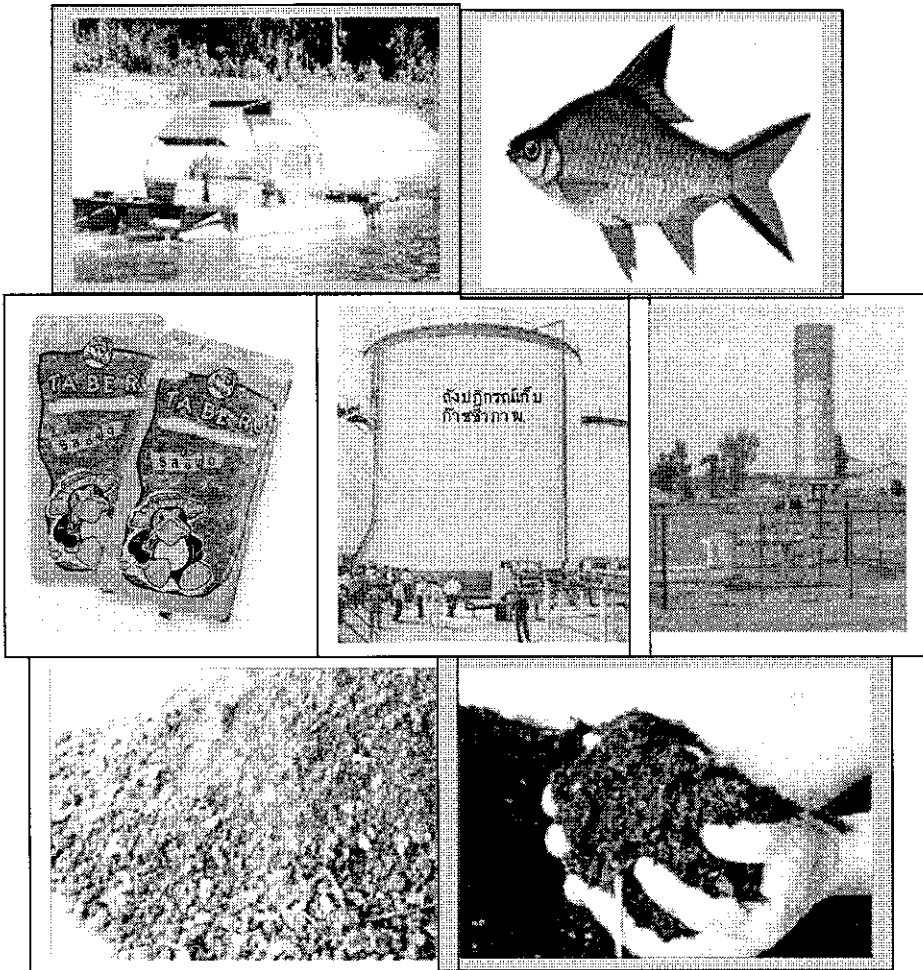


เอกสารประกอบการเรียน  
การจัดการของเสียจากฟาร์มเลี้ยงสัตว์  
สาขาวิชา เทคโนโลยีการผลิตสัตว์  
สำนักวิชาเทคโนโลยีเกษตร



จัดทำโดย  
อาจารย์ สนั่น ตั้งสถิตย์  
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## คำนำ

เอกสารประกอบการเรียนการสอน รายวิชา การจัดการของเสียในฟาร์มเลี้ยงสัตว์ เกิดจากแรงจูงใจการเตรียมเอกสารการสอน เพื่ออำนวยความสะดวกในการจัดการเรียนการสอนให้แก่นักศึกษาสาขาเทคโนโลยีการผลิตสัตว์ สำนักวิชาเทคโนโลยีเกษตร เนื้อหาของเอกสารดังกล่าวส่วนใหญ่ได้มาจากการเรียบเรียง การแปล รวมทั้งประสบการณ์ของผู้เขียนที่เกี่ยวข้องในการจัดการของเสียที่เกิดขึ้น ซึ่งมีประโยชน์ในระดับพื้นฐาน เพื่อสร้างความเข้าใจเกี่ยวกับแนวทางในการจัดการของเสียที่เกิดขึ้นภายในฟาร์มเลี้ยงสัตว์ ซึ่งจะนำไปสู่การลดรายจ่ายจากการทำธุรกิจเกี่ยวกับฟาร์มเลี้ยงสัตว์ และนำไปสู่ระบบการจัดการสิ่งแวดล้อมที่ดีของกิจการการทำฟาร์มเลี้ยงสัตว์ต่อไปในอนาคต รวมทั้งแนวทางในการใช้ประโยชน์จากของเสียที่เกิดขึ้นด้วยวิธีการต่างๆ เอกสารดังกล่าวนี้สามารถใช้อ้างอิงได้บ้าง เพราะสูตรหรือสมการที่เกี่ยวข้องในส่วนของการคำนวณนั้นเป็นสมการที่ใช้กันทั่วไป

ความดีของเอกสารประกอบการเรียนการสอนชุดนี้ หากมีประการใด ผู้เขียนขอมอบคุณงามความดีดังกล่าวให้แก่คณาจารย์ที่ประสพวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้ามาโดยตลอด ส่วนข้อบกพร่องของเอกสารประกอบการเรียนชุดนี้ข้าพเจ้าขอน้อมรับด้วยความยินดีอย่างยิ่ง จักได้นำไปใช้ปรับปรุงต่อไปในคราวต่อไป

อาจารย์สนั่น ตั้งสถิตย์

2 มีนาคม 2548

## สารบัญ

	หน้า
คำนำ	ก
สารบัญ	ข
สารบัญตาราง	ค
สารบัญรูป	ง
บทที่ 1 มลสารและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม	1
บทที่ 2 เคมีสิ่งแวดล้อมเบื้องต้น	8
บทที่ 3 วิศวกรรมศาสตร์เคมีเบื้องต้น	36
บทที่ 4 เทคนิคการเก็บรวบรวม การควบคุมของเสีย	60
บทที่ 5 การจัดการของเสีย	78
บทที่ 6 น้ำใต้ดินเบื้องต้น	89
บทที่ 7 กระบวนการบำบัดน้ำเสียเบื้องต้น	119
บทที่ 8 กระบวนการหมักทำปุ๋ย	146
บทที่ 9 การผลิตก๊าซชีวภาพ	173
บทที่ 10 การผลิตปลา	205
บทที่ 11 การผลิตสาหร่าย	223
บทที่ 12 การใช้ประโยชน์จากของเสีย	245
บรรณานุกรม	249

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 แสดงสมการในการคำนวณหาเวลาในการย่อยสลายมสสารด้วยถังปฏิกริยาแบบต่างๆ ที่อันดับของปฏิกริยาเท่ากับศูนย์, หนึ่ง และสอง ตามลำดับ	48
4.1 ขนาดช่องว่างของไม้พะเนงที่ใช้แยกของแข็งออกจากของเสียผสม	71
4.2 ค่า TLW, APU และ APE ของสัตว์แต่ละประเภท	73
4.3 ค่า APE ของสัตว์แต่ละประเภท	74
4.4 แสดงองค์ประกอบของธาตุต่างๆ ที่มีอยู่ในของเสียแต่ละประเภท	75
5.1 ข้อแตกต่างของระบบการจัดการของเสียในอดีตและในอนาคต	79
6.1 ระดับความสูงของน้ำภายในท่อแคปปีลารี ในวัสดุของชั้นน้ำไหลย้อนกลับ	92
6.2 ค่าความพรุนของวัสดุต่างชนิด และขนาดต่างๆ	96
6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวของวัสดุกับขนาดของอนุภาค ซึ่งเป็นรูปทรงกลม	97
6.4 ระยะเวลาความสูงของการไหลย้อนของวัสดุต่างชนิด ที่มีขนาดต่างๆ	99
6.5 ค่า Hydraulic Conductivity ของวัสดุประเภทต่างๆ	100
7.1 ข้อดีและข้อเสีย ของกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบใช้อากาศและไม่ใช้อากาศ	124
7.2 การเปลี่ยนแปลงของสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ที่ใช้อากาศและจุลินทรีย์ที่ไม่ใช้อากาศ	124
7.3 แหล่งสารเคมีที่นิยมใช้ในการปรับสภาพน้ำเสีย เพื่อบำบัดด้วยวิธีทางชีวภาพ	125
8.1 แสดงค่าอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนของของเสียชนิดต่างๆ	151
8.2 ผลของค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน กับระยะเวลาที่ทำการหมัก	152
8.3 แสดงสูตร โมเลกุลของของเสียชนิดต่างๆ	163
9.1 เทคโนโลยีกระบวนการหมักทำปุ๋ยและกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ	175
9.2 ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ	176
9.3 ลักษณะของจุลินทรีย์ที่ผลิตกรดอินทรีย์	180
9.4 ลักษณะของจุลินทรีย์ที่ผลิตก๊าซมีเทน	181
9.5 สารพิษต่างๆ ที่มีผลต่อจุลินทรีย์ที่ผลิตก๊าซชีวภาพ	184
9.6 คุณสมบัติของตัวกลางที่ใช้ในถังหมักแบบครึ่งฟิล์มหรือแบบแพคเบด	188
9.7 ข้อดีและข้อเสียของถังหมักแบบมีการใช้ตัวกลาง	189
9.8 ข้อดีและข้อเสียของระบบการผลิตก๊าซชีวภาพ ด้วยถังหมักแบบยูเอเอสบี	190
9.9 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นที่ระยะเวลาในการกักเก็บ และค่าการระสารถอินทรีย์ต่างๆ	190
9.10 หลักเกณฑ์ในการออกแบบระบบผลิตก๊าซชีวภาพด้วยจุลินทรีย์แขวนลอยอยู่ในน้ำเสีย	191

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
9.11 ค่าการละลายของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำ	199
10.1 ประสิทธิภาพของการเลี้ยงปลาด้วยของเสีย	206
10.2 ค่าการละลายของออกซิเจนในน้ำ ที่อุณหภูมิต่างๆ	209
10.3 หลักเกณฑ์ในการออกแบบระบบการเลี้ยงปลา	218
11.1 ประเภทของสาหร่าย ซึ่งแบ่งตามชนิดของเมล็ดสี	224
11.2 แฟกเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณเกี่ยวกับค่าความร้อนของแสงแดด หรือแสงเทียม	232
11.3 ค่าความร้อนเทียบเท่า	233
11.4 ค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนค่าอุณหภูมิ	234
11.5 หลักเกณฑ์ในการออกแบบระบบการผลิตสาหร่ายแบบรวดเร็ว	235
11.6 ความเข้มข้นตัวของแสงแดด ที่อุณหภูมิต่างๆ	236
11.7 องค์ประกอบของสาหร่ายแต่ละชนิด เมื่อเทียบกับถั่วเหลือง	241
11.8 องค์ประกอบทางเคมีของสาหร่าย หน่วยกรัมต่อน้ำหนักแห้งของสาหร่ายที่ผลิตได้ 100 กรัม	241
11.9 ปริมาณ โปรตีนทั้งหมดที่มีอยู่ในสาหร่าย ในระบบการผลิตสาหร่ายแบบรวดเร็ว	242

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงอัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับศูนย์	12
2.2 แสดงอัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง	12
2.3 แสดงอัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับสอง	12
2.4 แสดงอัตราเร็วของปฏิกิริยาในค่า Log	12
2.5 แสดงประเภทของสมการสมดุลสาร	15
2.6 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าบีโอดีของการย่อยสลายสารอินทรีย์ในของเสียชนิดต่างๆ	21
2.7 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าบีโอดีของน้ำเสียที่ยังไม่ผ่านกระบวนการตกตะกอน และที่ผ่านกระบวนการตกตะกอน ที่เวลาต่างๆ	21
2.8 ผลของค่าคงที่ของอัตราเร็วของปฏิกิริยา ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ชนิดเดียวกัน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากัน	25
2.9 Larger Lake with a Non-Conservative Pollutant	28
3.1 แสดงถึงปฏิกิริยาแบบกะ กรณี ก. ไม่มีไบโกว น ข. มีไบโกว น	36
3.2 แสดงถึงปฏิกิริยาแบบท่อไหล	37
3.3 แสดงถึงปฏิกิริยาแบบกวนสมบูรณ์	38
3.4 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของมลสารที่ความยาวต่างๆ ภายในถึงปฏิกิริยาแบบท่อไหล	41
3.5 แสดงการต่อถึงปฏิกิริยาแบบอนุกรม ซึ่งมีการป้อนน้ำเสียเข้าถังใบที่ 1	49
3.6 แสดงการต่อถึงปฏิกิริยาแบบอนุกรม ที่มีการป้อนน้ำเสียเข้าถังปฏิกิริยาทุกใบ	49
3.7 แสดงการต่อถึงปฏิกิริยาแบบอนุกรม จำนวน 2 ใบ ที่มีการดึงเอาน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว กลับมาใช้ใหม่ที่มีการดึงเอาน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่ เข้าที่ถังปฏิกิริยา	50
3.8 แสดงการต่อถึงปฏิกิริยาแบบอนุกรมที่มีการดึงเอาน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วกลับมาใช้ใหม่ เข้าที่ถังปฏิกิริยาใบที่ 1, ใบที่ 2 และใบที่ 3 ตามลำดับ	50
3.9 แสดงการต่อถึงปฏิกิริยาแบบขนาน	51
3.10 แสดงถึงปฏิกิริยาที่มีการกวนสมบูรณ์ และมีการดึงเอาน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว กลับมาใช้ใหม่	54

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 แสดงการควบคุมของเสียที่เกิดขึ้นในฟาร์มเลี้ยงสัตว์ของต่างประเทศ	63
4.2 กระบวนการควบคุมของเสีย การบำบัดของเสียและการนำของเสียไปใช้ประโยชน์	64
4.3 การควบคุม การจัดการของเสียที่ใช้ในงานจริงแบบง่าย	65
4.4 ระบบการระบายของเสีย แบบแยกสถานะของเสียแบบอัตโนมัติ	
ก. ระบบไซฟอน	69
ข. ระบบถังกระดก	69
ค. ระบบแยกของแข็งและของเหลว	69
4.5 แสดงระบบการเก็บรวบรวมของเสีย	
ก. ระบบท่อ	70
ข. หลุมแคบและลึก	70
ค. หลุมรูปตัวยู	70
ง. หลุมกว้าง	70
5.1 ลำดับความสำคัญของการจัดการสิ่งแวดล้อม	80
5.2 ประโยชน์ที่เกิดขึ้นจากการจัดการของเสีย	81
5.3 รากฐานของความสำเร็จในการจัดการสิ่งแวดล้อม	82
5.4 การลดปริมาณของเสีย	83
6.1 วงจรอุทกวิทยา	90
6.2 ประเภทของชั้นน้ำใต้ดิน	91
6.3 ประเภทของชั้นน้ำใต้ดินในชั้นน้ำอึดตัว	93
6.4 ความสัมพันธ์ของน้ำและชั้นวัสดุ ในรูปแบบต่างๆ	94
6.5 องค์ประกอบของชั้นวัสดุ	95
6.6 แสดงการไหลซึมขึ้นไปในแนวตั้งของน้ำภายในท่อเล็ก	98
6.7 การทดลองเกี่ยวกับการไหลของน้ำภายในกระบอกทราย ของคาร์ซี	101
6.8 การหาทิศทางการไหลของชั้นน้ำใต้ดิน	
ก. แนวราบ	105
ข. แนวตั้ง	105
6.9 การไหลของชั้นน้ำใต้ดินแบบอิสระ	106
6.10 รายละเอียดของตัวอย่างที่ 6.5	110

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.11 การเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดินในชั้นน้ำจำกัด ตามแนวรัศมีไปยังบ่อเจาะน้ำใต้ดิน	112
7.1 แสดงกระบวนการบำบัดน้ำเสีย	119
7.2 แสดงโรงงานกำจัดน้ำเสียห้วยขวาง กรุงเทพมหานคร	121
7.3 แสดงแผนผังของกระบวนการบำบัดน้ำเสียทั่วไป	123
7.4 จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องในระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ	128
7.5 แสดงสาหร่ายในกลุ่ม Eucaryotic Algae	131
7.6 โปรโตซัวประเภทต่างๆ ที่พบเห็นในระบบบำบัดน้ำเสีย	132
7.7 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบ Oxidation ponds	134
7.8 กลไกของระบบบำบัดน้ำเสียแบบ Oxidation ponds	134
7.9 การต่อระบบบำบัดน้ำเสียแบบ	
ก. อนุกรม	135
ข. ขนาน	135
ค. ผสมผสาน	135
7.10 เครื่องเติมอากาศแบบลอยที่ผิวน้ำ	136
7.11 เครื่องเติมอากาศแบบเป่าอากาศ	136
7.12 หัวจ่ายอากาศแบบโดม	136
7.13 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบ Aerated Lagoons	137
8.1 แสดงตัวอย่างของกระบวนการนำเอาปุ๋ยอินทรีย์ที่ได้จากกระบวนการหมักกลับมาใช้ใหม่	156
8.2 แสดงผลกระทบของอัตราการนำเอาปุ๋ยอินทรีย์กลับมาใช้ใหม่ในรูปของน้ำหนักแห้ง ที่ค่าของของแข็งต่างๆ เพื่อให้มีค่าของแข็งในของเสียผสม เท่ากับ 40%	158
8.3 แสดงให้เห็นถึงผลกระทบของอัตราการนำเอาปุ๋ยอินทรีย์กลับมาใช้ใหม่ในรูปของน้ำหนักเปียก ที่ค่าของของแข็งต่างๆ เพื่อให้มีค่าของแข็งในของเสียผสม เท่ากับ 40%	159
9.1 การนำเอาก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ	173
9.2 ขั้นตอนของปฏิกิริยาการผลิตก๊าซชีวภาพ	178
9.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ ที่อุณหภูมิต่างๆ ภายในถังหมัก	182
9.4 แสดงถังหมักแบบต่างๆ	186



## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
9.5 ส่วนประกอบภายในถังหมัก	
ก. ถังหมักแบบดั้งเดิม	187
ข. ถังหมักแบบ 2 ชั้นตอน	187
9.6 ตัวกลางแบบต่างๆ ที่นิยมใช้	
ก. Pall Ring	188
ข. Cross Flow Media	188
ค. Tubular Media	188
9.7 แสดงกระบวนการแยกก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์แบบก๊าซแห้ง	200
9.8 แสดงการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ด้วยสารละลายต่าง	201
9.9 รูปร่างอุปกรณ์ของท่อที่นำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์ในด้าน	
ก. การหุงต้ม	202
ข. การให้แสงสว่าง	202
10.1 วิธีการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้ง	205
10.2 ห่วงโซ่อาหารที่มีการสะสมมลสาร	207
10.3 ตัวอย่างของการสะสมมลสารภายในห่วงโซ่อาหาร	207
10.4 การเปลี่ยนแปลงของปัจจัยต่าง ภายในระบบการเลี้ยงปลา	208
10.5 การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดเป็นด่างและค่าการละลายของออกซิเจนในน้ำ ที่เวลาต่างๆ	210
10.6 ความเข้มข้นของแอมโมเนียและแอมโมเนียม ที่ความเป็นกรดเป็นด่างต่าง	211
10.7 น้ำหนักโดยเฉลี่ยของปลาที่เวลาการเลี้ยงต่างๆ	211
10.8 น้ำหนักโดยเฉลี่ยของปลาและน้ำหนักโดยรวมของปลา ที่ความหนาแน่นต่างๆ	212
10.9 ผลของความเป็นกรดเป็นด่างต่อความเข้มข้นของอิออนของสารประกอบไฮโดรเจนซัลไฟด์	213
10.10 การเปลี่ยนแปลงค่าการกักเก็บน้ำเสียที่ค่าการละลายของออกซิเจนต่างๆ	215
10.11 แสดงตัวอย่างการจัดวางเรียงบ่อเลี้ยงปลา	217
11.1 แสดงประเภทของสาหร่ายที่อยู่ในกลุ่มของพืช	223
11.2 กลไกของปฏิกิริยาการสังเคราะห์ของสาหร่าย และการนำสาหร่ายไปใช้ประโยชน์	225
11.3 การเปลี่ยนแปลงปริมาณสาหร่าย สารอาหาร ของกระบวนการผลิตสาหร่าย	227

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
11.4 ถึงผลิตสาหร่ายแบบรวดเร็ว	
ก. ภาพแปลน	228
ข. ภาพตัด	228
11.5 เปรียบเทียบปริมาณของสาหร่ายที่เกิดขึ้น ในระบบการผลิตสาหร่ายด้วย	
ก. ระบบที่ 1	230
ข. ระบบที่ 2	230
ค. ระบบที่ 3	230
11.6 ค่าอัตราการผลิตสาหร่าย ที่ความเข้มของแสงแดดอิมิตัว เท่ากับ $86.4 \text{ g-cal/cm}^2\text{-day}$ และ $28.8 \text{ g-cal/cm}^2\text{-day}$ ตามลำดับ	236
11.7 กระบวนการทำให้ตะกอนลอย	240

# บทที่ 1

## มลสารและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Environmental Pollutants & Their Effects.)

ในอดีตปัญหาสิ่งแวดล้อมที่มาจากกิจกรรมภาคการเกษตร เช่น การทำปุ๋ยคอกหรือการเพาะปลูก เป็นต้น ยังไม่รุนแรงและชนิดของมลภาวะที่เกิดขึ้นยังไม่มากเท่ากับในปัจจุบัน นอกจากนี้แล้วมลสารที่ปะปนอยู่ในสิ่งแวดล้อมในสมัยนั้น ยังมีไม่มากและเกิดการย่อยสลายได้โดยธรรมชาติจากสภาพของสิ่งแวดล้อม เช่น แสงแดด อุณหภูมิ น้ำฝน เป็นต้น รวมทั้งจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติ ซึ่งมีอยู่ในดิน น้ำ และอากาศ กลไกของกระบวนการปรับสภาพแวดล้อมที่ปนด้วยมลสารให้กลับสู่สภาพเดิมของธรรมชาติ จากปัจจัยที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น เรียกว่า การทำให้บริสุทธิ์ด้วยตนเอง หรือการฟอกตัวเอง (Self Purification)

ปัญหาสิ่งแวดล้อมในปัจจุบันเกิดจากสาเหตุหลักหลายประการ เช่น การใช้ทรัพยากรธรรมชาติอย่างไม่คุ้มค่าหรือใช้ทรัพยากรธรรมชาติอย่างไม่ประหยัด การไม่รู้จักใช้หรือนำเอาเทคโนโลยีที่มีอยู่มาใช้ให้เกิดประโยชน์อย่างถูกต้องและเหมาะสมกับสภาพแวดล้อม เป็นต้น ทำให้มลสารเกิดการปนเปื้อนในห่วงโซ่อาหาร (Food Chain) และสายใยอาหาร (Food Web) ส่งผลกระทบต่อทั่วโลกต่อไปโดยเฉพาะอย่างยิ่งผลิตภัณฑ์อาหารที่มีการส่งออกไปจำหน่ายทั่วโลก ดังนั้นหากมนุษย์ยังคงไม่ตระหนักในผลกระทบจากปัญหาสิ่งแวดล้อมจากการกระทำของมนุษย์เองหรือจากความรู้เท่าไม่ถึงการณ์ โดยเน้นเฉพาะความต้องการเพิ่มผลผลิตเท่านั้น โดยไม่ให้ความสนใจในผลกระทบจากปัญหาสิ่งแวดล้อมดังกล่าว ย่อมส่งผลกระทบในอนาคต ทำให้มนุษย์ขาดแคลนทรัพยากรธรรมชาติ เช่น แหล่งน้ำ ทรัพยากรป่าไม้ สัตว์ป่า ดินเสื่อมโทรม เป็นต้น และทำให้คุณภาพชีวิตของมนุษย์เกิดการเปลี่ยนแปลงไป ดังที่เป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมอยู่ในปัจจุบัน

การทำความเข้าใจเกี่ยวกับชนิดของมลสารที่ก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม เช่น มลภาวะทางน้ำ อากาศ ขยะและของเสียอันตราย เป็นต้น รวมทั้งวิธีบำบัดของเสียด้วยวิธีต่างๆ เช่น การทำปุ๋ยหมัก การผลิตก๊าซชีวภาพจากของเสียในส่วนของสารอินทรีย์ การนำเอาของเสียมาใช้ในการเป็นสารอาหารในการเลี้ยงสาหร่ายเกลียวทอง หรือสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน เป็นต้น รวมทั้งการทำความเข้าใจในกฎหมายสิ่งแวดล้อมหรือศัพท์เทคนิคด้านสิ่งแวดล้อม ย่อมทำให้เกิดระบบการจัดการของเสียของธุรกิจด้านเกษตรกรรมมีการพัฒนาและเป็นที่ยอมรับของทั่วโลก

ตามพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อม ปี พ.ศ. 2535 ได้กล่าวถึงคุณภาพของน้ำทิ้ง ซึ่งเป็นน้ำที่ผ่านการบำบัดมาแล้ว สามารถปล่อยลงสู่แหล่งสาธารณะได้ โดยไม่ก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมต่อแหล่งน้ำดังกล่าว ซึ่งใช้บังคับน้ำเสียที่มาจากทั้งจากภาคอุตสาหกรรม จากชุมชน และจากภาคเกษตรกรรม ดังนั้นการทำความเข้าใจในคำจำกัดความทางด้านสิ่งแวดล้อม ย่อมช่วยให้เกิดความเข้าใจเกี่ยวกับปัญหาสิ่งแวดล้อมได้มากขึ้นรวมทั้งวางแนวทางในการจัดการของเสีย และชนิดของมลภาวะที่เกิดขึ้นได้อย่างถูกต้องและเหมาะสม ตัวอย่างคำจำกัดความด้านสิ่งแวดล้อมที่สำคัญควรแสดงไว้ย่อหน้าข้างล่าง

### คำจำกัดความด้านสิ่งแวดล้อมที่สำคัญ

1. **สิ่งแวดล้อม (Environments)** หมายถึง สิ่งต่างๆ ที่มีคุณสมบัติทั้งทางด้านกายภาพ เคมี และชีวภาพ ทั้งที่มนุษย์เป็นผู้สร้างขึ้นมา และเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ โดยอยู่รอบๆ ตัวมนุษย์ และสิ่งมีชีวิต
2. **มลภาวะ (Pollution)** หมายถึง สภาพหรือสภาวะของสิ่งแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไป จากการปนเปื้อนของมลสารหรือของเสีย หรือเกินความสามารถของธรรมชาติในการบำบัดด้วยกลไกทางธรรมชาติ ตัวอย่างของมลภาวะ ได้แก่ มลภาวะทางอากาศ ซึ่งเป็นมลภาวะที่เกิดจากไอหรือก๊าซปนเปื้อนในอากาศ มลภาวะทางน้ำซึ่งเป็นการปนเปื้อนของมลสารที่สามารถเกิดการละลายในแหล่งน้ำ หรือแขวนลอยอยู่ในแหล่งน้ำ มลภาวะทางด้านขยะและของเสียอันตรายซึ่งเกิดจากการปนเปื้อนของขยะและของเสียอันตรายในสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะอย่างยิ่งขยะอันตรายที่มาจากโรงพยาบาล และสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการผลิตของภาคอุตสาหกรรม เป็นต้น
3. **แหล่งกำเนิดมลภาวะ (Source of Pollution)** หมายถึง ที่มาหรือต้นกำเนิดที่ทำให้เกิดมลภาวะด้านต่างๆ ซึ่งส่งผลกระทบต่อทรัพยากรธรรมชาติ แหล่งกำเนิดมลภาวะ แบ่งออกได้ 3 ประเภท คือ จากบ้านเรือนหรือชุมชน ภาคอุตสาหกรรมหรือนิคมอุตสาหกรรมหรือเขตอุตสาหกรรม และภาคเกษตรกรรม เป็นต้น
4. **คุณภาพสิ่งแวดล้อม (Environmental Quality)** หมายถึง คุณภาพหรือคุณลักษณะของธรรมชาติ อันได้แก่ สัตว์ พืช และทรัพยากรธรรมชาติ ต่างๆ ที่มนุษย์เป็นผู้สร้างขึ้นมา เพื่อประโยชน์ในการดำรงชีพของประชาชนและความอุดมสมบูรณ์สืบไปของมนุษยชาติ
5. **มาตรฐานคุณภาพสิ่งแวดล้อม (Environmental Standard)** หมายถึง ค่าหรือหลักเกณฑ์ที่ใช้ในการกำหนดคุณภาพสิ่งแวดล้อม มาตรฐานคุณภาพสิ่งแวดล้อมของประเทศไทย ได้แก่ มาตรฐานคุณภาพน้ำ มาตรฐานคุณภาพอากาศ มาตรฐานด้านเสียง และมลภาวะด้านต่างๆ การกำหนดมาตรฐานด้านสิ่งแวดล้อมขึ้นมา เพื่อดำรงไว้ซึ่งการส่งเสริม และรักษาสภาพแวดล้อม
6. **ผลกระทบสิ่งแวดล้อม (Environmental Impact)** หมายถึง ปรากฏการณ์ของมลภาวะด้านต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากการกระทำของมนุษย์แล้วส่งผลกระทบต่อมนุษย์และทรัพยากรธรรมชาติ

7. **มลสารหรือมลพิษ (Pollutants)** หมายถึง สิ่งที่ปะปนอยู่ในธรรมชาติ แล้วมีส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้านต่างๆ มลสารที่เกิดการปะปนอยู่ในสิ่งแวดล้อม มีอยู่ 3 รูปแบบ คือ ของแข็ง ของเหลว และไอหรือก๊าซ
8. **ของเสีย (Waste)** หมายถึง ของเสีย วัตถุอันตราย และมลสารอื่นๆ รวมทั้งกาก ตะกอน หรือสิ่งตกค้าง ซึ่งถูกปล่อยทิ้งจากแหล่งกำเนิดมลสาร หรือมลพิษ หรือจากสิ่งต่างๆ ที่มีอยู่ในธรรมชาติ แล้วก่อให้เกิดผลกระทบต่อ หรือก่อให้เกิดอันตรายต่อคุณภาพสิ่งแวดล้อม สุขภาพอนามัย และคุณภาพชีวิตของประชาชนและให้หมายความถึง รังสี ความร้อน แสง เสียง กลิ่น และความสั่นสะเทือน หรือเหตุรำคาญอื่นๆ ที่เกิดหรือถูกปล่อยออกจากแหล่งกำเนิดมลสาร หรือมลภาวะอีกด้วย
9. **มลภาวะทางน้ำและน้ำเสีย (Water Pollution and Wastewater Pollution)** หมายถึง มลภาวะที่เกิดจากของเสีย ซึ่งอาจละลายอยู่ในน้ำหรือแขวนลอยอยู่ในน้ำ แล้วส่งผลให้แหล่งน้ำมีความสกปรก ทำให้น้ำดังกล่าวไม่เหมาะสมในการนำไปใช้ประโยชน์โดยตรง
10. **ระบบบำบัดน้ำเสีย (Wastewater Treatment System)** หมายถึง เทคโนโลยีหรือวิทยาการความรู้ทางด้านวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ ที่เกี่ยวข้องในการป้องกันหรือลดความรุนแรงของมลภาวะทางน้ำ ทำให้น้ำที่ผ่านกระบวนการบำบัดขั้นตอนของระบบบำบัดน้ำเสียมีคุณภาพได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้ง และสามารถทำการปล่อยลงแหล่งน้ำสาธารณะได้
11. **มลภาวะทางอากาศ (Air Pollution)** หมายถึง ของเสียที่เกิดจากการใช้ความร้อนในการเผาไหม้หรือการสันดาป ของเสียที่ปะปนอยู่ในธรรมชาติ อาจอยู่ในรูปของไอเสีย กลิ่นควัน ก๊าซ เขม่า ฝุ่น ละออง เถ้าถ่าน หรือมลสารอื่นๆ ที่มีสภาพเบาจนลอยอยู่ในบรรยากาศได้
12. **ของเสียจากสัตว์ (Animal Waste หรือ Livestock Waste)** หมายถึง ของเสียที่ปล่อยออกจากฟาร์มเลี้ยงสัตว์ โดยทั่วไปแล้วของเสียที่เกิดขึ้นในฟาร์มเลี้ยงสัตว์แบ่งออกได้ 2 ส่วน คือ ของแข็ง และของเหลว
13. **เคมีสิ่งแวดล้อม (Environmental Chemistry)** หมายถึง การใช้ความรู้ ความเข้าใจทางด้านเคมีหรือเคมีสิ่งแวดล้อม มาอธิบายการเปลี่ยนแปลงมลสารต่างๆ ที่มีอยู่ตามธรรมชาติ เพื่อนำมาซึ่งความเข้าใจในกลไกการเปลี่ยนแปลงของของเสีย แล้วนำข้อมูลที่ได้ดังกล่าวมาใช้ในการออกแบบระบบบำบัดของเสียได้อย่างเหมาะสม และถูกต้องตามหลักวิชาการ
14. **วิศวกรรมศาสตร์ (Chemical Reaction Engineering)** หมายถึง การใช้ความรู้ทางวิศวกรรมศาสตร์ ซึ่งกล่าวถึงอัตราเร็วของปฏิกิริยา เพื่อทำนายความเข้มข้นของสารที่เกิดการเปลี่ยนแปลง และความรู้ทางด้านเคมีสิ่งแวดล้อมมาทำเลือกระบบบำบัด ขนาดความจุของระบบบำบัดและเวลาที่ใช้ในการบำบัดของเสีย พร้อมทั้งทำการประเมินประสิทธิภาพของระบบบำบัดให้สอดคล้องกับหลักการทางวิชาการ และความเหมาะสมทางด้านเศรษฐศาสตร์อีกด้วย

15. การจัดการสิ่งแวดล้อม (Environmental Management) หมายถึง กระบวนการหรือแนวทางในการจัดการมลภาวะ ที่เกิดขึ้นในสิ่งแวดล้อม เพื่อให้สภาพแวดล้อมกลับคืนสู่สภาพที่ดีเหมือนเดิม หรือเกิดของเสียน้อยที่สุดเท่าที่เป็นไปได้
16. ค่าบีโอดี (Biochemical Oxygen Demand : BOD) หมายถึง ปริมาณออกซิเจนที่จุลินทรีย์ต้องการใช้ ในการย่อยสลายสาหร่ายอินทรีย์ที่มีอยู่ในของเสีย โดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอินทรีย์ ที่มีอยู่ในน้ำเสียที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ซึ่งมีการควบคุมอุณหภูมิด้วย เป็นเวลา 5 วัน และทำการเก็บตัวอย่างไว้ในที่มืด

มลภาวะที่เกิดขึ้นในปัจจุบันนี้มีหลายรูปแบบ ซึ่งเกิดขึ้นเพราะสิ่งแวดล้อมมีการปนเปื้อนด้วยมลสารเกินความสามารถของธรรมชาติในการบำบัดให้กลับมาเหมือนเดิม มลภาวะด้านสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นในภาคเกษตรกรรม มักเกิดจากฟาร์มสัตว์การทำเกษตรกรรม ปัญหาสิ่งแวดล้อมที่มาจากการทำฟาร์มเลี้ยงสัตว์ส่วนใหญ่แล้วมาจากของเสียจากสัตว์ ที่ขาดวิธีการรวบรวมของเสียที่ดี เพื่อนำไปบำบัดต่อไปหรือวิธีบำบัดของเสียดังกล่าวก่อนปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อม รวมทั้งขาดการควบคุมและการจัดการที่ดีในการทำฟาร์มไม่ว่าเป็นเรื่องของอาหารที่ให้มากเกินไปเกินความต้องการของสัตว์ ก่อให้เกิดปัญหาการตกค้างของอาหารภายในโรงเรือน

มลภาวะทางน้ำ (Water Pollution หรือ Wastewater Pollution) ส่งผลทำให้ทรัพยากรน้ำตามธรรมชาติมีปริมาณลดลง เช่น แหล่งน้ำดิบในอ่างเก็บน้ำ แม่น้ำลำคลอง เป็นต้น ทำให้แหล่งน้ำที่ใช้ในการผลิตน้ำสะอาดหรือน้ำประปามีปริมาณลดลงไป หรือเกิดการขาดแคลนแหล่งน้ำในการผลิตน้ำประปา โดยทั่วไปแล้วของเสียจากสัตว์ที่ปล่อยลงไปในแหล่งน้ำธรรมชาติ มักอยู่ในรูปสารอินทรีย์ทำให้สาหร่ายและสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในน้ำนำไปใช้ประโยชน์ได้ ก่อให้เกิดปัญหาหมอกควันทางน้ำ ทำให้เกิดปรากฏการณ์การเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วของสาหร่ายและพืชน้ำอย่างรวดเร็ว ซึ่งเรียกว่า ยูโทรฟิเคชัน “Algae Bloom หรือ Eutrofication” โดยปรากฏการณ์ดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากในน้ำเสีย มีปริมาณธาตุไนโตรเจน หรือ ฟอสฟอรัสในน้ำเสียมากเกินไปเกินความสามารถในการฟื้นฟูสภาพน้ำด้วยกลไกทางธรรมชาติได้

มลภาวะทางขยะและของเสียอันตราย (Solid and Hazardous Waste Pollution) ในกระบวนการจัดการเกี่ยวกับการกสิกรรม ซึ่งมักมีการใช้สารเคมีเพื่อเร่งการเจริญเติบโต เพิ่มสีของเนื้อสัตว์หรือเพื่อประโยชน์ด้านอื่นๆ ของเสียที่ก่อให้เกิดมลภาวะทางขยะจากภาคเกษตรกรรม ได้แก่ พลาสติก กระจก กระจก กระป๋อง แก้ว ขวดน้ำ เป็นต้น และจากของเสียอันตราย ได้แก่ ภาชนะที่บรรจุยาฆ่าแมลง สารเคมี สารละลายที่มีฤทธิ์เป็นกรดหรือด่าง ผลิตภัณฑ์ที่หมดอายุการใช้งาน เป็นต้น

**มลภาวะทางอากาศ (Air Pollution)** ในบางพื้นที่ของการทำการกสิกรรม อาจมีการรวบรวมของเสียที่เกิดจากการกสิกรรมหรือปุ๋ยสัตว์ มากองรวมกันแล้วทำการเผาหรือให้ความร้อน ทำให้พื้นที่บริเวณดังกล่าวมีเถ้าถ่านของมูลสัตว์ที่หลงเหลืออยู่ ซึ่งนำไปสู่ปัญหาดินเสื่อมสภาพจากกระบวนการเผาและยังทำให้บรรยากาศปนเปื้อนด้วยควัน

**มลภาวะทางดิน (Soil Pollution)** การใช้สารเคมีในภาคเกษตรกรรม พบว่า มีการใช้ในปริมาณมากเกินไป ความต้องการ เมื่อเกิดการทำความสะอาดโรงเรือนด้วยน้ำ ทำให้สภาพของดินที่อยู่ในบริเวณที่น้ำชะล้างโรงเรือนไหลผ่าน มีการสะสมของสารเคมีมากขึ้นเรื่อยๆ ทำให้เกิดมลภาวะทางดิน จากสารเคมีดังกล่าวที่เกิดการตกค้างอยู่ในดินหรือแทรกตัวอยู่ในชั้นดิน ทำให้ดินเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นดินเปรี้ยว ดินเค็ม

**ดินเปรี้ยว (Acid Soil)** หมายถึง ดินที่มีแร่ธาตุต่างๆ ซึ่งมีฤทธิ์เป็นกรด ปะปนอยู่ในหน้าดิน หรือชั้นดินเป็นจำนวนมาก ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของสารอินทรีย์หรืออินทรีย์วัตถุ เช่น ชิวมีส ซากพืช ซากสัตว์ เป็นต้น หรือจากการใช้สารเคมีหรือปุ๋ยเคมีมากเกินไปความต้องการ หรือใช้ติดต่อกันเป็นระยะเวลานาน

**ดินเค็ม (Saline Soil)** หมายถึง ดินที่มีเกลือแร่ ซึ่งมีฤทธิ์เป็นด่างปะปนอยู่ในหน้าดินหรือชั้นดินอยู่ในปริมาณมาก จนทำให้เกิดคราบของเกลือแร่ ดินชนิดนี้มักพบเห็นได้ทั่วไปตามแถบชายฝั่งทะเล

แหล่งกำเนิดมลภาวะ แบ่งได้ 3 ประเภท คือ ชุมชนหรือบ้านเรือน ภาคอุตสาหกรรม และภาคเกษตรกรรม ซึ่งปัญหาสิ่งแวดล้อมจากแหล่งกำเนิดมลภาวะแต่ละแหล่งมีความแตกต่างกัน ขึ้นกับชนิดของมลภาวะที่ปะปนอยู่ในสิ่งแวดล้อม

**จากชุมชนหรือบ้านเรือน (Domestic Source)** ของเสียที่เกิดขึ้นจากแหล่งกำเนิดชนิดนี้ แบ่งออกได้ 2 ส่วน คือ น้ำหรือน้ำเสีย ซึ่งเป็นสิ่งที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมการใช้น้ำภายในบ้านเรือน หรือชุมชน เช่น การอาบน้ำชำระร่างกาย การทำความสะอาด เป็นต้น ขยะและของเสียอันตราย เช่น พลาสติก ขวด แก้ว กระจก สารเคมีหรือยาฆ่าแมลง กระจาย เป็นต้น

**จากภาคอุตสาหกรรม หรือนิคมอุตสาหกรรม (Industrial Source หรือ Industrial Estate)** ของเสียที่เกิดขึ้นในภาคอุตสาหกรรมมีความแตกต่างกันค่อนข้างมาก ขึ้นกับชนิดของสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรม ปัญหาที่เกิดขึ้นจากแหล่งกำเนิดชนิดนี้ค่อนข้างรุนแรงเมื่อเทียบกับแหล่งกำเนิดของเสียแหล่งอื่น

จากภาคเกษตรกรรม (Agriculture Source) ของเสียที่เกิดขึ้นในภาคเกษตรกรรม ส่วนใหญ่แล้วเป็น สารเคมีที่ใช้ในการเพิ่มผลผลิต การควบคุมการทำลายผลผลิตจากแมลงและสัตว์อื่นๆ รวมทั้งจากการเผา ป่า แทนการไถกลบ ทำให้สภาพของหน้าดินมีความอุดมสมบูรณ์น้อยลงไปและจากการสังเกตพฤติกรรม การใช้สารเคมีในภาคเกษตรกรรม มักพบว่ามีการใช้ในปริมาณมากเกินไปเกินความต้องการใช้ ทำให้สารเคมี ตกค้างในพื้นที่ทำการเกษตร หรือจากการทำความสะอาดโรงเรือน ซึ่งเกิดการไหลไปยังแหล่งน้ำที่อยู่ใน บริเวณใกล้เคียง หรือการตกค้างในหน้าดินหรือชั้นดิน

ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการใช้สารเคมี หรือการใช้อาหารเสริมที่มากเกินไปเกินความต้องการในกิจกรรมด้าน การเกษตร ทำให้เกิดมลภาวะตามมา เช่น มลภาวะทางน้ำ มลภาวะทางดิน ทางอากาศ กลิ่น เป็นแหล่ง เพาะพันธุ์ของแมลงชนิดต่างๆ เป็นต้น



## แบบฝึกหัดเพิ่มความเข้าใจ

1. ให้ทำการรวบรวมปัญหาที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมการเลี้ยงสัตว์ พร้อมทั้งอธิบายสาเหตุปัญหาดังกล่าวว่าทำให้เกิดปัญหาดังกล่าวได้อย่างไร พร้อมทั้งให้เสนอแนวทางในการป้องกัน เพื่อลดมลภาวะที่เกิดจากปัญหาที่รวบรวมได้
2. อยากทราบว่ากฎข้อบังคับตามพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาสิ่งแวดล้อม ปีพุทธศักราช 2535 ควบคุมไปถึงฟาร์มเลี้ยงสัตว์ชนิดใดบ้าง และขนาดฟาร์มเลี้ยงสัตว์ขนาดใดบ้าง
3. ให้ยกตัวอย่างของฟาร์มเลี้ยงสัตว์ภายในประเทศไทยที่มีระบบบำบัดของเสีย พร้อมทั้งให้แจกแจงว่าระบบบำบัดของเสียดังกล่าว ช่วยลดมลภาวะด้านใดบ้าง เพราะเหตุใด
4. ให้สรุปแนวทางในการรณรงค์ เพื่อลดการใช้สารเคมีในกิจกรรมภาคเกษตรกรรมมา 1-2 ตัวอย่าง และแนวทางดังกล่าวช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมด้านใดได้บ้าง
5. ยกตัวอย่างแนวทางในการลดปัญหามลภาวะทางน้ำที่เกิดขึ้นจากการเลี้ยงสุกรมา 1 ตัวอย่าง พร้อมทั้งอธิบายแนวทางดังกล่าวมาด้วยว่าช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมได้อย่างไรบ้าง
6. อยากทราบว่าแนวทางในการนำแอมูลสุกรมามบำบัดด้วยระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ จนกระทั่งได้ก๊าซชีวภาพเกิดขึ้น ช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมในด้านใดบ้าง คิดว่าก๊าซชีวภาพที่ได้นั้นมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมหรือไม่ เพราะเหตุใด

## บทที่ 2

### เคมีสิ่งแวดล้อมเบื้องต้น

#### (Introduction to the basic of Environmental Chemistry)

การทำธุรกิจเกี่ยวกับฟาร์มเลี้ยงสัตว์ เช่น ฟาร์มสุกร แกะ แพะ นกกระจอกเทศ เป็นต้น สิ่งที่ได้มีอยู่สองลักษณะคือ ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการขาย และของเสียที่เกิดขึ้น ของเสียที่เกิดขึ้นภายในฟาร์มเลี้ยงสัตว์ อาจเป็นของเสียที่ขับถ่ายจากร่างกายสัตว์หรือของเสียที่มาจากเศษอาหารที่เหลือ หรือน้ำที่ล้างโรงเรือนของเสียที่จากการเลี้ยงสัตว์แยกได้ 2 ส่วน คือ มูลสัตว์และปัสสาวะของสัตว์ ปัญหาที่พบเห็นเสมอในฟาร์มเลี้ยงสัตว์ขนาดเล็กและขนาดกลาง คือ เรื่องกลิ่น เพราะขาดระบบรวบรวมของเสียและระบบบำบัดของเสีย เนื่องจากผู้ประกอบการยังไม่ให้ความสำคัญเกี่ยวกับเรื่องดังกล่าวมากนัก

มลสารที่มีอยู่ในของเสียเกิดการเปลี่ยนแปลง 2 ลักษณะ คือ การเปลี่ยนแปลงทางเคมีและทางชีวเคมี สำหรับการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของมลสารในของเสีย มักเกิดจากการที่สภาพแวดล้อมเปลี่ยนแปลงไป เช่น ความเป็นกรดเป็นด่าง อุณหภูมิ ความชื้นหรือน้ำฝน เป็นต้น ทำให้มลสารที่มีอยู่ในของเสียเกิดการเปลี่ยนแปลงไปหรือถูกย่อยสลายไปบางส่วน ซึ่งเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว สำหรับตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบไนโตรเจนที่มีอยู่ในของเสียเป็นก๊าซแอมโมเนีย ก๊าซแอมโมเนียม ไนไตรต์ และไนเตรท ตามลำดับ

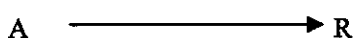
การทำความเข้าใจเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของของเสียทางเคมี มีความสำคัญมากในการประเมินความรุนแรงในการเปลี่ยนแปลงสารดังกล่าวจากสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนไป ซึ่งจะทำให้ทราบแนวทางในการควบคุมปัญหาสิ่งแวดล้อมทำได้ดีขึ้น นอกจากนี้แล้วการทราบคุณลักษณะของของเสียแต่ละชนิดจากฟาร์มเลี้ยงสัตว์แต่ละแห่ง ย่อมช่วยให้แนวทางในการจัดการของเสียมีความเหมาะสมยิ่งขึ้น ซึ่งอาจหาได้จากฉลากที่ติดข้างภาชนะที่ใส่สารเคมีที่เรียกว่า Material Substance Data Sheet หรือเรียกย่อว่า MSDS

ส่วนมลสารที่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมี เกิดจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในของเสียดังกล่าว ซึ่งมีอยู่ในธรรมชาติหรือเติมลงไปของเสียดังกล่าว เมื่อของเสียเกิดการย่อยสลายไปโดยจุลินทรีย์ ทำให้ได้ของเสียที่อยู่ในสภาพที่เสถียรมากยิ่งขึ้น กล่าวคือ มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยลง จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงทางปฏิกิริยาชีวเคมีแบ่งได้ 3 ประเภท คือ แบคทีเรีย โปรโตซัว และสาหร่าย แต่สิ่งมีชีวิตที่มีบทบาทสำคัญในการย่อยสลายมลสารหรือของเสีย คือ แบคทีเรีย

ความรู้ที่มีความจำเป็นเพื่อเรียนรู้เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงมลสารทางด้านเคมีและทางชีวเคมี ได้แก่ ความรู้ทางเคมี ซึ่งใช้อธิบายผลของการเปลี่ยนแปลงของมลสารที่มีอยู่ต่อสิ่งแวดล้อมและยังกล่าวถึง อัตราเร็วของการเปลี่ยนแปลง (การย่อยสลาย) มลสารที่ตกค้างในสิ่งแวดล้อม เพื่อใช้ทำนายความเข้มข้นของของเสียจากสัตว์ เมื่อเวลาผ่านไปและค่าคงที่ของการย่อยสลายมลสาร และใช้ในการออกแบบระบบบำบัดของเสีย ตลอดจนลดปัญหาสิ่งแวดล้อม และวางแนวทางในการแก้ไขปัญหาสิ่งแวดล้อมในระยะยาวต่อไป

เมื่อปัญหาสิ่งแวดล้อมเกิดขึ้นจากกิจกรรมภายในฟาร์มเลี้ยงสัตว์ ควรเก็บข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของเสียดังกล่าว เช่น องค์ประกอบของของเสีย ความเข้มข้นของของเสีย และชนิดของของเสียที่เกิดขึ้นแต่ละช่วงเวลา เป็นต้น ข้อมูลเบื้องต้นดังกล่าวจะช่วยให้การวางแผนการจัดการของเสียได้อย่างถูกต้องและเหมาะสมกับฟาร์มเลี้ยงสัตว์ นำไปสู่การจัดการของเสียอย่างต่อเนื่องได้รวมทั้งอาจนำไปการพัฒนาแบบยั่งยืน (Sustainable Development) ซึ่งเป็นการพัฒนาที่ก่อให้เกิดความเจริญก้าวหน้าทั้งทางด้านธุรกิจและสิ่งแวดล้อม

สมมติว่าการเปลี่ยนแปลงของของเสียในกระบวนการเลี้ยงสัตว์เกิดขึ้นจากของเสียชนิดหนึ่ง คือ สาร A เมื่อของเสียดังกล่าวเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีหรือทางชีวเคมี ทำให้ได้สารผลิตภัณฑ์ใหม่ขึ้นมา คือ สาร R สมการการเปลี่ยนแปลงของสาร A กลายเป็นสาร R เขียนได้ดังสมการข้างล่าง



อัตราเร็วของการเปลี่ยนแปลงหรืออัตราเร็วของการย่อยสลายของสารตั้งต้น เป็นดังสมการที่ 2.1 จะมีค่าลดลงไปเรื่อยๆ จนกระทั่งไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาผ่านไป เครื่องหมายหน้าสมการที่ 2.1 จึงมีค่าเป็นลบ และอัตราการเปลี่ยนแปลงสารผลิตภัณฑ์ เป็นดังสมการที่ 2.2 มีค่าเพิ่มขึ้นจนอาจจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาผ่านไปเช่นกัน เครื่องหมายหน้าสมการที่ 2.2 จึงมีค่าเป็นบวก อัตราการเปลี่ยนแปลงของของเสียและผลิตภัณฑ์มีค่าเท่ากัน ต่างกันที่เครื่องหมายเท่านั้น

$$\left. \begin{aligned} -r_A &= -\frac{dC_A}{dt} \\ &= k * C_A^n \end{aligned} \right\} \dots 2.1$$

$$\left. \begin{aligned} r_R &= \frac{dC_R}{dt} \\ &= k * C_R^n \end{aligned} \right\} \dots 2.2$$

เมื่อ  $-r_A$  หรือ  $-\frac{dC_A}{dt}$  คือ อัตราการย่อยสลายของสารตั้งต้น หรือสาร A  
หน่วยความเข้มข้นต่อเวลา

$r_R$ หรือ $+\frac{dC_R}{dt}$	คือ	อัตราการสร้างผลิตภัณฑ์ หรือสาร R หน่วยความเข้มข้นต่อเวลา
$C_A$	คือ	ความเข้มข้นของสาร A ที่เหลืออยู่ เมื่อเวลาผ่านไป $t$ นาที หรือวินาที หรือชั่วโมง หน่วยความเข้มข้น
$k$	คือ	ค่าคงที่ของอัตราการย่อยสลายสารของเสีย หรือค่าคงที่ของอัตราการสร้างผลิตภัณฑ์ หน่วยของค่า $k$ ขึ้นอยู่กับชนิดของอันดับปฏิกิริยาเคมี หรือปฏิกิริยาชีวเคมี แยกได้ดังนี้ ค่า $n$ เท่ากับ ศูนย์ ค่า $k$ มีหน่วยเป็นหน่วยความเข้มข้นต่อเวลา ค่า $n$ เท่ากับ หนึ่ง ค่า $k$ มีหน่วยเป็นหน่วยต่อเวลา ค่า $n$ เท่ากับ สอง ค่า $k$ มีหน่วยเป็นหน่วยต่อความเข้มข้นต่อเวลา
$n$	คือ	อันดับของปฏิกิริยาการย่อยสลายของเสีย หรือปฏิกิริยาการสร้างผลิตภัณฑ์ ในทางเคมีหรือทางชีวเคมี โดยทั่วไปแล้ว อันดับของปฏิกิริยาเคมีหรือชีวเคมีมีค่าตั้งแต่ศูนย์ขึ้นไป อาจมีเป็นจำนวนเต็มหรือเศษส่วน อย่างไรก็ตามในระบบบำบัดของเสีย อันดับของปฏิกิริยาเคมีหรือปฏิกิริยาชีวเคมี มีค่าเท่ากับหนึ่ง

สมการที่ 2.1 และสมการที่ 2.2 เป็นสมการพื้นฐานที่อธิบายการเปลี่ยนแปลงของของเสียหรือผลิตภัณฑ์ภายในระบบที่พิจารณา ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการออกแบบระบบบำบัดของเสียในขั้นตอนอื่นๆ ต่อไป

**สมการการย่อยสลายของเสีย** การย่อยสลายของเสียขึ้นกับปัจจัยสิ่งแวดล้อมและคุณลักษณะของเสีย ที่เกิดการเปลี่ยนแปลง เช่น ชนิดของอันดับปฏิกิริยาเคมี องค์ประกอบของของเสีย ถึงปฏิกิริยาที่ใช้ อุณหภูมิ ภายในระบบ รูปแบบของการป้อนของเสียเข้าระบบบำบัด เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วสมการแสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารที่อยู่ในระบบมักพิจารณาในรูปของการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้นมากกว่าผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น เพราะการวัดความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่เปลี่ยนแปลงทำได้ง่ายและมีความสะดวกมากกว่าการวัดความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ ซึ่งมักมีความยุ่งยากในการวัดความเข้มข้นที่แท้จริง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อกลไกการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้นมีหลายขั้นตอน อาจทำให้ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์แต่ละขั้นตอนของการเปลี่ยนแปลงที่วัดได้ อาจมีความผิดพลาดเกิดขึ้นได้

ในที่นี้จะกล่าวถึงสมการการย่อยสลายของเสียที่อันดับศูนย์ อันดับหนึ่ง และอันดับสอง โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้น ซึ่งเริ่มต้นจากสมการที่ 2.1 ส่วนอันดับการย่อยสลายของเสียที่ไม่ใช่อันดับที่กล่าวมาแล้วในข้างต้นสามารถหาได้โดยวิธีการเดียวกัน สำหรับแนวทางการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์ก็มีแนวทางในการศึกษาในลักษณะเดียวกัน โดยเริ่มต้นจากสมการที่ 2.2 แทน

### 1. เมื่ออันดับของปฏิกิริยาเท่ากับศูนย์ ( $n = 0$ )

จากสมการที่ 2.1 สมการการย่อยสลายของเสีย เมื่ออันดับของปฏิกิริยาเท่ากับศูนย์ เป็นดังสมการ 1\*

$$\begin{aligned} -\frac{dC_A}{dt} &= k * C_A^0 \\ &= k * 1 \\ &= k \\ -dC_A &= k * dt \quad \dots 1* \end{aligned}$$

ทำการอินทิเกรตสมการอนุพันธ์สมการที่ 1\* จากเวลาเริ่มต้น ( $t$  เท่ากับ 0) ไปจนถึงเวลาที่พิจารณา ( $t$  เท่ากับ  $t$ ) และที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของมลสาร ( $C$  เท่ากับ  $C_{A0}$ ) จนถึงความเข้มข้นของมลสารที่เหลืออยู่ที่เวลาสิ้นสุด ( $C$  เท่ากับ  $C_A$ ) เป็นดังสมการที่ 2.3

$$C_{A0} - C_A = k * t \quad \dots 2.3$$

### 2. เมื่ออันดับของปฏิกิริยาเท่ากับหนึ่ง ( $n = 1$ )

จากสมการที่ 2.1 สมการการย่อยสลายของเสีย เมื่ออันดับของปฏิกิริยาเท่ากับหนึ่ง เป็นดังสมการ 2\*

$$\begin{aligned} -\frac{dC_A}{dt} &= k * C_A^1 \\ &= k * C_A \\ -\frac{dC_A}{C_A} &= k * dt \quad \dots 2* \end{aligned}$$

ทำการอินทิเกรตสมการอนุพันธ์สมการที่ 2\* จากเวลาเริ่มต้น ( $t$  เท่ากับ 0) ไปจนถึงเวลาที่พิจารณา ( $t$  เท่ากับ  $t$ ) และที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของมลสาร ( $C$  เท่ากับ  $C_{A0}$ ) จนถึงความเข้มข้นของมลสารที่เหลืออยู่ที่เวลาสิ้นสุด ( $C$  เท่ากับ  $C_A$ ) เป็นดังสมการที่ 2.4

$$C_A = C_{A0} * e^{(-k * t)} \quad \dots 2.4$$

### 3. เมื่ออันดับของปฏิกิริยาเท่ากับสอง ( $n = 2$ )

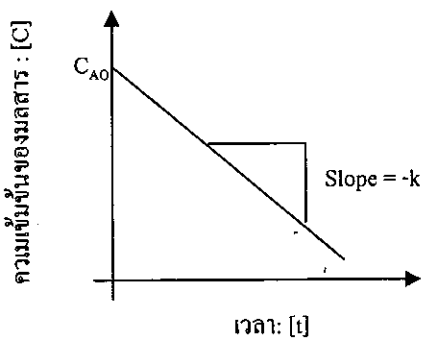
จากสมการที่ 2.1 สมการการย่อยสลายของเสีย เมื่ออันดับของปฏิกิริยาเท่ากับสอง เป็นดังสมการ 3\*

$$\begin{aligned} -\frac{dC_A}{dt} &= k * C_A^2 \\ -\frac{dC_A}{C_A^2} &= k * dt \quad \dots 3* \end{aligned}$$

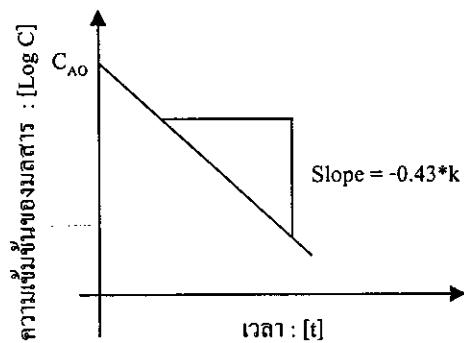
ทำการอินทิเกรตสมการอนุพันธ์สมการที่ 3\* จากเวลาเริ่มต้น (t เท่ากับ 0) ไปจนถึงเวลาที่พิจารณา (t เท่ากับ t) และที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของมลสาร (C เท่ากับ  $C_{A0}$ ) จนถึงความเข้มข้นของมลสารที่เหลืออยู่ที่เวลาสิ้นสุด (C เท่ากับ  $C_A$ ) เป็นดังสมการที่ 2.5

$$\frac{1}{C_A} - \frac{1}{C_{A0}} = k * t \quad \dots 2.5$$

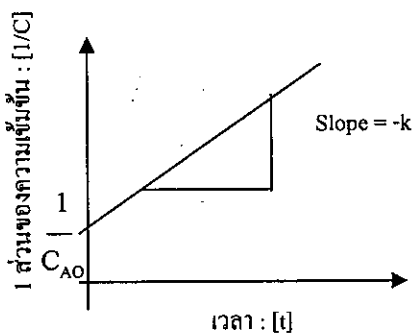
การหาสมการการย่อยสลายของเสียที่อันดับต่างๆ ของปฏิกิริยาการย่อยสลาย มีอยู่ 2 วิธี คือ การใช้สมการที่ 2.3 หรือสมการที่ 2.4 หรือสมการที่ 2.5 และการเขียนกราฟ (Graphical Method) โดยกราฟดังกล่าวประกอบด้วยแกนนอน ซึ่งแทนใช้เวลาที่ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลง และแกนตั้ง ใช้แทนความเข้มข้นของมลสารที่เหลืออยู่ที่เวลาต่างๆ ซึ่งเป็นไปดังรูปที่ 2.1 ถึง 2.3 การตรวจสอบอันดับของปฏิกิริยาการย่อยสลายของเสียว่าเป็นไปตามความสัมพันธ์ของสมการที่ 2.3 จนถึงสมการที่ 2.5 ทำได้โดยเขียนกราฟล็อกการิทึม โดยที่แกนนอน แทนความเข้มข้นในรูปของล็อกการิทึม และแกนตั้ง แทนอัตราเร็วของปฏิกิริยาในรูปของล็อกการิทึมฐานสิบ กราฟที่ได้มีลักษณะดังรูปที่ 2.4



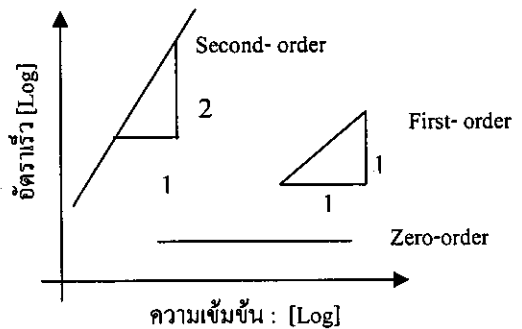
รูปที่ 2.1 แสดงอัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับศูนย์



รูปที่ 2.2 แสดงอัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง



รูปที่ 2.3 แสดงอัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับสอง



รูปที่ 2.4 แสดงอัตราเร็วของปฏิกิริยาในค่า Log

การทำสมดุลมวลสารของมลสารหรือของเสียที่ปะปนอยู่ในสิ่งแวดล้อม มีความสำคัญอย่างยิ่งในการวิเคราะห์หาปริมาณของมลสารบางอย่างที่ไม่ได้ทำการวัด หรือไม่สามารถทำการวัดค่าการเปลี่ยนแปลงของมลสารภายในระบบที่พิจารณาอยู่ (Control Volume) จึงต้องอาศัยกฎเกณฑ์ทางธรรมชาติที่เรียกว่า กฎการอนุรักษ์มวลสาร (Law of Conservative of Mass) ซึ่งกล่าวว่า “มวลสารไม่มีการสูญหายไปจากระบบ เพียงแต่มีการเปลี่ยนแปลงไปเท่านั้น” เพื่อให้สะดวกในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงมลสารในระบบที่พิจารณา มักนิยมใช้สมมติฐานข้างล่างประกอบการพิจารณาหาสมการสมดุลมวลสารรอบระบบที่กำลังพิจารณา เพื่อทำการหาค่าอื่นของของเสียที่ต้องการทราบในระบบ

สมมติฐานในการทำสมดุลมวลสาร คือ

1. ผลรวมทั้งหมดในรูปของอัตราการไหลเชิงมวลของมลสารที่เข้าสู่ระบบ และผลรวมทั้งหมดของมลสารในรูปเชิงมวลที่ออกจากระบบ มีค่าเท่ากัน
2. ไม่มีการสูญเสียเนื่องจากความร้อนหรือจากระบวนการไล่ความชื้น ซึ่งทำให้น้ำที่มีอยู่ในของเสียเกิดการระเหยออกไปจากของเสีย
3. เกิดการผสมกันอย่างทั่วถึง หรือเป็นเนื้อเดียวกันภายในระบบ หรืออาจกล่าวได้ว่าเนื้อสารของของเสียภายในระบบไม่มีความแตกต่างกัน (Homogeneous)
4. ปฏิกิริยาเคมีหรือชีวเคมี ซึ่งทำให้ของเสียเกิดการเปลี่ยนแปลงไป เกิดขึ้นภายในระบบเท่านั้น

สมการสมดุลมวลสารทั่วไป เขียนได้ดังสมการที่ 2.6

$$\left. \begin{aligned} \sum \text{อัตราการสะสม} &= \sum \text{อัตราการไหลเข้า} - \sum \text{อัตราการไหลออก} - \sum (\text{อัตราการย่อยสลาย}) \\ &\text{หรือ} + \sum (\text{อัตราการสร้าง}) \end{aligned} \right\} \dots 2.6$$

สมการที่ 2.6 เป็นสมการสมดุลของมลสารที่มีอยู่ในสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของมลสารที่อยู่ในระบบปิดเท่านั้น ค่าที่ได้จากสมการที่ 2.6 ซึ่งเป็นการคิดต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของเสีย

การวัดปริมาณของเสียสามารถวัดในรูปของน้ำหนัก บางครั้งอาจวัดในรูปของปริมาตร ไม่ว่าจะเป็นการวัดของเสียในรูปแบบใดก็ตาม สามารถเปลี่ยนค่าปริมาณของของเสียในรูปหนึ่งไปเป็นอีกรูปแบบหนึ่งได้ เช่น ของเสียที่ทำการวัดในรูปของน้ำหนักไปเป็นปริมาตรของของเสียได้ด้วยสมการที่ 2.7 ซึ่งเป็นสมการที่พัฒนามาจากความสัมพันธ์ที่ว่า “ความหนาแน่นเท่ากับ มวลต่อปริมาตร” เมื่อทำการจัดรูปสมการของปริมาตรในรูปของความหนาแน่นและหารด้วยเวลา จะได้อัตราการไหลเชิงมวลของมลสารหรือของเสีย ดังสมการที่ 2.7

$$\rho = \frac{m}{V}$$

หรือ  $m = \rho * V$

จากสมการข้างบน เมื่อทำการหาในเทอมของการเปลี่ยนแปลงต่อหนึ่งหน่วยเวลา จะได้ว่า

$$m/t = \rho * V/t$$

$$\dot{m} = \rho * Q \quad \dots 2.7$$

ศัพท์เทคนิคหรือคำจำกัดความที่สำคัญในการทำสมดุลมวลสารแสดงไว้ในคำอธิบายข้างล่าง ซึ่งมีความสำคัญต่อการทำสมดุลมวลสารของมลสาร ของระบบที่พิจารณาลักษณะต่างๆ

### ศัพท์เทคนิค

1. **สภาวะคงตัวหรือสภาวะคงที่ (Steady State)** หมายถึง สภาวะที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณใดๆ ภายในระบบ เมื่อเวลาผ่านไปนานเท่าใดก็ตาม หรืออาจกล่าวว่าเป็นสภาวะที่ไม่เกิดการสะสมของมลสาร หรือเกิดการเปลี่ยนแปลงการของมลสารที่มีอยู่ในระบบ เมื่อระยะเวลาผ่านไปนาน มีค่าเท่ากับศูนย์ แสดงว่าเทอมของอัตราการสะสมภายในระบบ เท่ากับศูนย์
2. **สภาวะไม่คงตัว (Non-Steady State)** หมายถึง สภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณใดๆ ภายในระบบ เมื่อเวลาผ่านไปนานเท่าใดก็ตาม หรืออาจกล่าวว่าเป็นสภาวะที่เกิดการสะสมของมลสาร หรือเกิดการลดลงของมลสารที่มีอยู่ในระบบ เมื่อระยะเวลาผ่านไปนานเท่าใดก็ตาม แสดงว่าเทอมอัตราการสะสมภายในระบบ มีค่าไม่เท่ากับศูนย์
3. **สภาวะไม่มีการเปลี่ยนแปลง (Conservative)** หมายถึง สภาวะที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี หรือทางชีวเคมี ของมลสารที่มีอยู่ในระบบหรือที่ใส่ลงไปในระบบ แสดงว่า เทอมอัตราการย่อยสลายหรือเทอมอัตราการสร้าง มีค่าเท่ากับศูนย์
4. **สภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลง (Non-conservative)** หมายถึง ถึง สภาวะที่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี หรือทางชีวเคมี ของมลสารที่มีอยู่ในระบบหรือที่ใส่ลงไปในระบบ แสดงว่า เทอมอัตราการย่อยสลายหรือเทอมอัตราการสร้าง มีค่าไม่เท่ากับศูนย์

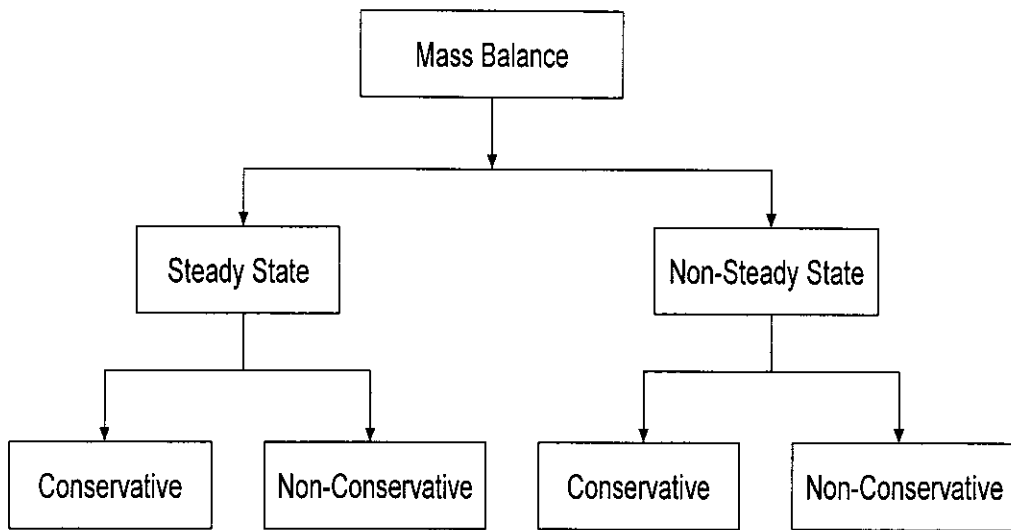
สมการสมดุลมวลสารของมลสารที่เกิดการเปลี่ยนแปลง แบ่งได้ 2 ประเภท ตามสภาวะที่มีการสะสมหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงมลสารภายในระบบ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.5

1. สมการสมดุลมวลสารที่สภาวะคงตัว (Steady State Condition)
2. สมการสมดุลมวลสารที่สภาวะไม่คงตัว(Non-Steady State Condition)

นอกจากนี้แล้วในสมการสมดุลมวลสารของแต่ละประเภท ยังแบ่งย่อยได้อีก 2 ประเภท ตามสภาพการเปลี่ยนแปลงของมลสารว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงไปหรือไม่ คือ

1. สมการสมดุลมวลสารที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง (Conservative Condition)
2. สมการสมดุลมวลสารที่มีการเปลี่ยนแปลง (Non-Conservative Condition)





รูปที่ 2.5 แสดงประเภทของสมการสมดุลสาร

โดยทั่วไปแล้วการเปลี่ยนแปลงของมวลสารที่มีต่อสภาพแวดล้อม มักเป็นไปในลักษณะของสภาวะคงที่ และไม่มีการเปลี่ยนแปลงของมวลสารเกิดขึ้นภายในระบบ สมการที่ 2.6 อาจเขียนใหม่สำหรับกรณีนี้ได้ดังสมการที่ 2.8

$$\Sigma \text{อัตราการไหลเข้า} = \Sigma \text{อัตราการไหลออก} \quad \dots 2.8$$

ความรู้พื้นฐานที่นำมาใช้ในการสมการสมดุลมวลสาร ได้แก่

1. ความรู้พื้นฐานทางเคมีที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเคมีและถึงปฏิกิริยา ช่วยให้การเขียนสมการการย่อยสลายของเสียไม่เป็นการย่อยสลายทางเคมีหรือชีวเคมีในทางทฤษฎี ทำให้ทราบค่าสารที่เกี่ยวข้องในกระบวนการย่อยสลายของเสียดังกล่าว เป็นต้น เมื่อทราบค่าพื้นฐานของการย่อยสลายของเสียดังกล่าวแล้วนำไปสู่การออกแบบระบบบำบัดของเสียต่อไปได้
2. ความรู้เกี่ยวกับแคลคูลัสเบื้องต้น เพื่อใช้ในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงของมวลสารเทียบกับเวลาว่ามีการเปลี่ยนแปลงไปมากน้อยเพียงใด ทำให้ทราบค่าอัตราเร็วของการย่อยสลายมวลสารหรืออัตราการสร้างผลิตภัณฑ์จากข้อมูลที่มีการเก็บรวบรวมเอาไว้ ช่วยให้การหาขนาดของระบบบำบัดง่ายขึ้น
3. การแปลงค่าของตัวแปรให้อยู่ในหน่วยเดียวกัน ทำได้โดยใช้ค่า แฟกเตอร์ของการเปลี่ยนหน่วย (Unit Conversions) ช่วยให้การหาค่าต่างๆ หรือทำการเปรียบเทียบค่าของพารามิเตอร์ต่างๆ ทำได้สะดวกและการวิเคราะห์ง่ายขึ้นด้วย
4. กลศาสตร์ของไหล (Fluid Mechanics) ช่วยให้การออกแบบระบบการรวบรวมของเสียว่าควรเป็นไปในลักษณะใด ช่วยให้การออกแบบอุปกรณ์ในการรวบรวมของเสียมีความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติ

ชนิดของสมดุลมวลสาร มีอยู่ 2 ประเภท ตามสภาพของมวลสารที่พิจารณา คือ

1. สมการสมดุลองค์ประกอบ (Component Balances) เป็นการพิจารณาสมการสมดุลมวลสารขององค์ประกอบแต่ละชนิดที่อยู่ในสารตั้งต้นจนกระทั่งกลายเป็นผลิตภัณฑ์ ส่วนประกอบของมวลสารที่พิจารณาส่วนใหญ่แล้ว สำหรับฟาร์มเลี้ยงสัตว์มักเป็นการพิจารณาว่าส่วนประกอบของอาหารที่ใช้เลี้ยงสัตว์ว่ามีอะไรบ้างเท่าใด เช่น ของแข็ง ความชื้นหรือน้ำ (ของเหลว) ซึ่งถือว่าเป็นสารตั้งต้นของการเปลี่ยนแปลงของของเสียที่มีอยู่ในระบบและผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นนั้นว่า ประกอบไปด้วยอะไรบ้าง ปริมาณเท่าใด เพราะฉะนั้นสมการสมดุลการหาปริมาณของมวลสารในลักษณะขององค์ประกอบ จึงมักเป็นการหาสมการสมดุลองค์ประกอบของของแข็งและความชื้นที่อยู่ในสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์
2. สมการสมดุลรวม (Overall Balances) เป็นการพิจารณาสมการสมดุลมวลสารตั้งแต่สารตั้งต้นไปจนได้ออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ ของเสียจากสัตว์สารตั้งต้นอาจได้แก่ อาหารสัตว์ เป็นต้น ส่วนผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการสมการสมดุล คือ ของเสียที่สัตว์ขับถ่ายออกมาและเศษอาหารที่เหลืออยู่ เป็นต้น จะเห็นว่าในการทำสมดุลรวมของมวลสาร จะไม่พิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของสารที่เกี่ยวข้องหรือที่เกิดการเปลี่ยนแปลง

ตัวอย่างที่ 2.1 ฟาร์มเลี้ยงสุกรแห่งหนึ่ง มีการเลี้ยงหมูจำนวนทั้งสิ้น 100 ตัว โดยให้อาหาร โดยเฉลี่ยวันละ 1.2 กิโลกรัมต่อหมู 1ตัว องค์ประกอบของอาหารที่ใช้เลี้ยงหมู แสดงไว้ในข้อมูลข้างล่าง

- โปรตีน เท่ากับ 50%
- ไขมัน เท่ากับ 30%
- รำข้าวและอื่นๆ เท่ากับ 20%

การเลี้ยงหมูของฟาร์มแห่งนี้ จะทำการจับหมูขายเมื่อทำการเลี้ยงเป็นเวลา 3 เดือน โดยจับขายทั้งหมด สมมติว่าหมูที่เลี้ยงนั้น ไม่มีหมูตัวใดตาย และในการให้อาหารแก่หมู มีการคำนวณอาหารให้เพียงพอต่อความต้องการของหมู จึงไม่มีเศษอาหารตกค้างภายในโรงเรือน อยากรทราบว่า

1. ปริมาณสารอาหารทั้งหมดที่ใช้เลี้ยงหมูจำนวนดังกล่าวในช่วงเวลา 3 เดือน มีค่ากี่กิโลกรัม
2. ปริมาณโปรตีนทั้งสิ้นที่หมูทั้งหมดได้รับจากอาหารที่ใช้เลี้ยง มีค่ากี่กิโลกรัมต่อวัน
3. เพื่อเป็นการลดต้นทุนในการเลี้ยงหมู เจ้าของฟาร์มได้นำเศษอาหารที่เหลือ ได้จากร้านอาหาร ซึ่งขายข้าวต้มเลือดหมู องค์ประกอบของเศษอาหารดังกล่าวมีโปรตีนอยู่ 10% ถ้าวางเศษอาหารดังกล่าวที่นำมาใช้ในการเลี้ยงหมู ช่วยลดปริมาณโปรตีนในอาหารเดิม ไปกี่กิโลกรัมต่อวัน

วิธีทำ สมมติว่า “การให้อาหารเลี้ยงสุกรของฟาร์มแห่งนี้ มีการให้อาหารเพียง 1 ครั้งใน 1 วัน”

1. จากความสัมพันธ์ที่ว่า

$$\left[ \begin{array}{l} \text{ปริมาณอาหาร} \\ \text{ที่ใช้เลี้ยงหมู} \\ \text{ทั้งสิ้น} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{l} \text{อัตราการให้อาหาร} \\ \text{แก่หมู จำนวน 1} \\ \text{ตัว ใน 1 วัน} \end{array} \right] * \left[ \begin{array}{l} \text{จำนวนหมู} \\ \text{ทั้งหมดที่ทำ} \\ \text{การเลี้ยง} \end{array} \right] * \left[ \begin{array}{l} \text{ระยะเวลาที่ทำ} \\ \text{การเลี้ยงหมู} \end{array} \right]$$

แทนค่าต่างๆ ที่ทราบค่าลงในความสัมพันธ์ข้างบน

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณสารอาหารทั้งสิ้น} &= \left[ \frac{1.2 \text{ กิโลกรัม}}{\text{ตัว-วัน}} \right] * \text{หมูจำนวน 100 ตัว} * \text{ระยะเวลา 30 วัน} \\ &= 3,600 \text{ กิโลกรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 2. \left[ \begin{array}{l} \text{ปริมาณโปรตีนทั้งหมด} \\ \text{ที่หมูได้รับใน 1 วัน} \end{array} \right] &= \% \text{ โปรตีนในอาหาร} * \text{อัตราการให้อาหาร} * \text{หมูทั้งสิ้น} \\ &= 50\% * \left[ \frac{1.2 \text{ กิโลกรัม}}{\text{ตัว-วัน}} \right] * \text{หมูจำนวน 100 ตัว} \\ &= 60 \text{ กิโลกรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 3. \left[ \begin{array}{l} \text{ปริมาณโปรตีนที่} \\ \text{ลดลงจากการใช้} \\ \text{เศษอาหาร ใน 1 วัน} \end{array} \right] &= \left[ \begin{array}{l} \% \text{ การลดลงใน} \\ \text{การใช้โปรตีน} \end{array} \right] * \left[ \begin{array}{l} \text{ปริมาณโปรตีน} \\ \text{ทั้งสิ้นในอาหาร} \end{array} \right] \\ &= 10\% * 60 \text{ กิโลกรัมต่อวัน} \\ &= 6 \text{ กิโลกรัมต่อวัน} \end{aligned}$$

คำตอบ 1. ปริมาณสารอาหารทั้งสิ้นที่ใช้เลี้ยงหมู เท่ากับ 3,600 กิโลกรัมในเวลา 3 เดือน

2. ปริมาณ โปรตีนทั้งสิ้นที่หมูได้รับแต่ละวัน เท่ากับ 60 กิโลกรัม

3. ปริมาณ โปรตีนที่ลดลงไป จากการใช้เศษอาหารในการเลี้ยงหมู เท่ากับ 6 กิโลกรัมต่อวัน

ตัวอย่างที่ 2.2 ฟาร์มเลี้ยงสุกรแห่งหนึ่ง มีหมูภายในโรงเรือนจำนวนทั้งสิ้น 100 ตัว อัตราการให้อาหารเท่ากับ 1.0 กิโลกรัมต่อวันต่อตัว เมื่อทำการเลี้ยงไปได้ประมาณ 10 วัน ปรากฏว่าหมูตายไป 10% ของจำนวนหมูที่เลี้ยง ทำการเลี้ยงต่อไปอีกระยะหนึ่ง จึงได้ขายเป็นพ่อพันธุ์ แม่พันธุ์ไป คิดเป็น 80% ของหมูที่เหลือ ซึ่งเลี้ยงรอด ส่วนหมูจำนวนที่เหลือส่งขายโรงฆ่าสัตว์ อยากรทราบว่า

1. ปริมาณสารอาหารที่ใช้ในการเลี้ยงหมู ในช่วง 10 วัน มีค่ากี่กิโลกรัม
2. จำนวนหมูที่จับส่งขายโรงฆ่าสัตว์มีจำนวนทั้งสิ้นกี่ตัว

วิธีทำ สมมติว่า

1. จำนวนครั้งในการให้อาหารใน 1 วัน เท่ากับ 1 ครั้ง
2. ไม่มีเศษอาหารเหลือจากการเลี้ยง

1. จากความสัมพันธ์ข้างล่าง

$$\left[ \begin{array}{c} \text{ปริมาณอาหาร} \\ \text{ที่ใช้เลี้ยงหมู} \\ \text{ทั้งสิ้น} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{c} \text{อัตราการให้อาหาร} \\ \text{แก่หมู จำนวน 1} \\ \text{ตัว ใน 1 วัน} \end{array} \right] * \left[ \begin{array}{c} \text{จำนวนหมู} \\ \text{ทั้งหมดที่ทำ} \\ \text{การเลี้ยง} \end{array} \right] * \left[ \begin{array}{c} \text{ระยะเวลาที่ทำ} \\ \text{การเลี้ยงหมู} \end{array} \right]$$

แทนค่าต่างๆ ที่ทราบค่าลงในความสัมพันธ์ข้างบน

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณสารอาหารทั้งสิ้น} &= \left[ \frac{1.0 \text{ กิโลกรัม}}{\text{ตัว-วัน}} \right] * \text{หมูจำนวน 100 ตัว} * \text{ระยะเวลา 10 วัน} \\ &= 1,000 \text{ กิโลกรัม} \end{aligned}$$

อาจจะหาคำตอบด้วยสมการสมดุลมวลสาร จะได้คำตอบเช่นเดียวกัน

จากสมการสมดุลมวลสาร ดังแสดงไว้ในสมการที่ 2.6

$$\sum \text{อัตราการสะสม} = \sum \text{อัตราการไหลเข้า} - \sum \text{อัตราการไหลออก} - \sum (\text{อัตราการย่อยสลาย}) \dots 2.6$$

ในที่นี้เทอมของอัตราการสะสมของอาหาร และอัตราการย่อยสลายสารอาหาร มีค่าเท่ากับศูนย์ และเทอมอัตราการกินอาหารของหมู ซึ่งถือว่าเป็นอัตราการไหลออกของสารอาหารในระบบการเลี้ยงหมู และอัตราการไหลเข้า คือ ปริมาณสารอาหารทั้งสิ้นที่ใช้ในการเลี้ยงหมู ในช่วงระยะเวลา 10 วัน

แทนค่าต่างๆ ที่ทราบค่าลงในสมการที่ 2.6

$$\text{จะได้ } 0 = \left[ \begin{array}{c} \text{ปริมาณอาหาร} \\ \text{ทั้งสิ้นในช่วง} \\ \text{10 วัน} \end{array} \right] - \left[ \frac{1.0 \text{ กิโลกรัม}}{\text{ตัว-วัน}} \right] * \text{หมูจำนวน 100 ตัว} * \text{ระยะเวลา 10 วัน} - 0$$

$$\left[ \begin{array}{c} \text{ปริมาณอาหาร} \\ \text{ทั้งสิ้นในช่วง} \\ 10 \text{ วัน} \end{array} \right] = \left[ \frac{1.0 \text{ กิโลกรัม}}{\text{ตัว-วัน}} \right] * \text{หมู จำนวน 100 ตัว} * \text{ระยะเวลา 10 วัน}$$

$$= 1,000 \text{ กิโลกรัม}$$

$$2. \text{จำนวนหมูที่เลี้ยงรอดในช่วง 10 วัน} = \% \text{การรอดตายในการเลี้ยงช่วง 10 วัน} * \left[ \begin{array}{c} \text{จำนวนหมูที่เลี้ยง} \\ \text{ในครั้งแรก} \end{array} \right]$$

$$= (1-10\%) * 100 \text{ ตัว}$$

$$= 90 \text{ ตัว}$$

$$\text{จำนวนหมูที่รอดตาย และขายเป็นพ่อพันธุ์แม่พันธุ์} = \% \text{การขายเป็นพ่อพันธุ์แม่พันธุ์} * \text{หมูที่รอดตาย}$$

$$= 80\% * 90 \text{ ตัว}$$

$$= 72 \text{ ตัว}$$

เพราะฉะนั้น

$$\text{จำนวนหมูที่เลี้ยงรอดในช่วง 10 วัน และนำส่งโรงฆ่าสัตว์} = \left[ \begin{array}{c} \text{จำนวนหมูที่} \\ \text{เลี้ยงรอด} \end{array} \right] - \left[ \begin{array}{c} \text{จำนวนหมูที่เป็น} \\ \text{พ่อพันธุ์ แม่พันธุ์} \end{array} \right]$$

$$= 90 \text{ ตัว} - 72 \text{ ตัว}$$

$$= 18 \text{ ตัว}$$

$$\text{หรือเปอร์เซ็นต์การส่งขายโรงฆ่าสัตว์} = (1-\% \text{การขายเป็นพ่อพันธุ์แม่พันธุ์})$$

$$= (1-80\%)$$

$$= 20\%$$

$$\text{จำนวนหมูที่ส่งขายโรงฆ่าสัตว์} = \% \text{การส่งขายโรงฆ่าสัตว์} * \text{จำนวนหมูที่เลี้ยงจนจำหน่ายได้}$$

$$= 20\% * 90 \text{ ตัว}$$

$$= 18 \text{ ตัว}$$

อาจจะหาคำตอบของปัญหานี้ด้วยการเริ่มต้นจากสมการสมดุลมวลสาร จะได้คำตอบเช่นเดียวกันกับวิธีดังกล่าวข้างต้น

จากสมการสมดุลมวลสาร สมการที่ 2.6

$$\sum \text{อัตราการสะสม} = \sum \text{อัตราการไหลเข้า} - \sum \text{อัตราการไหลออก} - \sum (\text{อัตราการย่อยสลาย}) \quad \dots 2.6$$

ในที่นี้เทอมของอัตราการสะสมทั้งหมด และอัตราการย่อยสลายของเสียทั้งหมด มีค่าเท่ากับศูนย์ และเทอมของอัตราการไหลเข้า เท่ากับปริมาณหมูทั้งสิ้นที่รอดตาย และอัตราการไหลออก เท่ากับปริมาณหมูที่จำหน่ายเป็นพ่อพันธุ์ แม่พันธุ์ และปริมาณหมูที่ส่งขายโรงฆ่าสัตว์ เมื่อแทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ 2.6 จะได้

$$0 = 90 \text{ ตัว} - 72 \text{ ตัว} - \text{ปริมาณหมูที่ส่งขายโรงฆ่าสัตว์} - 0$$

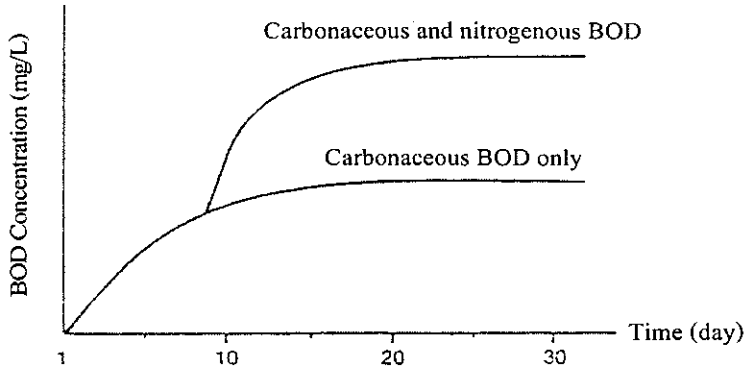
$$\text{เพราะฉะนั้น ปริมาณหมูที่ส่งขายโรงฆ่าสัตว์} = 90 \text{ ตัว} - 72 \text{ ตัว}$$

$$= 18 \text{ ตัว}$$

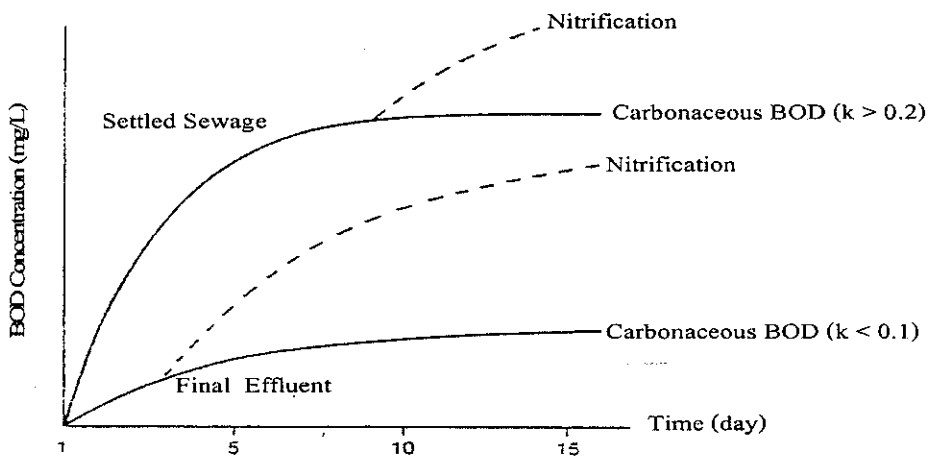
- คำตอบ 1. ปริมาณสารอาหารที่ใช้เลี้ยงหมูทั้งสิ้น เท่ากับ 1,000 กิโลกรัม  
 2. จำนวนหมูทั้งสิ้นที่ส่งขายโรงฆ่าสัตว์ เท่ากับ 18 ตัว

การวัดความสกปรกของน้ำเสียส่วนใหญ่แล้วเป็นการวัดในรูปของสารอินทรีย์ ซึ่งวัดในรูปของค่าบีโอดี กลไกของการย่อยสลายของเสียอันดับแรกเป็นการย่อยสลายสารประกอบคาร์บอน กระบวนการที่เกิดขึ้นเรียกว่า กระบวนการย่อยสลายสารประกอบคาร์บอน (Carbonization) ดังสมการที่ 2.9 จากนั้นจึงเป็นการย่อยสลายสารประกอบไนโตรเจน แม้ว่าในกระบวนการหลังนี้อาจมีสารประกอบคาร์บอนเหลืออยู่บ้าง กระบวนการนี้เรียกว่า การย่อยสลายสารประกอบไนโตรเจน (Nitrification) การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในรูปของสารประกอบคาร์บอนและไนโตรเจน เมื่อเวลาการย่อยสลายของเสียผ่านไปแสดงไว้ในรูปที่ 2.2 สำหรับแนวทางในการลดความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสียที่มีน้ำหนักรากกว่าน้ำ หรือมีค่าความหนาแน่นมากกว่าน้ำ นิยมทำการแยกออกจากน้ำเสียก่อนนำไปผ่านกระบวนการย่อยสลายหรือการบำบัดในขั้นตอนอื่นๆ ต่อไป ซึ่งเป็นกระบวนการบำบัดทางกายภาพ เช่น การตกตะกอน การไหลผ่านตะแกรง การกรอง เป็นต้น กระบวนการแบบง่ายในการปรับสภาพน้ำเสีย ทำได้โดยนำน้ำเสียที่บำบัดมาตกตะกอน จากนั้นนำเอาน้ำเสียที่อยู่เหนือตะกอนไปทำการบำบัดต่อไป เมื่อนำเอาน้ำเสียส่วนดังกล่าวมาหาค่าบีโอดีมีค่าเท่ากับค่าบีโอดีในน้ำเสียที่อยู่เหนือตะกอนถ้านำเอาส่วนของตะกอนที่แยกได้มาหาค่าบีโอดี ค่าบีโอดีในส่วนนี้มีค่ามาก เนื่องจากตะกอนในน้ำเสียที่มาจากฟาร์มเลี้ยงสัตว์มักเป็นตะกอนของสารอินทรีย์ จึงทำให้ค่าบีโอดีที่วัดได้มีค่ามากกว่าส่วนของน้ำเสียที่อยู่เหนือตะกอน ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.7

ในสภาพความเป็นจริงตามธรรมชาติ การย่อยสลายสารอินทรีย์โดยไม่ผ่านขั้นตอนที่ 1 พบเห็นได้น้อยมากหรือแทบจะไม่เกิดขึ้นเลย เพราะการย่อยสลายสารประกอบคาร์บอนเกิดได้ง่ายกว่ากระบวนการย่อยสลายสารประกอบไนโตรเจน และการย่อยสลายสารอินทรีย์ในขั้นตอนที่ 2 เกิดได้เฉพาะกับน้ำเสียที่มีส่วนประกอบของสารประกอบไนโตรเจนเท่านั้น

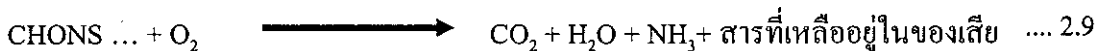


รูปที่ 2.6 การเปลี่ยนแปลงค่าบีโอดี ของการย่อยสลายสารอินทรีย์ในของเสียที่เวลาต่างๆ



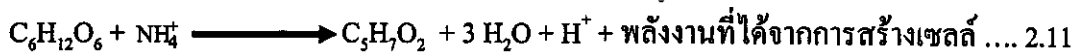
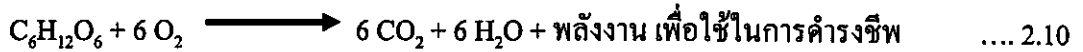
รูปที่ 2.7 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าบีโอดีของน้ำเสียที่ยังไม่ผ่านกระบวนการตกตะกอนและที่ผ่านกระบวนการตกตะกอน ที่เวลาต่างๆ

องค์ประกอบของสารอินทรีย์ในของเสียทั่วไป ประกอบด้วยสารประกอบคาร์บอน ไนโตรเจน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และสารอื่นๆ เขียนในรูปของสูตรโมเลกุลแบบง่ายได้ว่า CHONS เมื่อเกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ดังกล่าวเกิดขึ้น เป็นดังสมการที่ 2.9



ปริมาณออกซิเจนที่ใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ หรือการออกซิเดชันสารอินทรีย์ที่มีในของเสียเป็นดังสมการที่ 2.10 ค่าที่ได้จากการย่อยสลายจากสมการดังกล่าวเรียกว่า ค่าบีโอดี (Biochemical Oxygen Demand: BOD) ซึ่งเป็นสมการที่อธิบายกลไกการย่อยสลายของเสียทางชีวเคมี ปริมาณสารอินทรีย์ที่เกิดการย่อยสลายไปเป็นการคิดจากปริมาณของสารอินทรีย์ทั้งหมด ในช่วงเริ่มต้นทำการศึกษากการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารอินทรีย์ เพราะฉะนั้นค่าบีโอดีที่วัดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เวลาเริ่มต้น จึงเรียกว่า ค่าบีโอดีเริ่มต้น (Ultimate Biochemical Demand: BOD<sub>0 วัน</sub>)

สมมติว่าสารอินทรีย์ในของเสีย คือ กลูโคส ( $C_6H_{12}O_6$ ) ดังนั้นสมการในการย่อยสลายของเสียชนิดนี้ เป็นดังสมการที่ 2.10 ซึ่งเป็นสมการที่แสดงถึงกลไกของย่อยสลายของเสียโดยแบคทีเรีย เพื่อนำมาใช้ในการดำรงชีพหรือหายใจ และในสมการที่ 2.11 แสดงสมการการย่อยสลายของเสีย เพื่อนำมาใช้ในการสร้างเซลล์ใหม่ ภายหลังจากที่กลไกของการย่อยสลายของแบคทีเรีย เพื่อใช้ในการสร้างเซลล์เกิดขึ้นไปแล้ว



เมื่อพิจารณาหาค่าบีโอดีที่ใช้ในการย่อยสลายน้ำตาลกลูโคสในสมการที่ 2.10 จะได้ว่า ปริมาณออกซิเจนที่ใช้ในการย่อยสลายน้ำตาล มีค่าเท่ากับ 6 เท่าของปริมาณของน้ำตาลกลูโคสที่เกิดการย่อยสลายไป หรือเขียนได้ดังสมการข้างล่าง

ปริมาณออกซิเจนที่ใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ = 6 \* ปริมาณน้ำตาลกลูโคสที่เกิดการย่อยสลายไป : หน่วยโมล ดังแสดงไว้ในสมการที่ 4\*

ปริมาณออกซิเจนที่ใช้ : หน่วยโมล	=	6	....4*
ปริมาณน้ำตาลกลูโคสที่เกิดการย่อยสลายไป : หน่วยโมล			
หรือ ปริมาณออกซิเจนที่ใช้ : หน่วยกรัม	=	192 กรัม	
ปริมาณน้ำตาลกลูโคสที่เกิดการย่อยสลายไป : หน่วยกรัม	=	180 กรัม	
	=	1.07	....5*

สมมติว่าทำการย่อยสลายน้ำตาลที่มีความเข้มข้นทั้งสิ้น x กรัมต่อลิตร อยากทราบว่าปริมาณออกซิเจนที่ต้องใช้ในการย่อยสลายน้ำตาลกลูโคสความเข้มข้นดังกล่าวก็กรัมต่อลิตร

$$\begin{aligned} \text{จากสมการที่ 5* จะได้ว่า } 1.07 &= \frac{\text{ปริมาณออกซิเจนที่ใช้ : หน่วยกรัมต่อลิตร}}{\text{ปริมาณน้ำตาลกลูโคสที่เกิดการย่อยสลายไป : หน่วยกรัมต่อลิตร}} \\ &= \frac{\text{ปริมาณออกซิเจนที่ใช้ : หน่วยกรัมต่อลิตร}}{x \text{ กรัมต่อลิตร}} \end{aligned}$$

เพราะฉะนั้น

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณออกซิเจนที่ใช้ในการย่อยสลายน้ำตาล} &= 1.07 * x \text{ กรัมต่อลิตร} \\ &= \text{ค่าบีโอดีเริ่มต้นในการย่อยสลายสารอินทรีย์} \end{aligned}$$



สมการแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าบีโอดี (สารอินทรีย์) ของในน้ำเสีย เป็นดังสมการที่ 6\*

$$\begin{aligned} \frac{dL}{dt} &= -k * L \\ \frac{dL}{L} &= -k * dt \\ \int \frac{dL}{L} &= \int -k * dt \\ &= - \int k * dt \end{aligned} \quad \dots 6^*$$

ทำการอินทิเกรตสมการที่ 6\* จากความเข้มข้นเริ่มต้น (L เท่ากับ  $L_0$ ) ไปจนถึงความเข้มข้นสุดท้าย (L เท่ากับ  $L_t$ ) ตั้งแต่เวลาเริ่มต้น (t เท่ากับ 0) ไปจนถึงเวลาสุดท้าย (t เท่ากับ t) จะได้ดังสมการที่ 2.12

$$\begin{aligned} \int_{L_0}^{L_t} \frac{dL}{L} &= k * \int_0^t dt \\ \ln(L) \Big|_{L_0}^{L_t} &= -k * (t) \Big|_0^t \\ \ln(L_t) - \ln L_0 &= -k * (t-0) \\ \ln \frac{L_t}{L_0} &= -k * t \\ L_t &= L_0 * e^{-(k * t)} \end{aligned} \quad \dots 2.12$$

- เมื่อ  $k$  แทนค่าคงที่อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ ซึ่งมีอันดับของปฏิกิริยาเท่ากับหนึ่ง ดังนั้นหน่วยของค่าคงที่อัตราเร็วของการย่อยสลายสารอินทรีย์ เท่ากับต่อเวลา ค่าคงที่ดังกล่าวขึ้นกับอุณหภูมิของเสีย ซึ่งพบว่าเมื่อผลต่างของอุณหภูมิ เท่ากับ 10 องศาเซลเซียส ค่าคงที่ของอัตราเร็ว มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า
- $L_0$  วัน,  $BOD_0$  วัน แทนความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทั้งหมด ซึ่งวัดในรูปของค่าบีโอดีที่เวลา เริ่มต้น (Ultimate BOD) หน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร
- $L_t$  แทนความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่เหลืออยู่ ซึ่งวัดในรูปของค่าบีโอดี เมื่อเกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์เป็นเวลา t วัน หน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร
- $y_t$  วัน,  $BOD_t$  วัน แทนความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่เกิดการย่อยสลายไป ซึ่งวัดในรูปของค่าบีโอดี เมื่อเกิดการย่อยสลายไปเป็นเวลา t วัน หน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร

ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่เกิดการย่อยสลายไป ซึ่งวัดในรูปของค่าบีโอดี (y หรือ BOD) เมื่อเกิดการย่อยสลายไปเป็นเวลา t เท่ากับ ความเข้มข้นของสารอินทรีย์เริ่มต้นที่มีอยู่ในน้ำเสียลบด้วยความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่เหลืออยู่ในน้ำเสีย เป็นดังสมการที่ 2.13 หรือสมการที่ 2.14

$$y_t \text{ วัน} = L_0 \text{ วัน} - L_t \text{ วัน} \quad \dots 2.13$$

แทนค่าสมการที่ 2.12 ลงในสมการที่ 2.13 จะได้ดังสมการที่ 2.14

$$\begin{aligned}
 Y_{t \text{ วัน}} &= L_{o \text{ วัน}} - L_{o \text{ วัน}} * e^{(-k * t)} \\
 &= L_{o \text{ วัน}} * [1 - e^{(-k * t)}]
 \end{aligned}
 \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} Y_{t \text{ วัน}} \\ &= L_{o \text{ วัน}} * [1 - e^{(-k * t)}] \end{aligned}} \right\} \dots 2.14$$

ในกรณีที่อุณหภูมิของน้ำเสียหรืออุณหภูมิของของเสียไม่เท่ากับ 20 องศาเซลเซียส ต้องทำการปรับค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์เริ่มต้น ( $L_o$ ) และค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยา ( $k$ ) ที่อุณหภูมิดังกล่าว เพราะค่าทั้งสองขึ้นกับอุณหภูมิ สมการที่ใช้ในการปรับค่าดังกล่าวเป็นดังสมการที่ 2.15 และสมการที่ 2.16 ตามลำดับ

$$\begin{aligned}
 BOD_{0 \text{ วัน, TC}} \text{ หรือ } L_{o \text{ วัน, TC}} &= L_{o \text{ วัน}} * e^{(k * 0)} D_T \\
 &= L_{o \text{ วัน}} * (0.02 * T + 0.60)
 \end{aligned}
 \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} BOD_{0 \text{ วัน, TC}} \text{ หรือ } L_{o \text{ วัน, TC}} \\ &= L_{o \text{ วัน}} * (0.02 * T + 0.60) \end{aligned}} \right\} \dots 2.15$$

$$k_{TC} = k_{20C} * \theta^{(T-20)} \quad \left. \vphantom{k_{TC}} \right\} \dots 2.16$$

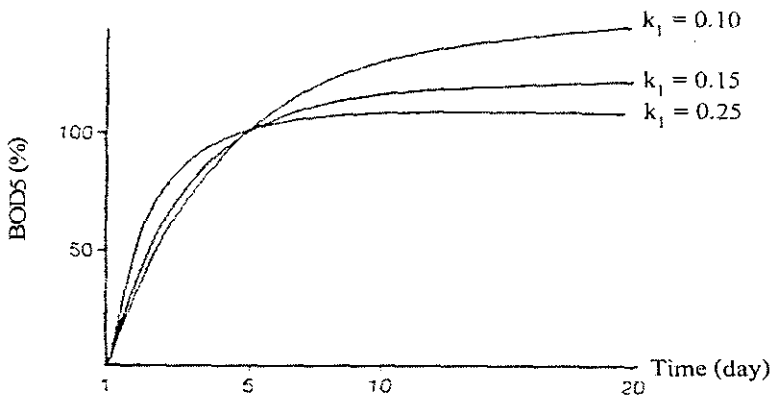
เมื่อ  $BOD_{0 \text{ วัน, TC}}$  หรือ  $L_{o \text{ วัน, TC}}$  แทนความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทั้งหมด ซึ่งวัดในรูปของค่าบีโอดีที่เวลาเริ่มต้น (Ultimate BOD) และที่อุณหภูมิ T องศาเซลเซียส หน่วย mg/L

$D_T$  แทนค่าคงที่ หรือแฟคเตอร์ในการเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ ซึ่งวัดในรูปของค่าบีโอดี ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ไปเป็นอุณหภูมิ T องศาเซลเซียส ไม่มีหน่วย

$k_{TC}$  แทนค่าคงที่ของอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่อุณหภูมิ T องศาเซลเซียส หน่วยต่อวัน

$\theta$  แทนค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนค่าอัตราเร็วการย่อยสลายสารอินทรีย์ จากอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิ T องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 1.047

ค่าคงที่อัตราเร็วการย่อยสลายสารอินทรีย์มีผลต่อเวลาการย่อยสลายสารอินทรีย์ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.8 เมื่อพิจารณาการย่อยสลายของเสียชนิดเดียวกันที่ความเข้มข้นเท่ากัน เมื่อทดสอบการย่อยสลายของเสียดังกล่าวด้วยอัตราเร็วของปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน ซึ่งทำการทดลองที่ค่าอัตราเร็วของปฏิกิริยาเท่ากับ 0.133 ต่อวัน และที่ 0.032 ต่อวัน เพื่อให้ได้ค่าบีโอดีเท่ากับ 70 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งพบว่าที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาเท่ากับ 0.133 ต่อวัน ใช้เวลาไปทั้งสิ้น 20 วัน เมื่อเทียบกับที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาเท่ากับ 0.032 ต่อวัน จะใช้เวลานานถึง 60 วัน แสดงว่าอัตราเร็วของปฏิกิริยามีผลต่อเวลาในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ในน้ำเสียหรืออาจกล่าวได้ว่า เมื่อค่าคงที่ของอัตราของปฏิกิริยามีค่ามากขึ้น เวลาในการย่อยสลายสารอินทรีย์ จะมีค่าน้อยลง



รูปที่ 2.8 ผลของค่าคงที่ของอัตราเร็วของปฏิกิริยา ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ชนิดเดียวกัน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากัน

เนื่องจากการวัดค่าบีโอดีใช้เวลานานถึง 5 วัน และต้องควบคุมอุณหภูมิของน้ำเสียไว้ที่ 20 องศาเซลเซียส พร้อมทั้งเก็บตัวอย่างน้ำเสียไว้ที่ห้องมืด ซึ่งมีความยุ่งยากในการวัดค่อนข้างมากในงานภาคสนาม จึงมีการพัฒนาการหาค่าความเข้มข้นทั้งหมดของสารอินทรีย์ในรูปของค่าบีโอดีศูนย์ ซึ่งคิดคิดโดยหน่วยงานป้องกันสิ่งแวดล้อม ของประเทศสหรัฐอเมริกา (Environmental Protection Agency :EPA) ดังสมการที่ 2.17

$$L_{\text{เริ่มต้น}} = 1.5 * \text{BOD}_{\text{เริ่มต้น}} + 4.6 * \text{NH}_4^+ - \text{N}_{\text{เริ่มต้น}} \quad \dots 2.17$$

ค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในรูปของสารประกอบไนโตรเจน ซึ่งวัดในรูปของค่าบีโอดีที่เหลือ หลังจากปฏิกิริยาดำเนินไปเป็นเวลา t วัน (Y<sub>2</sub>) หาได้จากสมการที่ 2.18

$$Y_2 = L_n * (1 - e^{-k_n * t}) \quad \dots 2.18$$

เมื่อ L<sub>n</sub> แทนความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในรูปของสารประกอบไนโตรเจนและส่วนของสารประกอบคาร์บอนที่เหลือ จากกระบวนการการย่อยสลายสารประกอบคาร์บอน ซึ่งวัดในรูปของค่าบีโอดี ก่อนเกิดกลไกของการย่อยสลายสารอินทรีย์ในขั้นตอนที่ 2

จากรูปที่ 2.2 พบว่ากระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์มี 2 ขั้นตอน คือ กระบวนการย่อยสลายสารประกอบคาร์บอนและสารประกอบไนโตรเจน เพราะค่าที่ทำกรวัดได้อาจประกอบไปด้วยค่าบีโอดีที่มาจากส่วนของการย่อยสลายสารอินทรีย์ในรูปของประกอบคาร์บอน รวมกับส่วนของการย่อยสลายสารอินทรีย์ในรูปของสารประกอบไนโตรเจน ซึ่งแทนด้วยเทอมของ Y<sub>T</sub> สมการในการหาค่าค่าเป็นไปตามสมการที่ 2.19

$$Y_T = y + Y_2 \quad \dots 2.19$$

แทนค่า  $y$  ด้วยสมการที่ 2.13 และ  $Y_2$  ด้วยสมการที่ 2.18 ลงในสมการที่ 2.19 จะเป็นดังสมการที่ 2.20

$$\text{จะได้ } Y_T = L_{0\text{วัน}} * (1 - e^{-(k * t)}) + L_n * (1 - e^{-(K_n * t)}) \quad \dots 2.20$$

และค่า  $K_n$  หาได้จากสมการที่ 2.21 ซึ่งที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ค่า  $K_n$  เท่ากับ 0.044 ต่อวัน

$$K_n = 0.0317 * (1.017)^T \quad \dots 2.21$$

**ตัวอย่างที่ 2.3** ปฏิบัติการย่อยสลายของเสียส่วนของสารอินทรีย์ชนิดหนึ่งเป็นดังสมการข้างล่าง

$$\text{อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ } (-r) = \frac{k * C}{K + C}$$

เมื่อ  $k$  มีค่าเท่ากับ 40 mg/L-min และ  $K$  มีค่าเท่ากับ 70 mg/L อยากทราบว่าต้องใช้เวลานานเท่าไร ในการย่อยสลายของเสียที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้มีความเข้มข้นเหลือเพียง 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

วิธีทำ จากสมการสมดุลมวลสาร สมการที่ 2.6

$$\Sigma \text{อัตราการสะสม} = \Sigma \text{อัตราการไหลเข้า} - \Sigma \text{อัตราการไหลออก} - \Sigma \text{อัตราการทำลาย} \quad \dots 2.6$$

ในช่วงที่ความเข้มข้นของมลสารมีค่าอยู่ในช่วง 20-400 mg/L ไม่มีการป้อนของเสียใหม่หรือเอาของเสียเก่าออกจากถังปฏิกิริยาที่ใช้

เพราะฉะนั้นอัตราการไหลเข้า และอัตราการไหลออก มีค่าเท่ากับศูนย์

อัตราการสะสมทั้งหมด ภายในระบบ ในช่วงความเข้มข้นดังกล่าว เท่ากับ  $V * \frac{dC}{dt}$

และอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ทั้งสิ้น เท่ากับ  $V * (-r)$  หรือเท่ากับ  $V * \frac{k * C}{K + C}$

แทนค่าต่างๆ ลงในสมการสมดุล จะได้ว่า  $\Sigma \text{อัตราการสะสม} = - \Sigma \text{อัตราการย่อยสลาย}$

$$\text{หรือ} \quad V * \frac{dC}{dt} = -V * \frac{k * C}{K + C}$$

$$\int_{C_{AO}}^{C_A} \frac{(K + C) * dC}{C} = \int_{t=0}^{t=t} -k * dt$$

$$\int_{C_{AO}}^{C_A} \left( \frac{K}{C} + 1 \right) dC = \int_{t=0}^{t=t} -k * dt$$

$$K * \ln \left( \frac{C_A}{C_{AO}} \right) + C_A - C_{AO} = -k * t$$

$$\text{เพราะฉะนั้น} \quad t = \frac{K * \ln \left( \frac{C_A}{C_{AO}} \right) + C_A - C_{AO}}{k} \quad \dots 7^*$$

แทนค่า  $K$ ,  $C_0$ ,  $C$  และ ค่า  $k$  ลงในสมการ 7\*

$$\text{จะได้ว่า } t = \frac{\left[ 70 \text{ mg/L} * \ln \left( \frac{20 \text{ mg/L}}{400 \text{ mg/L}} \right) + 20 \text{ mg/L} - 400 \text{ mg/L} \right]}{40 \text{ mg/L} \cdot \text{min}}$$

$$= 14.7 \text{ min}$$

คำตอบ การย่อยสลายของเสียที่มีความเข้มข้น 400 mg/L จนเหลือเพียง 20 mg/L ใช้เวลาทั้งสิ้น 14.7 นาที

ตัวอย่างที่ 2.4 น้ำเสียของฟาร์มสัตว์แห่งหนึ่งวัดได้ 10,000 m<sup>3</sup>/day วัดความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในรูปของค่าบีโอดีที่ 5 วัน ได้เท่ากับ 80 mg/L น้ำเสียดังกล่าวเกิดการไหลลงสู่อ่างเก็บน้ำที่อยู่ในระแวกใกล้เคียงขนาดใหญ่จำนวน 2 แห่ง ซึ่งวางเรียงต่อกันแบบอนุกรม ความจุของอ่างน้ำแห่งแรก และแห่งที่สอง เท่ากับ 50,000 m<sup>3</sup> และ 9,000 m<sup>3</sup> ตามลำดับ สมมติว่าอันดับปฏิกิริยาการย่อยสลายมลสารที่มีอยู่ในอ่างเก็บน้ำทั้ง 2 แห่ง เป็นอันดับหนึ่ง และค่า k มีค่า 0.40 ต่อวัน และของเสียดังกล่าวภายในอ่างเก็บน้ำทั้งสอง มีการกวนอย่างสมบูรณ์ จงหาค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในรูปของค่าบีโอดีวันที่ 5 ของน้ำเสียที่ไหลออกจากอ่างเก็บน้ำแห่งที่ 2 ว่า มีค่ากี่ mg/L

วิธีทำ จากสมการสมดุลมวลสาร สมการที่ 2.6

$$\Sigma \text{อัตราการสะสม} = \Sigma \text{อัตราการไหลเข้า} - \Sigma \text{อัตราการไหลออก} - \Sigma \text{อัตราการทำลาย} \dots 2.6$$

พิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่าต่างๆ ภายในระบบที่สถานะคงตัว ซึ่งพบว่า เทอมอัตราการสะสมปริมาณมลสารภายในอ่างเก็บน้ำทั้งสอง เท่ากับศูนย์ (dC/dt มีค่าเท่ากับศูนย์)

เมื่อแทนค่าเทอมอัตราการสะสม เท่ากับศูนย์ ลงในสมการสมดุล สมการที่ 2.6

$$\text{จะได้ } 0 = Q * C_{AO} - Q * C_A - (k * C_A * V)$$

$$(Q + k * V) C = Q * C_{AO}$$

$$\text{ดังนั้น } C_A = \left( \frac{Q * C_{AO}}{Q + k * V} \right)$$

$$= \frac{C_{AO}}{1 + k * \frac{V}{Q}} \dots 8^*$$

พิจารณาอ่างเก็บน้ำใบที่ 1

แทนค่า C<sub>AO,1</sub>, k, V และ Q ลงในสมการ 8\* และให้ค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ ในน้ำเสียที่ไหลออกจากอ่างเก็บน้ำใบที่ 1 ซึ่งวัดในรูปของค่าบีโอดี หรือสารประกอบคาร์บอน มีค่าเท่ากับ C<sub>A,1</sub>

แทนค่าต่างๆ ลงในสมการ 8\*

$$\text{จะได้ } C_{A,1} = \frac{C_{AO,1}}{1 + k * \frac{V_1}{Q_1}}$$

$$= \frac{80 \text{ mg/L}}{1 + 0.4 \text{ perday} * \frac{50,000 \text{ m}^3}{10,000 \text{ m}^3/\text{day}}}$$

$$= 27 \text{ mg/L}$$

พิจารณาอ่างเก็บน้ำใบที่ 2

ให้ค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสียที่ไหลออกจากอ่างเก็บน้ำใบที่ 2 ซึ่งวัดในรูปของสารประกอบคาร์บอนหรือค่าบีโอดี ซึ่งมีค่า  $C_{A,2}$

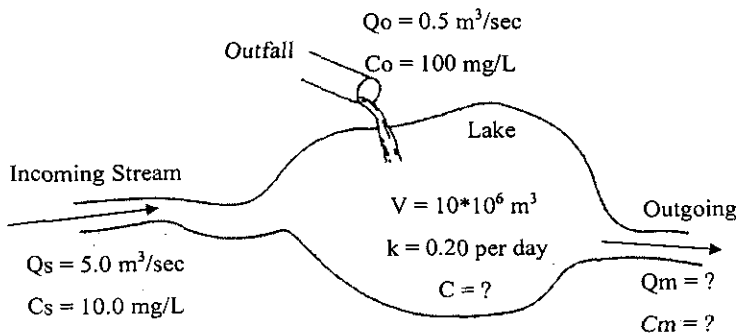
เนื่องจากคุณสมบัติของน้ำเสียที่ไหลออกจากอ่างเก็บน้ำใบที่ 1 เท่ากับคุณสมบัติของน้ำเสียที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำใบที่ 2 หรือเขียนได้ดังสมการ  $C_{A,1}$  เท่ากับ  $C_{AO,2}$

แทนค่า  $C_{AO,2}$ ,  $k$ ,  $V$  และ  $Q$  ลงในสมการ 8\*

$$\begin{aligned} \text{จะได้ } C_{A,2} &= \frac{C_{AO,2}}{1 + k * \frac{V_2}{Q_2}} \\ &= \frac{27 \text{ mg/L}}{1 + 0.4 \text{ perday} * \frac{9,000 \text{ m}^3}{10,000 \text{ m}^3/\text{day}}} \\ &= 19.9 \text{ mg/L} \end{aligned}$$

คำตอบ ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสียที่ไหลออกจากอ่างเก็บน้ำใบที่ 2 มีค่าเท่ากับ 19.9 mg/L

**ตัวอย่างที่ 2.5** Consider a larger pond within the volume 10.0 million cubic meter that is fed by a stream with a flow rate of 5.0 m<sup>3</sup>/sec and pollution concentration equal to 10.0 mg/L. There is also a sewage out fall that discharges 0.5 m<sup>3</sup>/sec of that same pollutant into a larger pond. The sewage has a concentration 100.0 mg/L and a reaction rate coefficient (k) of 0.20 per day as shown in the figure 2.9. Assuming the pollution is completely mixed in a larger pond, and assuming no evaporation or water losses or other water gains, find the steady state concentration in this basin before discharge in unit mg/L?



**รูปที่ 2.9** Larger Lake with a Non-Conservative Pollutant.

วิธีทำ จากสมการสมดุลมวลสาร สมการที่ 2.6

$$\Sigma \text{อัตราการสะสม} = \Sigma \text{อัตราการไหลเข้า} - \Sigma \text{อัตราการไหลออก} - \Sigma \text{อัตราการทำลาย} \dots 2.6$$

พิจารณาระบบที่พิจารณา (อ่างเก็บน้ำขนาดใหญ่) อยู่ในสภาวะคงที่

เพราะฉะนั้นอัตราการสะสม มีค่าเท่ากับศูนย์ ( $dC/dt = 0$ )

แทนค่าอัตราการสะสมเท่ากับศูนย์ ลงในสมการสมดุลมวลสาร

จะได้  $0 = \sum \text{อัตราการไหลเข้า} - \sum \text{อัตราการไหลออก} - \sum \text{อัตราการทำลาย} \dots 6^*$

$\sum \text{อัตราการไหลเข้าของน้ำเสีย} = Q_s * C_s + Q_w * C_s$

$$= (5.0 \text{ m}^3/\text{sec} * 10.0 \text{ mg/L} + 0.5 \text{ m}^3/\text{sec} * 100.0 \text{ mg/L}) * \frac{10^3 \text{ L}}{1 \text{ m}^3}$$

$$= 100,000 \text{ mg/sec}$$

$\sum \text{อัตราการไหลออกของน้ำเสีย} = Q_m * C_m \dots 7^*$

อัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำเสียที่ไหลออกจากระบบ เท่ากับ ผลรวมของอัตราการไหลเข้าของน้ำเสียที่ไหลเข้าระบบ เขียนได้ดังสมการข้างล่าง

$$Q_m = Q_s + Q_w \dots 8^*$$

แทนค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำเสียที่ไหลออกจากระบบด้วยสมการที่ 8\* ลงในสมการที่ 7\*

จะได้  $\sum \text{อัตราการไหลออกของน้ำเสีย} = (Q_s + Q_w) * C_m$

$$= (Q_s + Q_w) * C_A$$

$$= (5.0 \text{ m}^3/\text{sec} + 0.5 \text{ m}^3/\text{sec}) * C_m \text{ mg/L} * \frac{10^3 \text{ L}}{1 \text{ m}^3}$$

$$= 5,500 * C_m \text{ mg/sec}$$

$\sum \text{อัตราการทำลาย} = K * C_m * V \dots$

$$= 0.20 \text{ per day} * C_m \text{ mg/L} * 10^7 \text{ m}^3 * \frac{10^3 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} * \frac{1 \text{ day}}{24 \text{ hr}} * \frac{1 \text{ hr}}{60 \text{ min}} * \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ sec}}$$

$$= 23,100 * C_m \text{ mg/sec}$$

แทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ 6\*

จะได้  $100,000 \text{ mg/sec} = 5,500 * C_m \text{ mg/sec} + 23,100 * C_m \text{ mg/sec}$

$$= (5,500 + 23,100) * C_m \text{ mg/sec}$$

$$C_m = \frac{(100,000 \text{ mg/sec})}{(28,600 \text{ mg/sec})}$$

$$= 3.5 \text{ mg/l}$$

คำตอบ ความเข้มข้นของมลสารที่มีอยู่ในแหล่งน้ำดังกล่าว ก่อนไหลออกจากแหล่งน้ำนี้เท่ากับ 3.5 mg/L

ตัวอย่างที่ 2.6 อยากทราบว่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสียของฟาร์มเลี้ยงสัตว์แห่งหนึ่ง มีค่ากี่ มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อเวลาผ่านไป 1 วัน (ค่าบีโอดีหนึ่งวัน หรือค่าบีโอดีหนึ่ง) มีค่าเท่าใด ในหน่วย มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่เกิดการย่อยสลายไป เมื่อเวลาผ่านไป 5 วัน เท่ากับ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่ทำการวัดการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของมลสารได้มีควบคุมอุณหภูมิของน้ำเสียไว้ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส และค่าคงที่ของอัตราเร็วของปฏิกิริยาการย่อยสลายของเสีย มีค่าเท่ากับ 0.23 ต่อวัน

วิธีทำ หากค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทั้งหมดหรือความเข้มข้นเริ่มต้น ในรูปของค่าบีโอดี ( $L_0$ ) ด้วยสมการที่ 2.14

$$\text{จาก } y_{t \text{ วัน}} = L_{o \text{ วัน}} * [1 - e^{(-k * t)}] \quad \dots 2.14$$

แทนค่า  $y_{5 \text{ วัน}}$  เท่ากับ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร,  $k$  เท่ากับ 0.23 ต่อวัน และ  $t$  เท่ากับ 5 วัน ลงในสมการที่ 2.14

$$\begin{aligned} \text{จะได้ } 200 \text{ mg/L} &= L_{o \text{ วัน}} * [1 - e^{(-0.23 \text{ ต่อวัน} * 5 \text{ วัน})}] \\ \text{ดังนั้น } L_{o \text{ วัน}} &= 200 \text{ mg/L} / [1 - e^{(-0.23 * 5)}] \\ &= 200 \text{ mg/L} / (1 - 0.316) \\ &= 293 \text{ mg/L} \end{aligned}$$

วิธีที่ 1 ใช้สมการที่ 2.12 เพื่อหาค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่เหลืออยู่ในวันที่หนึ่ง ( $BOD_1$ )

$$\text{จาก } L_{t \text{ วัน}} = L_{o \text{ วัน}} * e^{(-k * t)} \quad \dots 2.12$$

แทนค่า  $L_{o \text{ วัน}}$  เท่ากับ 293 มิลลิกรัมต่อลิตร,  $k$  เท่ากับ 0.23 ต่อวัน และ  $t$  เท่ากับ 1 วัน ลงในสมการที่ 2.12

$$\begin{aligned} \text{จะได้ } L_{1 \text{ วัน}} &= 293 \text{ mg/L} * e^{(-0.23 \text{ ต่อวัน} * 1 \text{ วัน})} \\ &= 233 \text{ mg/L} \end{aligned}$$

$$\text{จากสมการที่ 2.13 } y_{t \text{ วัน}} = L_{o \text{ วัน}} - L_{t \text{ วัน}} \quad \dots 2.13$$

แทนค่า  $L_{o \text{ วัน}}$  เท่ากับ 293 มิลลิกรัมต่อลิตร และ  $L_{1 \text{ วัน}}$  เท่ากับ 233 มิลลิกรัมต่อลิตรลงในสมการที่ 2.13

$$\begin{aligned} \text{จะได้ } y_{1 \text{ วัน}} &= 293 \text{ mg/L} - 233 \text{ mg/L} \\ &= 60 \text{ mg/L} \end{aligned}$$



วิธีที่ 2 ใช้สมการที่ 2.14 เพื่อคำนวณหาค่าบีโอดีวันที่หนึ่ง

$$y_{t \text{ วัน}} = L_{o \text{ วัน}} * [1 - e^{(-k * t)}] \quad \dots 2.14$$

แทนค่า  $L_{o \text{ วัน}}$  เท่ากับ 293 มิลลิกรัมต่อลิตร,  $k$  เท่ากับ 0.23 ต่อวัน และ  $t$  เท่ากับ 1 วัน ลงในสมการที่ 2.14

$$\begin{aligned} \text{จะได้ } y_{1 \text{ วัน}} &= 293 \text{ mg/L} * [1 - e^{(-0.23 \text{ ต่อวัน} * 1 \text{ วัน})}] \\ &= 60.20 \text{ mg/L} \\ &\approx 60 \text{ mg/L} \end{aligned}$$

คำตอบ ค่าบีโอดีวันที่ 1 ของน้ำเสียของฟาร์มแห่งนี้ เท่ากับ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตัวอย่างที่ 2.7 The wastes had an ultimate BOD equal to 300 mg/L. At 20 C, the reaction rate constant was 0.22 per day. What would be the 5-day BOD of this waste at 25 C ?

วิธีทำ 1. ใช้สมการที่ 2.16 เพื่อหาค่า  $k$  ที่อุณหภูมิ 25 C

$$\text{จาก } k_{T \text{ C}} = k_{20 \text{ C}} * \theta^{(T-20)} \quad \dots 2.16$$

แทนค่า  $k_{20 \text{ C}}$  เท่ากับ 0.222 ต่อวัน,  $T$  เท่ากับ 25 องศาเซลเซียส และ  $\theta$  เท่ากับ 1.047 ลงในสมการที่ 2.16

$$\begin{aligned} \text{จะได้ } k_{25 \text{ C}} &= 0.22 \text{ ต่อวัน} * (1.047)^{(25-20)} \\ &= 0.277 \text{ ต่อวัน} \end{aligned}$$

2. ใช้สมการที่ 2.15 เพื่อหาค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์เริ่มต้นที่อุณหภูมิ 25 C ( $BOD_{o \text{ วัน}, 25 \text{ C}}$ )

$$\text{จาก } BOD_{o \text{ วัน}, T \text{ C}} = L_{o \text{ วัน}, 20 \text{ C}} * (0.02 * T + 0.60) \quad \dots 2.15$$

แทนค่า  $L_{o \text{ วัน}, 20 \text{ C}}$  เท่ากับ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร และ  $T$  เท่ากับ 25 องศาเซลเซียส ลงในสมการที่ 2.15

$$\begin{aligned} \text{จะได้ } BOD_{o \text{ วัน}, 25 \text{ C}} &= 300 \text{ mg/L} * (0.02 * 25 + 0.6) \\ &= 330 \text{ mg/L} \end{aligned}$$

3. ใช้สมการที่ 2.12 เพื่อหาค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่เหลืออยู่ในรูปของบีโอดี ในวันที่ห้า ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ( $L_{5 \text{ วัน}, 25 \text{ C}}$ )

$$\text{จาก } L_{t \text{ วัน}, T \text{ C}} = L_{o \text{ วัน}, 25 \text{ C}} * e^{(-k * t)} \quad \dots 2.12$$

แทนค่า  $L_{o \text{ วัน}}$  เท่ากับ 330 มิลลิกรัมต่อลิตร,  $k$  เท่ากับ 0.277 ต่อวัน และ  $t$  เท่ากับ 5 วัน ลงในสมการที่ 2.12

$$\begin{aligned} \text{จะได้ } L_{5 \text{ วัน}, 25 \text{ C}} &= 330 \text{ mg/L} * e^{(-0.277 \text{ ต่อวัน} * 5 \text{ วัน})} \\ &= 82.61 \text{ mg/L} \end{aligned}$$

4. ใช้สมการที่ 2.13 เพื่อหาค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในรูปของบีโอดีวันที่ห้า (BOD<sub>5</sub>)

$$\text{จาก } y_{5 \text{ วัน}, 25 \text{ C}} = L_{0 \text{ วัน}, 25 \text{ C}} - L_{t \text{ วัน}} \quad \dots 2.13$$

แทนค่า  $L_{0 \text{ วัน}, 25 \text{ C}}$  และ  $L_{1 \text{ วัน}, 25 \text{ C}}$  ลงในสมการที่ 2.13

$$\begin{aligned} \text{จะได้ } y_{5 \text{ วัน}, 25 \text{ C}} &= 330 \text{ mg/L} - 82.61 \text{ mg/L} \\ &= 247.39 \text{ mg/L} \end{aligned}$$

$$\text{หรือหาค่าดังกล่าวจากสมการที่ 2.14 } y_t = L_{0 \text{ วัน}, T \text{ C}} * [1 - e^{-(k \cdot t)}] \quad \dots 2.14$$

แทนค่า  $L_{0, 25 \text{ C}}$  เท่ากับ 330 มิลลิกรัมต่อลิตร,  $k$  เท่ากับ 0.277 ต่อวัน และ  $t$  เท่ากับ 5 วัน ลงในสมการที่ 2.14

$$\begin{aligned} \text{จะได้ว่า } y_{5 \text{ วัน}, 25 \text{ C}} &= 330 \text{ mg/L} * [1 - e^{(-0.277 \text{ ต่อวัน} * 5 \text{ วัน})}] \\ &= 247.39 \text{ mg/L} \end{aligned}$$

**คำตอบ** ค่าบีโอดีห้าของน้ำเสียดังกล่าว ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เท่ากับ 247.39 มิลลิกรัมต่อลิตร

**ตัวอย่างที่ 2.8** ค่าบีโอดีห้า (BOD<sub>5</sub>) ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ของน้ำเสียแหล่งหนึ่ง เท่ากับ 210 มิลลิกรัมต่อลิตร จงหาค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารอินทรีย์ ซึ่งวัดในรูปของค่าบีโอดี (BOD<sub>0</sub>) และค่าบีโอดีสิบ (BOD<sub>10</sub>) มีค่ากี่มิลลิกรัมต่อลิตร ถ้าตัวอย่างน้ำเสียถูกเก็บไว้ในห้องมืด ซึ่งควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 30 องศาเซลเซียส จงหาค่าบีโอดีห้า (BOD<sub>5</sub>) ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และค่าคงที่อัตราการย่อยสลายที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เท่ากับ 0.23 ต่อวัน

**วิธีทำ** 1. ใช้สมการที่ 2.14 เพื่อหาค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทั้งหมด ( $L_0$  หรือ BOD<sub>0</sub>)

$$\text{จาก } y_t = L_0 * [1 - e^{-(k \cdot t)}] \quad \dots 2.14$$

แทนค่า  $y_{5 \text{ วัน}}$  เท่ากับ 210 มิลลิกรัมต่อลิตร,  $k$  เท่ากับ 0.23 ต่อวัน และ  $t$  เท่ากับ 5 วัน ลงในสมการที่ 2.14

$$\begin{aligned} \text{จะได้ } 210 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร} &= L_{0 \text{ วัน}} * [1 - e^{(-0.23 \text{ ต่อวัน} * 5 \text{ วัน})}] \\ L_{0 \text{ วัน}} &= 210 \text{ mg/L} / e^{(-0.23 \text{ ต่อวัน} * 5 \text{ วัน})} \\ &= 307 \text{ mg/L} \end{aligned}$$

2. ใช้สมการที่ 2.12 เพื่อหาค่า BOD<sub>10</sub>

$$\text{จาก } L_{t \text{ วัน}} = L_{0 \text{ วัน}} * e^{-(k \cdot t)} \quad \dots 2.12$$

แทนค่า  $L_{0 \text{ วัน}}$  เท่ากับ 307 มิลลิกรัมต่อลิตร,  $k$  เท่ากับ 0.23 ต่อวัน และ  $t$  เท่ากับ 10 วัน ลงในสมการที่ 2.12

$$\begin{aligned} \text{จะได้ว่า } L_{10 \text{ วัน}} &= 307 \text{ mg/L} * e^{(-0.23 \text{ ต่อวัน} * 10 \text{ วัน})} \\ &= 276 \text{ mg/L} \end{aligned}$$

3. ใช้สมการที่ 2.16 เพื่อหาค่า  $k$  ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

$$\text{จาก } k_{Tc} = k_{20c} * 1.047^{(T-20)} \quad \dots 2.16$$

แทนค่า  $k_{20c}$  เท่ากับ 0.23 ต่อวัน, ค่า  $T$  เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส และ  $\theta$  เท่ากับ 1.047 ลงในสมการที่ 2.16

$$\begin{aligned} \text{จะได้ } k_{30c} &= 0.23 \text{ ต่อวัน} * (1.047)^{(30-20)} \\ &= 0.364 \text{ per day} \end{aligned}$$

4. ใช้สมการที่ 2.15 เพื่อหาค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์เริ่มต้นที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

( $BOD_{0 \text{ วัน}, Tc}$  หรือ  $L_{0 \text{ วัน}, Tc}$ )

$$\text{จาก } BOD_{0 \text{ วัน}, Tc} = L_{0 \text{ วัน}, 20c} * (0.02 * T + 0.60) \quad \dots 2.15$$

แทนค่า  $L_{0 \text{ วัน}, 20}$  องศาเซลเซียส,  $T$  เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส ลงในสมการที่ 2.15

$$\begin{aligned} \text{จะได้ว่า } BOD_{0 \text{ วัน}, T \text{ องศาเซลเซียส}} &= 307 \text{ mg/L} * (0.02 * 30 + 0.6) \\ &= 368.40 \text{ mg/L} \end{aligned}$$

5. ใช้สมการที่ 2.12 เพื่อหาค่าบีโอดี 5 ที่เหลืออยู่ ( $y_5$ )

$$\text{จาก } y_{t \text{ วัน}} = L_{0 \text{ วัน}} * [1 - e^{-(k * t)}] \quad \dots 2.12$$

แทนค่า  $L_{0 \text{ วัน}}$  เท่ากับ 368.40 มิลลิกรัมต่อลิตร, ค่า  $k$  เท่ากับ 0.364 ต่อวัน และ  $t$  เท่ากับ 5 วัน ลงในสมการที่ 2.12

$$\begin{aligned} \text{จะได้ว่า } y_{5 \text{ วัน}} &= 368.4 \text{ mg/L} * [1 - e^{-(0.364 \text{ ต่อวัน} * 5 \text{ วัน})}] \\ &= 308.71 \text{ mg/L} \end{aligned}$$

## แบบฝึกหัดเพิ่มความเข้าใจ

1. ให้ยกตัวอย่างการทำสมมูลมวลสารของของเสียจากฟาร์มเลี้ยงสัตว์มา 1 ตัวอย่าง พร้อมทั้งแสดงสมการที่เกี่ยวข้องในสมการสมมูลมวลรวมและสมการสมมูลขององค์ประกอบมาด้วย
2. ฟาร์มเลี้ยงปลาแห่งหนึ่ง ซื้อปลาอนุบาลมาจำนวน 100 ตัว ทำการเลี้ยงด้วยสูตรอาหารชนิดหนึ่ง โดยซื้อมาในราคาตัวละ 1 บาท น้ำหนักเฉลี่ยของปลาเท่ากับ 0.8 กิโลกรัมต่อตัว เมื่อทำการเลี้ยงจนครบ 90 วัน จะมีน้ำหนักตัวโดยเฉลี่ยตัวละ 4 กิโลกรัม เปอร์เซ็นต์ของการเลี้ยงปลารอดจนครบ 90 วัน เท่ากับ 90% ของจำนวนปลาที่ซื้อมาในครั้งแรก ปลาที่โตซึ่งเลี้ยงจนครบ 90 วัน ถูกขายไปเพียง 80% ของปลาที่เลี้ยงจนโต โดยขายในราคาเฉลี่ย 20 บาทต่อกิโลกรัม ส่วนปลาที่เหลือนั้นเลี้ยงต่อไปเพื่อใช้เป็นพ่อพันธุ์และแม่พันธุ์ต่อไป กำหนดให้
  - สูตรอาหารที่ใช้เลี้ยงปลาจนโต เท่ากับ 0.5 กิโลกรัมต่อปลา 1 กิโลกรัม
  - ราคาสูตรอาหาร เท่ากับ 1.5 บาทต่อสูตรอาหาร 1 กิโลกรัม

อยากทราบว่า

- 2.1 ปลาที่ขายไป เมื่อทำการเลี้ยงจนครบ 90 วัน ได้กำไรหรือขาดทุน เพราะเหตุใด โดยคิดจากต้นทุนจากการเลี้ยงปลาด้วยสูตรอาหารดังกล่าวและราคาปลาที่ซื้อมาในช่วงแรก
- 2.2 น้ำหนักรวมของปลาที่ใช้เป็นพ่อพันธุ์และแม่พันธุ์มีค่ากี่กิโลกรัม
3. มลสารชนิดหนึ่งนำมาบำบัดภายในถังปฏิกรณ์แบบเท เมื่อเวลาผ่านไป 10 นาที ความเข้มข้นของมลสารดังกล่าวเหลือเพียง 50% ของความเข้มข้นเดิม อยากทราบว่าค่าคงที่ของการย่อยสลายมลสารชนิดนี้มีค่าเท่าใด หน่วยอะไร ถ้าอันดับของการย่อยสลายมลสารชนิดนี้เท่ากับหนึ่ง
4. น้ำเสียของฟาร์มเลี้ยงสุกรแห่งหนึ่งทำการบำบัดด้วยระบบบำบัดที่เรียกว่า ยูเอสบี วัดความเข้มข้นของมลสารเริ่มต้นในน้ำเสียได้เท่ากับ 12,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการบำบัดภายในระบบบำบัดดังกล่าว เป็นเวลา 20 วัน ปรากฏว่าความเข้มข้นของมลสารในน้ำเสียลดลง เหลือเพียง 150 มิลลิกรัมต่อลิตร อยากทราบว่าอัตราการย่อยสลายมลสารในน้ำเสียของฟาร์มแห่งนี้มีค่าเท่าใด และหน่วยค่าคงที่ของการย่อยสลายมลสารในน้ำเสีย มีค่าเท่าไร และมีหน่วยอะไร
5. จงคำนวณหาค่าบีโอดีวันที่ห้า ของการย่อยสลายน้ำเสียของฟาร์มเลี้ยงสัตว์แห่งหนึ่ง ซึ่งมีอุณหภูมิเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส เมื่อค่าบีโอดีวันที่ห้าของตัวอย่างน้ำเสียที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เท่ากับ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าคงที่ที่อุณหภูมิดังกล่าว เท่ากับ 0.23 ต่อวัน (อุณหภูมิ เท่ากับ 20 องศาเซลเซียส) และอันดับของปฏิกรณ์มีค่าเท่าใด เพราะเหตุใด
6. จงหาค่าบีโอดีวันที่เจ็ดของน้ำเสียจากฟาร์มเลี้ยงสัตว์แห่งหนึ่ง ค่าบีโอดีของวันที่ห้าเท่ากับ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าคงที่ของการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย เท่ากับ 0.24 ต่อวัน อุณหภูมิของน้ำเสียที่ทำการศึกษาเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส

7. จากคำถามข้อที่ 6 หากทำการปรับอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 30 องศาเซลเซียส อยากทราบว่าค่าบีโอดีวันที่สิบ มีค่ากี่มิลลิกรัมต่อลิตร
8. จากคำถามข้อที่ 6 หากทำการลดอุณหภูมิของน้ำเสียลงไปอีก 5 องศาเซลเซียส อยากทราบว่าค่าคงที่ของการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียมีค่าเท่าไร และค่าบีโอดีวันที่สามมีค่ากี่มิลลิกรัมต่อลิตร
9. ค่าบีโอดีวันที่ห้าของการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียที่อยู่ใกล้ฟาร์มเลี้ยงสัตว์แห่งหนึ่ง เท่ากับ 220 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสีย เท่ากับ 320 มิลลิกรัมต่อลิตร อยากทราบว่าค่าคงที่ของการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียมีค่าเท่าใด

# บทที่ 3

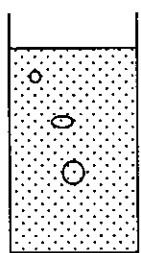
## วิศวกรรมศาสตร์เคมีเบื้องต้น

### (Introduction to Chemical Reaction Engineering)

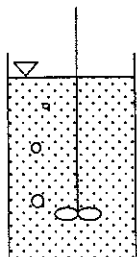
วิศวกรรมศาสตร์เคมีเบื้องต้นเป็นเรื่องที่ประยุกต์ความรู้เคมีเบื้องต้น มาทำนายหาความเข้มข้นของมลสารที่เกิดขึ้นหรือที่เหลืออยู่ภายหลังจากที่ปฏิกิริยาการย่อยสลายไปเกิดไประยะหนึ่ง เพื่อนำเอาข้อมูลดังกล่าวมาทำการออกแบบและหาขนาดของถังปฏิริยา ตลอดจนเป็นการหาระยะเวลาที่เหมาะสมของการย่อยสลายมลสารจากปฏิกิริยาเคมีหรือปฏิกิริยาชีวเคมีภายในถังปฏิริยาที่ใช้ บางครั้งแนวทางในการแก้ ปัญหาการหาความเข้มข้นหรือการหาค่าคงที่ของการย่อยสลายสารอินทรีย์ของมลสาร อาจต้องเริ่มต้นจากการทำสมดุลมวลสารของสารต่างๆ ที่มีส่วนเกี่ยวข้องในระบบที่พิจารณาอยู่ แล้วใช้ความรู้ทางด้านเคมีสิ่งตั้งแวดล้อมประกอบการพิจารณา เพื่อหาสิ่งที่ต้องการทราบภายในระบบต่อไป

ประเภทของถังปฏิริยา แบ่งได้ 3 ประเภท ตามลักษณะการทำงาน คือ

1. ถังปฏิริยาแบบกะ (Batch Reactor) การบำบัดของเสียด้วยถังปฏิริยาแบบกะ เป็นการบำบัดของเสียเป็นกะหรือครั้งคราว โดยป้อนของเสียเข้าถังปฏิริยาด้วยความเข้มข้นเริ่มต้นหนึ่งจากนั้นปล่อยให้ของเสียเกิดการย่อยสลายไปจนกระทั่งความเข้มข้นของมลสารเหลือเท่ากับ หรือน้อยกว่าความเข้มข้นของมลสารตามที่ต้องการ จึงเทกับระบายของเสียเก่าออกจากถังปฏิริยาแล้วทำการเติมของเสียใหม่ลงไปภายในถังปฏิริยาใบเดิมอีกครั้ง ถังปฏิริยาแบบนี้มักออกแบบถังในรูปทรงกระบอก ดังรูปที่ 3.1 (ก) ในบางครั้งอาจมีการติดตั้งระบบการกวนภายในถังปฏิริยา เพื่อช่วยให้ประสิทธิภาพของระบบ มีค่าดีขึ้นเพราะของเสียและจุลินทรีย์เกิดการสัมผัสกันได้มากขึ้น ดังรูปที่ 3.1 (ข) ระบบการกวนที่นิยมใช้กัน ได้แก่ การใช้ใบกวน การเป่าอากาศ เป็นต้น นอกจากนี้แล้วระบบการกวนดังกล่าวยังช่วยป้องกันการเน่าของน้ำเสียหรือสภาพของแอนาโรบิกของน้ำเสียดังกล่าวเกิดขึ้นอีกด้วย เมื่อบำบัดน้ำเสียที่ประกอบด้วยสารอินทรีย์ที่เกิดการย่อยสลายได้ช้า และสารอินทรีย์ในของของเสียดังกล่าวมีค่ามาก ถังปฏิริยาแบบนี้แสดงไว้ในรูปที่ 3.1



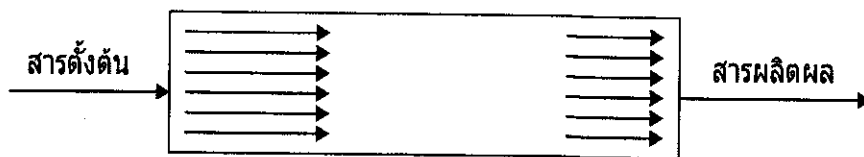
ก. ไม่มีใบกวน



ข. มีใบกวน

รูปที่ 3.1 แสดงถังปฏิริยาแบบกะกรณี ก. ไม่มีใบกวน ข. มีใบกวน

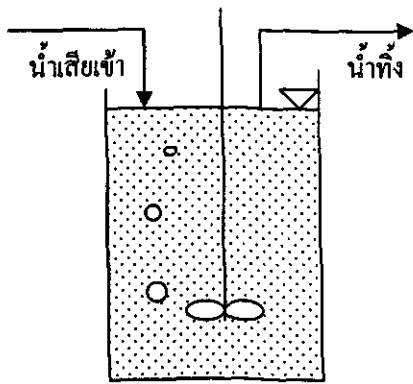
2. ถังปฏิกริยาแบบท่อไหล (Plug flow reactor) ลักษณะของถังปฏิกริยาแบบนี้มักเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ความยาวของถังค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับความกว้างหรือความสูงของถังปฏิกริยา ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับคลองหรือรางระบายน้ำ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.2 เนื่องจากถังปฏิกริยาแบบนี้ความยาวค่อนข้างมาก ทำให้มลสารที่อยู่ในน้ำเสียหรือในระบบบำบัดเกิดการย่อยสลายได้นานขึ้น รวมทั้งเกิดการย่อยสลายอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่น้ำเสียเกิดการไหลภายในถังปฏิกริยาดังกล่าว ทำให้การย่อยสลายสารอินทรีย์มีค่ามากขึ้น ลักษณะการป้อนของเสียเข้าสู่ถังปฏิกริยาแบบนี้มีลักษณะเช่นเดียวกับถังปฏิกริยาแบบกะ ข้อจำกัดของถังปฏิกริยาแบบนี้มีหลายประการ เช่น ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำเสียด้วยถังปฏิกริยาแบบนี้ยังมีค่าค่อนข้างต่ำแต่ยังดีกว่าถังปฏิกริยาแบบกะ เนื่องจากถังปฏิกริยาแบบนี้มีความยาวค่อนข้างมาก ทำให้เกิดการย่อยสลายมลสาร โดยใช้เวลานานขึ้น เป็นต้น



รูปที่ 3.2 แสดงถังปฏิกริยาแบบท่อไหล

3. ถังปฏิกริยาแบบกวนสมบูรณ์ (Continuous stirred tank reactors : CSTRs) ถังปฏิกริยาแบบนี้ มักมีระบบการกวนควบคู่ด้วยเสมอ เพื่อให้สารอินทรีย์กระจายไปทั่วถังปฏิกริยา ทำให้ปฏิกริยาเคมีหรือปฏิกริยาชีวเคมีภายในถังปฏิกริยาเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.3 การป้อนของเสียเข้าสู่ถังปฏิกริยาแบบนี้เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยทั่วไปในการออกแบบถังปฏิกริยาแบบนี้ต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพของกระบวนการกวนด้วย เพื่อให้ความเข้มข้นของมลสารภายในถังมีค่าเท่ากันและเป็นเนื้อเดียวกันทุกตำแหน่งภายในถังปฏิกริยา

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของถังปฏิกริยาทั้ง 3 แบบ พบว่าถังปฏิกริยาแบบนี้มีค่ามากกว่าถังปฏิกริยาทั้งสองแบบดังที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น อย่างไรก็ตามถังปฏิกริยาแบบนี้อาจไม่เหมาะที่จะนำมาบำบัดน้ำเสียบางประเภท เช่น น้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูง เนื่องจากกำลังของกระบวนการกวนอาจไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการกระจายของมลสารไปทั่วถัง ดังนั้นหากจำเป็นต้องออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูงมาก มักมีระบบการกวน ซึ่งต้องใช้กำลังในการกวนมาก ทำให้เสีค่าไฟฟ้ามากตามไปด้วย ดังนั้นหากต้องทำการบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูงมักทำการออกแบบในลักษณะของถังปฏิกริยาแบบท่อไหล



รูปที่ 3.3 แสดงถึงปฏิกิริยาแบบกวนสมบูรณ์

กรณีที่ไม่ทราบค่าความเข้มข้นหรืออัตราการไหลเชิงปริมาตรของค่าใดค่าหนึ่งที่เกี่ยวข้องในระบบ อาจหาค่าดังกล่าวด้วยการใช้สมการสมดุลมวลสาร เพื่อหาค่าที่ไม่ทราบจากนั้นจึงหาค่าอื่นต่อไปด้วยสมการของถังปฏิกิริยาแต่ละแบบ

สมการสมดุลทั่วไป แสดงไว้ในสมการที่ 3.1

$$\sum \text{อัตราการสะสม} = \sum \text{อัตราการไหลเข้า} - \sum \text{อัตราการไหลออก} - \sum \text{อัตราการทำลาย} \left. \begin{array}{l} \text{หรือ} + \sum \text{อัตราการสร้าง} \end{array} \right\} \dots 3.1$$

$$\text{หรือ } \sum \left[ \begin{array}{c} \text{Accumulation} \\ \text{Rate} \end{array} \right] = \sum \left[ \begin{array}{c} \text{Input} \\ \text{Rate} \end{array} \right] - \sum \left[ \begin{array}{c} \text{Output} \\ \text{Rate} \end{array} \right] - \sum \left[ \begin{array}{c} \text{Decay} \\ \text{Rate} \end{array} \right] \text{ หรือ } + \sum \left[ \begin{array}{c} \text{Production} \\ \text{Rate} \end{array} \right]$$

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของถังปฏิกิริยาที่ใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ มีหลายประการ ได้แก่ เวลาในการบำบัดน้ำเสีย ขนาดความจุของถังปฏิกิริยา อัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำเสีย อันดับในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย เป็นต้น



เวลาในการบำบัดของเสีย (Retention Time: RT หรือ  $t$ ) เวลาในการบำบัดของเสียภายในถังปฏิกริยาแต่ละประเภทนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ อาทิ ความเข้มข้นของมลสารในของเสียที่นำมาบำบัด ขนาดของถังปฏิกริยา รูปแบบของถังปฏิกริยาที่เลือกใช้ ปริมาณของเสียที่นำมาบำบัด เป็นต้น ในเอกสารบทนี้เป็นการหาสมการในการคำนวณหาเวลาในการบำบัดของเสียด้วยถังปฏิกริยาแต่ละประเภท ที่อันดับต่างๆ ของการย่อยสลายของเสีย โดยแยกตามชนิดของถังปฏิกริยา ดังนี้

1. ถังปฏิกริยาแบบกะ การทำงานของถังปฏิกริยาแบบนี้เป็นการบำบัดของเสียแบบครั้งคราว ในขณะที่ของเสียอยู่ในระบบอยู่นั้นหากความเข้มข้นของมลสารมีค่ามากกว่าค่าที่ต้องการ ระบบบำบัดจะยังคงเกิดการย่อยสลายต่อไปจนกว่าความเข้มข้นของมลสาร มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าความเข้มข้นตามต้องการ จึงระบายของเสียชุดเก่าออกแล้วทำการเติมของเสียชุดใหม่ลงไปในระบบ จากนั้นปล่อยให้ระบบทำการบำบัดของเสียชุดใหม่ต่อไป เทอมของอัตราการไหลเข้าและอัตราการไหลออกในช่วงที่เกิดการย่อยสลายของเสียมีค่าเท่ากับศูนย์ เมื่อพิจารณาเฉพาะการย่อยสลายสารอินทรีย์เท่านั้นเทอมของอัตราการผลิตมีค่าเท่ากับศูนย์ (ต้องทำการแยกการเจริญเติบโตของแบคทีเรียออกจากการลดลงของมลสารที่อยู่ในน้ำเสีย) สมการสมดุลมวลสารของถังปฏิกริยาเป็นดังสมการที่ 3.2 และสมการทั่วไปในการคำนวณหาเวลาในการบำบัดของเสียด้วยถังปฏิกริยาแบบนี้ แสดงไว้ในสมการที่ 3.3

$$\begin{aligned}
 \text{อัตราการสะสม} &= 0 - \text{อัตราการย่อยสลาย} \\
 \text{หรือ} \quad V * \frac{dC}{dt} &= -V * (-r_c) \\
 &= -V * (k * C^n) \\
 \text{เพราะฉะนั้น} \quad \frac{dC}{dt} &= -k * C^n \\
 \frac{dC}{C^n} &= -k * dt
 \end{aligned}
 \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} \text{อัตราการสะสม} \\ \text{หรือ} \\ \text{เพราะฉะนั้น} \end{aligned}} \right\} \dots 3.2$$

ทำการอินทิเกรตสมการที่ 3.2 แบบไม่ใส่ลิมิต จะได้ดังสมการที่ 3.3

$$\begin{aligned}
 \text{จะได้} \quad \int -k * dt &= \int \frac{dC}{C^n} \\
 -k * \int dt &= \int \frac{dC}{C^n} \\
 \int dt &= \frac{\int \frac{dC}{C^n}}{-k} \\
 t &= \frac{\int \frac{dC}{C^n}}{-k} \quad \dots 3.3
 \end{aligned}$$

จากสมการที่ 3.3 เมื่อทำการพิจารณาหาสมการในการคำนวณเวลาในการบำบัดของเสีย โดยแยกตามชนิดของอันดับปฏิกิริยาการย่อยสลายของเสีย เป็นดังนี้

**1. พิจารณาการย่อยสลายของเสียที่อันดับศูนย์ ( $n = 0$ )**

ทำการอินทิเกรตสมการที่ 3.3 ที่เวลาเริ่มต้น ( $t$  เท่ากับ 0) จนถึงเวลาสุดท้ายที่ต้องการ ( $t$  เท่ากับ  $t$ ) และความเข้มข้นของมลสารเริ่มต้น ( $C$  เท่ากับ  $C_{AO}$ ) ไปจนถึงความเข้มข้นของมลสารที่เวลา  $t$  ( $C$  เท่ากับ  $C_A$ ) และแทนค่าอันดับของปฏิกิริยา ( $n$ ) เท่ากับศูนย์ลงในสมการที่ 3.3 ได้สมการคำนวณหาเวลาที่ใช้ในการย่อยสลายมลสารของอันดับศูนย์ เป็นดังสมการที่ 3.4

$$t = \frac{C_{AO} - C_A}{k} \quad \dots 3.4$$

**2. พิจารณาการย่อยสลายของเสียที่อันดับหนึ่ง ( $n = 1$ )**

ทำการอินทิเกรตสมการที่ 3.3 ที่เวลาเริ่มต้น ( $t$  เท่ากับ 0) จนถึงเวลาสุดท้ายที่ต้องการ ( $t$  เท่ากับ  $t$ ) และความเข้มข้นของมลสารเริ่มต้น ( $C$  เท่ากับ  $C_{AO}$ ) ไปจนถึงความเข้มข้นของมลสารที่เวลา  $t$  ( $C$  เท่ากับ  $C_A$ ) และแทนค่าอันดับของปฏิกิริยา ( $n$ ) เท่ากับหนึ่งลงในสมการที่ 3.3 สมการในการคำนวณหาเวลาที่ใช้ในการย่อยสลายมลสารของอันดับหนึ่ง เป็นดังสมการที่ 3.5

$$t = \frac{1}{k} * \ln\left(\frac{C_{AO}}{C_A}\right) \quad \dots 3.5$$

**3. พิจารณาการย่อยสลายของเสียที่อันดับสอง ( $n = 2$ )**

ทำการอินทิเกรตสมการที่ 3.3 ที่เวลาเริ่มต้น ( $t$  เท่ากับ 0) จนถึงเวลาสุดท้ายที่ต้องการ ( $t$  เท่ากับ  $t$ ) และความเข้มข้นของมลสารเริ่มต้น ( $C$  เท่ากับ  $C_{AO}$ ) ไปจนถึงความเข้มข้นของมลสารที่เวลา  $t$  ( $C$  เท่ากับ  $C_A$ ) และแทนค่าอันดับของปฏิกิริยา ( $n$ ) เท่ากับสองลงในสมการที่ 3.3 สมการในการคำนวณหาเวลาที่ใช้ในการย่อยสลายมลสารของอันดับสอง เป็นดังสมการที่ 3.6

$$t = \frac{1}{k} * \left( \frac{1}{C_A} - \frac{1}{C_{AO}} \right) \quad \dots 3.6$$

- เมื่อ  $t$  แทนระยะเวลาที่เกิดการย่อยสลายของเสีย จากความเข้มข้นเริ่มต้น ( $C$  เท่ากับ  $C_{AO}$ ) จนมีความเข้มข้นของมลสารตามที่ต้องการ ( $C$  เท่ากับ  $C_A$ ) หน่วยเวลา
- $k$  แทนค่าคงที่ของปฏิกิริยาการย่อยสลายของเสียที่อันดับต่างๆ ของการย่อยสลายของเสีย หน่วยของค่าคงที่ขึ้นกับอันดับของปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ ดังได้กล่าวมาแล้วในเอกสารบทที่ 2
- $C_{AO}$  แทนความเข้มข้นเริ่มต้นของมลสารในของเสียก่อนเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายของเสียดังกล่าว หน่วยความเข้มข้น
- $C_A$  แทนความเข้มข้นของมลสารในของเสียตามความต้องการ หรือความเข้มข้นของมลสารที่เกิดการย่อยสลายเป็นเวลาช่วงหนึ่ง หน่วยความเข้มข้น

ตัวอย่างที่ 3.1 ถังปฏิกริยาแบบกะนำมาใช้บำบัดน้ำเสียที่มีปริมาณสารอินทรีย์ ซึ่งวัดในรูปของบีโอดี มีค่า 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ภายหลังจากการบำบัดน้ำเสียดังกล่าวเป็นเวลานานถึง 6 ชั่วโมง พบว่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ซึ่งวัดในรูปของบีโอดีลดลงเหลือเพียง 90 มิลลิกรัมต่อลิตร อยากทราบว่าค่าคงที่ของอัตราเร็วของปฏิกริยานี้มีค่าเท่าใด เมื่อ อันดับของปฏิกริยาการย่อยสลายของเสียในน้ำเสีย เท่ากับอันดับหนึ่ง

วิธีทำ จากสมการที่ 3.5  $t = \frac{1}{k} * \ln\left(\frac{C_{AO}}{C_A}\right)$  .... 3.5

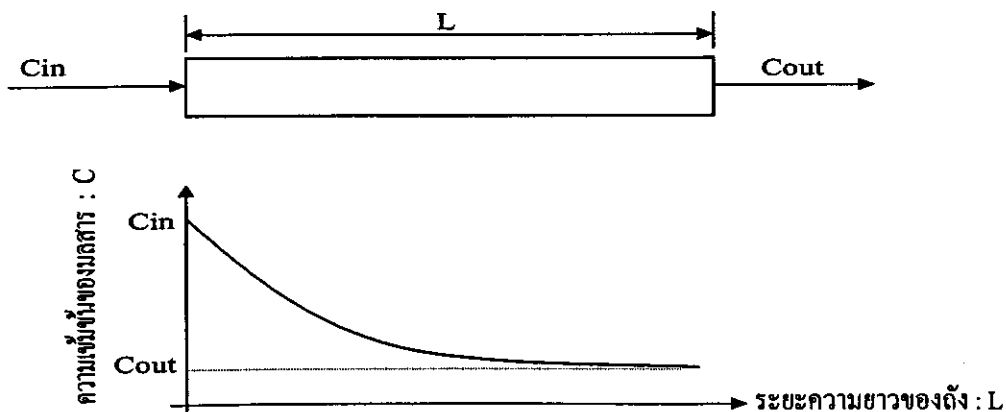
ดังนั้น ค่า  $k = \frac{1}{t} * \ln\left(\frac{C_{AO}}{C_A}\right)$  .... \*

แทนค่าต่างๆ ลงในสมการ \*

จะได้  $k = \frac{1}{6 \text{ hr}} * \ln\left(\frac{500 \text{ mg/L}}{90 \text{ mg/L}}\right)$   
 $= 0.29$  ต่อชั่วโมง

คำตอบ ค่าคงที่ของปฏิกริยาการย่อยสลายของเสียที่มีอยู่ในน้ำเสีย เท่ากับ 0.29 ต่อวัน

2. ถังปฏิกริยาแบบท่อไหล การทำงานของถังปฏิกริยาแบบนี้มีลักษณะการทำงานเหมือนกับถังปฏิกริยาแบบกะหรือแบบเท ถังปฏิกริยาแบบนี้มักมีความยาวค่อนข้างมากคล้ายกับคลองส่งน้ำหรือรางระบายน้ำ ดังนั้นความเข้มข้นของมลสารที่ความยาวต่างๆ ของถังปฏิกริยาแบบนี้มีค่าไม่เท่ากัน โดยที่จุดเริ่มต้นหรือจุดที่เกิดการปล่อยของเสียลงมา มีความเข้มข้นของมลสารมากที่สุดและความเข้มข้นของมลสารจะมีค่าลดลงตามความยาวของถัง เพราะปฏิกริยาการย่อยสลายของเสียมีค่ามากขึ้นตามระยะทางที่ของเสียเกิดการไหล เมื่อทำการเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของมลสารที่มีอยู่ในถังปฏิกริยากับความยาวของถังปฏิกริยาจะเป็นดังรูปที่ 3.4 ซึ่งจะพบว่าความเข้มข้นของมลสารที่ทางออกหรือที่ปลายถัง มีค่าน้อยที่สุด ถังปฏิกริยาแบบนี้นิยมนำไปใช้ในการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งมีความเข้มข้นของมลสารมากและมีความหนืดสูง สมการอธิบายการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของมลสารที่ลดลงไป ที่เวลาต่างๆ เป็นดังสมการที่ 3.7 หรือสมการที่ 3.8



รูปที่ 3.4 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของมลสารที่ความยาวต่างๆ ภายในถังปฏิกริยาแบบท่อไหล

$$\left[ \begin{array}{l} \text{การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น} \\ \text{ของมลสารในช่วงเวลา dt} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{l} \text{การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของมลสาร} \\ \text{เมื่อเกิดการย่อยสลายในช่วงเวลา dt} \end{array} \right] \quad \dots 3.7$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -v_x * \frac{\partial C}{\partial x} + r_c \quad \dots 3.8$$

เมื่อ  $v_x$  แทนอัตราเร็วของน้ำเสีย ภายในถังปฏิกริยาแบบท่อไหล  
หน่วยระยะทางต่อเวลา

$x$  แทนความยาวของถังปฏิกริยา หน่วยความยาว

$t$  แทนระยะเวลาที่เกิดการย่อยสลายของเสียภายในถังปฏิกริยาแบบนี้ หน่วยเวลา

การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของมลสารในช่วงเวลา dt หมายถึง อัตราการสะสมของมลสารที่เหลืออยู่ในถังปฏิกริยาแบบท่อไหล เมื่อพิจารณาว่ามลสารดังกล่าวที่เกิดขึ้นนั้นยังไม่เกิดการระบายออกจากถังปฏิกริยาแบบนี้ในช่วงที่ความเข้มข้นของมลสารมีค่ามากกว่าที่ต้องการ ในช่วงที่ความเข้มข้นของมลสารอยู่ในช่วง  $C_{AO}$  ถึง  $C_A$  ไม่มีการระบายของเสียชุดเก่าออกจากถังปฏิกริยา และป้อนของเสียชุดใหม่ลงไปจนกว่าความเข้มข้นของมลสารที่วัดได้มีค่าเท่ากับหรือน้อยกว่าความเข้มข้นของมลสารตามที่ต้องการ จึงระบายของเสียชุดเก่าออกไปและป้อนของเสียชุดใหม่ลงไปแทน เมื่อพิจารณาในสมการสมดุล เทอมของอัตราการไหลเข้าและอัตราการไหลออกของมลสารภายในถังปฏิกริยาแบบนี้ มีค่าเท่ากับศูนย์ เมื่อแทนค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของมลสารด้วยสมการที่ 3.7 ลงในสมการที่ 3.1 จะได้ดังสมการที่ 3.9

$$V * \frac{\partial C}{\partial t} = V * (-v_x * \frac{\partial C}{\partial x} + r_c) \quad \dots 3.9$$

พิจารณาการเปลี่ยนแปลงของมลสารที่สภาวะคงที่ (Steady State Condition) สมการที่ 3.9 เขียนใหม่ได้ดังสมการที่ 3.10

$$0 = V * (-v_x * \frac{\partial C}{\partial x} + r_c)$$

หรือ  $\frac{1}{v_x} * dx = \frac{dC}{r_c} \quad \dots 3.10$

ทำการอินทิเกรตสมการที่ 3.10 ตั้งแต่ที่ทางเข้าของถังปฏิกริยา ซึ่งความยาวเท่ากับศูนย์ ( $x$  เท่ากับ 0) ไปจนถึงปลายถังปฏิกริยา ซึ่งมีความยาวเท่ากับความยาวทั้งหมดของถังปฏิกริยา ดังกล่าว ( $x$  เท่ากับ  $L$ ) และที่ความเข้มข้นของมลสารที่เวลาเริ่มต้น ( $C$  เท่ากับ  $C_{AO}$ ) ไปจนถึงความเข้มข้นของมลสารที่เวลา  $t$  ( $C$  เท่ากับ  $C_A$ ) จะได้ดังสมการที่ 3.11 หรือสมการที่ 3.12 ตามลำดับ

$$\int_0^L \frac{dX}{v_x} = \int_{C_{AO}}^{C_A} \frac{dC}{r_c}$$

$$\left. \frac{1}{v_x} * X \right|_0^L = \int_{C_{AO}}^{C_A} \frac{dC}{r_c}$$

$$\frac{1}{v_x} * L = \int_{C_{AO}}^{C_A} \frac{dC}{r_c} \quad \dots 3.11$$

$$\frac{1}{v_x} * L * \frac{A}{A} = \int_{C_{AO}}^{C_A} \frac{dC}{r_c} \quad \dots 3.12$$

ปริมาตรของน้ำเสียภายในถัง (V) มีค่าเท่ากับผลคูณของความยาวของถังปฏิกริยากับพื้นที่หน้าตัดของถังปฏิกริยา เพราะฉะนั้นสมการที่ 3.12 เขียนใหม่ได้ดังสมการที่ 3.13

$$V = L * A \quad \dots 3.13$$

จากความสัมพันธ์ที่ว่า “อัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำเสียที่ไหลเข้าถัง (Q) เท่ากับ ผลคูณของพื้นที่หน้าตัดของถังปฏิกริยากับพื้นที่หน้าตัดของถังปฏิกริยา” ดังแสดงไว้ด้วยสมการที่ 3.14

$$Q = v_x * A \quad \dots 3.14$$

แทนค่าสมการที่ 3.13 และสมการที่ 3.14 ลงในสมการที่ 3.12 จะได้สมการที่ 3.15

$$\frac{V}{Q} = \int_{C_{AO}}^{C_A} \frac{dC}{r_c} \quad \dots 3.15$$

จากความสัมพันธ์ที่ว่า “ระยะเวลาในการย่อยสลายมลสาร เท่ากับอัตราส่วนของปริมาตรความจุมลสารภายในถังปฏิกริยากับอัตราการไหลเชิงปริมาตรของมลสารที่ไหลเข้าถังปฏิกริยา” ดังแสดงไว้ในสมการที่ 3.16

$$t = \frac{V}{Q} \quad \dots 3.16$$

แทนค่าสมการที่ 3.16 ลงในสมการที่ 3.15 จะได้ดังสมการที่ 3.17

$$t = \int_{C_{AO}}^{C_A} \frac{dC}{r_c} \quad \dots 3.17$$

จากสมการที่ 3.17 เวลาในการบำบัดของเสียโดยแยกตามชนิดของอันดับปฏิกิริยาการย่อยสลายของเสียของแต่ละอันดับของปฏิกิริยาการย่อยสลาย เป็นดังนี้

1. พิจารณาการย่อยสลายของเสียที่อันดับศูนย์ ( $n = 0$ )

ทำการอินทิเกรตสมการที่ 3.17 ที่ความเข้มข้นของมลสารเริ่มต้น ( $C$  เท่ากับ  $C_{AO}$ ) ที่เวลาเริ่มต้น ( $t$  เท่ากับ 0) ไปจนถึงความเข้มข้นของมลสารสุดท้าย ( $C$  เท่ากับ  $C_A$ ) ที่เวลาสุดท้ายของการย่อยสลายมลสาร ( $t$  เท่ากับ  $t$ ) และแทนค่าอันดับของปฏิกิริยา ( $n$ ) เท่ากับศูนย์ลงในสมการที่ 3.17 จะได้สมการในการคำนวณหาเวลาที่ใช้ในการย่อยสลายมลสารของอันดับศูนย์ เป็นดังสมการที่ 3.18

$$t = \frac{C_{AO} - C_A}{k} \quad \dots 3.18$$

2. พิจารณาการย่อยสลายของเสียที่อันดับหนึ่ง ( $n = 1$ )

ทำการอินทิเกรตสมการที่ 3.17 ที่ความเข้มข้นของมลสารเริ่มต้น ( $C$  เท่ากับ  $C_{AO}$ ) ที่เวลาเริ่มต้น ( $t$  เท่ากับ 0) ไปจนถึงความเข้มข้นของมลสารสุดท้าย ( $C$  เท่ากับ  $C_A$ ) ที่เวลาสุดท้ายของการย่อยสลายมลสาร ( $t$  เท่ากับ  $t$ ) และแทนค่าอันดับของปฏิกิริยา ( $n$ ) เท่ากับหนึ่งในสมการที่ 3.17 สมการในการคำนวณหาเวลาที่ใช้ในการย่อยสลายมลสารของอันดับหนึ่ง เป็นดังสมการที่ 3.19

$$t = \frac{1}{k} * \ln\left(\frac{C_{AO}}{C_A}\right) \quad \dots 3.19$$

3. พิจารณาการย่อยสลายของเสียที่อันดับสอง ( $n = 2$ )

ทำการอินทิเกรตสมการที่ 3.17 ที่ความเข้มข้นของมลสารเริ่มต้น ( $C$  เท่ากับ  $C_{AO}$ ) ที่เวลาเริ่มต้น ( $t$  เท่ากับ 0) ไปจนถึงความเข้มข้นของมลสารสุดท้าย ( $C$  เท่ากับ  $C_A$ ) ที่เวลาสุดท้ายของการย่อยสลายมลสาร ( $t$  เท่ากับ  $t$ ) และแทนค่าอันดับของปฏิกิริยา ( $n$ ) เท่ากับสอง ลงในสมการที่ 3.17 สมการในการคำนวณหาเวลาที่ใช้ในการย่อยสลายมลสารของอันดับสอง เป็นดังสมการที่ 3.20

$$t = \frac{1}{k} * \left( \frac{1}{C_A} - \frac{1}{C_{AO}} \right) \quad \dots 3.20$$

เมื่อ  $t$  แทนระยะเวลาที่เกิดการย่อยสลายของเสีย จากความเข้มข้นเริ่มต้น ( $C$  เท่ากับ  $C_{AO}$ ) จนมีความเข้มข้นของมลสารที่เหลืออยู่ตามต้องการ ( $C$  เท่ากับ  $C_A$ ) หน่วยเวลา

$k$  แทนค่าคงที่ของปฏิกิริยาการย่อยสลายของเสียที่อันดับต่างๆ ของการย่อยสลายของเสีย หน่วยของค่าคงที่ขึ้นกับอันดับของปฏิกิริยา ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในเอกสารบทที่ 2

$C_{AO}$  แทนความเข้มข้นเริ่มต้นของมลสารในของเสียก่อนเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายของเสียดังกล่าว หน่วยความเข้มข้น

$C_A$  แทนความเข้มข้นของมลสารในของเสียตามความต้องการ หรือความเข้มข้นของมลสารที่เกิดการย่อยสลายเป็นเวลา  $t$  หน่วย ความเข้มข้น

**ข้อสังเกต** เมื่อเปรียบเทียบสมการที่ใช้ในการคำนวณหาเวลาในการย่อยสลายมลสารของถังปฏิกริยาแบบกะและถังปฏิกริยาแบบท่อไหล สมการในการคำนวณหาเวลาในการย่อยสลายของเสียที่อันดับต่างๆ ของปฏิกริยาของถังปฏิกริยาทั้งสองแบบมีรูปสมการเดียวกัน หรืออาจกล่าวได้ว่าสมการในการคำนวณหาเวลาในการย่อยสลายมลสารด้วยถังปฏิกริยาแบบกะ หรือถังปฏิกริยาแบบท่อไหลเป็นสมการเดียวกันที่อันดับปฏิกริยาการย่อยสลายมลสารเดียวกัน

**ตัวอย่างที่ 3.2** จงหาขนาดของถังปฏิกริยาแบบท่อไหลว่าค่าที่ลูกบาศก์เมตร เพื่อใช้บำบัดน้ำเสียจากฟาร์มเลี้ยงสัตว์ เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียที่ไหลเข้าถังปฏิกริยาใบนี้ มีค่าเท่ากับ 350 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าคงที่ของการย่อยสลายสารอินทรีย์ เท่ากับ 0.7 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน ทำการบำบัดน้ำเสียดังกล่าวจนความเข้มข้นเหลือเพียง 52.5 มิลลิกรัมต่อลิตร

**วิธีทำ** เมื่อพิจารณาจากหน่วยของค่าคงที่ของอัตราเร็วของปฏิกริยาการย่อยสลายน้ำเสีย พบว่า อันดับของการย่อยสลายของเสียในน้ำเสียชนิดนี้ คือ อันดับศูนย์

เพราะฉะนั้นสมการที่ใช้หาเวลาในการย่อยสลายสารอินทรีย์ คือ สมการที่ 3.16

$$t = \frac{V}{Q} \quad \dots 3.16$$

ค่าเวลาที่ใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ของถังปฏิกริยาแบบท่อไหล เมื่ออันดับของปฏิกริยาเท่ากับหนึ่งหาได้จากสมการที่ 3.18

$$t = \frac{C_{A0} - C_A}{k} \quad \dots 3.18$$

เนื่องจากสมการที่ 3.16 และสมการที่ 3.18 มีค่าเท่ากัน เมื่อนำมาเทียบกัน จะได้สมการข้างล่าง

$$\frac{V}{Q} = \frac{C_{A0} - C_A}{k}$$

แทนค่าต่างๆ ลงในสมการข้างบน

$$\begin{aligned} \text{จะได้} \quad V &= 250 \text{ m}^3/\text{day} * \frac{350 - 52.5 \text{ mg/L}}{0.7 \text{ mg/L} - \text{day}} \\ &= 106,250 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

**คำตอบ** ขนาดของถังปฏิกริยาที่ใช้ เท่ากับ 106,250  $\text{m}^3$

ในบางครั้งอาจมีการคำนวณหาประสิทธิภาพของถังปฏิกริยาจากข้อมูลของน้ำเสีย ซึ่งทำการบำบัดด้วยถังปฏิกริยาแบบเดิมเป็นระยะเวลาาน สมการที่ใช้ในการทำนายประสิทธิภาพของถังปฏิกริยาหรือระบบบำบัดแต่ละแบบแสดงไว้ในสมการที่ 3.21 ช่วยลดจำนวนครั้งในการเก็บตัวอย่างน้ำเสีย เพียงแต่ทราบค่าใดค่าหนึ่ง ก็จะสามารถคำนวณหาค่าที่เหลือได้จากประสิทธิภาพของถังปฏิกริยาหรือระบบบำบัดที่ใช้ รวมทั้งยังช่วยในการทำนายจำนวนถังปฏิกริยาที่ใช้ในระบบบำบัด

$$\text{Efficiency (Eff)} = \frac{(C_{AO} - C_A)}{C_{AO}} * 100 : \text{หน่วย \%} \quad \dots 3.21$$

3. สำหรับถังปฏิกริยาแบบกวนสมบูรณ์ เนื่องจากลักษณะของการป้อนของเสียเข้าสู่ถังปฏิกริยาแบบนี้ เกิดขึ้นตลอดเวลาหรืออย่างต่อเนื่อง เทอมต่างๆ ในสมการสมดุลที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงกับเวลาจึงมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ สมการสมดุลของถังปฏิกริยาแบบนี้ เป็นดังสมการ 3.22

$$V * \frac{dC}{dt} = Q * C_{AO} - Q * C_A + V * r_c \quad \dots 3.22$$

พิจารณาการย่อยสลายของเสียที่สภาวะคงที่ (Steady State Condition) สมการที่ 3.22 อาจเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ 3.23

$$0 = Q * C_{AO} - Q * C_A + V * r_c \quad \dots 3.23$$

จากสมการที่ 3.16  $t = \frac{V}{Q}$  ... 3.16

ดังนั้น  $Q = \frac{V}{t}$  .... 3.16\*

แทนค่า Q จากสมการที่ 3.16\* ลงในสมการที่ 3.23 จะได้ดังสมการที่ 3.24

$$0 = \frac{V}{t} * C_{AO} - \frac{V}{t} * C_A + V * r_c \quad \dots 3.24$$

ทำการจัดรูปสมการที่ 3.24 ใหม่ จะได้ดังสมการที่ 3.25

ดังนั้น  $t = \frac{(C_{AO} - C_A)}{r_c}$  .... 3.25

จากสมการที่ 3.25 พิจารณาหาสมการในการคำนวณเวลาในการบำบัดของเสีย โดยแยกตามชนิดของอันดับปฏิกริยาการย่อยสลายของเสีย จะเป็นดังนี้

1. พิจารณาการย่อยสลายของเสียที่อันดับศูนย์ (n = 0)

ทำการอินทิเกรตสมการที่ 3.25 ที่ความเข้มข้นของมลสารเริ่มต้น (C เท่ากับ  $C_{AO}$ ) ที่เวลาเริ่มต้น (t เท่ากับ 0) ไปจนถึงความเข้มข้นของมลสารสุดท้าย (C เท่ากับ  $C_A$ ) ที่เวลาสุดท้ายของการย่อยสลายมลสาร (t เท่ากับ t) และแทนค่าอันดับของปฏิกริยา(n) เท่ากับศูนย์ลงในสมการที่ 3.25 สมการในการคำนวณหาเวลาที่ใช้ในการย่อยสลายมลสารของอันดับศูนย์ เป็นดังสมการที่ 3.26

$$t = \frac{C_{AO} - C_A}{k} \quad \dots 3.26$$



## 2. พิจารณาการย่อยสลายของเสียที่อันดับหนึ่ง ( $n = 1$ )

ทำการอินทิเกรตสมการที่ 3.25 ที่ความเข้มข้นของมลสารเริ่มต้น ( $C$  เท่ากับ  $C_{AO}$ ) ที่เวลาเริ่มต้น ( $t$  เท่ากับ 0) ไปจนถึงความเข้มข้นของมลสารสุดท้าย ( $C$  เท่ากับ  $C_A$ ) ที่เวลาสุดท้ายของการย่อยสลายมลสาร ( $t$  เท่ากับ  $t$ ) และแทนค่าอันดับของปฏิกิริยา ( $n$ ) เท่ากับหนึ่งลงในสมการที่ 3.25 สมการในการคำนวณหาเวลาที่ใช้ในการย่อยสลายมลสารของอันดับหนึ่ง เป็นดังสมการที่ 3.27

$$t = \frac{1}{k} * \ln \left( \frac{C_{AO}}{C_A} - 1 \right) \quad \dots 3.27$$

## 3. พิจารณาการย่อยสลายของเสียที่อันดับสอง ( $n = 2$ )

ทำการอินทิเกรตสมการที่ 3.25 ที่ความเข้มข้นของมลสารเริ่มต้น ( $C$  เท่ากับ  $C_{AO}$ ) ที่เวลาเริ่มต้น ( $t$  เท่ากับ 0) ไปจนถึงความเข้มข้นของมลสารสุดท้าย ( $C$  เท่ากับ  $C_A$ ) ที่เวลาสุดท้ายของการย่อยสลายมลสาร ( $t$  เท่ากับ  $t$ ) และแทนค่าอันดับของปฏิกิริยา ( $n$ ) เท่ากับสองลงในสมการที่ 3.25 สมการในการคำนวณหาเวลาที่ใช้ในการย่อยสลายมลสารของอันดับสอง เป็นดังสมการที่ 3.28

$$t = \frac{1}{k * C_A} * \left( \frac{C_{AO}}{C_A} - 1 \right) \quad \dots 3.28$$

เมื่อ	$t$	แทนเวลาที่เกิดการย่อยสลายของเสีย จากความเข้มข้นเริ่มต้น ( $C$ เท่ากับ $C_{AO}$ ) จนมีความเข้มข้นของมลสารเหลือตามความต้องการ ( $C$ เท่ากับ $C_A$ )
	$k$	แทนค่าคงที่ของปฏิกิริยาการย่อยสลายของเสียที่อันดับต่างๆ ของการย่อยสลายของเสีย หน่วยของค่าคงที่ขึ้นกับอันดับของปฏิกิริยา ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในเอกสารบทที่ 2
	$C_{AO}$	แทนความเข้มข้นเริ่มต้นของมลสารในของเสีย ก่อนเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายของเสียดังกล่าว หน่วยความเข้มข้น
	$C_A$	แทนความเข้มข้นของมลสารในของเสียตามความต้องการ หรือความเข้มข้นของมลสารที่เกิดการย่อยสลายเป็นเวลาช่วงหนึ่ง (เท่ากับ $t$ ) หน่วยความเข้มข้น

สมการคำนวณหาเวลาในการย่อยสลายมลสารด้วยถังปฏิกิริยาทั้งสามแบบดังที่กล่าวมาแล้ว ที่อันดับของปฏิกิริยาเท่ากับศูนย์, หนึ่ง และสอง ตามลำดับ แสดงไว้ในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงสมการในการคำนวณหาเวลาในการย่อยสลายผสมสารด้วยถังปฏิกรณ์แบบต่างๆ ที่อันดับของปฏิกรณ์เท่ากับศูนย์, หนึ่ง และสอง ตามลำดับ

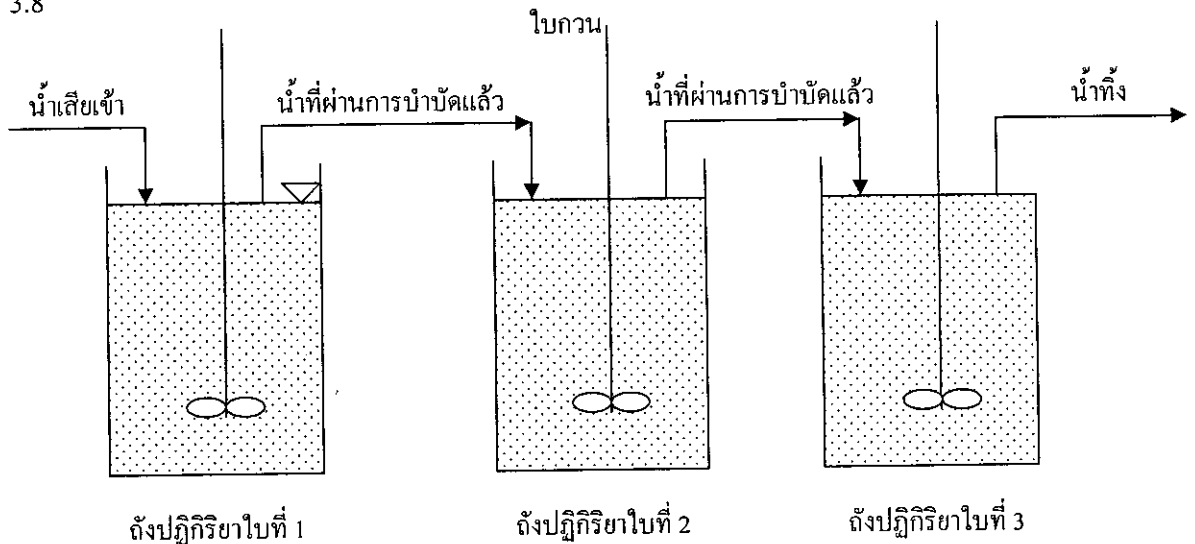
อันดับของ ปฏิกรณ์การย่อยสลาย ของเสีย	สมการหาเวลาที่ใช้ในการย่อยสลายของเสีย (t)		
	ชนิดของถังปฏิกรณ์		
	แบบกะ	แบบท่อไหล	แบบกวนสมบูรณ์
0	$\frac{C_{AO} - C_A}{k}$	$\frac{C_{AO} - C_A}{k}$	$\frac{C_{AO} - C_A}{k}$
1	$\frac{1}{k} * \ln\left(\frac{C_{AO}}{C_A}\right)$	$\frac{1}{k} * \ln\left(\frac{C_{AO}}{C_A}\right)$	$\frac{1}{k} * \left(\frac{C_{AO}}{C_A} - 1\right)$
2	$\frac{1}{k} * \left(\frac{1}{C_A} - \frac{1}{C_{AO}}\right)$	$\frac{1}{k} * \left(\frac{1}{C_A} - \frac{1}{C_{AO}}\right)$	$\frac{1}{k * C_A} * \left(\frac{C_{AO}}{C_A} - 1\right)$

**ประเภทของการต่อถังปฏิกรณ์** บางครั้งการใช้ถังปฏิกรณ์แบบเพียงหนึ่งใบเพื่อบำบัดสารอินทรีย์ที่มีความเข้มข้นมากอาจทำได้น้ำทิ้งที่มีค่ามากกว่ามาตรฐาน ซึ่งไม่เพียงพอต่อการบำบัดสารอินทรีย์ในเวลากการบำบัดด้วยถังปฏิกรณ์เพียง 1 ใบ จึงมีความจำเป็นในการใช้ถังปฏิกรณ์ในการบำบัดน้ำเสียมากกว่า 1 ใบขึ้นไป เพื่อให้ได้น้ำทิ้งที่มีคุณภาพตามมาตรฐานน้ำทิ้ง

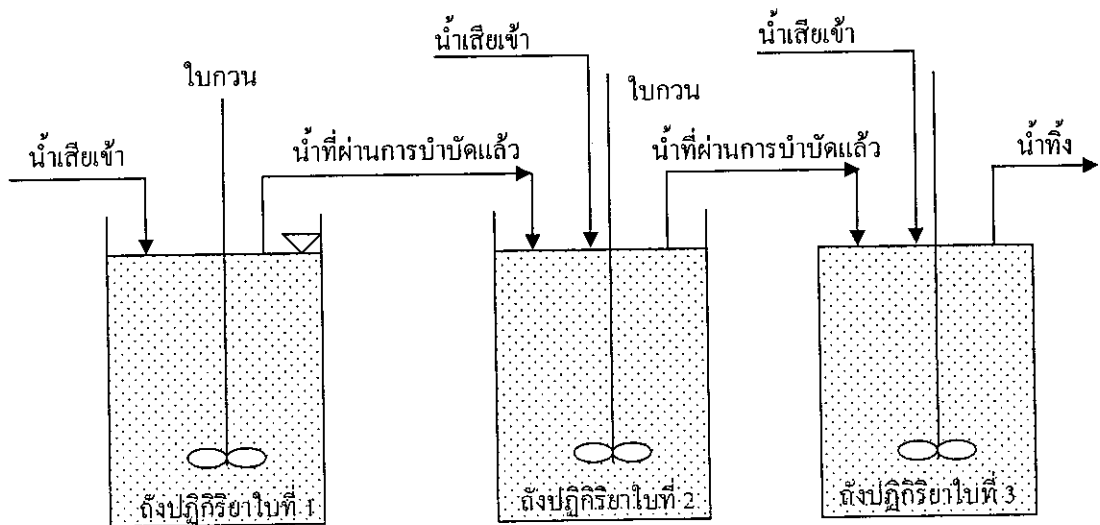
ระบบการต่อถังปฏิกรณ์มีอยู่ 2 แบบ คือ การต่อถังปฏิกรณ์แบบอนุกรม (Series System) และการต่อถังปฏิกรณ์แบบขนาน (Parallel Connection System)

1. การต่อถังปฏิกรณ์แบบอนุกรม เป็นการต่อถังปฏิกรณ์ในการบำบัดน้ำเสียที่เรียงต่อกันซึ่งมีลักษณะคล้ายกับต่อแถวของถังปฏิกรณ์ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.5 ซึ่งเป็นระบบการต่อถังปฏิกรณ์แบบอนุกรมธรรมดา การทำงานของการบำบัดน้ำเสียด้วยถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์ในรูปที่ 3.5 เมื่อทำการป้อนน้ำเสียชุดแรกเข้าถังปฏิกรณ์ใบที่ 1 และปล่อยให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำเสียไปสักช่วงเวลาหนึ่ง จากนั้นทำการเติมน้ำเสียชุดใหม่ ลงในถังปฏิกรณ์ใบที่ 1 ปริมาณน้ำเสียชุดใหม่รวมกับปริมาณของน้ำเสียชุดเก่ามีค่ามากกว่าความจุของถังปฏิกรณ์ใบที่ 1 เกิดการไหลล้นออกจากถังปฏิกรณ์ใบที่ 1 ไปยังถังปฏิกรณ์ใบที่ 2 และเกิดการย่อยสลายของเสียต่อในถังปฏิกรณ์ใบที่ 2 ในช่วงเวลาหนึ่งภายในถังใบที่ 2 เมื่อเติมของเสียชุดใหม่ที่ถังปฏิกรณ์ใบที่ 1 อีกครั้ง ปริมาณของน้ำเสียทั้งหมดมีค่ามากกว่าความจุของถังปฏิกรณ์ใบที่ 1 จะไหลล้นไปยังถังปฏิกรณ์ใบที่ 2 และเมื่อปริมาณของน้ำเสียชุดเก่ารวมกับปริมาณของน้ำเสียชุดใหม่ภายในถังปฏิกรณ์ใบที่ 2 มีค่ามากกว่าความจุของถังปฏิกรณ์ใบที่ 2 น้ำเสียจะไหลล้นออกจากถังปฏิกรณ์ใบที่ 2 ไปยังถังปฏิกรณ์ใบที่ 3 เมื่อทำการเติมน้ำเสียลงในถังปฏิกรณ์ใบที่ 1 ปริมาณของน้ำเสียทั้งหมดภายในถังปฏิกรณ์ใบที่ 1 มีค่ามากกว่าความจุของถังปฏิกรณ์ใบที่ 1 จะเกิดการไหลล้นไปยังถังปฏิกรณ์ใบที่ 2 และไหลล้นไปยัง

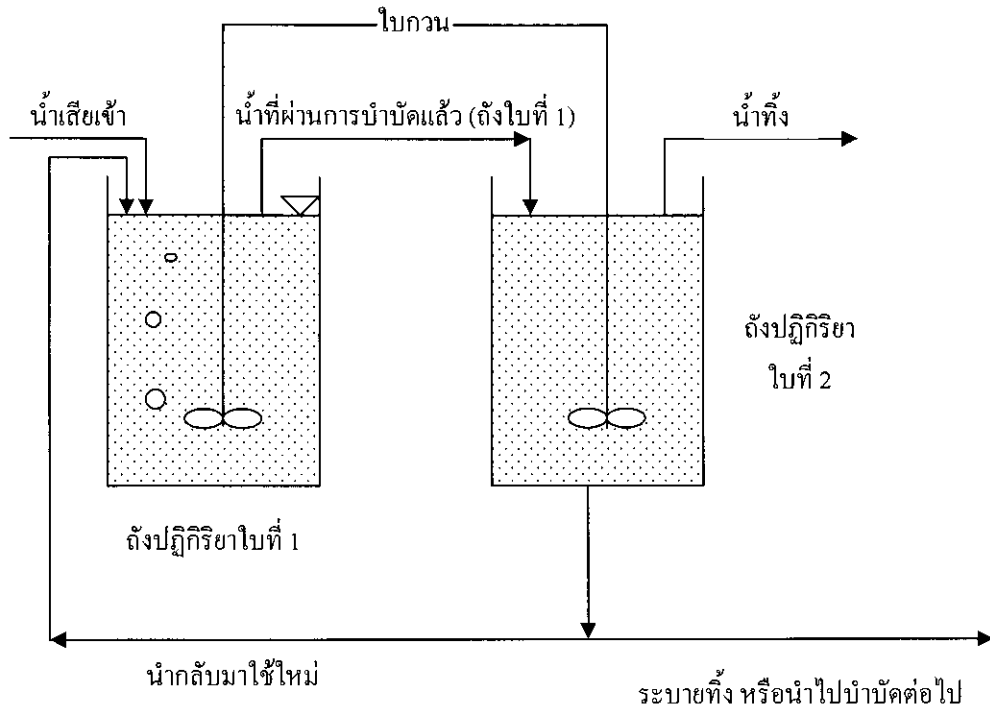
ถังปฏิกริยาใบที่ 3 ต่อไปตามลำดับ และน้ำเสียที่ไหลล้นออกจากถังปฏิกริยาใบที่ 3 หากได้คุณภาพตามมาตรฐานน้ำทิ้งสามารถระบายทิ้งลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ ดังนั้นเมื่อทำการเติมน้ำเสียชุดใหม่ลงในถังปฏิกริยาใบที่ 1 น้ำเสียจะเกิดการไหลในลักษณะดังที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น นอกจากนี้แล้วในการออกแบบระบบการบำบัดของเสีย อาจมีการแบ่งของเสียมาใส่ในถังปฏิกริยาใบที่ 2 และใบที่ 3 ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.6 ซึ่งจะช่วยให้ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียมีค่ามากขึ้นด้วย นอกจากนี้อาจมีการเพิ่มประสิทธิภาพ อาจทำได้โดยการเพิ่มใบกวนเข้าไปในถังปฏิกริยาแต่ละใบ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.7 และหากต้องการลดระยะเวลาในการบำบัดน้ำเสียลงมากกว่าเดิม ทำได้โดยการนำเอาน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วในถังปฏิกริยาใบสุดท้ายนำกลับมาใช้ใหม่ที่ถังปฏิกริยาใบที่ 1 หรือออกแบบระบบบำบัดน้ำเสีย โดยนำเอาน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วจากถังปฏิกริยาใบสุดท้ายมาผสมกับน้ำเสียชุดใหม่ของถังปฏิกริยาแต่ละใบก่อนทำการบำบัดน้ำเสียด้วยถังปฏิกริยาแต่ละใบ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.8



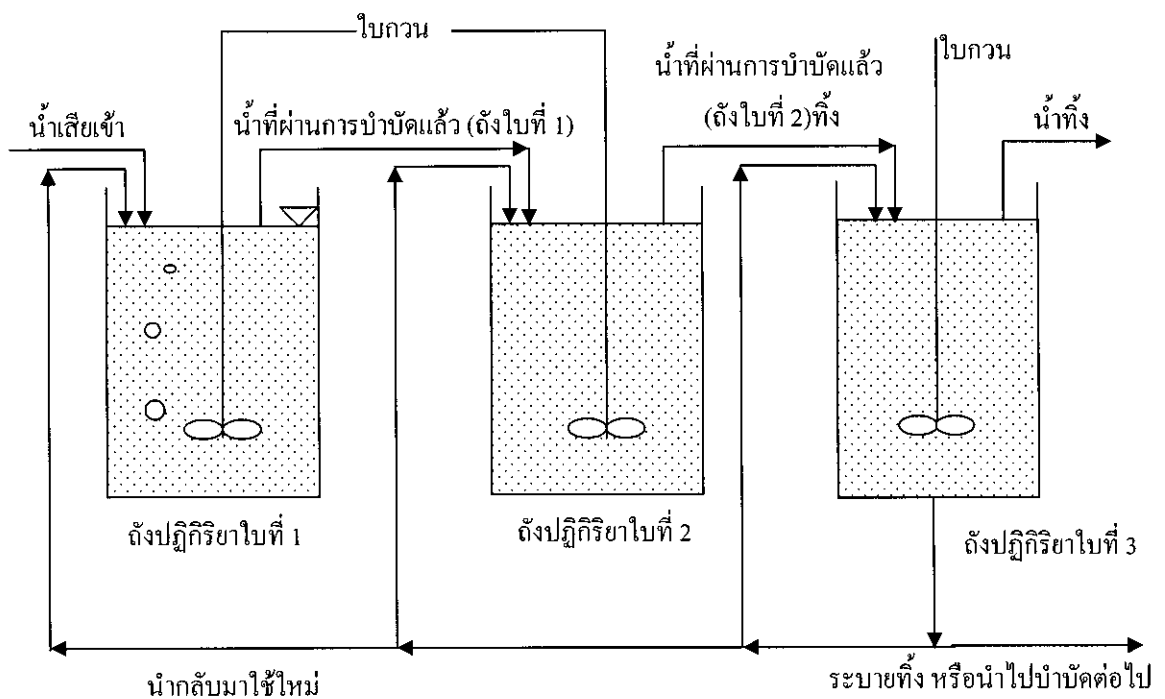
รูปที่ 3.5 แสดงการต่อถังปฏิกริยาแบบอนุกรม ซึ่งมีการป้อนน้ำเสียเข้าถังใบที่ 1



รูปที่ 3.6 แสดงการต่อถังปฏิกริยาแบบอนุกรมที่มีการป้อนน้ำเสียเข้าถังปฏิกริยาทุกใบ

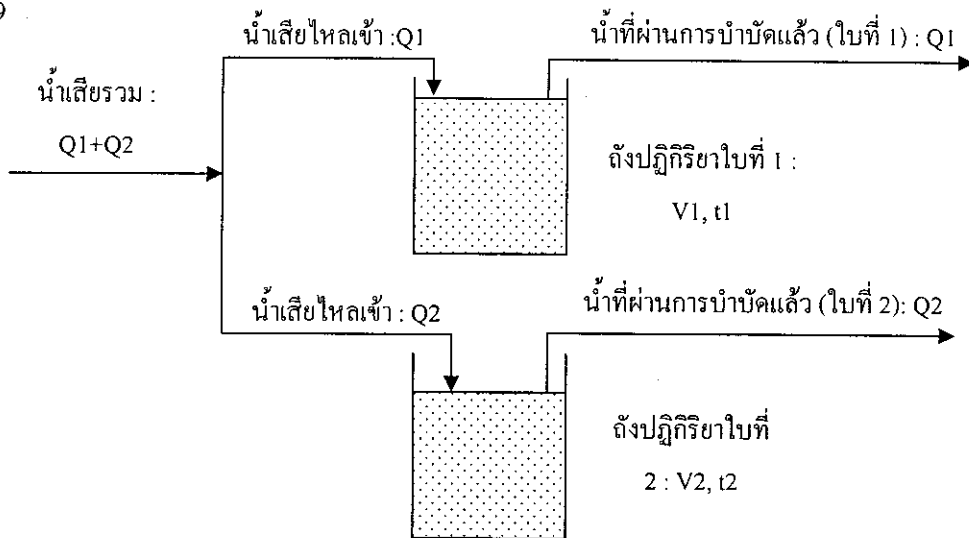


รูปที่ 3.7 แสดงการต่อถังปฏิกรณ์แบบอนุกรมจำนวน 2 ใบ ที่มีการดึงเอาน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วกลับมาใช้ใหม่



รูปที่ 3.8 แสดงการต่อถังปฏิกรณ์แบบอนุกรมที่มีการดึงเอาน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วกลับมาใช้ใหม่เข้าที่ถังปฏิกรณ์ใบที่ 1, ใบที่ 2 และใบที่ 3 ตามลำดับ

การต่อถังปฏิกริยาแบบขนาน (Parallel Connection System) มักใช้สำหรับการบำบัดของเสียที่มีปริมาณมากกว่าความจุของถังปฏิกริยาที่ใช้ โดยทำการแบ่งปริมาณของเสียที่ไหลเข้าถังปฏิกริยาแต่ละใบ ซึ่งอาจมีค่าเท่ากันหรือไม่ก็ได้ โดยพิจารณาจากพื้นที่ที่มีอยู่ในถังระบบบำบัดแต่ละใบ จากนั้นของเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วอาจมีการนำมาผสมกัน ก่อนทำการระบายทิ้งลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะต่อไป ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แสดงการต่อถังปฏิกริยาแบบขนาน

สมการที่ใช้ในการคำนวณของการต่อถังปฏิกริยาแบบอนุกรม เป็นดังสมการที่ 3.25 ถึงสมการที่ 3.27 โดยความเข้มข้นของมลสารที่ออกจากถังใบที่ 1 มีค่าเท่ากับความเข้มข้นของมลสารที่ไหลเข้าใบที่ 2 และความเข้มข้นของมลสารที่ไหลออกจากถังใบที่ 2 มีค่าเท่ากับความเข้มข้นของมลสารที่ไหลเข้าใบที่ 3 และการไหลของน้ำเสียจากถังใบแรกไปยังใบสุดท้าย จะพิจารณาความเข้มข้นของน้ำเสียที่ไหลออกจากใบก่อนและส่วนที่ไหลเข้าถังใบหลังที่พิจารณาอยู่ เป็นไปใบลักษณะนี้จนกว่าจะครบถังปฏิกริยาทุกใบ

จากรูปที่ 3.5 ถังปฏิกริยาที่ใช้เป็นแบบกวนผสมและสมมติว่าอันดับของการย่อยสลายสารอินทรีย์ในของเสียเป็นอันดับหนึ่ง ซึ่งประกอบไปด้วยถังปฏิกริยาเพียง 2 ใบ การหาความเข้มข้นของมลสารที่ออกจากถังปฏิกริยาแต่ละใบ ต้องพิจารณาจากถังปฏิกริยาแต่ละใบ

พิจารณาถังปฏิกริยาใบที่ 1

$$\text{จากสมการที่ 3.27} \quad t = \frac{1}{k} * \left( \frac{C_{AO}}{C_A} - 1 \right) \quad \dots 3.27$$

อาจเขียนสมการที่ 3.27 ใหม่ จะได้ดังสมการที่ 3.28

$$\frac{C_{A,1}}{C_{A0,1}} = \frac{1}{1+k*t_1} \quad \dots 3.28$$

ในทำนองเดียวกัน เมื่อพิจารณาที่ถังปฏิกริยาใบที่ 2 สมการที่ใช้ในการคำนวณเป็นดังสมการที่ 3.29 หรือสมการที่ 3.30

$$\frac{C_{A,2}}{C_{AO,2}} = \frac{1}{1+k*t_2} \quad \dots 3.29$$

หรือ

$$\frac{C_{A,2}}{C_{A,1}} = \frac{1}{1+k*t_2} \quad \dots 3.30$$

ในกรณีที่ขนาดของถังปฏิกริยามีค่าเท่ากัน ( $V_1$  เท่ากับ  $V_2$  เท่ากับ  $V$ ) เมื่ออัตราการไหลของของน้ำเสียที่ไหลเข้าถังปฏิกริยาแต่ละใบมีค่าเท่ากัน หรืออาจกล่าวได้ว่าเวลาในการบำบัดหรือเวลาในการกักเก็บน้ำเสีย มีค่าเท่ากัน ( $t_1$  เท่ากับ  $t_2$  เท่ากับ  $t$ ) เมื่อนำเอาสมการที่ 3.28 คูณกับสมการที่ 3.30 จะได้ดังสมการที่ 3.31

$$\begin{aligned} \frac{C_{A,1}}{C_{AO,1}} * \frac{C_{A,2}}{C_{A,1}} &= \frac{1}{1+k*t} * \frac{1}{1+k*t} \\ \frac{C_{A,2}}{C_{AO,1}} &= \left( \frac{1}{1+k*t} \right)^2 \end{aligned} \quad \dots 3.31$$

กรณีทำการต่อถังแบบอนุกรมจำนวน  $n$  ใบ ซึ่งมีขนาดเท่ากันและอัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำเสียที่ไหลเข้าถังปฏิกริยาแต่ละใบมีค่าเท่ากัน เวลาในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียของถังปฏิกริยาแต่ละใบมีค่าเท่ากัน สมการในการคำนวณหาความเข้มข้นของมลสารที่ไหลออกจากถังปฏิกริยาใบสุดท้าย เมื่อเทียบกับถังปฏิกริยาใบที่ 1 เป็นดังสมการที่ 3.32 และเวลาในการย่อยสลายของเสียของถังปฏิกริยาแต่ละใบ เป็นดังสมการที่ 3.33

$$\frac{C_{A,n}}{C_{AO,1}} = \left( \frac{1}{1+k*t} \right)^n \quad \dots 3.32$$

$$t = \frac{1}{k} * \left[ \left( \frac{C_{AO}}{C_{A,n}} \right)^{1/n} - 1 \right] \quad \dots 3.33$$

ตัวอย่างที่ 3.3 ถังบำบัดแบบกวนสมบูรณ์จำนวน 1 ใบ ถูกใช้ในการบำบัดของเสียจากฟาร์ม โดยพบว่า อันดับของปฏิกิริยาการย่อยสลายของเสียจากฟาร์มเป็นอันดับที่ 2 ค่าคงที่ของอัตราเร็วของปฏิกิริยาการย่อยสลายของเสีย เท่ากับ 0.1 ลิตรต่อมิลลิกรัมต่อวัน ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสียที่ไหลเข้าถึงปฏิกิริยา ซึ่งวัดในรูปของบีโอดีในน้ำเสีย เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ถึงปฏิกิริยาใบนี้รับน้ำเสียได้เพียง 400 ลิตร วัตถุประสงค์การไหลเชิงปริมาตรของน้ำเสียที่ไหลเข้าถึงปฏิกิริยาได้เท่ากับ 1,600 ลิตรต่อวัน จงคำนวณหาความเข้มข้นของน้ำเสียที่ออกจากถังปฏิกิริยาใบนี้ ในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร

วิธีทำ จากสมการที่ 3.16 
$$t = \frac{V}{Q} \quad \dots 3.16$$

และจากสมการที่ 3.28 
$$t = \frac{1}{k \cdot C_A} * \left( \frac{C_{AO}}{C_A} - 1 \right) \quad \dots 3.28$$

สมการที่ 3.16 และสมการที่ 3.28 มีค่าเท่ากัน เมื่อนำเทียบเท่ากัน จะได้ดังสมการที่ 3.28\*

$$\frac{V}{Q} = \frac{1}{k \cdot C_A} \left( \frac{C_{AO}}{C_A} - 1 \right) \quad \dots 3.28^*$$

แทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ 3.28\*

จะได้ 
$$\frac{400L}{1,600 \text{ L/day}} = \frac{1}{0.1 \text{ L/mg-day} * C_A} * \left( \frac{100 \text{ mg/L}}{C_A} - 1 \right)$$

$$C_A^2 + 40 * C_A - 4,000 = 0 \quad \dots 3.28^{**}$$

แก้สมการที่ 3.28\*\* ซึ่งเป็นสมการกำลังสอง (Quadratic Equation) ด้วยวิธีของสมการกำลังสอง

จากสมการกำลังสอง 
$$a * X^2 + b * X + c = 0 \quad \dots 3.34$$

คำตอบของสมการที่ 3.34 คือ 
$$X = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4 * a * c}}{2 * a}$$

เมื่อเทียบสมการที่ 3.28\* กับสมการที่ 3.34

ค่า a เท่ากับ 1, ค่า b เท่ากับ 40, ค่า c เท่ากับ 4,000 และค่า X เท่ากับ  $C_A$  หน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร

แทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ 3.34

จะได้ 
$$C_A = 46.3 \text{ mg/L}, -86.3 \text{ mg/L}$$

เลือกเฉพาะคำตอบที่เป็นบวก ดังนั้นค่า  $C_A$  เท่ากับ 46.3 mg/L

คำตอบ ความเข้มข้นของมลสารที่วัดในรูปของบีโอดี เมื่อผ่านการบำบัดแล้ว มีค่าเท่ากับ 46.3 mg/L

สมการในการคำนวณหาความเข้มข้นของมลสารที่ผ่านการบำบัดแล้ว โดยทำการต่อถังปฏิกิริยาในลักษณะขนานกันหรือแบบขนาน สมการที่ใช้ในการหาเวลาในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียที่อันดับต่างๆ ของปฏิกิริยาประกอบการคำนวณ เป็นดังสมการที่ 3.16

กรณีที่ทำการต่อถังปฏิกริยาแบบที่มีการดึงเอาน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่ การบำบัดน้ำเสียด้วยระบบบำบัดแบบนี้เป็นที่นิยมกันมากในการออกแบบ เพราะประหยัดทั้งค่าใช้จ่ายหลายด้าน อาทิ ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบบำบัดและพื้นที่ในการก่อสร้าง ตลอดจนเป็นการใช้ทรัพยากรธรรมชาติที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด สมการที่ใช้คำนวณเป็นไปตามสมการที่ 3.35 ซึ่งหาได้จากสมการสมดุลมวลสารที่สภาวะคงที่ และพิจารณาที่อันดับของปฏิกริยาการย่อยสลายเท่ากับหนึ่ง การต่อถังปฏิกริยากวนผสมแบบที่มีการดึงเอาน้ำเสียที่บำบัดแล้วกลับมาใช้ใหม่ แสดงไว้ในรูปที่ 3.10

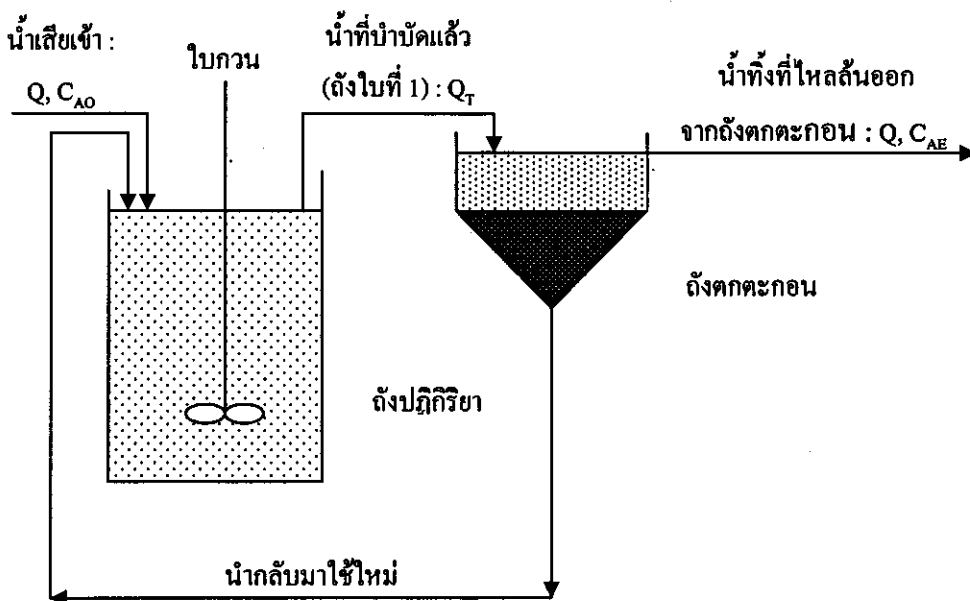
$$Q * C_{AO} + Q_R * C_A = C_A * (Q + Q_R) + k * C_A * V$$

$$\frac{V}{Q} = \frac{1}{k * C_A} * (C_{AO} - C_A) \quad \dots 3.35$$

จากสมการที่ 3.16  $t = \frac{V}{Q} \quad \dots 3.16$

เมื่อนำเอาสมการที่ 3.35 และสมการที่ 3.16 มาเทียบเท่ากัน จะได้ดังสมการที่ 3.36

$$t = \frac{1}{k * C_A} * (C_{AO} - C_A) \quad \dots 3.36$$



รูปที่ 3.10 แสดงถังปฏิกริยาที่มีการกวนผสม และมีการดึงเอาน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่

ปริมาณน้ำเสียที่ดึงกลับมาใช้ใหม่ที่จุดแรกหรือที่ตำแหน่งใดของระบบบำบัด ช่วยให้ประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียมีค่ามากขึ้นและยังช่วยลดระยะเวลาในการบำบัดของเสียภายในระบบลงไปด้วย เมื่อคิดปริมาณน้ำเสียที่นำกลับมาใช้เทียบกับปริมาณน้ำเสียชุดใหม่ที่ป้อนเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสีย ค่าดังกล่าวเรียกว่า อัตราส่วนของการนำเอาน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่ ( $\alpha$ ) ดังแสดงไว้ในสมการที่ 3.37

$$\alpha = \frac{Q_R}{Q} \quad \dots 3.37$$



เมื่อ $\alpha$	แทนอัตราส่วนของการนำเอาน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ มีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 150%
$Q_R$	แทนอัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วเพื่อนำมากลับมาใช้ใหม่ หน่วยของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำเสีย
$Q$	แทนอัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำเสียที่นำมาบำบัด มีหน่วยเป็นหน่วยของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำเสีย

ตัวอย่างที่ 3.4 ระบบบำบัดน้ำเสียของฟาร์มเลี้ยงสัตว์แห่งหนึ่งประกอบไปด้วยถังกวน (หมายเลข 1) และถังตกตะกอน(หมายเลข 2) ดังรูปที่ 3.10 วัดความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในรูปของค่าบีโอดี เท่ากับ 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ความจุของถังกวนที่ใช้ เท่ากับ 1,500 ลิตร อัตราการไหลกลับของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วออกจากถังตกตะกอน แทนด้วยหมายเลขที่ 2 เท่ากับ 500 ลิตรต่อวินาที และประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำเสียภายในถังกวน เท่ากับ 80% อัตราการไหลกลับของน้ำเสียที่ไหลกลับออกจากถังกวน เท่ากับ 750 ลิตรต่อวินาที อยากรทราบว่า

1. ระยะเวลาในการบำบัดน้ำเสียในถังกวน มีค่ากี่วัน
2. ความเข้มข้นของน้ำเสีย เมื่อผ่านการบำบัดในถังกวน มีค่ากี่มิลลิกรัมต่อลิตร
3. ค่าคงที่ของอัตราย่อยสลายสารอินทรีย์ของถังกวน มีค่ากี่ต่อวัน
4. อัตราส่วนของการนำน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วกลับมาใหม่ มีค่ากี่เปอร์เซ็นต์

**วิธีทำ** 1. จากสมการที่ 3.16  $t = \frac{V}{Q}$  .... 3.16

แทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ 3.16

จะได้  $t = \frac{1500 \text{ ลิตร}}{750 \text{ ลิตรต่อวินาที}}$   
 $= 2 \text{ วัน}$

2. จากสมการที่ 3.21  $\text{Efficiency (Eff)} = \frac{(C_{AO} - C_A)}{C_{AO}} * 100 : \text{หน่วย \%}$  .... 3.21

แทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ 3.21

จะได้  $80\% = \frac{(10,000 \text{ mg/L} - C_A)}{10,000 \text{ mg/L}} * 100$

เพราะฉะนั้น  $C_A = 10,000 \text{ mg/L} - 80\% * 10,000 \text{ mg/L}$   
 $= 2,000 \text{ mg/L}$

$$3. \text{ จากสมการที่ 3.36 } t = \frac{1}{k * C_A} * (C_{AO} - C_A) \quad \dots 3.36$$

แทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ 3.36

$$\text{จะได้ } 2 \text{ วัน} = \frac{1}{k * 2,000 \text{ mg/L}} * (10,000 - 2,000) : \text{mg/L}$$

$$k = \frac{1}{2 \text{ day} * 2,000 \text{ mg/L}} * (10,000 - 2,000) : \text{mg/L}$$

$$= 4 \text{ per day}$$

4. พิจารณาสมการสมดุลของอัตราการไหลเชิงปริมาตรรอบถังตะกอน จะได้ดังสมการข้างล่าง

$$Q + Q_R = Q(1 + \alpha)$$

$$= Q + Q_R$$

$$= Q_T$$

เพราะฉะนั้น  $Q_R = Q_T - Q$

$$= 750 \text{ ลิตรต่อวัน} - 500 \text{ ลิตรต่อวัน}$$

$$= 250 \text{ ลิตรต่อวัน}$$

จากสมการที่  $\alpha = \frac{Q_R}{Q} \quad \dots 3.37$

แทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ 3.37

$$\text{จะได้ } \alpha = \frac{250 \text{ ลิตรต่อวัน}}{500 \text{ ลิตรต่อวัน}}$$

$$= 0.50 * 100$$

$$= 50\%$$

**คำตอบ** 1. ระยะเวลาในการบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ภายในถังกวน มีค่าเท่ากับ 2 วัน

2. ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสียที่ไหลล้นออกจากถังกวน มีค่าเท่ากับ 2,000 mg/L

3. ค่าคงที่ของการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียดังกล่าว ภายในถังกวน มีค่าเท่ากับ 4 ต่อวัน

4. อัตราส่วนของการนำน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว นำกลับมาใช้ใหม่ มีค่าเท่ากับ 50%

## แบบฝึกหัดเพิ่มความเข้าใจ

1. ดังปฏิกิริยาแบบกะโปกหนึ่งถูกนำมาใช้เพื่อบำบัดน้ำเสีย ซึ่งมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในรูปของบีโอดี เท่ากับ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร ภายหลังจากการบำบัดน้ำเสียในดังปฏิกิริยาเป็นเวลา 6 ชั่วโมง ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในรูปของบีโอดีลดลงเหลือเพียง 90 มิลลิกรัมต่อลิตร จงคำนวณหาค่าคงที่ของอัตราเร็วของปฏิกิริยานี้ เมื่ออันดับของปฏิกิริยา คือ อันดับสอง และอันดับศูนย์ตามลำดับ พร้อมทั้งหน่วยของค่าคงที่ดังกล่าวด้วย
2. มลสาร A นำมาทดสอบหาค่าคงที่ของการย่อยสลายสาร A ภายในห้องปฏิบัติการแห่งหนึ่งด้วยดังปฏิกิริยาแบบกวนสมบูรณ์ เมื่อเวลาผ่านไป 10 นาที ความเข้มข้นของสาร A ลดลง 50% อยากรทราบหาค่าคงที่ของปฏิกิริยานี้มีค่าเท่าใด และมีหน่วยเป็นอย่างไร กำหนดให้อันดับของปฏิกิริยาการย่อยสลายสาร A คือ อันดับหนึ่ง
3. ดังปฏิกิริยาแบบกะโปกหนึ่งนำมาใช้บำบัดของเสียที่เกิดขึ้นในฟาร์มนกกระจอกเทศแห่งหนึ่ง วัดความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในรูปของบีโอดี ได้เท่ากับ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นสุดท้ายของของเสียที่ออกจากระบบบำบัดดังกล่าว มีค่าเท่ากับ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งจากการทดลองใช้เวลาในการลดความเข้มข้นจากความเข้มข้นเดิมจนเหลือความเข้มข้นสุดท้าย ใช้เวลาเพียง 10 นาที กำหนดให้อันดับการย่อยสลายสารอินทรีย์ เท่ากับ อันดับหนึ่ง อยากรทราบหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์นี้มีค่าเท่าใด และมีหน่วยเป็นอะไร
4. ของเสียจากฟาร์มแห่งหนึ่ง วัดความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในรูปของค่าบีโอดีได้ 180 มิลลิกรัมต่อลิตร จงคำนวณหาค่าบีโอดีที่ปลายน้ำ ซึ่งอยู่ห่างจากจุดที่ทำการปล่อยของเสีย เป็นระยะ 10 กิโลเมตร เมื่อความเร็วของของเสียที่ไหลในแหล่งน้ำ มีค่า 0.4 เมตรต่อวินาที และค่าคงที่ของอัตราเร็ว มีค่า 0.30 ต่อวัน และอัตราการไหลของน้ำเสีย วัดได้  $640,000 \text{ m}^3/\text{day}$
5. น้ำเสียจากฟาร์มหมูวัดความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในรูปของบีโอดี เท่ากับ 90 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเร็วเฉลี่ยที่น้ำเสียที่ไหลจากจุดเริ่มต้นมาจนถึงจุดสุดท้าย ก่อนไหลลงสู่แม่น้ำที่อยู่ใกล้ๆ เท่ากับ 40 เมตรต่อชั่วโมง ระยะทางที่น้ำเสียดังกล่าวไหลในช่วงที่ทำการวัดความเร็ว เท่ากับ 15 กิโลเมตร ในขณะที่น้ำเสียเกิดการไหลในช่วงดังกล่าว เกิดการย่อยสลายของเสียด้วยอัตรา 0.30 ต่อวัน อยากรทราบว่าจะต้องใช้เวลากี่ชั่วโมง เพื่อลดความเข้มข้นของสารอินทรีย์เริ่มต้นจนเหลือความเข้มข้นสุดท้ายตามต้องการ
6. จงคำนวณหาเวลาในการกักเก็บน้ำเสียในหน่วยนาทีกด้วยดังปฏิกิริยาแบบท่อไหล เมื่อความเข้มข้นของสารอินทรีย์เริ่มต้น ซึ่งวัดในรูปของค่าบีโอดี มีค่าเท่ากับ 350 มิลลิกรัมต่อลิตร วัดอัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำเสียที่ไหลเข้าดังปฏิกิริยาได้เท่ากับ  $25 \text{ m}^3/\text{day}$  ค่าคงที่ของอัตราเร็วของปฏิกิริยา มีค่า 0.7 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน และประสิทธิภาพของถังโปกนี้เท่ากับ 85%

7. ถังบำบัดแบบกวนผสมรูปทรงถูกใช้ในการบำบัดของเสียจากฟาร์ม พบว่าอันดับของปฏิกริยาเป็นอันดับที่ 2 ค่าคงที่ของอัตราเร็วของปฏิกริยา เท่ากับ 0.1 ลิตรต่อมิลลิกรัมต่อวัน ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในรูปของค่าบีโอดี เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ถังปฏิกริยาใบที่ 1 รับน้ำเสียได้มากที่สุดเพียง 400 ลิตร อัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำเสียที่นำมาบำบัดได้เท่ากับ 1,600 ลิตรต่อวัน อยากรทราบถึงความเข้มข้นของน้ำเสียที่ออกจากถังปฏิกริยาแต่ละใบมีค่ากี่ mg/L เมื่อใช้ถังปฏิกริยาในการบำบัดน้ำเสียจำนวน 2 ใบ ซึ่งขนาดความจุของถังปฏิกริยาใบที่ 1 มีค่าเท่ากับถังปฏิกริยาใบที่ 2
8. จากคำถามข้อที่ 7 ถ้าบำบัดน้ำเสียด้วยถังปฏิกริยาที่มีขนาดแตกต่างกันเป็น 2 เท่า และถังปฏิกริยาใบใหญ่รับน้ำเสียได้เป็น 2 เท่าของถังปฏิกริยาใบเล็ก ถังปฏิกริยาทั้ง 2 ใบ ค่อกันแบบขนาน อยากรทราบว่าความเข้มข้นของมลสารที่ออกจากถังปฏิกริยาแต่ละใบมีค่ากี่มิลลิกรัมต่อลิตรและเวลาในการบำบัดน้ำเสียของถังปฏิกริยาใบใหญ่มีค่ากี่ชั่วโมง
9. ถังปฏิกริยาแบบกวนผสมรูปทรงถูกใช้ในการบำบัดของเสียจากฟาร์ม อันดับของปฏิกริยาเป็นอันดับที่ 2 ค่าคงที่ของอัตราเร็วของปฏิกริยา เท่ากับ 0.1 ลิตรต่อมิลลิกรัมต่อวัน ค่าโอดีในน้ำเสีย มีค่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ถ้าถังปฏิกริยาใบนี้รับน้ำเสียได้ 400 ลิตร และอัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำเสีย มีค่า 1,600 ลิตรต่อวัน จงคำนวณหาความเข้มข้นของน้ำเสียที่ออกจากถังบำบัดแต่ละใบ ซึ่งใช้ระบบบำบัดใช้ถังปฏิกริยาจำนวน 2 ใบ ในการบำบัดน้ำเสีย โดยถังใบที่ 1 มีขนาดใหญ่กว่าใบที่ 1 ประมาณ 2 เท่า
10. ถังบำบัดแบบกวนผสมรูปทรงถูกใช้ในการบำบัดของเสียจากฟาร์ม พบว่า อันดับของปฏิกริยาเป็นอันดับที่ 2 มีค่าคงที่ของอัตราเร็วของปฏิกริยา เท่ากับ 0.1 ลิตรต่อมิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน ค่าโอดีในน้ำเสีย มีค่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ถังปฏิกริยาใบนี้รับน้ำเสียได้ 400 ลิตร และอัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำเสีย มีค่า 1,600 ลิตรต่อวัน อยากรทราบว่าความเข้มข้นของน้ำเสียที่ออกจากถังบำบัดแต่ละใบภายในระบบดังกล่าวใช้ถังบำบัดจำนวน 3 ใบ โดยถังใบที่ 1 มีขนาดใหญ่กว่าใบที่ 1 ประมาณ 2 เท่า และใบที่ 3 มีขนาดเล็กกว่าใบที่ 2 ประมาณ 75% วัดความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในของเสียนี้ ในรูปของบีโอดีได้เท่ากับ 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร
11. จากคำถามข้อที่ 10 ถ้ามมีการปรับปรุงระบบบำบัดของเสียด้วยระบบบำบัดแบบใหม่ ซึ่งทำการต่อถังปฏิกริยาในลักษณะอนุกรมจำนวนทั้งสิ้น 4 ใบ อยากรทราบว่าความเข้มข้นของน้ำเสียที่ไหลออกจากถังปฏิกริยาแต่ละใบ มีค่าเท่าใดในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร กำหนดให้ความจุของถังปฏิกริยาใบที่ 1 มีค่าเท่ากับ 500 ลิตร และอยากรทราบว่าความจุของถังปฏิกริยาที่ใช้แต่ละใบ มีค่าเพียงพอต่อการบำบัดน้ำเสียหรือไม่ เพราะเหตุใด เมื่อคุณภาพมาตรฐานในการปล่อยน้ำเสียก่อนลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ เท่ากับ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร

12. ระบบบำบัดน้ำเสียของฟาร์มเลี้ยงสัตว์แห่งหนึ่งประกอบไปด้วยถังกวนแบบสมบูรณ์ (หมายเลข 1) และถังตกตะกอน (หมายเลข 2) ดังรูปที่ 3.10 วัดความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในรูปของค่าบีโอดี ได้เท่ากับ 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ความจุของถังกวนเท่ากับ 1,500 ลิตร อัตราการไหลล้นของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วออกจากถังตกตะกอน ซึ่งแทนด้วยหมายเลขที่ 2 มีค่าเท่ากับ 500 ลิตรต่อวินาที ประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำเสียของถังกวนมีค่าเท่ากับ 80% อัตราการไหลล้นของน้ำเสียที่ไหลล้นออกจากถังกวน เท่ากับ 750 ลิตรต่อวินาที จากข้อมูลที่ให้มา อยากทราบว่า
1. ระยะเวลาในการบำบัดน้ำเสียในถังกวน มีค่ากี่วัน
  2. ความเข้มข้นของน้ำเสีย เมื่อผ่านการบำบัดในถังกวน มีค่ากี่มิลลิกรัมต่อลิตร
  3. ค่าคงที่ของอัตราย่อยสลายสารอินทรีย์ของถังกวน มีค่ากี่ต่อวัน
  4. อัตราส่วนของการนำน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วกลับมาใหม่ มีค่ากี่เปอร์เซ็นต์
13. จากคำถามข้อที่ 12 ถ้าแทนถังกวนด้วยถังปฏิบัติการแบบท่อไหล ซึ่งใช้เวลาในการบำบัดน้ำเสีย เท่ากับ ค่าที่ได้จากคำถามข้อที่ 12 วัดความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในรูปของค่าบีโอดี ได้เท่ากับ 8,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ความจุของถังปฏิบัติการแบบท่อไหล เท่ากับ 1,600 ลิตร อัตราการไหลล้นของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วออกจากถังตกตะกอน ซึ่งแทนด้วยหมายเลขที่ 2 มีค่าเท่ากับ 500 ลิตรต่อวินาที ประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำเสียของถังกวนมีค่าเท่ากับ 80% อัตราการไหลล้นของน้ำเสียที่ไหลล้นออกจากถังปฏิบัติการแบบท่อไหล เท่ากับ 750 ลิตรต่อวินาที จากข้อมูลที่ให้มา อยากทราบว่า
1. ระยะเวลาในการบำบัดน้ำเสียในถังปฏิบัติการแบบท่อไหล มีค่ากี่วัน
  2. ความเข้มข้นของน้ำเสีย เมื่อผ่านการบำบัดในถังกวน มีค่ากี่มิลลิกรัมต่อลิตร
  3. ค่าคงที่ของอัตราย่อยสลายสารอินทรีย์ของถังกวน มีค่ากี่ต่อวัน
  4. อัตราส่วนของการนำน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วกลับมาใหม่ มีค่ากี่เปอร์เซ็นต์
14. จากคำถามข้อที่ 14 ถ้าต้องการให้ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบดังกล่าวมีค่ามากขึ้นอีก 10% อยากทราบว่าต้องทำการปรับเปลี่ยนแนวทางอะไรได้บ้างและค่าที่ทำการปรับเปลี่ยนมีค่าเท่าใด

## บทที่ 4

# เทคนิคการเก็บรวบรวม การควบคุมของเสีย (Collection & Transportation Techniques)

เทคนิคในการรวบรวมของเสียที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมจากการทำปศุสัตว์ เพื่อรวบรวมของเสียที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมดังกล่าวไว้ในสถานที่ที่เหมาะสมก่อนนำไปบำบัดต่อไปหรือนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ ถือได้ว่าเป็นวิธีหนึ่งของการจัดการของเสียที่ต้นกำเนิดของเสีย และกำลังเป็นที่นิยมกันมากในปัจจุบัน เนื่องจากช่วยลดปริมาณของเสียลงไปได้ค่อนข้างมากรวมทั้งค่าใช้จ่ายในการบำบัดของเสียที่เกิดขึ้นอีกด้วย เทคนิคการเก็บรวบรวมและการควบคุมของเสียแบ่งออกได้ 2 ประเภท คือ

1. ระบบการรวบรวมของเสียที่ต้นกำเนิดของเสียหรือระบบการรวบรวมของเสียแบบแยก การรวบรวมของเสียด้วยวิธีนี้ มักเป็นการก่อสร้างระบบรวบรวมของเสียหรือนำเอาถังสำเร็จรูปที่ขายมาดัดแปลงใช้ในการรวบรวมของเสียที่เกิดขึ้นภายในฟาร์มดังกล่าว ซึ่งเป็นวิธีการรวบรวมของเสียที่ต้นกำเนิดหรือแหล่งกำเนิดโดยตรง อย่างไรก็ตามการออกแบบขนาดของถังบรรจุหรือภาชนะบรรจุของเสียต้องคำนึงถึงปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละวันว่ามีปริมาณมากน้อยเพียงใด และเวลาในการรวบรวมของเสียดังกล่าวด้วย การรวบรวมของเสียด้วยวิธีนี้เรียกว่า Construction Collection System หรือเรียกว่าระบบการรวบรวมของเสียแบบแยก (On-site Collection System) ข้อดีของระบบการรวบรวมของเสียด้วยวิธีนี้ คือ การรวบรวมของเสียในแต่ละแหล่งทำได้สะดวก ส่วนข้อจำกัดของวิธีนี้ คือ หากปริมาณของเสียที่เก็บรวบรวมได้มีปริมาณมากกว่าความจุของระบบการรวบรวมของแหล่งกำเนิดดังกล่าว มักปล่อยของเสียที่เกินความจุของระบบรวบรวมนั้นออกสู่แหล่งน้ำสาธารณะ หรือสิ่งแวดล้อม ทำให้เกิดความยากลำบากในการลงโทษแหล่งกำเนิดที่เป็นต้นเหตุของปัญหาดังกล่าว ถ้าประสิทธิภาพในการรวบรวมของเสียแต่ละแหล่งไม่ดี มักก่อให้เกิดปัญหาต่อสภาพสิ่งแวดล้อมโดยรวมค่อนข้างรุนแรง
2. ระบบการรวบรวมของเสียแบบรวม การรวบรวมของเสียด้วยวิธีนี้เป็นการนำเอาของเสียที่เกิดขึ้นจากแหล่งกำเนิดแต่ละแห่งมารวมกันภายในสถานแห่งหนึ่ง เพื่อรอนำไปบำบัดต่อที่ระบบบำบัดรวมหรือทำการรวบรวมไว้ในบริเวณที่มีระบบบำบัดของเสียขนาดใหญ่ ซึ่งรับปริมาณของเสียที่มีปริมาณมากได้ ข้อดีของวิธีนี้ คือ ต้นทุนในการสร้างระบบรวบรวมของเสียมีราคาถูกกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณของเสียที่เท่ากัน และการบำบัดของเสียหรือการนำไปใช้ประโยชน์มีความเป็นไปได้มากกว่าระบบการรวบรวมของเสียแบบแยก และมักไม่มีปัญหาในเรื่องการร้องเรียน เพราะเป็นความต้องการ

ของกลุ่มบุคคลที่ต้องการลดมลภาวะที่เกิดขึ้น ระบบการรวบรวมของเสียด้วยวิธีนี้ เรียกว่า ระบบการรวบรวมของเสียแบบรวม หรือ Off-site Collection System

การควบคุมการจัดการของเสียที่เกิดขึ้นฟาร์ม เรียกว่า Waste Handling ซึ่งประกอบไปด้วยขั้นตอนของการเก็บรวบรวม การเก็บถ่าย และการขนส่งของเสียจากแหล่งกำเนิดของเสียแห่งหนึ่งไปยังแหล่งที่ทำรวบรวมของเสียทั้งหมด เพื่อนำของเสียทั้งหมดนำไปบำบัด หรือนำใช้ประโยชน์ต่อไป

ของเสียจากการทำฟาร์มปศุสัตว์ แยกได้ 2 สถานะ คือ ของเสียที่อยู่ในรูปของของแข็ง และของเสียที่อยู่ในรูปของเหลว แนวทางในการควบคุมปัญหาที่เกิดจากของเสียควรทำการพิจารณาตามสถานะของเสียที่เกิดขึ้นและปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละวัน เพื่อให้ประสิทธิภาพของระบบการควบคุมของเสียเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพตามความต้องการ โดยทั่วไปแล้วของเสียที่เกิดขึ้นมักอยู่ในรูปของเสียผสม ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นของแข็งและส่วนที่มีน้ำเป็นส่วนผสม ข้อเสียของระบบการควบคุมโดยแยกตามสถานะของเสีย คือ มีค่าใช้จ่ายมีค่ามากกว่าระบบรวบรวมของเสียรวม (ทั้งส่วนที่เป็นของแข็งและส่วนที่เป็นของเหลว) ส่วนข้อดีของวิธีรวบรวมของเสียโดยแยกตามลักษณะของเสีย คือ ควบคุมปัจจัยต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อกระบวนการบำบัดของเสีย เช่น ความเข้มข้น ปริมาณของโลหะหนัก เป็นต้น ได้ดีกว่าระบบการรวบรวมของเสียรวม และเสียค่าใช้จ่ายในการตรวจสอบคุณภาพของของเสียมากกว่าการรวบรวมแบบแยกสถานะ

**การเลือกระบบการควบคุมของเสีย ควรพิจารณาจากปัจจัยดังต่อไปนี้**

1. **ชนิดของฟาร์มปศุสัตว์ (Type of Livestock)** ซึ่งมีผลต่อชนิดและปริมาณของเสียที่เกิดขึ้น เช่น ฟาร์มที่มีการให้อาหารและน้ำมาก ปริมาณของเสียที่เกิดขึ้น ซึ่งอยู่ในลักษณะของเสียผสม (Feedlot) มีค่ามากกว่าฟาร์มที่มีการให้อาหารปริมาณจำกัด เป็นต้น
2. **ชนิดและขนาดของเสียที่เกิดขึ้น (Type & Size of Feedlot)** มีผลต่อการเลือกระบบการควบคุมของเสียเพราะหากปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นมีมาก การควบคุมการจัดการของเสีย อาจทำการควบคุมแบบรวม ซึ่งเกิดจากความร่วมมือของผู้ที่ทำการปศุสัตว์ และความต้องการของชุมชน ตลอดจนกฎหมายท้องถิ่น
3. **สภาพภูมิประเทศ (Topography)** การก่อสร้างระบบรวบรวมของเสีย หรือระบบการจัดเก็บของเสีย ควรพิจารณาถึงสภาพภูมิประเทศที่จะก่อสร้างด้วย เช่น ดินกำเนิดของแม่น้ำสาธารณะ ไม่ควรให้มีการก่อสร้างระบบรวบรวมของเสีย เพราะอาจมีผลกระทบต่อคุณภาพของแหล่งน้ำผิวดินและน้ำใต้ดิน เป็นต้น หากจำเป็นต้องทำการก่อสร้างระบบรวบรวมของเสียในพื้นที่ดังกล่าว ควรมีระบบการป้องกันการปนเปื้อนของมลสารลงสู่แหล่งน้ำดังกล่าวมากขึ้น

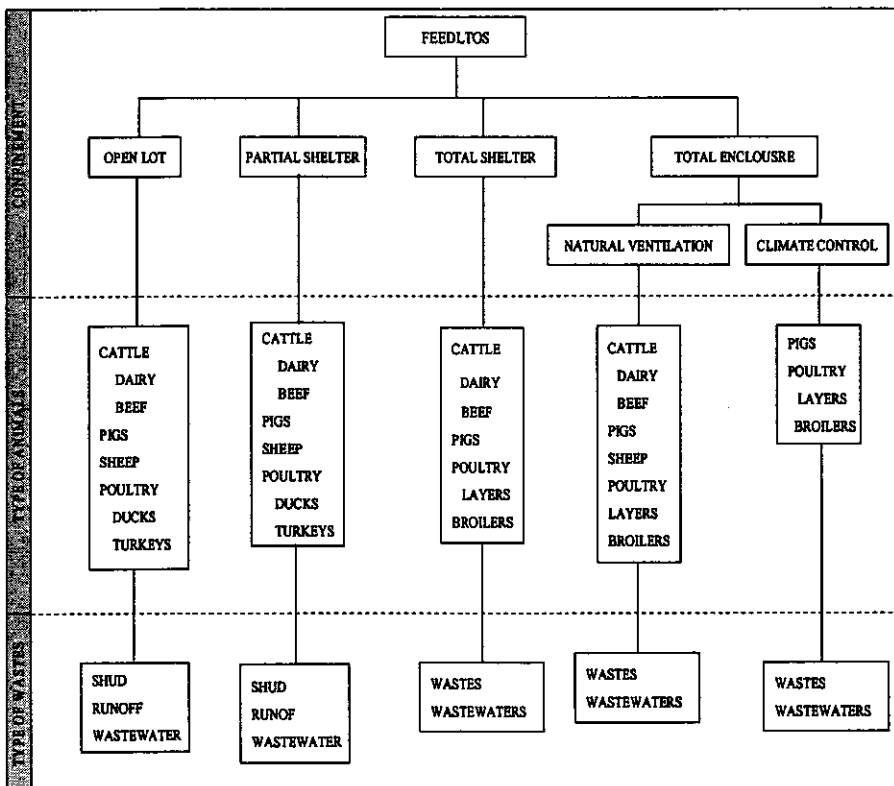
4. คุณลักษณะทางกายภาพของของเสี่ย (Physical Characteristics of Farm Stead) มีผลต่อการเลือกระบบบำบัดของเสี่ย เพราะคุณภาพของเสี่ยมีความแตกต่างกันมาก ซึ่งต้องมีคุณภาพของน้ำทิ้ง หรือของเสี่ยที่ผ่านการบำบัดแล้วเป็นไปตามกฎข้อบังคับภายในท้องถิ่น หรือพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อม ปีพุทธศักราช 2535 หรือพระราชบัญญัติสาธารณสุข ปีพุทธศักราช 2535
5. ความพึงพอใจของเกษตรกร (Farmer Preference) ความสำเร็จการควบคุมของเสี่ยภายในท้องถิ่นหนึ่ง ขึ้นกับปัจจัยหลายประการ ปัจจัยที่มีผลอย่างมากต่อความสำเร็จดังกล่าว คือ ความสมัครใจร่วมกันของชุมชนภายในท้องถิ่นที่ดังกล่าวที่ช่วยควบคุมของเสี่ยที่เกิดขึ้นภายในชุมชน เพื่อให้คุณภาพของเสี่ยที่ผ่านการบำบัดของเสี่ยแล้ว มีคุณภาพตามกฎระเบียบข้อบังคับของหน่วยงานในท้องถิ่นนั้นหรือของหน่วยงานส่วนกลาง เช่น กรมปศุสัตว์ เป็นต้น
6. จำนวนแรงงานคน และอุปกรณ์ที่จำเป็นในกระบวนการ (Labor & Equipment Availability) มีผลกระทบโดยตรงต่อค่าใช้จ่ายในการควบคุมของเสี่ย ถ้าใช้ระบบที่มีความสลับซับซ้อนมากเกินไป เมื่อเกิดปัญหาขึ้น การดำเนินการของระบบมักหยุดเพื่อหาปัญหาที่เกิดขึ้นและทำการแก้ไข หากเป็นระบบที่สลับซับซ้อนมาก การแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นมักต้องอาศัยผู้ที่มีประสบการณ์มาก ถ้าสามารถทำการออกแบบระบบการควบคุมแบบง่ายและมีประสิทธิภาพดีพอสมควร โดยคุณภาพของเสี่ยที่ออกมาเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานของเสี่ยที่ผ่านการบำบัดแล้ว ควรจะเลือกวิธีการที่ง่ายและควบคุมได้ง่าย รวมทั้งใช้ความรู้ไม่มากนัก
7. ขนาดหรืออาณาบริเวณพื้นที่ของการรวบรวม (Size of Waste Collection) การรวบรวมของเสี่ยควรพิจารณาเกี่ยวกับพื้นที่ที่เป็นเขตของชุมชนด้วย โดยเฉพาะของเสี่ยที่ก่อให้เกิดปัญหาในเรื่องกลิ่น เช่น มูลสุกร เป็นต้น ซึ่งส่งผลกระทบต่อปัญหาสิ่งแวดล้อมค่อนข้างมาก และอาจนำมาซึ่งการร้องเรียนให้มีการย้ายที่ตั้งของฟาร์ม หรือทำให้การบริหารงานของฟาร์มได้รับผลกระทบ จึงควรพอพิจารณาเป็นปัจจัยสำคัญอีกประการหนึ่งในการเลือกที่ตั้งของโรงรวบรวมของเสี่ย
8. ราคาของที่ดิน (Land Pricing) เนื่องจากราคาของที่ดินมีราคาแพงขึ้นทุกวัน การใช้ระบบบำบัดแบบแยก จึงจำนวนเพิ่มมากขึ้น เพราะการบำบัดของเสี่ยด้วยระบบบำบัดส่วนกลางต้องใช้พื้นที่มากเกินไป อย่างไรก็ตามคุณภาพของของเสี่ยที่ผ่านการบำบัด ควรทำการควบคุมให้ดี เพราะปัญหาที่อาจเกิดขึ้นมีการแพร่กระจายได้มากกว่าระบบบำบัดแบบรวม นอกจากนี้แล้วการควบคุมความรุนแรงของปัญหาที่อาจเกิดขึ้นนั้น ทำได้ยากกว่าระบบบำบัดแบบรวม หรือส่วนกลาง
9. ข้อบังคับของชุมชนนั้นๆ (Regulations) ซึ่งได้แก่ ข้อบังคับ หรือกฎหมายของเทศบาล ข้อระเบียบ ข้อบังคับของจังหวัดหรือพื้นที่ดังกล่าว เป็นต้น



10. เทคนิค หรือเทคโนโลยีในการควบคุม การจัดการของเสีย (Technique หรือ Technology of Waste Handling) มีผลกระทบโดยตรงต่อผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการรวบรวมและทำการบำบัดของเสีย ผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการบำบัดของเสียของประเทศไทย ยังมีความรู้ในการควบคุมของเสียอยู่ในระดับที่ต่ำเมื่อเทียบกับประเทศอื่น นอกจากนี้การสร้างระบบควบคุม (รวบรวม และบำบัด) ของเสียที่มีความสลับซับซ้อนมากขึ้น ไปย่อมมีผลต่อการเดินระบบ และการซ่อมแซม ด้วยเหตุผลดังที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น

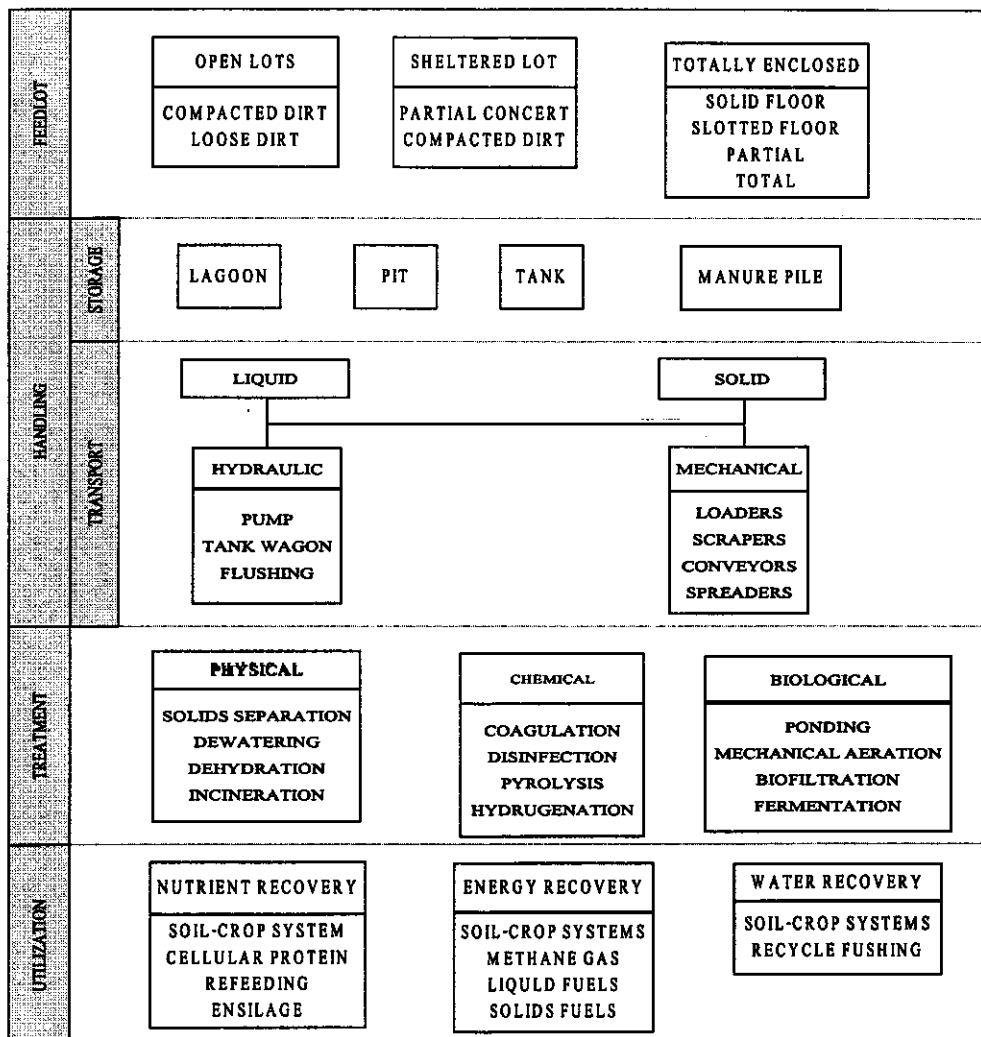
โดยทั่วไปแล้วสถานีในการรวบรวมของเสียแบบรวม ควรอยู่ห่างไกลจากชุมชนอย่างน้อย 20 กิโลเมตร และขนาดความจุของรถที่ใช้ในการรวบรวมของเสียควรขนาดความจุที่พอเหมาะ และสะดวกในการเดินทางไปเก็บขน รวมทั้งพิจารณาในเรื่องของจำนวนเที่ยวในการวิ่งรับส่งของเสีย เพราะอาจมีผลกระทบต่อระบบการจราจรภายในท้องที่ที่ทำการเก็บรวบรวมของเสียขึ้นได้ เพราะจะทำให้ต้นทุนในการเก็บขนของเสียมีค่ามากขึ้น

ตัวอย่างของการควบคุมปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นจากการทำปศุสัตว์ของต่างประเทศ แสดงไว้ในรูปที่ 4.1 และในรูปที่ 4.2 แสดงกระบวนการควบคุมปริมาณของเสีย การบำบัดของเสียและการนำของเสียไปใช้ประโยชน์แบบต่างๆ ซึ่งมีการแยกประเภทของการควบคุมตามสถานะของของเสีย วิธีบำบัดของเสียดังกล่าวตลอดจนการนำของเสียไปใช้ประโยชน์



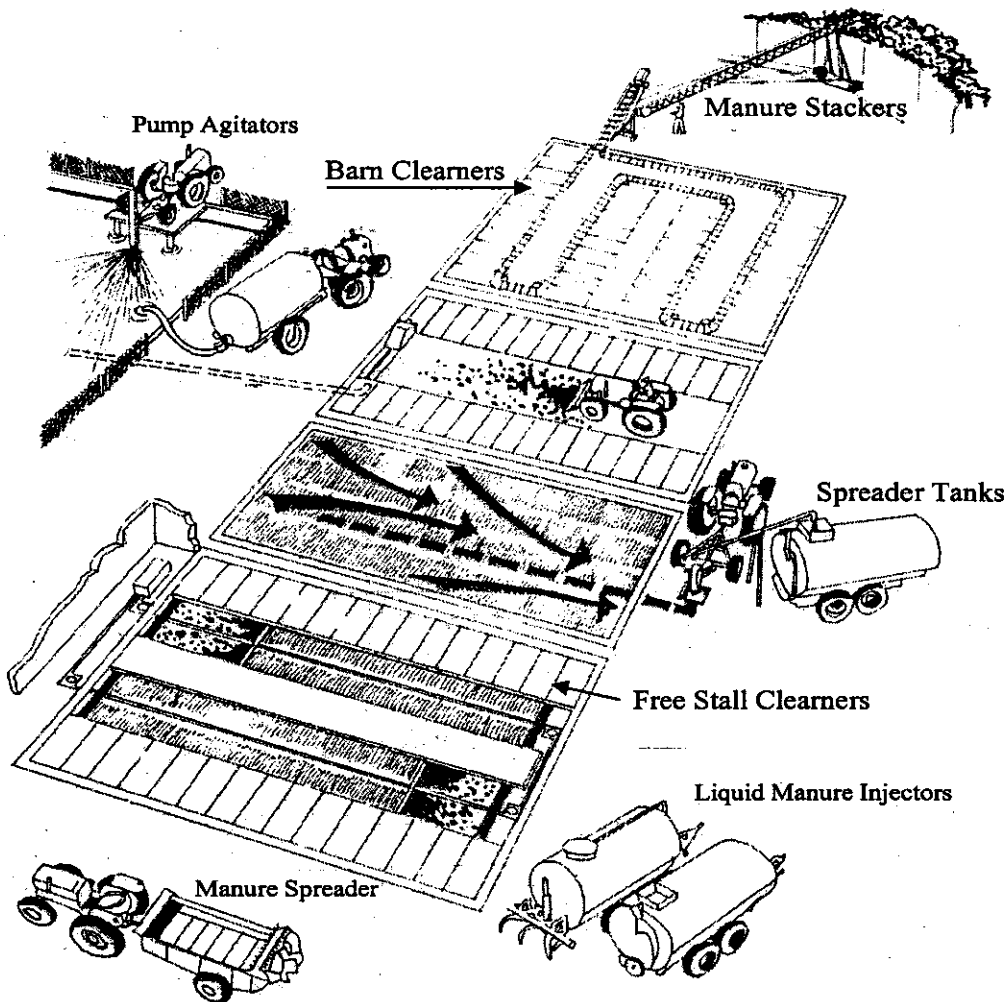
รูปที่ 4.1 แสดงการควบคุมของเสียที่เกิดขึ้นในฟาร์มปศุสัตว์ของต่างประเทศ

จากรูปที่ 4.1 ขั้นตอนของการจัดการของเสียนั้น ประกอบไปด้วย (1) ขั้นตอนของการเก็บของเสีย ได้แก่ การเก็บในถังลากรูน (Lagoon) ซึ่งเป็นถังเก็บของเสียแบบง่าย ซึ่งคล้ายบ่อเก็บน้ำหรือบ่อน้ำ การใช้หลุม (Pit) การเก็บไว้ในถัง (Tank) การเก็บของเสียไว้ในท่อนำของเสีย (Manure Pile) เป็นต้น และ (2) ขั้นตอนของการขนส่งของเสีย ซึ่งแบ่งได้ 2 ประเภทตามสถานะของเสีย ได้แก่ ของเสียที่อยู่ในรูปของเหลว (Liquid Form) ใช้ระบบการขนส่งแบบต่างๆ เช่น การใช้เครื่องสูบลมหรือปั๊ม การใช้ถังในการขนส่งของเสีย ที่เรียกว่า Tank Wagon ระบบชักโครก(Flushing) ส่วนของเสียในรูปของของแข็ง (Solid Form) ใช้ระบบขนส่งด้วยระบบสายพาน (Conveyor) ใบกวาด (Scrapers) การขังน้ำหนัก (Loader) การไล่น้ำออกจากของเสีย ด้วยการใช้ไม้พะเนง (Spreaded) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมกันมากในฟาร์มเลี้ยงสัตว์ทั่วไป เป็นต้น



รูปที่ 4.2 กระบวนการควบคุมของเสีย การบำบัดของเสียและการนำของเสียไปใช้ประโยชน์

ตัวอย่างกระบวนการควบคุมของเสียที่ใช้กันในงานจริงแบบง่ายๆ แสดงไว้ในรูปที่ 4.3 ประกอบด้วยขั้นตอนการเก็บรวบรวมของเสีย การขนส่ง



รูปที่ 4.3 การควบคุม การจัดการของเสียที่ใช้ในงานจริงแบบง่าย

ประโยชน์ที่เกิดขึ้นจากการควบคุม จัดการของเสีย ได้แก่

1. ลดปริมาณของของเสียที่เกิดขึ้น (Reduce of Wastes)
2. ช่วยควบคุม ลดปัญหาเรื่องกลิ่นที่เกิดขึ้นจากการทำฟาร์มปศุสัตว์และปัญหาในเรื่องแหล่งเพาะพันธุ์ของแมลงและไข่ของแมลงชนิดต่างๆ (Avoid Condition Conducive to Pollution Control หรือ Reduce Problems of Diseases and Odor)
3. ก่อให้เกิดความพึงพอใจทั้งผู้ที่ทำการปศุสัตว์ และชาวบ้านที่อาศัยในละแวกใกล้เคียง (Pleasant to many people)

4. ช่วยป้องกันปัญหาการปนเปื้อนของของเสียลงในชั้นน้ำใต้ดินจากของเสียในส่วนที่เปียก (Avoid Wet Ground)
5. ช่วยระบายอากาศภายใน โรงเรือนและฟาร์มเลี้ยงสัตว์ (Ventilation Controlling)
6. ลดปัญหามลภาวะทางเสียงที่เกิดขึ้นในฟาร์ม (Reduce of Noise Pollution)
7. ช่วยปรับปรุงคุณภาพของสิ่งแวดล้อม (Improve an Aesthetic Environment) ในระบบบำบัดของเสียทั่วไปหากใช้กระบวนการฝังกลบ (Landfill) ซึ่งคล้ายกับการฝังกลบขยะและของเสียอันตราย พื้นล่างของระบบรวบรวมของเสียต้องผ่านการบดอัดให้แน่นเพื่อใช้ประโยชน์จากพื้นที่ดังกล่าวได้ อาทิ ใช้เป็นสถานที่ท่องเที่ยวได้เหมือนในต่างประเทศ เป็นต้น

ระบบในการรวบรวม ของเสียแบ่งออกได้ 2 ประเภท ตามลักษณะของการก่อสร้าง คือ

1. ระบบการรวบรวมของเสียแบบเหนือพื้นดิน (Above Ground Storage Tank)
2. ระบบการรวบรวมของเสียแบบฝังดิน (Underground Storage Tank)

ขนาดของถังที่ใช้ในการรวบรวมของเสีย มีค่าอยู่ในช่วง 400 - 800 m<sup>3</sup> ไม่ว่าจะเลือกวิธีการรวบรวมของเสียด้วยระบบใดก็ตาม ควรคำนึงปัญหาที่อาจเกิดขึ้นจากการปนเปื้อนของมลสารลงสู่แหล่งน้ำใต้ดิน เพราะอาจส่งผลกระทบต่อระบบการผลิตน้ำประปาหรือน้ำดื่มที่ใช้แหล่งน้ำใต้ดิน เป็นแหล่งน้ำดิบในบริเวณดังกล่าวผลิตน้ำประปาหรือเกิดการรั่วไหลภายในระบบท่อขึ้นได้ เมื่อใช้งานเป็นเวลานาน ซึ่งไม่มีการตรวจสอบแก้ไขให้อยู่ในสภาพที่ดี ดังนั้นสถานที่ตั้งถังรวบรวมของเสียแบบรวม จึงควรอยู่ห่างจากระบบการผลิตน้ำประปาและเส้นท่อในการขนส่งน้ำประปา อย่างน้อย 3 กิโลเมตร เพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบต่อคุณภาพของน้ำใต้ดิน หากไม่สามารถดำเนินการได้ควรมีการป้องกันการรั่วไหลของของเสียลงสู่ชั้นน้ำใต้ดินเป็นอย่างดี

วิธีการรวบรวมของเสีย แบ่งได้ 2 ลักษณะ ตามลักษณะของการรวบรวมของเสีย คือ

1. ระบบการรวบรวมของเสียแบบแยก (On-Site System) การรวบรวมของเสียด้วยวิธีนี้เหมาะสำหรับการรวบรวมของเสียจากแหล่งกำเนิดของเสียที่มีงบประมาณเพียงพอหรืออยู่ห่างไกลกันมาก จะทำให้การควบคุมปัญหาสิ่งแวดล้อมจากของเสียทำได้สะดวกและง่ายขึ้น ขั้นตอนของการรวบรวมของเสียแบบนี้มักเริ่มต้นจากการศึกษาปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละวัน หรือแต่ละครั้งของการเกิดของเสีย และคุณลักษณะของเสียที่เกิดขึ้น จากนั้นทำการออกแบบระบบการรวบรวมแล้วทำการก่อสร้างด้วยคอนกรีต หรือเลือกใช้ถังพลาสติกที่วางขายให้มีความจุในการรวบรวมตามที่ทำการออกแบบไว้

2. ระบบการรวบรวมของเสียแบบรวม (Off-Site System) ของเสียที่ถูกรวบรวมด้วยวิธีนี้เป็นของเสียปริมาณมากภายในชุมชนที่ต้องการที่จะทำการรวบรวมของเสียไว้ที่เดียวกัน เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างระบบบำบัดแบบแยก และลดบทบาทหน้าที่ในการบำบัดของเสียด้วย สถานที่ทำการรวบรวมของเสียควรอยู่ห่างไกลจากชุมชน และทำการออกแบบระบบการรวบรวมที่ดี รวมทั้งคำนึงถึงการรั่วไหลของของเสีย ภายในเส้นทางที่ทำการรวบรวมมาจากแหล่งกำเนิดของเสียแต่ละแหล่งด้วย

ประเภทของระบบการขนส่งของเสีย แบ่งได้ดังนี้ คือ

1. การใช้รถ (Vehicle Transportation System) จัดได้ว่าเป็นวิธีการที่ประหยัด มีความสะดวก อย่างไรก็ตามในขณะที่ทำการขนส่งของเสียที่อยู่ในรูปของเสียแห้ง ควรคลุมของเสียดังกล่าว ซึ่งอาจเกิดการตกหล่น หรือเกิดการแพร่กระจายได้ในระหว่างที่เดินทาง นอกจากนี้ขนาดความจุของรถที่ใช้ ควรเลือกขนาดที่เหมาะสมในการขนส่ง เพื่อไม่ให้เกิดปัญหาจราจรเมื่อทำการเก็บขนส่งของเสีย โดยทั่วไปแล้วรถเก็บขนมักมีขนาดความจุน้อยกว่า 15 m<sup>3</sup> สำหรับการขนส่งของเสียภายในชุมชน ตัวอย่างของรถที่ทำการเก็บขนของเสียได้แก่ รถกระบะ รถพ่วง รถอัด เป็นต้น
2. การใช้ระบบไฮดรอลิก และนิวมาติก (Hydraulic & Pneumatic System) ระบบไฮดรอลิกเป็นการลดปริมาตรน้ำออกจากของเสียที่เหลือ ทำให้ของเสียที่ทำการเก็บรวบรวมได้เหลือเฉพาะของแข็ง ซึ่งมีน้ำปนอยู่น้อย ส่วนระบบนิวมาติกเหมาะกับของเสียที่อยู่ในรูปของของแข็งเท่านั้น โดยทั่วไปแล้วในระบบการทำฟาร์มเลี้ยงสัตว์ทั่วไป ของเสียที่เกิดขึ้นนั้นเป็นของเสียผสม จึงไม่ค่อยเจอระบบนิวมาติกในการรวบรวมของเสียในฟาร์มเลี้ยงสัตว์ และในการทำฟาร์มมักนิยมทำการรวบรวมของเสียในลักษณะของเสียผสมมากกว่าการแยกสถานะของเสีย เพราะสะดวกในการเก็บรวบรวมและมีค่าใช้จ่ายน้อยกว่าด้วย
3. ไม้พะแนง (Slotted Floor) เป็นวิธีแยกเอาของแข็งออกจากของเสียผสมแบบง่าย โดยอาศัยหลักการที่ว่า ของเสียผสมที่มีขนาดเล็กกว่าช่องว่างของไม้พะแนง ไม่สามารถผ่านช่องว่างดังกล่าวได้ ก็ติดอยู่บนพื้นจากนั้นทำการกวาดเอาของเสียที่เหลืออยู่บนพื้นไม้พะแนง รวบรวมไปทำการบำบัดต่อไป ส่วนของเสียที่มีขนาดเล็กกว่าช่องว่างของไม้พะแนง นำไปบำบัดด้วยระบบบำบัดอื่นๆ ต่อไป

ในการออกแบบช่องว่างของไม้พะแนง ต้องคำนึงถึงชนิดและอายุของสัตว์ที่อยู่ในฟาร์ม เช่น หากใช้ระบบการเลี้ยงสุกร ด้วยการยกพื้นบนไม้แบบไม้พะแนง พื้นของไม้พะแนงมีค่าเท่ากับ 30% ของพื้นที่โรงเลี้ยงสุกรทั้งหมด เป็นต้น การแยกเอาของแข็งออกจากของเสียผสม อาจใช้ตะแกรงแทนก็ได้ ของเสียที่แยกได้แล้ว มักนำไปรวบรวมไว้ในบ่อ หรือหลุม ซึ่งทำการออกแบบไว้ได้ระบบในการแยกเอาของเสียออก เพื่อร่อนนำไปบำบัดต่อไป ปัญหาที่อาจเกิดขึ้นได้จากการรวบรวมของเสียด้วยวิธีนี้ คือ เรื่องกลิ่นของ

ของเสีย เมื่อต้องทำการบำบัดต่อไปด้วยระยะเวลานาน นอกจากนี้แล้วขนาดของถังที่ใช้ในการรวบรวมของเสียด้วยวิธีนี้ ไม่ควรออกแบบขนาดของถังให้ใหญ่เกินไป

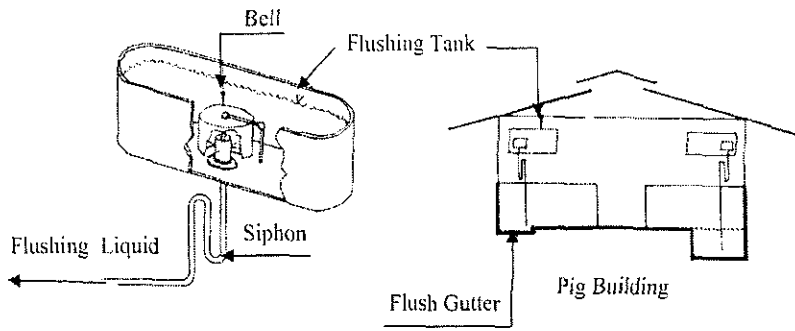
การแยกของเสียในรูปของเหลวขึ้นอยู่กับปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในของเสียผสม ถ้าใช้ระบบการรวบรวมแบบอัตโนมัติ เช่น การใช้ลูกลอย เพื่อควบคุมระดับของของเหลวภายในถัง เป็นต้น เมื่อปริมาณของเสียเกินระดับที่ถังเก็บรวบรวมได้ ก็ทำการส่งของเสียดังกล่าวไปยังขั้นตอนอื่นๆ เพื่อทำการบำบัดหรือนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป การควบคุมของเสียด้วยวิธีนี้ ทำให้ขนาดของถังมีขนาดเล็กลง

**ระบบการแยกของเสียในรูปของของเหลว ประกอบไปด้วย**

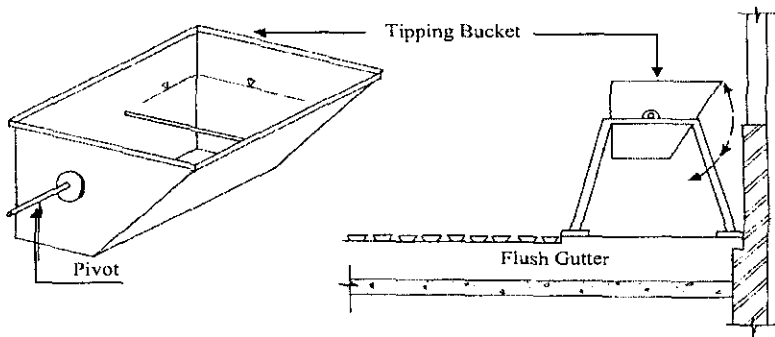
1. **สถานะในการรวบรวมของเสีย (Liquid Collection System)** เช่น การใช้หลุม การใช้ถังพลาสติก การใช้บ่อคอนกรีต เป็นต้น
2. **เครื่องสูบน้ำ หรือปั๊ม (Pump)**
3. **อุปกรณ์ในการแยกขนาดของของเหลว (Spreading Device)**

**ระบบชักโครก (Flushing)** เมื่อของเสียผสมมีการไหลผ่านอุปกรณ์แยกขนาดของของแข็ง ของเหลวไหลผ่านช่องว่างดังกล่าวไปรวมกันภายในภาชนะที่วางอยู่ข้างล่าง หรือไหลตามท่อไปยังสถานะในการรวบรวมของเสีย หรืออาจไหลไปยังถังเก็บรวบรวมของเสีย เมื่อปริมาณของเสียภายในระบบดังกล่าวเต็มแล้ว จะเกิดการไหลต่อไปยังส่วนอื่นๆ ต่อไป โดยอัตโนมัติหรือใช้คนกดชักโครก

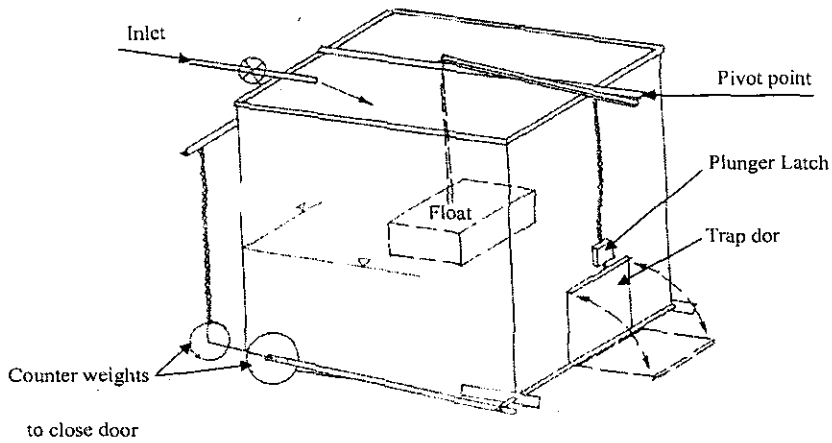
ในระบบรวบรวมของเสียที่มีปริมาณมาก มักเก็บรวบรวมของเสียดังกล่าวไปยังภาชนะใบใหญ่ด้วยเครื่องสูบน้ำ หรือปั๊ม ดังรูปที่ 4.4 ในระบบนี้ความเร็วของของเหลวที่เกิดการไหล ควรมีค่าอยู่มากกว่า 0.6 เมตรต่อวินาที อย่างไรก็ตามความเร็วที่เหมาะสมของของเหลวมีค่า 1 เมตรต่อวินาที ในกรณีไม่มีการใช้เครื่องสูบน้ำ อาจทำการออกแบบระบบการรวบรวมของเสีย (ของเหลว) โดยให้ของเหลวเกิดการไหลมายังภาชนะที่ทำการรวบรวมของเหลวตามธรรมชาติ ภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลก โดยของเสียเกิดการไหลจากที่สูงมายังที่ต่ำ ซึ่งทำได้โดยออกแบบให้พื้นล่างของรางระบายของเหลว ให้มีค่าความลาดเอียงหรือความชันอยู่ในช่วง 1% ถึง 5% ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.5



ก. ระบบไซฟอน (Automatic Siphon System)



ข. ระบบถังกระดก (Tipping Bucket Flushing)

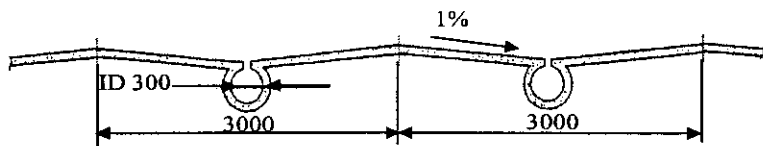


ค. ระบบแยกของแข็งและของเหลว (Trap Door Flush Tank System)

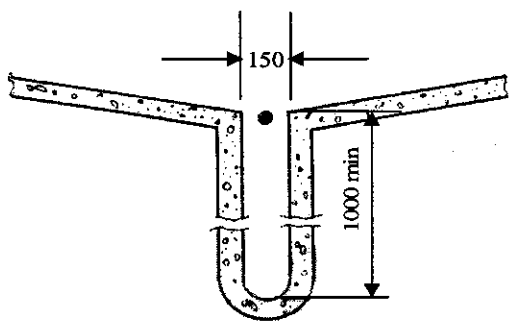
รูปที่ 4.4 ระบบการระบายของเสีย แบบแยกสถานะของเสียแบบอัตโนมัติ แบบ

- ก. ระบบไซฟอน
- ข. ระบบถังกระดก
- ค. ระบบแยกของแข็ง และของเหลว

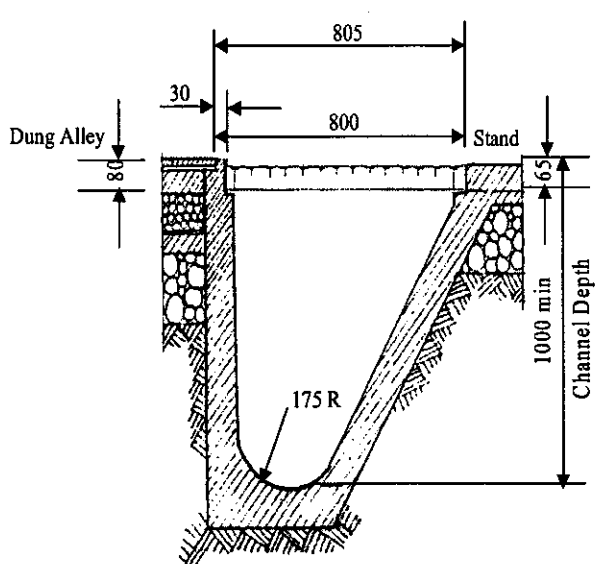
ส่วนระบบในการรวบรวมของเสียที่เกิดขึ้นในรูปของของเหลวแบบอัตโนมัติ ได้แก่ การไหลผ่านระบบท่อ (Flushing Flume) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.5(ก) หลุมแคบและลึก Narrow Gutter ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.5(ข) หลุมรูปตัวยู (U-Shaped Channel) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.5(ค) และหลุมกว้าง (Floating Channel) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.5(ง)



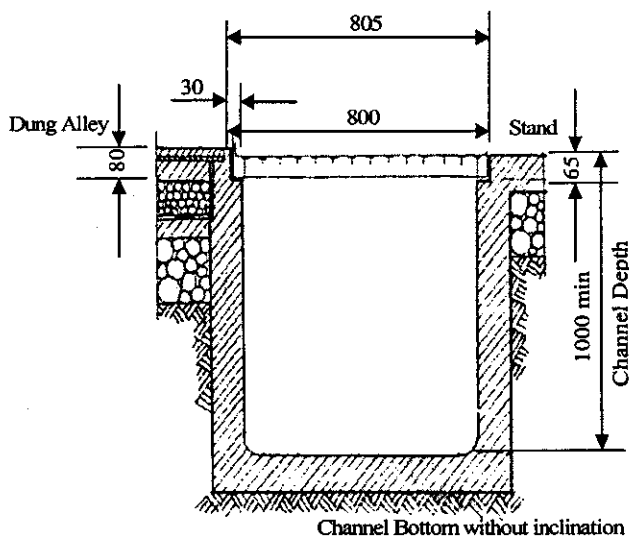
ก. ระบบท่อ (Flushing Flume)



ข. หลุมแคบและลึก (Narrow Gutter)



ค. หลุมรูปตัวยู (U-Shaped Channel)



ง. หลุมกว้าง (Floating Channel)

รูปที่ 4.5 แสดงระบบการเก็บรวบรวมของเสีย

ก. ระบบท่อ (Flushing Flume)

ค. หลุมรูปตัวยู (U-Shaped Channel)

ข. หลุมแคบและลึก (Narrow Gutter)

ง. หลุมกว้าง (Floating Channel)



การออกแบบขนาดช่องว่างของไม้พะแนง เพื่อรวบรวมของเสี้ยวที่เกิดขึ้นภายในโรงเรือน ขึ้นกับชนิดและจำนวนสัตว์ที่เลี้ยง ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.1 เพราะสัตว์ที่มีขนาดโดยอ้อมมีความต้องการอาหารมากเมื่อกินอาหารมากปริมาณของเสี้ยวที่ถ่ายออกมาโดยอ้อมมีปริมาณมากด้วย จึงต้องมีระบบการเก็บรวบรวมของเสี้ยวค่อนข้างดี ช่องว่างของไม้พะแนงจึงห่างมากกว่าการเก็บรวบรวมของเสี้ยวจากสัตว์ที่มีขนาดเล็กกว่า

ตารางที่ 4.1 ขนาดช่องว่างของไม้พะแนงที่ใช้แยกของแข็งออกจากของเสี้ยวผสม

Animal Type	Size : TLW (kg)	Slot Opening or Slat Spacing (mm)	
		Narrow Slats (30-70 mm)	Wide Slats (100-200 mm)
<b>Pigs</b>			
Sows	100 -150	-	25-40
Weaners	10-20	10-15	20-30
Porkers	20-100	-	25-40
<b>Dairy Cattles</b>			
Cows	450-600	-	40-45
Calves	100-200	20	30
Beef Cattle	300-450	-	40-45
<b>Sheep</b>			
Ewes	60-100	25	25

#### การคำนวณหาปริมาณของเสี้ยวที่เกิดขึ้นในฟาร์ม

ปริมาณของเสี้ยวที่เกิดขึ้นในฟาร์ม ทั้งที่อยู่ในรูปของเหลวและของแข็ง ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ดังนี้

1. น้ำหนักรวมของสัตว์ที่มีชีวิต (Total Live Weight of Animals : TLW)
2. ชนิดของสัตว์ที่อยู่ในคอก (Type of Species)
3. ขนาด และอายุ ของสัตว์ (Animal Size and Age)
4. ความต้องการอาหาร และน้ำ (Feed and Water Intake)
5. ช่วงฤดูกาล (Climate)
6. ระบบการจัดการฟาร์ม (Management)

ศัพท์ที่ควรทราบ ที่ใช้ในการคำนวณหาปริมาณของเสีย ได้แก่

1. **Total Live Weight of Animal : TLW** หมายถึง น้ำหนักรวมของสัตว์ที่มีชีวิตทั้งหมดที่มีอยู่ในฟาร์ม ในขณะนั้น ซึ่งมีผลต่อการหาขนาดความจุของภาชนะรวบรวมของเสียหรือระบบบำบัดของเสียโดย Young ได้เสนอว่า “การคำนวณหาปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นจากสัตว์ที่มีชีวิตนั้น ควรคำนวณจากสัตว์ที่อยู่ในช่วงเป็นแม่พันธุ์หรือพ่อพันธุ์ ซึ่งทำให้ปริมาณของเสียที่คำนวณได้มีค่าถูกต้องยิ่งขึ้น” ในประเทศสหรัฐอเมริกา กำหนดไว้ว่า สุกรที่อยู่ในช่วงดังกล่าวมีน้ำหนักเฉลี่ยเท่ากับ 45 กิโลกรัมหรือ 100 ปอนด์ ส่วนในประเทศไทย กำหนดว่า น้ำหนักโดยเฉลี่ยของสุกรที่อยู่ในช่วงดังกล่าว เท่ากับ 50 กิโลกรัม หรืออาจกล่าวได้ว่า 1 TLW เท่ากับ 50 กิโลกรัมของสุกรจำนวน 1 ตัว
2. **Animal Unit : AU** หมายถึง น้ำหนักของสัตว์ที่มีชีวิตจำนวน 1 กลุ่ม ซึ่งมีผลต่อการคำนวณหาปริมาณของเสีย โดยทั่วไปแล้วน้ำหนักของสัตว์จำนวน 1 กลุ่ม มักแสดงค่าออกมาในรูปของกิโลกรัมหรือปอนด์ สำนักงานป้องกันสิ่งแวดล้อม (Environment protection agency หรือ EPA) ของประเทศสหรัฐอเมริกา กำหนดว่า 1 AU เท่ากับ 450 กิโลกรัมของวัวที่มีชีวิต ซึ่งคิดเป็นจำนวน 1 กลุ่ม
3. **Animal Population Unit : APU** หมายถึง จำนวนของสัตว์ที่เกี่ยวข้องว่ามีทั้งสิ้นกี่ตัว เมื่อน้ำหนักรวมของสัตว์ที่มีชีวิตจำนวนดังกล่าว มีค่าเท่ากับ 100 กิโลกรัมของสัตว์ที่มีชีวิต หรือเขียนได้ว่า APU เท่ากับ 100 kg TLW
4. **Animal Population Equivalent : APE** หมายถึง ปริมาณของเสียที่เกิดจากสัตว์ที่มีชีวิตจำนวน 1 ตัว โดยทั่วไปปริมาณของเสียที่เกิดขึ้น นิยมวัดในรูปของบีโอดี (Biochemical Oxygen Demand) ปริมาณของเสียที่เกิดจากมนุษย์ เท่ากับ 0.075 กิโลกรัมหรืออาจกล่าวได้ว่า ค่า 1 APE ของของเสียจากมนุษย์ เท่ากับ 0.075 กิโลกรัมของค่าบีโอดี อย่างไรก็ตามค่าดังกล่าวขึ้นอยู่กับชนิดของสัตว์

ค่า TLW, APU และ APE ของสัตว์แต่ละประเภท แสดงไว้ในตารางที่ 4.2 และค่า APE ของสัตว์แต่ละประเภท แสดงไว้ในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.2 ค่า TLW, APU และ APE ของสัตว์แต่ละประเภท

Animal Type	Description and Age	Mean TLW (kg/animal)	APU per animal	Number of animals per APU	APE per animal
Beef Cattle	Cows 2y and older	500	5.0	0.2	8.5
	Heifers 1-2y olds	400	4.0	0.25	6.8
	Feeder calve	200	2.0	0.5	3.4
	Steers 1y and older	300	3.0	0.33	5.1
Dairy Cattle	Cows 2 y and older	700	7.0	0.14	16.8
	Heifers 1-2y olds	500	5.0	0.2	12.0
	Heifer calves	300	3.0	0.33	7.2
Pigs	Piglets	10	0.1	10.0	0.3
	Growers	40	0.4	2.5	1.2
	Porkers	70	0.7	1.4	2.0
	Gilts, Sows and Boars	100	1.0	1.0	2.9
Poultry	Pullets-not laying	1	0.01	100	0.05
	Pullets-laying	1.5	0.015	67	0.07
	Hens-laying	2	0.02	50	0.10
	Broilers	1	0.01	100	0.05
	Ducks	2	0.02	50	0.10
	Turkey-heavy	7	0.07	14	0.34
	Turkey-light	4	0.04	25	0.19
Sheep	Lambs-ewe and ram	40	0.4	2.5	0.48
	Wethers	50	0.5	2.0	0.6
	Ewes-1 y old and older	80	0.8	1.2	0.96
	Rams	100	1.0	1.0	1.2

ตารางที่ 4.3 ค่า APE ของสัตว์แต่ละประเภท

Parameters	Symbol	Units	Pork Pigs	Laying Hens	Feedlot Beef	Feedlot Sheep	Dairy Cattle
Total Wet Waste	TWW	kg/APU-d	5.1	6.6	4.6	3.6	9.4
Faeces Urine Ratio	F/U	Ratio	1.21	10	2.41	11	2.21
Urine	U	% TWW	45	0	29	50	31
Total Moisture Content	TMC	% TWW	86.5	74.7	82.8	70.3	90.7
Total Dry Solids	TTS	% TWW	13.5	25.3	17.2	29.7	9.3
	TTS	kg/APU-d	0.69	1.67	0.7	1.07	0.89
	TTS	kg/ton TWW	135	253	172	297	93
Total Volatile Solids	TVS	% TTS	82.4	72.8	82.8	84.7	80.3
	TVS	kg/APU-d	0.57	1.22	0.65	0.91	0.72
	TVS	kg/ton TWW	111	184	142	252	75
Biochemical Oxygen Demand	BOD	% TTS	31.8	21.4	16.2	8.8	20.4
	BOD	% TVS	38.6	29.4	19.6	10.4	25.4
	BOD	kg/APU-d	0.22	0.36	0.13	0.09	0.18
	BOD	% COD	30.7	23.2	17.4	7.8	13.8
Pollution Population Equivalent	APE	APE/APU	2.9	4.8	1.7	1.2	2.4
Chemical Oxygen Demand	COD	% TTS	104	92	93	113	148
	COD	kg/APU-d	0.72	1.5	0.65	1.2	1.3
Total Kjeldahl Nitrogen	TKN	% TTS	5.6	5.9	7.8	4.0	4.0
	TKN	kg/APU-d	0.039	0.099	0.055	0.043	0.036
	TKN	kg/ton TWW	7.6	15	12	12	3.8
Total Phosphorus as P	TPP	% TTS	2.5	2.1	1.6	0.66	0.7
	TPP	kg/APU-d	0.017	0.035	0.011	0.007	0.006
	TPP	kg/ton TWW	3.3	5.3	2.4	1.9	0.64
Total Potassium as K	TKK	% TTS	4.9	2.3	3.6	3.2	2.3
	TKK	kg/APU-d	0.034	0.039	0.025	0.034	0.023
	TKK	kg/ton TWW	6.7	5.9	5.4	9.4	2.4
NPK Ratio	NPK	Ratio	212	311	512	615	614

องค์ประกอบของธาตุต่างๆ ที่มีอยู่ในของเสียแต่ละประเภท อาจหาได้จากตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 แสดงองค์ประกอบของธาตุต่างๆ ที่มีอยู่ในของเสียแต่ละประเภท

Animal Species	Size	Annual Production (kg/y)			
		Nitrogen <sup>b</sup>	Phosphorus	Potassium	
Type		TKN	TPP	TKK	
Pigs	APU <sup>a</sup>	14.2	6.20	12.40	
	Porkers	0.7 APU	10.00	4.30	8.70
	Sows	1.0 APU	14.20	6.20	6.20
Poultry	APU	36.10	12.80	14.20	
	Layers	0.02 APU	0.72	0.26	0.28
	Pullets	0.01 APU	0.36	0.13	0.14
Beef Cattle	APU	20.00	4.00	9.10	
	Calves	2 APU	40.00	8.00	18.20
	Steers	3 APU	60.00	12.00	27.30
Sheep	APU	15.70	2.60	12.40	
	Wethers	0.5 APU	7.80	1.30	6.20
	Ewes	0.8 APU	12.60	2.00	9.90
Dairy Cattle	APU	13.10	2.20	8.40	
	Cows	7 APU	92.00	15.30	59.00
	Heifers	5 APU	66.00	10.90	42.00
	Calves	3 APU	39.00	18.20	25.00

<sup>a</sup>APU = 100 kg Total Live Weight (TLW).<sup>b</sup> Assuming no

ตัวอย่างที่ 4.1 ฟาร์มเลี้ยงสัตว์แห่งหนึ่ง มีจำนวนสัตว์ดังนี้

- (1.) 2,000 porkers pigs
- (2.) 1,500 growing pigs
- (3.) 1,000 piglets
- (4.) 400 sows

อยากทราบว่าปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นจากสัตว์ทั้งสิ้นภายในฟาร์มแห่งนี้ มีค่ากี่ APU

วิธีทำ จากตารางที่ 4.2 พบว่า 1 หน่วย ของ Porkers Pigs เท่ากับ 0.7 APU  
1 หน่วย ของ Growing Pigs เท่ากับ 0.4 APU  
1 หน่วย ของ Piglets เท่ากับ 0.1 APU  
1 หน่วย ของ Sows เท่ากับ 1.0 APU

จาก ค่า APU ทั้งหมด ของสัตว์ = จำนวนสัตว์ทั้งหมด \* 1 หน่วยของสัตว์ที่เทียบเท่าใด ของค่า APU  
เพราะฉะนั้น

$$\begin{aligned} \text{ค่า APU ของสัตว์ทั้งหมด} &= 2,000 \text{ Porkers Pigs} * 0.7 \text{ APU} / 1 \text{ หน่วยของ Porkers Pigs} + 1,500 \\ &\text{Growing pigs} * 0.4 \text{ APU} / 1 \text{ หน่วยของ Growing pigs} + 1,000 \text{ piglets} \\ &* 0.1 \text{ APU} / 1 \text{ หน่วยของ piglets} + 400 \text{ sows} * 1.0 \text{ APU} / 1 \text{ หน่วยของ} \\ &\text{Sows} \\ &= 2,500 \text{ APU} \end{aligned}$$

Answer

ตัวอย่างที่ 4.2 จงคำนวณหาปริมาณของเสียที่เกิดขึ้น มีค่าเท่าใด เมื่อจำนวนหมู เท่ากับ 2,500 APU

วิธีทำ จากตารางที่ 3 1 APU ของ หมู เท่ากับ 5.1 kg TWW /day

จากความสัมพันธ์ที่ว่า ปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นทั้งหมด = จำนวนหมูทั้งหมด \* อัตราการเกิดของเสียที่  
เกิดขึ้นในรูปของแข็ง  
เปียก ในหนึ่งวัน

$$\begin{aligned} \text{เพราะฉะนั้น ปริมาณของแข็งเปียกที่เกิดขึ้นทั้งหมด (TWW)} &= 2,500 \text{ APU} * 5.1 \text{ kg TWW /day} - \text{APU} \\ &= 12,750 \text{ kg TWW/day} \end{aligned}$$

Answer

## แบบฝึกหัดเพิ่มความเข้าใจ

1. ให้ยกตัวอย่างระบบการรวบรวมของเสียจากฟาร์มเลี้ยงสัตว์ที่เคยพบเห็นมา 1 ตัวอย่าง พร้อมทั้งอธิบายแนวทางในการรวบรวมของเสียของฟาร์มดังกล่าว
2. ระบบการรวบรวมของเสียของฟาร์มเลี้ยงวัว ของฟาร์มนมวัว ที่อำเภอปากช่อง ใช้ระบบการรวบรวมของเสียอย่างไร และระบบดังกล่าวดีหรือไม่ เพื่อพิจารณาในแง่ของผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม
3. ปัญหาของระบบการรวบรวมของเสียของฟาร์มเลี้ยงสุกรคืออะไร
4. ฟาร์มเลี้ยงไก่แห่งหนึ่ง มีจำนวน 5,000 Laying Hens นำหนักเฉลี่ยของไก่ที่มีชีวิต มีค่า 1.5 กิโลกรัม จากข้อมูลดังกล่าว

อยากทราบว่า

- 4.1 ปริมาณของเสียรวม ในรูปของน้ำหนักเปียก (TLW) มีค่ากี่กิโลกรัมต่อวัน
- 4.2 ปริมาณของเสียรวม ในรูปของน้ำหนักแห้ง มีค่ากี่กิโลกรัมต่อสัปดาห์
- 4.3 ปริมาณของเสียทั้งหมดที่เกิดขึ้นในรูปของสารอินทรีย์ มีค่าที่ APE ต่อวัน
- 4.4 ปริมาณของเสียทั้งหมดที่เกิดขึ้นในรูปของสารประกอบไนโตรเจน (Kjeldahl Nitrogen) มีค่ากี่กิโลกรัมต่อเดือน

5. ฟาร์มเลี้ยงสัตว์ของเกษตรกร ในอำเภอหนึ่งของจังหวัดนครราชสีมา มีการเลี้ยงสัตว์หลายชนิด จำนวนสัตว์ที่ทำการเลี้ยงแต่ละชนิด เป็นดังนี้

- ไก่ (Laying Hen) จำนวน 5,000 ตัว
- เป็ด จำนวน 10,000 ตัว โดยกำหนดให้พิจารณาของเสียจากเป็ดในลักษณะเดียวกับไก่
- วัว จำนวน 15,000 ตัว
- หมู จำนวน 10,000 ตัว
- แพะ จำนวน 20,000 ตัว

อยากทราบว่า

- 2.1 ปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นใน 1 วัน ในรูปของน้ำหนักเปียก มีค่ากี่กิโลกรัม
- 2.2 ปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นใน 1 สัปดาห์ ในรูปของน้ำหนักแห้ง มีค่ากี่กิโลกรัม
- 2.3 ปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นใน 1 เดือน ในรูปของยูเรีย มีค่ากี่กิโลกรัม
- 2.4 ปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นใน 1 วัน ในรูปของของแข็งที่เกิดการระเหยได้ มีค่ากี่กิโลกรัม
- 2.5 ปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นใน 1 เดือน ในรูปของฟอสฟอรัส มีค่ากี่กิโลกรัม
- 2.6 ปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นใน 1 วัน ในรูปของไนโตรเจน มีค่ากี่กิโลกรัม
- 2.7 ปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นใน 1 สัปดาห์ ในรูปของบีโอดี มีค่ากี่กิโลกรัม
- 2.8 ค่า Population Equivalent ทั้งหมดมีค่าเท่าใด

## บทที่ 5

### การจัดการของเสีย

#### (Waste Management)

แนวคิดในการจัดการของเสียที่เกิดขึ้นในกิจกรรมต่างๆ จากภาคเกษตรกรรมนั้นมีมานานแล้ว แต่ยังไม่เป็นที่แพร่หลายและไม่ได้รับความนิยม เพราะมนุษย์ยังมองไม่เห็นผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมที่เกิดขึ้น จนกระทั่งในช่วง 20-30 ปีที่ผ่านมา ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากมลภาวะเริ่มมีแพร่กระจายออกไปสู่ภาคอุตสาหกรรมและภาคเกษตรกรรมมากขึ้น มนุษย์จึงเริ่มมีแนวคิดในการจัดการของเสียที่เกิดขึ้น ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นอย่างแท้จริงในระบบการจัดการของเสีย การจัดการของเสียในประเทศที่พัฒนาแล้ว เช่น ญี่ปุ่น สหรัฐอเมริกา สาธารณรัฐเยอรมัน เป็นต้น มีจุดเริ่มต้นจากการจัดการของเสียตั้งแต่แหล่งกำเนิดและออกแบบระบบบำบัดของเสีย เพื่อบำบัดของเสียในส่วนที่หลีกเลี่ยงจนนำไปสู่การพัฒนาแบบยั่งยืนต่อไป การจัดการของเสียภายในประเทศดังกล่าวประสบความสำเร็จเพราะมีระบบจัดการของเสียตั้งแต่เริ่มต้นที่ดี ประกอบกับจิตสำนึกในการรักษาสิ่งแวดล้อมภายในประเทศดังกล่าวค่อนข้างสูง ซึ่งมีการสอนแนวคิดในการรักษาสิ่งแวดล้อมให้แก่เยาวชนมาตั้งแต่ระดับอนุบาลประกอบกับการใช้กฎหมายของรัฐบาลในประเทศเหล่านั้นเพื่อบังคับแหล่งกำเนิดมลภาวะต่างๆ ที่ทำให้มลภาวะเกิดขึ้นค่อนข้างเข้มงวด นอกจากนี้แล้วระบบบำบัดของเสียของประเทศดังกล่าวมีการออกแบบค่อนข้างดี ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดของเสียค่อนข้างดี เหลือของเสียที่ไม่ได้บำบัดไม่มาก

**การพัฒนาแบบยั่งยืน (Sustainable Development)** หมายถึง “การพัฒนาทางด้านสังคม การศึกษา สาธารณสุข เศรษฐกิจ และสิ่งแวดล้อม ควบคู่ไปด้วยกัน เพื่อตอบสนองต่อความต้องการของมนุษย์ในยุคปัจจุบัน โดยไม่มีผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมในอนาคต หรือทำให้สิ่งแวดล้อมมีการเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อย ซึ่งเป็นการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมไว้เพื่อคนรุ่นหลังน้อย”

ในอดีตประเทศที่กำลังพัฒนาส่วนใหญ่รวมทั้งประเทศที่พัฒนาแล้ว เน้นการพัฒนาทางด้านอุตสาหกรรมและเศรษฐกิจ ในส่วนของจิตสำนึกเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมแทบไม่มีเลยหรือน้อยมาก แต่ทว่าในปัจจุบันนี้ปัญหาสิ่งแวดล้อมหลายประการที่คนทั่วโลกประสบอยู่ เป็นผลมาจากการพัฒนาประเทศในลักษณะดังกล่าว เพื่อลดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่นับวันจะทวีความรุนแรงมากขึ้น ประเทศที่กำลังพัฒนาทั้งหลายควรปรับเปลี่ยนแนวคิดในการพัฒนาประเทศ โดยมีนโยบายในการพัฒนาประเทศควบคู่ไปกับการพัฒนาหรือการฟื้นฟูสิ่งแวดล้อม พร้อมทั้งมีการเสริมสร้างจิตสำนึกเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมให้แก่เยาวชนภายในประเทศอย่างต่อเนื่อง เพื่อลดปัญหาสิ่งแวดล้อมและอาจนำไปสู่การพัฒนาแบบยั่งยืนในอนาคต ดังเช่น



ประเทศที่พัฒนาแล้ว ซึ่งมีการรณรงค์และให้ความสำคัญในเรื่องของสิ่งแวดล้อมค่อนข้างมาก ซึ่งประสบผลสำเร็จอย่างมากในการจัดการของเสีย

แนวคิดในการจัดการเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมเป็นสิ่งที่กำลังได้รับความนิยม และได้รับความสนับสนุนจากองค์กรระหว่างประเทศหลายแห่ง เช่น องค์กรสหประชาชาติ ธนาคารโลก ธนาคารเพื่อการพัฒนาเอเชีย และองค์กรความช่วยเหลือระหว่างประเทศ ได้แก่ DANCED จากประเทศเคนมาร์ก NEDO จากประเทศญี่ปุ่น GTZ จากประเทศเยอรมัน เป็นต้น ความช่วยเหลือจากประเทศดังกล่าวแก่ประเทศกำลังพัฒนาอาจอยู่ในรูปของการเผยแพร่ความรู้ทางด้านเทคนิค หรือเทคโนโลยีในการจัดการของเสียที่ใช้กันมากในภาคอุตสาหกรรม ซึ่งได้รับความสำเร็จมาแล้วเป็นอย่างดีโดยได้รับการสนับสนุนให้มีระบบจัดการของเสียในกระบวนการผลิตในภาคอุตสาหกรรมอย่างทั่วถึง เพื่อดำรงไว้ซึ่งสภาพแวดล้อมที่ดีในการทำงาน ตัวอย่างการจัดการของเสียที่ประสบความสำเร็จมาแล้วในภาคอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมฟอกหนัง น้ำมันปาล์ม โรงงานซูบโลหะ เป็นต้น

ข้อแตกต่างของระบบการจัดการของเสียในอดีตและในอนาคต แสดงไว้ในตารางที่ 5.1

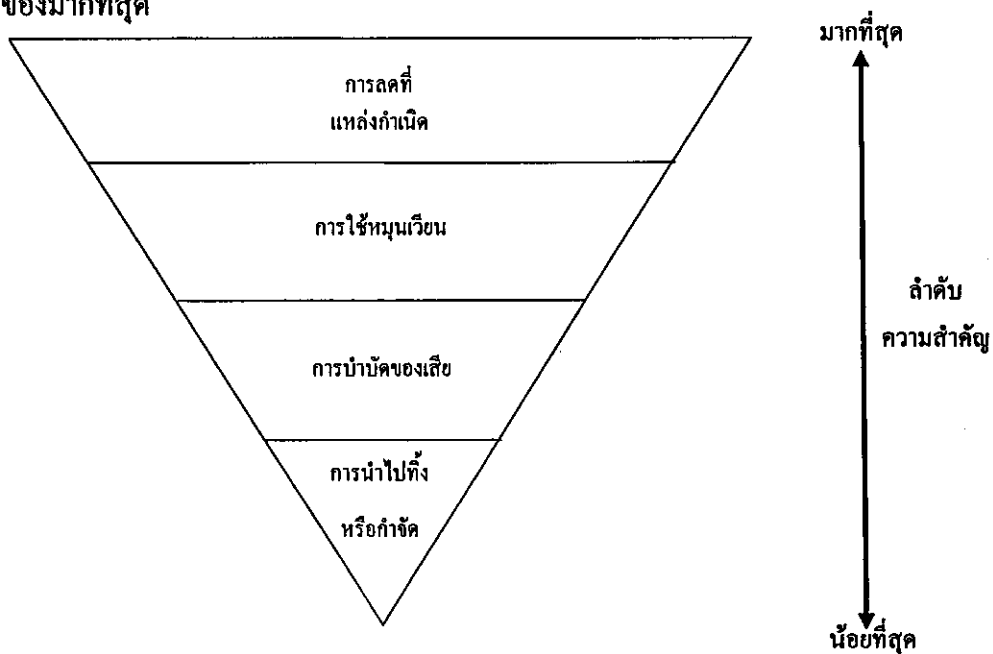
ตารางที่ 5.1 ข้อแตกต่างของระบบการจัดการของเสียในอดีตและในอนาคต

แนวทางในอดีต	แนวทางในอนาคต
การควบคุมปัญหามลพิษ (Pollution Control)	การจัดการสิ่งแวดล้อม (Environmental Management System : EMS)
การบำบัดที่ปลายท่อ (End of Pipe Treatment)	การป้องกันมลพิษที่จุดกำเนิด (Source Reduction)
มลพิษที่บำบัดแล้วแปลงสภาพเป็นรูปอื่น ต้องนำไปบำบัดต่อ เสียค่าใช้จ่ายเพิ่ม	เพิ่มผลผลิต ไม่มีมลพิษสู่สิ่งแวดล้อม ลดค่าใช้จ่าย
มาตรฐานมลพิษจากแหล่งกำเนิดต้องเข้มงวดขึ้น ตามลำดับเพื่อรักษาสิ่งแวดล้อม	การพัฒนาที่ยั่งยืน (Sustainable Development)

จากตารางที่ 5.1 จะเห็นว่าการจัดการสิ่งแวดล้อมในอดีตนั้น เป็นการแก้ไขปัญหาสิ่งแวดล้อมที่ปลายเหตุหรือที่ปลายท่อ ซึ่งนอกจากนี้การจัดการเกี่ยวกับปัญหาสิ่งแวดล้อมจะกระทำก็ต่อเมื่อปัญหาสิ่งแวดล้อมเกิดขึ้นค่อนข้างรุนแรงและได้รับการร้องเรียนจากชุมชนในละแวกใกล้เคียง ส่วนการจัดการสิ่งแวดล้อมในอนาคตเป็นการแก้ไขปัญหาสิ่งแวดล้อมตั้งแต่จุดเริ่มต้นของกิจกรรมที่มีการใช้ทรัพยากร ซึ่งเป็นการป้องกันปัญหาสิ่งแวดล้อมหรือมลภาวะที่ต้นเหตุหรือจุดกำเนิด ปัญหาสิ่งแวดล้อมที่อาจจะเกิดขึ้นได้ ซึ่งเป็นปัญหาที่ไม่ได้คาดคิดไว้

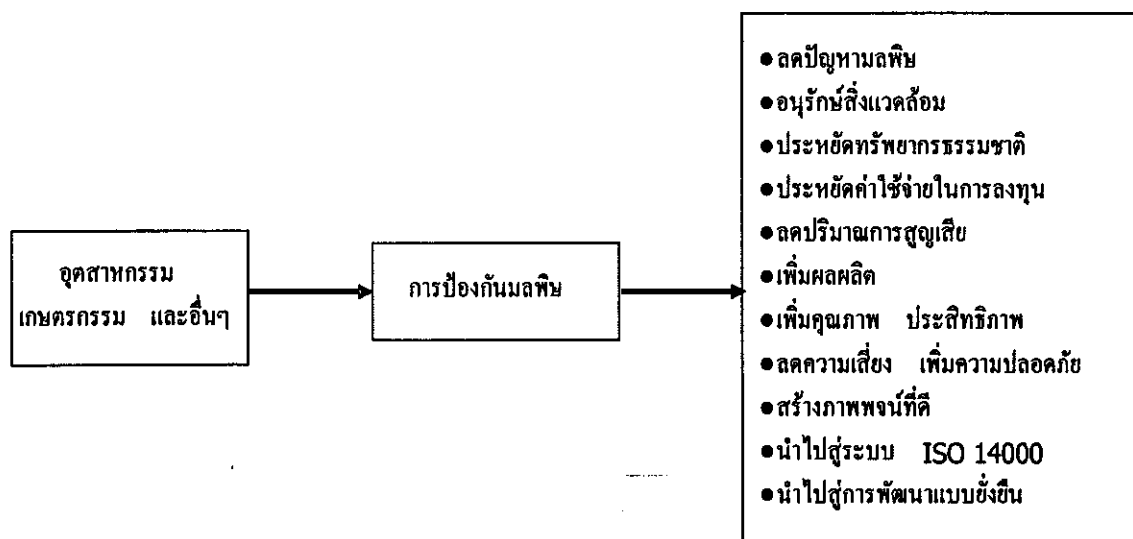
ประโยชน์ที่เกิดขึ้นจากการจัดการของเสียสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ในชีวิตประจำวันได้ ทั้งที่สถานที่ราชการ สถานประกอบการ หรือสถานที่ทำงาน สถานการศึกษา แหล่งการค้าและการบริการ เช่น การท่องเที่ยว ปัจจุบันนี้มีการรณรงค์เกี่ยวกับการท่องเที่ยวแบบยั่งยืน (Ecotourist) ซึ่งในประเทศไทยนั้นมีการรณรงค์มีการนำเอาการจัดการของเสียไปใช้ในสถานที่ประกอบการต่างๆ อาทิ ในฟาร์มเลี้ยงสุกรที่จังหวัดนครปฐม เป็นต้น

กระบวนการจัดการด้านสิ่งแวดล้อมประกอบด้วยกระบวนการรวบรวมของเสียไปทิ้ง เพื่อนำไปกำจัดหรือบำบัด การใช้หมุนเวียนและการลดปริมาณของเสียที่จุดกำเนิดหรือที่แหล่งของเสีย ดังแสดงไว้ในรูปที่ 5.1 ซึ่งจากรูปที่ 5.1 การจัดการของเสียให้ความสำคัญทางมากที่สุดในการลดปริมาณของเสียที่แหล่งกำเนิด ซึ่งเป็นสิ่งที่ช่วยให้การจัดการของเสียเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ และเป็นที่ยอมรับของหน่วยงานที่เกี่ยวข้องมากที่สุด



รูปที่ 5.1 ลำดับความสำคัญของการจัดการสิ่งแวดล้อม

ประโยชน์ของการจัดการสิ่งแวดล้อมแสดงไว้ในรูปที่ 5.2 นอกจากจะช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมแล้วยังช่วยเพิ่มผลผลิตอีกด้วย โดยนำเอาของเสียที่เกิดขึ้นนั้นไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่น เช่น การนำมูลสัตว์มาผลิตเป็นก๊าซชีวภาพ เป็นต้น นอกจากนี้ยังเป็นการสร้างภาพพจน์ที่ดีให้เกิดขึ้นกับองค์กรดังกล่าวอีกด้วย และยังเป็นการวางพื้นฐานการจัดการสิ่งแวดล้อมไปสู่ระบบมาตรฐานสากล เช่น ISO 14000 หรือ ISO 9000 เป็นต้น นอกจากนี้ยังนำมาซึ่งความสามารถในการแข่งขันทางตลาดขององค์กรได้มากขึ้น และอาจช่วยทำให้ส่วนแบ่งของตลาดในการค้าขายมีมูลค่ามากขึ้นด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระหว่างประเทศที่มีการแข่งขันทางด้านการค้าสูงมาก

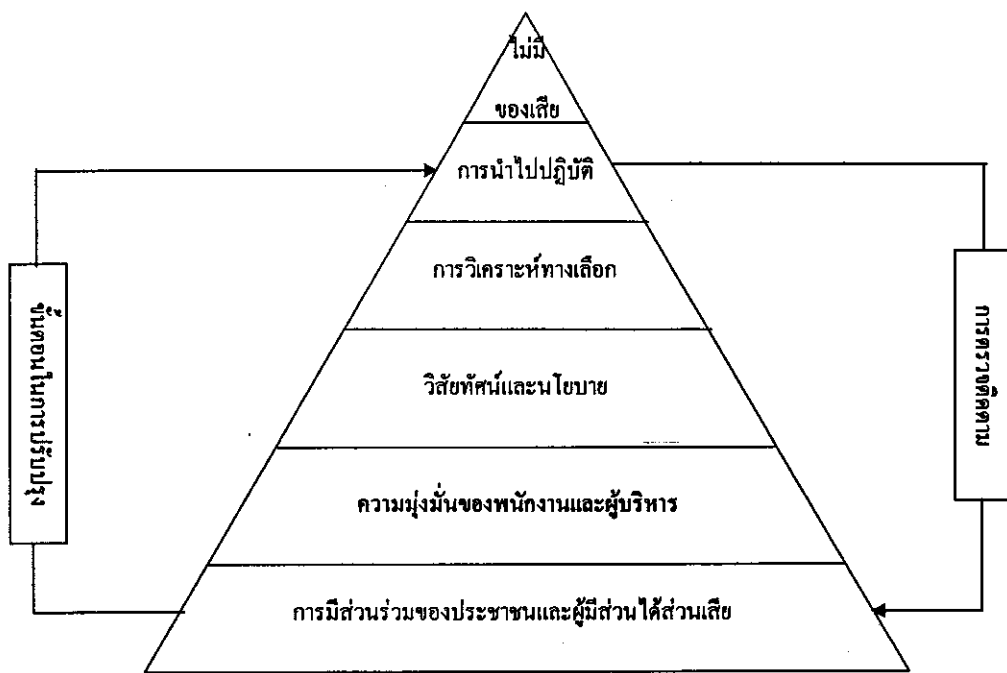


รูปที่ 5.2 ประโยชน์ที่เกิดขึ้นจากการจัดการของเสีย

ประโยชน์ที่เกิดขึ้นจากการจัดการของเสีย ได้แก่

1. ช่วยเพิ่มผลผลิตให้มีค่ามากขึ้น (Increase Production)
2. ช่วยรักษาสภาพแวดล้อม (Environmental Protection)
3. ช่วยคุ้มครองในเรื่องของสุขภาพของสาธารณชน และคนที่ทำงานอยู่ในหน่วยงาน หรือองค์กรนั้น (Safe Public Health and Worker Health)
4. นำไปสู่การพัฒนามาตรฐานสากลอื่นๆ (Approach to Another Standard)
5. เป็นที่ปรารถนาของลูกค้า (Pleased Customers) และอาจนำไปสู่การขายธุรกิจ (Enhanced Business)

การจัดการของเสียที่ดีควรเริ่มต้นมาจากการมีส่วนร่วมของประชาชน หรือผู้ที่มีส่วนได้ ส่วนเสีย ในการรับรู้ปัญหาสิ่งแวดล้อม ความมุ่งมั่นในการจัดการสิ่งแวดล้อมจากผู้ที่มีส่วนรับผิดชอบในเรื่องดังกล่าว โดยผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการแก้ไขปัญหาสิ่งแวดล้อม ควรมีวิสัยทัศน์ที่ยาวไกล และกำหนดออกมาเป็นนโยบาย เพื่อให้การดำเนินงานของการจัดการสิ่งแวดล้อมเป็นไปด้วยดี โดยพยายามหาแนวทางในการจัดการของเสียที่ดีที่สุด เมื่อนำไปปฏิบัติแล้วสักระยะเวลาหนึ่ง ควรทำการประเมินผลที่เกิดขึ้นจากการดำเนินการในการจัดการของเสียดังกล่าว เพื่อให้แนวทางในการจัดการของเสียดังกล่าวประสบผลสำเร็จได้และอาจจะมีของเสียเหลือน้อยที่สุดหรือไม่มีเลย ดังแสดงไว้ในรูปที่ 5.3

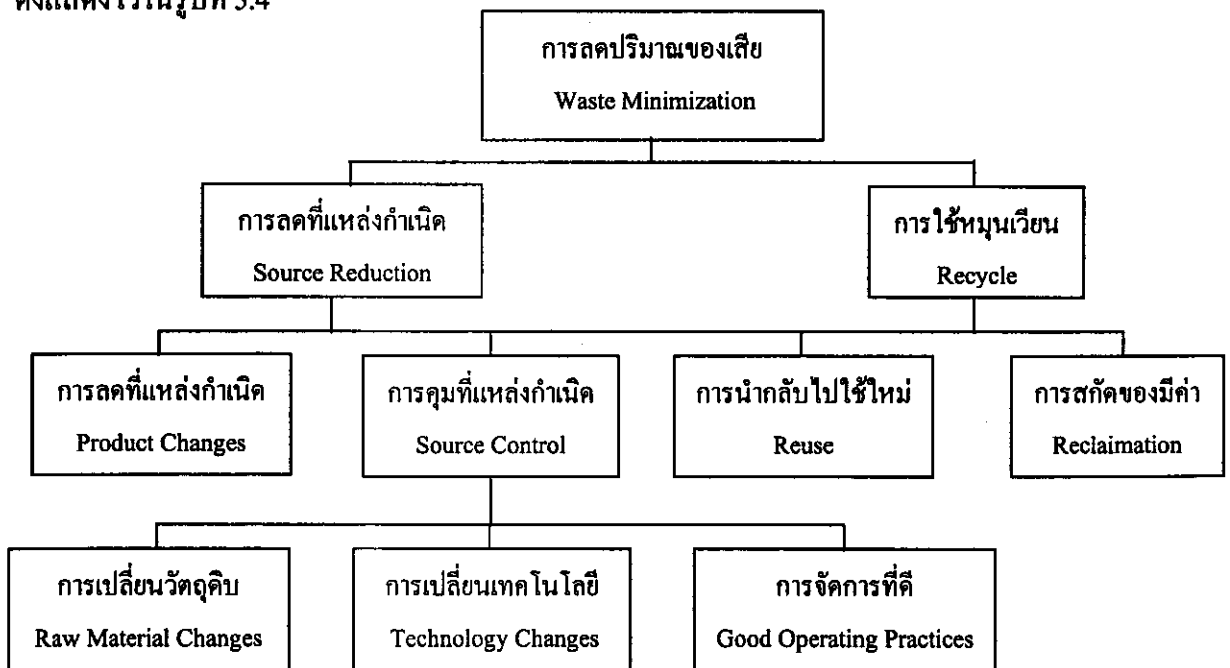


รูปที่ 5.3 รากฐานของความสำเร็จในการจัดการสิ่งแวดล้อม

ของเสียที่เกิดจากกิจกรรมของฟาร์มเลี้ยงสัตว์แบ่งได้ 2 ประเภท คือ ของแข็งและของเหลว โดยใช้สถานะของของเสียเป็นเกณฑ์ในการแบ่ง นอกจากนี้อาจแบ่งประเภทของของเสียตามองค์ประกอบของสารที่มีอยู่ในของเสีย จะแยกได้ 2 ประเภท คือ สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ดังนั้นการจัดการของเสียที่ดีควรเลือกวิธีการจัดการของเสียให้เหมาะกับของเสียแต่ละประเภท

หลักการจัดการของเสีย (Principal of Waste Management) ทำได้ 3 วิธี คือ

1. การจัดการของเสียที่จุดกำเนิดของกระบวนการ (Source Treatment) หมายถึง การกำจัดหรือการบำบัดของเสียที่เกิดขึ้นก่อนการเริ่มต้นกระบวนการที่มีการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ การจัดการของเสียด้วยวิธีนี้ทำให้เกิดของเสียน้อยมาก และหากมีการจัดการที่ดี ของเสียที่จะเกิดขึ้นในกระบวนการผลิตแทบไม่เกิดขึ้นเลย หากมีของเสียเกิดขึ้นย่อมเป็นสิ่งที่ไม่ได้คาดหวัง การจัดการของเสียแบบนี้ ได้แก่ ควบคุมปริมาณการใช้สารอาหารในฟาร์มเลี้ยงสัตว์ โดยไม่ให้เกิดการตกค้างภายในโรงเรือน เป็นต้น
2. การจัดการของเสียที่จุดสุดท้ายของกระบวนการผลิต (End of Pipe Treatment) หมายถึง การใช้ขั้นตอนในการบำบัดของเสียที่เกิดขึ้นในระหว่างที่กระบวนการผลิตกำลังเกิดขึ้น ภายหลังจากที่กระบวนการผลิตสิ้นสุดแล้ว การจัดการของเสียด้วยวิธีนี้มักเป็นการออกแบบระบบบำบัดของเสียแบบต่างๆ เช่น ระบบบำบัดน้ำเสีย ระบบบำบัดอากาศเสีย ระบบบำบัดขยะและของเสียอันตราย ได้แก่ กระจายไถ่ยุ่ง ภาชนะบรรจุสารอาหารเสริม เป็นต้น การจัดการของเสียด้วยวิธีนี้ไม่สามารถกำจัดของเสียหรือบำบัดของเสียได้หมด อาจมีของเสียบางส่วนหลงเหลืออยู่ซึ่งต้องนำไปผ่านการบำบัดในขั้นตอนอื่นๆ ต่อไป เพื่อลดความเป็นพิษของของเสียดังกล่าวลง
3. การลดปริมาณของเสีย (Waste Minimization) เป็นขั้นตอนที่สำคัญซึ่งจะช่วยลดค่าใช้จ่ายของการจัดการของเสียลงไปได้ค่อนข้างมาก เนื่องจากของเสียที่ผ่านขั้นตอนนี้อาจนำกลับไปใช้ในกระบวนการผลิตได้อีก องค์กรใดที่มีระบบการจัดการของเสียที่ดีมักได้รับผลพลอยได้ในส่วนของภาพลักษณ์ที่ดีขององค์กรอีกด้วย เป็นที่รู้จักกันมากขึ้นในการค้าขาย วิธีลดปริมาณของเสียมีมากมายหลายวิธี ดังแสดงไว้ในรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 การลดปริมาณของเสีย (Waste Minimization)

การลดปริมาณของเสีย แบ่งได้ 2 ประเภทใหญ่ คือ

1. การลดปริมาณของเสียที่แหล่งกำเนิด (Source Reduction) เป็นการลดปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตก่อนป้อนวัตถุดิบเข้าสู่กระบวนการผลิต การลดปริมาณของเสียด้วยวิธีนี้แบ่งย่อยได้อีก 2 วิธี คือ

- การเปลี่ยนผลิตภัณฑ์ (Product Change) เป็นการพิจารณาถึงสิ่งที่มีผลกระทบต่อคุณภาพและปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่จะได้รับการป้อน การจัดการของเสียในส่วนนี้ ได้แก่
  - การเปลี่ยนองค์ประกอบ (Change in Product Composition) เช่น การเปลี่ยนองค์ประกอบของปุ๋ยที่ใช้ สูตรอาหารที่ใช้ เป็นต้น
  - การเปลี่ยนวัตถุดิบ (Raw Material Change) ได้แก่ การคัดเลือกสายพันธุ์ของสัตว์ที่ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของสิ่งแวดล้อม หรือเกิดโรคภัยได้ยาก การใช้สารควบคุมแมลงนอยบในยามล่าคืนด้วยสมุนไพรที่มีอยู่ภายในท้องถิ่น แทนการใช้สารเคมี เป็นต้น
  - การประหยัดการใช้ผลิตภัณฑ์ (Product Conservation) ได้แก่ การใช้สารเคมีในการกำจัดวัชพืชในปริมาณที่เพียงพอต่อความต้องการ โดยไม่มีการตกค้างของสารเคมีดังกล่าวภายในโรงเลี้ยง การคำนวณหาปริมาณการใช้สารอาหารเสริมสร้างในฟาร์มปศุสัตว์ให้มีค่าเพียงพอต่อความต้องการ เป็นต้น
  - การทำผลิตภัณฑ์ทดแทน (Product Substitution) ได้แก่ การใช้ปุ๋ยอินทรีย์แทนการใช้ปุ๋ยเคมี การใช้สูตรอาหารที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อย หรือเกิดการย่อยสลายได้ง่าย เป็นต้น
- การควบคุมที่แหล่งกำเนิด (Source Control) การลดปริมาณของเสียแบบนี้มักเกี่ยวกับการคัดเลือกวัตถุดิบที่นำมาใช้ในกระบวนการผลิตหรือกิจกรรมอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิต เพื่อให้มีความเหมาะสมรวมทั้งมีวิธีการจัดการเกี่ยวกับทรัพยากรที่เกี่ยวข้องที่ดี เพื่อให้มีปริมาณสารเคมีตกค้างน้อยหรือไม่มีเลย การควบคุมปริมาณของเสียที่แหล่งกำเนิด แบ่งย่อยได้อีก 3 วิธี คือ
  - การเปลี่ยนวัตถุดิบ (Raw Material Changes) การควบคุมของเสียด้วยวิธีนี้ เป็นการพิจารณาและเลือกวัตถุดิบที่มีคุณภาพคล้ายคลึงกับวัตถุดิบเดิมโดยไม่ส่งผลกระทบต่อผลผลิตที่ได้จากการดำเนินกิจกรรมต่างๆ ในการผลิตวิธีการเปลี่ยนวัตถุดิบในกระบวนการจัดการของเสีย ได้แก่
  - การใช้วัตถุดิบที่สะอาด (Material Changes)
  - การใช้วัตถุดิบทดแทน (Material Substitution)
  - การประหยัดการใช้วัตถุดิบ (Material Conservation)

- การเปลี่ยนเทคโนโลยี (Technology Changes) เป็นการปรับเปลี่ยน หรือเปลี่ยนแปลงเทคนิค หรือเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องในกระบวนการผลิต ซึ่งอาจทำการเปลี่ยนแปลงไปเพียงบางส่วน หรือทำการเปลี่ยนแปลงไปทั้งหมดของกระบวนการดังกล่าว ตัวอย่างของการเปลี่ยนแปลงเทคโนโลยี แบ่งได้อีก คือ
  - การเปลี่ยนแปลงกระบวนการผลิต (Process Changes)
  - การเปลี่ยนแผนการติดตั้งเครื่องจักร (Equipment Layout หรือ Piping Changes)
  - การใช้ระบบอัตโนมัติ (Automatic)
  - การเปลี่ยนค่าที่ใช้ในการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยี (Operational Setting Changes)
- การจัดการที่ดี (Good Operating Practices) เป็นการวางแผนการจัดการเกี่ยวกับทรัพยากรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในกระบวนการผลิต เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานและยังช่วยลดปริมาณของเสียภายในองค์กรอีกด้วย การจัดการที่ดีเกี่ยวกับของเสีย ได้แก่
  - การป้องกันการสูญเสีย (Loss Prevention)
  - การปรับปรุงการจัดการ (Management Improvement)
  - การแยกประเภทของของเสีย (Waste Stream Segregation)
  - การปรับปรุงระบบขนย้ายวัสดุ (Material Handling Improvement)
  - การวางแผนการผลิต (Production Scheduling)
  - การควบคุมคุณภาพ (Quality Control)
  - การวางแผนวัสดุ และทรัพยากร (Material and Resource Planning : MRP)
  - การยกเครื่อง (Reengineering)

2. การใช้หมุนเวียน (Recycle) เป็นการนำเอาของเสียหรือทรัพยากรที่คิดว่าจะมีประโยชน์ เพื่อนำไปดัดแปลงใช้ประโยชน์ในด้านอื่นต่อไป ของเสียที่เกิดขึ้นนั้นอาจทำการหมุนเวียนภายในโรงงานหรือภายนอกโรงงาน การใช้หมุนเวียนของเสีย แยกได้ 2 ลักษณะ คือ

- การนำกลับไปใช้ใหม่ (Reuse) เป็นการนำเอาของเสียที่เกิดขึ้นมาใช้ให้เกิดประโยชน์ภายในองค์กรนอกเหนือไปจากการลดปริมาณของเสียแล้ว ยังช่วยลดค่าใช้จ่ายในการบำบัดของเสียอันตรายจากของเสียดังกล่าวด้วย และเป็นการสร้างรายได้จากการดำเนินการ กระบวนการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่ ได้แก่
  - การนำไปใช้ใหม่ในกระบวนการผลิตเดิม (Return to Original Process) เช่น การนำเอาปุ๋ยที่มีคุณภาพดีกลับมาใช้ใหม่ หรือนำมาผสมบางส่วนในปุ๋ยใหม่ การนำเอาอาหารเสริมสร้างที่ยังมีคือนำกลับไปใช้ใหม่อีกครั้ง

- การนำไปใช้เป็นวัตถุดิบทดแทนในกระบวนการผลิตอื่น (Raw Material Substitution for Another Process) เช่น การนำเอาปุ๋ยอินทรีย์ที่ได้จากของเสียใส่ลงในแปลงเกษตรกรรมแทนปุ๋ยเคมี เป็นต้น

อย่างไรก็ตาม การนำเอาของเสียกลับไปใช้ใหม่ (Waste Utilization) ควรคำนึงถึงหลักการ NICE โดยความหมายของคำย่อแต่ละคำเป็นดังนี้

N is for Non-Hazardous Waste Material หมายความว่า ของเสียดังกล่าวไม่ใช่ของเสียอันตราย

I is for Waste with High Improvability หมายความว่า ของเสียดังกล่าวสามารถนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ในขั้นตอนสุดท้ายได้

C is for Waste with High Consistency หมายความว่า ของเสียดังกล่าวมีคุณสมบัติไม่เปลี่ยนแปลงไปหรือหาของเสียอื่นๆ มาทดแทนได้ ซึ่งมีคุณสมบัติคล้ายคลึงกัน

E is for Waste with High Economic Feasibility หมายความว่า ของเสียดังกล่าวมีคุณค่าทางเศรษฐกิจ ช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิตได้ จากการนำของเสียดังกล่าวไปใช้

- การสกัดเอาสิ่งที่มีค่าออกมา (Reclamation) เป็นการนำเอาของเสียที่มีค่าอยู่กลับมาใช้ใหม่ ซึ่งเป็นการแยกเอาของที่มีค่าออกจากของเสียหรือเป็นการเอาผลผลิตที่เกิดจากกระบวนการผลิตไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่นๆ การสกัดเอาสิ่งที่มีค่าออกมาแบ่งได้
  - การสกัดเอาของที่มีค่ากลับมาใช้ใหม่ (Resource Recovery) เช่น การแยกเอาไคติน ซึ่งเป็นสารที่มีอยู่ในเปลือกหอยมาใช้ประโยชน์ การแยกเอาสาร โอเมก้า 3 ออกจากน้ำมันตับปลา เป็นต้น
  - การผลิตผลพลอยได้ (By-Product Recovery) เช่น การนำเอาก๊าซมีเทนที่ได้จากกระบวนการหมักไปใช้ในกระบวนการให้ความร้อน การผลิตกระแสไฟฟ้า การนำเอาความร้อนที่ได้ไปใช้กระบวนการกักไข่ เป็นต้น

ข้อมูลที่จะช่วยให้การจัดการของเสียภายในหน่วยงานหรือองค์กรต่างๆ ดำเนินไปได้ด้วยดี ได้แก่

1. การทำการทดลองหรือการวิจัย โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำเอาของเสียกลับมาใช้ใหม่หรือการสกัดเอาสิ่งที่มีค่าออกมา กระบวนการเรียกว่า การดำเนินงานวิจัย (Operation Research หรือ OR)
2. การเปลี่ยนแปลงคุณภาพของของเสียหรือผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการผลิต (Qualitative Flow Chart)
3. ปริมาณของเสียที่เกิดขึ้น (Quantitative Flow Diagram)
4. ข้อมูลกระบวนการผลิต (Process Information)



## ขั้นตอนในการจัดการของเสีย ประกอบไปด้วย

1. ทำการศึกษาเกี่ยวกับขั้นตอนทั้งหมดที่อยู่ในกระบวนการผลิต (Process Study) เป็นการพิจารณาเกี่ยวกับทางเลือกในการลดปริมาณของเสีย ในตำแหน่งต่างๆ ที่ทำให้เกิดของเสียภายในกระบวนการผลิต ข้อมูลที่ได้จะมีความถูกต้องมากน้อยเพียงใด ขึ้นกับความรู้ความเข้าใจในกระบวนการผลิตทั้งวัตถุดิบที่ใช้ ขั้นตอนในกระบวนการผลิต และผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น
2. การประมาณค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ (Economic Evaluation) การประมาณค่าของการจัดการของเสียทางด้านเศรษฐศาสตร์ต้องพิจารณาการใช้ทรัพยากรให้เกิดประโยชน์มากที่สุด ประสิทธิภาพของกระบวนการผลิต กฎระเบียบข้อบังคับและกฎหมายที่เกี่ยวข้อง ตลอดจนการยอมรับจากสาธารณชน
3. การจัดเรียงลำดับความสำคัญของแนวทางในการจัดการของเสีย (Waste Prioritization)
4. การเลือกแนวทางในการจัดการของเสียที่เกิดขึ้น (Selection Alternative) ควรพิจารณาเลือกทางเลือกที่เป็นปัญหาสำคัญก่อนหรือปัญหาเร่งด่วน
5. การปรับเปลี่ยนแผนการปฏิบัติงาน (Implementation) เพื่อให้ผลการปฏิบัติงานมีประสิทธิภาพมากขึ้น และเป็นไปตามที่ต้องการ
6. การนำไปใช้อีกครั้ง (Practical Again) ภายหลังจากที่ปรับเปลี่ยนแผนการปฏิบัติงานแล้ว ต้องนำแผนดังกล่าวไปใช้งานอีกครั้ง และประเมินผลการดำเนินการอีกครั้ง หากผลการประเมินออกมาดีกว่าเดิม ควรนำไปปฏิบัติ เพราะช่วยลดปริมาณของเสียได้มากขึ้น

ตัวอย่างของการจัดการของเสียภายในฟาร์มเลี้ยงสุกร ได้แก่

1. การประหยัดน้ำ กระทำได้ดังนี้ คือ การใช้วิธีการเลี้ยงในโรงเรือนที่ออกแบบระบบการแยกสิ่งปฏิกูลหรือของเสียออกได้สะดวก ลดการใช้น้ำล้างโรงเรือนและบริเวณที่เลี้ยงสัตว์ ลดของเสียที่ปนเปื้อนด้วยการกวาดก่อนล้างด้วยน้ำ ใช้น้ำเสียที่เกิดขึ้นในการเกษตรกรรม เช่น การปลูกผักหรือการเลี้ยงปลาเลี้ยงสาหร่าย เป็นต้น
2. การประหยัดพลังงาน ได้แก่ ใช้ก๊าซมีเทนที่ได้จากกระบวนการหมักของเสียเป็นเชื้อเพลิงในฟาร์ม ออกแบบโรงเรือนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น
3. นำของเสียกลับมาใช้ใหม่ ได้แก่ การนำกากตะกอนมาใช้เป็นปุ๋ย เลี้ยงสาหร่ายและพืชน้ำในน้ำเสีย เพื่อนำมาเป็นอาหารสัตว์ นำของเสียมาเลี้ยงปลา ทำเป็นอาหารเสริมให้สัตว์ นำบรรจุภัณฑ์ เช่น ขวด ยา เป็นต้น
4. ลดการใช้สารเคมี ได้แก่ ลดการใช้ฮอร์โมน ยาบำรุง หรือยาฆ่าเชื้อโรคต่างๆ ที่ไม่จำเป็น เลือกใช้สารที่เกิดการย่อยสลายตามธรรมชาติได้เองตามธรรมชาติ ป้องกันการปนเปื้อนของสารเคมีลงสู่แหล่งน้ำ หรือสู่สิ่งแวดล้อม ออกแบบโรงเรือนและมีการดูแลรักษาให้ถูกสุขลักษณะ เพื่อป้องกันโรค และการติดเชื้อ เลือกสายพันธุ์สัตว์ที่แข็งแรง ไม่เกิดโรคได้ง่าย เพื่อลดการใช้สารเคมีในการเลี้ยงสัตว์ เป็นต้น

## แบบฝึกหัดเพิ่มความเข้าใจ

1. ให้ยกตัวอย่างการจัดการของเสียในฟาร์มเลี้ยงสัตว์มา 1 ตัวอย่าง พร้อมทั้งระบุวิธีการจัดการของเสียภายในสถานประกอบการดังกล่าว และวิเคราะห์ว่าขั้นตอนดังกล่าวมีประโยชน์มากน้อยเพียงใด
2. การจัดการของเสียของฟาร์มเลี้ยงสุกรในจังหวัดนครปฐม มีวิธีการอย่างไร และการจัดการของเสียดังกล่าวเป็นการจัดการของเสียในลักษณะใด
3. มูลสุกร ไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่น นอกเหนือไปจากการผลิตก๊าซชีวภาพและการผลิตเป็นปุ๋ยอินทรีย์
4. ขั้นตอนในการลดปริมาณของเสียจากมูลช้างของจังหวัดลำปางเป็นอย่างไร ให้วิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์อื่น
5. การใช้ประโยชน์จากมูลสัตว์ที่เกิดขึ้นในฟาร์มเลี้ยงสัตว์ สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ทั้งหมดหรือไม่ เพราะเหตุใด เช่น มูลสุกร เป็นต้น
6. ให้วิเคราะห์การใช้ประโยชน์จากของเสียจากฟาร์มเลี้ยงสุกรของอำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา เพื่อนำมาใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพ

# บทที่ 6

## น้ำใต้ดินเบื้องต้น

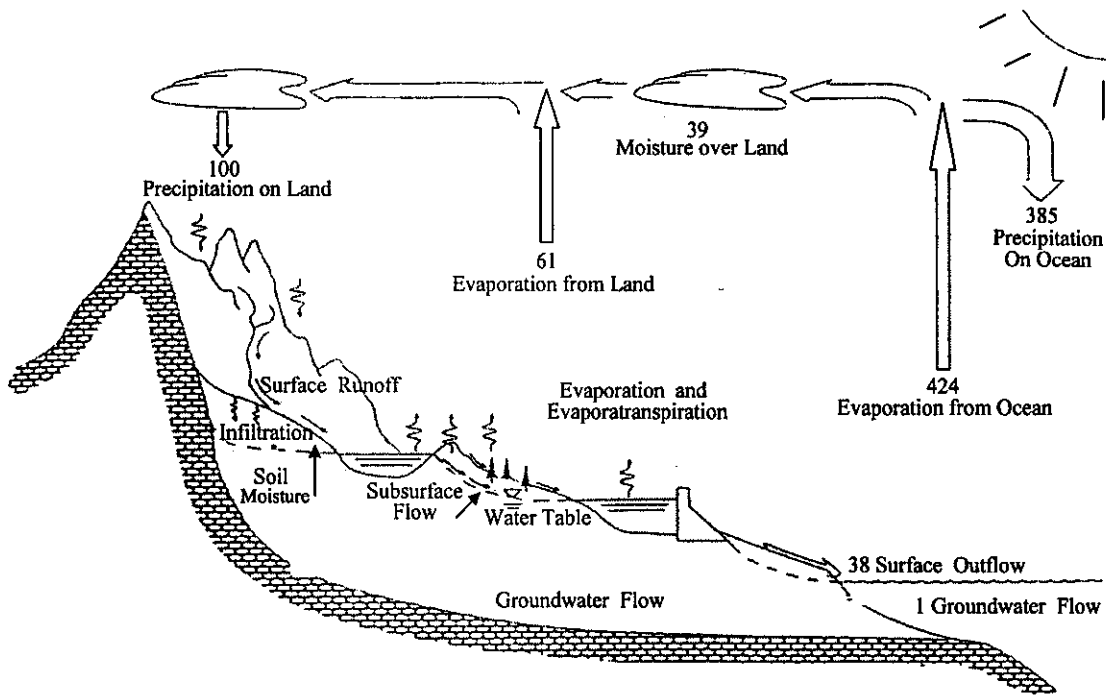
### (Fundamental of Groundwater)

น้ำเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่มีความสำคัญอย่างมากต่อมนุษย์และสิ่งมีชีวิตอื่นๆ ที่อาศัยอยู่ในโลกใบนี้ ทรัพยากรน้ำก่อให้เกิดพลังงานที่ไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลายทาง เช่น ผลิตกระแสไฟฟ้า การชลประทาน เป็นต้น แม้ว่าทรัพยากรน้ำมีประโยชน์ค่อนข้างมาก แต่ก็ก่อให้เกิดโทษอย่างมากมาย เช่น อุทกภัย เป็นต้น

แหล่งน้ำที่มนุษย์นำมาใช้ประโยชน์ มีอยู่ 3 แหล่ง คือ

1. น้ำผิวดิน (Surface Water) หมายถึง น้ำอยู่ในชั้นดินหรือชั้นหินที่มีระดับความลึกไม่มาก ความดันของน้ำในชั้นนี้เท่ากับความดันบรรยากาศ เช่น น้ำในแหล่งน้ำสาธารณะทั่วไป น้ำในสระ น้ำฝนที่ไหลตามแนวลาดของภูเขา เป็นต้น แหล่งน้ำประเภทนี้มีปริมาณไม่แน่นอนขึ้นกับฤดูกาลและไหลไม่ต่อเนื่อง (Ephemeral Stream)
2. น้ำใต้ดิน (Sub-surface Water หรือ Groundwater) หมายถึง น้ำที่แทรกอยู่ในชั้นดินหรือชั้นหิน ซึ่งอยู่ใต้พื้นดินลงไป แหล่งน้ำชนิดนี้มีปริมาณมากกว่าแหล่งน้ำอื่นๆ และคุณภาพค่อนข้างดี นอกจากนี้แล้วแหล่งน้ำในชั้นนี้ยังไหลอย่างต่อเนื่องตลอดปี (Perennial Stream) แต่ทว่าในปัจจุบันนี้ฟาร์มเลี้ยงสัตว์มีการระบายของเสียที่เกิดขึ้นในฟาร์มลงสู่แม่น้ำลำคลอง ซึ่งอาจเกิดการซึมลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน
3. น้ำจากฟ้าหรือน้ำฝน (Hydrospheric Water หรือ Atmospheric Water) หมายถึง น้ำที่มีอยู่ในชั้นบรรยากาศ ที่อยู่สูงจากผิวดินขึ้นไปเป็นระยะอย่างน้อย 15 กิโลเมตร

วงจรรออุทกวิทยา (Hydrological Cycle) หมายถึง แผนภาพที่ใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงของน้ำที่มีอยู่ในโลก ซึ่งเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและไม่มีการสูญหายไป ดังแสดงไว้ในรูปที่ 6.1 ซึ่งขึ้นกับปรากฏการณ์ทางธรรมชาติ ความกดอากาศ ลม ความชื้น เป็นต้น และสภาพภูมิศาสตร์ ซึ่งมีส่วนช่วยในการทำนายปริมาณน้ำในแต่ละพื้นที่ว่ามีค่าเท่าใด ช่วยให้แนวทางในการจัดการทรัพยากรน้ำเป็นไปด้วยดีและมีความถูกต้องมากขึ้น



รูปที่ 6.1 วงจรอุทกวิทยา (Hydrological cycle)

น้ำฝนที่ตกลงมาสู่พื้นดินภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลก บางส่วนถูกพืชกักเก็บเอาไว้ตามส่วนของใบหรือลำต้น น้ำในส่วนนี้เรียกว่า Interception น้ำส่วนที่เหลือจะไหลต่อไปตามความลาดของผิวดิน น้ำในส่วนนี้เรียกว่า น้ำท่า (Runoff) ซึ่งอาจมีน้ำบางส่วนเกิดการไหลซึมต่อไปยังชั้นน้ำใต้ดินตามรอยแตกของชั้นดินหรือชั้นหิน เรียกว่าน้ำส่วนที่ถูกเก็บไว้ตามรอยแตกชั้นดินหรือชั้นหินว่า น้ำใต้ดิน (Groundwater) น้ำที่เหลือจะไหลต่อไปยังพื้นที่ต่ำ ถูกเก็บไว้ในแหล่งน้ำธรรมชาติ เช่น ห้วย เป็นต้น น้ำในส่วนนี้เรียกว่า น้ำที่ถูกเก็บ (Storage Water) ในช่วงกลางวันน้ำส่วนที่ถูกเก็บก็จะเกิดการระเหยขึ้นไปสู่ท้องฟ้า เนื่องจากความร้อนของแสงแดดที่ส่องมายังผิวน้ำ น้ำในส่วนนี้เรียกว่า น้ำที่เกิดการระเหย (Evaporation Water) กระบวนการดังกล่าวเรียกว่า การระเหย (Evaporation) น้ำที่ส่วนที่เกิดจากกระบวนการสังเคราะห์ของพืชในช่วงกลางวันเกิดการระเหยขึ้นสู่ท้องฟ้า น้ำในส่วนดังกล่าวเรียกว่า น้ำที่เกิดจากการคายน้ำของพืช (Transpiration Water) กระบวนการนี้เรียกว่า การคายน้ำ (Transpiration) วงจรอุทกวิทยาหรือวงจรของน้ำจะเกิดในลักษณะนี้อย่างต่อเนื่องและเกิดซ้ำไปเรื่อยๆ

## การกำเนิดของน้ำใต้ดิน (Occurrence of Subsurface Water)

จากวงจรอุทกวิทยาพบว่าน้ำใต้ดิน เกิดจากน้ำผิวดินไหลซึมลงสู่ชั้นน้ำใต้ดินตามรอยแตกของชั้นดินหรือชั้นหินจนกระทั่งไม่สามารถไหลต่อไปได้อีก น้ำก็จะถูกเก็บสะสมในพื้นที่ดังกล่าว ชั้นน้ำดังกล่าวเรียกว่าชั้นน้ำอุ้มน้ำ (Aquifers) เมื่อทำการขุดเจาะน้ำบาดาลในชั้นนี้ จะได้น้ำที่เกิดการไหลขึ้นสู่ที่น้ำสูงในลักษณะเดียวกับน้ำพุ ในช่วงแรก จนกว่าความดันของน้ำมีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศ

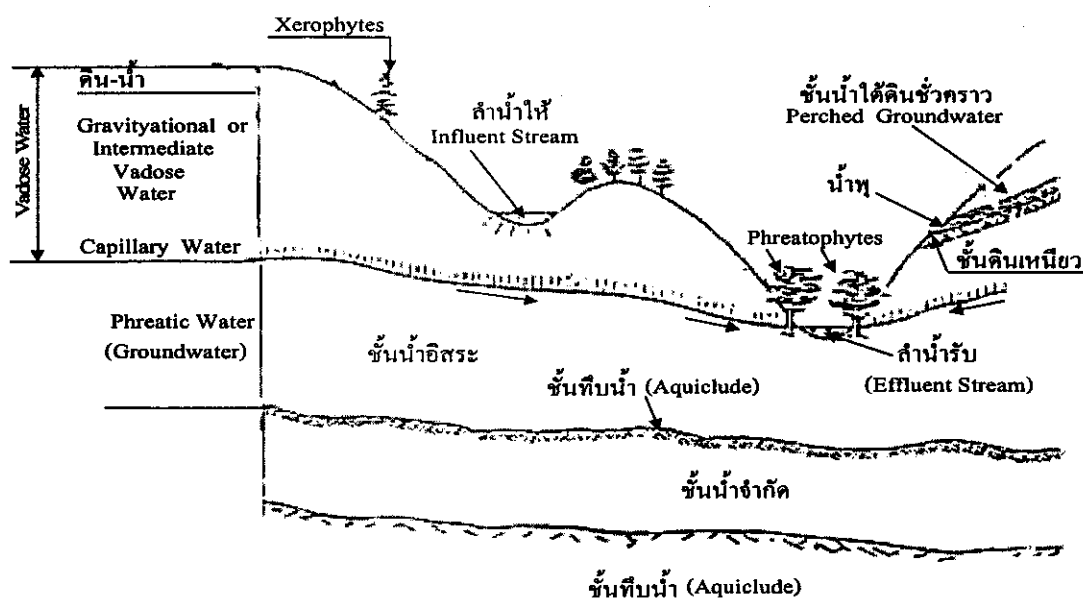
ชั้นน้ำแบ่งออกได้ 2 ประเภท คือ ชั้นน้ำที่อิ่มตัว (Saturated Subsurface Aquifer) เป็นชั้นน้ำใต้ดินที่สามารถรับน้ำใต้ดินหรือแหล่งน้ำผิวดินที่ซึมลงสู่ชั้นน้ำใต้ดินดังกล่าวได้อีก จนกว่าชั้นวัสดุดังกล่าวจะเกิดสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำ และชั้นน้ำแบบไม่อิ่มตัว (Unsaturated Subsurface Aquifer) เป็นชั้นน้ำใต้ดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ ความดันของน้ำในชั้นนี้มีค่ามาก ดังนั้นน้ำใต้ดินที่จะไหลเข้าสู่ชั้นน้ำใต้ดินดังกล่าวได้ ต้องมีความดันน้ำมากกว่าชั้นน้ำใต้ดินดังกล่าว

ชั้นน้ำแบ่งออกได้ 3 ประเภท ตามลักษณะทางธรณีวิทยา คือ

1. ชั้นน้ำที่อิ่มตัว (Aquiclude) ปริมาณน้ำในชั้นน้ำประเภทนี้ค่อนข้างน้อย เนื่องจากการไหลของน้ำเกิดได้ยากและไม่รับน้ำจากแหล่งน้ำอื่นๆ เข้ามา เนื่องจากคุณสมบัติของวัสดุดังกล่าวไม่ให้น้ำไหลผ่านและน้ำไหลผ่านยาก ตัวอย่างของชั้นน้ำที่อิ่มตัว คือ ชั้นดินเหนียว
2. ชั้นน้ำไม่อิ่มตัวและไม่ยอมให้น้ำ (Aquifuge) ชั้นดินหรือชั้นหินในชั้นน้ำแบบนี้มีสภาพไม่ต่อเนื่องน้ำไม่สามารถเกิดการไหลผ่านได้ และชั้นวัสดุ (ชั้นดินหรือชั้นหิน) ไม่สามารถเก็บน้ำไว้ได้ จนกว่าจะเกิดรอยแตกของชั้นวัสดุดังกล่าว ตัวอย่างของชั้นวัสดุดังกล่าว คือ ชั้นหินแกรนิต
3. ชั้นน้ำใต้ดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Aquitard) น้ำในชั้นนี้เกิดการไหลได้ค่อนข้างน้อย แต่ก็ยังดีกว่าชั้น Aquiclude ตัวอย่างของชั้นน้ำประเภทนี้ คือ ชั้นดินเหนียวปนทราย (Sandy clay)

การแบ่งชั้นน้ำใต้ดินอาจใช้เส้นระดับน้ำใต้ดิน (Water Table) เป็นเกณฑ์ในการแบ่ง ซึ่งแบ่งได้ 2 ชนิด คือ

1. ชั้นน้ำไม่อิ่มตัว และ 2. ชั้นน้ำที่อิ่มตัว ดังแสดงไว้ในรูปที่ 6.2



รูปที่ 6.2 ประเภทของชั้นน้ำใต้ดิน

1. **ชั้นน้ำไม่อิ่มตัว (Unsaturated Water)** เป็นชั้นน้ำที่อยู่บนสุด ซึ่งอาจเป็นชั้นหน้าดิน ชั้นน้ำแบบนี้ยังแบ่งได้อีก 3 ประเภท คือ

- **ชั้นโปร่งอากาศหรือชั้นที่มีอากาศ (Aeration Zone) หรือ ชั้นดินน้ำ (Soil Water)** การระเหยของน้ำในชั้นน้ำในชั้นนี้มีค่าค่อนข้างมาก และเกิดการระเหยได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อน ในพื้นที่บางแห่งซึ่งไม่กว้างมากอาจมีน้ำขังอยู่ แหล่งน้ำในบริเวณดังกล่าวเรียกว่า ชั้นน้ำใต้ดินแบบตื้นหรือชั้นน้ำใต้ดินชั่วคราว (Perched Water)

- **ชั้นน้ำโน้มถ่วง (Gravitational Water)** การไหลของน้ำในชั้นนี้อยู่ภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลก ซึ่งมักเกิดจากชั้นน้ำผิวดินเกิดการไหลไปตามรอยแตกของชั้นดินหรือชั้นหิน จนกระทั่งไหลต่อไปไม่ได้ อีก น้ำจะถูกเก็บไว้ในชั้นวัสดุดังกล่าว

- **ชั้นน้ำไหลย้อน (Capillary Water)** เป็นชั้นน้ำที่เกิดการไหลย้อนกลับหรือเกิดการไหลขึ้นไป แนวตั้ง ซึ่งต้านกับแรงโน้มถ่วงของโลกที่กระทำต่อชั้นน้ำใต้ดินดังกล่าว หากแรงลัพท์ของน้ำมากกว่าแรงโน้มถ่วงของโลก น้ำจะเกิดการไหลพุ่งขึ้นไปด้วยความดันของน้ำที่มากกว่าความดันบรรยากาศ แรงที่ทำให้เกิดการไหลในลักษณะได้ เรียกว่า แรงกะปิลลารี (Capillary Force) และความดันของน้ำที่อยู่ในชั้นนี้ เรียกว่า ความดันไฮโดรสแตติก (Hydrostatic Pressure) ซึ่งอาจเท่ากับค่าความดันบรรยากาศ (Atmospheric pressure) ขึ้นกับระดับความลึกของระดับน้ำใต้ดินและแปรผกผันกับขนาดของชั้นวัสดุ (ดินหรือหิน) ดังแสดงไว้ในตารางที่ 6.1 ความดันในชั้นน้ำดังกล่าวจะมีค่าลดลงจนเท่ากับความดันบรรยากาศ ระดับน้ำจะหยุดนิ่งที่ระดับดังกล่าว ระดับดังกล่าวเรียกว่า เส้นระดับน้ำ (Water Table)

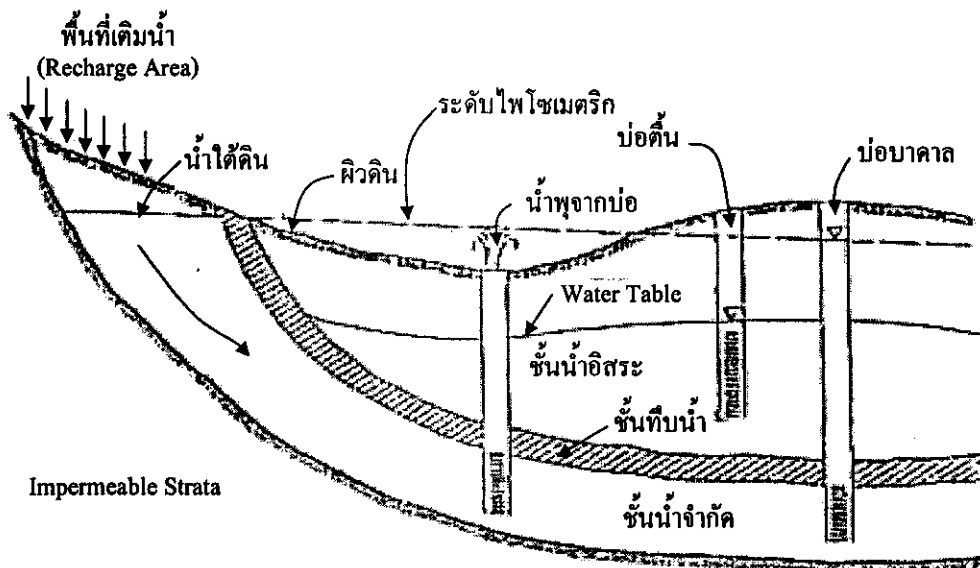
ตารางที่ 6.1 ระดับความสูงของน้ำภายในท่อแคปิลลารี ในวัสดุ ของชั้นน้ำไหลย้อนกลับ

ชนิดของดิน	เส้นผ่าศูนย์กลางของเม็ดดิน (มม)	ความสูงของน้ำ ในท่อแคปิลลารี (มม)
Silt	0.02 - 0.05	2000
Coarse Silt	0.05 - 0.10	1055
Fine Sand	0.10 - 0.20	428
Medium Sand	0.20 - 0.50	246
Coarse Sand	0.50 - 1.00	135
Very Coarse Sand	1.00 - 2.00	65
Fine Gravel	2.00 - 5.00	25

ชั้นน้ำที่แทรกตัวอยู่ในช่องว่างระหว่างวัสดุที่ติดกับพื้นดินบางครั้งอาจเรียกว่า ชั้นเติมอากาศ (Aeration Zone) และเรียกน้ำที่อยู่ในชั้นน้ำนี้ว่า วาโดสวอเตอร์ หรือความชื้นของดิน (Vadose Water หรือ Soil Moisture)

2. **ชั้นน้ำอิ่มตัว (Saturated Water)** ชั้นน้ำแบบนี้มักอยู่ใต้ระดับน้ำผิวดินลงไปค่อนข้างมาก เมื่อเทียบกับชั้นน้ำไม่อิ่มตัว โดยแทรกตามรอยแตกของชั้นวัสดุ ปริมาณน้ำใต้ดินในชั้นนี้ขึ้นกับขนาดช่องว่างของชั้นวัสดุ ชนิดและความยาวของรอยแตกของชั้นวัสดุ

ชั้นน้ำใต้ดินชั้นนี้แยกได้ 2 ประเภท ตามค่าความดันของน้ำ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 6.3 คือ ชั้นน้ำใต้ดินอิสระ (Unconfined Aquifer) ซึ่งค่าความดันของน้ำใต้ดินเท่ากับค่าความดันบรรยากาศ ชั้นน้ำใต้ดินที่มีการสะสมของน้ำใต้ดินระหว่างชั้นวัสดุที่อยู่ลงไปจากผิวดินค่อนข้างมาก ความดันน้ำของชั้นน้ำใต้ดินชั้นนี้มีค่ามากกว่าค่าความดันของบรรยากาศ ชั้นน้ำใต้ดินชั้นนี้ว่า ชั้นน้ำใต้ดินจำกัด (Confined Aquifer) เมื่อทำการขุดเจาะน้ำจนถึงระดับความลึกของชั้นวัสดุที่เก็บน้ำเอาไว้ในชั้นนี้ จะเกิดการไหลย้อนของน้ำในชั้นนี้ในลักษณะเดียวกับน้ำพุ บางครั้งอาจเรียกชั้นน้ำแบบนี้ว่า ชั้นน้ำบาดาล (Groundwater)



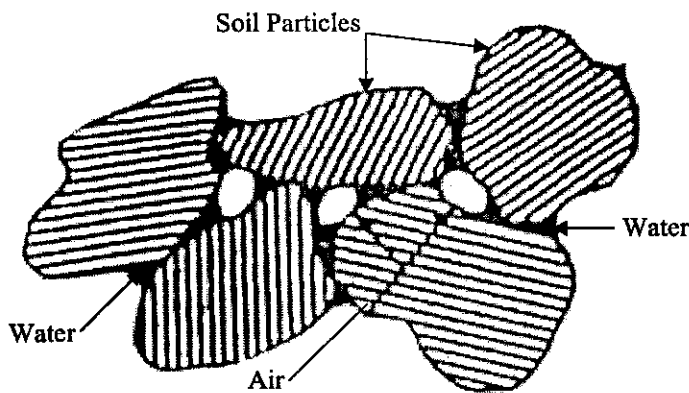
รูปที่ 6.3 ประเภทของชั้นน้ำใต้ดินในชั้นน้ำอิ่มตัว

ระดับน้ำใต้ดินมีความสัมพันธ์กับระดับน้ำอื่นๆ ที่อยู่รอบแหล่งน้ำใต้ดินที่พิจารณา ถ้าระดับน้ำใต้ดินในชั้นที่พิจารณามีค่ามากกว่าระดับน้ำในชั้นน้ำอื่นๆ น้ำใต้ดินในชั้นน้ำที่พิจารณาไปยังชั้นน้ำอื่นๆ ที่ต่ำกว่า เรียกว่าน้ำที่ไหลออกจากชั้นน้ำที่พิจารณาเรียกว่า น้ำใต้ดินที่ไหลออก (Effluent Stream) ทำให้ปริมาณน้ำใต้ดินในชั้นน้ำดังกล่าวมีค่าลดลง ในทางตรงข้ามหากระดับน้ำในชั้นน้ำที่พิจารณาน้อยกว่าระดับน้ำมากกว่าระดับน้ำในชั้นน้ำอื่นๆ จะเกิดการไหลของชั้นน้ำใต้ดินอื่นๆ มายังชั้นน้ำที่พิจารณา น้ำใต้ดินที่ไหลเข้ามายังชั้นน้ำที่พิจารณา อยู่ เรียกว่า น้ำใต้ดินที่ไหลเข้า (Influent Stream)

## ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำและชั้นดิน (Soil - Moisture Relationship)

แรงที่ทำให้ น้ำ (ความชื้น) ยึดติดกับชั้นวัสดุ หรือแทรกตัวอยู่ในชั้นวัสดุ ประกอบไปด้วยแรง 2 ชนิดคือ แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดินกับน้ำ (Adhesive Force) และแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคของเม็ดดิน (Cohesive Force) โดยปกติแล้วแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาควัสดุมีค่ามากกว่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุกับน้ำ จะทำให้น้ำได้ดินเกิดการไหล เมื่อความดันของน้ำเกิดการเปลี่ยนแปลงไป หรือเกิดการเจาะท่อน้ำ ได้ดินหรือบ่อน้ำบาดาล

ชั้นน้ำที่แทรกอยู่ตามรอยแตกของชั้นดินหรือชั้นหิน แบ่งได้ 4 ลักษณะดังแสดงไว้ในรูปที่ 6.4 คือ



รูปที่ 6.4 ความสัมพันธ์ของน้ำและชั้นวัสดุ ในรูปแบบต่างๆ

1. Gravity Water น้ำได้ดินที่อยู่ในลักษณะแบบนี้มักพบเห็นในช่องว่างของอนุภาคดินที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งเก็บน้ำเอาไว้จำนวนหนึ่งหรือมีอากาศแทรกอยู่จำนวนหนึ่ง เมื่อน้ำผิวดินซึมลงสู่ชั้นน้ำได้ดินจะถูกเก็บไว้ในบริเวณดังกล่าวในปริมาณเท่ากับอากาศที่ถูกแทนที่ไปด้วยน้ำ

2. Capillary Water น้ำได้ดินที่อยู่ในลักษณะแบบนี้มักพบเห็นในช่องว่างของอนุภาควัสดุขนาดเล็ก ซึ่งทำให้แรงกดคั้นของน้ำอาจมีค่ามากกว่าความดันของบรรยากาศ ส่วนน้ำได้ดินที่อยู่ในช่องว่างระหว่างชั้นวัสดุขนาดเล็ก ผลรวมของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นวัสดุกับน้ำ มีค่ามากกว่าแรงโน้มถ่วงของโลกที่กระทำค่อน้ำ ทำให้น้ำไม่ไหลไปภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลก แต่เคลื่อนที่ไหลย้อนขึ้นไปด้วยแรงดูดซับ (Capillary Force) โดยมีความเร็วน้อยกว่า Gravity Water และทิศทางการเคลื่อนที่ของน้ำได้ดินแบบนี้ไม่แน่นอน (Brownian Motion)

3. Hygroscopic Moisture น้ำได้ดินแบบนี้มีลักษณะคล้ายกับแผ่นฟิล์มบางที่อยู่รอบชั้นวัสดุ เมื่อชั้นน้ำดังกล่าวได้รับความร้อนมากขึ้น จะเกิดการระเหยของน้ำในลักษณะดังกล่าวขึ้น

4. Water Vapor เมื่ออุณหภูมิของน้ำมีค่ามากขึ้นน้ำที่เกาะอยู่บนผิวของชั้นวัสดุ จะระเหยกลายเป็นไอลอยขึ้นไปสู่ท้องฟ้าหรือระดับที่สูงต่อไปตามรอยแตกของชั้นวัสดุ

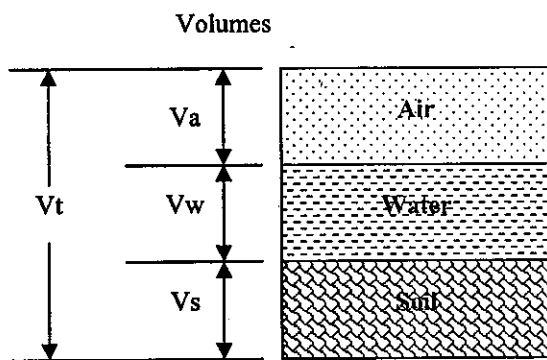


**คุณสมบัติของชั้นวัสดุ (Material Properties)** การไหลของน้ำใต้ดินที่ไหลผ่านชั้นวัสดุขึ้นกับคุณสมบัติของชั้นวัสดุ ได้แก่ ความพรุน พื้นที่ผิวจำเพาะ แรงคัปิลลารี ปริมาตรจำเพาะที่เหลืออยู่ เป็นต้น

1. **ความพรุน(Porosity : n)** หมายถึง คุณสมบัติของชั้นวัสดุที่ยอมให้น้ำไหลผ่านไปตามช่องว่างหรือรอยแตก ซึ่งน้ำใต้ดินสามารถแทนที่ช่องว่างของอากาศ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 6.5 ซึ่งประกอบไปด้วยชั้นอากาศ ชั้นน้ำ และชั้นวัสดุ สมการที่ใช้คำนวณหาค่าความพรุนเป็นดังสมการที่ 6.1 ซึ่งขึ้นกับขนาดของวัสดุ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 6.2 ความไม่สม่ำเสมอของรูปร่าง และการกระจายของชั้นวัสดุแบบต่างๆ

$$n = \frac{V_v}{V_T} \quad \dots 6.1$$

- เมื่อ  $V_v$  แทนปริมาตรของช่องว่างที่น้ำบรรจุอยู่เต็มรวมกับปริมาตรของอากาศที่แทรกอยู่ในชั้นวัสดุ หน่วยปริมาตร ดังแสดงไว้ในสมการที่ 6.2 หน่วยปริมาตร
- $V_a$  แทนปริมาตรของอากาศที่แทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างวัสดุ หน่วยปริมาตร
- $V_w$  แทนปริมาตรของน้ำที่แทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างวัสดุ หน่วยปริมาตร
- $V_T$  แทนปริมาตรทั้งหมดของดินหรือหิน มีค่าเท่ากับผลรวมของปริมาตรช่องว่างกับปริมาตรของวัสดุ หน่วยปริมาตร ดังแสดงไว้ในสมการที่ 6.3
- $n$  แทนค่าความพรุนของวัสดุ ไม่มีหน่วย



รูปที่ 6.5 องค์ประกอบของชั้นวัสดุ

$$V_v = V_a + V_w \quad \dots 6.2$$

$$V_T = V_a + V_w + V_s \quad \dots 6.3$$

เมื่อแทนค่าสมการที่ 6.2 และสมการที่ 6.3 ลงในสมการที่ 6.1 แล้วจัดรูปสมการใหม่ ได้ดังสมการที่ 6.4

$$n = 1 - \frac{V_s}{V_T} \quad \dots 6.4$$

ตารางที่ 6.2 ค่าความพรุนของวัสดุต่างชนิด และขนาดต่างๆ

วัสดุ	ขนาด (มิลลิเมตร.)	ค่าความพรุน : n (%)
กรวดหยาบ	16-32	28
กรวด	8-16	32
กรวดละเอียด	4-8	34
ทรายหยาบ	0.5-1	39
ทราย	0.25-0.5	39
ทรายละเอียด	0.125-0.25	43
Silt	0.114-0.062	46
ดินเหนียว	< 0.004	42

ค่าความพรุนมีความสำคัญต่อการไหลของน้ำใต้ดินหรือความชื้นภายในวัสดุค่อนข้างมาก ซึ่งนำมาใช้ประโยชน์ได้หลายด้าน โดยเฉพาะการศึกษาเกี่ยวกับทรัพยากรดินหรือหิน เช่น คุณสมบัติของชั้นดินหรือชั้นหิน การกักเก็บของดิน เป็นต้น

ตัวอย่างที่ 6.1 ดินชนิดหนึ่งประมาณผลรวมของปริมาตรอากาศที่อยู่เหนือน้ำรวมกับปริมาตรของน้ำในวัสดุได้เท่ากับ 15 ลิตร ปริมาตรของชั้นดินมีค่าประมาณ 20 ลิตร อยากทราบว่าค่าความพรุนของชั้นวัสดุดังกล่าว มีค่าเท่าใด

วิธีทำ ในที่นี้ค่า  $V_v$  เท่ากับ 15 ลิตร

$$\text{จากสมการที่ 6.3} \quad V_T = V_a + V_w + V_s \quad \dots 6.3$$

แทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ 6.3

$$\begin{aligned} \text{จะได้} \quad V_T &= 15 \text{ ลิตร} + 20 \text{ ลิตร} \\ &= 35 \text{ ลิตร} \end{aligned}$$

$$\text{จากสมการที่ 6.1} \quad n = \frac{V_v}{V_T} \quad \dots 6.1$$

แทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ 6.1

$$\begin{aligned} \text{จะได้} \quad n &= 15 \text{ ลิตร} / 35 \text{ ลิตร} \\ &= 0.43 \end{aligned}$$

คำตอบ ค่าความพรุนของวัสดุนี้ เท่ากับ 0.43

ตัวอย่างที่ 6.2 อยากรหาว่าระดับความลึกมากที่สุดของชั้นน้ำเมื่อคิดต่อ 1 ตารางนิ้ว ซึ่งมีค่าความพรุนเท่ากับ 0.5 เมื่อระดับความลึกมากที่สุดของชั้นวัสดุเท่ากับ 3 ฟุต

วิธีทำ จากสมการที่ 6.1 
$$n = \frac{V_v}{V_T} \quad \dots 6.1$$

ดังนั้น 
$$V_v = n * V_T$$

$$\frac{V_v}{A} = n * \frac{V_T}{A} \quad \dots 1^*$$

จากความสัมพันธ์ที่ว่า “ปริมาตรทั้งหมด เท่ากับ ผลคูณของพื้นที่หน้าตัดกับระดับความลึก” แทนค่าความสัมพันธ์ลงในสมการที่ 1\*

จะได้ 
$$\frac{A * \text{Water depth}}{A} = n * \frac{\text{Total depth} * A}{A}$$

$$\text{Water depth} = n * \text{Total depth}$$

$$= 0.5 * 3 \text{ ft} * \frac{12 \text{ in}}{1 \text{ ft}}$$

$$= 18 \text{ นิ้วต่อตารางนิ้ว}$$

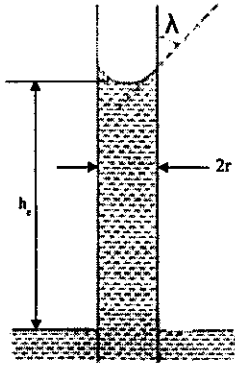
คำตอบ ความลึกมากที่สุดของระดับน้ำในชั้นวัสดุนี้ มีค่าเท่ากับ 18 นิ้วต่อตารางนิ้ว

- พื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific Surface) หมายถึง อัตราส่วนพื้นที่ผิวทั้งหมดของวัสดุที่สามารถเก็บหรืออุ้มน้ำไว้ได้ต่อน้ำหนักของวัสดุ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 6.3

ตารางที่ 6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวของวัสดุกับขนาดอนุภาค ซึ่งเป็นรูปทรงกลม

เส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาค (มิลลิเมตร)	ชนิดของวัสดุ	จำนวนอนุภาค ต่อ 1 ลบ.ซม.	พื้นที่ผิวรวม (ตารางเซนติเมตร)
10	กรวดเม็ดกลาง	1	3.14
1.000	ทรายหยาบ	$1 * 10^3$	31.4
0.100	ทรายละเอียด	$1 * 10^6$	314.0
0.020	ซิลต์	$1.25 * 10^8$	1570.0
0.002	ดินเหนียว	$1.25 * 10^{11}$	15,700.0

- แรงกะปิลลารีหรือกะปิลลารีเท็นชัน (Capillary Tension) หมายถึง แรงที่ทำให้น้ำได้เคลื่อนที่ไหลซึมขึ้นไปในแนวตั้ง ซึ่งไหลสวนทางกับแรงโน้มถ่วงของโลกที่กระทำต่อชั้นน้ำได้ดิน ดังแสดงไว้ในรูปที่ 6.6 ระดับความสูงของระดับน้ำได้ดิน (Capillary Rise) ที่ไหลขึ้นไปได้มากที่สุด ซึ่งวัดในรูปของความดันของน้ำ สามารถหาได้จากสมการที่ 6.5 และสมการที่ 6.6 ซึ่งเป็นสมการที่ใช้หาแรงกะปิลลารีที่สภาวะมาตรฐานจากตารางที่ 6.4 พบว่าแรงกะปิลลารีแปรผกผันกับขนาดของช่องว่างระหว่างดิน



รูปที่ 6.6 แสดงการไหลซึมขึ้นไปในแนวตั้งของน้ำภายในท่อเล็ก

$$hc = \frac{2 * T}{r * \gamma_w} * \cos \lambda \quad \dots 6.5$$

- เมื่อ  $r$  แทนรัศมีของท่อเล็กที่ใช้ในการทดสอบหาระยะความสูงของน้ำใต้ดินที่เกิดการไหลซึมในแนวตั้ง หน่วยเซนติเมตร
- $\gamma_w$  แทนน้ำหนักจำเพาะของน้ำใต้ดิน หน่วย  $g/cm^3$
- $\lambda$  แทนมุมระหว่างผิวโค้งของน้ำกับแนวตั้ง หน่วยองศา
- $T$  แทนแรงตึงผิวของชั้นน้ำใต้ดิน ซึ่งแปรผกผันกับอุณหภูมิของน้ำ หน่วย  $g/cm$
- $hc$  แทนระยะความสูงของน้ำใต้ดินที่เกิดการไหลซึมขึ้นไปแนวตั้งได้มากที่สุด หน่วยเซนติเมตร

ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ความดัน เท่ากับ 1 บรรยากาศ ค่าแรงตึงผิวเท่ากับ 0.078 กรัมต่อเซนติเมตร น้ำหนักจำเพาะ เท่ากับ  $1 g/cm^3$  และมุมระหว่างผิวโค้งของน้ำในแนวตั้ง เท่ากับ 20 องศา สำหรับน้ำบริสุทธิ์ในแก้วสะอาด ระยะความสูงของน้ำที่เกิดการไหลซึมขึ้นไปได้ในสภาวะดังกล่าว ซึ่งเป็นสภาวะมาตรฐาน เป็นดังสมการที่ 6.6

$$hc = \frac{0.15}{r} \quad \dots 6.6$$

ตารางที่ 6.4 ระยะความสูงของการไหลย้อนของวัสดุต่างชนิด ที่มีขนาดต่างๆ

วัสดุ	ขนาดของวัสดุ (มิลลิเมตร)	ระยะความสูงของน้ำที่ไหลขึ้นได้ (ซม)
กรวดละเอียด	2.00 - 5.00	2.5
ทรายหยาบมาก	1.00 - 2.00	6.5
ทรายหยาบ	0.50 - 1.00	13.5
ทราย	0.20 - 0.50	24.6
ทรายละเอียด	0.10 - 0.20	42.8
Silt	0.05 - 0.10	105.5
Silt	0.05 - 0.02	200.0

4. ค่าการซึมผ่าน (Permeability : K) หมายถึง ความสามารถของวัสดุที่ยอมให้น้ำไหลซึมผ่านช่องว่างของชั้นวัสดุออกไป ด้วยแรงที่มาจากความแตกต่างของระดับน้ำใต้ดินหรือเฮดของน้ำใต้ดินตั้งแต่ 2 แห่งขึ้นไป บางครั้งอาจเรียกค่าการซึมผ่านว่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน สมการที่ใช้คำนวณหาค่าการซึมผ่านเป็นดังสมการที่ 6.7 ซึ่งขึ้นกับชนิดของวัสดุและขนาดของวัสดุ

$$K = \frac{Q}{A} \quad \dots 6.7$$

เมื่อ Q คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของชั้นน้ำใต้ดินที่เกิดการไหลออกหรือไหลเข้าในแนวตั้งฉากกับรอยแตกของชั้นวัสดุ หน่วยปริมาตรต่อเวลา

A คือ พื้นที่หน้าตัดของชั้นวัสดุที่น้ำใต้ดินเกิดการไหลผ่าน หน่วย

K คือ ค่าการซึมผ่าน หน่วยเมตรต่อวัน

ตารางที่ 6.5 ค่า Hydraulic Conductivity ของวัสดุประเภทต่างๆ

ชนิดของวัสดุ	ค่า K : m/day
Clay soils (surface)	0.01-0.2
Deep clay beds	$10^{-8}$ - $10^{-2}$
Loam soils (Surface)	0.1-1
Fine sand	1-5
Medium sand	5-20
Coarse sand	20-100
Gravel	100-1000
Sand and gravel mixes	5-100
Clay Sand and gravel mixes (Till)	0.001-0.1
Sandstone	0.001-1
Carbonate rock with secondary porosity	0.01-1
Shale	$10^{-7}$
Dense solid rock	$< 10^{-5}$
Fractured หรือ Weathered rock (Aquifers)	0.001-10
Fractured หรือ Weathered rock (Core Samples)	0-300
Volcanic rock	0-1000

5. ค่าการส่งผ่าน (Transmissivity :T) หมายถึง อัตราการไหลของน้ำใต้ดินที่ไหลผ่านชั้นวัสดุในชั้นน้ำใต้ดินแบบจำกัด เมื่อคิดเทียบต่อหนึ่งหน่วยความยาวของชั้นน้ำและต่อหนึ่งหน่วยความเอียงของระดับน้ำสมการที่ 6.8 ใช้คำนวณหาค่าการส่งผ่าน

$$T = K * b \quad \dots 6.8$$

เมื่อ T คือ ค่าการส่งผ่าน หน่วยตารางเมตรต่อวัน ( $m^2/day$ )  
 K คือ ค่า Hydraulic Conductivity หน่วยเมตรต่อวัน (m/day)  
 b คือ ความหนาของชั้นอุ้มน้ำแบบจำกัด หน่วยเป็นเมตร (m)

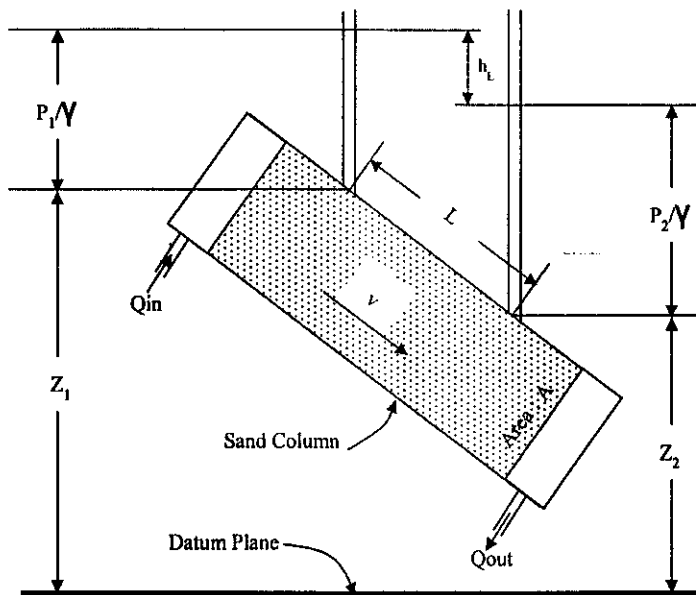
## การไหลของน้ำใต้ดิน (Groundwater Flowing)

น้ำใต้ดินมีการไหลตามหลักกลศาสตร์ภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลก กล่าวคือ “น้ำใต้ดินไหลจากบริเวณที่สูงไปยังบริเวณที่ต่ำ” ซึ่งกฎดังกล่าวเรียกว่า กฎของดาร์ซี (Darcy's Law) ใช้อธิบายการไหลของน้ำใต้ดินทั้งในชั้นน้ำอิสระและในชั้นน้ำจำกัด

### กฎของดาร์ซี (Darcy's Law)

เป็นเวลานานกว่า 100 ปีมาแล้ว ที่ประเทศฝรั่งเศส วิศวกรชื่อ Henry Darcy ได้ทำการกรองน้ำด้วยการปล่อยให้ให้น้ำไหลผ่านชั้นทรายตามแนวราบ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 6.7 และในปี 1856 นายดาร์ซีได้เขียนรายงานออกมา 1 เล่ม สรุปได้ว่า “อัตราการไหลของน้ำผ่านชั้นวัสดุกรอง (Porosity Media) แปรผันโดยตรงกับการสูญเสียเฮด (Head Loss) พื้นที่หน้าตัดของทรงกระบอกทราย และธรรมชาติของวัสดุกรองและแปรผกผันกับความยาวของทรงกระบอกทรายตามแนวทางของการไหล” ดังแสดงไว้ในสมการที่

6.9



รูปที่ 6.7 การทดลองเกี่ยวกับการไหลของน้ำภายในกระบอกทราย ของดาร์ซี

$$Q \propto -\frac{A \cdot h_L}{L} \quad \dots 6.9$$

- เมื่อ Q แทนอัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำใต้ดิน หน่วยปริมาตรต่อเวลา  
 A แทนพื้นที่หน้าตัดของชั้นอุ้มน้ำที่น้ำใต้ดินเกิดการไหลผ่านในแนวตั้งฉาก หน่วยพื้นที่  
 $h_L$  แทนการสูญเสียเฮดของน้ำ มีหน่วยเป็นเมตรของน้ำ คิดได้จากผลต่างของเฮดของน้ำ 2 แห่ง หาค่าด้วยระยะห่างของแหล่งน้ำทั้ง 2 แห่ง ไม่มีหน่วย  
 L แทนระยะห่างระหว่างจุดที่วัดเฮดของน้ำ 2 ตำแหน่ง หน่วยความยาว

จากสมการที่ 6.9 เมื่อเขียนความสัมพันธ์ดังกล่าวออกมาในรูปของสมการทั่วไป เป็นดังสมการที่ 6.10

$$Q = \frac{K * A * h_L}{L} \quad \dots 6.10$$

เมื่อ K แทนค่าการซึมผ่านชั้นอุ้มน้ำ (Hydraulic conductivity) หน่วยความยาวต่อเวลา

จากความสัมพันธ์ที่ว่า “อัตราการไหลเชิงปริมาตรของของไหล มีค่าเท่ากับ ผลคูณของความเร็วของการไหลของของไหลกับพื้นที่หน้าตัดของชั้นอุ้มน้ำที่ของไหลเกิดการไหลผ่านในแนวตั้งฉาก” ดังแสดงไว้ในสมการที่ 6.11 สมการคำนวณหาความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านรอยแตกของชั้นวัสดุเป็นดังสมการที่ 6.12

$$Q = v * A \quad \dots 6.11$$

$$\begin{aligned} v &= Q / A \\ &= \frac{K * A * h_L / L}{A} \\ &= \frac{K * h_L}{L} \\ &= \frac{K * d h_L}{d} \end{aligned}$$

} ... 6.12

เมื่อ v แทนความเร็วคาร์ซี หรือความเร็วเฉลี่ยของการไหล (Darcy Velocity) หรือ Specific Discharge Velocity หน่วยระยะทางต่อเวลา

K แทนค่าการซึมผ่าน (Hydraulic conductivity) หน่วยระยะทางต่อเวลา

$h_L$  หรือ  $dh_L$  แทนการสูญเสียเฮดของน้ำ มีหน่วยเป็นเมตรของน้ำ ซึ่งคิดได้จากผลต่างของเฮดของน้ำ 2 แห่งหารด้วยระยะห่างของแหล่งน้ำทั้ง 2 แห่ง ไม่มีหน่วย

L หรือ dL แทนระยะห่างระหว่างจุดที่ทำการวัดเฮดของน้ำ 2 ตำแหน่ง หน่วยความยาว

เครื่องหมายลบหน้าสมการที่ 6.10 หรือสมการที่ 6.12 แสดงให้เห็นว่าการไหลของน้ำใต้ดินเกิดขึ้นในทิศทางตรงข้ามกับการสูญเสียเฮดของน้ำใต้ดิน

ค่าความเร็วของน้ำใต้ดินที่ไหลภายในช่องว่างของชั้นวัสดุ (Actual Velocity :  $v_a$ ) เป็นดังสมการที่ 6.13

$$v_a = v/n \quad \dots 6.13$$

เมื่อ n แทนความพรุนของวัสดุ ไม่มีหน่วย

$V_a$  แทนความเร็วของน้ำใต้ดินที่ไหลผ่านช่องว่างของชั้นวัสดุ หน่วยระยะทางต่อเวลา



จากรูปที่ 6.7 เป็นกระบวนการกรองน้ำด้วยชั้นทราย ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ A ตารางเมตร ระยะห่างของอุปกรณ์ที่ใช้วัดเสดของน้ำที่ทางเข้าและทางออก เท่ากับ L หน่วยระยะทาง ระดับความแตกต่างของระดับน้ำที่ทางเข้ากับทางออก เพื่อควบคุมการไหลของน้ำภายในกระบอก เท่ากับ  $h_L$  จากการทดลองหาค่าพลังงานทั้งหมด (Total Energy หรือ Total Head หรือ Fluid Potential) เหนือระดับอ้างอิง เป็นดังสมการที่ 6.14 ซึ่งเรียกว่า สมการของเบอร์นูลลี (Bernoulli's equation)

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2 * g} + Z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2 * g} + Z_2 + h_L \quad \dots 6.14$$

- เมื่อ P แทนความดันของของน้ำภายในทรงกระบอกทราย หน่วย Pa  
 $\gamma$  แทนน้ำหนักจำเพาะของน้ำ หน่วยเมตรของน้ำ  
 v แทนความเร็วของการไหลของน้ำภายในทรงกระบอกทราย หน่วย m/sec  
 g แทนความเร่งของน้ำ เนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก หน่วย  $m/sec^2$   
 Z แทนระดับความสูงของระดับน้ำภายในทรงกระบอกทราย หน่วยเมตร (m)  
 $h_L$  แทนความแตกต่างของระดับความสูงที่จุดทางเข้ากับทางออกของทรงกระบอกทราย หน่วยเมตร (m)

ตัวห้อย 1 หมายถึง จุดทางเข้าของน้ำ

ตัวห้อย 2 หมายถึง จุดทางออกของน้ำ

จากสมการที่ 6.14 เมื่อคิดการสูญเสียเสด (Head loss) ของการไหลของน้ำภายในกระบอกทราย จะเป็นดังสมการที่ 6.15 เนื่องจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกระบอกทรายที่ใช้มีค่าเท่ากัน ดังนั้นผลต่างของการสูญเสียเสดความเร็วของน้ำที่ทางเข้าและที่ทางออกมีค่าเท่ากับศูนย์ (velocity head:  $H_v$ ) ค่าการสูญเสียเสดมีค่าเล็กน้อยเพียงใดขึ้นกับความเอียงและความดันของน้ำภายในกระบอกทรายที่ใช้ในการทดลอง

$$h_L = \left( \frac{P_1}{\gamma} + Z_1 \right) - \left( \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 \right) \quad \dots 6.15$$

ตัวอย่างที่ 6.3 ทำการทดสอบการไหลของชั้นน้ำใต้ดินผ่านตัวกลางสังเคราะห์ชนิดหนึ่ง ในทิศทางแกนนอน วัดค่าความพรุนของตัวกลางดังกล่าวได้เท่ากับ 35% ตัวกลางที่ใช้มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 1.5 ตารางเมตร ความยาวทั้งสิ้นของตัวกลางที่ใช้ในการทดสอบครั้งนี้ เท่ากับ 2.5 เมตร ระยะเวลาทั้งสิ้นที่น้ำเกิดการไหลผ่านตัวกลาง นับตั้งแต่เกิดการไหลเข้าและไหลผ่านออกจากตัวกลาง เท่ากับ 1 นาที อยากราบว่า

1. ความเร็วของคาร์ซีในการทดสอบครั้งนี้ มีค่ากี่เมตรต่อวินาที
2. ความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านช่องว่างของตัวกลางดังกล่าว มีค่ากี่เมตรต่อวินาที

วิธีทำ 1. จากสมการที่ 6.11  $Q = v * A$  .... 6.11

ดังนั้น  $v = \frac{Q}{A}$

$$= \frac{A * L/t}{A}$$

$$= \frac{L}{t} \quad \text{.... 2*}$$

แทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ 2\*

จะได้  $v = \frac{2.5 \text{ m} * \frac{3.28 \text{ ft}}{1 \text{ m}} * \frac{12 \text{ in}}{1 \text{ ft}} * \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ sec}}}{1}$

$$= 1.64 \text{ in/sec}$$

2. จากสมการที่ 6.13  $v_a = \frac{v}{n}$  ..... 6.13

แทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ 6.13

จะได้  $v_a = \frac{2.5 \text{ m/1min} * \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ sec}}}{0.35}$

$$= 0.12 \text{ m/sec}$$

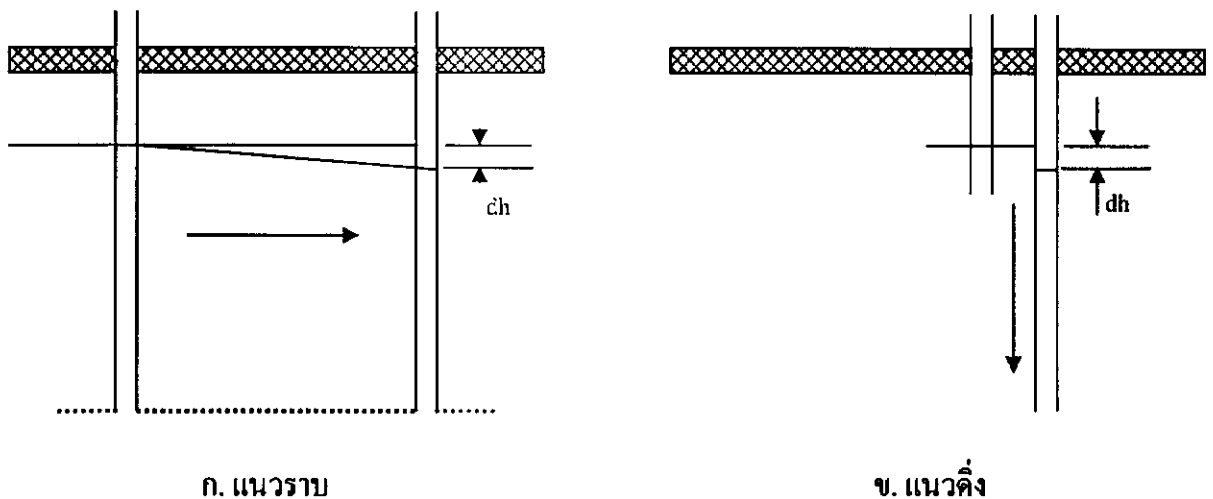
คำตอบ 1. ความเร็วของคาร์ซี มีค่า 1.64 นิ้วต่อวินาที

2. ความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านช่องว่างของตัวกลาง มีค่า 0.12 เมตรต่อวินาที (m/sec)

การหาทิศทางการไหลของชั้นน้ำใต้ดินอาศัยเครื่องมือที่เรียกว่า ไพโซมิเตอร์ (Piezometer) ซึ่งเป็นการวัดในรูปของความสูงของระดับน้ำใต้ดิน หรือความดันของชั้นน้ำใต้ดิน ระดับน้ำที่ทำการวัดเรียกว่า ไพโซเมตริก (Piezometric Level) หรือระดับน้ำ (Water Level)

การไหลของชั้นน้ำใต้ดิน มีอยู่ 2 ลักษณะ คือ

1. การไหลในแนวราบ (Horizontal Movement) การหาทิศทางการไหลของชั้นน้ำใต้ดิน ทำได้โดยการติดตั้งไพโซมิเตอร์จำนวนอย่างน้อย 2 ชั้น ในระดับเดียวกัน ห่างกันเป็นระยะหนึ่ง เท่ากับ  $L$  ดังแสดงไว้ในรูปที่ 6.8 (ก) ถ้าระดับน้ำในไพโซมิเตอร์มีค่าเท่ากัน แสดงว่าในบริเวณดังกล่าวน้ำใต้ดินไม่มีการไหล แต่ถ้ามีความแตกต่างของระดับน้ำเกิดขึ้น แสดงว่าน้ำใต้ดินเกิดการไหลจากไพโซมิเตอร์ที่มีค่าระดับน้ำมีค่ามากไปยังไพโซมิเตอร์ที่มีค่าระดับน้ำน้อยกว่า
2. การไหลในแนวตั้ง (Vertical Movement) การหาทิศทางการไหลของชั้นน้ำใต้ดิน ทำได้โดยการติดตั้งไพโซมิเตอร์จำนวนอย่างน้อย 2 ชั้น ในระดับต่างกันและห่างกันเป็นระยะหนึ่งเกือบวางชิดกัน ดังแสดงไว้ในรูปที่ 6.8 (ข) ถ้าระดับน้ำในไพโซมิเตอร์มีค่าเท่ากันแสดงว่าในบริเวณดังกล่าวน้ำใต้ดินไม่มีการไหล แต่ถ้ามีความแตกต่างของระดับน้ำเกิดขึ้นแสดงว่าน้ำใต้ดินเกิดการไหลจากไพโซมิเตอร์ที่มีค่าระดับน้ำมีค่ามากไปยังไพโซมิเตอร์ที่มีค่าระดับน้ำน้อยกว่า

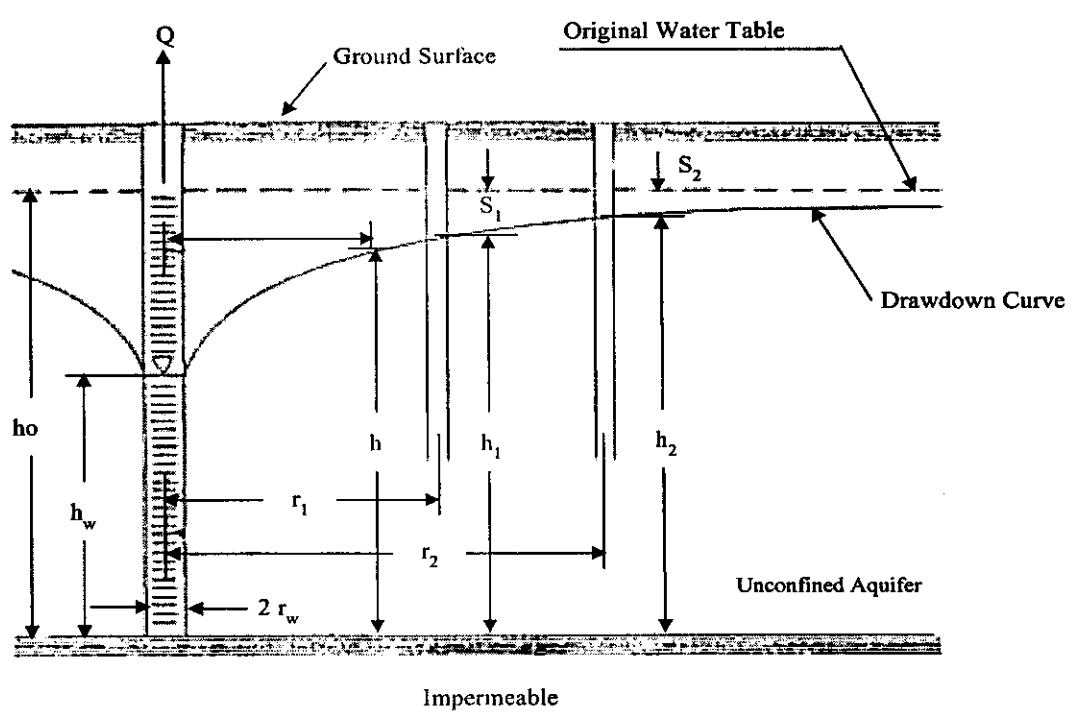


รูปที่ 6.8 การหาทิศทางการไหลของชั้นน้ำใต้ดิน  
ก. แนวราบ ข. แนวตั้ง

ประเภทของการไหลของน้ำใต้ดิน (Groundwater Flowing Type) การพิจารณาการไหลของน้ำใต้ดินในชั้นน้ำแต่ละประเภท แยกได้ 2 สภาวะ คือ การไหลของน้ำใต้ดินในสภาวะคงที่ (Steady State Condition) และการไหลของน้ำใต้ดินในสภาวะไม่คงที่ (Unsteady State Condition) เนื่องจากการไหลของน้ำใต้ดินในสภาวะแบบไม่คงที่ ต้องทำการวัดข้อมูลการเปลี่ยนการขึ้นลงของระดับน้ำใต้ดินตลอดเวลาที่เกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งมีความยุ่งยากมากในการคำนวณ ดังนั้นในที่นี้จะกล่าวถึงเพราะกรณีการไหลของชั้นน้ำใต้ดินในสภาวะคงที่เท่านั้น

การไหลของน้ำใต้ดินแบ่งออกได้ 2 ประเภทโดยใช้เส้นระดับน้ำในชั้นน้ำใต้ดินเป็นเกณฑ์ในการแบ่ง คือ ชั้นน้ำแบบอิสระ (Unconfined Aquifer) และชั้นน้ำจำกัด (Confined Aquifer) สมการที่ใช้คำนวณหาอัตราการไหลของน้ำใต้ดิน แยกออกได้ 2 กรณี คือ

1. การไหลของน้ำใต้ดินในชั้นน้ำอิสระที่สภาวะคงที่ (Unconfined Aquifer Flowing at the Steady State Condition) ลักษณะของการไหลของน้ำใต้ดินในชั้นน้ำอิสระ เกิดจากระดับน้ำใต้ดินในชั้นวัสดุที่อัดแน่นปานกลาง หรืออัดแน่นน้อยมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการสูบน้ำใต้ดินหรือเจาะน้ำใต้ดินมาถึงชั้นน้ำดังกล่าว การเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดินในชั้นน้ำอิสระแสดงไว้ในรูปที่ 6.9 เส้นกราฟที่แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำหรือเฮดของน้ำแต่ละตำแหน่งของชั้นน้ำใต้ดิน เมื่อทำการสูบน้ำออกไปจำนวนหนึ่ง เรียกว่า แผนภาพการลดลงของน้ำใต้ดิน (Draw Down Curve) และระดับน้ำที่ลดลงไปจนมีค่าคงที่ เรียกว่า ระดับน้ำลด (Draw Down Level : DDL)



รูปที่ 6.9 การไหลของชั้นน้ำใต้ดินแบบอิสระ

ก่อนทำการเจาะน้ำใต้ดินขึ้นมา ระดับน้ำใต้ดินเดิม เท่ากับ  $h_0$  เมตร เมื่อทำการเจาะน้ำใต้ดินด้วยท่อขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง  $d_w$  เซนติเมตร หรือ  $2 \cdot r_w$  เซนติเมตร เมื่อขุดเจาะน้ำใต้ดินจนทะลุชั้นน้ำอิสระและวัด อัตราการสูบของน้ำด้วยปั๊มน้ำเครื่องหนึ่ง สมมติว่าวัดอัตราการสูบได้เท่ากับ  $Q$   $m^3/sec$  ในช่วงแรกของการสูบน้ำใต้ดินขึ้นมา นั้น ระดับน้ำใต้ดินจะเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะตำแหน่งของ ไพโซมิเตอร์หรือบ่อสังเกตการณ์ ระดับน้ำใต้ดินเกิดเปลี่ยนแปลงน้อยลงเมื่อระยะห่างของบ่อสังเกต การณ์ห่างจากท่อเจาะน้ำใต้ดินมากขึ้น จนกระทั่งระดับน้ำใต้ดินไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงอีก วัดความสูง ของระดับน้ำใต้ดิน  $h$  ตำแหน่งดังกล่าวได้เท่ากับ  $h_w$  เมตร ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดินที่ สภาวะคงที่ (Steady State Condition)

พื้นที่การไหลของน้ำใต้ดินที่ไหลเข้าท่อเจาะน้ำใต้ดินในชั้นน้ำอิสระ เท่ากับ  $2 \cdot \pi \cdot r \cdot h$  ตารางเมตร สูบน้ำ ใต้ดินออกจากชั้นน้ำอิสระในอัตราการสูบน้ำเท่ากับ  $Q$  หน่วยปริมาตรต่อเวลา สมการในการคำนวณหา ค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำใต้ดินเป็นดังสมการที่ 6.16

$$Q = A \cdot v \quad \dots 6.16$$

แทนค่าพื้นที่หน้าตัดและความเร็วของคาร์ซีลลงในสมการที่ 6.16 แล้วจัดรูปสมการใหม่ จะได้ดังสมการที่ 6.17

$$\begin{aligned} \text{จะได้ } Q &= -2 \cdot \pi \cdot r \cdot h \cdot K \cdot \frac{dh}{dr} \\ Q \cdot \frac{dr}{r} &= -2 \cdot \pi \cdot h \cdot K \cdot dh \\ Q \cdot \int \frac{dr}{r} &= -2 \cdot \pi \cdot K \cdot \int h \cdot dh \quad \dots 6.17 \end{aligned}$$

ทำการอินทิเกรตสมการที่ 6.17 ที่ค่า  $r$  เท่ากับ  $r_w$  เมตร ไปจนถึงค่า  $r$  เท่ากับ  $r_0$  เมตร และที่ระดับความสูง ของน้ำใต้ดิน  $h$  เท่ากับ  $h_0$  เมตร ไปจนถึงระดับความสูงของระดับน้ำใต้ดิน  $h$  เท่ากับ  $h_w$  เมตร จะได้ดัง สมการที่ 6.18

$$Q = K \cdot \pi \cdot \frac{h_0^2 - h_w^2}{\ln(r_0 / r_w)} \quad \dots 6.18$$

เมื่อ  $Q$  แทนอัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำใต้ดินที่ถูกสูบออกจากชั้นน้ำใต้ดินแบบชั้นน้ำ อิสระ หน่วย  $m^3/sec$

$h_0$  แทนระดับความสูงเดิมของน้ำใต้ดิน เมื่อยังไม่เริ่มต้นการสูบน้ำ หน่วยเมตร

$h_w$  แทนระดับความสูงใหม่ของน้ำใต้ดิน เมื่อสูบน้ำออกจากชั้นน้ำอิสระ หน่วยเมตร

$r_0$  แทนรัศมีเดิมของระดับน้ำใต้ดิน เมื่อยังไม่มีการสูบน้ำมีหน่วยเมตร

$r_w$  แทนรัศมีของแท่งเจาะน้ำใต้ดิน หน่วยเมตร

ในทางปฏิบัติแล้วการหาค่า  $r_0$  ทำได้ค่อนข้างยาก เพราะต้องวัดรัศมีของน้ำใต้ดินในชั้นน้ำใต้ดินว่ามีค่าเท่าใด ซึ่งไม่ทราบว่าจะสิ้นสุดที่ใด หรือในบางครั้งค่าที่หาได้ก็ผิดพลาดเพราะเป็นการไหลของน้ำใต้ดิน อาจเกิดการไหลผ่านรอยแตกขนาดเล็กของวัสดุ ดังนั้นการหาอัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำใต้ดินอาจใช้หลักการของสมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation) ที่ว่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำใต้ดินในตำแหน่งใดๆ มีค่าเท่ากัน โดยใช้บ่อสังเกตการณ์ (Observation Well) จำนวน 2 บ่อ ขนาดเท่ากัน วัดระดับเสกของน้ำใต้ดินที่เกิดการเปลี่ยนแปลงไปของแต่ละบ่อ บ่อสังเกตการณ์ทั้งสองวางห่างจากท่อเจาะน้ำใต้ดินในระยะที่แตกต่างกัน สมมติว่าบ่อสังเกตการณ์ที่ 1 วางห่างจากท่อเจาะน้ำใต้ดินเป็นระยะทาง  $r_1$  เมตร วัดเสกของน้ำใต้ดินที่บ่อสังเกตการณ์ที่ 1 ได้เท่ากับ  $h_1$  เมตร เมื่อทำการสูบน้ำใต้ดินด้วยอัตราการสูบน้ำเท่าเดิม และระยะห่างของบ่อสังเกตการณ์ที่ 2 วางห่างจากท่อเจาะน้ำใต้ดิน เป็นระยะ  $r_2$  เมตร วัดเสกของน้ำของบ่อสังเกตการณ์ที่ 2 ได้เท่ากับ  $h_2$  เมตร ผลของการอินทิเกรตสมการที่ 6.17 ที่ค่า  $r$  เท่ากับ  $r_1$  เมตร ไปจนถึง  $r$  เท่ากับ  $r_2$  เมตร และที่ค่า  $h$  เท่ากับ  $h_1$  เมตร ไปจนถึงค่า  $h$  เท่ากับ  $h_2$  เมตร เป็นดังสมการที่ 6.19

$$Q = \pi * K * \frac{h_2^2 - h_1^2}{\ln(r_2 / r_1)} \quad \dots 6.19$$

ค่าการซึมผ่านของชั้นน้ำใต้ดินที่ไหลชั้นวัสดุดังกล่าว เป็นดังสมการที่ 6.20

$$K = \frac{Q}{\pi} * \frac{\ln(r_2 / r_1)}{h_2^2 - h_1^2} \quad \dots 6.20$$

- เมื่อ Q แทนปริมาณการสูบน้ำออกจากท่อเจาะน้ำใต้ดิน หน่วย  $m^3/sec$   
 $h_1$  แทนระดับความสูง (เสกน้ำ) ซึ่งมีค่าค่อนข้างคงที่ของบ่อสังเกตการณ์ที่ 1 หน่วยเมตร  
 $h_2$  แทนระดับความสูง (เสกน้ำ) ซึ่งมีค่าค่อนข้างคงที่ของบ่อสังเกตการณ์ที่ 2 หน่วยเมตร  
 $r_1$  แทนระยะห่างของบ่อสังเกตการณ์ที่ 1 กับท่อเจาะน้ำบาดาล หน่วยเมตร  
 $r_2$  แทนระยะห่างของบ่อสังเกตการณ์ที่ 2 กับท่อเจาะน้ำบาดาล หน่วยเมตร

ค่าที่ได้จากสมการที่ 6.19 หรือจากสมการที่ 6.20 ไม่สามารถอธิบายลักษณะการลดลงของน้ำใต้ดิน โดยเฉพาะที่ผิวหน้า เพราะการไหลของน้ำใต้ดินในแนวตั้งมีค่ามากขึ้น สมการที่ใช้คำนวณหาค่าการส่งผ่าน (Transmissivity : T) เป็นดังสมการที่ 6.21

$$T = K * \frac{h_1 + h_2}{2} \quad \dots 6.21$$

จากสมการที่ 6.8  $T = K * b \quad \dots 6.8$

เมื่อเปรียบเทียบสมการที่ 6.21 กับสมการที่ 6.8

จะได้  $b = \frac{h_1 + h_2}{2}$

แทนค่าสมการที่ 6.20 และ  $h_1$  เท่ากับ  $h_0 - S_1$  และ  $h_2$  เท่ากับ  $h_0 - S_2$  ลงในสมการที่ 6.8

จะได้  $T = \frac{Q}{2 * \pi} * \frac{\ln(r_2 / r_1)}{\left[ \left( S_1 - \frac{S_1^2}{2 * h_0} \right) - \left( S_2 - \frac{S_2^2}{2 * h_0} \right) \right]} \quad \dots 6.22$

จากรูปที่ 6.9 พบว่าในช่วงแรกของการสูบน้ำใต้ดิน ระดับความสูงของน้ำใต้ดินจะเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วจนกระทั่งระดับความสูงของน้ำใต้ดินมีค่าคงที่ ระดับความสูงของน้ำเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเทียบกับระดับความสูงของน้ำใต้ดินก่อนเดินเครื่องสูบน้ำ เรียกว่า ระดับน้ำลด (Draw Down Level: DDL) ดังแสดงไว้ในสมการที่ 6.23

$$DDL = h_o - h_w \quad \dots 6.23$$

เมื่อ DDL แทนระดับน้ำใต้ดินที่ลดลงไป เมื่อสูบน้ำใต้ดิน หน่วยเมตร

$h_o$  แทนระดับน้ำใต้ดินระดับเดิม ก่อนสูบน้ำใต้ดิน หน่วยเมตร

$h_w$  แทนระดับน้ำใต้ดินที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอีก เมื่อทำการสูบน้ำใต้ดินออกจากชั้นน้ำใต้ดิน ซึ่งเป็นการพิจารณาที่สภาวะคงที่ หน่วยเมตร

**ตัวอย่างที่ 6.4** ทำการหาอัตราการไหลของชั้นน้ำใต้ดินด้วยการสูบน้ำออกจากชั้นน้ำใต้ดินแบบอิสระ เพื่อนำมาหาค่าการซึมผ่านชั้นวัสดุของชั้นน้ำดังกล่าว ซึ่งด้านล่างของชั้นน้ำดังกล่าวเป็นชั้นหิน ลึก 20 เมตร ทำการสังเกตการณ์การเปลี่ยนแปลงระดับน้ำของชั้นน้ำดังกล่าวด้วยบ่อสังเกตการณ์จำนวน 2 บ่อ ซึ่งวางห่างจากท่อที่ทำกรเจาะน้ำใต้ดินเป็นระยะทาง 15 เมตร และ 100 เมตร ตามลำดับ ระดับน้ำของชั้นน้ำใต้ดินเดิมก่อนทำการสูบน้ำใต้ดินขึ้นไป มีค่าเท่ากับ 15 เมตร ภายหลังจากที่ทำการสูบน้ำใต้ดินขึ้นไปด้วยอัตรา 70 ลิตรต่อวินาที ปรากฏว่าระดับน้ำใต้ดินในบ่อสังเกตการณ์ที่ 1 และที่บ่อสังเกตการณ์ที่ 2 มีค่าเท่ากับ 11.4 เมตร และ 13.1 เมตร ตามลำดับ อยากทราบว่าค่าการซึมผ่านของชั้นน้ำดังกล่าวมีค่ากี่มิลลิเมตรต่อวินาที

**วิธีทำ**  $Q = \frac{70L}{\text{sec}} * \frac{1\text{m}^3}{10^3 L} = 70 * 10^{-3} \text{ m}^3/\text{sec}$

$r_1 = 15 \text{ m}, h_1 = 11.4 \text{ m}$

$r_2 = 100 \text{ m}, h_2 = 13.1 \text{ m}$

จากสมการที่ 6.20  $K = \frac{Q}{\pi} * \frac{\ln(r_2/r_1)}{h_2^2 - h_1^2} \quad \dots 6.20$

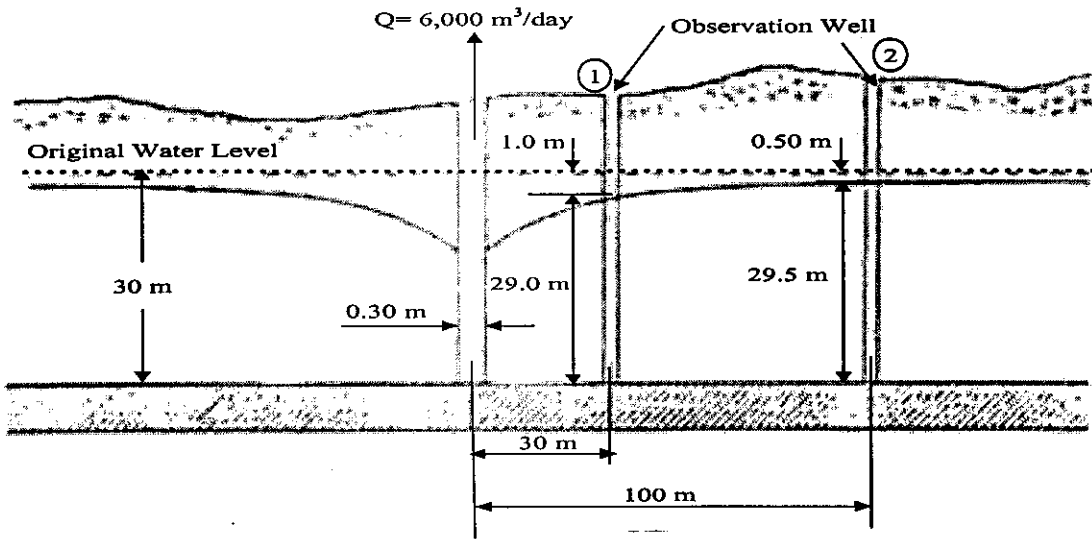
แทนค่าต่างๆ ที่ทราบค่าลงในสมการที่ 6.20

จะได้  $K = \frac{70 * 10^{-3} \text{ m}^3 * \ln(100 \text{ m} / 15\text{m})}{3.14 * (13.1^2 \text{ m}^2 - 11.4^2 \text{ m}^2)}$   
 $= 1.015 * 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{sec}} * \frac{10^3 \text{ mm}}{1 \text{ m}}$   
 $= 1.015 \text{ mm/sec}$

**คำตอบ** ค่าการซึมผ่านของชั้นวัสดุดังกล่าว เท่ากับ 1.015 มิลลิเมตรต่อวินาที

ตัวอย่างที่ 6.5 Suppose a well 0.30 m in diameter has been pumped at a rate of 6,000 m<sup>3</sup>/day for a long enough time that steady state conditions apply. An observation well located 30.0 m from the pumped well has been drawn down by 1.0 m and another well at 100.0 m is draw-down by 0.50 m. The well extends completely through an unconfined aquifer 30.0 m thick. Determine

1. The Hydraulic conductivity : K
2. Estimate the draw-down level at the well and the below figure show the details of example 4.5



รูปที่ 6.10 รายละเอียดของตัวอย่างที่ 6.5

วิธีทำ (1)  $Q = 6,000 \text{ m}^3/\text{day}$

$r_1 = 30.0 \text{ m}, \quad r_2 = 100.0 \text{ m}$

$h_1 = 29.0 \text{ m}, \quad h_2 = 29.5 \text{ m}$

จากสมการที่ 6.20  $K = \frac{Q}{\pi} * \frac{\ln(r_2/r_1)}{h_2^2 - h_1^2} \dots 6.20$

แทนค่าต่างๆ ที่ทราบค่าลงในสมการที่ 6.20

จะได้  $K = \frac{6000 \text{ m}^3/\text{day} * \ln(100.0 \text{ m} / 30.0 \text{ m})}{3.14 * (29.5^2 \text{ m}^2 - 29.0^2 \text{ m}^2)}$   
 $= 78.6 \text{ m/day}$

(2) Draw Down Level หมายถึง ระดับความสูงของน้ำที่ลดลงไป เมื่อทำการสูบน้ำได้ดินออกไปจากชั้นน้ำดังกล่าว เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำได้ดินที่สภาวะคงที่

ให้  $r_1 = r_w$



$$r_1 = 0.30/2 \text{ m}$$

$$= 0.15 \text{ m}$$

ให้  $h_1$  มีค่าเท่ากับ  $h_w$  เมตร

จากโจทย์  $r_2 = 30 \text{ m}$ ,  $h_2 = 29 \text{ m}$

$$\text{จากสมการที่ 6.19 } Q = \pi * K * \frac{(h_1^2 - h_w^2)}{\ln(r_1 / r_w)} \quad \dots 6.19$$

แทนค่าต่างๆ ลงไปในสมการที่ 6.19

$$\text{จะได้ } 6,000 \text{ m}^3/\text{day} = \pi * (78.6 \text{ m/day}) * \frac{(29.0^2 - h_w^2)}{\ln(30.0 \text{ m} / 0.15 \text{ m})}$$

ทำการแก้สมการข้างบน

$$\text{จะได้ } h_w = 26.7 \text{ m}$$

$$\text{จากสมการที่ 6.23 } DDL = h_o - h_w \quad \dots 6.23$$

แทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ 6.23

$$\text{จะได้ } DDL = 30.0 \text{ m} - 26.7 \text{ m}$$

$$= 3.3 \text{ m}$$

**คำตอบ** 1. ค่าการซึมผ่านของชั้นวัสดุดังกล่าว มีค่าเท่ากับ 78.6 เมตรต่อวัน

2. ระดับน้ำที่ลดลงไปมีค่าเท่ากับ 3.3 เมตร

3. การไหลของน้ำใต้ดินในชั้นน้ำจำกัดที่สภาวะคงที่ (Confined Aquifer Flowing at the Steady State Condition) การไหลของน้ำใต้ดินในชั้นอุ้มน้ำจำกัดเกิดจากการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดินในชั้นวัสดุที่อัดแน่นมากซึ่งมีค่าความพรุนน้อยมาก การเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดินในชั้นน้ำจำกัด แสดงไว้ในรูปที่ 6.11 เส้นกราฟที่แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำ (เฮดน้ำ) ของแต่ละตำแหน่งของชั้นน้ำใต้ดินเมื่อทำการสูบน้ำออกไปมีลักษณะเดียวกับชั้นน้ำอิสระที่เกิดการไหลในสภาวะคงที่ และสมการในการหาระดับน้ำที่ลดลงไป เป็นดังสมการที่ 6.23 ซึ่งเป็นสมการเดียวกับที่ใช้ในชั้นน้ำอิสระ



$$\begin{aligned}
\text{จะได้ } Q &= -2 * \pi * r * b * K * \frac{dh}{dr} \\
Q * \frac{dr}{r} &= -2 * \pi * b * K * dh \\
Q * \int \frac{dr}{r} &= -2 * \pi * K * \int dh
\end{aligned}
\left. \vphantom{\begin{aligned} Q \\ Q * \frac{dr}{r} \\ Q * \int \frac{dr}{r} \end{aligned}} \right\} \dots 6.25$$

ทำการอินทิเกรตสมการที่ 6.25 ที่ค่า  $r$  เท่ากับ  $r_w$  เมตร ไปจนถึงค่า  $r$  เท่ากับ  $r_o$  เมตร และที่ระดับความสูงของน้ำได้ดิน  $h$  เท่ากับ  $h_o$  เมตร ไปจนถึงระดับความสูงของระดับน้ำได้ดิน  $h$  เท่ากับ  $h_w$  เมตร เป็นดังสมการที่ 6.26

$$Q = 2 * \pi * K * b * \frac{h_o - h_w}{\ln(r_o / r_w)} \quad \dots 6.26$$

- เมื่อ  $Q$  แทนอัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำได้ดินในชั้นน้ำจำกัด หน่วย  $m^3/sec$   
 $h_o$  แทนระดับความสูงเดิมของน้ำได้ดิน เมื่อยังไม่เริ่มต้นการสูบน้ำ หน่วยเมตร  
 $h_w$  แทนระดับความสูงใหม่ของน้ำได้ดิน เมื่อทำการสูบน้ำออกจากชั้นอุ้มน้ำอิสระ หน่วยเมตร  
 $r_o$  แทนรัศมีเดิมของระดับน้ำได้ดิน เมื่อยังไม่มีการสูบน้ำ หน่วยเมตร  
 $r_w$  แทนรัศมีของท่อเจาะน้ำได้ดิน หน่วยเมตร

เนื่องจากการหาค่า  $r_o$  หาได้ยากมากในชั้นน้ำจำกัด อัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำได้ดิน อาจใช้หลักการของสมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation) ซึ่งกล่าวว่า “อัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำได้ดินในตำแหน่งใดๆ มีค่าเท่ากัน” โดยใช้บ่อสังเกตการณ์ (Observation Well) จำนวน 2 บ่อ ขนาดเท่ากัน เพื่อวัดระดับเสดของน้ำที่เปลี่ยนไปของแต่ละบ่อ บ่อสังเกตการณ์ที่ 1 วางห่างจากท่อเจาะน้ำได้ดินเป็นระยะที่  $r_1$  เมตร วัดเสดของน้ำได้  $h_1$  เมตร ที่อัตราการสูบน้ำได้ดินเท่าเดิม ระยะห่างของบ่อสังเกตการณ์ที่ 2 ห่างจากท่อเจาะได้ดิน เท่ากับ  $r_2$  เมตร วัดเสดของน้ำได้  $h_2$  เมตร ผลจากการอินทิเกรตสมการที่ 6.26 ที่ค่า  $r$  เท่ากับ  $r_1$  เมตร ไปจนถึงค่า  $r$  เท่ากับ  $r_2$  เมตร และที่ค่า  $h$  เท่ากับ  $h_1$  เมตร ไปจนถึงค่า  $h$  เท่ากับ  $h_2$  เมตร ได้ดังสมการที่ 6.27

$$Q = 2 * \pi * K * b * \frac{h_2 - h_1}{\ln(r_2 / r_1)} \quad \dots 6.27$$

- เมื่อ  $Q$  แทนอัตราการไหลเชิงปริมาตรของการสูบน้ำได้ดินในชั้นน้ำจำกัด หน่วย  $m^3/sec$   
 $h_1$  แทนระดับความสูงของน้ำได้ดิน(เสดของน้ำ) ของบ่อสังเกตการณ์ที่ 1 หน่วยเมตร  
 $h_2$  แทนระดับความสูงของน้ำได้ดิน(เสดของน้ำ) ของบ่อสังเกตการณ์ที่ 2 หน่วยเมตร  
 $r_1$  แทนระยะห่างของบ่อสังเกตการณ์ที่ 1 กับท่อเจาะน้ำบาดาล หน่วยเมตร  
 $r_2$  แทนระยะห่างของบ่อสังเกตการณ์ที่ 2 กับท่อเจาะน้ำบาดาล หน่วยเมตร

b แทนความหนาของชั้นอุ้มน้ำจำกัด หน่วยเมตร

ค่าการซึมผ่านของน้ำใต้ดินในชั้นจำกัด (K) เป็นดังสมการที่ 6.28

$$K = \frac{Q}{2 * \pi * b} * \frac{\ln(r_2/r_1)}{h_2^2 - h_1^2} \quad \dots 6.28$$

จากสมการที่ 6.8  $T = K * b$  .... 6.8

แทนค่า K ด้วยสมการที่ 6.28 ลงในสมการที่ 6.8 จะได้ค่าการส่งผ่านดังสมการที่ 6.29

$$\begin{aligned} T &= \frac{Q}{2 * \pi * b} * \frac{\ln(r_2/r_1)}{h_2^2 - h_1^2} * b \\ &= \frac{Q}{2 * \pi} * \frac{\ln(r_2/r_1)}{h_2^2 - h_1^2} \quad \dots 6.29 \end{aligned}$$

ตัวอย่างที่ 6.6 จงหาปริมาณการสูบน้ำใต้ดินออกจากชั้นน้ำใต้ดินแบบจำกัด ด้วยท่อขนาด 50 เซนติเมตร ชั้นน้ำดังกล่าวมีความหนา 15 เมตร กำหนดให้ระดับน้ำที่ลดลงเมื่อทำการสูบน้ำออกจากชั้นน้ำดังกล่าว มีค่ามากที่สุดไม่เกิน 15 เมตร กำหนดให้ค่า  $r_o$  เท่ากับ 120 เมตร ค่าสัมประสิทธิ์ของการซึมผ่าน เท่ากับ 20 เมตรต่อวัน

วิธีทำ จากโจทย์

$$\begin{aligned} b &= 15 \text{ m}, & r_o &= 120 \text{ m} \\ h_o - h_w &= 15 \text{ m}, & r_w &= 0.50 \text{ m} \\ K &= \frac{20 \text{ m}}{\text{day}} * \frac{1 \text{ day}}{24 \text{ hr}} * \frac{1 \text{ hr}}{60 \text{ min}} * \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ sec}} \\ &= 2.3148 * 10^{-4} \text{ m/sec} \end{aligned}$$

จากสมการที่ 6.26  $Q = 2 * \pi * K * b * \frac{h_o - h_w}{\ln(r_o / r_w)}$  .... 6.26

แทนค่าต่างๆ ที่ทราบค่าลงไปในสมการที่ 6.26

จะได้

$$\begin{aligned} Q &= \frac{2 * 3.14 * 2.3148 * 10^{-4} \text{ m/sec} * 15 \text{ m} * 15 \text{ m}}{\ln(120 \text{ m} / 0.50 \text{ m})} \\ &= 0.0597 \text{ m}^3/\text{sec} * \frac{10^3 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} \\ &= 59.7 \text{ ลิตรต่อวินาที} \end{aligned}$$

คำตอบ ปริมาณการสูบน้ำออกจากบ่อน้ำบาดาล มีค่าเท่ากับ 59.7 ลิตรต่อวินาที

ตัวอย่างที่ 6.7 Determine the permeability of an artesian aquifer being pumped by fully penetrating well. The aquifer is 90 ft thick and composed of medium sand. The steady-state pumping rate is 850 gpm. The draw down of an observation well 50 ft away is 10 ft : in a second observation well 500 ft away it is 1 ft, Express your answer in unit gpd/ft<sup>2</sup>.

วิธีทำ จากสมการที่ 6.28 
$$K = \frac{Q}{2 * \pi * b} * \frac{\ln(r_2/r_1)}{h_2^2 - h_1^2} \dots 6.28$$

สมมติว่าระดับความสูงของน้ำใต้ดินในชั้นน้ำจืดเท่ากับ  $h_0$  เมตร

ในที่นี้  $r_1$  เท่ากับ 50 ฟุต และ  $r_2$  เท่ากับ 500 ฟุต

ดังนั้น  $h_1$  เท่ากับ  $h_0 - 20$  ฟุต และ  $h_2$  เท่ากับ  $h_0 - 10$  ft

แทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ 6.28

จะได้ 
$$K = \frac{850 \text{ gpm}}{2 * \pi * 90 \text{ ft}} * \frac{\ln(500 \text{ ft} / 50 \text{ ft})}{[(h_0 - 1) : \text{ft} - (h_0 - 10) : \text{ft}]} * \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ hr}} * \frac{24 \text{ hr}}{1 \text{ day}}$$

$$= 553.78 \text{ gpd/ft}^2$$

มีค่าโดยประมาณ 554 gpd/ft<sup>2</sup>

คำตอบ ค่าการซึมผ่านของชั้นน้ำแบบจืดเท่ากับ 554 gpd/ft<sup>2</sup>

### การปนเปื้อนของมลสารในชั้นน้ำใต้ดิน (Pollutants Contaminant Processes)

การปนเปื้อนของมลสารในชั้นน้ำใต้ดิน เกิดได้ 2 ลักษณะคือ

1. การปนเปื้อนของมลสารในชั้นน้ำจากฟ้า (Precipitation contaminant processes) มลสารที่ลอยอยู่ในอากาศมีอยู่หลายรูปแบบ เช่น ก๊าซหรือควันที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเผาป่า เป็นต้น ในช่วงที่ฝนตก อาจเกิดการละลายเอามลสารปนลงมาด้วย ซึ่งอาจอยู่ในลักษณะของสารละลายหรือสารแขวนลอย
2. การปนเปื้อนลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน (Groundwater contaminant processes) เกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะ คือ จาก การไหลของน้ำผิวดิน ในช่วงที่น้ำจากฟ้าเกิดการไหลตามที่ลาดชันลงมานั้น อาจมีละลายเอามลสารที่มีอยู่ในชั้นหน้าดินหรือผิวดิน เมื่อน้ำผิวดินเมื่อไหลมาเจอรอยแตกของชั้นดินหรือชั้นหิน อาจเกิดการไหลซึมลงสู่ชั้นน้ำใต้ดินต่อไปและนำไปสู่ปัญหาคุณสมบัติของแหล่งน้ำตามธรรมชาติ ทำให้มีสภาพไม่เหมาะสมในการนำมาใช้ประโยชน์

## แนวทางในการป้องกันการปนเปื้อนของมลสารลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน ทำได้ดังนี้

1. ออกกฎหมายหรือระเบียบข้อบังคับบังคับการปล่อยของเสียทั้งในภาคของโรงงานอุตสาหกรรม ภาค การเกษตรกรรม เป็นต้น
2. ภาครัฐให้ความช่วยเหลือหรือบรรเทาในเรื่องของการจัดการของเสียที่เกิดขึ้น โดยเฉพาะในเรื่องการ นำของเสียกลับมาใช้ใหม่หรือการนำไปใช้ใหม่หรือใช้ซ้ำ เป็นต้น
3. สำหรับระบบบำบัดของเสียแบบต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นระบบบำบัดน้ำเสีย ระบบการฝังกลบขยะ ระบบ การเผา เป็นต้น ควรมีการดูแล บำรุงรักษาอยู่เสมอ เพื่อให้ไม่ให้เกิดของเสียปนเปื้อนลงไปสู่ชั้นน้ำใต้ดิน
4. จัดวางผังเมืองให้ดีขึ้น โดยเฉพาะชุมชนใหม่ที่จะปรับสภาพเป็นอำเภอหรือจังหวัด

## แบบฝึกหัดเพิ่มความเข้าใจ

- จงพิสูจน์ว่า ความเร็วของน้ำใต้ดินที่ไหลผ่านช่องว่างของวัสดุ เท่ากับความเร็วของคาร์ซีท์หารด้วยค่าความพรุนของวัสดุดังกล่าว
- น้ำไหลผ่านตัวกลางชนิดหนึ่ง ซึ่งมีค่าความพรุนเท่ากับ 0.40 ทิศทางการไหลของน้ำที่ทำการทดสอบ อยู่ในแนวนอน วัสดุพื้นที่หน้าตัดของตัวกลางได้เท่ากับ 1.5 ตารางเมตร ความยาวทั้งสิ้นของตัวกลาง เท่ากับ 2.5 เมตร ทำการทดสอบการไหลของน้ำที่ไหลผ่านตัวกลาง ประมาณค่าเฉลี่ยเวลาของการไหลผ่านตัวกลางได้เท่ากับ 1 นาที อยากรทราบว่าจะ
  - 2.1 ความเร็วของคาร์ซีท์ มีค่ากี่นิ้วต่อนาที
  - 2.2 ความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านช่องว่างของตัวกลาง มีค่ากี่เมตรต่อวัน
- สถานี ก วัดระดับน้ำใต้ดินได้ เท่ากับ 196 เมตร จากระดับน้ำทะเลปานกลาง และสถานี ข วัดระดับน้ำใต้ดินได้เท่ากับ 192 เมตร จากระดับน้ำทะเลปานกลาง สถานีวัดระดับน้ำใต้ดินทั้งสองอยู่ห่างกัน เป็นระยะทาง 335 เมตร และชั้นอุ้มน้ำมีค่าการซึมผ่านเท่ากับ 12.24 เมตรต่อวัน ค่าความพรุน เท่ากับ 0.14 จงหาความเร็วคาร์ซีท์และความเร็วของน้ำใต้ดินที่ไหลผ่านช่องว่างของวัสดุในชั้นน้ำดังกล่าว
- ทำการทดสอบการสูบน้ำของบ่อน้ำที่อยู่ติดกับชั้นน้ำใต้ดินแบบอิสระซึ่งมีหินอยู่ข้างใต้ ทำการเจาะ น้ำบาดาลมาจนถึงชั้นหิน ซึ่งมีความลึก 40 เมตร สังเกตการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดินดังกล่าวด้วย บ่อสังเกตการณ์จำนวน 2 บ่อ ก่อนทดสอบการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดิน พบว่าระดับน้ำใต้ดินมีค่า เท่ากับ 30 เมตร เมื่อทำการสูบน้ำออกจากชั้นน้ำใต้ดินดังกล่าวเป็นเวลาหลายวัน ด้วยอัตราการสูบ 500 ลิตรต่อวินาที ปรากฏว่าระดับน้ำในบ่อสังเกตการณ์ทั้งสอง ลดลงไปจำนวนหนึ่ง ค่าเสดของน้ำที่ บ่อสังเกตการณ์บ่อที่ 1 เท่ากับ 22.5 เมตร และของบ่อสังเกตการณ์ที่ 2 เท่ากับ 26 เมตร ระยะห่างของ บ่อสังเกตการณ์ที่ 1 และบ่อสังเกตการณ์ที่ 2 อยู่ห่างจากบ่อเจาะน้ำบาดาล เป็นระยะทาง 15 เมตร และ 30 เมตร ตามลำดับ อยากรทราบว่าค่าการซึมผ่านของชั้นน้ำอิสระแห่งนี้ ในหน่วยมิลลิเมตรต่อ วินาที และนิ้วต่อนาที
- An 18-in well fully penetrates are unconfined aquifer of 100-ft depth. Two observation wells located 100 and 235 ft from the pumped well are known to have draw down of 22.2 and 21 ft, respectively. If the flow is steady state and  $K = 1,320 \text{ gpd/ft}^2$ , what would be the discharge in unit gpm?
- For a artesian aquifer 150 ft thick and composed of fine sand, a well is pumped to equilibrium at 1,000 gpm. The draw down at an observation well 400 ft away is 2 ft and at 40 ft is 12 ft. What is the permeability? ( $352 \text{ gpd} / \text{ft}^2$ )

7. Calculate the steady state discharge if the draw-down at observation wells remains constant at 20 ft and 15 ft corresponding to observation wells 100 ft and 200 ft from the proposed well location. The unconfined aquifer permeability is  $70.0 \text{ gpm/ft}^2$  and the aquifer thickness is 80 ft. (137.8 gpm)
8. บ่อน้ำขนาด 30 เซนติเมตร เจาะทะลุผ่านชั้นอุ้มน้ำจำกัด หนา 30 เมตร ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านเท่ากับ  $1.0185 \text{ เมตร/ชั่วโมง}$  ระดับน้ำในบ่อสังเกตการณ์ 2 บ่อซึ่งอยู่ห่างออกไป เป็นระยะ 12.0 เมตร และ 36.6 เมตร ตามลำดับ ระดับน้ำภายในบ่อดังกล่าวมีความแตกต่างกัน 2.74 เมตร อยากทราบว่า อัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำใต้ดินในชั้นน้ำดังกล่าวมีค่าเท่าใด

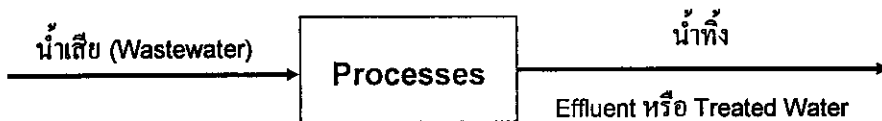


# บทที่ 7

## กระบวนการบำบัดน้ำเสียเบื้องต้น

### (Fundamental of Wastewater Treatment Processes)

กระบวนการบำบัดน้ำเสีย หมายถึง กรรมวิธีในการทำให้น้ำเสียให้มีคุณสมบัติเหมาะสม ที่จะปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ กระบวนการบำบัดน้ำเสีย แสดงด้วยแผนภาพง่ายๆ ดังรูปที่ 7.1



รูปที่ 7.1 แสดงกระบวนการบำบัดน้ำเสีย

การออกแบบกระบวนการบำบัดน้ำเสียให้ทำงานได้ตามความต้องการ ควรคำนึงถึงคุณสมบัติของน้ำเสีย และปริมาณน้ำเสียที่นำมาบำบัดภายในระบบบำบัด เพื่อให้ประสิทธิภาพของกระบวนการบำบัดน้ำเสีย เป็นไปได้ในทางปฏิบัติและบำบัดน้ำเสียได้ตามความต้องการได้ โดยอาศัยหลักเกณฑ์ในการออกแบบ กระบวนการบำบัดตามเอกสารการบำบัดน้ำเสียจนสามารถปล่อยน้ำทิ้งลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะได้

กระบวนการวิธีบำบัดน้ำเสีย แบ่งได้ 4 ประเภท ตามกระบวนการบำบัดน้ำเสีย คือ

1. การบำบัดน้ำเสียทางกายภาพ (Physical Processes) การบำบัดน้ำเสียแบบนี้เป็นขั้นตอนแรกของการบำบัดน้ำเสีย เพื่อลดปริมาณมลสารที่อยู่ในรูปของแข็งแขวนลอย หรือมลสารที่มีน้ำหนักมากกว่าน้ำ และยังช่วยป้องกันความเสียหายในกระบวนการบำบัดน้ำเสียในขั้นตอนอื่นและอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบบำบัด ตัวอย่างการบำบัดน้ำเสียแบบนี้ ได้แก่ การดักด้วยตะแกรง (Screening) การทำให้ตะกอนลอย (Flotation) การตกตะกอนทางกายภาพ (Sedimentation) การกรอง (Filtration) การเติมอากาศ (Aeration) และการกวน (Mixing) เป็นต้น
2. การบำบัดน้ำเสียทางเคมี (Chemical Processes) การบำบัดน้ำเสียแบบนี้ มักมีการเติมสารเคมีลงไป ในน้ำเสียเพื่อเปลี่ยนรูปของมลสารของสารอินทรีย์ให้อยู่ในรูปสารที่มีเสถียรภาพ คือ ไม่เปลี่ยนรูปอีก หรือมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยลงไป ทำให้ง่ายต่อการแยกออกจากน้ำเสีย ตัวอย่างการบำบัดทางเคมี ได้แก่ การปรับสภาพให้เป็นกลาง (Neutralization) การทำให้เกิดตะกอนขนาดเล็กและการสร้างฟล็อก หรือทำให้ตะกอนมีขนาดใหญ่ขึ้น (Flocculation-Coagulation) การไล่มลสารที่อยู่ในรูปของสารอินทรีย์ด้วยอากาศ (Air Stripping) การฆ่าเชื้อโรค (Disinfection) เป็นต้น

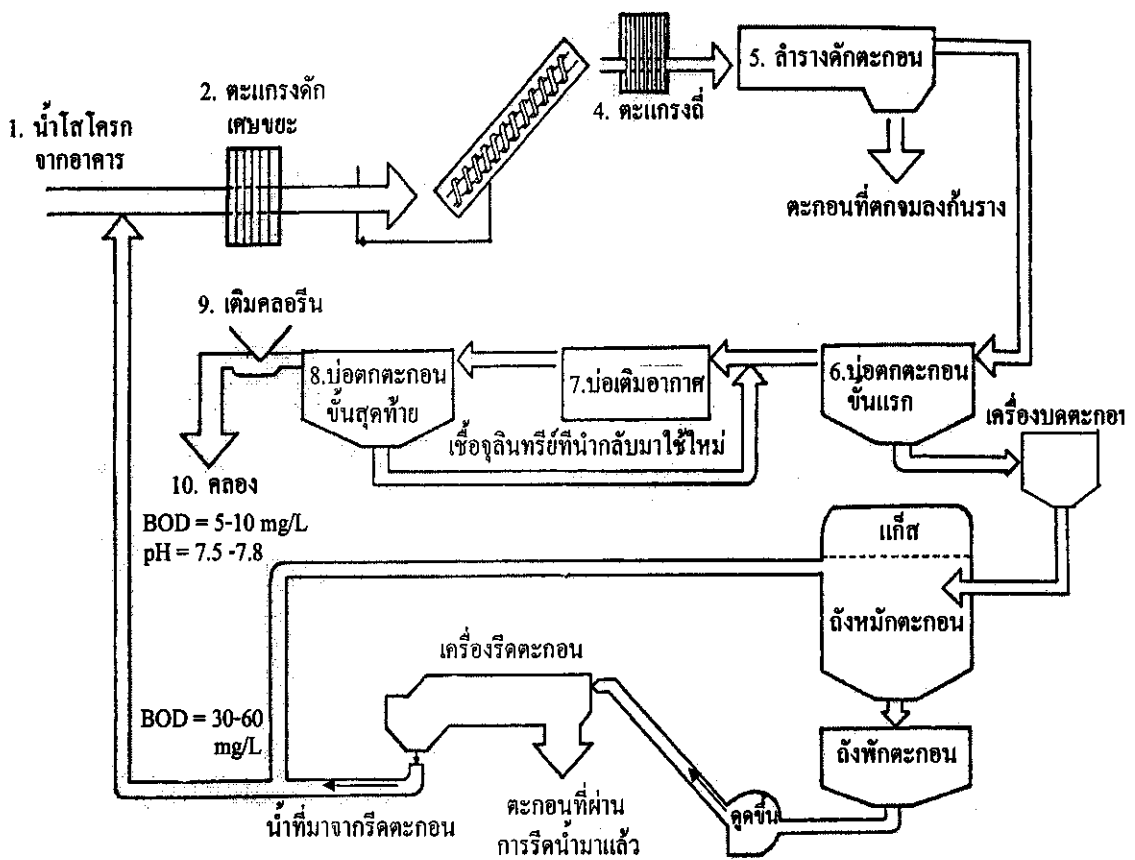
3. การบำบัดทางชีวภาพ (Biological Processes) เป็นการนำเอาทฤษฎีจุลินทรีย์ (Micrological Theory) มาอธิบายกลไกการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำเสียโดยจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำเสีย หรืออาจมีการเติมจุลินทรีย์ลงในน้ำเสีย เพื่อเพิ่มปริมาณจุลินทรีย์ให้เพียงพอต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ทำให้ประสิทธิภาพของระบบบำบัดเป็นไปตามต้องการ ตัวอย่างกระบวนการบำบัดแบบนี้ ได้แก่ ระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอเอส (Activated Sludge : AS) ออกซิเดชันพอนด์ (Oxidation Ponds : OP) แอโรเทตลาگون (Aerated Lagoons : AL) ระบบบำบัดน้ำเสียแบบตัวกรองไร้อากาศ (Anaerobic Filter : AF) ระบบบำบัดน้ำเสียแบบยูเอสบี (Up Flow Anaerobic Sludge Blanket : UASB) เป็นต้น
4. การบำบัดน้ำเสียทางกายภาพ เคมี (Physical – Chemical Processes) เป็นการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งประกอบด้วยกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางกายภาพและทางเคมีรวมกัน ทำให้น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วมีคุณสมบัติที่ดีขึ้น ซึ่งอาจนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายทาง เช่น การนำมาใช้ทำความสะอาดฟาร์ม การเพาะปลูก เป็นต้น ตัวอย่างของการบำบัดน้ำเสียแบบนี้ ได้แก่ การดูดซับด้วยคาร์บอน (Carbon Adsorption) การแลกเปลี่ยนประจุ (Ion Exchange) กระบวนการออสโมซิสแบบผันกลับ (Reverse Osmosis : RO) เป็นต้น

นอกจากนี้กระบวนการบำบัดน้ำเสีย อาจแบ่งได้ 4 ประเภท ตามคุณภาพของน้ำทิ้งที่ต้องการ คือ

1. การบำบัดในขั้นเตรียมการ (Preliminary Treatment) –ส่วนใหญ่แล้วการบำบัดน้ำเสียในขั้นตอนนี้เป็นการบำบัดน้ำเสียทางกายภาพ ทำให้น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมีความสะอาดอยู่ระดับหนึ่ง จากการที่มลสารบางส่วนถูกแยกออกไปจากน้ำเสีย ส่วนใหญ่แล้วมลสารที่แยกได้มักเป็นทราย กรวด ของแข็งแขวนลอยซึ่งเป็นสารอนินทรีย์ และปริมาณสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำเสียมีค่าลดลงน้อยหรือไม่ลดลง
2. การบำบัดขั้นตอนที่ 1 (Primary Treatment) เป็นการทำให้คุณภาพของน้ำทิ้งมีค่าดีขึ้นอีกระดับหนึ่ง โดยทั่วไปแล้วสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำเสีย เมื่อผ่านการบำบัดในขั้นตอนนี้แล้วลดลงไปประมาณ 30% ถึง 50% โดยเฉพาะในถังตกตะกอนใบแรก โดยทั่วไปแล้วกระบวนการบำบัดน้ำเสียในขั้นตอนนี้เป็นการบำบัดน้ำเสียทางกายภาพ หรือทางเคมี
3. การบำบัดในขั้นตอนที่ 2 (Secondary Treatment) เป็นการลดปริมาณสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำเสีย ซึ่งอยู่ในรูปของสารละลายหรือคอลลอยด์ ซึ่งเป็นสารละลายที่มีขนาดเล็กมาก กระบวนการบำบัดน้ำเสียในขั้นตอนนี้เป็นการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพและบางวิธีของการบำบัดน้ำเสียทางเคมี ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียในขั้นตอนนี้ขึ้นอยู่กับค่าภาระสารอินทรีย์ (Organic Loading Rate : OLR) สภาพแวดล้อม ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำเสีย อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ชนิดของมลสารที่มีอยู่ในน้ำเสีย ดังนั้นน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยวิธีนี้มลสารมีค่าลดลงไปได้มากถึง 90% และปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำทิ้งได้ตามเกณฑ์มาตรฐาน หรือต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน

4. การบำบัดในขั้นตอนที่ 3 หรือการบำบัดขั้นสูงสุด (Tertiary Treatment) เป็นการนำเอาน้ำทิ้งหรือน้ำที่ผ่านการบำบัดในแต่ละขั้นตอนมาใช้ประโยชน์ในการอุปโภคบริโภค ซึ่งช่วยลดความเข้มข้นของสารอาหารเสริมสร้าง (Nutrient) เช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส เป็นต้น ซึ่งเป็นสาเหตุของปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน (Eutrofication) หรือสาหร่ายบุ่ม (Algae bloom) การบำบัดน้ำเสียในขั้นตอนนี้ส่วนใหญ่แล้วเป็นการบำบัดน้ำเสียทางกายภาพและเคมีแล้วต่อด้วยการบำบัดทางชีวภาพ

จากที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น จะเห็นได้ว่ากระบวนการบำบัดน้ำเสียประกอบไปด้วยขั้นตอนการบำบัดน้ำเสียหลายขั้นตอนรวมกัน เช่น ระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานกำจัดน้ำเสียห้วยขวาง กรุงเทพมหานคร ดังแสดงไว้ในรูปที่ 7.2



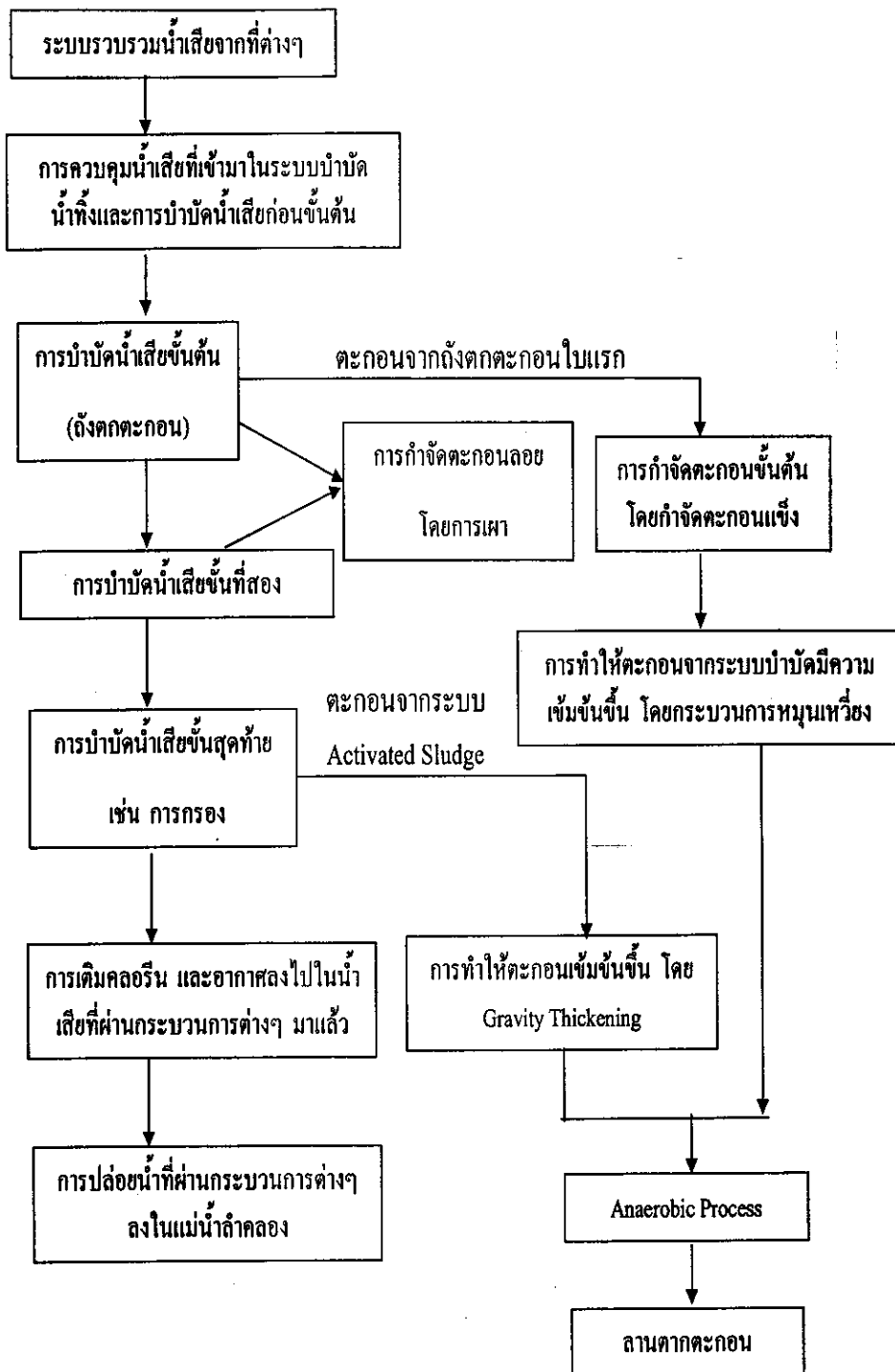
รูปที่ 7.2 แสดงโรงงานกำจัดน้ำเสียห้วยขวาง กรุงเทพมหานคร

การบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ แยกได้ 2 ประเภท ตามลักษณะของจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้อง คือ

1. การบำบัดน้ำเสียแบบใช้ออกซิเจน (Aerobic Processes) เป็นการบำบัดด้วยจุลินทรีย์ที่อยู่ได้ด้วยอากาศหรือออกซิเจน ทำให้เกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนหรือปฏิกิริยาออกซิเดชัน เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ละลายอยู่ในน้ำเสีย ตัวอย่างการบำบัดน้ำเสียแบบนี้ ได้แก่ ระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอเอส ระบบบำบัดน้ำเสียแบบ Aerated Lagoons เป็นต้น
2. การบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนหรือแบบไร้ออกซิเจน (Anaerobic Processes) เป็นการบำบัดน้ำเสียด้วยจุลินทรีย์ที่ไม่ต้องการอากาศไปย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำเสีย การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีนี้ช่วยลดความเข้มข้นของมลสารที่มีอยู่ในน้ำเสีย และยังทำให้ได้พลังงานทดแทนอีกรูปแบบหนึ่ง คือ ก๊าซชีวภาพ (Biogas)

วิธีการบำบัดน้ำเสีย แสดงไว้ในรูปที่ 7.3 ซึ่งประกอบไปด้วย

- การรวบรวมน้ำเสีย เพื่อควบคุมและปรับสภาพของน้ำเสียให้มีความเหมาะสมในการบำบัดในขั้นตอนอื่นๆ ต่อไป
- การบำบัดน้ำเสียในขั้นตอนต่างๆ เช่น อาจเป็นขั้นตอนที่ 2 หรือขั้นตอนที่ 3 การบำบัดน้ำเสียในขั้นตอน นี้เป็นการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการทางชีวภาพ และอาจตามด้วยกระบวนการกายภาพ (ถังตกตะกอน) สิ่งที่ต้องระมัดระวังและพึงระลึกเสมอของการบำบัดน้ำเสียในขั้นตอนนี้ คือ พยายามรักษาปริมาณ จุลินทรีย์ให้มีค่าตามที่ออกแบบเอาไว้ได้ เพื่อให้คุณภาพของน้ำทิ้งที่ได้ออกมา เป็นไปตามที่ได้ออกแบบ เอาไว้ หรือผ่านมาตรฐานที่ทางราชการกำหนด
- การสะสมปริมาณจุลินทรีย์ภายในระบบมากเกินไป ในกรณีที่ปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ในน้ำเสียมากเกินความต้องการ จำเป็นต้องมีการลดปริมาณลงเพื่อให้มีเพียงพอต่อความต้องการภายในระบบบำบัด จุลินทรีย์ที่นำออกไปจากระบบบำบัดอาจนำไปบำบัดด้วยวิธีอื่น เช่น การทำให้ตะกอนมีความเข้มข้นมากขึ้น การลด ปริมาตรของตะกอน การนำไปถมที่ดินแทนการใช้แอสฟัลต์ หรือยางมะตอย เป็นต้น



รูปที่ 7.3 แสดงแผนผังของกระบวนการบำบัดน้ำเสียทั่วไป

ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีระบบบำบัดน้ำเสียแบบใช้อากาศและระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ แสดงไว้ในตารางที่ 7.1

ตารางที่ 7.1 ข้อดีและข้อเสีย ของกระบวนการบำบัดน้ำเสีย แบบใช้อากาศ และไม่ใช้อากาศ

กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบใช้อากาศ	กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ
BOD : N : P เท่ากับ 100 ต่อ 5 ต่อ 1	BOD : N : P เท่ากับ 100 ต่อ 1 ต่อ 0.2
ต้องการพลังงานเพื่อให้ระบบบำบัดน้ำเสีย เพื่อทำการเติมอากาศ	ได้พลังงานเกิดขึ้น ในรูปของก๊าซมีเทนหรือก๊าซชีวภาพ
รับภาระสารอินทรีย์ได้ไม่มาก	รับภาระสารอินทรีย์ได้มากกว่าระบบบำบัดแบบใช้อากาศ สำหรับน้ำเสียที่มีค่าภาระสารอินทรีย์มากๆ มักทำการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีนี้ก่อน
ตะกอนจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นในระบบบำบัดน้ำเสียแบบนี้มีค่ามาก ซึ่งต้องทำการกำจัดออกไป เพื่อให้ปริมาตรของน้ำเสียนำมาบำบัดมีค่าเท่าเดิม	ตะกอนจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นมีปริมาณเกิดขึ้นน้อยมาก เพราะปริมาณสารอินทรีย์ที่เกิดการย่อยสลายไปร้อยละ 80 ถึง 90 ถูกย่อยสลายกลายเป็นพลังงาน(ก๊าซชีวภาพ) ดังนั้นที่เหลือร้อยละ 10 ถึง 20 กลายเป็นตะกอนจุลินทรีย์
จุลินทรีย์ในระบบบำบัดแบบนี้ไม่ค่อยไวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมมากนัก	จุลินทรีย์ในระบบบำบัดแบบนี้ มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมค่อนข้างมาก
น้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว มักมีสีค่อนข้างใส หรือมีสีเหลืองอ่อน ซึ่งเป็นไปตามธรรมชาติของน้ำ	น้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยวิธีนี้ ส่วนใหญ่มีสีค่อนข้างดำ เพราะเกิดการทำปฏิกิริยาระหว่างก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์กับอนุภาคโลหะในน้ำเสีย
อัตราการเติบโตของจุลินทรีย์ค่อนข้างมาก	อัตราการเจริญเติบโตของตะกอนจุลินทรีย์ มีค่าค่อนข้างช้า ดังนั้นขนาดของถังที่ใช้มักมีขนาดใหญ่ เพื่อให้มีปริมาณจุลินทรีย์เพียงพอต่อการบำบัดน้ำเสีย

ผลที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำเสียโดยจุลินทรีย์แต่ละชนิดเป็นดังตารางที่ 7.2

ตารางที่ 7.2 การเปลี่ยนแปลงของสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ที่ใช้อากาศและจุลินทรีย์ที่ไม่ใช้อากาศ

สารอินทรีย์	จุลินทรีย์ที่ใช้อากาศ	จุลินทรีย์ที่ไม่ใช้อากาศ
คาร์บอน (C)	ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO <sub>2</sub> )	ก๊าซมีเทน(CH <sub>4</sub> )
ไนโตรเจน (N)	กรดไนตริก (HNO <sub>3</sub> ) แอมโมเนีย (NH <sub>3</sub> ) เกลือแอมโมเนีย (NH <sub>4</sub> )	แอมโมเนีย (NH <sub>3</sub> )
ฟอสฟอรัส (P)	กรดฟอสฟอริก (H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> ) ฟอสเฟต (PO <sub>4</sub> )	ฟอสฟีน (PH <sub>3</sub> )
ซัลเฟอร์ (S)	กรดซัลฟูริก (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ) สารประกอบซัลเฟต (SO <sub>4</sub> )	ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H <sub>2</sub> S)

ก่อนตัดสินใจเลือกระบบบำบัดแบบชีวภาพ ควรทำการตรวจเช็คอัตราส่วนของ BOD<sub>5</sub> :N : P ที่มีอยู่ในน้ำเสียก่อนว่ามีค่าเป็นไปตามข้อตกลงที่อยู่ในตารางที่ 7.1 หรือไม่ หรือมีค่าอย่างต่ำเท่ากับค่าอยู่ในตารางที่ 7.1 หากมีค่าไม่เพียงพอควรเติมสารเคมีลงไป เพื่อปรับสภาพน้ำเสียให้เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ เพื่อให้ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียเป็นไปตามต้องการ จากนั้นจึงค่อยทำการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียต่อไป โดยแหล่งของสารอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัส ที่เติมลงไปในระบบบำบัดน้ำเสีย แสดงไว้ในตารางที่ 7.3 เพื่อปรับค่า BOD<sub>5</sub> :N:P ให้เป็นไปตามตารางที่ 7.1

ตารางที่ 7.3 แสดงแหล่งสารเคมีที่นิยมใช้ในการปรับสภาพน้ำเสีย เพื่อทำการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ

แหล่งไนโตรเจน		แหล่งฟอสฟอรัส	
ชื่อทางเคมี	สูตร	ชื่อทางเคมี	สูตร
Anhydrous ammonia	NH <sub>3</sub>	<b>Orthophosphate</b>	
Aqua ammonia	NH <sub>4</sub> OH	Trisodium phosphate	Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>
Ammonium bicarbonate	NH <sub>4</sub> HCO <sub>3</sub>	Disodium phosphate	Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>
Ammonium carbonate	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Monosodium phosphate	NaH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>
Ammonium chloride	NH <sub>4</sub> Cl	Ammonium phosphate	NH <sub>4</sub> H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>
Ammonium phosphate	NH <sub>4</sub> H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	<b>Polyphosphate</b>	
Ammonium sulphate	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Sodium hexametaphosphate	Na <sub>3</sub> (PO <sub>3</sub> ) <sub>6</sub>
		Sodium tripolyphosphate	Na <sub>5</sub> P <sub>3</sub> O <sub>10</sub>
		Tetrasodium pyrophosphate	Na <sub>4</sub> P <sub>2</sub> O <sub>7</sub>
		Phosphoric acid	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>

ตัวอย่างที่ 7.1 บำบัดน้ำเสียของฟาร์มแห่งหนึ่งด้วยระบบบำบัดแบบเติมอากาศ ซึ่งวัดอัตราการไหลเชิงปริมาตรได้ 2,000 m<sup>3</sup>/day น้ำเสียดังกล่าวมีค่าบีโอดี เท่ากับ 500 mg/L ค่าไนโตรเจนซึ่งวัดในรูปของ TKN มีค่า 5 mg/L และ Phosphate มีค่า 2 mg/L as P ที่อายุของตะกอน 20 วัน จงคำนวณหาว่าสารอาหารเสริมในน้ำเสียดังกล่าวมีเพียงพอหรือไม่ หากไม่เพียงพอต้องใส่อาหารเสริมสร้างไคบ่างในรูปใดและต้องเติมในปริมาณเท่าใดใน 1 วัน

#### วิธีทำ

$$\begin{aligned}
 1. \text{ จำนวนหาค่าอัตราส่วน BOD : N : P} &= 500 : 5 : 2 \\
 &= 100 : 1 : 0.4 \\
 &< 100 : 5 : 1 \text{ (ตารางที่ 7.1)}
 \end{aligned}$$

จากค่าอัตราส่วนดังกล่าว พบว่า น้ำเสียดังกล่าวมีปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสมีค่าไม่เพียงพอในการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบเติมอากาศ เพราะฉะนั้นต้องเติมสารเคมีเพื่อเพิ่มค่าไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำเสียก่อนนำไปบำบัดต่อไป

$$\begin{aligned}
 2. \text{ จำนวนหาอัตราส่วนของค่าบีโอดีต่อสารอาหารในทางทฤษฎี} \\
 \text{อัตราส่วนของค่าบีโอดี ต่อ ไนโตรเจน เท่ากับ } &100 : 5 = 20 \\
 \text{อัตราส่วนของค่าบีโอดี ต่อฟอสฟอรัส เท่ากับ } &100 : 1 = 100
 \end{aligned}$$

$$3. \text{ จำนวนหาความต้องการอาหารเสริมสร้าง จากสมการข้างล่าง}$$

$$\text{ความต้องการอาหารเสริมสร้างที่ต้องใส่ลงในน้ำเสีย} = \frac{\text{ค่าบีโอดีในน้ำเสีย}}{\text{อัตราส่วนของอาหารตามทฤษฎี}}$$

$$\begin{aligned}
 \text{เพราะฉะนั้น ความต้องการไนโตรเจน} &= 500 \text{ mg/L} / 20 \\
 &= 25 \text{ mg/L}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{เพราะฉะนั้น ความต้องการฟอสฟอรัส} &= 500 \text{ mg/L} / 100 \\
 &= 5 \text{ mg/L}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 4. \text{ จำนวนหาปริมาณสารอาหารเสริม ที่ต้องเติม} \\
 \text{สารอาหารไนโตรเจนที่ต้องเติม} &= \text{ความต้องการไนโตรเจนในข้อ 3 - ปริมาณไนโตรเจนในน้ำเสีย} \\
 \text{เพราะฉะนั้น สารอาหารไนโตรเจนที่ต้องเติม} &= 25 \text{ mg/L} - 5 \text{ mg/L} \\
 &= 20 \text{ mg/L}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{สารอาหารฟอสฟอรัสที่ต้องเติม} &= \text{ความต้องการฟอสฟอรัสในข้อ 3 - ปริมาณฟอสฟอรัสในน้ำเสีย} \\
 \text{เพราะฉะนั้น สารอาหารฟอสฟอรัสที่ต้องเติม} &= 5 \text{ mg/L} - 2 \text{ mg/L} \\
 &= 3 \text{ mg/L}
 \end{aligned}$$



5. กำหนดหาปริมาณสารอาหารเสริมทั้งหมดที่ต้องเติมแต่ละวัน

$$\text{ปริมาณสารอาหารเสริมทั้งหมดที่ต้องเติม} = \text{ปริมาณสารอาหารเสริมที่ไม่พอ} * \frac{\text{อัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำเสีย}}{\text{ปริมาตรของน้ำเสีย}}$$

$$\begin{aligned} \text{เพราะฉะนั้น สารอาหารไนโตรเจนทั้งหมดที่ต้องเติม} &= 20 \text{ mg/L} * 2,000 \text{ m}^3/\text{day} * \frac{10^3 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} \\ & * \frac{1 \text{ kg}}{10^6 \text{ mg}} \\ &= 40 \text{ kg/day} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{เพราะฉะนั้น สารอาหารฟอสฟอรัสทั้งหมดที่ต้องเติม} &= 3 \text{ mg/L} * 2,000 \text{ m}^3/\text{day} * \frac{10^3 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} \\ & * \frac{1 \text{ kg}}{10^6 \text{ mg}} \\ &= 6 \text{ kg/day} \end{aligned}$$

เลือกสารเคมีที่เติมในรูปของสารอาหารไนโตรเจน คือ Anhydrous Ammonia เข้มข้น 80% โดยน้ำหนัก จากสมการเคมีพบว่าแอมโมเนีย 1 โมล หรือ 17 กรัม ประกอบด้วยไนโตรเจน 14 กรัม และไฮโดรเจน 3 กรัม

เพราะฉะนั้น

$$\text{สารอาหารไนโตรเจนที่เติม} = \frac{\text{ความต้องการไนโตรเจนทั้งหมด} * 17 \text{ กรัม Anhydrous Ammonia}}{14 \text{ กรัม ไนโตรเจน}}$$

เปอร์เซ็นต์น้ำหนักของสารเคมี

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น Anhydrous Ammonia ที่เติม} &= 40 \text{ kg/day} * 17/14 * 100/80 \\ &= 61 \text{ kg/day} \end{aligned}$$

เลือกสารเคมีที่เติมในรูปของสารอาหารฟอสฟอรัส คือ Trisodium Phosphate เข้มข้น 85% โดยน้ำหนัก Trisodium Phosphate 1 โมล หรือ 164 กรัม ประกอบด้วยโซเดียม 3\*23 เท่ากับ 69 กรัม ฟอสฟอรัส 31 กรัม และออกซิเจน 4\*16 เท่ากับ 64 กรัม

เพราะฉะนั้น

$$\text{สารอาหารฟอสฟอรัส} = \frac{\text{ความต้องการฟอสฟอรัสทั้งหมด} * 164 \text{ กรัม Trisodium Phosphate}}{31 \text{ กรัม ฟอสฟอรัส}}$$

เปอร์เซ็นต์น้ำหนักของสารเคมี

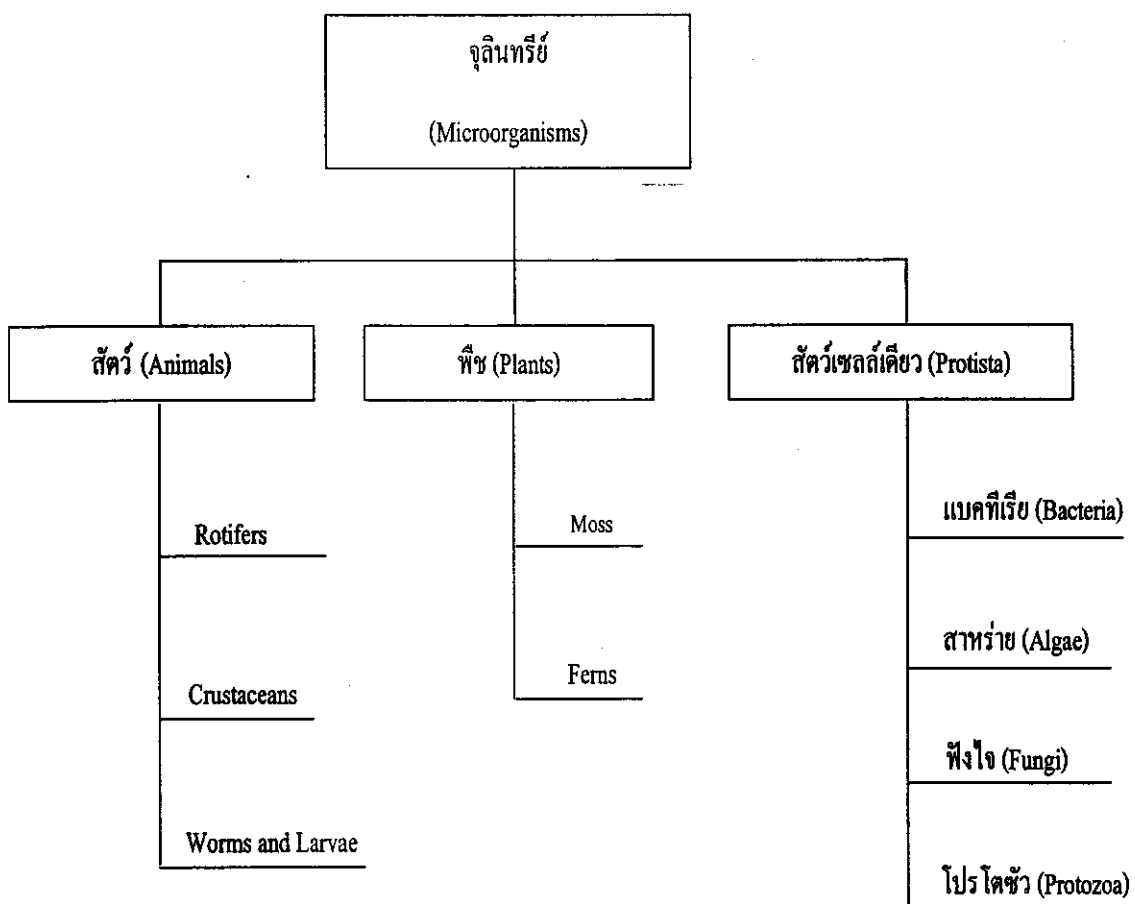
$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น Trisodium Phosphate ที่เติม} &= 6 \text{ kg/day} * 164 / 31 * 100/85 \\ &= 37.3 \text{ kg/day} \end{aligned}$$

### จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องในระบบบำบัดน้ำเสีย

จุลินทรีย์เป็นสิ่งมีชีวิตที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติเมื่อสภาพแวดล้อมเหมาะสมต่อการเจริญเติบโต เนื่องจากจุลินทรีย์เป็นสิ่งที่เกิดขึ้นเองและหาได้ง่าย จึงได้นำเอาสิ่งมีชีวิตดังกล่าวมาช่วยในการบำบัดน้ำเสีย เพื่อให้ประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียเป็นไปตามต้องการ

โดยทั่วไปแล้วจุลินทรีย์เหล่านี้ไม่สามารถมองด้วยตาเปล่าได้ ในระบบบำบัดน้ำเสียทั่วไปจุลินทรีย์จะย่อยสลายสารอินทรีย์ ทำให้ได้น้ำ พลังงานเพื่อใช้ในการดำรงชีพ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และสารอื่นๆ โดยจุลินทรีย์ที่อยู่ในน้ำเสียอยู่ในลักษณะของมิกซ์คัลเจอร์ (Mixed Culture) ซึ่งประกอบไปด้วยสิ่งมีชีวิตหลายชนิดในกลุ่มของจุลินทรีย์ ประกอบกับสภาพแวดล้อมของน้ำเสียมีการเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ ยากต่อการควบคุมให้มีความเหมาะสมกับสิ่งมีชีวิตชนิดใดชนิดหนึ่งในกลุ่มของจุลินทรีย์โดยเฉพาะ

จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องในการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ แบ่งออกได้ 3 ประเภท ดังแสดงไว้ในรูปที่ 7.4



รูปที่ 7.4 จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องในระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ

### จุลินทรีย์ในกลุ่มสัตว์

1. **Rotifer** จุลินทรีย์ในกลุ่มนี้มีขนาดเล็กมาก มีขนอยู่รอบปาก เพื่อทำหน้าที่ในการพัดพาเอาสารอินทรีย์ที่ละลายอยู่ในน้ำเสียเข้าปาก และช่วยในการว่ายน้ำ ในปัจจุบันนี้จุลินทรีย์พวกนี้มีอยู่ประมาณ 1,500 ชนิดประมาณ 90% ของสัตว์เหล่านี้อยู่ในน้ำจืด ซึ่งแบ่งออกได้ 3 พวก คือ พวกที่กินพืช พวกที่กินสัตว์ และพวกที่กินทั้งพืช และสัตว์
2. **Crustaceae** เป็นกลุ่มของไรน้ำ ปู กุ้ง และเพรียง มีทั้งที่อยู่ในน้ำจืด และในน้ำเค็ม
3. **หนอน และพยาธิ** เป็นสิ่งมีชีวิตที่ไม่ต้องการให้ออกซิเจนในน้ำเสีย เพราะอาจย้อนกลับเข้าสู่ห่วงโซ่อาหารของมนุษย์ หรือสิ่งมีชีวิตอื่นๆ ได้

### จุลินทรีย์พวกพืช

1. **มอสส์ (Moss)** เป็นพืชที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติในบริเวณที่มีความชุ่มชื้น ช่วยรักษาสภาพแวดล้อมของแหล่งน้ำตามธรรมชาติให้อยู่ในสภาพเดิมหรือมีการปรับสภาพให้กลับคืนสู่ธรรมชาติ เมื่อน้ำเสียไหลผ่านมอสส์
2. **เฟิร์น (Ferns)** เป็นพืชอีกประเภทหนึ่งเช่นเดียวกับมอสส์ที่ชอบความชุ่มชื้น แต่ความแข็งแรงของกิ่งก้านและของต้นมากกว่ามอสส์

### จุลินทรีย์พวกโปรติสตา

1. **แบคทีเรีย (Bacteria)** เป็นสิ่งมีชีวิตที่มีเพียงเซลล์เดียวและมีขนาดเล็กมาก สืบพันธุ์แบบแบ่งตัวทวิคูณ (Binary fission) แบคทีเรียมีรูปร่างหลายลักษณะ ได้แก่ ทรงกลม (Cocci) แท่งยาว (Bacillus) เกลียว (Spiral) สูตรอย่างง่ายของแบคทีเรีย ในรูปสารอินทรีย์ คือ  $C_6H_{87}O_{23}N_{12}P$  ในรูปของสารอนินทรีย์ คือ  $P_2O_5, SO_3, Na_2O, MgO, K_2O$  และ  $Fe_2O_3$  เป็นต้น

อาจแบ่งแบคทีเรียตามอุณหภูมิได้ 3 ประเภท ตามอุณหภูมิของแหล่งน้ำเสีย คือ

1. **Psychrophilles** เป็นแบคทีเรียที่ชอบอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 15 ถึง 20 C อาจอยู่ได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 0 C
2. **Mesophilles** เป็นแบคทีเรียที่ชอบอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 40 C
3. **Thermophilles** เป็นแบคทีเรียที่ชอบอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 50 ถึง 60 C

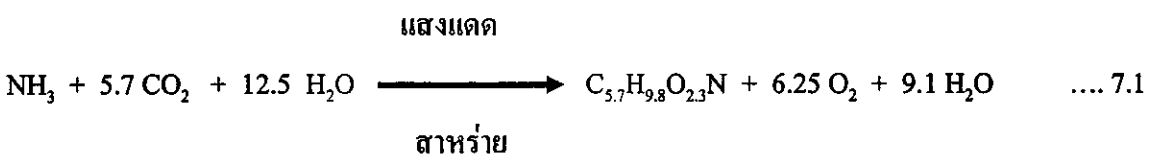
อาจแบ่งแบคทีเรียออกได้ 2 ประเภท ตามลักษณะของแหล่งคาร์บอน (Carbon Sources) คือ

- **Autotrophic Bacteria** เป็นแบคทีเรียที่ใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งของคาร์บอน โดยผลิตสารอินทรีย์จากสารอนินทรีย์ แบคทีเรียในกลุ่มนี้ที่สำคัญ ได้แก่ Nitrifying Bacteria เป็นต้น
- **Heterotrophic Bacteria** เป็นแบคทีเรียที่ใช้สารอินทรีย์เป็นแหล่งของคาร์บอน ซึ่งมีความสำคัญอย่างมากในระบบบำบัดน้ำเสีย เพราะมีการนำเอาแบคทีเรียกลุ่มนี้ไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียค่อนข้างมาก แบคทีเรียกลุ่มนี้ยังแบ่งได้อีก 3 กลุ่ม คือ
  - **Aerobic Bacteria** เป็นแบคทีเรียที่ใช้ออกซิเจนอิสระในการเผาผลาญสารอินทรีย์ เพื่อให้ได้พลังงานและดำรงชีพในสภาพที่มีอากาศเท่านั้น
  - **Anaerobic Bacteria** เป็นแบคทีเรียที่ใช้ออกซิเจนที่อยู่ในรูปของสารอินทรีย์ หรือสารอนินทรีย์ เช่น ไนเตรต ซัลเฟต เป็นต้น
  - **Faculative Bacteria** เป็นแบคทีเรียที่ดำรงชีพได้ทั้งในสภาพที่มีอากาศ และไม่มีอากาศ โดยขึ้นกับสภาพแวดล้อมในขณะนั้นว่า มีอากาศ หรือไม่มีอากาศ

2. สาหร่าย (Algae) เป็นสิ่งมีชีวิตที่มีอยู่ในแหล่งน้ำตามธรรมชาติ ซึ่งช่วยในการรักษาสภาพของน้ำเสีย จากปฏิกิริยาการสังเคราะห์แสง สาหร่ายแบ่งได้มากมายหลายชนิด ด้วยหลักเกณฑ์ต่างๆ ดังนี้

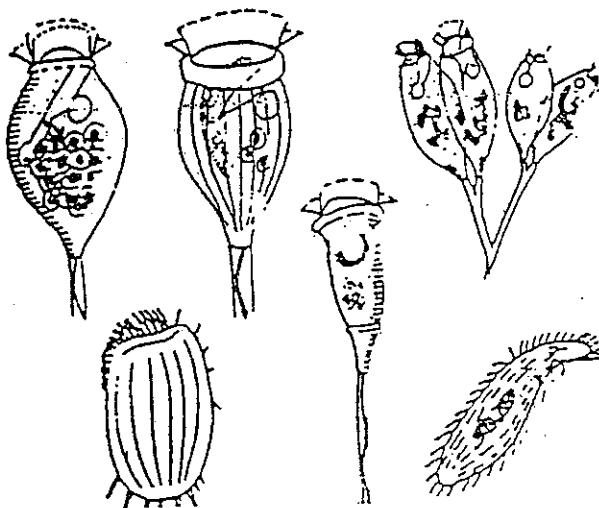
- ตามลักษณะโครงสร้างของสาหร่าย แบ่งสาหร่ายออกได้ 2 ประเภท คือ สาหร่ายเซลล์เดียว (Single Cell Algae) และสาหร่ายหลายเซลล์ (Multicell Algae)
- ตามความสามารถในการสังเคราะห์แสง (Synthesized Performance) แบ่งสาหร่ายออกได้ 2 ชนิด คือ สาหร่ายที่ทำการสังเคราะห์แสงได้ และสาหร่ายที่ไม่สามารถทำการสังเคราะห์แสงได้
- ตามชนิดของสาหร่ายที่มีเม็ดสี หรือ ไม่มี (Pigments) แบ่งสาหร่ายออกได้ 2 ชนิด คือ สาหร่ายที่มีเม็ดสี ซึ่งสามารถสังเคราะห์แสงได้ และสาหร่ายที่ไม่มีเม็ดสี ซึ่งไม่สังเคราะห์แสงได้

สาหร่ายที่พบเห็นตามแหล่งน้ำธรรมชาติและในระบบบำบัดน้ำเสียที่ต้องออกซิเจน อยู่ร่วมกับแบคทีเรียในลักษณะพึ่งพากัน โดยสาหร่ายจะเอาก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ของแบคทีเรียมาเป็นแหล่งอาหาร เพื่อใช้เป็นสารอาหารตั้งต้นในการสังเคราะห์ช่วงที่มีแสงแดด หรือมีแสงอาทิตย์เทียม ปฏิกิริยาชีวเคมีที่เกิดขึ้นจากกระบวนการสังเคราะห์แสงดูไว้ในสมการที่ 7.1





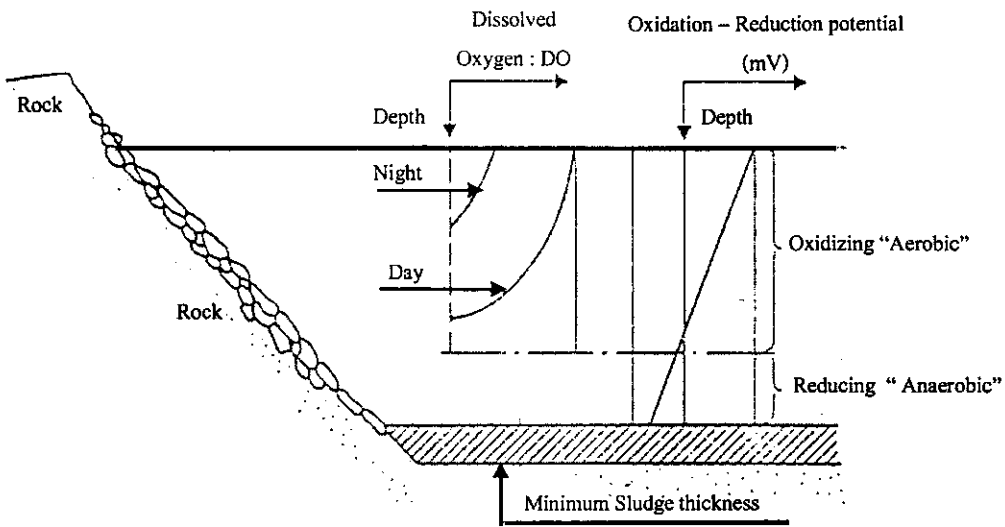
- **Procaryotic Algae** หรือ **Blue-Green Algae** เป็นกลุ่มของสาหร่ายที่ไม่มีนิวเคลียสเมมเบรน (Nucleus Membrane) สาหร่ายในกลุ่มนี้สามารถตรึงไนโตรเจนจากอากาศได้โดยใช้ก๊าซไฮโดรเจน ซัลไฟด์แทนน้ำในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน และยังสามารถออกซิโดซ์สารประกอบซัลเฟอร์ที่มีอยู่ในน้ำเสียได้ สาหร่ายประเภทนี้มีบทบาทสำคัญมากในระบบบำบัดน้ำเสีย
- 3. **รา (Fungi)** เป็นพวก Heterotrophic Protista ลักษณะทั่วไปของรา คือมีนิวเคลียสเมมเบรน (Nucleus Membrane) มีการเคลื่อนที่โดยอาศัยไมซีเลียม (Mycelium) ไม่มีผนังเซลล์ (Cell Wall) อาจจัดเชื้อราอยู่ในประเภทเดียวกับยีสต์ (Yeast) ซึ่งมีการสืบพันธุ์แบบ Budding และมีการสร้างสปอร์ เชื้อราสามารถดำรงชีพได้ทั้งสภาพที่ไม่มีออกซิเจนและสภาพที่มีออกซิเจน รวมทั้งสภาวะที่มีอาหารน้อย ค่าพีเอชและที่ความชื้นมีค่าต่ำได้ ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอส (Activated Sludge Wastewater Treatment : AS) มักพบเชื้อราอยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่งจะทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์แทนแบคทีเรีย
- 4. **โปรโตซัว (Protozoa)** ส่วนใหญ่แล้วโปรโตซัวจัดอยู่ใน Aerobic Autotrophys ซึ่งมีลักษณะสำคัญ คือเป็นสัตว์เซลล์เดียว ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่า 100 ไมครอน ไม่มีผนังเซลล์ (Cell Wall) เคลื่อนไหวได้ มีการสืบพันธุ์แบบแบ่งตัววิถุณ (Binary Fission) ช่วยกำจัดเซลล์แบคทีเรีย ช่วยให้ระบบบำบัดแอสมีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยทำให้เกิดฟล็อก (floc) ประเภทของโปรโตซัวที่พบเห็นในระบบบำบัดน้ำเสีย แสดงไว้ในรูปที่ 7.6



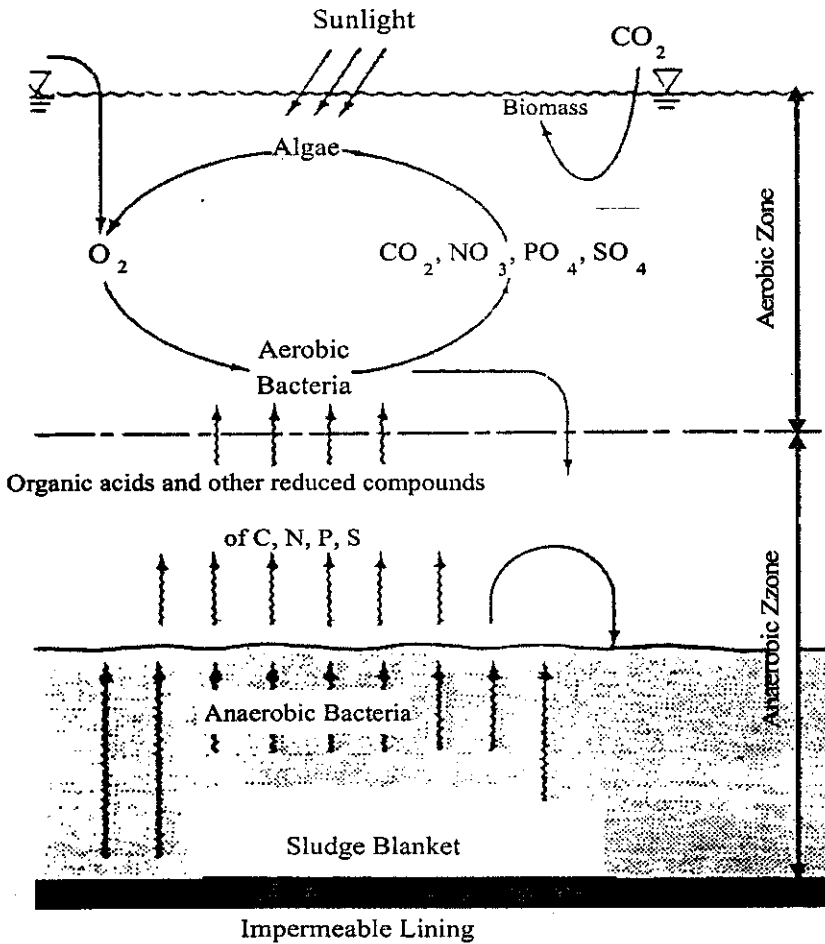
รูปที่ 7.6 โปรโตซัวประเภทต่างๆ ที่พบเห็นในระบบบำบัดน้ำเสีย

**Oxidation Ponds (OP)** เป็นระบบบำบัดน้ำเสียแบบง่ายที่สุดและเป็นธรรมชาติมากที่สุด มีลักษณะคล้ายกับบ่อบำบัดหรือสระน้ำที่ใช้ในการเก็บรวบรวมน้ำไว้ใช้ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 7.7 แต่บ่อดังกล่าวใช้ในการบำบัดน้ำเสีย ระบบบำบัดแบบนี้ต้องลาดหรือปูด้วยคอนกรีต หรือวัสดุอื่นที่กันน้ำเสียซึมหรือป้องกันไม่ให้น้ำเสียซึมผ่านไปยังชั้นน้ำใต้ดินได้ สารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำเสียมีค่าลดลงจากย่อยสลายโดยสาหร่ายในช่วงกลางวันหรือในช่วงที่มีแสง เนื่องจากการย่อยสลายของเสียในระบบนี้เกิดขึ้นเฉพาะในช่วงกลางวันหรือในช่วงที่มีแสงเท่านั้น ดังนั้นประสิทธิภาพของระบบบำบัดแบบนี้จึงมีค่าต่ำ ระบบบำบัดแบบนี้ยังแบ่งออกได้ 4 ประเภท ตามประสิทธิภาพของระบบบำบัด คือ

1. **High Rate Ponds** ความลึกของบ่อบำบัดมีค่าไม่เกิน 0.5 เมตร แสงแดดส่องถึงก้นบ่อได้ ทำให้การสังเคราะห์แสงเกิดขึ้นได้ดีขึ้น สาหร่ายเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ทำให้น้ำเสียภายในบ่อมีสีเขียว ซึ่งอาจนำไปสู่การเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วของสาหร่าย (Algae Bloom) อย่างไรก็ตามน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบนี้ควรผ่านกระบวนการบำบัดขั้นต้นมาก่อน เพื่อป้องกันการคืนเงินของบ่อบำบัด เมื่อกำหนดน้ำเสียเป็นเวลานาน
2. **Faculative Ponds** ความลึกของบ่อบำบัดมีค่ามากกว่า 0.5 เมตร แต่ไม่เกิน 2 เมตร แสงแดดส่องไม่ถึงก้นบ่อ ทำให้สาหร่ายมีการเจริญเติบโตช้า ข้อดีของระบบนี้คือ น้ำเสียที่ป้อนเข้าบ่อบำบัดไม่จำเป็นต้องผ่านการบำบัดขั้นต้น ส่วนปฏิกิริยาที่ก้นบ่อ เป็นการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน
3. **Maturation Ponds** มีความลึกโดยเฉลี่ยประมาณ 1 เมตร ทำให้มีลักษณะเหมือนบ่อบำบัดแบบผสม มักใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่ผ่านขั้นตอนการบำบัดอื่นมาแล้ว เพื่อช่วยให้น้ำทิ้งมีการฟอกโดยธรรมชาติ (Self Purification) ทำให้น้ำในบ่อบำบัดมีคุณภาพดีขึ้นตามลำดับ ดังนั้นประสิทธิภาพของระบบนี้ดีกว่าระบบบำบัดน้ำเสียแบบ Oxidation Pond แบบที่ 1 และ 2
4. **Anaerobic Ponds** ความลึกของบ่อบำบัดอยู่ในช่วง 3 ถึง 4 เมตร มักใช้ในการรับน้ำเสียที่มีค่าบีโอดีสูง จากนั้นน้ำเสียที่ผ่านระบบนี้ไปบำบัดต่อไป ประสิทธิภาพของระบบมีค่าค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับแบบที่ 1 ถึง 3 เพราะแสงแดดส่องลงไปไม่ถึงพื้นดิน จึงเกิดการสะสมของตะกอนจุลินทรีย์จำนวนมากและกลไกของการย่อยสลายของเสียโดยจุลินทรีย์แต่ละชนิด แสดงไว้ในรูปที่ 7.8



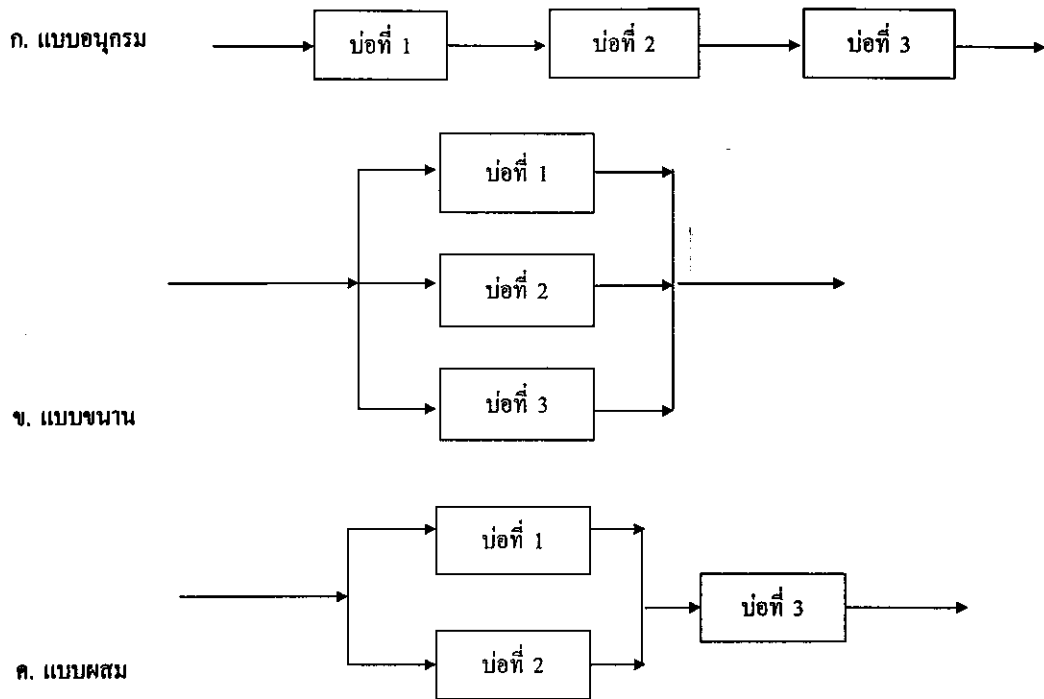
รูปที่ 7.7 ระบบบำบัดน้ำเสีย แบบ Oxidation ponds



รูปที่ 7.8 กลไกระบบบำบัดน้ำเสียแบบ Oxidation Ponds



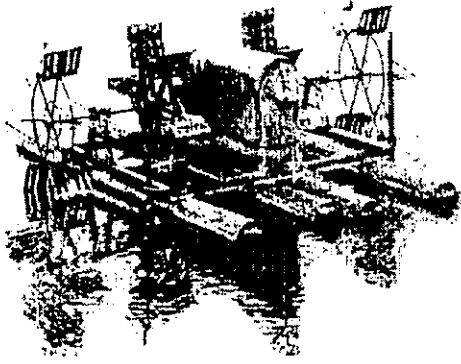
การต่อระบบบำบัดน้ำเสีย แบ่งได้ 3 ลักษณะ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 7.9 โดยแบ่งตามลักษณะการเดินระบบบำบัด คือ แบบอนุกรม (Series Type) แบบขนาน (Paralleled Type) และแบบผสมผสาน (Mixed Type)



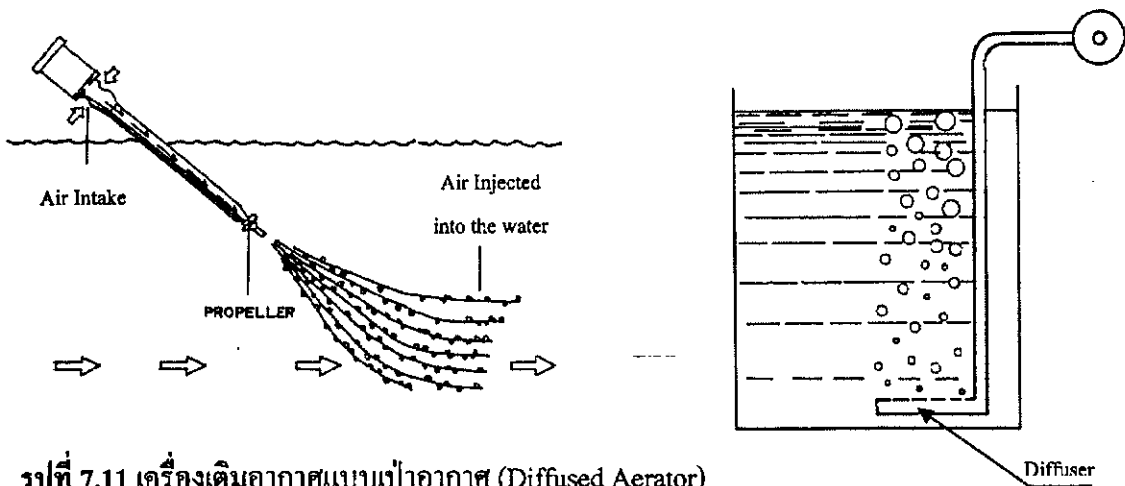
รูปที่ 7.9 การต่อระบบบำบัดน้ำเสีย แบบ ก. อนุกรม ข. ขนาน และ ค. ผสมผสาน

**Aerated Lagoons** เป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่คล้ายกับระบบ Oxidation Ponds ทุกประการทั้งในส่วนของ การออกแบบและการก่อสร้าง ซึ่งต่างจากระบบ Oxidation Ponds ตรงที่ระบบบำบัดแบบ Aerated Lagoon มีการใช้เครื่องเติมอากาศเพื่อเพิ่มปริมาณออกซิเจนในน้ำเสีย ช่วยให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์มีค่ามากขึ้น

โดยทั่วไปแล้วเครื่องเติมอากาศที่ใช้ มี 2 แบบ คือ แบบลอยที่ผิวน้ำ (Surface aerator) ดังรูปที่ 7.10 และแบบเป่าอากาศ (Diffused Aerator) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 7.11 โดยทั่วไปแล้วประสิทธิภาพของระบบบำบัดแบบนี้มีค่ามากกว่าระบบบำบัดน้ำเสียแบบ Oxidation Ponds ค่อนข้างมาก เมื่อพิจารณาที่ภาระสารอินทรีย์เท่ากัน นอกจากนี้แล้วระบบบำบัดแบบนี้ยังใช้พื้นที่ในการสร้างระบบเพื่อบำบัดน้ำเสียน้อยกว่าระบบบำบัดน้ำเสียแบบ Oxidation Ponds ประมาณ 8-10 เท่า

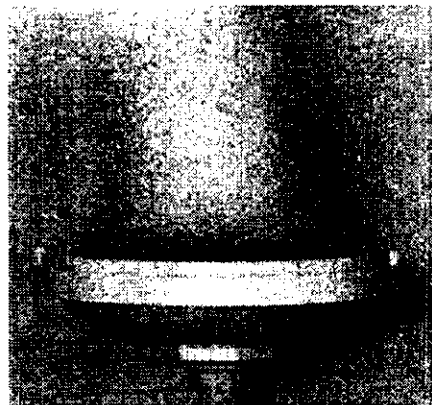
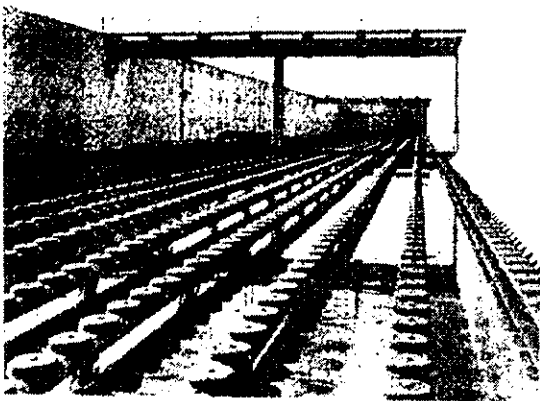


รูปที่ 7.10 เครื่องเติมอากาศแบบลอยที่ผิวน้ำ (Surface Aerator)



รูปที่ 7.11 เครื่องเติมอากาศแบบเป่าอากาศ (Diffused Aerator)

ตัวอย่างของหัวจ่ายอากาศหรือออกซิเจนให้แก่น้ำ ดังรูปที่ 7.12 ซึ่งเรียกว่าหัวจ่ายอากาศแบบโดม (Dome Aeration Device)

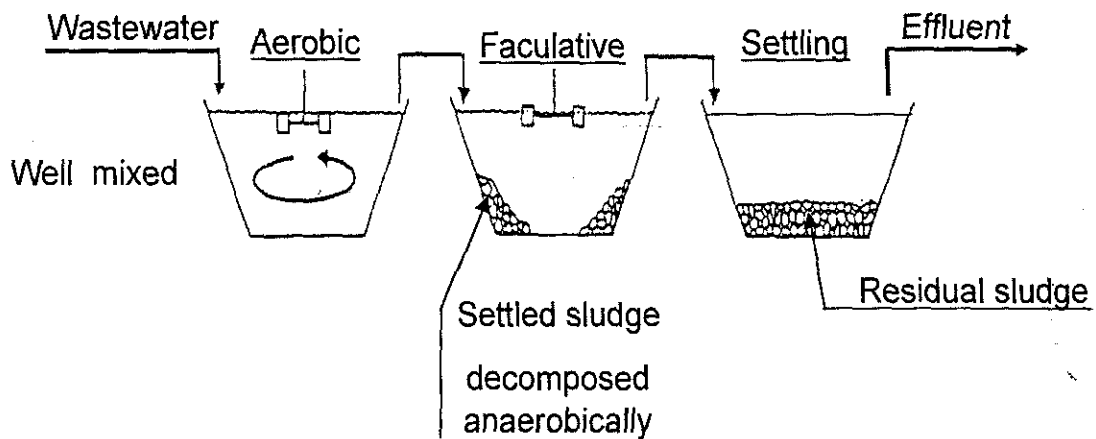


รูปที่ 7.12 หัวจ่ายอากาศแบบ โดม

ระบบบำบัดแบบ Aerated Lagoons แบ่งได้ 2 ประเภท ตามระดับความลึกของบ่อบำบัด คือ

1. **Aerobic Lagoons** ระบบบำบัดแบบนี้จะใช้เครื่องเติมอากาศที่ให้อากาศได้อย่างทั่วถึงบ่อ น้ำทิ้งที่ผ่านระบบบำบัดแบบนี้มีความขุ่นค่อนข้างมาก ดังนั้นระบบบำบัดแบบนี้ มักมีถังตกตะกอนควบคู่อยู่เสมอ ก่อนที่ปล่อยน้ำทิ้งออกไปสู่แหล่งน้ำสาธารณะ
2. **Faculative Lagoons** ระบบบำบัดแบบนี้ใช้เครื่องเติมอากาศ เพื่อให้มีอากาศเพียงพอต่อความต้องการของจุลินทรีย์ Faculative Bacteria ซึ่งคำนวณหาปริมาณความต้องการอากาศของแบคทีเรียที่มีอยู่ในน้ำเสียจากสมการที่สมดุลในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ดังนั้นบางส่วนของระบบบำบัดแบบนี้ อาจเกิดการย่อยสลายแบบไม่ต้องการอากาศเกิดขึ้นได้ การแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นอาจใช้ถังตกตะกอนเข้ามาร่วมด้วย เพื่อลดปริมาณตะกอนที่มีอยู่ในน้ำเสียลงไปจำนวนหนึ่ง

ระบบบำบัดแบบ Aerated Lagoons เป็นระบบบำบัดที่มีการกวนอย่างสมบูรณ์ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 7.13 ระบบบำบัดแบบนี้มักไม่มีปัญหาเรื่องกลิ่นและยังสามารถกำจัดตะกอนได้ดี นอกจากนี้แล้วยังรับภาระสารอินทรีย์ของน้ำเสียได้ค่อนข้างมาก



รูปที่ 7.13 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบ Aerated Lagoons

สมการสมดุลมวลสารของสารอาหารในระบบบำบัดน้ำเสียแบบ Oxidation Ponds และ Aerated Lagoons เป็นดังสมการที่ 7.3

$$\text{อัตราสารสะสมทั้งหมด} = \text{อัตราสารไหลเข้าทั้งหมด} - \text{อัตราสารไหลออกทั้งหมด} + \text{อัตราสารเจริญเติบโตสุทธิทั้งหมด} \quad \dots 7.3$$

เนื่องจากในระบบบำบัดน้ำเสียไม่ต้องการให้มีสารอินทรีย์ตกค้าง ดังนั้นอัตราการสะสมของสารอินทรีย์ภายในระบบบำบัด เท่ากับศูนย์ ซึ่งตรงกับสภาวะคงที่ (Steady State Condition)

จากความสัมพันธ์ที่ว่า “อัตราการไหลเข้าเชิงมวลของสารอาหารในน้ำเสีย = ปริมาณสารอาหารเริ่มต้นกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำเสีย” ซึ่งเป็นดังสมการที่ 7.4

$$\text{อัตราการไหลเข้าเชิงมวลของสารอาหารในน้ำเสีย} = C_{AO} * Q \quad \dots 7.4$$

จากความสัมพันธ์ดังกล่าว อัตราการไหลออกเชิงมวลของสารอาหารในน้ำทิ้ง มีค่าเท่ากับ ผลคูณของปริมาณสารอาหารในน้ำทิ้ง กับอัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำเสีย ซึ่งเป็นดังสมการที่ 7.5

$$\text{อัตราการไหลออกเชิงมวลของสารอาหารในน้ำเสีย} = C_A * Q \quad \dots 7.5$$

อัตราการใช้สารอาหารของสาหร่าย เท่ากับ ผลคูณของอัตราการใช้สารอาหารกับปริมาณสารที่ออกจากระบบ และปริมาตรของน้ำเสียในระบบบำบัด เป็นดังสมการที่ 7.6

$$\text{อัตราการใช้สารอาหารเชิงมวล} = V_r * k * C_A \quad \dots 7.6$$

แทนค่าสมการที่ 7.5 ถึง 7.6 ลงในสมการที่ 7.3 ได้ดังสมการที่ 7.7

$$0 = C_{AO} * Q - C_A * Q - V_r * k * C_A \quad \dots 7.7$$

จัดรูปสมการที่ 7.7 ใหม่ได้ดังสมการที่ 7.8

$$\begin{aligned} \frac{C_A}{C_{AO}} &= \frac{1}{1 + k * \frac{V_r}{Q}} \\ &= \frac{1}{1 + k * t} \end{aligned} \quad \dots 7.8$$

ในกรณีมีการต่อแบบอนุกรม n ชั้นตอน สมการคำนวณหาค่าคุณภาพของน้ำทิ้งที่ออกจากระบบบำบัดไบสสุดท้าย เป็นดังสมการที่ 7.9

$$C_{A,n} = C_{AO} * \left( \frac{1}{1 + \frac{k * t}{n}} \right)^n \quad \dots 7.9$$

- |       |           |     |                                                          |
|-------|-----------|-----|----------------------------------------------------------|
| เมื่อ | $C_{AO}$  | คือ | ปริมาณสารอาหารเริ่มต้นในน้ำเสีย หน่วยมวลต่อปริมาตร       |
|       | $C_A$     | คือ | ปริมาณสารอาหารในน้ำทิ้ง หน่วยมวลต่อปริมาตร               |
|       | $C_{A,n}$ | คือ | ปริมาณสารอาหารในน้ำทิ้งในชั้นตอนที่ n หน่วยมวลต่อปริมาตร |
|       | k         | คือ | ค่าคงที่ของอัตราการย่อยสลายสารอาหาร หน่วยต่อเวลา         |
|       | n         | คือ | จำนวนถังบำบัดทั้งหมดของระบบบำบัดน้ำเสีย หน่วยจำนวนใบ     |
|       | t         | คือ | ระยะเวลาในการกักเก็บน้ำเสีย หน่วยเวลา                    |

ค่าคงที่ของอัตราการย่อยสลายสารอาหาร ขึ้นกับอุณหภูมิของน้ำเสีย การหาค่าคงที่ของการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่อุณหภูมิของน้ำเสีย ซึ่งไม่ใช่ที่สภาวะมาตรฐาน หาได้จากสมการที่ 7.10

$$k_{Tc} = k_{20c} * \theta^{(T-20)} \quad \dots 7.10$$

- เมื่อ  $k_{Tc}$  คือ ค่าคงที่ของอัตราการย่อยสลายสารอาหาร ที่อุณหภูมิ T C หน่วยต่อเวลา
- $k_{20c}$  คือ ค่าคงที่ของอัตราการย่อยสลายสารอาหาร ที่อุณหภูมิ 20 T หน่วยต่อเวลา
- $\theta$  คือ ค่าคงที่ของการแปลงค่าค่าคงที่อัตราการย่อยสลายสารอาหารที่อุณหภูมิ 20 C ไปเป็นที่อุณหภูมิ T C ซึ่งเท่ากับ 1.079

รูปร่างของถังบำบัดในระบบบำบัดน้ำเสียแบบ Oxidation Ponds และ Aerated Lagoons มักเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าหรือรูปสี่เหลี่ยม และมีความลาดเอียงประมาณ 1/2 ถึง 1/4 ขึ้นกับลักษณะของชั้นดินและความลึกของบ่อ ผนังบ่อควรมีการคาดหรือปูด้วยดินซีเมนต์หรือแผ่นพลาสติก หินขนาดใหญ่ เป็นต้น เพื่อป้องกันการซึมของน้ำใต้ดินเข้ามายังระบบบำบัดและซึมออกจากบ่อบำบัดออกไปยังน้ำใต้ดิน และที่แนวระดับขอบน้ำ ควรมีการคาดหินอย่างน้อยประมาณ 0.30 เมตร เหนือและใต้ระดับผิวน้ำ เพื่อป้องกันการกัดกร่อนของผนังบ่อจากคลื่นที่เกิดขึ้นจากเครื่องเติมอากาศ และขอบบ่อควรสูงกว่าระดับน้ำเสีย (Free Board Level) อย่างน้อย 0.30 เมตร ความยาวของบ่อบำบัดดังกล่าว หาได้จากสมการที่ 7.11

$$L_T = \frac{[4*r*A - 6*r*(S*D)^2 + 2*(S*D)^2]^{1/2} + S*D*(1+r)}{2*r} \quad \dots 7.11$$

- เมื่อ  $L_T$  คือ ความยาวของบ่อ ที่ต้องการที่ระดับผิวน้ำ หน่วยความยาว
- $S$  คือ ความลาดเอียงของขอบบ่อ ซึ่งหาค่าได้จากอัตราส่วนของแนวระดับกับแนวตั้ง
- $D$  คือ ความลึกของก้นบ่อถึงผิวน้ำ หน่วยความยาว
- $r$  คือ อัตราส่วนระหว่างความกว้างต่อความยาวของบ่อ ที่ระดับผิวน้ำ
- $A$  คือ พื้นที่เฉลี่ยของบ่อ ซึ่งหาได้จากอัตราส่วนของปริมาตรของน้ำเสีย ต่อความลึกของระดับผิวน้ำภายในบ่อ หน่วยพื้นที่

ขนาดของเครื่องเติมอากาศขึ้นกับความจุของบ่อและปริมาณอากาศที่ต้องการ โดยทั่วไปแล้วอัตราการใช้อากาศในระบบนี้มีค่าอยู่ในช่วง 12 ถึง 1.5 เท่าของปริมาณสารอาหาร ในรูปของมวลของบีโอดีที่ถูกกำจัดได้ต่อเวลา กำลังของเครื่องเติมอากาศมีค่าประมาณ 2 แรงม้าต่อน้ำเสีย 1,000 m<sup>3</sup> สำหรับระบบบำบัดแบบ Faculative Ponds และอัตราการใช้อากาศมีค่าอยู่ในช่วง 13 ถึง 40 แรงม้าต่อน้ำเสีย 1,000 m<sup>3</sup> สำหรับ Aerobic Ponds หรือระบบบำบัดน้ำเสียแบบ Aerated Lagoons

ตัวอย่างที่ 7.2 จงคำนวณหาค่าคงที่ของอัตราการย่อยสลายสารอาหารแบบ Oxidation Ponds ซึ่งมีการใช้ระบบบำบัดแบบ 2 ขั้นตอน ที่ระยะเวลาในการกักเก็บน้ำเสีย 6 วันสำหรับขั้นตอนแรก และระยะเวลาในการกักเก็บ 3 วัน สำหรับขั้นตอนที่ 2 และประสิทธิภาพโดยรวมในการบำบัดสารอาหารทั้ง 2 ขั้นตอน เท่ากับ 88%

วิธีทำ เนื่องจากค่าคงที่ของอัตราการย่อยสลายสารอาหารมีค่าคงที่ ไม่ขึ้นอยู่กับระยะเวลาในการกักเก็บน้ำเสียเพราะฉะนั้น ค่าคงที่อัตราการย่อยสลายสารอาหารในขั้นตอนที่ 1 และในขั้นตอนที่ 2 มีค่าเท่ากัน จากสมการที่ 7.8

$$\frac{C_A}{C_{AO}} = \frac{1}{1+k \cdot t} \quad \dots 7.8$$

สำหรับขั้นตอนที่ 1  $\frac{C_{A,1}}{C_{AO,1}} = \frac{1}{1+k \cdot 6 \text{ day}} \quad \dots 1^*$

สำหรับขั้นตอนที่ 2  $\frac{C_{A,2}}{C_{AO,1}} = \frac{1}{1+k \cdot 3 \text{ day}} \quad \dots 2^*$

เมื่อ	$C_{AO,1}$	คือ	ปริมาณสารอาหารในน้ำเสียที่ไหลเข้าบ่อที่ 1 หน่วยมวลต่อปริมาตร
	$C_{A,1}$	คือ	ปริมาณสารอาหารในน้ำเสียที่ออกจากบ่อที่ 1 หน่วยมวลต่อปริมาตร
	$C_{A,2}$	คือ	ปริมาณสารอาหารในน้ำทิ้งที่ออกจากบ่อที่ 2 หน่วยมวลต่อปริมาตร

นำสมการที่ 1\* คูณกับสมการที่ 2\* ได้ดังสมการที่ 3\*

$$\frac{C_{A,1}}{C_{AO,1}} * \frac{C_{A,2}}{C_{AO,1}} = \frac{1}{1+k \cdot 6 \text{ day}} * \frac{1}{1+k \cdot 3 \text{ day}} \quad \dots 3^*$$

$$\frac{C_{A,2}}{C_{AO,1}} = \frac{1}{1+k \cdot 6 \text{ day}} * \frac{1}{1+k \cdot 3 \text{ day}}$$

$$= 0.12$$

จากสมการประสิทธิภาพของการกำจัดสารอาหาร ทั้งระบบ (Efficiency of Total System : E)

$$E = 1 - \frac{C_{A,2}}{C_{AO,1}}$$

เพราะฉะนั้น

$$E = 1 - 0.12$$

$$= 0.88$$

$$= \frac{1}{1+k*6 \text{ day}} * \frac{1}{1+k*3 \text{ day}} \quad \dots 4^*$$

แก้สมการที่ 4\* ได้ค่าคงที่ของอัตราการย่อยสลาย เท่ากับ 0.265 ต่อวัน

Answer

ตัวอย่างที่ 7.3 จงออกแบบระบบบำบัดแบบ Aerated lagoons เพื่อบำบัดน้ำเสีย ซึ่งวัดอัตราการไหลเชิงปริมาตร 1,500 m<sup>3</sup>/day ค่าบีโอดีของน้ำเสีย เท่ากับ 600 mg/L อุณหภูมิของน้ำเสียในขณะนั้น เท่ากับ 29 C ข้อมูลเพิ่มเติมประกอบการคำนวณเป็นดังนี้

- น้ำทิ้งดังกล่าวมีคุณสมบัติเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์
- ค่าคงที่อัตราการย่อยสลายสารอาหารที่อุณหภูมิ 20 C เท่ากับ 1.2 ต่อวัน
- น้ำทิ้งที่ออกจากระบบบำบัด มีค่าไม่เกิน 60 mg/L
- กำหนดให้อัตราส่วนความกว้างต่อความยาวของบ่อ ที่ระดับผิวน้ำ เท่ากับ 1/3
- ความลาดของบ่อ เท่ากับ 2
- ความลึกของก้นบ่อถึงผิวน้ำ เท่ากับ 3 เมตร
- ระยะเผื่อน้ำขึ้น (Free board level) เท่ากับ 0.5 เมตร

วิธีทำ จากสมการที่ 7.10  $k_{TC} = k_{20c} * \theta^{(T-20)} \quad \dots 7.10$

แทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ 7.10

$$\text{จะได้} \quad k_{TC} = 1.2 \text{ ต่อวัน} * 1.079^{(29-20)}$$

$$= 2.379 \text{ ต่อวัน}$$

จากสมการที่ 7.9  $\frac{C_A}{C_{AO}} = \frac{1}{1+k*t} \quad \dots 7.9$

แทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ 7.9

$$\text{จะได้} \quad \frac{60 \text{ mg/L}}{600 \text{ mg/L}} = \frac{1}{1+2.379 \text{ per day} * t}$$

$$\text{เพราะฉะนั้น} \quad t = 3.783 \text{ day}$$

$$\approx 4 \text{ วัน}$$

ปริมาตรของบ่อ = ผลคูณของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำเสีย กับระยะเวลาในการกักเก็บน้ำเสีย  
 เพราะฉะนั้น

$$\begin{aligned} V_r &= 1,500 \text{ m}^3/\text{day} * 4 \text{ day} \\ &= 6,000 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

ปริมาณสารอาหารที่เข้าสู่บ่อ มีค่าเท่ากับ ผลคูณของอัตราการไหลเชิงปริมาตรกับปริมาณสารอาหารในน้ำเสียที่ไหลเข้าบ่อ เขียนได้ดังสมการที่ 5\*

$$\text{ปริมาณสารอาหารที่เข้าสู่บ่อ} = Q * C_{AO} \quad \dots 5^*$$

แทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ 5\*

$$\begin{aligned} \text{เพราะฉะนั้น ปริมาณสารอาหารที่เข้าสู่บ่อ} &= 1,500 \text{ m}^3/\text{day} * 600 \text{ mg/L} * \frac{10^3 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} * \frac{1 \text{ kg}}{10^6 \text{ mg}} \\ &= 900 \text{ kg/day} \end{aligned}$$

ปริมาณออกซิเจนที่ได้จากเครื่องเติมอากาศ เท่ากับ 1.3 เท่าของปริมาณสารอาหารที่ถูกกำจัดได้  
 เพราะฉะนั้น

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณออกซิเจนที่ได้จากเครื่องเติมอากาศ} &= 1.3 \text{ kgO}_2 / \text{kg BOD} * 900 \text{ kg BOD/day} * \frac{1 \text{ day}}{24 \text{ hr}} \\ &= 48.75 \text{ kg/hr} \end{aligned}$$

กำลังของเครื่องเติมอากาศ เท่ากับ 13 แรงม้า ต่อ 1,000 m<sup>3</sup> ของน้ำเสีย \* ปริมาตรของน้ำเสียภายในบ่อ

$$\begin{aligned} \text{เพราะฉะนั้น กำลังของเครื่องเติมอากาศ} &= \frac{13 \text{ Hp}}{1,000 \text{ m}^3} * 6,000 \text{ m}^3 \\ &= 78 \text{ Hp} \end{aligned}$$

จากสมการที่ 7.11

$$L_T = \frac{[4*r*A - 6*r*(S*D)^2 + 2*(S*D)^2]^{1/2} + S*D*(1+r)}{2*r} \quad \dots 7.11$$

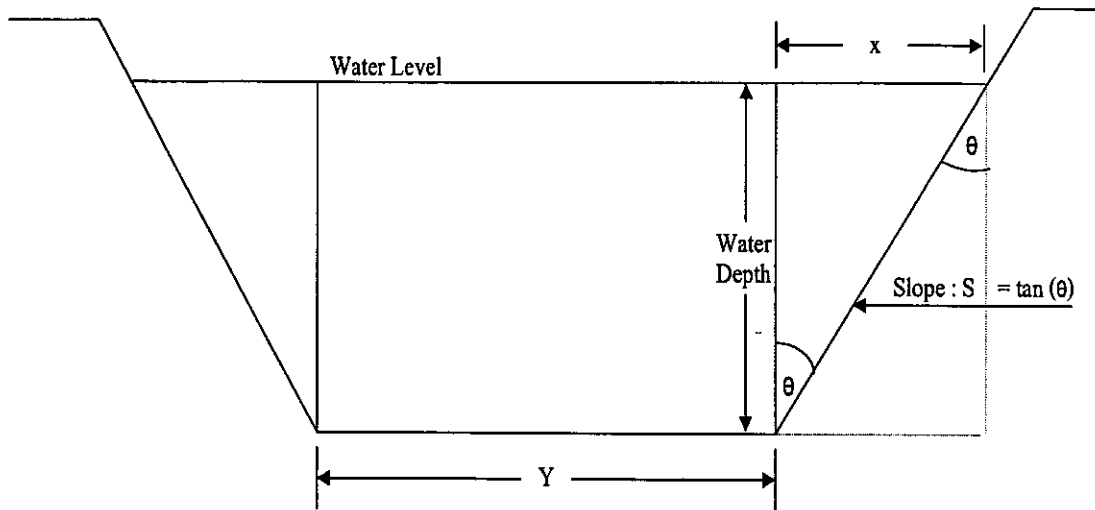
แทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ 7.11

$$\begin{aligned} \text{จะได้ } L_T &= \frac{[4*1/3*2,000 - 6*(1/3)*(2*3)^2 + 2*(2*3)^2]^{1/2} + 2*3*(1+1/3)}{2*1/3} \\ &= 89.5 \text{ เมตร} \\ &\approx 90 \text{ เมตร} \end{aligned}$$

จากอัตราส่วน  $r = 1/3$

$$\begin{aligned} \text{เพราะฉะนั้นความกว้างของบ่อ} &= 90 \text{ เมตร} * 1/3 \\ &= 30 \text{ เมตร} \end{aligned}$$





กำหนดให้ระยะห่างในแนวตั้งฉากของผิวน้ำที่ผิวบ่อกับก้นบ่อ เท่ากับ X เมตร

จากหลักการของสามเหลี่ยมคล้าย จากรูปข้างบน

ความลาดชันของบ่อ เท่ากับ 2 ซึ่งเท่ากับ อัตราส่วนของก้นระยะห่างในแนวตั้งฉากของผิวน้ำที่ผิวบ่อกับก้นบ่อกับระดับน้ำในบ่อ

$$\begin{aligned}
 S &= X / \text{Water Depth} \\
 2 &= X / 3 \text{ เมตร} \\
 \text{เพราะฉะนั้น } X &= 2 * 3 \text{ เมตร} \\
 &= 6 \text{ เมตร} \\
 \text{และความยาวของก้นบ่อ} &= 90 \text{ เมตร} - 2 * 6 \text{ เมตร} \\
 &= 78 \text{ เมตร}
 \end{aligned}$$

ในการก่อสร้างบ่อควรทำการออกแบบบ่อให้มีความลาดชันเท่ากันทั้งสองด้าน (ทั้งด้านยาวและด้านกว้าง) ดังนั้นความกว้างของก้นบ่อสามารถหาได้ด้วยวิธีเดียวกัน โดยเอาความกว้างของบ่อที่ผิวน้ำหักด้วยสองเท่าของระยะ X

$$\begin{aligned}
 \text{ความกว้างของก้นบ่อ} &= 30 - 2 * 6 \text{ เมตร} \\
 &= 18 \text{ เมตร}
 \end{aligned}$$

เพื่อให้เกิดความสะดวกในการเดินรอบบ่อ จึงเผื่อระยะจากขอบบ่อทางด้านความยาวและความกว้างไป อีกด้านละ 1 เมตร เพราะความยาวของบ่อและความกว้างของบ่อที่พื้นดิน มีค่าดังข้างล่าง

$$\begin{aligned}
 \text{ความยาวของบ่อซึ่งรวมทางเดินด้วย} &= 90 \text{ เมตร} + 1 \text{ เมตร} + 1 \text{ เมตร} \\
 &= 92 \text{ เมตร} \\
 \text{และความกว้างของบ่อรวมทางเดิน} &= 30 \text{ เมตร} + 1 \text{ เมตร} + 1 \text{ เมตร} \\
 &= 32 \text{ เมตร}
 \end{aligned}$$

ขนาดของขอบบ่อ ผิวน้ำและก้นบ่อ แสดงไว้ในตารางข้างล่าง

	ขอบบ่อ	ผิวน้ำ	ก้นบ่อ
กว้าง : m	32	30	18
ยาว : m	92	90	78

## แบบฝึกหัดเพิ่มความเข้าใจ

1. จงออกแบบระบบบำบัดแบบ Aerated Lagoons เพื่อบำบัดน้ำเสีย ซึ่งมีอัตราการไหลเชิงปริมาตร  $20,000 \text{ m}^3/\text{day}$  ค่าบีโอดีของน้ำเสีย เท่ากับ  $150 \text{ mg/L}$  อุณหภูมิของน้ำเสียในขณะนั้น เท่ากับ  $39 \text{ C}$  โดยอาศัยข้อมูลต่อไปนี้ช่วยในการออกแบบ
  - น้ำเสียมีคุณสมบัติเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์
  - ค่าคงที่อัตราการย่อยสลายสารอาหารที่อุณหภูมิ  $20 \text{ C}$  เท่ากับ  $1.102$  ต่อวัน
  - น้ำทิ้งที่ออกจากระบบบำบัด มีค่าไม่เกิน  $60 \text{ mg/L}$
  - กำหนดให้อัตราส่วนความกว้างต่อความยาวของบ่อ ที่ระดับผิวน้ำ เท่ากับ  $1/3$
  - ความลาดของบ่อ เท่ากับ  $2$
  - ความลึกของก้นบ่อถึงผิวน้ำ เท่ากับ  $3$  เมตร
  - ระยะเพื่อน้ำล้น (Free board level) เท่ากับ  $0.5$  เมตร
  - บ่อที่ใช้ มีจำนวน  $5$  บ่อ ซึ่งทำการต่อระบบบำบัดในลักษณะแบบอนุกรม และขนาดความจุของถึงเท่ากัน
2. จงออกแบบระบบบำบัดแบบ Aerated lagoons เพื่อบำบัดน้ำเสีย ซึ่งมีอัตราการไหลเชิงปริมาตร  $20,000 \text{ m}^3/\text{day}$  ค่าบีโอดีของน้ำเสีย เท่ากับ  $150 \text{ mg/L}$  อุณหภูมิของน้ำเสียในขณะนั้น เท่ากับ  $39 \text{ C}$  โดยอาศัยข้อมูลต่อไปนี้ช่วยในการออกแบบ
  - น้ำเสียที่นำมาบำบัด ภายในบ่อบำบัดแต่ละบ่อ มีคุณสมบัติเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์
  - ค่าคงที่อัตราการย่อยสลายสารอาหารที่อุณหภูมิ  $20 \text{ C}$  เท่ากับ  $1.102$  ต่อวัน
  - น้ำทิ้งที่ออกจากระบบบำบัด ซึ่งมาจากน้ำเสีย ที่ผ่านการบำบัดแล้ว จากทั้ง  $2$  บ่อ รวมกันแล้ว มีค่าไม่เกิน  $60 \text{ mg/L}$
  - กำหนดให้อัตราส่วนความกว้างต่อความยาวของบ่อ ที่ระดับผิวน้ำ เท่ากับ  $1/3$
  - ความลาดของบ่อ แต่ละบ่อ มีค่าเท่ากับ  $2$
  - ความลึกของก้นบ่อถึงผิวน้ำของบ่อบำบัดแต่ละบ่อ เท่ากับ  $3$  เมตร
  - ระยะเพื่อน้ำล้น (Free board level) ของบ่อบำบัด แต่ละบ่อ เท่ากับ  $0.5$  เมตร
  - บ่อที่ใช้ มีจำนวน  $2$  บ่อ ซึ่งต่อถึงในลักษณะขนานกัน
  - บ่อบำบัดใบที่  $1$  มีความจุของถัง เป็น  $2$  เท่าของบ่อบำบัดที่  $2$
  - อัตราการบำบัดน้ำเสีย ของบ่อบำบัดที่  $1$  มีค่าเป็น  $4$  เท่าของบ่อบำบัดที่  $2$

## บทที่ 8

### กระบวนการหมักทำปุ๋ย (Composting Process)

**กระบวนการหมักทำปุ๋ย** หมายถึง กระบวนการบำบัดของเสียทางชีวภาพ เพื่อลดปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นให้อยู่ในรูปของสารที่เกษตรกร สามารถนำไปใช้ประโยชน์ทางด้านเกษตรกรรมได้โดยตรง โดยทั่วไปแล้วของเสียที่นำมาผลิตเป็นปุ๋ย ควรประกอบไปด้วยสารอินทรีย์เป็นส่วนใหญ่ เพื่อก่อให้เกิดประโยชน์ต่อผลผลิตทางการเกษตร

ประโยชน์ที่ได้รับจากกระบวนการหมัก คือ ทำให้ได้ปุ๋ยอินทรีย์ที่มีคุณภาพดี ของเสียที่ผ่านกระบวนการดังกล่าวอยู่ในสภาพที่เสถียรหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อย (Stabilized Organic Matter) ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมลดลงไป ตัวอย่างของของเสียที่นำมาใช้ในกระบวนการหมัก ได้แก่ ของเสียจากมนุษย์ ซึ่งเรียกว่า Night Soil เชื้อจุลินทรีย์ ของเสียจากสัตว์ ของเสียจากภาคเกษตรกรรมและของเสียบางชนิดของชุมชน เป็นต้น

วัตถุประสงค์ของกระบวนการหมัก ได้แก่

1. ทำให้ของเสียอยู่ในสภาพที่เสถียร (Waste Stabilization) ทำให้มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยลง และทำให้การบำบัดของเสียดังกล่าวในขั้นตอนอื่นๆ ทำได้ดีขึ้น
2. ลดกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุของโรคต่างๆ ลงไป (Pathogen Inactivation) กิจกรรมการย่อยสลาย การเจริญเติบโต และการขยายพันธุ์ของจุลินทรีย์ ที่เป็นสาเหตุของโรคต่างๆ มักเกิดขึ้นในสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสม เช่น อุณหภูมิห้อง เป็นต้น เนื่องจากว่าที่อุณหภูมิสูงประมาณ 50-60 C ของกระบวนการหมัก สภาวะดังกล่าวสามารถยับยั้งกิจกรรมของจุลินทรีย์หรือการทำงานของเซลล์ จุลินทรีย์
3. เป็นการนำเอาอาหารเสริมสร้างกลับมาใช้ใหม่ได้อีก (Nutrient Reclamation) กระบวนการหมักเกิดขึ้นได้ดีเพียงใดขึ้นอยู่กับชนิดของสารอินทรีย์ที่นำมาทำการหมักทำปุ๋ย โครงสร้างของสารอินทรีย์ โดยเฉพาะสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างสลับซับซ้อน การย่อยสลายสารอินทรีย์ดังกล่าว ต้องผ่านขั้นตอนการสลายหลายขั้นตอน และใช้ระยะเวลาในการย่อยสลายนานกว่าสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างแบบง่าย หรือมีโครงสร้างของโมเลกุลเป็นแบบขนาดเล็ก

4. ช่วยในการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์แห้ง (Sludge Drying) อุณหภูมิภายในกองหมักของเสียในกระบวนการหมักมีค่าสูงถึง 50 C ทำให้ได้ปุ๋ยที่มีคุณภาพแล้วยังช่วยกำจัดเชื้อจุลินทรีย์อีกด้วย นอกจากนี้ยังลดช่วยลดปริมาณของของเสียลงไปด้วย ทำให้ค่าใช้จ่ายต่างๆ ในส่วนของเสียมีค่าลดลง อาทิ ค่าใช้จ่ายในการขนส่ง การเก็บกักและการบำบัด ซึ่งเป็นค่าใช้จ่ายที่สูงมากของระบบบำบัดทุกประเภทมีค่าลดลง เป็นต้น

**ประเภทของกระบวนการหมัก (Type of Composting)** กระบวนการหมักแต่ละประเภท มีการใช้เครื่องมือ เครื่องจักร และใช้เวลาในการหมักต่างกัน อาจแบ่งกระบวนการหมักออกได้ 2 ประเภท ตามประเภทของเครื่องมือ เครื่องจักรที่ใช้กระบวนการ คือ

1. กระบวนการหมักที่มีการใช้เครื่องจักรกล (Mechanical Composting Process) เป็นกระบวนการหมักที่มีการใช้อุปกรณ์เครื่องกล เพื่ออำนวยความสะดวกในการทำงานของกระบวนการ เช่น การใช้รถดัดเพื่อทำการรวมรวมของเสียมากองไว้ ณ สถานที่เดียวกัน การใช้อุปกรณ์เป่าลม เพื่อช่วยให้กระบวนการหมักของเสียเกิดขึ้นได้ดี เพราะลมจะช่วยทำให้เกิดการผสมผสานระหว่างเชื้อจุลินทรีย์และสารอินทรีย์ได้ดีขึ้น นอกจากนี้แล้วลมที่เป่าเข้าไปภายในกองหมักยังช่วยระบายความร้อนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักอีกด้วย เป็นต้น
2. กระบวนการหมักที่ไม่มีการใช้เครื่องจักรกล (Non-Mechanical Processes) เป็นกระบวนการหมักที่อาศัยแรงงานคนหรืออุปกรณ์แบบง่าย เช่น การกองปุ๋ยซึ่งได้มาจากการรวบรวมของเสียประเภทต่างๆ จากคนภายในชุมชนนั้น ๆ นำมาเทรวมกัน เป็นต้น

อาจแบ่งกระบวนการหมักแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ตามลักษณะของการก่อสร้างระบบการทำปุ๋ย คือ

1. กระบวนการหมักที่ต้นกำเนิดของของเสีย (On-Site Process) เป็นการหมักจากของเสียที่ต้นกำเนิดของของเสียที่เกิดขึ้นภายในชุมชนหรือภายในโรงงานอุตสาหกรรม กระบวนการหมักแบบนี้เกิดขึ้นในชุมชนที่มีความต้องการในการบำบัดของเสียที่เกิดขึ้นและเห็นความสำคัญของการหมักทำปุ๋ย เช่น ที่ชุมชนบรมไตร โลกนาถ อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก เป็นต้น
2. กระบวนการหมักรวมหรือกระบวนการหมักแบบศูนย์กลาง(Off-Site Processes) เป็นการหมักจากของเสียที่ทำการรวบรวมของเสียของชุมชนทั้งหมด หรือมีปริมาณของเสียมากในสถานที่เดียวกัน ซึ่งมีความจุในการรองรับปริมาณของเสียได้มาก กระบวนการหมักแบบนี้เหมาะกับชุมชนที่มีระบบการรวบรวมของเสียที่ดี หรือจากความต้องการของชุมชนร่วมกับภาครัฐที่ต้องการนำเอาของเสียที่เกิดขึ้นมาทำการหมักภายในสถานที่เดียวกัน เช่น โรงหมักทำปุ๋ย ที่อ่อนนุช กรุงเทพมหานคร เป็นต้น

นอกจากนี้อาจแบ่งกระบวนการหมักอาจแบ่งได้ 3 ประเภท ตามวิธีการเดินระบบ คือ

1. **กระบวนการหมักแบบเบต หรือกระบวนการหมักแบบครั้งคราว (Batch Operation)** หมายถึง กระบวนการหมักของเสียที่มีการเติมของเสียลงไปครั้งเดียว แล้วรอจนกระทั่งความเข้มข้นของสารอินทรีย์มีค่าลดลงอยู่ในระดับที่ต้องการแล้ว จึงถ่ายของเสียที่ผ่านการหมักออกจากถังหมักทั้งหมด จากนั้นจึงค่อยเติมของเสียใหม่ลงไปในถังหมัก เพื่อให้เกิดกระบวนการหมักต่อไป
2. **กระบวนการหมักแบบต่อเนื่อง (Continuous Operation)** หมายถึง กระบวนการหมักที่เติมของเสียลงไปตลอดเวลาภายในกระบวนการซึ่งจะทำให้ผลผลิตที่เกิดขึ้น (ปุ๋ยอินทรีย์) ที่ได้มีค่าอย่างต่อเนื่อง
3. **กระบวนการหมักกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous Operation)** หมายถึง กระบวนการหมักที่มีการเติมของเสียลงไปในระบบอย่างไม่ต่อเนื่อง เช่น มีการเติมของเสียลงไป 2 ครั้งใน 1 วัน หรือเป็นการกำหนดระยะเวลาในการเติมของเสียลงไปในแต่ละวัน ทำให้จำนวนครั้งในการเติมมีมากกว่าหนึ่งครั้ง เป็นต้น กระบวนการหมักแบบนี้มักเหมาะกับปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นในลักษณะไม่สม่ำเสมอ หรือมีปริมาณไม่คงที่ในแต่ละช่วงเวลา

นอกจากนี้แล้วอาจแบ่งกระบวนการหมักได้ 2 ประเภท ตามอุณหภูมิของกระบวนการ คือ

1. **อุณหภูมิปานกลาง (Mesophilic Composting)** มีค่าอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 25-40 C
2. **อุณหภูมิสูง (Thermophilic Composting)** มีค่าอยู่ในช่วง 50-65 C

กระบวนการหมักแบ่งได้ 2 ประเภท ตามชนิดของจุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบ คือ

1. **กระบวนการหมักแบบใช้ออกซิเจน (Aerobic Process)** หมายถึง กระบวนการหมักที่เกิดจากการทำงานของจุลินทรีย์ที่ต้องการอากาศหรือออกซิเจน กระบวนการหมักแบบนี้ต้องมีระบบการเติมอากาศหรือระบบอากาศค่อนข้างดี เพื่อให้จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องในระบบมีชีวิตเกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์
2. **กระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Process)** หมายถึง กระบวนการหมักที่อาศัยการทำงานของจุลินทรีย์ที่ไม่ต้องการอากาศหรือออกซิเจน เพื่อใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างการหมักของเสีย แบ่งได้ 2 ขั้นตอน คือ

1. **กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ (Digestion หรือ Degradation)** เป็นการย่อยสลายสารอินทรีย์ให้อยู่ในรูปที่เสถียรหรือเป็นกระบวนการลดความเข้มข้นของสารอินทรีย์ และได้พลังงานทดแทนจากก๊าซมีเทน หรือ ก๊าซชีวภาพ
2. **กระบวนการสร้างเซลล์ใหม่ (Synthesis หรือ Assimilatory Process)** เป็นการสร้างเซลล์จุลินทรีย์เซลล์ใหม่ โดยจุลินทรีย์นำเอาสารอินทรีย์คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ ซึ่งเป็นธาตุที่สำคัญในการสร้างเซลล์ที่สำคัญของจุลินทรีย์ และใช้พลังงานบางส่วนในการสร้างเซลล์มาใช้ในการสร้างเซลล์นอกเหนือไปจากใช้ในการดำรงชีพ

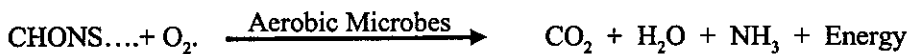
ปฏิกิริยาชีวเคมีของกระบวนการย่อยสลายของเสีย หมายถึง กระบวนการเปลี่ยนแปลงของเสียที่นำมาผ่านกระบวนการหมัก เพื่อให้ของเสียดังกล่าวเกิดการย่อยสลายไปโดยจุลินทรีย์ โดยทั่วไปแล้วกระบวนการเปลี่ยนแปลงของของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการหมัก แยกได้ 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนของการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ เพื่อใช้พลังงานและอาหารในการดำรงชีพ และขั้นตอนของการสร้างเซลล์เมื่อจุลินทรีย์อยู่ในช่วงเจริญพันธุ์

การเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีของของเสียในกระบวนการหมัก มีอยู่ 2 ลักษณะ คือ การเปลี่ยนแปลงทางองค์ประกอบของอินทรีย์ที่มีอยู่ในของเสีย ทำให้ของเสียดังกล่าวก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยลง และการเปลี่ยนแปลงส่วนของเซลล์จุลินทรีย์เอง ซึ่งมีทั้งการย่อยสลายสารอินทรีย์และการสร้างเซลล์ใหม่ขึ้นมา

กระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงของของเสียทางด้านปฏิกิริยาชีวเคมี แบ่งได้ 2 ประเภทตามลักษณะของจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้อง คือ

1. กระบวนการหมักแบบใช้อากาศ (Aerobic Process) เป็นกระบวนการหมักที่ย่อยสลายของเสียที่นำมาหมักโดยจุลินทรีย์ที่ต้องการอากาศหรือออกซิเจน (Aerobic Microbes) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักโดยจุลินทรีย์ชนิดนี้ แบ่งออกได้ 2 ขั้นตอน คือ

1.1 ปฏิกิริยาการย่อยสลาย (Degradation)



1.2 ปฏิกิริยาการสร้างเซลล์ใหม่ (Cell Production)



ข้อจำกัดของกระบวนการหมักแบบใช้อากาศ ได้แก่

1. รับภาระสารอินทรีย์ได้ค่อนข้างต่ำ (Low Organic Loading Rate : OLR) การคำนวณหาค่าภาระสารอินทรีย์หาได้จากสมการที่ 8.1

$$\text{Organic Loading Rate} = Q * \frac{C_{AO}}{V_r} \quad \dots 8.1$$

เมื่อ Q คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของเสียที่นำมาทำการหมัก หน่วยปริมาตรต่อเวลา

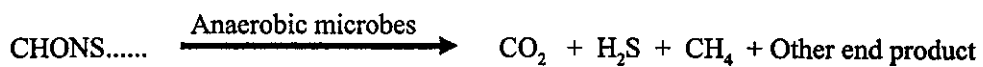
$C_{AO}$  คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของของเสียที่นำมาหมัก หน่วยความเข้มข้น

$V_r$  คือ ปริมาตรหรือความจุของของเสียที่นำมาหมัก หน่วยปริมาตร

2. การเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมมีผลกระทบต่ออันตรายของจุลินทรีย์ เมื่อสภาพแวดล้อมมีการเปลี่ยนแปลงไปมากหรือเปลี่ยนแปลงทันที เช่น อุณหภูมิของอากาศรอบกระบวนการหมักมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ปฏิกริยาชีวเคมีของเชื้อจุลินทรีย์อาจหยุดชะงักไปหรือเกิดขึ้นไม่ดี ทำให้ประสิทธิภาพของกระบวนการหมักมีค่าลดลง

2. กระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Process) เป็นกระบวนการหมักที่เกิดการย่อยสลายของเสียที่นำมาหมักโดยจุลินทรีย์ที่ไม่ต้องการอากาศหรือออกซิเจน (Anaerobic Microbes) ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการหมักโดยจุลินทรีย์ชนิดนี้ แบ่งออกได้ 2 ปฏิกริยา คือ

2.1 ปฏิกริยาการย่อยสลาย (Degradation)



2.2 ปฏิกริยาการสร้างเซลล์ (Cell Production)



ข้อดีของกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน ได้แก่

1. ไม่ต้องการพลังงานเพื่อใช้ในปฏิกริยาการย่อยสลาย
2. รับภาระสารอินทรีย์ได้ค่อนข้างสูง
3. ใช้เป็นระบบบำบัดในขั้นตอนแรกแล้วจึงต่อด้วยระบบบำบัดแบบใช้ออกซิเจน

ข้อจำกัดของกระบวนการแบบไม่ใช้ออกซิเจน ได้แก่

1. ปริมาตรของถังมีขนาดใหญ่
2. ใช้เวลาในการหมักค่อนข้างยาวนาน
3. มีปัญหาเรื่องกลิ่นและก๊าซไข่เน่า



สภาพแวดล้อมที่มีผลกระทบต่อกระบวนการหมัก ได้แก่

1. อัตราส่วนของสารอาหารเสริมสร้าง (Nutrient balance) ได้แก่ อัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน ฟอสฟอรัส ซัลเฟอร์ แคลเซียมและธาตุอื่นๆ ที่จำเป็นต่อการสร้างเซลล์ ได้แก่ โปตัสเซียม เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วปริมาณไนโตรเจนที่เหมาะสมในกระบวนการหมัก มีค่าอยู่ในช่วง 2%-4% ในรูปของน้ำหนักแห้ง ค่าอัตราส่วนของอาหารเสริมสร้างของของเสียต่างๆ แสดงไว้ในตารางที่ 8.1

ตารางที่ 8.1 แสดงค่าอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน ของเสียชนิดต่างๆ

Materials	Nitrogen (% Dry Weight)	ค่า C/N ratio
Night Soil	5.5-6.5	6-10
Urine	15-18	0.8
Blood	10-14	3.0
Animal Tankage	-	4.1
Cow Manure	1.7	18
Poultry Manure	6.3	15
Sheep Manure	3.8	-
Pig Manure	3.8	-
Horse Manure	2.3	25
Raw Sewage Sludge	4-7	11
Digested Sewage Sludge	2-4	-
Activated Sludge	5	6
Grass Clippings	3-6	12-15
Non-Legume Vegetable Wastes	2.5-4	11-12
Mixed Grasses	2.4	19
Potato Tops	1.5	25
Straw, wheat	0.3-0.5	128-150
Straw, Oats	1.1	48
Sawdust	0.1	200-500

ถ้าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของเสียที่นำมาทำการย่อยสลายในกระบวนการหมัก มีค่าน้อยกว่า 25 ต้องเติมของเสียชนิดอื่นปะปนลงไปด้วย เพื่อเพิ่มค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนให้มีค่าน้อยกว่า 25 หรือให้มีค่าอัตราส่วนดังกล่าวอยู่ในช่วง 20-40 ซึ่งเป็นค่าที่กระบวนการหมักเกิดขึ้นได้ดี

ของเสียที่เป็นสารประกอบเชิงซ้อน หรือมีโครงสร้างสลับซับซ้อน เช่น เซลล์ลูโลส ลิกนิน เป็นต้น กลไกการย่อยสลายมักเกิดช้าและย่อยสลายได้น้อยมาก หากจำเป็นต้องนำมาของเสียดังกล่าวมาทำการย่อยสลายในกระบวนการหมัก ควรหาหรือเติมของเสียอื่นลงไปไปด้วย เพื่อให้เกิดการย่อยสลายได้เร็วขึ้น หรืออาจเลือกจุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ดังกล่าวได้ดี ซึ่งจะช่วยทำให้กลไกของการย่อยสลายของเสียมีประสิทธิภาพตามต้องการได้

ในสารประกอบโปรตีน เช่น เคราติน(Keratin) เป็นต้น เกิดการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ได้น้อยมาก ดังนั้นของเสียชนิดนี้มักไม่นิยมในการบำบัดด้วยวิธีการหมักทำปุ๋ย และไนโตรเจนบางส่วนที่เกิดขึ้นระหว่างที่กระบวนการหมักดำเนินอยู่ อาจมาจากปฏิกิริยาการตรึงเอาไนโตรเจนในบรรยากาศมาใช้ โดยจุลินทรีย์บางชนิด ได้แก่ Azotobacter Spp. และเนื่องจากการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของคาร์บอนในสารอินทรีย์มีความยากลำบากในการวิเคราะห์ การหาค่าเปอร์เซ็นต์ของโมเลกุลของคาร์บอนจากสมการที่ 8.2 ซึ่งมีความถูกต้องอยู่ในช่วง 2-10% สมการดังกล่าวถูกค้นพบโดย Gotass ในปี ค.ศ. 1956

$$\% C = \frac{100 - \% Ash}{1.8} \quad \dots 8.2$$

เมื่อ %C คือ เปอร์เซ็นต์ของโมเลกุลของคาร์บอนในสารอินทรีย์  
 %Ash คือ เปอร์เซ็นต์ของเถ้าที่เหลือ ภายหลังจากที่นำของเสียไปเผา หรือผ่านกระบวนการออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 550 C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

หากอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนมีค่าน้อยกว่า 25 ควรทำสมดุลของสารประกอบไนโตรเจนและสารประกอบคาร์บอนในรูปของมวลสารของเสียภายในระบบการหมัก เพื่อหาปริมาณของของเสียที่ต้องเติมลงไป เพื่อให้กระบวนการหมักเกิดได้ดีจากค่าดังกล่าวข้างต้น

ผลของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ต่อระยะเวลาที่ทำการหมักแสดงไว้ในตารางที่ 8.2

ตารางที่ 8.2 ผลของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) กับระยะเวลาที่ทำการหมัก (Composting Time)

ค่า C/N Ratio	Composting Time : Days
20	12
20-50	14
78	21

ปริมาณของเสียที่นำมาผสมเพื่อทำการหมักที่ได้จากสมการที่ 8.2 เป็นการคิดในรูปของน้ำหนักแห้ง ซึ่งมีความยุ่งยากในทางปฏิบัติงาน โดยเฉพาะในท้องถิ่นที่ไม่มีเครื่องอบแห้ง เพื่อไล่ความชื้นหรือน้ำออกจากของเสียดังกล่าว เพื่อให้เกิดความสะดวกในทางปฏิบัติ จึงนิยมปริมาณหรือน้ำหนักของเสียที่นำมาผ่านกระบวนการหมักในรูปของน้ำหนักเปียก ซึ่งมีความชื้นปะปนอยู่จำนวนหนึ่ง สมการที่ใช้หาปริมาตรของเสียที่จะนำมาหมักเป็นดังสมการที่ 8.3

$$V = \frac{m}{\rho} \quad \dots 8.3$$

เมื่อ V คือ ปริมาตรของของเสียที่นำมาหมัก หน่วยปริมาตร  
 m คือ ปริมาณหรือน้ำหนัก หรือมวลของของเสียที่นำมาหมัก หน่วยมวล  
 ρ คือ ความหนาแน่นของของเสีย (Bulk density) หน่วยมวลต่อปริมาตร

ตัวอย่างที่ 8.1 ของเสียชนิดหนึ่งที่ได้มาจากบ้านเรือนนำมาทำการหมักให้ได้ปุ๋ยอินทรีย์ ของเสียดังกล่าวมีคุณสมบัติดังนี้

1. ค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน เท่ากับ 15
2. ค่าของแข็งทั้งหมด เท่ากับ 10%
3. ค่าของแข็งทั้งหมดในรูปของสารอินทรีย์ มีค่าเท่ากับ 90% ของของแข็งทั้งหมด
4. ค่าความหนาแน่น (Bulk Density) มีค่าเท่ากับ 1.1 kg/L

จากข้อมูลที่ให้มาในข้างต้น อยากทราบว่าปริมาณของแกลบข้าวที่เติมลงไปผสมมีค่ากี่กิโลกรัมต่อวัน เพื่อให้กระบวนการหมักเกิดขึ้น ที่ค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในของเสียผสม เท่ากับ 30 และแกลบข้าวที่นำมาผสม มีคุณสมบัติดังนี้

- \* ค่าอัตราส่วนคาร์บอน ต่อไนโตรเจน เท่ากับ 80
- \* ค่าความชื้นเท่ากับ 50%
- \* ค่าความหนาแน่นเท่ากับ 100 kg/m<sup>3</sup>
- \* องค์ประกอบของไนโตรเจน เท่ากับ 2% โดยน้ำหนัก

### วิธีทำ

สมมติว่า ปริมาณของของเสียที่เติมในกระบวนการหมักใช้ทั้งสิ้น เท่ากับ 1 kg ในรูปของน้ำหนักแห้ง

จากสมการที่ 8.2 
$$\% C = \frac{100 - \% \text{ Ash}}{1.8} \quad \dots 8.2$$

แทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ 8.2

จะได้ 
$$\begin{aligned} \% C &= \frac{100 - 10}{1.8} \\ &= 50\% \text{ ของของแข็งทั้งหมด} \end{aligned}$$

จากปริมาณคาร์บอนทั้งหมด = % คาร์บอนที่มีอยู่ในของเสีย \* ปริมาณของเสียทั้งหมดที่นำมาหมัก .... 1\*  
แทนค่าต่างๆ ลงในสมการ 1\*

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณของคาร์บอนทั้งหมดในของเสีย (C)} &= 1 \text{ kg} * 50\% \\ &= 0.50 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จากอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N)} &= 15 \\ &= \frac{0.5 \text{ kg}}{N} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{เพราะฉะนั้น ปริมาณไนโตรเจน (N)} &= 0.50 \text{ kg} / 15 \\ &= 0.033 \text{ kg} \end{aligned}$$

สมมติให้ปริมาณของแกลบข้าวที่เติม เท่ากับ x kg โดยน้ำหนักแห้ง

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น ปริมาณของไนโตรเจนที่มีอยู่ในแกลบข้าว} &= 2\% * x \text{ kg} \\ &= 0.02 * x \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จากอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N)} &= 80 \\ &= \frac{C}{0.02 * x \text{ kg}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{เพราะฉะนั้น ปริมาณคาร์บอนในแกลบข้าว (C)} &= 80 * 0.02 * x \text{ kg} \\ &= 1.6 * x \text{ kg} \end{aligned}$$

อัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) ในของเสียผสมต้องการให้มีค่าเท่ากับ 30 ดังสมการที่ 2\*

$$30 = \frac{\sum \text{Carbon}}{\sum \text{Nitrogen}} \quad \dots 2^*$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } \sum \text{Carbon} &= \text{ผลรวมของคาร์บอนในของเสีย รวมกับคาร์บอนในแกลบข้าว} \\ &= 1 * 0.5 \text{ kg} + 1.6 * x \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{และ } \sum \text{Nitrogen} &= \text{ผลรวมของไนโตรเจนในของเสีย รวมกับไนโตรเจนในแกลบข้าว} \\ &= 0.033 \text{ kg} + 0.02 * x \text{ kg} \end{aligned}$$

แทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ 2\*

$$\text{จะได้} \quad 30 = \frac{0.5 \text{ kg} + 1.6 * x \text{ kg}}{0.033 \text{ kg} + 0.02 * x \text{ kg}} \quad \dots 3^*$$

$$\text{แก้สมการที่ 3* จะได้} \quad x = 5 \text{ kg}$$

ดังนั้นปริมาณของแกลบข้าว ในรูปของน้ำหนักแห้ง ที่เติมลงไปผสมในของเสีย เท่ากับ 5 kg

จากความสัมพันธ์ที่ว่า”ปริมาณของเสียในรูปของน้ำหนักแห้ง เท่ากับ ผลคูณของเปอร์เซ็นต์ของของแข็งในของเสียกับน้ำหนักเปียกของของเสีย”

.... 4\*

แทนค่าต่างๆ ที่ทราบค่าลงในสมการที่ 4\*

$$\begin{aligned} \text{จะได้ว่า ปริมาณของของเสียในรูปของน้ำหนักเปียก} &= 1 \text{ kg} / 10\% \\ &= 10 \text{ kg} \end{aligned}$$

ปริมาณของของเสียในรูปของน้ำหนักเปียก ที่นำมาหมัก เท่ากับ 10 kg

$$\text{จากสมการที่ 8.3} \quad V = \frac{m}{\rho} \quad \dots 8.3$$

แทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ 8.3

$$\begin{aligned} \text{จะได้ว่า ปริมาตรของของเสีย} \quad V &= \frac{10 \text{ kg}}{1.1 \text{ kg/L}} \\ &= 9.09 \text{ L} \end{aligned}$$

ดังนั้นปริมาตรของของเสียที่นำมาหมัก เท่ากับ 9.09 ลิตร

ปริมาณของแกลบข้าว คิดในทำนองเดียวกับปริมาตรของของเสีย

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้นปริมาณของแกลบข้าว ในรูปของน้ำหนักเปียก} &= 5 \text{ kg} / 50\% \\ &= 10 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{และปริมาตรของแกลบข้าว (V of rice straw)} &= \frac{10 \text{ kg}}{10 \text{ kg/m}^3} * \frac{10^3 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} \\ &= 100 \text{ L} \end{aligned}$$

ดังนั้นปริมาตรของแกลบข้าวที่นำมาผสม มีปริมาตรเท่ากับ 100 ลิตร

2. ขนาดของของเสีย และโครงสร้างของอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการหมัก ซึ่งเรียกว่า Compost Pile หากขนาดของเสียมีขนาดเล็กมากเท่าใด พื้นที่ผิวในการสัมผัสระหว่างเชื้อจุลินทรีย์และของเสียมีค่ามากขึ้น ทำให้กระบวนการย่อยสลายของเสียโดยเชื้อจุลินทรีย์เกิดได้ง่ายขึ้น และใช้เวลาอันน้อยลง

3. ค่าความชื้นภายในของเสีย (Moisture Content) โดยทั่วไปแล้วปริมาณความชื้นที่อยู่ในของเสีย ควร มีค่าอยู่ในช่วงที่พอเหมาะ เพราะความชื้นมีผลต่อเซลล์จุลินทรีย์ ซึ่งอาจไปยับยั้งกิจกรรมของเชื้อจุลินทรีย์หรือละลายเอาอาหารเสริมสร้าง (Nutrient) ออกไปจากของเสียมากเกินไป ทำให้อาหารที่เป็นส่วนที่จุลินทรีย์ต้องการมีค่าลดลง ผลของความชื้นต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์ สรุปได้ดังนี้

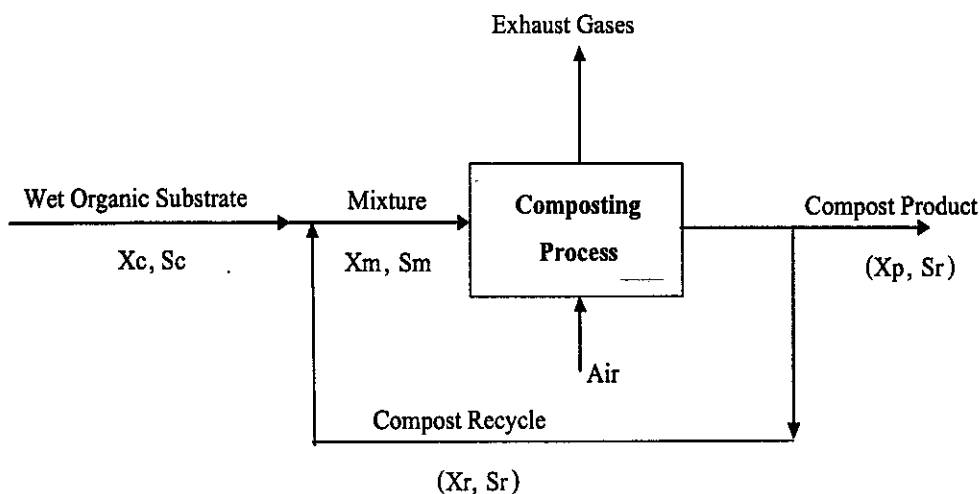
ความชื้น < 20% มีผลกระทบต่อการยับยั้งกิจกรรมการย่อยสลายของจุลินทรีย์

ค่าความชื้น > 80% ส่งผลต่อการชะล้างเอาอาหารเสริมสร้างออกจากของเสีย อุณหภูมิภายในกองของเสียลดลง ทำให้จุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุของโรคต่างๆ ทำให้อัตราตายของจุลินทรีย์กลุ่มดังกล่าวมีปริมาณน้อยลง ผลผลิตที่ได้จากกระบวนการหมักปนเปื้อนด้วยจุลินทรีย์ดังกล่าวปริมาณที่มากเกินไปจนเกิดความชื้นสูงเกินไป เกิดผลกระทบ

ต่อสิ่งแวดล้อม เมื่อนำเอาปุ๋ยอินทรีย์ที่ได้ไปใช้ประโยชน์

ค่าความชื้นที่เหมาะสมในกระบวนการหมักแบบที่อาศัยการทำงานของจุลินทรีย์ที่ต้องการอากาศ มีค่าอยู่ในช่วง 50%-70% ในกรณีที่ค่าความชื้นมากกว่า 60% ต้องทำการลดความชื้นลงเสียก่อน ด้วยวิธีการแบบง่าย เช่น การให้ความร้อน หรือการเติมของเสี้ยวที่เป็นของแข็งแห้งลงไปผสม เพื่อลดค่าความชื้นของของเสี้ยวดังกล่าวลง ก่อนนำไปของเสี้ยวดังกล่าวไปผ่านกระบวนการหมัก

บางครั้งอาจมีการนำเอาปุ๋ยอินทรีย์ที่ได้จากกระบวนการหมักมาใช้อีกครั้ง โดยทำการป้อนผสมเข้าไปของเสี้ยวใหม่ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 8.1 วิธีนี้ช่วยให้ค่าความชื้นของของเสี้ยวถูกปรับให้มีค่าลดลง และทำให้สภาพแวดล้อมของกระบวนการหมักสามารถเกิดขึ้นได้ดี



รูปที่ 8.1 แสดงตัวอย่างของกระบวนการนำเอาปุ๋ยอินทรีย์ที่ได้จากกระบวนการหมักกลับมาใช้ใหม่

จากรูปที่ 8.1 สมการสมดุลที่ต้องพิจารณา แบ่งออกได้ 2 ประเภท คือ สมดุลมวลสารรวมและสมดุลมวลสารขององค์ประกอบ สมการสมดุลมวลรวมของของแข็งเป็นดังสมการที่ 8.4

$$\text{สมการสมดุลมวลรวมของของแข็ง} \quad X_c + X_r = X_m \quad \dots 8.4$$

- เมื่อ  $X_c$  คือ น้ำหนักของเสี้ยวในรูปของของแข็งเปียก ที่ป้อนเข้าสู่กระบวนการหมักในเวลา 1 วัน หน่วยมวลต่อเวลา
- $X_p$  คือ น้ำหนักของเสี้ยวในรูปของปุ๋ยอินทรีย์ที่ผลิตได้ในรูปของน้ำหนักเปียก จากการผลิตของเสี้ยวเป็นเวลา 1 วัน หน่วยมวลต่อเวลา
- $X_r$  คือ น้ำหนักของเสี้ยวในรูปของปุ๋ยอินทรีย์ในรูปของของแข็งเปียก ที่นำกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการหมัก เป็นเวลา 1 วัน หน่วยมวลต่อเวลา
- $X_m$  คือ น้ำหนักรวมของของเสี้ยวผสมที่ป้อนเข้าสู่กระบวนการหมัก เป็นเวลา 1 วัน

สมการสมดุลมวลสารขององค์ประกอบของของแข็ง เป็นไปตามสมการที่ 8.5 หรือสมการที่ 8.6

$$Sc * Xc + Sr * Xr = Sm * Xm \quad \dots 8.5$$

$$Sc * Xc + Sr * Xr = Sm * (Xc + Xr) \quad \dots 8.6$$

- เมื่อ Sc คือ เปอร์เซนต์ของของแข็งภายในของเสียที่ทำการป้อนเข้าสู่กระบวนการหมักทำปุ๋ย ไม่มีหน่วย
- Sr คือ เปอร์เซนต์ของของแข็งภายในของเสียที่นำกลับมาใช้ใหม่ ในกระบวนการหมักทำปุ๋ย ไม่มีหน่วย
- Sm คือ เปอร์เซนต์ของของแข็งภายในของเสียผสม ก่อนนำเข้าสู่กระบวนการหมักทำปุ๋ย ไม่มีหน่วย

จากรูปที่ 8.1 อัตราส่วนของการนำเอาปุ๋ยอินทรีย์ที่ได้จากกระบวนการหมักกลับมาใช้ใหม่ มีการพิจารณาอยู่ 2 ลักษณะ คือ ในรูปของน้ำหนักแห้ง (Dried Weight Ratio : Rd) สมการที่ใช้ในการคำนวณหาอัตราส่วนในรูปของน้ำหนักแห้ง เป็นดังสมการที่ 8.7 และในรูปของน้ำหนักเปียก (Wet Weight Ratio : Rw) เป็นดังสมการที่ 8.8

$$Rd = \frac{Xr * Sr}{Xc * Sc} \quad \dots 8.7$$

$$Rw = \frac{Xr}{Xc} \quad \dots 8.8$$

- เมื่อ Rd คือ อัตราส่วนของการนำเอาปุ๋ยอินทรีย์ที่ได้กลับมาใช้ใหม่ต่อปริมาณของของเสียที่ทำการป้อนเข้าสู่กระบวนการหมัก ในรูปของน้ำหนักแห้ง ไม่มีหน่วย
- Rw คือ อัตราส่วนของการนำเอาปุ๋ยอินทรีย์ที่ได้กลับมาใช้ใหม่ ต่อปริมาณของของเสียที่ทำการป้อนเข้าสู่กระบวนการหมัก ในรูปของน้ำหนักเปียก ไม่มีหน่วย

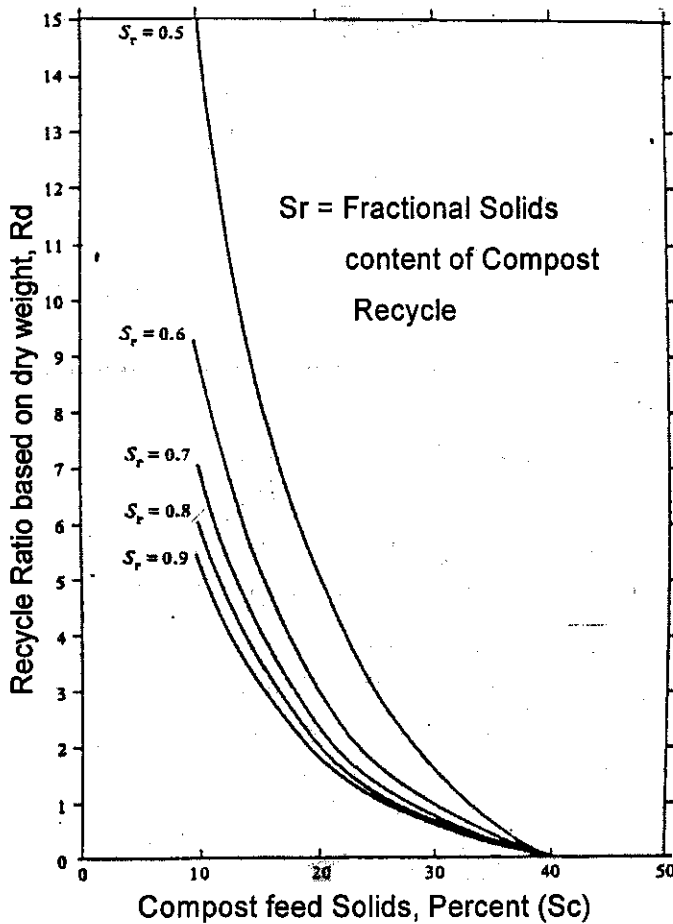
แทนค่าสมการที่ 8.7 ลงในสมการที่ 8.6 แล้วจัดรูปสมการใหม่ จะได้ดังสมการที่ 8.9

$$Rd = \frac{\left(\frac{Sm}{Sc}\right) - 1}{1 - \left(\frac{Sm}{Sr}\right)} \quad \dots 8.9$$

ในทำนองเดียวกันเมื่อค่าสมการที่ 8.8 ลงในสมการที่ 8.6 แล้วจัดรูปสมการใหม่ จะได้ดังสมการที่ 8.10

$$Rw = \frac{Sm - Sc}{Sr - Sm} \quad \dots 8.10$$

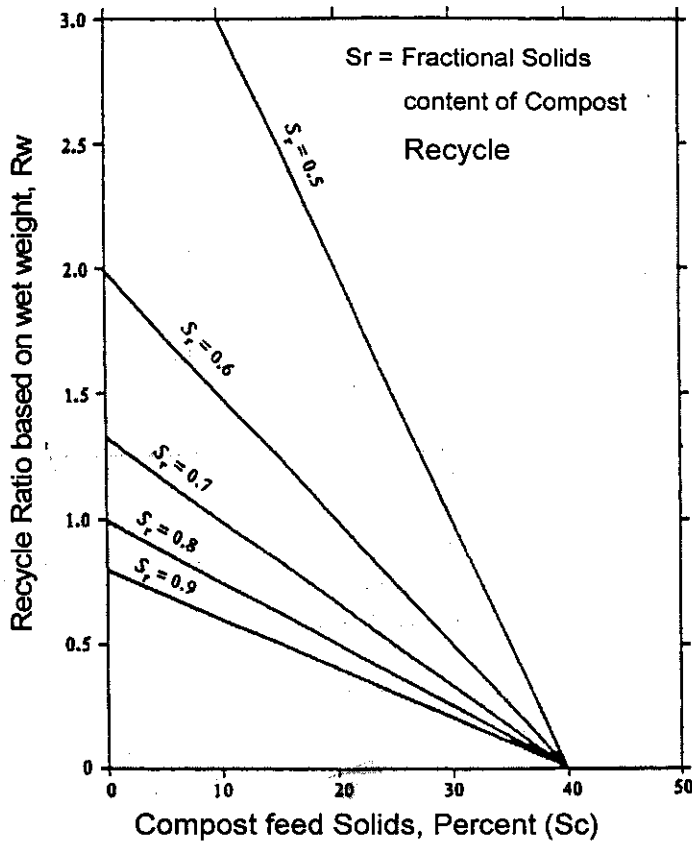
การนำเอาของเสียที่ผ่านการหมักมาใช้มากเกินไป ย่อมมีผลกระทบต่ออัตราการนำเอาปุ๋ยอินทรีย์กลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 8.2 ซึ่งพบว่าเมื่ออัตราส่วนการนำเอาปุ๋ยอินทรีย์ที่ผ่านกระบวนการหมักแล้วนำมาผสมกับของเสียใหม่ที่ต้องการนำมาหมัก อัตราส่วนของการนำเอาของเสียชุดใหม่ที่ผ่านการหมักแล้วมีค่าลดลง



รูปที่ 8.2 แสดงผลกระทบของอัตราการนำเอาปุ๋ยอินทรีย์กลับมาใช้ใหม่ในรูปของน้ำหนักแห้งที่ค่าของของแข็งต่างๆ เพื่อให้มีค่าของแข็งในของเสียผสม เท่ากับ 40%

ในการทำงานเดียวกันกับรูปที่ 8.3 ผลกระทบของการนำเอาปุ๋ยอินทรีย์กลับมาใช้ใหม่ในรูปของน้ำหนักเปียกมาผสมกับของเสียใหม่ที่ต้องการนำมาหมัก ก็มีผลเช่นเดียวกับรูปที่ 8.2 ซึ่งรูปที่ 8.3 มีความแตกต่างจากรูปที่ 8.2 เพราะการนำเอาปุ๋ยที่ผ่านการหมักแล้วในรูปของน้ำหนักแห้งมาผสมกับของเสียใหม่ ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงในส่วนผสมของแข็งเท่านั้น ไม่มีผลกระทบอื่นๆ ต่อเชื้อจุลินทรีย์





รูปที่ 8.3 แสดงให้เห็นถึงผลกระทบของอัตราการทำปุ๋ยอินทรีย์กลับมาใช้ใหม่ในรูปของน้ำหนักเปียกที่ค่าของแข็งต่างๆ เพื่อให้มีค่าของแข็งในของเสียผสม เท่ากับ 40%

ตัวอย่างที่ 8.2 ให้ใช้ข้อมูลในตัวอย่างที่ 8.1 นำมาใช้ในการคำนวณตัวอย่างที่ 8.2 สมมติว่าค่าความชื้นของปุ๋ยอินทรีย์ที่ผลิตได้ เท่ากับ 20% จากข้อมูลที่ให้มาจงคำนวณหาปริมาณของปุ๋ยอินทรีย์ที่ผลิตได้ซึ่งมีการนำเอาปุ๋ยอินทรีย์ที่ผลิตได้กลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการหมัก เพื่อให้ค่าของของแข็งในปุ๋ยอินทรีย์ที่นำกลับมาใช้ใหม่ มีค่า 40%

**วิธีทำ**

สมมติว่า ปริมาณของแข็งผสมทั้งหมด มีปริมาณของแข็งทั้งหมด 100 kg

$$\text{ปริมาณความชื้นในของเสียผสม} = \frac{\sum \text{Total moisture of all wastes}}{\sum \text{Total solid of all wastes}} * 100 \quad \dots 5^*$$

แทนค่าต่างๆ ที่ทราบค่าลงในสมการที่ 5\*

$$\begin{aligned} \sum \text{ความชื้นในของเสียผสม} &= \text{ความชื้นในของเสีย} + \text{ความชื้นในแกลบข้าว} \\ &= \left( \frac{1 \text{ kg}}{10\%} * 90\% + \frac{5 \text{ kg}}{50\%} * 50\% \right) * 100 \\ &= 1,400 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Sigma \text{ ของแข็งในของเสียผสม} &= \text{ของแข็งทั้งหมดในของเสีย} + \text{ของแข็งทั้งหมดในแกลบข้าว} \\ &= \left( \frac{1}{10\%} \text{ kg} + \frac{5}{50\%} \text{ kg} \right) * 100 \\ &= 2,000 \text{ kg} \end{aligned}$$

แทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ 6\*

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้นปริมาณความชื้นในของเสียผสม} &= \frac{1,400 \text{ kg}}{2,000 \text{ kg}} * 100 \\ &= 70\% \end{aligned}$$

$$\text{จากสมการที่ 8.9} \quad R_d = \frac{\left(\frac{S_m}{S_c}\right) - 1}{1 - \left(\frac{S_m}{S_r}\right)} \quad \dots 8.9$$

เมื่อทำการแทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ 8.9

$$\begin{aligned} \text{จะได้} \quad R_d &= \frac{\left(\frac{0.4}{0.3}\right) - 1}{1 - \left(\frac{0.4}{0.8}\right)} \\ &= 0.67 \end{aligned}$$

$$\text{จากสมการที่ 8.10} \quad R_w = \frac{S_m - S_c}{S_r - S_m} \quad \dots 8.10$$

เมื่อทำการแทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ 8.10

$$\begin{aligned} \text{จะได้} \quad R_w &= \frac{0.4 - 0.3}{0.8 - 0.4} \\ &= 0.25 \end{aligned}$$

จากความสัมพันธ์ที่ว่า ปริมาณของเสียผสมที่เติมลงไปในการหมักในรูปของน้ำหนักแห้ง (Xd) เท่ากับ “ผลคูณของมวลของของเสียในรูปของน้ำหนักแห้งที่ป้อนเข้าสู่กระบวนการหมัก กับอัตราส่วนการนำเอาปุ๋ยกลับมาใช้ใหม่ในรูปของน้ำหนักแห้ง (Rd)” เขียนได้ดังสมการที่ 6\*

$$X_d = \text{Total Wet weight of Mixed Waste} * R_w \quad \dots 6^*$$

แทนค่าต่างๆ ที่ทราบค่าลงในสมการที่ 6\*

$$\begin{aligned} \text{จะได้} \quad X_d &= (1 \text{ kg} + 5 \text{ kg}) * 0.67 \\ &= 4 \text{ kg Dried Weight} \end{aligned}$$

จากความสัมพันธ์ที่ว่า

ปริมาณของเสียผสมที่เติมลงไปในการหมักในรูปของน้ำหนักเปียก (Xw) เท่ากับ “ผลคูณของมวลของของเสียในรูปของน้ำหนักเปียกที่ป้อนเข้าสู่กระบวนการหมัก กับอัตราส่วนการนำเอาปุ๋ยกลับมาใช้ใหม่ในรูปของน้ำหนักเปียก (Rw)” เขียนได้ดังสมการที่ 7\*

$$X_w = \text{Total Wet Weight of Mixed Waste} * R_w \quad \dots 7^*$$

แทนค่าต่างๆ ที่ทราบค่าลงในสมการที่ 7\*

$$\begin{aligned} \text{จะได้} \quad X_w &= (100 \text{ kg} * 20\%) * 0.25 \\ &= 5 \text{ kg Wet Weight} \end{aligned}$$

4. **อุปกรณ์ที่ช่วยเติมอากาศ (Aeration Requirement)** ในกระบวนการหมักที่ไม่ต้องการอากาศ อุปกรณ์เติมอากาศอาจไม่มีความจำเป็นที่ต้องใช้เพียงแต่มีท่อในการนำเอาก๊าซที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนออกจากกองของเสียดังกล่าว เพื่อป้องกันการระเบิดของก๊าซภายในกองของเสีย และยังช่วยระบายอุณหภูมิออกไปบางส่วน การคำนวณหาปริมาณของอากาศที่ต้องการในกระบวนการหมักที่มีการใช้ออกซิเจน มีขั้นตอนดังนี้ คือ

- ทำการเขียนสมการสมดุลของการย่อยสลายของเสีย (Stoichiometric Equation)
- จากสมการสมดุลที่ได้ หาอัตราส่วนของออกซิเจนที่ใช้ในการออกซิเดชันของเสียต่อปริมาณของเสียที่เกิดการย่อยสลายไป (ในทางทฤษฎี)
- แปลงปริมาณของออกซิเจนที่ได้ ด้วยสมการที่ 8.11
- คำนวณหาปริมาณอากาศที่ใช้ (ในทางทฤษฎี) จากสมการที่ 8.12
- คำนวณหาปริมาณอากาศที่ใช้จริง ด้วยสมการที่ 8.13 ด้วยการนำเอาแฟกเตอร์ความปลอดภัย (Safety Factor) มาคูณกับค่าที่ได้จากสมการที่ 8.12

คำนวณหาปริมาณออกซิเจนที่ใช้ในกระบวนการหมัก

จากความสัมพันธ์ที่ว่า “ปริมาณออกซิเจนที่ต้องการในกระบวนการหมัก เท่ากับ ผลคูณของอัตราส่วนของออกซิเจนที่ใช้ในการออกซิเดชันของเสียต่อปริมาณของเสียที่เกิดการย่อยสลายไป (ในทางทฤษฎี) กับปริมาณของสารอินทรีย์ทั้งหมดที่มีอยู่ในของเสียดังกล่าว” เขียนได้ดังสมการที่ 8.11

$$\text{Total O}_2 \text{ requirement} = \text{Total Organic Matter} * \frac{\text{Total O}_2}{\text{Total Wastes}} \quad \dots 8.11$$

เมื่อ	Total O <sub>2</sub> requirement	คือ	ปริมาณออกซิเจนทั้งหมดที่ใช้ในการออกซิเดชันของเสีย หน่วยมวล
	$\frac{\text{Total O}_2}{\text{Total Wastes}}$	คือ	อัตราส่วนของออกซิเจนที่ใช้ในการออกซิเดชันของเสียต่อปริมาณของเสียที่เกิดการย่อยสลายไป(ในทางทฤษฎี)
	Total Organic Matter	คือ	ปริมาณของสารอินทรีย์ทั้งหมดที่มีอยู่ในของเสีย หน่วยมวล

### คำนวณหาปริมาณอากาศที่ใช้ (ในทางทฤษฎี)

จากความสัมพันธ์ที่ว่า ปริมาณอากาศที่ต้องการ(ในทางทฤษฎี) เท่ากับ “ผลคูณของปริมาณออกซิเจนทั้งหมดที่คำนวณหาได้กับเปอร์เซ็นต์ออกซิเจนที่มีอยู่ในอากาศ” เขียนใหม่ได้ดังสมการที่ 8.12

$$\text{Total Air requirement} = \text{Total O}_2 \text{ requirement} * \frac{1}{\text{Percentage of Oxygen in Air}} \quad \dots 8.12$$

เมื่อ Total Air requirement คือ ปริมาณอากาศทั้งหมดที่ใช้ในการออกซิเดชันสารอินทรีย์ หน่วยมวลต่อเวลา

Total O<sub>2</sub> requirement คือ ปริมาณออกซิเจนทั้งหมดที่ใช้ในการออกซิเดชันของเสีย หน่วยมวล

Percentage of Oxygen in Air คือ ออกซิเจนที่มีอยู่ในอากาศ มีค่าเท่ากับ 23% (ในทางทฤษฎี)

คำนวณหาปริมาณอากาศที่ใช้งานจริง หาปริมาณอากาศที่ใช้งานจริงด้วยสมการที่ 8.13 โดยนำเอาค่าแฟคเตอร์ความปลอดภัย (Safety Factor) มาคูณกับค่าที่ได้จากสมการที่ 8.12 เนื่องจากอาจมีการสูญเสียอากาศที่ปล่อยออกจากอุปกรณ์หรือท่อจ่ายอากาศหรือก๊าซ ดังนั้นประสิทธิภาพในการจ่ายอากาศให้แก่กระบวนการย่อยสลายมีค่าไม่ถึง 100%

$$\text{Total Air in Practical} = \text{Total Air requirement} * \text{Safety Factor} \quad \dots 8.13$$

5. **อุณหภูมิ และค่าความเป็นกรดเป็นด่าง** เมื่อมีค่ามากขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าคงที่ของการย่อยสลายเกิดขึ้นได้มากขึ้น นอกจากนี้ค่าความเป็นกรดเป็นด่างมีผลต่อกิจกรรมของเชื้อจุลินทรีย์

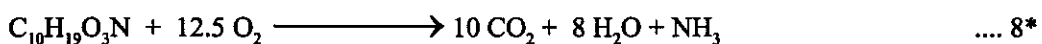
สูตรโมเลกุลของของเสียแต่ละชนิด แสดงไว้ในตารางที่ 8.3

ตารางที่ 8.3 แสดงสูตรโมเลกุลของของเสียชนิดต่างๆ

Waste Component	Typical Chemical Composition
Carbohydrate	$(C_6H_{10}O_5)_x$
Protein	$C_{16}H_{24}O_5N_4$
Fat and oil	$C_{50}H_{90}O_6$
Sludge : Primary	$C_{22}H_{39}O_{10}N$
: Combined	$C_{10}H_{19}O_3N$
Refuse (Total Organic Fraction	$C_{64}H_{104}O_{37}N$
	$C_{99}H_{148}O_{59}N$
Wood	$C_{295}H_{420}O_{186}N$
Grass	$C_{23}H_{38}O_{17}N$
Garbage	$C_{16}H_{27}O_8N$
Bacteria	$C_5H_7O_2N$
Fungi	$C_{10}H_{17}O_6N$

ตัวอย่างที่ 8.3 จงคำนวณหาปริมาณออกซิเจนที่ใช้ในกระบวนการหมักแบบใช้อากาศ จากของเสียจำนวน 1 กรัม เมื่อของเสียดังกล่าวคือ เชื้อจุลินทรีย์แบบผสม สมมติว่าในของแข็งดังกล่าวมีสารอินทรีย์อยู่ 75% และสารอินทรีย์เกิดการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ มีค่าเพียง 50%

วิธีทำ จากตารางที่ 8.3 สูตร โมเลกุลของเชื้อจุลินทรีย์แบบผสม คือ  $C_{10}H_{19}O_3N$   
สมการการออกซิเดชันสารอินทรีย์ดังกล่าวเขียนได้ดังสมการที่ 8\*



MW      201      400

(Molecular Weight : MW คือ น้ำหนักโมเลกุล)

จากสมการที่ 8\* พบว่า 400 กรัม  $O_2$  ทำปฏิกิริยาพอดีกับสารอินทรีย์ดังกล่าว จำนวน 201 กรัม

หรือเขียนใหม่ได้ว่า

$$\frac{O_2}{\text{Organic Matter}} = \frac{400 \text{ g}}{201 \text{ g}}$$

ประมาณค่าได้ = 2

จากความสัมพันธ์ที่ว่า ปริมาณสารอินทรีย์ที่เกิดการย่อยสลาย เท่ากับ “ผลคูณของเปอร์เซ็นต์สารอินทรีย์ที่มีอยู่ในของเสียกับปริมาณของเสียทั้งหมดที่นำมาหมัก” เขียนได้ดังสมการที่ 9\*

$$\text{ปริมาณสารอินทรีย์ทั้งหมด} = \% \text{ Organic Matter} * \text{Total Wastes} \quad \dots 9^*$$

เมื่อ    % Organic Matter    คือ    เปอร์เซ็นต์สารอินทรีย์ที่มีอยู่ในของเสีย

          Total Wastes            คือ    ปริมาณของเสียทั้งหมดที่นำมาหมัก หน่วยมวล

แทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ 9\*

$$\begin{aligned} \text{จะได้ปริมาณสารอินทรีย์ที่เกิดการย่อยสลายได้} &= 75\% * 1 \text{ g} \\ &= 0.75 \text{ g} \end{aligned}$$

จากความสัมพันธ์ที่ว่า ปริมาณสารอินทรีย์ที่เกิดการย่อยสลายไปโดยจุลินทรีย์ เท่ากับ “ผลคูณปริมาณสารอินทรีย์ทั้งหมดที่นำมาหมักกับประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์” เป็นดังสมการที่ 10\*

Total Digested Organic Matter	=	Total Organic Matter * Efficiency	.... 10*
เมื่อ Total Digested Organic Matter	คือ	ปริมาณสารอินทรีย์ที่เกิดการย่อยสลายไปโดยจุลินทรีย์ หน่วยมวล	
Total Organic Matter	คือ	ปริมาณสารอินทรีย์ทั้งหมดที่นำมาหมัก หน่วยมวล	
Efficiency	คือ	ประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์	

แทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ 10\*

$$\begin{aligned} \text{จะได้สารอินทรีย์ส่วนที่จุลินทรีย์เกิดการย่อยสลายได้} &= 0.75 \text{ g} * 0.5 \\ &= 0.375 \text{ g} \end{aligned}$$

$$\text{จากสมการที่ 8.11 Total O}_2 \text{ requirement} = \text{Total Organic Matter} * \frac{\text{Total O}_2}{\text{Total Wastes}} \quad \dots 8.11$$

แทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ 8.11

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณออกซิเจนที่ต้องการในการออกซิเดชันสารประกอบอินทรีย์ดังกล่าว} &= 0.375 \text{ g} * 2 \\ &= 0.750 \text{ g} \end{aligned}$$

$$\text{Total Air requirement} = \text{Total O}_2 \text{ requirement} * \frac{1}{\text{Percentage of Oxygen in Air}} \quad \dots 8.12$$

แทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ 8.12

$$\begin{aligned} \text{จะได้ปริมาณของอากาศ ที่ต้องการในการออกซิเดชันสารอินทรีย์} &= 0.750 \text{ g O}_2 * \frac{1 \text{ g Air}}{0.23 \text{ g O}_2} \\ &= 3.26 \text{ g Air} \end{aligned}$$

ใช้ค่าแฟคเตอร์ความปลอดภัย เท่ากับ 1

$$\text{จากสมการที่ 8.13 Total Air in Practical} = \text{Total Air requirement} * \text{Safety Factor} \quad \dots 8.13$$

แทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ 8.13

$$\begin{aligned} \text{จะได้ปริมาณของอากาศที่ต้องการใช้} &= 3.26 \text{ g Air} * 1 \\ &= 3.26 \text{ g air} \end{aligned}$$

จากความสัมพันธ์ที่ว่า ความถ่วงจำเพาะของอากาศ (Specific Gravity of Air: Sp.Gr.<sub>Air</sub>) เท่ากับ “อัตราส่วนความหนาแน่นของอากาศ ที่อุณหภูมิของอากาศในขณะนั้น ต่อความหนาแน่นของน้ำ” เป็นดังสมการที่ 11\*

$$\text{Sp. Gr.}_{\text{Air}} = \frac{\rho_{\text{air}}}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}} \quad \dots 11^*$$

เมื่อ Sp. Gr. <sub>Air</sub> คือ ความถ่วงจำเพาะของอากาศ ไม่มีหน่วย  
 $\rho_{\text{air}}$  คือ ความหนาแน่นของอากาศ ที่อุณหภูมิของอากาศในขณะนั้น  
 $\rho_{\text{H}_2\text{O}}$  คือ ความหนาแน่นของน้ำ ที่สภาวะมาตรฐาน มีค่า 1 g/L

ที่สภาวะมาตรฐาน ความดันอากาศ เท่ากับ 1 บรรยากาศและอุณหภูมิของอากาศ เท่ากับ 25 C ค่าความถ่วงจำเพาะของอากาศ เท่ากับ 1.20

แทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ 11\*

$$\begin{aligned} \text{จะได้ความหนาแน่นของอากาศ} &= 1.20 * 1 \text{ g/L} \\ &= 1.20 \text{ g/L} \end{aligned}$$

$$\text{จากสมการที่ 8.3} \quad V = \frac{m}{\rho} \quad \dots 8.3$$

แทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ 8.3

$$\begin{aligned} \text{จะได้ ปริมาตรของอากาศที่ต้องการ} &= \frac{3.26 \text{ g}}{1.20 \text{ g/L}} \\ &= 2.72 \text{ L} \end{aligned}$$

ดังนั้นปริมาตรของอากาศที่ใช้ในการย่อยสลายของเสีย ด้วยกระบวนการหมัก มีค่า 2.72 ลิตร

**คุณลักษณะของปุ๋ยอินทรีย์** ปุ๋ยอินทรีย์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักแบบต่างๆ จะมีคุณลักษณะดังนี้ มีดังนี้

1. อุณหภูมิของของเสียมีค่าลดลง ตลอดความยาวของถังหมัก และมีค่าต่ำที่สุดที่ทางออกของถังหมัก
2. ค่าสารอินทรีย์ ซีไอดี ร้อยละของคาร์บอน หรือร้อยละของเถ้าถ่าน และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน มีค่าลดลง เมื่อกระบวนการหมักดำเนินไปสักระยะหนึ่ง เพราะของเสียถูกจุลินทรีย์ทำการย่อยสลายไปจำนวนหนึ่ง
3. ปุ๋ยอินทรีย์ที่ได้ ไม่มีแมลงเกิดขึ้น หรือไม่เป็นแหล่งที่เพาะพันธุ์ของแมลงชนิดต่างๆ
4. ปุ๋ยอินทรีย์ที่ได้ไม่มีกลิ่น
5. ในบางครั้งปุ๋ยที่ได้อาจมีสีขาวหรือสีเทา เพราะมีเชื้อรา Actinomycetes เจริญเติบโตในกองปุ๋ยดังกล่าว

การใช้ประโยชน์จากผลผลิตที่ได้จากกระบวนการหมัก ได้แก่

1. การใช้เป็นปุ๋ยอินทรีย์
2. การใช้เป็นอาหารในการเลี้ยงปลา
3. การใช้เป็นวัสดุในการฝังกลบ (Landfill)
4. ใช้เป็นส่วนผสมในปูนซีเมนต์บางชนิด
5. ใช้เป็นส่วนในการปรับสภาพของดิน หรือวัตถุประสงค์แต่งเนื้อดิน

การพิจารณาในการใช้ปุ๋ยอินทรีย์ มีข้อพิจารณาดังนี้ คือ

1. สภาพของสังคม และทางเศรษฐกิจ
2. คุณภาพของผลผลิตของปุ๋ยที่ได้จากกระบวนการหมัก
3. การตอบสนอง และการดูดซับของพืช และดิน



### มูลไก่

- ปริมาณของแข็งทั้งหมด เท่ากับ 10%
- ปริมาณไนโตรเจน เท่ากับ 3.8% ของมูลไก่ ในรูปของน้ำหนักแห้ง

### แกลบ

- อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน เท่ากับ 80
- ความชื้น เท่ากับ 30%
- ความหนาแน่น เท่ากับ  $150 \text{ kg/m}^3$
- ปริมาณไนโตรเจนที่มีอยู่ในของเสียบ เท่ากับ 0.02% ในรูปของน้ำหนักแห้ง

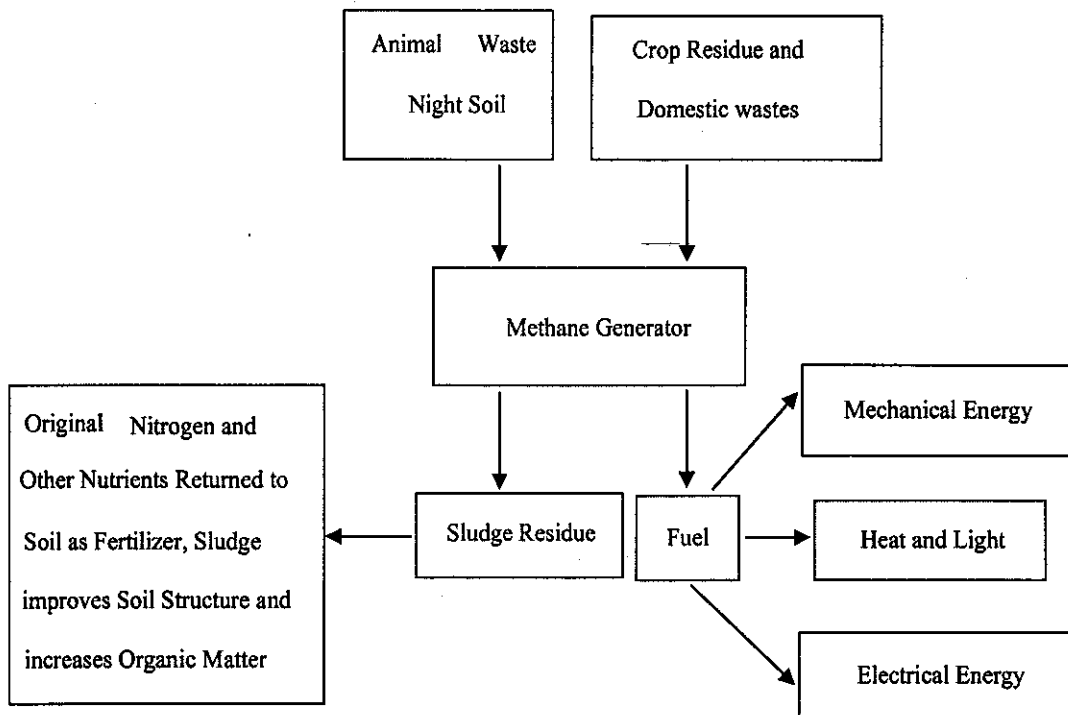
อยากทราบว่า ปริมาณและปริมาตรของแกลบที่นำมาผสมในกองหมัก เมื่อทำการหมักของเสียดังกล่าวเป็นเวลา 1 เดือน มีค่าเท่ากับกี่โลกรัม และคิดเป็นกี่ลูกบาศก์เมตร

# บทที่ 9

## การผลิตก๊าซชีวภาพ

### (Biogas Production)

ปัญหาวิกฤตพลังงานในปี ค.ศ. 1980 หลายประเทศโดยเฉพาะในประเทศกำลังพัฒนามีการนำเอาของเสีย ซึ่งส่วนใหญ่ประกอบไปด้วยสารอินทรีย์นำมาหมักภายในระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน สิ่งที่ได้คือ ก๊าซชีวภาพ หรือพลังงานทดแทนจากก๊าซมีเทนที่มีอยู่ในก๊าซชีวภาพ ซึ่งมาใช้ประโยชน์ได้หลายทาง เช่น การหุงต้ม การให้ความร้อน การให้แสงสว่าง การผลิตกระแสไฟฟ้า เป็นต้น ดังแสดงไว้ในรูปที่ 9.1



รูปที่ 9.1 การนำเอาก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ

ประโยชน์ของการผลิตก๊าซชีวภาพจากของเสีย ได้แก่

1. ได้พลังงานทดแทน (Sustainable Energy) อีกรูปแบบหนึ่งเกิดขึ้น ซึ่งวิธีดังกล่าวเป็นแนวทางหนึ่งในการจัดการของเสีย ในลักษณะของการนำของเสียดังกล่าวมาทำให้เกิดประโยชน์
2. ทำให้ของเสียที่ผ่านกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพอยู่ในสภาพที่เสถียร หรือมีผลต่อสิ่งแวดล้อมลดลง
3. เป็นกระบวนการนำเอาอาหารเสริมสร้างกลับมาใช้ใหม่ โดยเฉพาะธาตุไนโตรเจน และฟอสฟอรัส
4. ขยับยั้งกิจกรรมของจุลินทรีย์ โดยเฉพาะจุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุของโรคต่างๆ (Pathogen Inactivation) เพราะในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพอุณหภูมิภายในระบบมักมีค่าสูง

ของเสียที่นำมาผลิตได้ก๊าซชีวภาพ ควรประกอบไปด้วยสารอินทรีย์เป็นส่วนใหญ่ เช่น ของเสียจากบ้านเรือน (Night Soil หรืออาจเรียกว่า Sewage) ของเสียจากฟาร์มเลี้ยงสัตว์ จากการเกษตรกรรม เศษผักผลไม้ ของเสียอื่นๆ เป็นต้น สารอินทรีย์เป็นส่วนประกอบของของเสียที่จุลินทรีย์ย่อยสลายได้ง่าย รวดเร็วกว่าสารอนินทรีย์ ผลที่ได้จากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ดังกล่าวทำให้ได้ก๊าซชีวภาพ ซึ่งประกอบไปด้วยก๊าซหลายชนิด โดยทั่วไปแล้วประกอบไปด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทน ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ตามปกติแล้วก๊าซชีวภาพที่ได้จากกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ ประกอบไปด้วยก๊าซมีเทนประมาณ 55-60% ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ประมาณ 35-45% และก๊าซอื่นๆ ในปริมาณเล็กน้อย

ความร้อนของก๊าซมีเทนมีค่าโดยเฉลี่ย เท่ากับ  $9,000 \text{ kcal/m}^3$  และค่าความร้อนของก๊าซชีวภาพ มีค่าอยู่ในช่วง  $4,500-6,300 \text{ kcal/m}^3$  ความร้อนของก๊าซชีวภาพที่ได้มีค่ามากหรือน้อย ขึ้นกับร้อยละของก๊าซมีเทนที่มีอยู่ในก๊าซชีวภาพ กรณีที่นำของเสียซึ่งประกอบด้วยของแข็งค่อนข้างมากมาผลิตก๊าซชีวภาพ ควรเติมน้ำหรือเพิ่มความชื้นให้กับของเสียดังกล่าว เพื่อให้จุลินทรีย์ดำรงชีวิตอยู่ได้และย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีในของเสียได้ง่ายขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพของการผลิตก๊าซชีวภาพมีค่ามากขึ้นและช่วยปรับความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำเสียให้เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ

เทคโนโลยีกระบวนการหมักทำปุ๋ยและกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ แสดงไว้ในตารางที่ 9.1 จากตารางที่ 9.1 พบว่าประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพมากกว่ากระบวนการหมักทำปุ๋ยระยะเวลาการย่อยสลายของเสียในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพมีค่าน้อยกว่ากระบวนการผลิตหมักทำปุ๋ย นอกจากนี้แล้วกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพเป็นกระบวนการในระบบปิด (Closed System) ปัญหาเรื่องกลิ่นที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายของเสียจึงไม่มีซึ่งต่างไปจากกระบวนการหมักทำปุ๋ย โดยกระบวนการหมักส่วนใหญ่ระบบเปิด (Opened System) ซึ่งในกระบวนการผลิตปุ๋ยหมัก มักได้กลิ่นของแอมโมเนียหรือก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ อย่างไรก็ตามในกระบวนการหมักทำปุ๋ยไม่จำเป็นต้องมีการเติมน้ำลงไป

ตลอดเวลา เพราะของเสียที่นำมาใช้ในกระบวนการหมักทำปุ๋ยมักมีความชื้นมาก สำหรับของเสียที่นำมาใช้ในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพส่วนใหญ่เป็นของแข็งต้องมีการเติมน้ำลงไปของเสีย เพื่อรักษาความชื้นภายในของเสีย และยังช่วยปรับความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในระบบให้มีความเหมาะสม ทำให้กลไกของกระบวนการผลิตปุ๋ยเกิดได้ดี

ตารางที่ 9.1 เทคโนโลยีกระบวนการหมักทำปุ๋ย และกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ

Operation Conditions	Composting (Aerobic/Anaerobic)	Biogas Technology
Materials added to night or animal manure for C/N ratio and moisture adjustments	Vegetation	Water + Vegetation
Temperatures	50-70 C	Ambient
Period of operation	6-8 weeks (including maturation and curing)	4-8 weeks
Nitrogen Loss	Low to High	Low to Medium
Space required	Same	Same
Modes of operation	Range from traditional to complicated	Complicated
Odor	Problem for open system	Less problem due to closed system
End-product	composted Materials	Digested Slurry (and CH <sub>4</sub> gas)
Weight	Reduced the water loss	Increased in density due to biomass production
Water Content	40-50%	88-92%
Humus Content	Abundant	Less than composted product
Pathogen Destruction	Good	Moderate
Transport	Easier (solid matter)	More difficult (liquid matter)
Further Handling	Not necessary	Drying usually needed
Storage	Easy, little loss of nitrogen	Difficult, with possible loss of nitrogen

ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ แสดงไว้ในตารางที่ 9.2

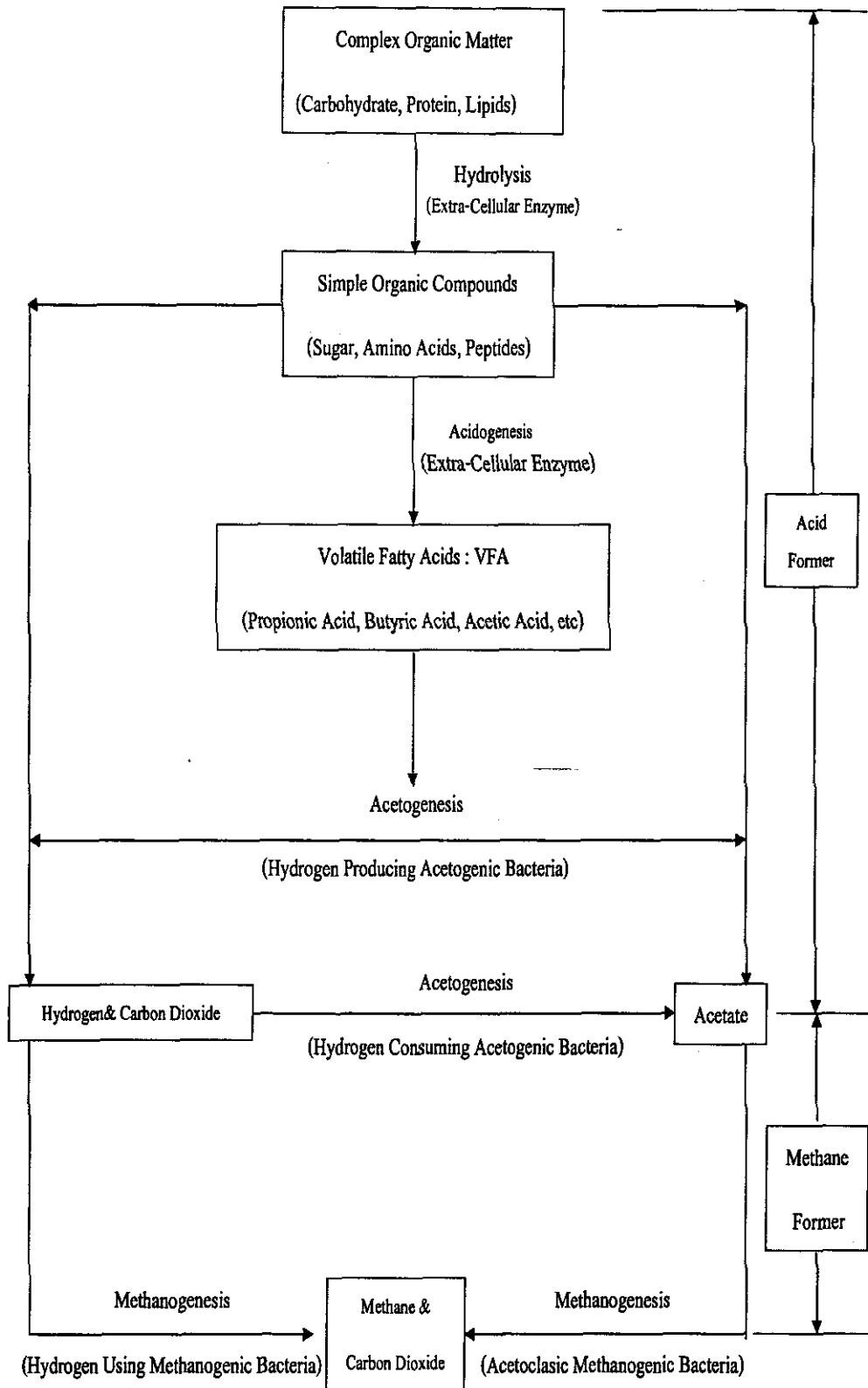
ตารางที่ 9.2 ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ

Advantages	Disadvantages
<p>Produces large amount of methane gas ;methane can be stored at ambient temperature</p> <p>Produces free-flowing, thick, sludge.</p> <p>Sludge are almost odorless, with the odor not being disagreeable</p> <p>Sludge has good fertilizer value and can be used as a soil conditioner</p> <p>Reduces organic content of the waste materials . by 30-50 percent and produces a stabilized sludge for ultimate disposal</p> <p>Weed seeds are destroyed and pathogens are either destroyed or greatly reduced in number</p> <p>Rodents and flies are not attracted to the end-product of the process; access of pests and vermin to wastes is limited</p> <p>Provides a sanitary way for disposal of human and animal wastes</p> <p>Helps conserve scarce local energy resources such as wood</p>	<p>Possibility of explosion.</p> <p>High capital cost (however, if operated and maintained properly, the system may pay for itself)</p> <p>May develop a volume of waste material much larger than the original material, as water is added to the substrate (this may not be a disadvantage in the rural areas of the developing countries where farm fields are closed to the village, thus permitting the liquid sludge to be applied directly to the land, serving both for irrigation and fertilization.</p> <p>Liquid sludge presents a potential water pollution problem if handled incorrectly</p> <p>Maintenance and control are required.</p> <p>Certain chemicals in the waste, if excessive, have the potential to interfere with digester performance (however, these chemicals are encountered only in the sludge from industrial wastewaters and therefore not likely to be a problem in the rural village system).</p> <p>Proper operating conditions must be maintained in the digester for maximum gas production</p> <p>Most efficient use of methane as a fuel required removal of impurities such as CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S, particularly when the gas is to be used in internal-combustion engines</p>

จากตารางที่ 9.2 พบว่าข้อดีของกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพเป็นการนำเอาของเสียกลับมาใช้ประโยชน์ ทำให้ได้เชื้อจุลินทรีย์ที่มีมูลค่ามาก ใช้เป็นปุ๋ยอินทรีย์หรือวัสดุปรุงแต่งในดิน นอกจากนี้ยังช่วยลดปัญหาในการตัดไม้ทำลายป่าและลดปัญหาในเรื่องแหล่งเพาะพันธุ์ของแมลงชนิดต่างๆ สำหรับข้อเสียของกระบวนการนี้ได้แก่ ขนาดตั้งปฏิบัติการใช้มีขนาดใหญ่ เพื่อให้มีปริมาณของจุลินทรีย์ภายในถังปฏิบัติมากเพียงพอต่อการย่อยสลายของเสีย อย่างไรก็ตามกระบวนการนี้จะรับภาระสารอินทรีย์ได้ค่อนข้างมากกว่ากระบวนการบำบัดของเสียแบบใช้อากาศ จุลินทรีย์รับรู้ต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมได้เร็ว (Sensitivity) เพราะฉะนั้นกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพควรควบคุมการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมที่มีผลต่อจุลินทรีย์ให้ดี

ปฏิบัติการการผลิตก๊าซชีวภาพ แบ่งได้ 2 ขั้นตอน คือ (1) ปฏิบัติการผลิตกรดอินทรีย์ (Acid Production) และ (2) ขั้นตอนการผลิตก๊าซชีวภาพจากกรดอินทรีย์ (Methane Production) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 9.2 โดยขั้นตอนดังกล่าวเกิดต่อเนื่องกัน หากสภาพแวดล้อมดังกล่าวมีความเหมาะสมต่อจุลินทรีย์แต่ละกลุ่มที่อยู่ในปฏิปฏิกิริยาดังกล่าว ซึ่งกลไกของการย่อยสลายสารอินทรีย์ในการผลิตก๊าซชีวภาพประกอบด้วยจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องจำนวน 2 กลุ่ม คือ จุลินทรีย์ที่ผลิตกรดอินทรีย์ (Acid Former) และจุลินทรีย์ที่ผลิตก๊าซมีเทน (Methane Former)

ในขั้นตอนของกระบวนการผลิตกรดอินทรีย์ สารอินทรีย์ที่มีอยู่ในของเสียถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ผลิตกรดอินทรีย์ (Acid Former) ซึ่งแบ่งได้ 3 ประเภท คือ (1) ปฏิปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) (2) ปฏิปฏิกิริยาการผลิตกรดอินทรีย์ (Acidogenesis) (3) ปฏิปฏิกิริยาการผลิตกรดอะซิติก (Acetogenesis) หลังจากนั้นกรดอินทรีย์ที่เกิดขึ้นจะเกิดการย่อยสลายกลายเป็นก๊าซชีวภาพโดยจุลินทรีย์ที่ผลิตก๊าซชีวภาพ เรียกปฏิปฏิกิริยาดังกล่าวว่าการผลิตก๊าซมีเทน (Methane Production) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 9.2



รูปที่ 9.2 ขั้นตอนของปฏิกิริยาการผลิตก๊าซชีวภาพ (Anaerobic Treatment Conversion)

**จุลินทรีย์ผลิตกรดอินทรีย์ (Acid Former)** เป็นจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในของเสีย ซึ่งอาจเป็นสารโมเลกุลใหญ่หรือสารประกอบเชิงซ้อน เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน เป็นต้น หรือสารโมเลกุลเล็ก เช่น น้ำตาล กรดอะมิโน เปปไทด์ เอมีน เป็นต้น ให้กลายเป็นกรดอินทรีย์โดยจุลินทรีย์กลุ่ม Faculative Bacteria ซึ่งดำรงชีวิตได้ทั้งในสภาพที่มีออกซิเจนและในสภาพที่ไม่มีออกซิเจน ค่าความเป็นกรดเป็นด่างที่เหมาะสมในการดำรงชีพของจุลินทรีย์ อยู่ในช่วง 4-6.5 และเพิ่มจำนวนเป็น 2 เท่าของจำนวนเดิมในเวลา 14-18 ชั่วโมง ตัวอย่างของจุลินทรีย์ในกลุ่มนี้ ได้แก่ Hydrolytic Bacteria, Fermentative Bacteria, Hydrogen Producing Acetogenic Bacteria และ Hydrogen Consuming Acetogenic Bacteria

● **Hydrolytic Bacteria** เป็นจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ ซึ่งไม่ละลายน้ำให้เป็นสารอินทรีย์ที่มีขนาดเล็กลงด้วยเอนไซม์ที่จุลินทรีย์ปล่อยออกมา (Extracellular Enzyme) ของเสียที่ผ่านการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์แล้วจะละลายในน้ำได้ดีขึ้น จากนั้นจุลินทรีย์ดูดซึมเอาสารอินทรีย์ดังกล่าวเข้าไปในเซลล์โดยผ่านผนังเซลล์ แล้วปล่อยสารอินทรีย์ที่เหลือจากการย่อยสลายซึ่งมากเกินความต้องการออกมานอกเซลล์ของจุลินทรีย์ผ่านทางผนังเซลล์

● **Fermentative Bacteria** เป็นจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลเล็กให้เป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Acids) ชนิดต่างๆ เช่น กรดโพรไพโอนิก (Propionic Acid : HPr) กรดบิวทิริก (Butyric Acid : HBr) กรดอะซิติก (Acetic Acid : HAC) เป็นต้น การย่อยสลายสารอินทรีย์ในขั้นตอนเกิดอย่างรวดเร็ว ซึ่งขึ้นอยู่กับโครงสร้างของสารอินทรีย์โมเลกุลเล็กกว่ามีจำนวนคาร์บอนอะตอมมากเพียงใด และสภาพแวดล้อมในขณะนั้นด้วย

● **Hydrogen Producing Acetogenic Bacteria** เป็นจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายกรดอินทรีย์โมเลกุลเล็กซึ่งมีจำนวนคาร์บอนอะตอมตั้งแต่ 2 อะตอมขึ้นไปให้กลายเป็นก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และกรดอะซิติก ตามลำดับ

● **Hydrogen Consuming Acetogenic Bacteria หรือ Homoacetiogenic Bacteria** เป็นจุลินทรีย์ที่ใช้ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งอาหารเพื่อผลิตกรดอะซิติก กระบวนการย่อยสลายของเสียในขั้นตอนมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ

ลักษณะของจุลินทรีย์ที่ผลิตกรดอินทรีย์แสดงไว้ในตารางที่ 9.3



ตารางที่ 9.3 ลักษณะของจุลินทรีย์ที่ผลิตกรดอินทรีย์

Bacterium	Substrate	Product
<p>1. Cellulose-splitting</p> <p><i>Acetivibrio cellulolyticus</i></p> <p><i>Bacteroides fibrisolvens</i></p> <p><i>B. succinogens</i></p> <p><i>Clostridium cellulovorans</i></p> <p><i>Cl. Dissolvens</i></p> <p><i>Cl. Omelianskii</i></p> <p><i>Cl. Papyrosolvens</i></p> <p><i>Cl. Populeti</i></p> <p><i>Cl. Thermocellum</i></p> <p><i>Neocallimastix frontalis</i></p> <p><i>Ruminococcus flavefaciens</i></p>	Cellulose	Similar compounds of low molecular weight, e.g. formate, acetate, succinate, lactate, H <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , ethanol.
<p>2. Semi-cellulose-splitting</p> <p><i>Bacteroides fibrisolvens</i></p> <p><i>B. ruminicola</i></p>	Semi-cellulose	Xylose, arabinose, galactose, mannose, formate, butyrate, lactate, H <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , propionate, acetate, succinate.
<p>3. Starch-splitting</p> <p><i>Bacterium butylicum</i></p> <p><i>Bacteroides</i> spp.</p> <p><i>Clostridium acetobutylicum</i></p> <p><i>Lactobacillus</i> spp.</p>	Starch	Acetobutanol, butyrate, acetate, H <sub>2</sub> , glucose, maltose, oligosaccharides.
<p>4. Protein-splitting</p> <p><i>Bacteroides amylophilus</i></p> <p><i>B. ruminicola</i></p> <p><i>Clostridium</i> spp.</p>	Protein	Amino acids, organic acids, NH <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> S.
<p>5. Fat-splitting</p> <p><i>Alcaligenes</i> spp.</p> <p><i>Bacillus</i> spp.</p> <p><i>Micrococcus</i> spp.</p> <p><i>Pseudomonas</i> spp.</p> <p><i>Streptomyces</i> spp.</p>	Fat and oil	Long-chain fatty acids.
<p>6. Acetogenic</p> <p>Species of the Enterbacteriaceae and Bacillaceae families.</p>	e.g. alcohol, butyric acid, aromatic acids, long-chain fatty acids.	Acetate, H <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> .

จุลินทรีย์ที่ผลิตก๊าซชีวภาพ (Methane Former) เป็นจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายกรดอินทรีย์ที่ได้จากขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ผลิตกรดอินทรีย์ เพื่อเปลี่ยนเป็นก๊าซชีวภาพ จุลินทรีย์ในกลุ่มนี้จัดอยู่ในกลุ่ม Oligative Anaerobic Bacteria ซึ่งดำรงชีพได้เฉพาะในสภาพที่ไม่มีอากาศหรือออกซิเจน ความเข้มข้นเป็นกรดเป็นค่าที่เหมาะสมต่อการดำรงชีพของจุลินทรีย์กลุ่มนี้ อยู่ในช่วง 6.6 ถึง 8.6 การเพิ่มจำนวนเซลล์เป็น 2 เท่า ใช้เวลา 2 ถึง 4 วัน นอกจากนี้แล้วสารแอมโมเนียและซัลไฟด์ที่เกิดขึ้น จุลินทรีย์ในกลุ่มนี้สามารถนำมาเป็นแหล่งไนโตรเจนและซัลเฟอร์ เพื่อผลิตโปรตีน จุลินทรีย์ในกลุ่มนี้ได้แก่ Hydrogen Using Methanogenic Bacteria หรือ Reductive Methane Formation Methanogens และ Acetoclastic Methanogenic Bacteria หรือ Acetate Cleavage Methanogens สารอาหารที่ใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพโดยจุลินทรีย์กลุ่มนี้แสดงไว้ในตารางที่ 9.4

- Hydrogen Using Methanogenic Bacteria หรือ Reductive Methane Formation Methanogens เป็นจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้ได้ก๊าซชีวภาพ
- Acetoclastic Methanogenic Bacteria หรือ Acetate Cleavage Methanogens เป็นจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายกรดอะซิติกไปเป็นก๊าซชีวภาพ

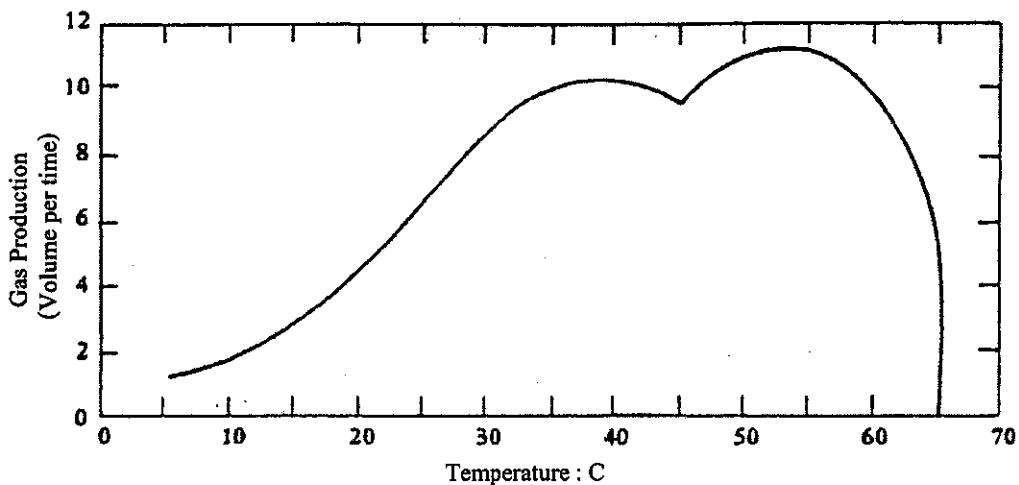
ตารางที่ 9.4 ลักษณะของจุลินทรีย์ที่ผลิตก๊าซมีเทน

Barterium	Substrate
Methanobacterium alcaliphilum WeN4	H <sub>2</sub> -CO <sub>2</sub>
Methnaobacterium bryantii M.O.H.	H <sub>2</sub> -CO <sub>2</sub>
Methanobacterium formicum DSM 863	H <sub>2</sub> -CO <sub>2</sub> , formate
Methanobacterium thermoautotrophicum 1/4H	H <sub>2</sub> -CO <sub>2</sub>
Methanobrevibacter ruminantium M1	H <sub>2</sub> -CO <sub>2</sub> , formate
Methanaobacterium smithii PS	H <sub>2</sub> -CO <sub>2</sub> , formate
Methanococoides methylutens TMA-10	Methanol, trimethylamine
Methanolobus tindarius Tindari 3	Methanol, trimethylamine
Methanomicrobium mibile BP	H <sub>2</sub> -CO <sub>2</sub> , formate
Methanomicrobium paynteri G-2000	H <sub>2</sub> -CO <sub>2</sub>
Methanoplanus limicola DSM 2279	H <sub>2</sub> -CO <sub>2</sub> , formate
Methanosarcina acetivorans C2A	H <sub>2</sub> -CO <sub>2</sub> , methanol, trimethylamine , acetate
Methanospirillum hungatei JF1	H <sub>2</sub> -CO <sub>2</sub> , formate

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ ได้แก่

1. ชนิดของเสีย และ โครงสร้างของของเสียที่นำมาผลิตก๊าซชีวภาพ
2. อุณหภูมิที่ทำการผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งแบ่งออกได้ 3 ประเภท คือ
  - อุณหภูมิต่ำ (Psychrophilic Temperature) มีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 20 C
  - อุณหภูมิปานกลาง (Mesophilic Temperature) มีค่าอยู่ในช่วง 25 ถึง 40 C
  - อุณหภูมิสูง (Thermophilic Temperature) มีค่าอยู่ในช่วง 50 ถึง 65 C

การเปลี่ยนแปลงปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ ที่อุณหภูมิต่างๆ ภายในถังหมัก แสดงไว้ในรูปที่ 9.3



รูปที่ 9.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ ที่อุณหภูมิต่างๆ ภายในถังหมัก

3. ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพเกิดได้คือที่ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง ในช่วง 6.6 ถึง 7.6 ซึ่งค่าความเป็นกรดเป็นด่างที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 7 ถึง 7.2
4. ค่าความเป็นด่าง (Alkalinity) หมายถึง ค่าที่ใช้ในการรักษาสภาพการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดเป็นด่างของของเสีย มีค่าอยู่ในช่วง 2,500 ถึง 5,000 mg/L
5. ค่าภาระสารอินทรีย์ (Organic Loading Rate : OLR) ค่าภาระสารอินทรีย์มีผลต่อปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้ กล่าวคือ ถ้างหมักมีปริมาณสารอาหารมากหรือค่าภาระสารอินทรีย์มีค่ามาก ปริมาณจุลินทรีย์ในถังหมักมีปริมาณมากเพียงพอต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ดังกล่าวด้วย ย่อมทำให้ได้ก๊าซชีวภาพมากขึ้นด้วย ค่าภาระสารอินทรีย์ในระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศของจุลินทรีย์ที่แขวนลอยอยู่ในน้ำเสีย (Suspended Microbes) อยู่ในช่วง 1 ถึง 4 kgTVS/m<sup>3</sup>-day หรือ 1 ถึง 6 kgCOD / m<sup>3</sup>-day และค่าภาระสารอินทรีย์ในระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศของจุลินทรีย์ที่อยู่กับตัวกลาง (Attached Microbes) อยู่ในช่วง 1 ถึง 15 kg TVS/m<sup>3</sup>-day หรือในรูปของค่าซีโอดี มีค่าอยู่ในช่วง 5 ถึง 30 kgCOD / m<sup>3</sup>-day

6. ระยะเวลาที่กักเก็บน้ำเสีย (Hydraulic Retention Time : HRTs) มีผลต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ เนื่องจากจุลินทรีย์ต้องใช้เวลาในการย่อยสลายสารอินทรีย์พอสมควร หากระยะเวลาในการย่อยสลายสารอินทรีย์น้อยเกินไป อาจทำให้ได้ก๊าซชีวภาพออกมาน้อยหรือไม่ได้เลย นอกจากนี้ทำให้จุลินทรีย์ถูกชะล้างออกจากตัวกลางที่เกาะอยู่บนออกไปพร้อมกับน้ำที่ออกจากถังหมัก ปริมาณสารอินทรีย์ถูกย่อยสลายน้อยลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพมีค่าต่ำลง และถ้าระยะเวลาในการกักเก็บน้ำเสียนั้นมีค่ามากเกินไป ปริมาณจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในระบบอาจมีมากเกินไปจนความต้องการทำให้ปริมาตรของน้ำเสียที่นำบำบัดมีค่าลดลงไป เพราะถูกแทนที่ด้วยจุลินทรีย์ที่มากเกินไปจนความต้องการโดยทั่วไปแล้วระยะเวลาในการกักเก็บน้ำเสียของการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยจุลินทรีย์แขวนลอย (Suspended Microbes) อยู่ในช่วง 10 ถึง 60 วัน และระยะเวลาในการกักเก็บอยู่ในช่วง 1 ถึง 10 วัน สำหรับถังกรองไร้อากาศ และอยู่ในช่วง 0.5 ถึง 6 วัน สำหรับถังหมักแบบยูเอสบี (Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor : UASB)
7. อัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน (Carbon to Nitrogen ratio) มีผลต่อการนำเอาสารอินทรีย์ไปใช้ในการสร้างเซลล์จุลินทรีย์
8. รูปแบบของการเดินระบบ และการป้อนสารอินทรีย์ (Operation and Feeding) มีผลต่อการใช้สารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ ทำให้ปริมาณกรดอินทรีย์หรือก๊าซชีวภาพที่ได้มีค่าไม่แน่นอน ส่งผลต่อปริมาณจุลินทรีย์ภายในถังหมัก
9. โครงสร้างของถังปฏิกรณ์ (Construction) มีผลต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ และระยะเวลาในการกักเก็บน้ำเสียด้วย จากการออกแบบให้จุลินทรีย์สัมผัสกับสารอินทรีย์ได้มากน้อยเพียงใด
10. ความเข้มข้นของสารต่างๆ มีผลต่อจุลินทรีย์ดังแสดงไว้ในตารางที่ 9.5

**ตารางที่ 9.5 สารพิษต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อจุลินทรีย์ที่ผลิตก๊าซชีวภาพ**

Parameters	Inhibiting Concentration (mg/L)
Volatile acids	> 2,000 (as acetic acids) <sup>a</sup>
Ammonia nitrogen	1,500-3,000 (at pH > 7.6)
Sulfide (soluble) <sup>b</sup>	> 200
	>3,000 toxic
Calcium	2,500-4,500
	8,000 strongly inhibitory
Magnesium	1,000-1,500
	3,000 strongly inhibitory
Potassium	2,500-4,500
	12,000 strongly inhibitory
Sodium	3,500-4,500
	12,000 strongly inhibitory
Copper	0.5 (soluble metal)
Cadmium	150 <sup>c</sup>
Iron	1,710 <sup>c</sup>
Chromium+6	3
Chromium+3	500
Nickel <sup>d</sup>	2

<sup>a</sup> Within the pH range 6.6-7.4, and with adequate buffering capacity, volatile acids concentration of 6,000-8,000 mg/L may be tolerated.

<sup>b</sup> Off-gas concentration of 6 percent is toxic.

<sup>c</sup> Millimol of metal per kg of dry solids.

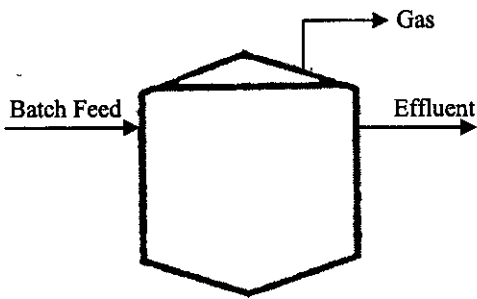
<sup>d</sup> Nickel promotes methane formation at low concentrations. It is required by methanogens.

**องค์ประกอบของกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ (Components of biogas production) ได้แก่**

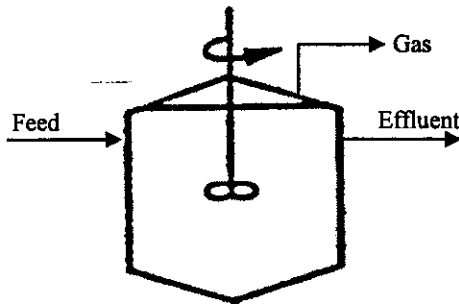
1. ถังปฏิกรณ์ (Digester)
2. ท่อนำเอาก๊าซออกจากถังปฏิกรณ์ (Gas Pipe)
3. ถังเก็บก๊าซชีวภาพ (Gas Holder)
4. รูปแบบของระบบการกวน (Type of Mixing)
5. อุปกรณ์ในการแยกเฟสของเหลว ของแข็ง และก๊าซ (Liquid Solid Gas Separator)

ชนิดของถังปฏิกริยา ที่ใช้ในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ ได้แก่

1. ถังแบบดั้งเดิม (Conventional Digester) ได้แก่ ถังหมักแบบเทหรือแบบกะ (Plug Digester หรือ Batch Digester) ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 9.4 (ก)
2. ถังกวนผสมบวม (Continuous Stirred Tank Reactors : CSTRs) แสดงไว้ในรูปที่ 9.4 (ข)
3. ถังหมักไร้อากาศแบบสัมผัส (Anaerobic Contact Digester) แสดงไว้ในรูปที่ 9.4 (ค)
4. ถังกรองไร้อากาศ (Anaerobic Filter Digester หรือ Anaerobic Packed Bed) แสดงไว้ในรูปที่ 9.4 (ง) และรูปที่ 9.4 (จ)
5. ถังยูเอเอสบี (Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor : UASB) แสดงไว้ในรูปที่ 9.4 (ฉ) และรูปที่ 9.4 (ช)
6. ถังเมมเบรน (Membrane Solids Separation) แสดงไว้ในรูปที่ 9.4 (ซ)
7. ถังหมักแบบแผ่นกั้น (Baffled Digester) แสดงไว้ในรูปที่ 9.4 (ฅ)
8. ถังหมักแบบ 2 ชั้นตอน (Two Stage Anaerobic Digester) แสดงไว้ในรูปที่ 9.4 (ฉ)
9. ถังหมักแบบฟลูอิด ไคซ์เบด (Fluidized Bed Digester) แสดงไว้ในรูปที่ 9.4 (ฏ)

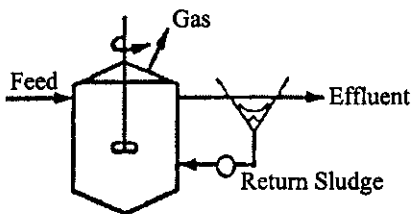


ก. ถังหมักแบบดั้งเดิม

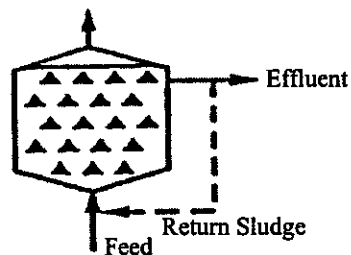


ข. ถังหมักแบบกวนผสม

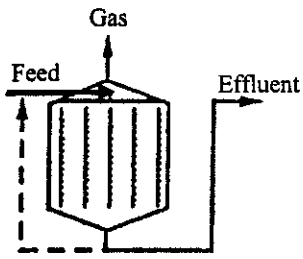
Gas



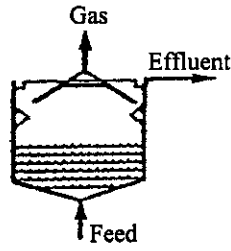
ค. ถังหมักไร้อากาศแบบสัมผัส



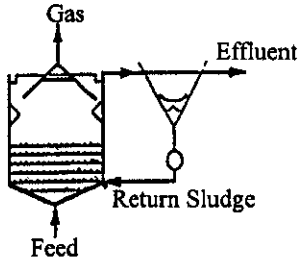
ง. ถังกรองไร้อากาศ (แบบไหลย้อนขึ้น)



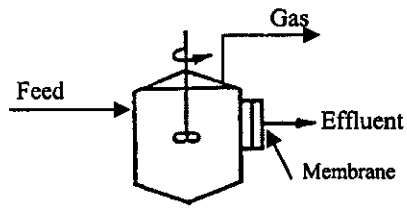
จ. ถังกรองไร้อากาศ (แบบไหลลง)



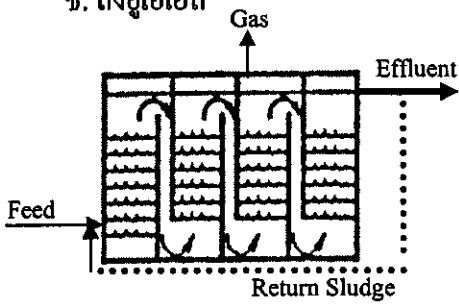
ฉ. ถังยูเอเอสบี



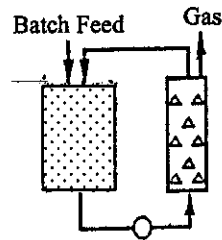
ช. ถังยูเอเอส



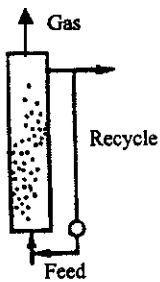
ซ. เมมเบรน



ฉ. ถังหมักแบบแผ่นกั้น



ญ. ถังหมักแบบ 2 ชั้นตอน



ฎ. ถังหมักแบบฟลูอิดไดซ์เบด

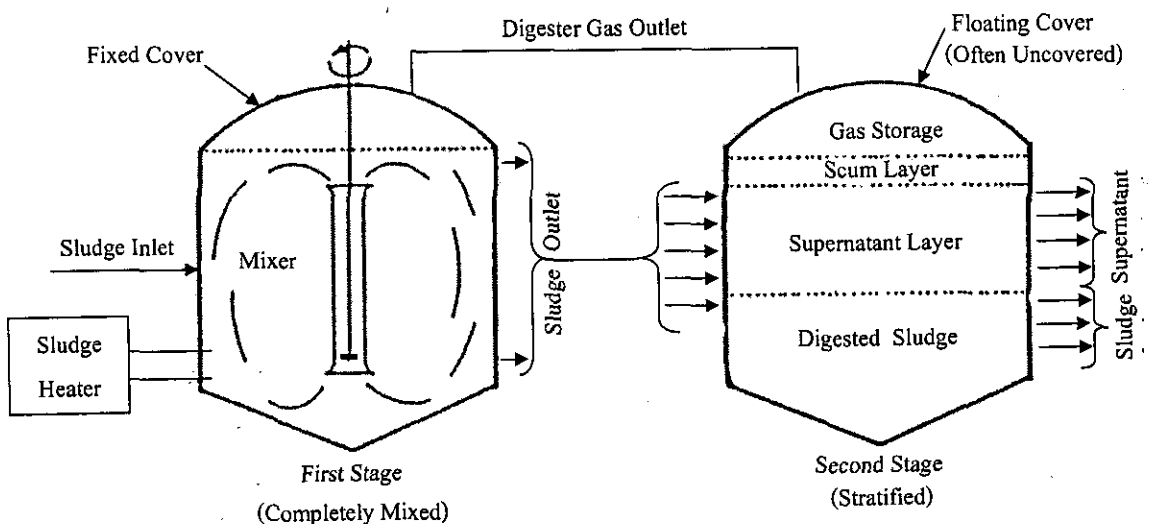
รูปที่ 9.4 แสดงถังหมักแบบต่างๆ

กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ แบ่งได้ 2 ประเภทตามลักษณะการไหลของน้ำเสียที่ไหลเข้าถังหมัก คือ

1. แบบไหลย้อนขึ้น (Up-flow Anaerobic Digester) น้ำเสียที่ไหลเข้าถังหมักไหลจากข้างล่างของถัง และน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วไหลออกทางด้านข้างของถัง ซึ่งอยู่สูงกว่าระดับที่ป้อนน้ำเสียหรือน้ำเสียไหลออกทางด้านบนของถังหมัก ตัวอย่างของถังหมักแบบนี้แสดงไว้ในรูปที่ 9.4 (ง)
2. แบบไหลลง (Down Flow Anaerobic Digester) น้ำเสียที่ไหลเข้าถังหมักโดยไหลจากข้างบนของถัง และน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วไหลออกทางด้านข้างของถัง ซึ่งอยู่ต่ำกว่าระดับที่ป้อนน้ำเสียหรือน้ำเสียไหลออกทางด้านล่างของถังหมัก ตัวอย่างของถังหมักแบบนี้ได้แก่ รูปที่ 9.4 (จ)

ส่วนประกอบภายในถังหมัก แบ่งออกได้ 4 ส่วน ดังแสดงไว้ในรูปที่ 9.5 (ก) และรูปที่ 9.5 (ข) คือ

1. ส่วนของจุลินทรีย์ที่มีความหนาแน่นมาก (Digested Sludge หรือ Sludge Blanket) เป็นบริเวณที่เก็บรวบรวมตะกอนจุลินทรีย์ ซึ่งมีความหนาแน่นมากหรือของแข็งที่มีน้ำหนักมากเกิดการตกตะกอนหรือเกิดการจมตัวลงสู่ก้นถังหมัก
2. ส่วนของจุลินทรีย์ที่มีความอ่อนไหวในการย่อยสลายสารอินทรีย์ (Active digesting sludge) เป็นบริเวณที่เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ดี โดยจุลินทรีย์ ทำให้ได้ก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นมากกว่าบริเวณอื่นๆ
3. ส่วนของน้ำใส (Supernatant Layer) เป็นส่วนที่น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วไหลขึ้นออกจากถังหมัก
4. ส่วนของตะกอนลอย (Scum Layer) เป็นส่วนของตะกอนเบา อาจเป็นส่วนของจุลินทรีย์ที่ตายไป ซึ่งลอยขึ้นสู่ผิวน้ำเนื่องจากก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นไปหุ้มตะกอนลอยดังกล่าว



ก. ถังหมักแบบดั้งเดิม

ข. ถังหมักแบบ 2 ชั้นตอน

รูปที่ 9.5 ส่วนประกอบภายในถังหมัก

ก. ถังหมักแบบดั้งเดิม

ข. ถังหมักแบบ 2 ชั้นตอน



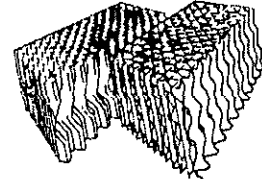
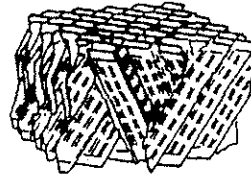
ตัวกลางที่นำมาใช้ในถังหมักช่วยรักษาปริมาณของจุลินทรีย์ภายในถังหมักให้มีค่ามากขึ้น ทำให้การผลิตก๊าซดังกล่าวมากขึ้น เพราะทำให้ระบบรับภาระสารอินทรีย์ได้มากขึ้น ลักษณะของตัวกลางแบบต่างๆ ที่นิยมใช้ในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ แสดงไว้ในรูปที่ 9.6 คุณลักษณะของตัวกลางที่ใช้ในถังหมักแบบตรึงฟิล์ม หรือแบบแพคเบจ แสดงไว้ในตารางที่ 9.6



ก. Pall ring



ข. Cross Flow media



ค. Tubular media

รูปที่ 9.6 ตัวกลางแบบต่างๆ ที่นิยมใช้

ก. Pall Ring

ข. Cross Flow Media

ค. Tubular Media

ตารางที่ 9.6 คุณลักษณะของตัวกลางที่ใช้ในถังหมักแบบตรึงฟิล์มหรือแบบแพคเบจ

Materials	Characteristics	Specific Surface Area ( $m^2/m^3$ )	Empty Bed Porosity
Quartz Stone	20-40 mm diam.		0.42
Granite Stone	25-38 mm diam.		0.53
Lime Stone	20-40 mm diam.		0.49
Gravel	6-68 mm diam.		0.4
Oyster Shells	60-100 mm diam.		0.82
Active Carbon	1.5 mm diam.		0.6
Red Clay Blocs	28.28 mm pore size	157	0.7
Corrugated Blocs		98-132	0.95
Granite Chips	12-25 mm		0.4
Pall Rings	90.90 mm	102	0.95
Norton Plastic Rings	90 mm	114	0.95
Raschig Rings	10.16 mm	45 - 49	0.76-0.78
Polypropylene Spheres	90 mm diam.	89	> 0.95

การพิจารณาเลือกตัวกลาง เพื่อนำมาใช้ในกระบวนการหมักแบบประสิทธิภาพสูง เป็นดังนี้

1. พื้นที่ผิวของตัวกลางที่ใช้มีค่ามาก และมีความหนาอยู่บ้าง เพื่อให้จุลินทรีย์เกาะบนตัวกลางได้ดี
2. ค่าความพรุนของตัวกลางเป็นช่องว่างที่ใช้กักเก็บจุลินทรีย์ ช่วยให้การไหลของน้ำเสียเกิดขึ้นได้มากขึ้นเมื่อค่าความพรุนของตัวกลางมีค่ามากขึ้น โดยทั่วไปแล้วขนาดของช่องว่างของตัวกลาง อยู่ในช่วง 1 ถึง 5 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางของจุลินทรีย์
3. รูปร่างและการจัดเรียงตัวกลางภายในถังหมัก ตัวกลางขนาดเล็กและจัดเรียงอย่างไม่สม่ำเสมอ ทำให้การผลิตก๊าซชีวภาพมีค่ามากขึ้น เพราะจุลินทรีย์ย่อยสลายของเสียได้มากกว่าแบบจัดเรียงอย่างเป็นระเบียบ จึงเกิดการอุดตันได้ง่ายกว่าแบบจัดวางเรียงไม่เป็นระเบียบ
4. อัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของน้ำเสียภายในถังหมัก ตัวกลางที่มีค่าดังกล่าวสูง ประสิทธิภาพการผลิต ก๊าซชีวภาพมีค่ามาก ช่วยลดระยะเวลาในการกักเก็บลง เพราะปริมาณจุลินทรีย์เกาะบนตัวกลางดังกล่าวได้มากขึ้น ทำให้การย่อยสลายของเสียโดยจุลินทรีย์มีค่าสูงขึ้น
5. ราคาและการหาอะไหล่สำรอง
6. น้ำหนักของตัวกลางที่ใช้

ข้อดีและข้อเสียของถังหมัก ที่มีการใช้ตัวกลางในระบบ แสดงไว้ในตารางที่ 9.7 สำหรับข้อดีและข้อเสียของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ แบบยูเอเอสบี แสดงไว้ในตารางที่ 9.8 ตามลำดับ

ตารางที่ 9.7 ข้อดีและข้อเสียของถังหมักแบบมีการใช้ตัวกลาง

Advantages	Disadvantages
High organic removal capacity.	Difficult to start up.
Short HRT.	Risk for clogging.
Good adaptation to different wastewater.	Restricted to wastewater with low TSS.
Application to dilute and high strength wastewater.	High TSS and NH <sub>4</sub> -N contents in the effluent.
No mechanical mixing required.	May require periodic biomass removal.
Insensitive against load fluctuations.	Limited access to reactor interior for monitoring and inspection of biomass accumulation.
Fast re-start after shut-down.	
Low area demand.	High costs for packing media and support systems.

ตารางที่ 9.8 ข้อดีและข้อเสียของระบบการผลิตก๊าซชีวภาพ ด้วยถังหมักแบบยูเอเอสบี

Advanges	Disadvantages
High organic removal capacity.	Granulation process difficult to control.
Short HRT.	Granulation depends on wastewater properties.
Low Energy Demand.	Start-up eventually needs granule sludge.
No need energy of packing media.	Sensitive to organic and hydraulic shock loads.
Long experience in practice	Restricted to nearly solid free wastewater.
	$\text{Ca}^{2+}$ and $\text{NH}_4^+$ inhibit granule formation.
	Re-start can result in granular flotation.

ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของถังหมักแบบไร้อากาศ มีมากมายหลายประการดังที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น ของเสียแต่ละประเภท ที่ค่าการสะสมอินทรีย์ต่างกัน เมื่อทำการบำบัดด้วยระยะเวลาในการกักเก็บต่างๆ ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้มีค่าต่างกัน ดังตารางที่ 9.9

ตารางที่ 9.9 ปริมาณของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นที่ระยะเวลาในการกักเก็บ และค่าการสะสมอินทรีย์ต่างๆ

Hydraulic retention time (days)	Organic loading rate ( $\text{kg TVS m}^{-3} \text{ day}^{-1}$ )	Number of digesters	Total biogas production rate [ $\text{m}^3 (\text{kg TVS})^{-1} \text{ day}^{-1}$ ]	Volumetric biogas production rate [ $\text{m}^3 \text{ m}^{-3} \text{ day}^{-1}$ ]	Methane production rate [ $\text{m}^3 (\text{kg TVS})^{-1} \text{ day}^{-1}$ ]	Volumetric methane production rate [ $\text{m}^3 \text{ m}^{-3} \text{ day}^{-1}$ ]
30	1.20	4	0.28	0.33	0.18	0.22
50	0.75	4	0.32	0.24	0.21	0.16
70	0.53	3	0.25	0.13	0.16	0.09

ส่วนหลักเกณฑ์ที่ใช้ในการออกแบบระบบการผลิตก๊าซชีวภาพ ด้วยระบบให้จุลินทรีย์ลอยอยู่ในน้ำเสีย แสดงไว้ในตารางที่ 9.10

ตารางที่ 9.10 หลักเกณฑ์ในการออกแบบระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ด้วยจุลินทรีย์แขวนลอยอยู่ในน้ำเสีย

หลักเกณฑ์	ช่วงที่เหมาะสม
Temperature inside digester (C)	25-40 (Optimum 35, mesophilic)
pH	6.6-7.6 (Optimum 7.0-7.2)
Alkalinity (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	2,500-5,000
C/N ratio	25-30
Loading rate (kg VS/m <sup>3</sup> -day)	1-4
(kg COD/m <sup>3</sup> -day)	1-6
Feed solid content (%)	5-10
HRT (days)	10-60 (no sludge return)
Gas production rate (m <sup>3</sup> /day per m <sup>3</sup> of digester capacity)	
Fixed-dome digester	0.15-0.40 (part of digester for gas storage
Floating gas holder digester	0.30-0.60)
Volumetric for gas storage (% of 1-day gas production)	50-100
Seeding materials as start-up	> 50% of influent feed
Air tightness	Essential
Water tightness	Strongly required
COD removal (%)	30-70
VS removal (%)	40-70
N reduction (%)	20-35

ก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้มีค่าความร้อนแตกต่างกัน เช่น ก๊าซชีวภาพที่ประกอบด้วยก๊าซมีเทนอยู่ 60% โดยปริมาตร ให้ความร้อนออกมา 5,000 kcal/m<sup>3</sup> เทียบเท่ากับความร้อนที่ได้จากน้ำมันดีเซล 0.6 ลิตร และ ปริมาณก๊าซ 0.75 m<sup>3</sup> ให้พลังงานไฟฟ้าออกมาเท่ากับ 1 kw - h

ถังหมักแบบที่มีประสิทธิภาพสูง (High Rate Anaerobic Digester) ปริมาณจุลินทรีย์ภายในถังหมักแบบนี้มีค่ามากขึ้น ทำให้ระยะเวลาที่เก็บน้ำเสียลดลง ช่วยให้ประสิทธิภาพของถังหมักมากขึ้น ตัวอย่างของถังหมักที่มีประสิทธิภาพสูง ได้แก่ ถังหมักแบบสัมผัส ถังหมักแบบยูเอเอสบี ถังหมักแบบดริงฟิล์ม ถังหมักแบบกรองไร้อากาศ เป็นต้น ระยะเวลาที่เก็บน้ำเสียของระบบบำบัดแบบนี้ อาจมีค่าต่ำกว่าระบบถังหมักแบบเดิม เช่น ในถังหมักแบบยูเอเอสบี ซึ่งใช้เวลาที่เก็บน้ำเสีย เพียง 3 วัน

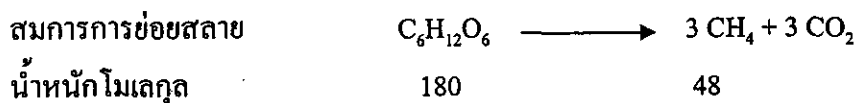
ถังหมักแบบตัวกลาง (Anaerobic Filter Digester หรือ Anaerobic Packed Bed) ตัวกลางที่ใช้มีขนาดอยู่ในช่วง 0.2 ถึง 6 cm โดยทั่วไปกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพแบบนี้ไม่นิยมมีการหมุนเวียนน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่ เพราะมักเกิดการอุดตันของของแข็งในช่องว่างของตัวกลางที่ใช้

**การออกแบบถังหมัก (Digester Designed)**

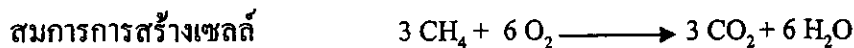
เมื่อปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์เกิดขึ้น ทำให้เกิดก๊าซชีวภาพ ซึ่งประกอบไปด้วยก๊าซมีเทน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แอมโมเนีย ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซอื่นๆ ที่มีปริมาณเล็กน้อย (Trace Quantities) และเซลล์ใหม่ของจุลินทรีย์ (New Cell) ปริมาณสารอินทรีย์ที่เกิดการย่อยสลายไปโดยจุลินทรีย์ เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ เป็นดังสมการที่ 9.1

$$\begin{aligned}
 \text{ปริมาณสารอินทรีย์ที่ใช้ผลิตก๊าซชีวภาพ} &= \frac{\text{ปริมาณสารอินทรีย์}}{\text{ปริมาณสารอินทรีย์}} \cdot \frac{\text{ปริมาณสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำทิ้ง}}{\text{ปริมาณสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำทิ้ง}} \\
 &= \text{BOD}_L \text{ stabilized} - \text{BOD}_L \text{ for cell production}
 \end{aligned}
 \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} \text{ปริมาณสารอินทรีย์ที่ใช้ผลิตก๊าซชีวภาพ} \\ = \frac{\text{ปริมาณสารอินทรีย์}}{\text{ปริมาณสารอินทรีย์}} \cdot \frac{\text{ปริมาณสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำทิ้ง}}{\text{ปริมาณสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำทิ้ง}} \right\} \dots 9.1$$

ตัวอย่างของสารอินทรีย์ คือ กลูโคส(น้ำตาล) สมการที่ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ชนิดนี้ประกอบไปด้วยสมการการย่อยสลายสารอินทรีย์ และสมการที่เกี่ยวกับการสร้างเซลล์ ดังสมการข้างล่าง



(Molecular weight : MW)



จากสมการย่อยสลายของเสีย พบว่า กลูโคส 180 กิโลกรัม ผลิตก๊าซมีเทนได้ 48 กิโลกรัม เทียบเท่ากับ 192 กิโลกรัม BOD<sub>L</sub> เพื่อใช้ในการสร้างเซลล์จุลินทรีย์ในสมการการสร้างเซลล์จุลินทรีย์ เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงในในรูปของมวล ทำได้โดยนำน้ำหนักหรือน้ำหนักโมเลกุลของสารที่พิจารณาคู่กับ

จำนวนโมลของสารดังกล่าวที่พิจารณา ดังนั้นของเสียที่เกิดการเปลี่ยนแปลงไป จำนวน 1 กิโลกรัม ทำให้ได้ก๊าซชีวภาพเกิดขึ้น 0.35 m<sup>3</sup> ดังสมการ 1\* ซึ่งแสดงที่มาของค่าอัตราส่วนดังกล่าว และของเสียทุกชนิดที่เกิดการย่อยสลายด้วยระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ ซึ่งมีค่าดังกล่าวเท่ากัน ที่สภาวะมาตรฐานเท่านั้น (Standard Temperature and Pressure)

$$\begin{aligned}
 \text{ในดังนั้น BOD}_L \text{ 1 kg ผลิตก๊าซมีเทน} &= \frac{48 \text{ kg CH}_4}{180 \text{ kg glucose}} * \frac{180 \text{ kg glucose}}{192 \text{ kg O}_2} * \frac{1 \text{ kg O}_2}{1 \text{ kg BOD}_L} \\
 &= 0.25 \text{ kg CH}_4 \\
 &= 0.25 \text{ kg CH}_4 * \frac{10^3 \text{ kgmol}}{16 \text{ kg CH}_4} * \frac{22.4 \text{ L}}{1 \text{ kgmol}} * \frac{1 \text{ m}^3}{10^3 \text{ L}} \\
 &= 0.35 \text{ m}^3 \text{ ที่สภาวะมาตรฐาน (STP)} \\
 &\text{(Standard Temperature and Pressure : STP) } \dots 1^*
 \end{aligned}$$

ค่าที่ได้จากสมการที่ 1\* เป็นค่าปริมาตรของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น เมื่อย่อยสลายของเสียไปจำนวน 1 กิโลกรัม ที่สภาวะมาตรฐาน เมื่อปริมาณของสารอินทรีย์เปลี่ยนแปลงไป ปริมาตรก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพหาได้จากความสัมพันธ์ เท่ากับ “ผลคูณของอัตราส่วนของก๊าซมีเทนที่ได้จากการย่อยสลายสารอินทรีย์ (ในทางทฤษฎี) กับปริมาณสารอินทรีย์ ที่ใช้ไปในการผลิตก๊าซชีวภาพซึ่งวัดในรูปบีโอดี” เขียนได้ดังสมการที่ 9.2

$$\begin{aligned}
 \text{ปริมาตรทั้งหมด} & \\
 \text{ของก๊าซชีวภาพที่} & \\
 \text{ผลิตได้} &= \frac{0.35 \text{ m}^3 \text{ CH}_4}{1 \text{ kg BOD}_L} * \left[ \begin{array}{l} \text{ปริมาณ} \quad \text{ปริมาณ} \\ \text{สารอินทรีย์} - \text{สารอินทรีย์ที่} \\ \text{ที่ย่อยสลาย} \quad \text{มีอยู่ในน้ำทิ้ง} \end{array} \right] \\
 &= \frac{0.35 \text{ m}^3 \text{ CH}_4}{1 \text{ kg BOD}_L} * \left[ \begin{array}{l} \text{BOD}_L \quad \text{BOD}_L \text{ for cell} \\ \text{Stabilized} \quad \text{Production} \end{array} \right] \dots 9.2
 \end{aligned}$$

ปริมาณสารอินทรีย์ที่ถูกย่อยสลายไป ในรูปของบีโอดี (BOD<sub>L</sub> Stabilized) หาได้จากสมการที่ 9.3

$$\begin{aligned}
 \text{BOD}_L &= \text{Eff} * Q * C_{AO} * 10^3 \dots 9.3 \\
 \text{เมื่อ} \quad \text{Eff} &\text{ คือ } \text{ประสิทธิภาพการกำจัดของเสีย หน่วยเปอร์เซ็นต์} \\
 \quad \quad Q &\text{ คือ } \text{อัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำเสีย หน่วย m}^3/\text{day} \\
 \quad \quad C_{AO} &\text{ คือ } \text{ความเข้มข้นเริ่มต้นของมลสารในน้ำเสีย หน่วย g/m}^3 \text{ หรือ mg/L}
 \end{aligned}$$

อัตราส่วนของออกซิเจนที่ใช้ ออกซิเดชันเซลล์จุลินทรีย์ เท่ากับอัตราส่วนของ 160 ต่อ 113 เท่ากับ 1.42 จากสมการที่ 9.3 อาจเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ 9.4

$$\begin{aligned}
 \text{BOD}_L \text{ Stabilized} &= 1.42 * P_x \dots 9.4 \\
 \text{เมื่อ} \quad P_x &\text{ คือ } \text{มวลสุทธิของจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้น หน่วย kg/day}
 \end{aligned}$$

มวลสุทธิของจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้น (Px) คำนวณหาได้จากสมการที่ 9.5

$$P_x = \frac{Q * Y * \text{Eff} * C_{AO} * 10^{-3}}{1 + k_d * \theta_c} \quad \dots 9.5$$

- เมื่อ Y คือ สัมประสิทธิ์การเพิ่มจำนวนจุลินทรีย์จากการย่อยสลายสารอินทรีย์ เท่ากับ 0.05  
 kd คือ ค่าคงที่อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ มีค่าอยู่ในช่วง 0.01-0.03 ต่อวัน  
 θc คือ ระยะเวลาในการกักเก็บจุลินทรีย์ หน่วยวัน

แทนค่าสมการ 9.3, สมการที่ 9.4 และสมการที่ 9.5 ลงในสมการที่ 9.2 จะได้ดังสมการที่ 9.6

$$\text{Volumetric Methane Gas} = \frac{0.35 \text{ m}^3 \text{ CH}_4}{1 \text{ kg BOD}_L} * \text{Eff} * Q * C_{AO} * 10^{-3} * \left(1 - \frac{1.42 * Y}{1 + k_d * \theta_c}\right) \quad \dots 9.6$$

- เมื่อ Volumetric Methane Gas คือ ปริมาตรของก๊าซมีเทนที่ผลิตได้ หน่วย  $\text{m}^3/\text{day}$   
 $10^{-3}$  คือ ตัวเลขที่มาจากการแปลงหน่วยของ  $\frac{1 \text{ kg}}{10^6 \text{ mg}} * \frac{10^3 \text{ L}}{1 \text{ m}^3}$

ตัวอย่างที่ 9.1 จงคำนวณหาปริมาณของก๊าซมีเทนที่เกิด โดยใช้ข้อมูลต่อไปนี้ในการคำนวณ

- อัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำเสีย เท่ากับ  $100 \text{ m}^3/\text{day}$
- ค่าซีโอดีในน้ำเสียที่ไหลเข้าถังหมัก เท่ากับ  $20,000 \text{ mg/L}$
- ค่าความเข้มข้นของไนโตรเจนในน้ำเสียที่ไหลเข้าถังหมัก เท่ากับ  $400 \text{ mg/L}$
- ระยะเวลาในการกักเก็บจุลินทรีย์ เท่ากับ 10 วัน
- ประสิทธิภาพของระบบบำบัด เท่ากับ 65%
- สัมประสิทธิ์การเพิ่มจำนวนจุลินทรีย์ เท่ากับ 0.05
- ค่าคงที่อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ เท่ากับ 0.02 ต่อวัน

วิธีทำ จากสมการที่ 9.6

$$\text{Volumetric Methane Gas} = \frac{0.35 \text{ m}^3 \text{ CH}_4}{1 \text{ kg BOD}_L} * \text{Eff} * Q * C_{AO} * 10^{-3} * \left(1 - \frac{1.42 * Y}{1 + k_d * \theta_c}\right) \quad \dots 9.6$$

แทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ 9.6

$$\begin{aligned} \text{จะได้ ปริมาตรก๊าซมีเทนที่ผลิตได้} &= \frac{0.35 \text{ m}^3 \text{ CH}_4}{1 \text{ kg BOD}_L} * 65\% * 100 \text{ m}^3/\text{day} * 20,000 \text{ mg/L} \\ &* 10^{-3} * \left(1 - \frac{1.42 * 0.05}{1 + 0.02 * 10}\right) \\ &= 428.1 \text{ m}^3/\text{day} \end{aligned} \quad \text{Answer}$$

ตัวอย่างที่ 9.2 ครอบครัวหนึ่งมีจำนวนสมาชิกทั้งสิ้น 5 คน ความต้องการนำเอาก๊าซชีวภาพที่ได้จากกระบวนการบำบัดของเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนจำนวน 10 m<sup>3</sup> ข้อมูลคุณลักษณะของของเสียคังตารางข้างล่าง อยากรทราบว่าขนาดถังหมักที่ใช้ในกระบวนการหมักมีค่า m<sup>3</sup> เพื่อให้ได้ปริมาณของก๊าซชีวภาพตามที่ต้องการและมีวิธีอย่างไรในการเตรียมของเสียผสม ทั้งในส่วนส่วนของของเสีย และแกลบข้าว เพื่อให้ค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน เท่ากับ 25 เพื่อใช้ในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากของเสียผสมดังกล่าว ให้ได้ก๊าซชีวภาพออกมา 0.32 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> / kg TVS added per day ภาระสารอินทรีย์ของเสียผสมที่ไหลเข้าถังหมัก เท่ากับ 2 kg TVS / m<sup>3</sup> per day และใช้เวลาผลิตก๊าซชีวภาพ 30 วัน

คุณลักษณะของของเสีย	ประเภทของเสีย	
	ของเสียจากบ้านเรือน (Night Soils)	แกลบข้าว (Rice Straw)
Organic Carbon , % Total solids	48	43
Total Kjeldahl Nitrogen : %total solids	4.5	0.9
Total Volatile Solids	86	77
Percentage Moisture : %	82	14
Bulk Density : kg/L	1.1	0.1

วิธีทำ ของเสียผสม มีค่าอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน เท่ากับ 25 เขียนได้ดังสมการที่ 2\*

$$25 = \frac{\sum \text{Carbon of all Wastes}}{\sum \text{nitrogen of all Wastes}} \quad \dots 2^*$$

สมมติว่า นำของเสียจากบ้านเรือนมา = m<sub>1</sub> kg ในรูปของน้ำหนักแห้ง

และนำแกลบข้าวที่ผสมลงไปของเสีย = m<sub>2</sub> kg ในรูปของน้ำหนักแห้ง

ดังนั้นปริมาณคาร์บอนทั้งหมดในของเสียผสม เป็นดังสมการที่ 3\*

$$\begin{aligned} \sum \text{Carbon of all Wastes} &= 48\% * m_1 \text{ kg} + 43\% * m_2 \text{ kg} \\ &= 0.48 * m_1 \text{ kg} + 0.43 * m_2 \text{ kg} \quad \dots 3^* \end{aligned}$$

ในทำนองเดียวกันปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในของเสียผสม เป็นดังสมการที่ 4\*

$$\begin{aligned} \sum \text{Nitrogen of all Wastes} &= 4.5\% * m_1 \text{ kg} + 0.9\% * m_2 \text{ kg} \\ &= 0.045 * m_1 \text{ kg} + 0.009 * m_2 \text{ kg} \quad \dots 4^* \end{aligned}$$

แทนค่าต่างๆ ลงในสมการ 2\*

$$\text{จะได้} \quad 25 = \frac{0.48 * m_1 \text{ kg} + 0.43 * m_2 \text{ kg}}{0.045 * m_1 \text{ kg} + 0.009 * m_2 \text{ kg}}$$

$$\text{เพราะฉะนั้น} \quad m_1 \text{ kg} = 3.15 * m_2 \text{ kg} \quad \dots 5^*$$



อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ เท่ากับ  $0.32 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 / \text{kg TVS added per day}$

$$\begin{aligned}
 \text{ดังนั้นปริมาณสารอินทรีย์ทั้งสิ้นที่เติม} &= \frac{\text{CH}_4 \text{ required}}{\text{CH}_4 \text{ production}} \\
 &= \frac{10 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 \text{ required per day}}{0.32 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 \text{ production / kgTVS added per day}} \\
 &= 31.25 \text{ kg TVS added} \\
 &= 86\% * m1 \text{ kg} + 77\% * m2 \text{ kg} \quad \dots 6*
 \end{aligned}$$

แก้สมการที่ 5\* และสมการที่ 6\*

ได้ค่า m1 เท่ากับ 10.16 kg และค่า m2 เท่ากับ  $3.15 * 10.16 \text{ kg}$  หรือ เท่ากับ 32 kg ในแต่ละวันของการป้อนของเสียเข้าสู่ถังหมักดังกล่าว

ค่าที่ได้จากการคำนวณ อยู่ในรูปของน้ำหนักแห้ง ซึ่งไม่สะดวกในการหาน้ำหนัก ในทางปฏิบัติ เพราะต้องผ่านกระบวนการเอาน้ำ (ความชื้น) ออกจากของเสีย ทำให้ต้องใช้ระยะเวลาจำนวนหนึ่งในกระบวนการเอาน้ำ หรือความชื้นออกจากของเสียและแกลบข้าว ดังนั้นการนำของเสียจากบ้านเรือนและแกลบข้าวมาผสมกัน จึงนิยมนำวัดในรูปของน้ำหนักเปียก ซึ่งหาได้จากสมการที่ 7\*

จากความสัมพันธ์ที่ว่า “น้ำหนักของเสียทั้งหมดในรูปของน้ำหนักแห้ง เท่ากับ ผลคูณของร้อยละของของแข็งในของเสีย กับน้ำหนักของเสียทั้งหมดในรูปของน้ำหนักเปียก” เขียนได้ดังสมการที่ 7\*

$$\text{Total dried weight} = \% \text{ Solid Content} * \text{Total Wet Weight} \quad \dots 7*$$

ในทำนองเดียวกันน้ำหนักรวมของของเสียผสม ในรูปของน้ำหนักเปียก หาได้จากความสัมพันธ์ดังกล่าว ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 8\*

ปริมาณของของเสียทั้งหมดในรูปของน้ำหนักแห้ง หาได้จากสมการที่ 8\*

$$\begin{aligned}
 \text{Total wet weight} &= \frac{\text{Total dried weight}}{\% \text{solid content}} \\
 &= \frac{\text{Total dried weight}}{1 - \text{water content}} \quad \dots 8*
 \end{aligned}$$

แทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ 8\*

$$\begin{aligned}
 \text{เพราะฉะนั้น น้ำหนักรวมของของเสีย ในรูปของน้ำหนักเปียก} &= \frac{10.16 \text{ kg}}{1 - 82\%} \\
 &= 56.44 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ในทำนองเดียวกัน น้ำหนักรวมของแกลบข้าว ในรูปของน้ำหนักเปียก} &= \frac{32.0 \text{ kg}}{1 - 86\%} \\
 &= 37.22 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้นน้ำหนักรวมของของเสียผสม} &= 56.44 \text{ kg} + 37.22 \text{ kg} \\ &= 93.66 \text{ kg} \end{aligned}$$

จากความสัมพันธ์ที่ว่า ภาระสารอินทรีย์ของของเสีย

*Volatile Loading Rate : VLR*) เท่ากับ “อัตราส่วนของปริมาณสารอินทรีย์ทั้งหมดที่มีอยู่ในของเสียกับ ปริมาตร (ความจุ) ของถังหมัก” เป็นดังสมการที่ 9\*

$$VLR = \frac{\text{TVS added per day}}{\text{capacity of digester}} \quad \dots 9^*$$

ค่าภาระสารอินทรีย์ของของเสียผสมที่นำมาผลิตเป็นก๊าซชีวภาพมีค่า เท่ากับ 2 kg TVS/m<sup>3</sup> -day แทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ 9\*

$$\begin{aligned} \text{จะได้} \quad 2 \text{ kg TVS / m}^3 \text{ per day} &= \frac{31.25 \text{ kg TVS added per day}}{\text{Capacity of digester}} \\ \text{เพราะฉะนั้น} \quad \text{ความจุของถังหมัก} &= \frac{31.25 \text{ kg TVS added per day}}{2 \text{ kg TVS per m}^3 \text{ per day}} \\ &= 15.625 \text{ m}^3 \\ &\approx 16.0 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

กำหนดให้ปริมาตรเผื่อของน้ำภายในถังหมัก เพื่อให้ถังหมักรองรับน้ำเสียได้มาก ในกรณีที่น้ำเสียหรือของเสียที่นำมาหมักในแต่ละวัน ให้ค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรมากกว่าค่ามากกว่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรตามที่ทำการออกแบบไว้ โดยเผื่อปริมาตรของน้ำเสีย(ของเสีย)และมีที่เก็บรวบรวมก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักภายในถังหมัก สมมติว่าปริมาตรเผื่อของน้ำภายในถังหมัก เท่ากับ 5 m<sup>3</sup> ดังนั้นปริมาตรความจุของถังหมักทั้งหมด เท่ากับ ผลบวกของปริมาตรความจุของถังหมักกับปริมาตรเผื่อของน้ำภายในถังหมัก ซึ่งเป็นดังสมการที่ 10\*

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตรความจุของถังหมัก} &= \text{ปริมาตรความจุของถังหมัก} + \text{ปริมาตรเผื่อของน้ำเสียในถังหมัก} \quad \dots 10^* \\ &= 16 \text{ m}^3 + 5 \text{ m}^3 \\ &= 21 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

จากความสัมพันธ์ที่ว่า “อัตราการไหลเชิงปริมาตรของของเสีย เท่ากับ อัตราส่วนปริมาตรของของเสียที่นำมาหมัก ในแต่ละวันต่อระยะเวลาที่ทำการหมัก” เขียนได้ดังสมการที่ 11\*

$$Q = \frac{V}{t} \quad \dots 11^*$$

แทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ 11\*

$$\begin{aligned} \text{จะได้} \quad Q &= \frac{16 \text{ m}^3}{30 \text{ days}} * \frac{10^3 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} \\ &= 533.3 \text{ L/day} \end{aligned}$$

จากความสัมพันธ์ที่ว่า “ปริมาณของของเสีย เท่ากับอัตราส่วนของของแข็งทั้งหมดต่อความหนาแน่นของของเสีย” ซึ่งเป็นคังสมการที่ 12\*

$$V = \frac{\text{Total Solids of Wastes}}{\text{Bulk Density of Wastes}} \quad \dots 12^*$$

แทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ 12\*

$$\begin{aligned} \text{คังนั้นปริมาณของของเสียจากบ้านเรือน} &= \frac{56.44 \text{ kg / day}}{1.1 * 1 \text{ kg/L}} \\ &= 51.30 \text{ L/day} \end{aligned}$$

ในทำนองเดียวกัน เมื่อพิจารณาในส่วนของแกลบข้าว

$$\begin{aligned} \text{เพราะฉะนั้น ปริมาณของแกลบข้าว} &= \frac{37.22 \text{ kg / day}}{0.1 * 1 \text{ kg / L}} \\ &= 372.2 \text{ L/day} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ผลรวมปริมาณของเสียผสมที่นำมาหมัก} &= 51.31 \text{ ลิตร} + 372.2 \text{ ลิตร} \\ &= 423.51 \text{ ลิตร} \end{aligned}$$

ปริมาณของเสียที่ต้องการทำการหมัก มีค่าทั้งสิ้น เท่ากับ 533.3 ลิตร คำนวณด้วยสมการที่ 11\*

ปริมาณที่เหลือมักทำการเติมน้ำประปาหรือน้ำในแหล่งน้ำตามธรรมชาติที่ไม่มีสารอินทรีย์หรือมีปริมาณสารอินทรีย์น้อย โดยที่ปริมาณของน้ำที่เติม เท่ากับ ผลต่างปริมาณรวมของของเสียผสมกับปริมาณของของเสีย และปริมาณของแกลบข้าว ซึ่งเป็นคังสมการ 13\*

$$\text{ปริมาณของน้ำที่เติม} = \text{ปริมาณของถัง} - \text{ปริมาณของเสีย} - \text{ปริมาณของแกลบข้าว} \quad \dots 13^*$$

แทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ 13\*

$$\begin{aligned} \text{คังนั้นปริมาณของน้ำที่เติมลงในถังหมัก} &= 533.3 \text{ ลิตร} - 51.3 \text{ ลิตร} - 372.2 \text{ ลิตร} \\ &= 109.7 \text{ ลิตร} \end{aligned}$$

ปริมาณที่เหลือมักทำการเติมน้ำประปาหรือน้ำในแหล่งน้ำตามธรรมชาติที่ไม่มีสารอินทรีย์หรือมีปริมาณสารอินทรีย์น้อยโดยที่ปริมาตรของน้ำที่เติม เท่ากับ ผลต่างปริมาตรรวมของของเสียผสมกับปริมาตรของของเสีย และปริมาตรของแกลบข้าว ซึ่งเป็นดังสมการ 13\*

$$\text{ปริมาตรของน้ำที่เติม} = \text{ปริมาตรของถัง} - \text{ปริมาตรของเสีย} - \text{ปริมาตรของแกลบข้าว} \quad \dots 13^*$$

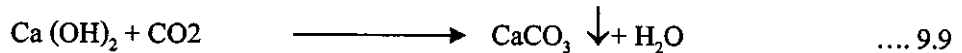
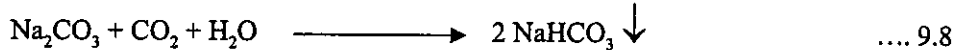
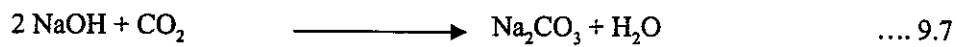
แทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ 13\*

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้นปริมาตรของน้ำที่เติมลงในถังหมัก} &= 533.3 \text{ ลิตร} - 51.3 \text{ ลิตร} - 372.2 \text{ ลิตร} \\ &= 109.7 \text{ ลิตร} \end{aligned}$$

การแยกเอาก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Biogas Production) ก๊าซที่ได้จากกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพนั้น เป็นก๊าซผสมซึ่งมีน้ำรวมอยู่ด้วยจากปฏิกิริยาชีวเคมีที่เกิดขึ้น การนำเอาก๊าซชีวภาพไปใช้งานโดยตรงต้องใช้พลังงานช่วงแรกทำให้น้ำระเหยและก๊าซอื่นๆ ออกจากก๊าซชีวภาพ เพื่อให้เหลือเพียงก๊าซมีเทน ซึ่งจะทำความร้อนที่ได้จากการใช้ประโยชน์มีค่ามากขึ้น ตัวอย่างของการแยกก๊าซออกจากก๊าซชีวภาพ ได้แก่ การแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ การแยกก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ออกจากก๊าซชีวภาพ เป็นต้น วิธีง่ายในการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากก๊าซชีวภาพ คือ การใช้น้ำแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เพราะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำได้ดี ทำให้ได้กรดคาร์บอนิก ส่วนก๊าซมีเทนที่มีอยู่ในก๊าซชีวภาพ เกิดการไหลออกไปสู่ขั้นตอนอื่นๆ ของการใช้ประโยชน์ อย่างไรก็ตามวิธีนี้มักต้องใช้น้ำปริมาณมาก เช่น ก๊าซชีวภาพที่ได้ที่ความดัน 1 บรรยากาศ และอุณหภูมิเท่ากับ 20 องศาเซลเซียส มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผสมอยู่ 30% โดยน้ำหนักและความหนาแน่นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 1.84 kg/m<sup>3</sup> ปริมาณน้ำที่ใช้ เท่ากับ 429 ลิตร ต่อก๊าซชีวภาพที่ได้ 1 m<sup>3</sup>

กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ มักได้น้ำเกิดขึ้นเสมอ ดังนั้นการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากก๊าซชีวภาพ ย่อมช่วยแยกเอาน้ำออกจากก๊าซชีวภาพดังกล่าวด้วย เพราะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำทำให้ได้กรดคาร์บอนิก และยังทำให้สภาพของน้ำมีฤทธิ์เป็นกรดอ่อน การแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากก๊าซชีวภาพ อาจใช้กระบวนการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากก๊าซชีวภาพด้วยสารละลายเบส กระบวนการนี้เรียกว่า กระบวนการดูดซับ (Adsorption Process) กระบวนการดูดซับขึ้นกับค่าการละลายของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำเสีย อุณหภูมิ และความดันของก๊าซชีวภาพที่ได้ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 9.11

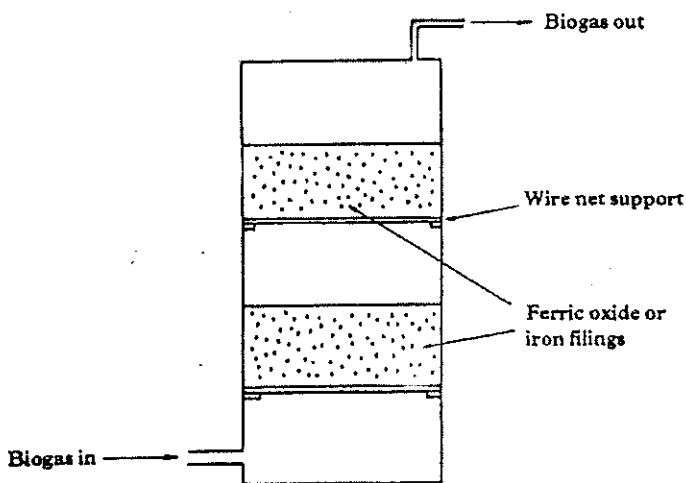
สารเคมีที่นิยมใช้ในกระบวนการดูดซับ ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โซดาไฟ (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) และปูนขาว [Ca(OH)<sub>2</sub>] เป็นต้น สมการที่ในการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากก๊าซชีวภาพด้วยสารเคมีชนิดต่างๆ แสดงไว้ในสมการที่ 9.7 ถึง 9.9



สมมติว่าองค์ประกอบของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซชีวภาพ มีค่าเพียง 30% โดยน้ำหนัก หรืออาจกล่าวได้ว่าปริมาตรของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ มีค่า 300 ลิตรในก๊าซชีวภาพจำนวนทั้งสิ้น 860 ลิตร ต้องใช้ปูนขาว จำนวน 1 กิโลกรัม ละลายน้ำให้ได้ปริมาตรทั้งสิ้น 1,000 ลิตร

### การแยกก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

การแยกเอาก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกจากก๊าซชีวภาพอาจใช้โซดาไฟ การเปลี่ยนแปลงของก๊าซชีวภาพเมื่อไหลโซดาไฟ เป็นดังสมการที่ 9.10 ซึ่งทำได้โดยการนำก๊าซชีวภาพผ่านสารละลายโซดาไฟหรืออาจนำก๊าซชีวภาพที่ได้จากกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพให้ไหลผ่านแผ่นเหล็กหรือเหล็กออกไซด์ (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ซึ่งบรรจุอยู่ภายในถังดังรูปที่ 9.7 กระบวนการนี้เรียกว่า กระบวนการแยกก๊าซแบบก๊าซแห้ง (Dry Gas Scrubbing) ปฏิกริยาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นบนแผ่นเหล็ก เป็นดังสมการที่ 9.11 และกระบวนการนำเอาเหล็กออกไซด์กลับมาใช้ใหม่ เป็นดังสมการที่ 9.12



รูปที่ 9.7 แสดงกระบวนการแยกก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์แบบก๊าซแห้ง (Dry Gas Scrubbling)

การแยกเอาก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Biogas Production) ก๊าซที่ได้จากกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพนั้น เป็นก๊าซผสมซึ่งมีน้ำรวมอยู่ด้วยจากปฏิกิริยาชีวเคมีที่เกิดขึ้น การนำเอาก๊าซชีวภาพไปใช้งานโดยตรงต้องใช้พลังงานช่วงแรกทำให้น้ำระเหยและก๊าซอื่นๆ ออกจากก๊าซชีวภาพ เพื่อให้เหลือเพียงก๊าซมีเทน ซึ่งจะ ทำให้ค่าความร้อนที่ได้จากการใช้ประโยชน์มีค่ามากขึ้น ตัวอย่างของการแยกก๊าซออกจากก๊าซชีวภาพ ได้แก่ การแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ การแยกก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ออกจากก๊าซชีวภาพ เป็นต้น วิธีง่ายในการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากก๊าซชีวภาพ คือ การใช้น้ำแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เพราะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำได้ดี ทำให้ได้กรดคาร์บอนิก ส่วนก๊าซมีเทนที่มีอยู่ในก๊าซชีวภาพ เกิดการไหลออกไปสู่ชั้นตอนอื่นๆ ของการใช้ประโยชน์ อย่างไรก็ตามวิธีนี้มักต้องใช้น้ำปริมาณมาก เช่น ก๊าซชีวภาพที่ได้ที่ความดัน 1 บรรยากาศ และอุณหภูมิเท่ากับ 20 องศาเซลเซียส มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผสมอยู่ 30% โดยน้ำหนักและความหนาแน่นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 1.84 kg/m<sup>3</sup> ปริมาณน้ำที่ใช้ เท่ากับ 429 ลิตร ต่อก๊าซชีวภาพที่ได้ 1 m<sup>3</sup>

กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ มักได้น้ำเกิดขึ้นเสมอ ดังนั้นการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากก๊าซชีวภาพ ย่อมช่วยแยกเอาน้ำออกจากก๊าซชีวภาพดังกล่าวด้วย เพราะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำทำให้ได้กรดคาร์บอนิก และยังทำให้สภาพของน้ำมีฤทธิ์เป็นกรดอ่อน การแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ออกจากก๊าซชีวภาพ อาจใช้กระบวนการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากก๊าซชีวภาพด้วยสารละลายเบส กระบวนการนี้เรียกว่า กระบวนการดูดซับ (Adsorption Process) กระบวนการดูดซับขึ้นกับค่าการละลายของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำเสีย อุณหภูมิ และความดันของก๊าซชีวภาพที่ได้ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 9.12

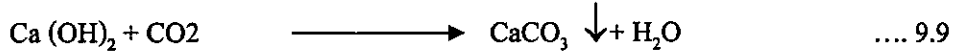
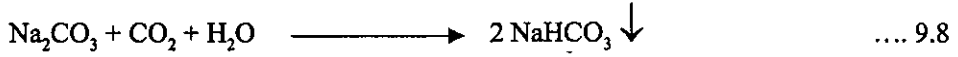
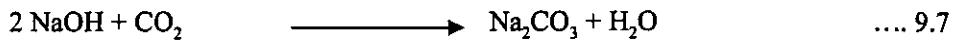
ตารางที่ 9.12 ค่าการละลายของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำ

ความดันก๊าซ		อุณหภูมิ หน่วย F (หน่วย C)				
Atm	kg/cm <sup>2</sup>	32 (0)	50 (10)	68 (20)	86 (30)	104 (40)
1	1.03	0.40	0.25	0.15	0.10	0.10
10	10.3	3.15	2.15	1.30	0.90	0.75
50	51.7	7.70	6.95	6.00	4.80	3.90
100	103	8.00	7.20	6.60	6.00	5.40
200	207	-	7.95	7.20	6.55	6.05

<sup>a</sup> Solubility is expressed as lb CO<sub>2</sub> per 100 lb H<sub>2</sub>O (kg CO<sub>2</sub> per 100 kg H<sub>2</sub>O)

<sup>b</sup> Adapted from Nonhebel (1972) : reproduced by permission of Butterworth & CO., London

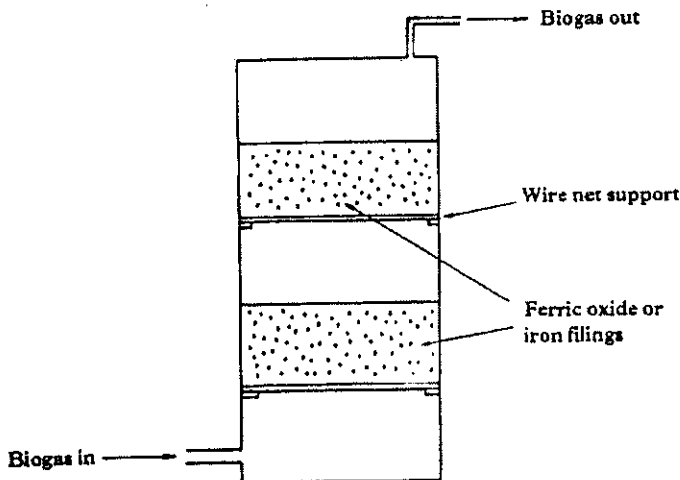
สารเคมีที่นิยมใช้ในกระบวนการดูดซับ ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โซดาไฟ (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) และปูนขาว [Ca(OH)<sub>2</sub>] เป็นต้น สมการที่ในการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากก๊าซชีวภาพด้วยสารเคมีชนิดต่างๆ แสดงไว้ในสมการที่ 9.7 ถึง 9.9



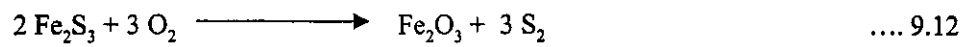
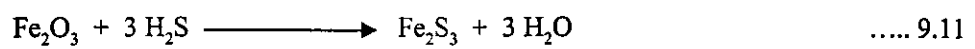
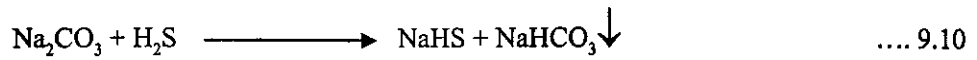
สมมติว่าองค์ประกอบของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซชีวภาพ มีค่าเพียง 30% โดยน้ำหนัก หรืออาจกล่าวได้ว่าปริมาตรของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ มีค่า 300 ลิตรในก๊าซชีวภาพจำนวนทั้งสิ้น 860 ลิตร ต้องใช้ปูนขาว จำนวน 1 กิโลกรัม ละลายน้ำให้ได้ปริมาตรทั้งสิ้น 1,000 ลิตร

### การแยกก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

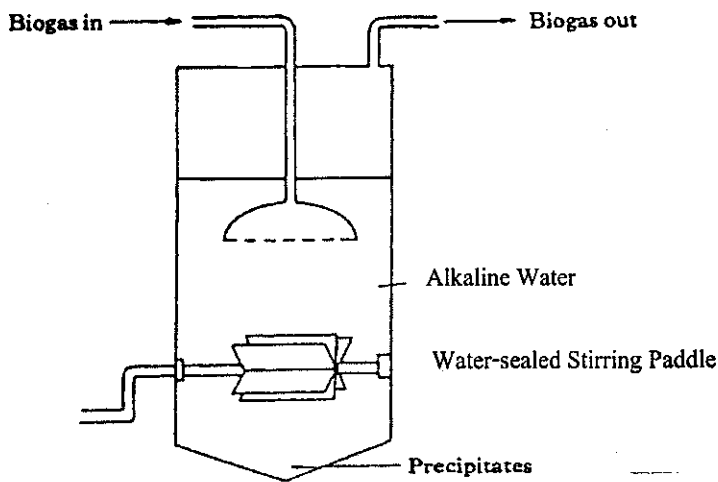
การแยกเอาก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกจากก๊าซชีวภาพอาจใช้โซดาไฟ การเปลี่ยนแปลงของก๊าซชีวภาพเมื่อไหลโซดาไฟ เป็นดังสมการที่ 9.10 ซึ่งทำได้โดยการนำก๊าซชีวภาพผ่านสารละลายโซดาไฟหรืออาจนำก๊าซชีวภาพที่ได้จากกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพให้ไหลผ่านแผ่นเหล็กหรือเหล็กออกไซด์ (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ซึ่งบรรจุอยู่ภายในถังดังรูปที่ 9.7 กระบวนการนี้เรียกว่า กระบวนการแยกก๊าซแบบก๊าซแห้ง (Dry Gas Scrubbing) ปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นบนแผ่นเหล็ก เป็นดังสมการที่ 9.11 และกระบวนการนำเอาเหล็กออกไซด์กลับมาใช้ใหม่ เป็นดังสมการที่ 9.12



รูปที่ 9.7 แสดงกระบวนการแยกก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์แบบก๊าซแห้ง (Dry Gas Scrubbling)



การแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกจากก๊าซชีวภาพด้วยสารละลายต่าง เป็น กังรูปที่ 9.8



รูปที่ 9.8 แสดงการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ด้วยสารละลายต่าง

ภายหลังแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หรือก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกจากก๊าซชีวภาพแล้ว สามารถนำ ก๊าซดังกล่าวไปใช้ประโยชน์ได้หลายประการ เช่น การให้แสงสว่าง การผลิตกระแสไฟฟ้า เป็นต้น โดย ให้ก๊าซดังกล่าวไหลไปภายในท่อที่ทางเข้าของท่อของอุปกรณ์ที่ต้องการนำก๊าซชีวภาพไปใช้งาน ขนาด ท่อแสดงไว้ในตารางที่ 9.13 และในรูปที่ 9.9 แสดงตัวอย่างจริงของอุปกรณ์ในการนำก๊าซชีวภาพหรือ ก๊าซมีเทนไปใช้ประโยชน์ในการหุงต้มและให้แสงสว่าง



ตารางที่ 9.13 แสดงขนาดของท่อนำเอาก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์ด้านต่างๆ

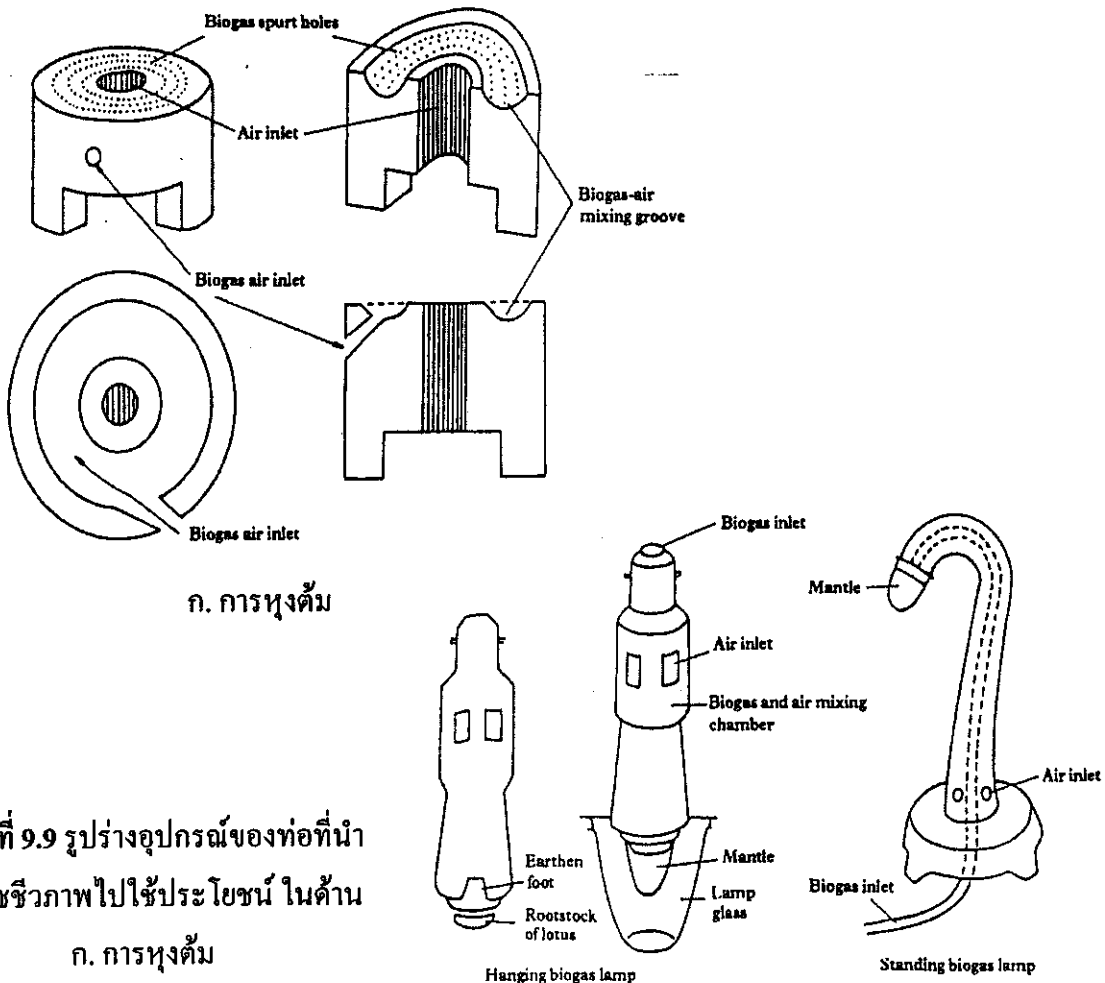
Use	Specification	Quantity of gas required	
		ft <sup>3</sup> /h	m <sup>3</sup> /h
Cooking	2-inch burner	11.5	0.33
	4-inch burner	16.5	0.47
	6-inch burner	22.5	0.64
	2-4-inch burner per person/day	8-16	0.23-0.45
Gas lighting	per lamp of 100 candle power	12-15	0.34-0.42
	per mantle	4.5	0.13
	per mantle	2.5	0.07
	per mantle	2.5-3.0	0.07-0.08
	two-mantle lamp	5	0.14
Gasoline or diesel engine <sup>b</sup>	three-mantle lamp	6	0.17
	converted to biogas, per horsepower	16-18	0.45-0.51
Refrigerator	per ft <sup>3</sup> capacity	1	0.028
	per ft <sup>3</sup> capacity	1.2	0.034
Incubator	per ft <sup>3</sup> capacity	0.45-0.6	0.013-0.017
	per ft <sup>3</sup> capacity	0.5-0.7	0.014-0.020
Gasoline	1 L	47-66 <sup>c</sup>	1.33-1.87 <sup>c</sup>
Diesel fuel	1 L	53-73 <sup>c</sup>	1.50-2.07 <sup>c</sup>
Boiling water	1 L	3.9 <sup>d</sup>	0.11 <sup>d</sup>

<sup>a</sup> Compiled by NAS (1977)

<sup>b</sup> Based on 25 percent efficiency

<sup>c</sup> Absolute volume of biogas needed to provide energy equivalent of 1 L of fuel

<sup>d</sup> Absolute volume of biogas needed to boil off 1 L of water



รูปที่ 9.9 รูปร่างอุปกรณ์ของท่อที่นำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์ในด้าน

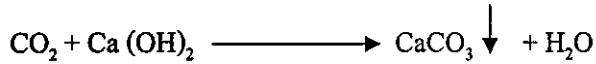
ก. การหุงต้ม

ข. การให้แสงสว่าง

ค. การให้แสงสว่าง

## แบบฝึกหัดเพิ่มความเข้าใจ

1. ถังหมักใบหนึ่งสามารถใช้ผลิตก๊าซชีวภาพได้ 15 m<sup>3</sup>/day ประกอบด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ปนอยู่ 15% โดยน้ำหนัก ความหนาแน่นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เท่ากับ 1.8 kg/m<sup>3</sup> ที่สภาวะมาตรฐาน จงคำนวณหาปริมาณปูนขาว [Ca(OH)<sub>2</sub>] เพื่อใช้กำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แต่ละวัน ในหน่วยกิโลกรัม สมการเคมีที่เกิดขึ้นแสดงไว้ด้านล่าง



2. ถังหมักใบหนึ่งสามารถใช้ผลิตก๊าซชีวภาพได้ 15 m<sup>3</sup>/day ประกอบไปด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ 15% โดยน้ำหนัก ความหนาแน่นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เท่ากับ 1.8 kg/m<sup>3</sup> ที่สภาวะมาตรฐาน อยากทราบว่าค่าใช้จ่ายในการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยปูนขาวมีค่ากี่บาท เมื่อราคาของปูนขาวเท่ากับ 30 บาทต่อกิโลกรัม
3. ฟาร์มแห่งหนึ่งต้องการใช้ก๊าซชีวภาพจำนวน 12 ซึ่งประกอบไปด้วยก๊าซมีเทน 85% ที่เหลือเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยกำจัดด้วยปูนขาวซึ่งมีความหนาแน่น เท่ากับ 1.8 kg/m<sup>3</sup> และค่าการระเหยอินทรีย์ในของเสียผสม ซึ่งเกิดจากของเสียจากบ้านเรือนกับแกลบ มีค่าเท่ากับ 2 kg TVS/m<sup>3</sup>-day และอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ เท่ากับ 0.3 m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/kg TVS added ข้อมูลของเสียแต่ละประเภท แสดงไว้ข้างล่าง

	ของเสียจากบ้านเรือน	แกลบ
ปริมาณคาร์บอนที่เกิดการหมัก (% Total Solid)	48	43
ปริมาณ ไนโตรเจน (% Total Solid)	4.5	0.9
ปริมาณของแข็งในส่วนของการอินทรีย์ (% Total Solid)	86	77
ความชื้น (%)	82	14
ความหนาแน่น (kg/L)	1.1	0.1

- อยากทราบว่า
1. ปริมาณของของเสียแต่ละชนิดที่เดิมมีค่ากี่กิโลกรัม
  2. ปริมาตรของถังหมัก มีค่ากี่ m<sup>3</sup>
  3. ปริมาตรของของเสียแต่ละชนิดที่ทำการเติมลงไปถังหมัก มีค่ากี่กิโลกรัม
  4. ปริมาตรน้ำที่เติมลงไปถังหมักเพื่อควบคุมการทำงานของกระบวนการหมักให้ให้เป็นไปตามที่ทำการออกแบบเอาไว้ เพื่อทำการหมักเป็นเวลา 10 วัน มีค่ากี่ m<sup>3</sup>

## บทที่ 10

### การผลิตปลา (Fish Production)

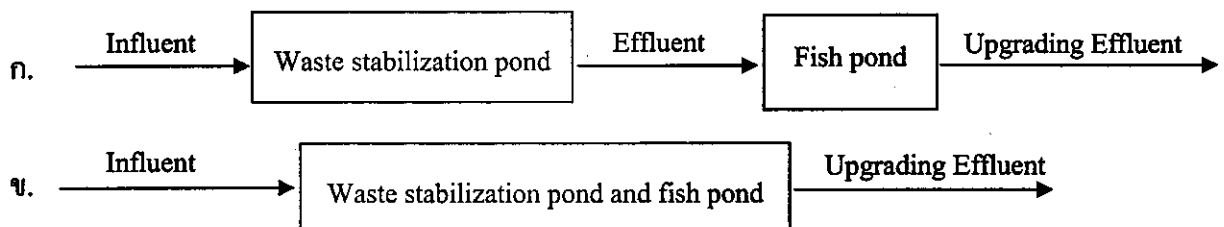
การเลี้ยงปลาจากของเสียที่เกิดขึ้นจากบ้านเรือน การกสิกรรม การเกษตรกรรม จากของเสียการเลี้ยงสัตว์ เป็นอีกวิธีหนึ่งของการนำของเสียกลับมาใช้ประโยชน์ หากฟาร์มแห่งใดมีระบบการจัดการของเสียดังกล่าวและนำมากลับมาใช้ใหม่ จะช่วยลดการใช้อาหารสูตรต่างๆ ในการเลี้ยงปลาเป็นการค้า ลดต้นทุน ทำให้มีกำไรมากขึ้น

การนำเอาของเสียกลับมาใช้ใหม่ในการทำเลี้ยงปลา มีอยู่ 3 ลักษณะ คือ

1. การรวบรวมเอาของเสียที่เกิดขึ้นไปเลี้ยงปลา
2. การเลี้ยงปลาในบริเวณที่ทำการปล่อยของเสีย วิธีนี้ถือได้ว่าเป็นวิธีเลี้ยงสัตว์แบบผสมผสาน
3. การเลี้ยงปลาในบ่อบำบัดของเสียโดยตรง ซึ่งเหมาะกับของเสียที่ไม่มีโลหะหนักปริมาณมาก รวมทั้งไม่มีจุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุของโรคต่างๆ ที่เป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำ

#### วัตถุประสงค์ของการเลี้ยงปลา (Objectives)

1. เป็นการนำเอาอาหารเสริมสร้างมาใช้ประโยชน์ ทำให้ของเสียที่เหลืออยู่อยู่ในรูปที่เสถียร (Waste Stabilization and Nutrient Recycling)
2. ช่วยปรับปรุงคุณภาพของน้ำทิ้งที่ออกจากบ่อบำบัดน้ำเสียแบบบ่อคิน (Upgrading Effluent from Waste Stabilization Ponds) การปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งจากบ่อบำบัดน้ำเสียมีอยู่ 2 วิธี คือ
  - การนำเอาน้ำทิ้งที่ออกจากบ่อบำบัดน้ำเสีย มาเลี้ยงปลา ดังรูปที่ 10.1 (ก)
  - การทำการเลี้ยงปลาในบ่อบำบัดน้ำเสียโดยตรง ดังรูปที่ 10.1 (ข)



รูปที่ 10.1 วิธีการปรับปรุงคุณภาพของน้ำทิ้ง

3. ทำให้การใช้สารอาหารและสารอินทรีย์มีค่ามากขึ้น เมื่อคิดในอัตราส่วนปริมาณหรือน้ำหนักสารอาหารที่ถูกใช้ไปต่อน้ำหนักของปลาที่เพิ่มขึ้น (High Food Conversion Ratio : FCR) อัตราส่วนดังกล่าวคิดในรูปของน้ำหนักเปียก ดังแสดงไว้ในสมการที่ 10.1 ประสิทธิภาพการเลี้ยงปลาด้วยของเสียชนิดต่างๆ แสดงไว้ในตารางที่ 10.1

$$FCR = \frac{\text{Dry Weight of Feed Given : kg}}{\text{Wet Weight of Fish Gained : kg}} \quad \dots 10.1$$

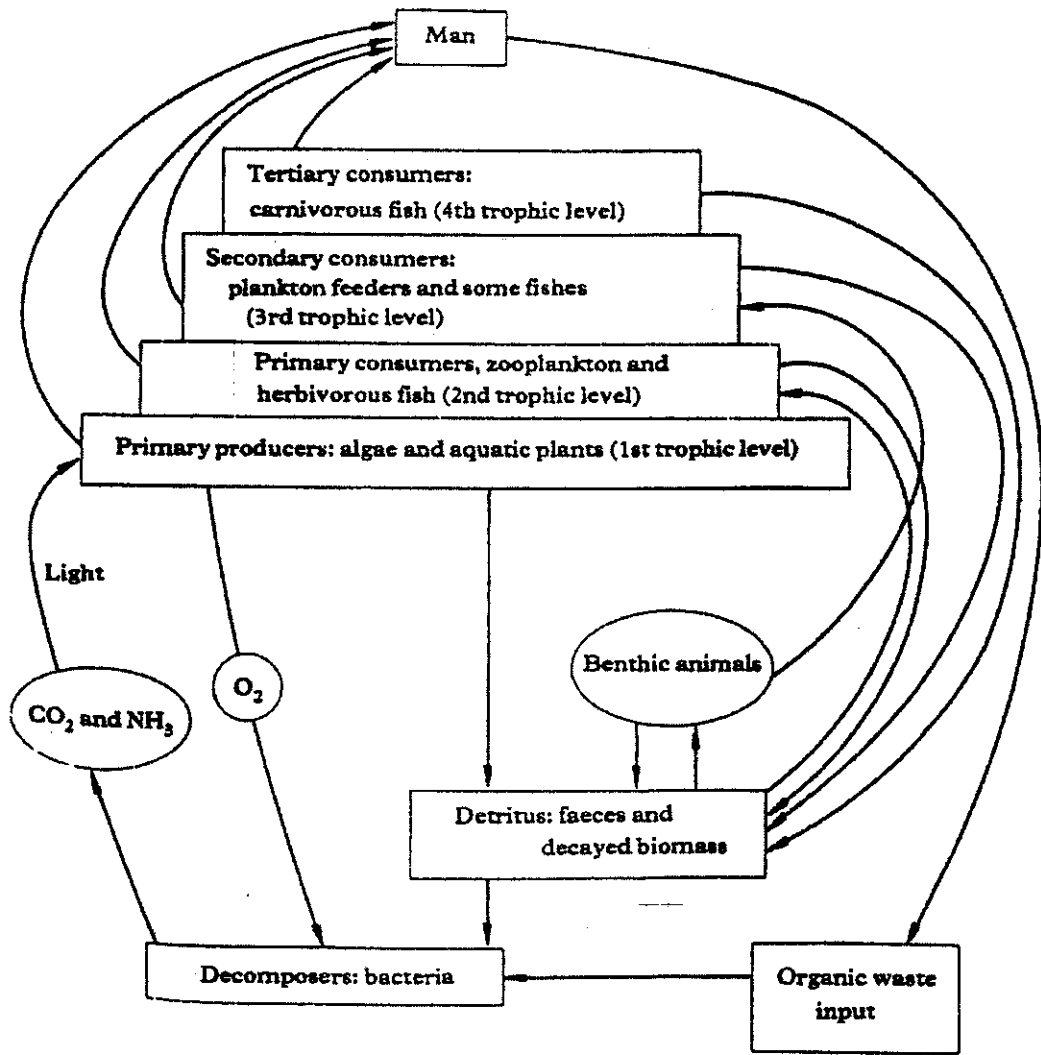
ตารางที่ 10.1 ประสิทธิภาพของการเลี้ยงปลาด้วยของเสีย

Species	Live Weight Gain (g)	Food Conversion Ratio	Energy Gain (kcal)	Protein Gain (g)
Chickens	356	2.8	782	101
Pigs	292	3.4	1,492	30
Sheep	185	5.4	832	22
Steers	163	6.1	748	26
Channel Catfish	715	1.4	935	118
Brown Trout	576	1.7	608	75

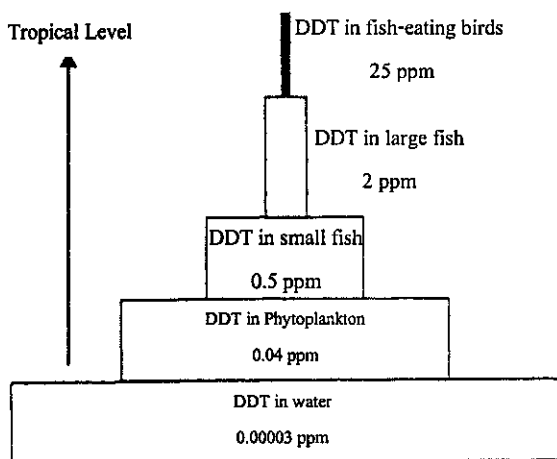
**ข้อสังเกต** การควบคุมการเดินระบบและการบำรุงรักษาระบบการเลี้ยงปลา ทำได้ง่ายกว่าระบบการผลิตสำหรับนอกจากนี้ระบบการเลี้ยงปลาไม่ใช่ทักษะความรู้ในการควบคุมมากเท่ากับการเลี้ยงสำหรับ (Operation Skill & Maintenance)

**ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อตรงต่อการเลี้ยงปลา ได้แก่**

- ราคาที่ดินและเนื้อที่ของระบบการเลี้ยงปลา
- ระบบการรวบรวมของเสีย ซึ่งต้องการนำเอาของเสียที่เกิดขึ้นกลับมาใช้ประโยชน์
- ราคาของปลา โดยปกติแล้วควรจับปลาขาย เมื่อน้ำหนักของปลามีน้ำหนักมาก ซึ่งอาจไม่ต้องรอถึงระยะเวลาทำการเก็บเกี่ยว
- ความเสี่ยงต่อสุขภาพของสาธารณชน ในกรณีที่เลี้ยงปลาในบ่อบำบัดน้ำเสียโดยตรง ควรตรวจสอบให้แน่ใจว่าในบ่อบำบัดดังกล่าวไม่มีของเสียที่เป็นโลหะหนัก หรือเชื้อโรคมกเกินเกณฑ์มาตรฐานของน้ำในการเลี้ยงปลา ซึ่งมีผลกระทบต่อห่วงโซ่อาหาร ดังแสดงไว้ในรูปที่ 10.2 ตัวอย่างของการสะสมมลสาร (ในที่นี้ คือ DDT) ในห่วงโซ่อาหาร แสดงไว้ในรูปที่ 10.3
- การยอมรับของตลาด รวมทั้งการยอมรับปลาที่เลี้ยงด้วยวิธีการเลี้ยงดังกล่าว



รูปที่ 10.2 ห่วงโซ่อาหารที่มีการสะสมสาร



รูปที่ 10.3 ตัวอย่างการสะสมสารภายในห่วงโซ่อาหาร

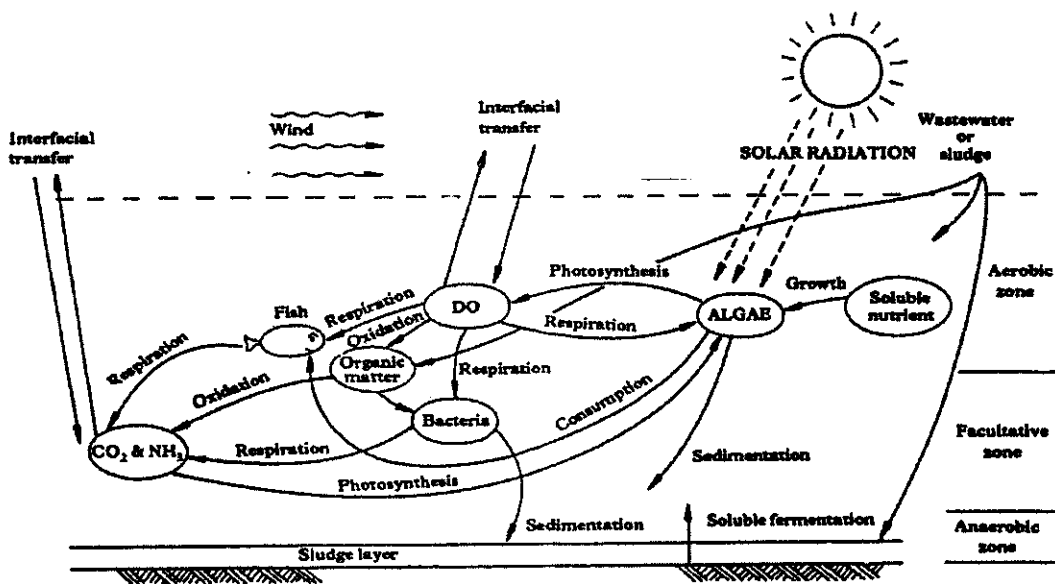
ปลาแบ่งได้ 3 ประเภท ตามลักษณะของอาหารที่กิน คือ

1. ปลาที่กินพืช (Herbivores)
2. ปลาที่กินเนื้อสัตว์ (Carnivores)
3. ปลาที่กินทั้งพืชและเนื้อสัตว์ (Omnivores)

อย่างไรก็ตามปลาที่นำมาเลี้ยงด้วยของเสีย ควรมีลักษณะดังนี้

1. มีความทนทานหรือสามารถดำรงชีพได้ที่ออกซิเจนละลายน้ำ มีค่าต่ำ (Low Dissolved Oxygen : Low DO)
2. มีความสามารถที่เติบโตได้ในน้ำเสีย
3. มีทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อม และ โรคต่างๆ ที่อาจเกิดขึ้น

การเปลี่ยนแปลงปัจจัยต่างๆ ภายในระบบการเลี้ยงปลา แสดงไว้ในรูปที่ 10.4



รูปที่ 10.4 การเปลี่ยนแปลงของปัจจัยต่างๆ ภายในระบบการเลี้ยงปลา

ปัจจัยที่มีผลต่อการเลี้ยงปลา ได้แก่

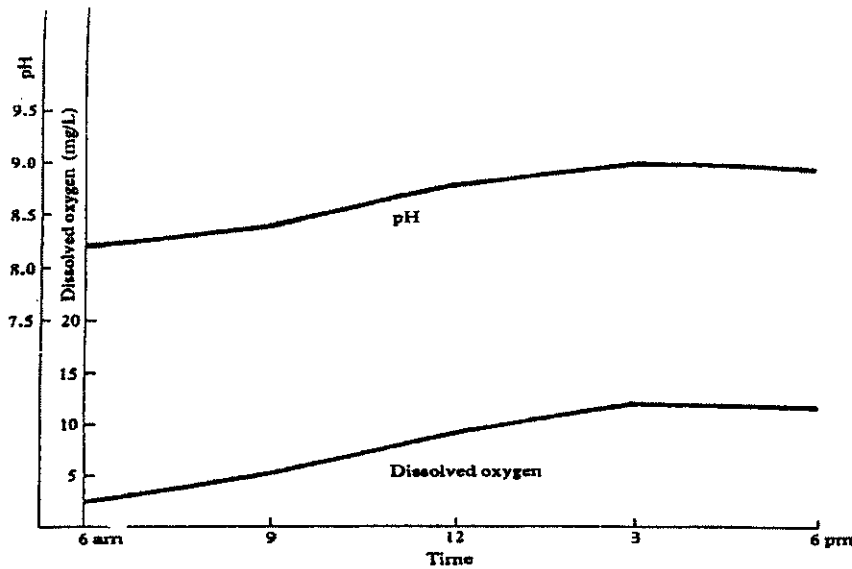
1. แสง (Light) ควรมีความเข้มพอเหมาะเพื่อให้สาหร่ายเติบโตได้ เมื่อสาหร่ายเพิ่มจำนวนมากขึ้น ปลาที่กินพืชมีอาหารเพิ่มขึ้นด้วย และยังทำให้ปลาที่กินสัตว์มีน้ำหนักรวมขึ้นจากการกินปลาที่กินพืช
2. อุณหภูมิ (Temperature) มีผลกระทบต่อกิจกรรมต่างๆ ของปลา ทำให้การกินอาหารของปลาลดลงไป ซึ่งอาจเป็นผลเสียต่อระบบการเลี้ยงปลา โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงที่พืชน้ำเพิ่มจำนวนอย่างรวดเร็ว และอาจทำให้ค่าการละลายของออกซิเจนในน้ำมีค่าลดลงไปด้วย
3. ค่าการละลายของออกซิเจนในน้ำ (Dissolved Oxygen : DO) มีผลกระทบโดยตรงต่อการอยู่หรือการอพยพของสัตว์น้ำ เช่น ปลา เป็นต้น เพราะเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าการละลายของออกซิเจนในน้ำเสียหรือในแหล่งน้ำทั่วไป มีค่าลดลง ดังตารางที่ 10.2

ตารางที่ 10.2 ค่าการละลายของออกซิเจนละลายน้ำ ที่อุณหภูมิต่างๆ

Temperature (°C)	Chloride concentration (mg/L)				
	0	5,000	10,000	15,000	20,000
0	14.6	13.8	13.0	12.1	11.3
1	14.2	13.4	12.6	11.8	11.0
2	13.8	13.1	12.3	11.5	10.8
3	13.5	12.7	12.0	11.2	10.5
4	13.1	12.4	11.7	11.0	10.3
5	12.8	12.1	11.4	10.7	10.0
6	12.5	11.8	11.1	10.5	9.8
7	12.2	11.5	10.9	10.2	9.6
8	11.9	11.2	10.6	10.0	9.4
9	11.6	11.0	10.4	9.8	9.2
10	11.3	10.7	10.1	9.6	9.0
11	11.1	10.5	9.9	9.4	8.8
12	10.8	10.3	9.7	9.2	8.6
13	10.6	10.1	9.5	9.0	8.5
14	10.4	9.9	9.3	8.8	8.3
15	10.2	9.7	9.1	8.6	8.1
16	10.0	9.5	9.0	8.5	8.0
17	9.7	9.3	8.8	8.3	7.8
18	9.5	9.1	8.6	8.2	7.7
19	9.4	8.9	8.5	8.0	7.6
20	9.2	8.7	8.3	7.9	7.4
21	9.0	8.6	8.1	7.7	7.3
22	8.8	8.4	8.0	7.6	7.1
23	8.7	8.3	7.9	7.4	7.0
24	8.5	8.1	7.7	7.3	6.9
25	8.4	8.0	7.6	7.2	6.7
26	8.2	7.8	7.4	7.0	6.6
27	8.1	7.7	7.3	6.9	6.5
28	7.9	7.5	7.1	6.8	6.4
29	7.8	7.4	7.0	6.6	6.3
30	7.6	7.3	6.9	6.5	6.1

Reproduced from Whipple and Whipple, 1911; copyright 1911, American Chemical Society

4. ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) มีผลกระทบต่อการเพาะพันธุ์ของสัตว์น้ำและกิจกรรมของสัตว์น้ำ ความเป็นกรดเป็นด่างที่เหมาะสมในการเลี้ยงปลา อยู่ในช่วง 7 ถึง 8 ถ้าความเป็นกรดเป็นด่างของน้ำต่ำกว่า 6.5 ทำให้อัตราการผลิตหรืออัตราการขยายพันธุ์ของสัตว์น้ำมีค่าลดลง และถ้าความเป็นกรดเป็นด่าง อยู่ในช่วง 4 ถึง 6.5 ทำให้อัตราการเจริญเติบโตของปลามีค่าลดลง การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดเป็นด่างและค่าการละลายของออกซิเจนในน้ำ ที่เวลาต่างๆ แสดงไว้ในรูปที่ 10.5

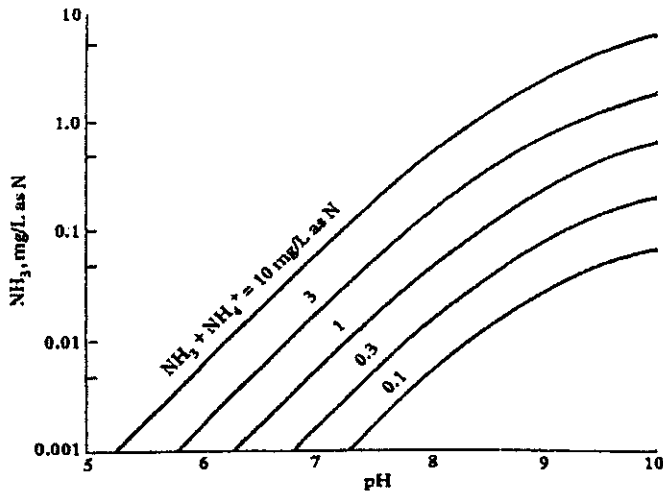


รูปที่ 10.5 การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดเป็นด่างและค่าการละลายของออกซิเจนในน้ำ ที่เวลาต่างๆ

5. ค่าความเข้มข้นของแอมโมเนียในน้ำ (Ammonia Concentration) ถ้าปริมาณสารประกอบไนโตรเจนที่อยู่ในรูปของแอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$ ) อยู่ในช่วง 0.2 ถึง 2.0 mg/L จะมีผลกระทบโดยตรงต่อสัตว์น้ำ และค่าความเป็นพิษของสารดังกล่าวมีค่ามากขึ้นเมื่อปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำมีค่าลดลง ความเป็นพิษของก๊าซแอมโมเนียลดลง เมื่อความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่ามากขึ้น สารประกอบไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียมไม่เป็นพิษต่อสัตว์น้ำ สมการอธิบายการเปลี่ยนแปลงแอมโมเนียมและแอมโมเนียเป็นดังสมการที่ 10.2 และความเข้มข้นของแอมโมเนียหรือแอมโมเนียมที่ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง แสดงไว้ในรูปที่ 10.6

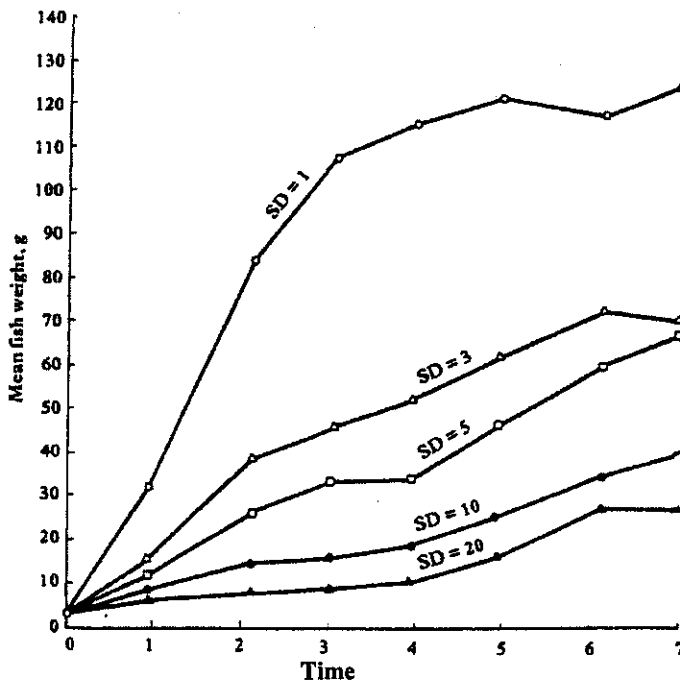




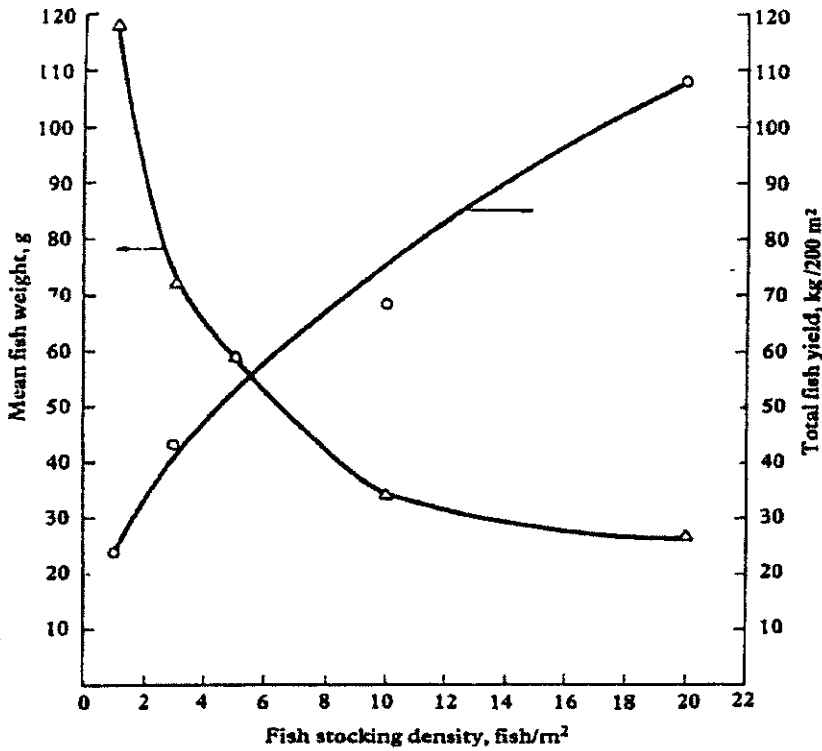


รูปที่ 10.6 ความเข้มข้นแอมโมเนียและแอมโมเนียม ที่ความเป็นกรดเป็นด่างต่างๆ

6. ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Dioxide) ไม่มีผลกระทบต่อกิจกรรมของสัตว์น้ำ อย่างไรก็ตาม ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตั้งแต่ 10 mg/L ช่วยให้การละลายของออกซิเจนในน้ำมีค่ามากขึ้น โดยทั่วไปแล้วความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำ มีค่าประมาณ 5 mg/L
7. ความหนาแน่นของสัตว์น้ำ (Stocking Density : SD) มีผลต่อน้ำหนักของปลาที่เลี้ยง กล่าวคือ เมื่อความหนาแน่นของปลามีมากขึ้น น้ำหนักโดยเฉลี่ยของปลาที่เก็บเกี่ยวได้มีค่าน้อย ดังแสดงไว้ในรูปที่ 10.7 แต่น้ำหนักโดยรวมของปลาทั้งหมดของปลามีค่ามากขึ้น ดังรูปที่ 10.8

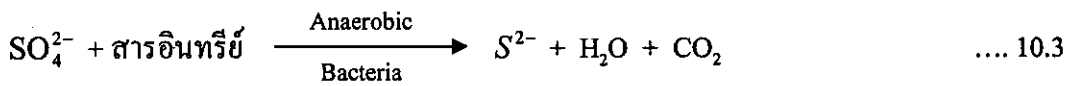


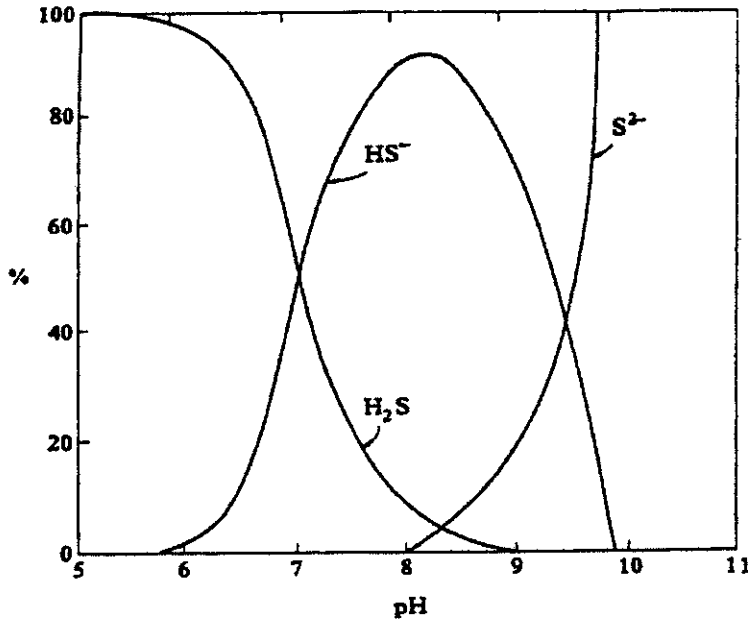
รูปที่ 10.7 น้ำหนักโดยเฉลี่ยของปลาที่เวลาการเลี้ยงต่างๆ



รูปที่ 10.8 น้ำหนักโดยเฉลี่ยของปลาและน้ำหนักโดยรวมของปลา ที่ความหนาแน่นต่างๆ

8. ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen Sulfide Gas : H<sub>2</sub>S) ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดจากย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ที่ไม่ต้องการอากาศ ซึ่งมักเกิดที่ก้นบ่อ ปฏิกริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์และก๊าซไฮโดรเจน เป็นดังสมการที่ 10.3 และสมการที่ 10.4 ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในของอืดอนต่างๆ มีความสัมพันธ์กับค่าความเป็นกรดเป็นด่าง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 10.9





รูปที่ 10.9 ผลของความเป็นกรดเป็นด่างต่อความเข้มข้นไอออนของสารประกอบไฮโดรเจนซัลไฟด์

9. ปริมาณโลหะหนักและยาฆ่าแมลง (Heavy Metals and Pesticides) ไม่ควรมีอยู่ในน้ำ เพราะเป็นพิษต่อสัตว์น้ำค่อนข้างรุนแรง หากไม่สามารถกำจัดได้หมดโลหะหนักและยาฆ่าแมลงที่มีอยู่ในน้ำ ควรมีอยู่ในปริมาณที่น้อยในหน่วยไมโครกรัมต่อลิตร
10. ค่าภาระสารอินทรีย์ (Organic Loading Rate : OLR) หมายถึง ปริมาณของเสียหรือสารอินทรีย์ทั้งหมดที่นำมาเลี้ยงปลาในบ่อที่มีปริมาตรจำนวนหนึ่ง ซึ่งค่าภาระสารอินทรีย์ควรมีค่าที่พอเหมาะ ซึ่งไม่ควรเกินความสามารถของปลาที่กินสารอาหารดังกล่าวได้หมด หรือตกค้างน้อยมาก ความสามารถในการใช้สารอาหารขึ้นกับอุณหภูมิของอากาศ การเดินระบบและความหนาแน่นของสัตว์น้ำ สมการคำนวณหาค่าภาระสารอินทรีย์เป็นดังสมการที่ 10.5

$$OLR = \frac{Q \cdot C_{AO}}{\text{Surface Area}} \quad \dots 10.5$$

- เมื่อ OLR คือ ปริมาณสารอินทรีย์ที่ไหลเข้าระบบการเลี้ยงปลา หน่วยกิโลกรัมบีโอดี หรือ ซีโอดีต่อพื้นที่ 1 เฮกตาร์ต่อวัน
- Q คือ อัตราการไหลของของเสียที่ไหลเข้าบ่อเลี้ยงปลา หน่วยปริมาตรต่อวัน
- C<sub>AO</sub> คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของของเสียที่ไหลบ่อเลี้ยงปลา หน่วย mg/L
- Surface Area : A คือ พื้นที่หน้าตัดของบ่อเลี้ยงปลา หน่วยตารางเมตร

11. ค่าการละลายของออกซิเจนในช่วงเช้ามีด (DO at Dawn : DOd) หมายถึง ปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในแหล่งน้ำในเวลาเช้ามีด ควรจะมีปริมาณมากเพียงพอต่อการดำรงชีพของสัตว์น้ำ สมการในการคำนวณค่าการละลายของออกซิเจนในน้ำ เป็นดังสมการที่ 10.6 ซึ่งพัฒนาโดย Boyd ในปี ค.ศ. 1979

$$DOd = DOdusk \pm DOdf - DOf - DOm - DOp \quad \dots 10.6$$

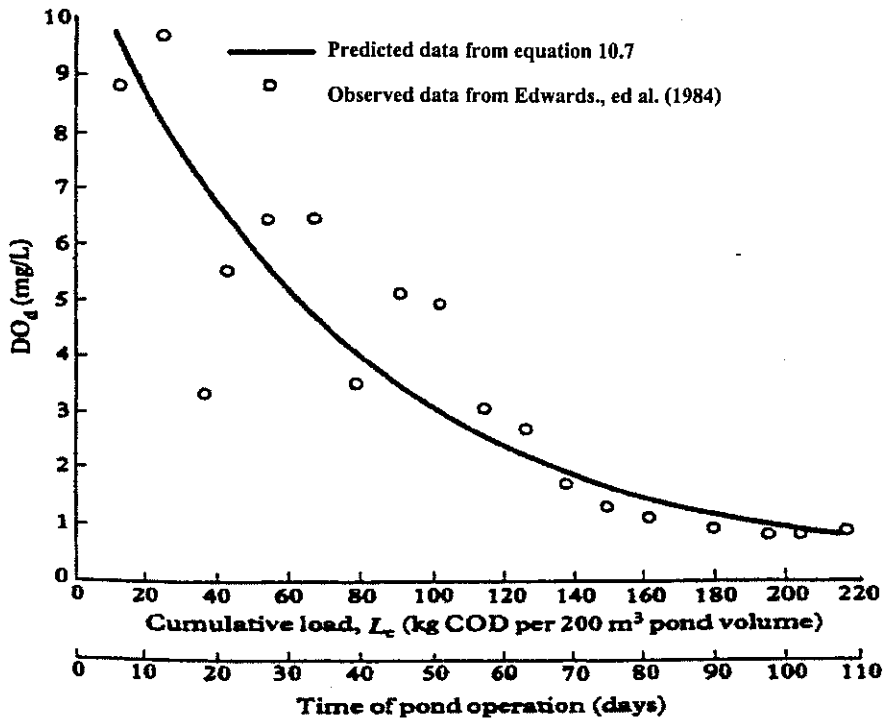
เมื่อ	DOd	คือ	ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ ซึ่งเหลืออยู่ในช่วงเช้ามีด หน่วย mg/L
	DOdusk	คือ	ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำในช่วงเวลากลางวัน ซึ่งเกิดจาก กระบวนการสังเคราะห์ หน่วย mg/L
	DOdf	คือ	ปริมาณออกซิเจนที่หายไปหรือเพิ่มขึ้นในน้ำซึ่งเป็นผลมาจากการเติม อากาศ หน่วย mg/L
	DOf	คือ	ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำที่ปลาใช้ไปในการดำรงชีพ หน่วย mg/L
	DOm	คือ	ปริมาณออกซิเจนที่หายไปจากการทับถมของตะกอนหรือสิ่งมีชีวิต ที่อยู่ใต้น้ำบริเวณก้นบ่อ หน่วย mg/L
	DOp	คือ	ปริมาณออกซิเจนที่ใช้ไปโดยจุลินทรีย์กลุ่มพืช หน่วย mg/L

สมการที่ 10.6 ที่ใช้คำนวณค่า DOd ได้จากการทำสมดุลมวลสารของออกซิเจนที่ละลายในน้ำ ค่าการใช้ออกซิเจนของพืชน้ำและสัตว์ที่กินพืช ค่าปริมาณออกซิเจนในสมการที่ 10.6 บางค่าในสมการดังกล่าวเกิดการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างเร็วและทำการวัดได้ยาก จึงมีการพัฒนาสมการเพื่อคำนวณหาปริมาณออกซิเจนที่เหลืออยู่ในน้ำโดย Bhattari ในปี ค.ศ. 1985 ดังแสดงไว้ในสมการที่ 10.7

$$DOd = 10.745 * e^{[-(0.017*t+0.002*Lc)]} \quad \dots 10.7$$

เมื่อ	t	คือ	เวลากักเก็บของสารอินทรีย์ในน้ำ หน่วยวัน
	Lc	คือ	ภาระสารอินทรีย์สะสมในบ่อปลา หน่วย kgCOD/200 m <sup>3</sup> Pond Volume

ค่าภาระสารอินทรีย์ของสารอินทรีย์ที่ป้อนลงสู่บ่อเลี้ยงปลา ทำให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ มีค่าลดลง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 10.10



รูปที่ 10.10 การเปลี่ยนแปลงค่าเวลากักเก็บน้ำเสียที่ค่าการละลายของออกซิเจนต่างๆ

สมการที่ใช้คำนวณหาน้ำหนักโดยเฉลี่ยของปลาที่เลี้ยงไว้ในบ่อ ดังแสดงไว้ในสมการที่ 10.8 โดย Bhattari ในปี ค.ศ. 1985 โดยทำการเลี้ยงปลาด้วยของเสียจากบ้านเรือน และอุณหภูมิของน้ำที่ทำการเลี้ยง เท่ากับ 30 C

$$W_t = 12.032 * \left( \frac{t * N}{SD} \right)^{0.707} \quad \dots 10.8$$

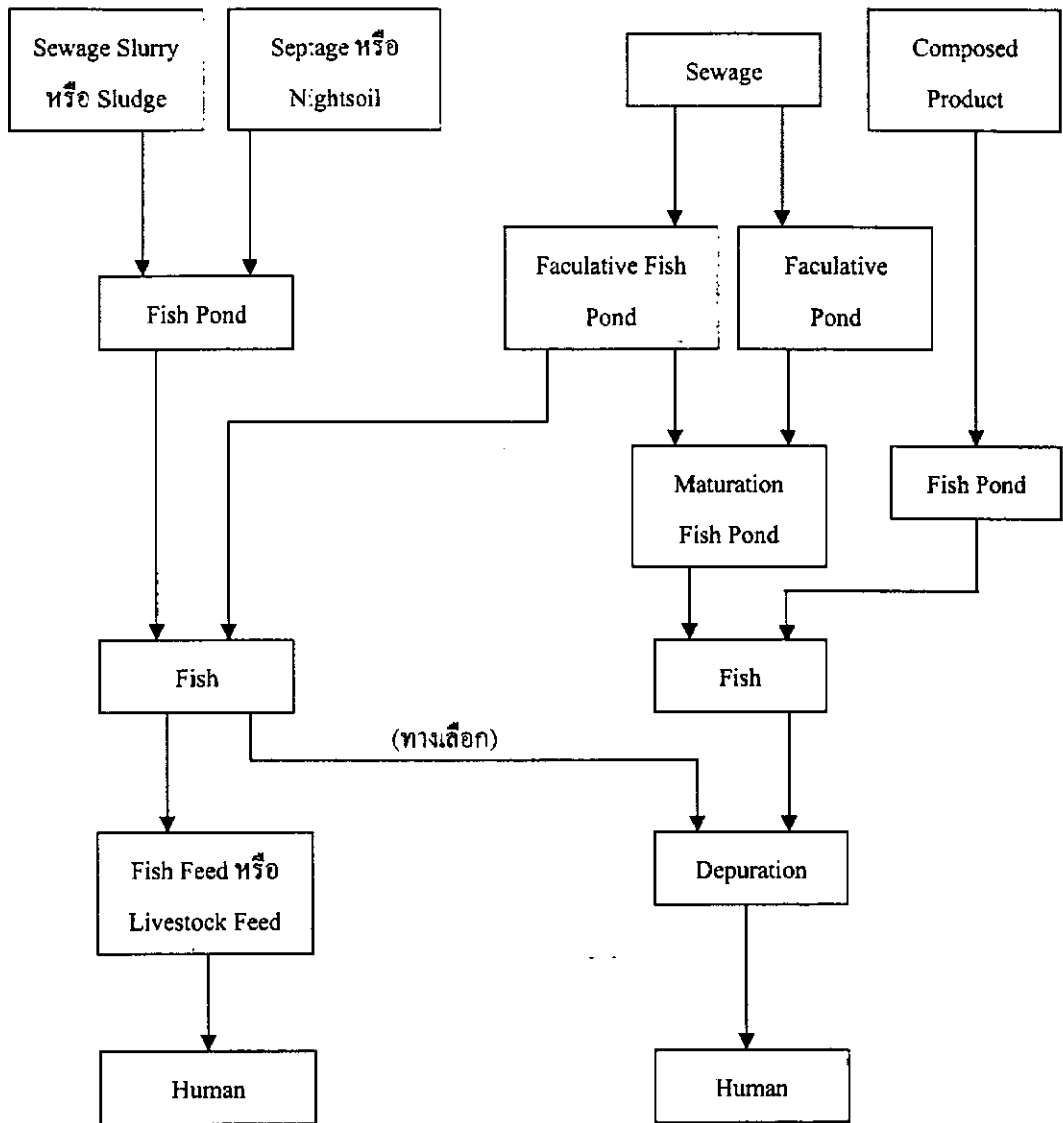
เมื่อ W<sub>t</sub> คือ น้ำหนักโดยเฉลี่ยของปลา ที่เวลา t วัน หน่วยกรัม

t คือ เวลาที่ใช้ในการเลี้ยงปลา หน่วยเดือน

N คือ ผลรวมของภาระสารอินทรีย์วัดในรูปของเจลดาคาร์บอน ไนโตรเจน ซึ่งมีค่าเท่ากับปริมาณสารอินทรีย์ไนโตรเจน และแอมโมเนียไนโตรเจนที่มีอยู่ในน้ำ หน่วย kg/ha-day

SD คือ ความหนาแน่นของปลา หน่วยจำนวนปลาต่อตารางเมตร (Fish/m<sup>2</sup>)

12. **ระยะเวลาการเลี้ยงปลาและความหนาแน่น (Fish Culture & Stocking Density)** ปลาพวกที่กินสัตว์และปลากินทั้งพืชและสัตว์ จะได้รับกระทบจากสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไปมากกว่าปลาที่กินพืชเพียงอย่างเดียว หลักเกณฑ์ในการเลี้ยงปลา เป็นดังนี้
- ความหนาแน่นของปลา ตั้งแต่ 10 ตัวต่อ 1 ตารางเมตร ระยะเวลาในการเลี้ยงเท่ากับ 3 เดือน จึงทำการเก็บเกี่ยว
  - ความหนาแน่นของปลา อยู่ในช่วง 1 ถึง 2 ตัวต่อตารางเมตร ระยะเวลาในการเลี้ยงมีค่าเท่ากับ 1 ปี หรือมากกว่า จึงทำการเก็บเกี่ยว
13. **น้ำประปา (Water Supply)** น้ำประปาที่ใช้เพื่อลดความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่เลี้ยงปลา รวมทั้งป้องกันการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไป มีผลต่อการดำรงชีพของปลา
14. **ขนาดของบ่อ (Pond Size)** ความลึกของบ่อเลี้ยงปลาโดยทั่วไปอยู่ในช่วง 1 ถึง 1.5 เมตร และระยะเผื่อ (Free Board) อยู่ในช่วง 0.3 ถึง 0.6 เมตร ในกรณีที่บ่อที่เลี้ยงปลาปริมาณน้ำในบ่อเลี้ยงปลาได้รับผลจากน้ำฝนค่อนข้างมาก หรือไม่มีระบบการระบายน้ำฝน ดังนั้นจึงควรออกแบบบ่อที่ใช้ในการเลี้ยงปลาให้รับน้ำได้อย่างพอทั้งในช่วงฤดูฝน และเก็บน้ำไว้ให้เพียงพอต่อความต้องการในการเลี้ยงปลาในช่วงฤดูแล้ง โดยปูพื้นบ่อด้วยพลาสติกเพื่อป้องกันน้ำซึมลงสู่ดินได้ดิน หรืออาจขุดบ่อให้ลึกมากขึ้น โดยทั่วไปแล้วบ่อเลี้ยงปลา มีความลึกอยู่ในช่วง 2 ถึง 3 เมตร พื้นที่หน้าตัดของบ่อ อยู่ในช่วง 1,000-4,000 m<sup>2</sup> ความกว้างของบ่อไม่ควรมีความมากกว่า 30 เมตร
15. **การจัดวางเรียงบ่อ (Pond Arrangement)** กรณีที่ต้องทำการออกแบบบ่อเลี้ยงปลามากกว่า 1 บ่อ อาจต้องพิจารณาจัดวางเรียงบ่อให้เหมาะสมกับอัตราการไหลของน้ำ เพื่อให้ได้ปลาจำนวนมาก นอกจากนี้แล้วยังป้องกันการแพร่กระจายของโรคไปทั่วบ่อและยังทำให้คุณภาพน้ำทั้งเป็นไปตามต้องการ ไม่ก่อให้เกิด ผลกระทบต่อสภาพแวดล้อม ตัวอย่างของการจัดวางเรียงบ่อแสดงไว้ในรูปที่ 10.11 ซึ่งจัดวางเรียงบ่อไว้จำนวน 4 ใบ โดยในช่วงแรกจัดวางเรียงบ่อในลักษณะแบบขนาน จากนั้นลดจำนวนบ่อที่ใช้เลี้ยงปลาลงให้เหลือเพียง 2 ใบ เมื่อใช้งานเป็นระยะเวลาช่วงหนึ่ง ควรมีการทำ ความสะอาดบ่อเลี้ยงปลา เพื่อป้องกันการสะสมของจุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุของโรค



รูปที่ 10.11 แสดงตัวอย่างการจัดวางเรียงบ่อเลี้ยงปลา

หลักเกณฑ์ในการออกแบบระบบการเลี้ยงปลา เพื่อให้ได้ปริมาณปลาจำนวนมากและได้น้ำหนักโดยเฉลี่ยมากในระบบการเลี้ยงปลา ก่อนทำการเก็บเกี่ยวปลาขึ้นมาจากระบบการเลี้ยงปลา ควรปฏิบัติตามตารางที่

10.3

ตารางที่ 10.3 หลักเกณฑ์ในการออกแบบระบบการเลี้ยงปลา

หลักเกณฑ์	ค่า
Pond Depth (m)	1-1.5
Pond Width (m)	< 30
Pond Area (m <sup>2</sup> )	400-4,000
Minimum DO at Dawn (mg/L)	1-2
NH <sub>3</sub> Concentration of Pond Water (mg/L)	< 0.02
pH of Pond Water	6.5-9 (Optimum 7-8)
Organic Loading Rate (OLR)	
kg BOD <sub>5</sub> /ha-day	25-75
kg COD/ha-day	50-150
Fish Stocking Density : SD (fish/m <sup>2</sup> )	0.5-50
Recommended Fish Species	Tilapia and Carps
Culture Periods (months)	3-12
Fish Yield (kg/ha-year)	1,000-10,000
Removal Efficiencies (%)	
Suspended Solids	70-85
BOD <sub>5</sub>	75-90
Total Nitrogen	70-80
Phosphorus	80-90



ตัวอย่างที่ 10.1 จงออกแบบระบบการเลี้ยงปลา โดยของเสียดังกล่าวคือ ของเสียจากห้องน้ำ โดยอาศัย ข้อมูลต่อไปนี้ในการออกแบบ

- อัตราการไหลเชิงปริมาตร มีค่า  $10^5 \text{ m}^3/\text{day}$
- ค่าบีโอดีในน้ำเสีย มีค่า  $5,000 \text{ mg/L}$
- ค่าซีโอดีในน้ำเสีย มีค่า  $25,000 \text{ mg/L}$
- ค่าสารอินทรีย์ในโตรเจน มีค่า  $1,500 \text{ mg/L}$
- ค่าแอมโมเนียในโตรเจน มีค่า  $500 \text{ mg/L}$
- ค่าฟอสฟอรัสทั้งหมดในน้ำเสีย มีค่า  $300 \text{ mg/L}$
- ค่าของแข็งทั้งหมดในน้ำเสีย มีค่า  $4.5\%$
- ค่าของแข็งในรูปของสารอินทรีย์ มีค่า  $70\%$  ของแข็งทั้งหมด
- ความหนาแน่นของปลา มีค่า  $5 \text{ No/m}^2$
- ค่าภาระสารอินทรีย์ มีค่า  $50 \text{ kg COD /ha-day}$
- อัตราส่วนความยาวต่อความกว้าง มีค่า  $2$
- อัตราการตายของปลา มีค่า  $20\%$
- ระยะเวลาในการเก็บเกี่ยว มีค่า  $90 \text{ วัน}$
- ระยะเวลาในการตากบ่อให้แห้ง มีค่า  $10 \text{ วัน}$
- บ่อลึกทั้งหมด  $1.5 \text{ เมตร}$
- ระยะเผื่อน้ำล้น มีค่า  $0.5 \text{ เมตร}$
- ความกว้างของบ่อ 1 บ่อ มีค่า  $25 \text{ เมตร}$

วิธีทำ จากสมการที่ 10.5 
$$\text{OLR} = \frac{Q * C_{AO}}{\text{Surface Area}} \quad \dots 10.5$$

จากสมการที่ 10.5 จัดรูปสมการใหม่ เพื่อหาพื้นที่หน้าตัดของบ่อเลี้ยงปลา

จะได้ดังสมการ 
$$\text{Surface Area} = \frac{Q * C_{AO}}{\text{OLR}} \quad \dots 1^*$$

แทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ 1\*

$$\begin{aligned} \text{จะได้ Surface Area} &= \frac{10^5 \text{ m}^3/\text{day} * 25,000 \text{ mg/L}}{50 \text{ kgCOD/ha - day}} * \frac{10^3 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} * \frac{1 \text{ kg}}{10^6 \text{ mg}} \\ &= 50,000 \text{ m}^2 * \frac{1 \text{ ha}}{10^4 \text{ m}^2} \\ &= 5 \text{ ha} \end{aligned}$$

จากโจทย์ อัตราส่วนความยาวต่อความกว้าง (L : W) เท่ากับ 2

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น ความยาวของบ่อเลี้ยงปลา (L)} &= 2 * 25 \text{ m} \\ &= 50 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{พื้นที่หน้าตัดของบ่อ 1 บ่อ (A)} &= L * W \\
&= 50 \text{ m} * 25 \text{ m} \\
&= 1,250 \text{ m}^2 \\
\text{ความลึกของระดับน้ำภายในบ่อ (Water Depth)} &= \text{Total Depth} - \text{Free Board Level} \quad \dots 2* \\
\text{แทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ 2*} & \\
\text{จะได้ความลึกของระดับน้ำภายในบ่อ (Water Depth)} &= 1.5 \text{ m} - 0.5 \text{ m} \\
&= 1.0 \text{ m} \\
\text{จากความสัมพันธ์ที่ว่า จำนวนบ่อเลี้ยงปลา (NO of Ponds)} &= \frac{\text{Total Area}}{\text{Area of 1 Pond}} \quad \dots 3* \\
\text{แทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ 3*} & \\
\text{ดังนั้น จำนวนบ่อเลี้ยงปลา (NO of Ponds)} &= \frac{50,000 \text{ m}^2}{1,250 \text{ m}^2 / \text{Pond}} \\
&= 40 \text{ Ponds} \\
\text{จำนวนปลาที่ได้ใน 1 บ่อ (NO of Fishes in 1 Pond)} &= \text{SD} * \text{Area in 1 Pond} \\
\text{เพราะฉะนั้น จำนวนปลาทั้งหมดที่เลี้ยงได้ ในบ่อ 1 บ่อ} &= (5 \text{ NO} / \text{m}^2) * 1,250 \text{ m}^2 \\
&= 6,250 \text{ Fishes} \\
\text{ระยะเวลาในการเลี้ยงปลา 1 บ่อ} &= 90 \text{ วัน} \\
\text{จากปริมาณของไนโตรเจนทั้งหมด (Total Nitrogen : TN)} &= \sum N * \frac{Q}{A} \quad \dots 4* \\
\text{แทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ 4*} & \\
\text{จะได้ TN} &= (500 + 1,500) \text{ mg/L} * \frac{10^5 \text{ m}^3/\text{day}}{5 \text{ ha}} * \frac{10^3 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} * \frac{1 \text{ kg}}{10^6 \text{ mg}} \\
&= 4 \text{ kg/ha-day} \\
\text{จากสมการที่ 10.8} & \text{Wt} = 12.032 * \left( \frac{t * N}{SD} \right)^{0.707} \quad \dots 10.8 \\
\text{แทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ 10.8} & \\
\text{จะได้} & \text{Wt} = 12.032 * \left( \frac{3 * 4}{5} \right)^{0.707} \\
&= 22.3 \text{ g/fish} \\
\text{ปริมาณของปลาที่ได้ (Fish Yield)} &= \text{NO of Fishes} * \text{Wt} * (1 - \text{อัตราการตาย}) \quad \dots 5* \\
\text{แทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ 5*} & \\
\text{จะได้ Fish Yield} &= \frac{6,250 \text{ fish}}{1 \text{ pond}} * 22.3 \text{ g / fish} * (1 - 0.20) * \frac{1 \text{ kg}}{10^3 \text{ g}} \\
&= 111.5 \text{ kg/Pond} - 100 \text{ days} \\
&\approx 112 \text{ kg/Pond} - 100 \text{ days} \\
&= 112 \frac{\text{kg}}{\text{Pond} - 100 \text{ days}} * \frac{365 \text{ days}}{1 \text{ year}}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= 408.8 \frac{\text{kg}}{\text{Pond} - 1 \text{ Year}} \\
&= 408.8 \frac{\text{kg}}{\text{Pond} - 1 \text{ Year}} * \frac{1 \text{ Pond}}{1,250 \text{ m}^2} * \frac{10^4 \text{ m}^2}{1 \text{ ha}} * 40 \text{ Ponds} \\
&= 16,352 \text{ kg / Year}
\end{aligned}$$

จากสมการที่ 10.7      DOD =  $10.745 * e^{[-(0.017*t+0.002*Lc)]}$       ....10.7

จากค่า                      Lc = COD Loading Rate \* Surface Area 1 pond \*  $\frac{t}{V}$       ....6\*

แทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ 6\*

จะได้                      Lc =  $50 \frac{\text{kg COD}}{\text{ha} - \text{day}} * 1,250 \text{ m}^2 * \frac{90 \text{ days}}{25 \text{ m} * 50 \text{ m} * 1 \text{ m}} * \frac{1 \text{ ha}}{10^4 \text{ m}^2}$

$$\begin{aligned}
&= 0.45 \frac{\text{kg COD}}{\text{m}^3} * \frac{200 \text{ m}^3}{200 \text{ m}^3} \\
&= 90 \frac{\text{kg COD}}{200 \text{ m}^3}
\end{aligned}$$

แทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ 10.7

จะได้                      DOD =  $10.745 * e^{[-(0.017*90+0.002*90)]}$

$$= 1.94 \text{ mg/L}$$

### การใช้ประโยชน์จากปลา (Waste - Grown Fish) ได้แก่

1. ใช้ในการบริโภค โดยทั่วไปโปรตีนที่มีอยู่ในปลา อยู่ในช่วง 74-89%
2. ใช้เป็นอาหารของมนุษย์
3. ของเสียที่เหลือจากการใช้ (กิน) ของปลา ในสัตว์ชนิดอื่นๆ หรือบ่อเลี้ยงปลาอื่นๆ

อย่างไรก็ตามการใช้ประโยชน์จากปลา ควรพิจารณาปัจจัยดังต่อไปนี้ คือ

1. ไม่มีเชื้อพยาธิ หรือไข่ของพยาธิในวงจรชีวิตของปลา
2. ไม่มีเชื้อพยาธิ หรือไข่ของพยาธิในวงจรชีวิตที่เกี่ยวข้องในห่วงโซ่อาหารที่มนุษย์ต้องบริโภค
3. ไม่มีการปนเปื้อนของเชื้อโรคต่างๆ ภายในบ่อเลี้ยงปลา

## แบบฝึกหัดเพิ่มความเข้าใจ

1. จากข้อมูลข้างล่าง ใช้ประกอบการคำนวณ

- อัตราการไหลของน้ำเสียที่ไหลบ่อเลี้ยงปลา เท่ากับ  $10 \text{ m}^3/\text{day}$
- ค่าบีโอดีในน้ำเสีย เท่ากับ  $5,000 \text{ mg/L}$
- ค่าซีโอดีในน้ำเสีย เท่ากับ  $25,000 \text{ mg/L}$
- ค่าสารอินทรีย์ในโตรเจนในน้ำเสีย เท่ากับ  $1,200 \text{ mg/L}$
- ค่าแอมโมเนียในโตรเจนในน้ำเสีย เท่ากับ  $800 \text{ mg/L}$
- ค่าฟอสฟอรัสในน้ำเสีย เท่ากับ  $500 \text{ mg/L}$
- ค่าของแข็งทั้งหมดในน้ำเสีย เท่ากับ  $300 \text{ mg/L}$
- ค่าของแข็งทั้งหมดในรูปของสารอินทรีย์ เท่ากับ 70% ของของแข็งทั้งหมด
- ความหนาแน่นของปลาที่ทำการเลี้ยง เท่ากับ 5 ตัวต่อตารางเมตร
- ค่าภาระสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดี เท่ากับ  $50 \text{ kgCOD/ha-day}$  กำหนดให้  $1 \text{ ha} = 10^4 \text{ m}^2$
- อัตราส่วนความยาวต่อความกว้างของบ่อเลี้ยงปลา เท่ากับ 2
- บ่อเลี้ยงปลาแต่ละบ่อ มีความกว้าง เท่ากับ 25 เมตร
- อัตราการตายของปลา เท่ากับ 10% ของปลาทั้งหมดที่ทำการเลี้ยง
- ระยะเวลาในการเลี้ยงปลา ก่อนทำการเก็บเกี่ยว เท่ากับ 90 วัน
- ระยะเวลาในภาคตากบ่อ ก่อนทำการเลี้ยงปลาในรอบต่อไป ใช้เวลาทั้งสิ้น 10 วัน
- ระดับน้ำภายในบ่อลึก 1.2 เมตร
- ระดับผิวน้ำดิน (Free Board Level) เท่ากับ 0.30 เมตร

อยากทราบว่า

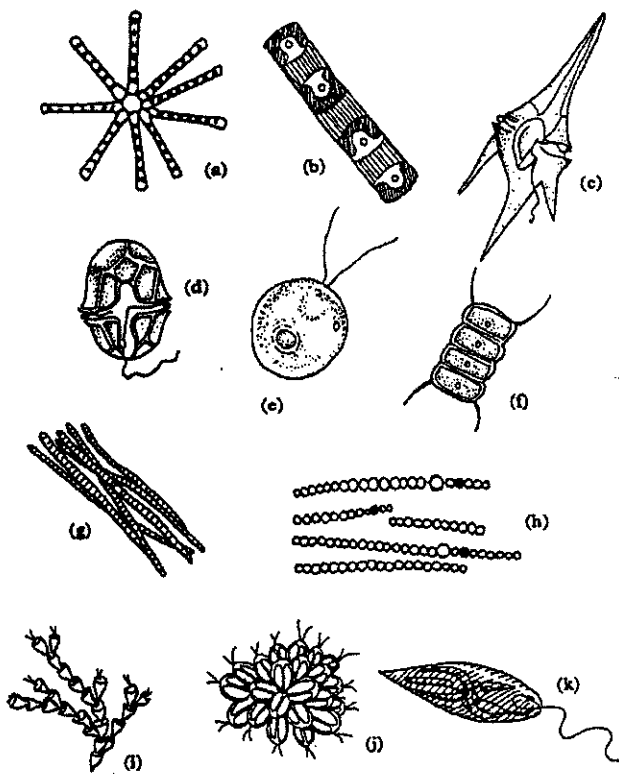
1. จำนวนบ่อเลี้ยงปลา มีทั้งสิ้นกี่บ่อ
2. ความลึกทั้งสิ้นของบ่อเลี้ยงปลา มีค่ากี่เมตร
3. บ่อที่ทำการเลี้ยงปลา มีความกว้าง ความยาวกี่เมตร
4. น้ำหนักทั้งสิ้นของปลาที่เลี้ยงรอดจนถึงระยะเวลาทำการเก็บเกี่ยว ภายในระยะเวลาดังกล่าว มีค่ากี่กิโลกรัม
5. ค่าการละลายของออกซิเจนในบ่อเลี้ยงปลา มีค่ากี่  $\text{mg/L}$

# บทที่ 11

## การผลิตสาหร่าย (Algae Production)

สาหร่ายเป็นสิ่งมีชีวิตซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มของสัตว์เซลล์เดียว โดยช่วยปรับสภาพน้ำในแหล่งน้ำ  
สาธารณะ ซึ่งพบเห็นได้ง่ายตามแหล่งน้ำธรรมชาติ สาหร่ายแบ่งได้ 2 ประเภท คือ

1. สาหร่ายที่อยู่ในกลุ่มของพืช (Planktonic Algae) ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 11.1
2. สาหร่ายที่อยู่ในกลุ่มของสัตว์ (Zooplanktonic Algae)



รูปที่ 11.1 แสดงประเภทของสาหร่ายที่อยู่ในกลุ่มของพืช

- a. Asterionella   b. Skeletonema   c. Dinoflagellatesc. Ceratium   d. Peridinium : Green Algae  
e. Chlamydomonas   f. Scenedesmus : Blue Green Algae   g. Aphanizomenon  
h. Anabaena : Chrysophytes   i. Dinobryon   j. Synura : Euglenods   k. Euglena

ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะสาหร่ายในกลุ่มของพืชเท่านั้น เพราะสาหร่ายกลุ่มนี้มีประโยชน์ต่อสิ่งมีชีวิต  
ค่อนข้างมาก

นักชีววิทยาแบ่งสาหร่ายออกเป็น 2 กลุ่มดังที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยใช้หลักเกณฑ์ต่อไปนี้ คือ

1. ความสามารถในการสังเคราะห์แสง (Synthesis Process)
2. ชนิดของเม็ดสีภายในเซลล์ของสาหร่าย (Pigment)
3. โครงสร้างของสาหร่าย หรือรูปร่างของสาหร่าย (Structure)

สาหร่ายแบ่งได้ 7 ประเภท ตามชนิดของเม็ดสีที่มีอยู่ภายในเซลล์ของสาหร่าย ดังแสดงไว้ในตารางที่ 11.1

ตารางที่ 11.1 ประเภทของสาหร่าย ซึ่งแบ่งตามชนิดของเม็ดสี

Phylum	Common name and species	Pigmentation	Other characteristics
Cynophyta	Blue-green algae : Spirulina. Oscillatoria, Anabaena	Blue-green : phycocyanin, phycoerythrin chlorophyll a and b	Multicellular or unicellular but usually microscopic : some forms become unicellular in turbulent media, usually with gelatinous sheath.
Euglenophyta	Euglenoids : Euglena	Grass green	Unicellular, motile : lacking cell wall
Chlorophyta	Green algae: Chlorella, Oocystis, Scenedesmus	Grass green chlorophyll a and b	Unicellular, multicellular, a few macroscopic : cell wall of cellulose and pectins
Chrysophyta	Yellow-green to golden brown algae (diatoms) : Diatoma, Navicula. Asterionella	Yellow – green to golden brown : Xanthophylls and carotens may mask the chlorophyll. Chlorophyll a and b	Microscopic, mostly unicellular, includes the large group of diatoms which have a cell wall containing silica
Pyrrophyta	Some are dinoflagellates : Peridinium, Massartia	Yellow – green to dark brown : xanthophylls predominant. Chlorophyll a and c	Unicellular, motile : cellulose cell wall
Phaeophyta	Brown algae : Fucus	Olive green to dark brown : fucoxanthin and other xanthophylls predominant. Chlorophyll a and c	Principally multicellular and marine (seaweeds) : cellulose and pectin cell wall
Rhodophyta	Red algae : Polysiphonia	Red : phycocyanin, phycoerythrin. Chlorophyll a	Some unicellular, mostly multicellular, marine : cellulose and pectin cell wall

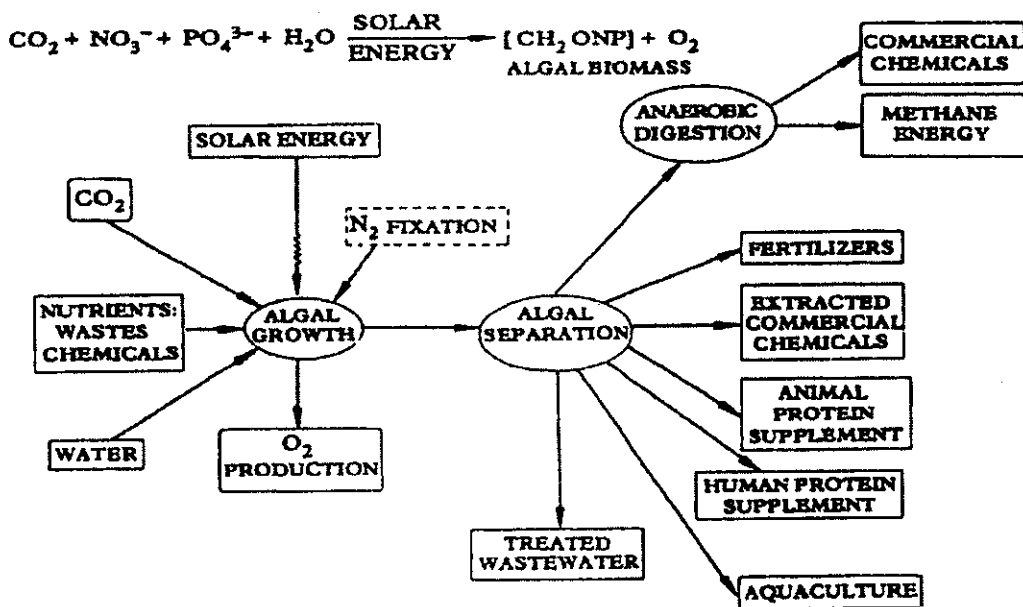
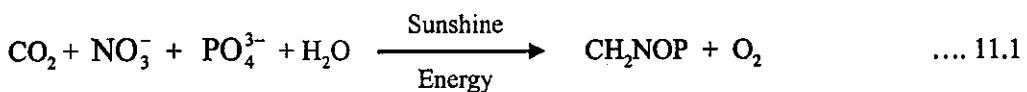
\*\* Adapted from Mitchell (1974), p. 75: reprinted by permission of Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.

Chlorophyll, carotenes and xanthophylls are present in all phyta.

การนำเอาสาหร่ายมาใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ มีเหตุผลหลายประการ ดังนี้

1. สาหร่ายมีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมได้ค่อนข้างดี (Resistance to Environmental Changes)
2. สาหร่ายมีอัตราการเจริญเติบโตสูง (High Growth Rate) อัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายมีค่า 70 ตันต่อเฮกตาร์ต่อปี (Tons/ha-y) หรือในรูปของโปรตีน เท่ากับ 35 ตันต่อเฮกตาร์ต่อปี (Tons/ha-y)
3. มูลค่าของสาหร่ายค่อนข้างสูง (High Nutritive Value) ซึ่งต่างจากสิ่งมีชีวิตอื่นๆ ที่นำมาใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย
4. เซลล์สาหร่ายมีส่วนประกอบของโปรตีนค่อนข้างสูง (High Protein Content)
5. สาหร่ายเติบโตในน้ำเสียหรือในแหล่งน้ำดิบได้ดีกว่าสัตว์มีชีวิตอื่นๆ ซึ่งดำรงชีพได้ในสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมเท่านั้น (Ability to Grow in Wastewater หรือ Natural Water Resources)

สาหร่ายต่างจากสิ่งมีชีวิตทั่วไป เพราะสาหร่ายส่วนใหญ่มีเม็ดสีจึงทำการสังเคราะห์แสงได้ในช่วงกลางวัน หรือในช่วงที่มีแสง ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ของสาหร่ายที่เกิดขึ้น เขียนได้ดังสมการที่ 11.1 กลไกของปฏิกิริยาการสังเคราะห์ของสาหร่าย จากการใช้สารตั้งต้นหลายชนิดและการนำสาหร่ายไปใช้ประโยชน์ได้หลายทาง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 11.2



รูปที่ 11.2 กลไกของปฏิกิริยาการสังเคราะห์ของสาหร่าย และการนำสาหร่ายไปใช้ประโยชน์

กลไกของปฏิกิริยาการสังเคราะห์ของสาหร่ายเริ่มต้นจากการนำเอาก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ สารอาหารที่มีอยู่ในน้ำเสียหรือในแหล่งน้ำคิบหรือในแหล่งน้ำอื่นๆ จากรูปที่ 11.2 เพราะสาหร่ายอยู่ได้ในสภาวะที่มีความชื้นเหมาะสม ในกรณีที่มีปริมาณไนโตรเจนภายในแหล่งน้ำหรือในอาหารที่มีอยู่ในแหล่งน้ำ มีค่าไม่เพียงพอสาหร่าย สามารถตรึงเอาไนโตรเจนจากอากาศมาเก็บไว้ในเซลล์ เพื่อใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสง กระบวนการเรียกว่า กระบวนการตรึงไนโตรเจน (Nitrogen Fixation) จากนั้นสาหร่ายเอาเม็ดสีมาใช้ในกระบวนการสังเคราะห์โดยมีแสงแดดช่วยเร่งอัตราการสังเคราะห์แสง สิ่งที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์แสง คือ เซลล์ใหม่ของสาหร่ายและปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำเพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้คุณภาพของน้ำเสียหรือแหล่งน้ำคิบมีค่าดีขึ้น

เนื่องจากสาหร่ายเป็นสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก บางชนิดมองด้วยตาเปล่าได้ โดยทั่วไปแล้วสาหร่ายมักอยู่ในรูปของของแข็ง ดังนั้นหากไม่มีการแยกเอาสาหร่ายออกจากน้ำทิ้ง ปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำทิ้งมักมีการปนเปื้อนของสาหร่าย จึงทำให้ปริมาณของแข็งแขวนลอยมีค่าเกินเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง สาหร่ายที่แยกออกจากน้ำทิ้งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายทาง เช่น เติมนลงในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย เพื่อให้สาหร่ายช่วยบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการทางวิธีชีวภาพหรือย่อยสลายเซลล์สาหร่ายด้วยกระบวนการเผาไหม้ ทำให้ได้พลังงานจากการเผาไหม้ หรือกระบวนการออกซิเดชัน นอกจากนี้แล้วยังได้สารเคมีที่เป็นส่วนประกอบของสาหร่ายที่เหลือจากกระบวนการเผาไหม้ ซึ่งนำไปใช้ประโยชน์ได้มากมาย เช่น นำไปผสมกับดิน เพื่อเพิ่มสารอาหารให้แก่ดิน หรือใช้เป็นวัตถุปรุงแต่งคุณภาพดิน นำใช้เป็นอาหารเลี้ยงสัตว์ หรืออาจผสมลงในสูตรอาหารเลี้ยงสัตว์ การสกัดเอาโปรตีนออกจากเซลล์สาหร่าย เพื่อใช้เป็นอาหารเสริมสำหรับผู้ป่วยที่มีความต้องการโปรตีน เพราะร่างกายของผู้ป่วยเหล่านั้นไม่สามารถย่อยสลายโปรตีนได้ตามธรรมชาติ และนำไปในการปรับสภาพของบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ เช่น บ่อเลี้ยงกุ้ง เป็นต้น

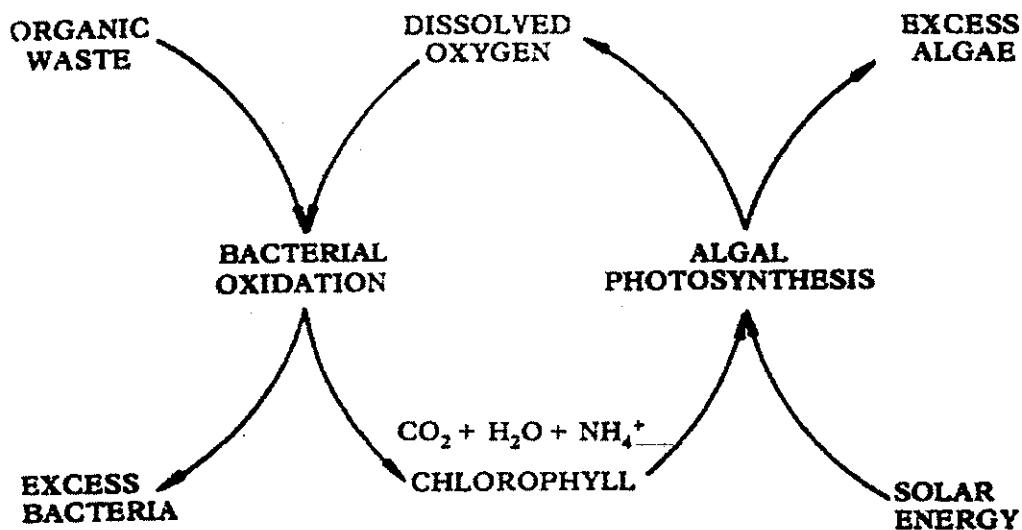
**ระบบการผลิตสาหร่าย แบ่งออกได้ 3 ระบบ ตามแหล่งที่มาของสาหร่าย คือ**

1. **ระบบการคัดเลือกเซลล์สาหร่ายจากแหล่งน้ำคิบ (Selection Algae Strain from the Fresh Water)** การผลิตสาหร่ายด้วยระบบนี้ จะมีการเติมสารอาหารเสริมสร้างที่จำเป็นลงในภาชนะที่ทำการเลี้ยงสาหร่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งธาตุไนโตรเจนและฟอสฟอรัส เพื่อให้ปริมาณสารอาหารดังกล่าวเพียงพอต่อการเจริญเติบโตของเซลล์สาหร่าย ในกรณีที่องค์ประกอบของคาร์บอนในน้ำมีค่าน้อย มักทำการเติมสารประกอบคาร์บอนลงไป เพื่อเพิ่มปริมาณสารประกอบคาร์บอนให้เพียงพอต่อความต้องการในการสร้างเซลล์สาหร่าย
2. **ระบบการผลิตสาหร่ายในน้ำเสียโดยตรง (Direct Algae Production in the Wastewater)** การผลิตสาหร่ายระบบนี้ไม่มีการเติมสารอาหารเสริมสร้างและคาร์บอนลงในน้ำเสีย เพราะในน้ำเสียทั่วไปมีสารดังกล่าวค่อนข้างมากอยู่แล้ว นอกจากนี้สาหร่ายที่ทำการผลิตได้ด้วยระบบนี้ ยังมีมากกว่าสาหร่ายที่เกิดขึ้นมากกว่า 1 ชนิด



3. ระบบการผลิตสาหร่ายภายในห้องปฏิบัติการหรือด้วยสูตรอาหารทางเคมี (Cultivation of Algae in the Laboratory หรือ With Chemical Nutrient) ระบบการผลิตสาหร่ายแบบนี้มักทำการเติมสูตรอาหารเสริมสร้างที่เรียกว่า Autotrophic Medium ปริมาณสาหร่ายที่ทำการผลิตได้ด้วยระบบนี้มีค่าค่อนข้างสูง นอกจากนี้แล้วการผลิตสาหร่ายด้วยระบบนี้สามารถทำการผลิตสาหร่ายเฉพาะบางสายพันธุ์ตามต้องการได้อีกด้วย

การเปลี่ยนแปลงปริมาณสาหร่ายและการใช้สารอาหารของระบบการผลิตสาหร่าย แสดงไว้ในรูปที่ 11.3

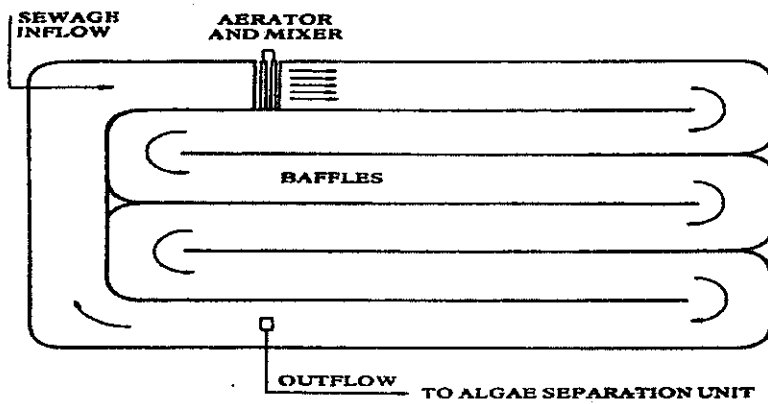


รูปที่ 11.3 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของสาหร่าย สารอาหาร ของกระบวนการผลิตสาหร่าย

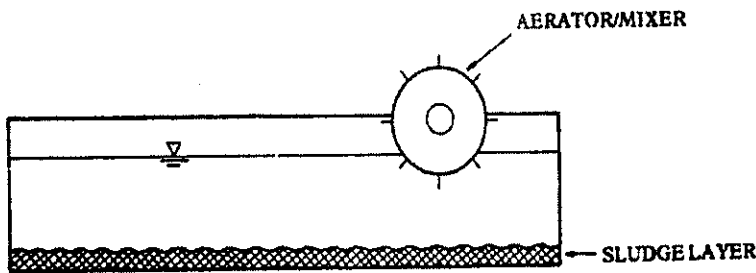
ปริมาณสาหร่ายที่ได้จากระบบการผลิตสาหร่ายตามธรรมชาติมีค่าน้อย ซึ่งไม่เพียงพอต่อความต้องการ ประกอบกับการผลิตในลักษณะดังกล่าวใช้เวลานาน ซึ่งไม่คุ้มค่าในการลงทุนเพื่อทำการผลิตสาหร่าย ในทางเศรษฐศาสตร์ แนวทางใหม่ในการเพิ่มปริมาณสาหร่ายได้อย่างรวดเร็วตามความต้องการและลดระยะเวลาในการผลิตสาหร่ายลง เรียกว่า ระบบการผลิตสาหร่ายแบบรวดเร็ว (High Rate Algae Production) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 11.4

ระบบการผลิตสาหร่ายแบบรวดเร็วประกอบไปด้วยส่วนสำคัญ 3 ประการ คือ

1. ถังผลิตสาหร่ายแบบรวดเร็ว (High Rate Algae Pond) เป็นถังที่ใช้ในการผลิตสาหร่ายจากน้ำเสียหรือสารอาหารที่เติมลงไปในถังดังกล่าว เพื่อให้สาหร่ายมีการเพิ่มจำนวนอย่างรวดเร็ว
2. แผ่นกั้น (Baffles) เป็นส่วนที่ช่วยให้การเจริญเติบโตของสาหร่ายเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดทั้งถัง
3. ใบกวนหรือระบบการกวน (Turbine หรือ Mixing Operation) ช่วยให้อาหารเกิดการกระจายไปทั่วถัง ทำให้การใช้สารอาหารดังกล่าวของสาหร่ายภายในถังมีค่าเท่ากัน ส่งผลให้การเพิ่มจำนวนสาหร่ายเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ นอกจากนี้แล้วระบบการกวนยังช่วยรักษาอุณหภูมิของน้ำภายในถัง ไม่ให้มีค่าสูงเกินไปอีกด้วย



ก. ภาพแปลน



ข. ภาพตัด

รูปที่ 11.4 ถังผลิตสาหร่ายแบบรวดเร็ว

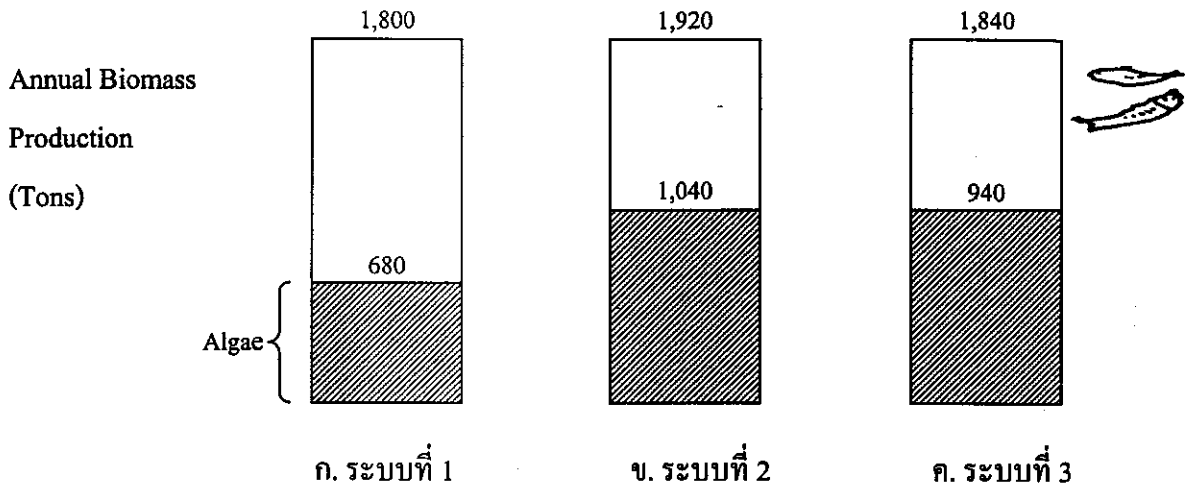
ก. ภาพแปลน

ข. ภาพตัด

ระบบการผลิตสาหร่ายแบบรวดเร็ว แบ่งย่อยได้ 3 ลักษณะ ตามลักษณะของการเดินระบบ คือ

1. ระบบการควบคุมระยะเวลาในการกักเก็บให้มีค่าคงที่ (Constant Retention Time) ระบบนี้ต้องควบคุมเวลาในการกักเก็บน้ำเสียภายในถังเลี้ยงสาหร่ายให้มีค่าคงที่ตลอดเวลา หรืออัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบการเลี้ยงให้มีค่าคงที่ เพราะกระบวนการผลิตสาหร่ายขึ้นกับปัจจัยหลายประการ เช่น ความเข้มของแสงแดด อัตราการไหลเชิงปริมาตร สารอาหารที่เติม เป็นต้น เนื่องจากการควบคุมเฉพาะอัตราการไหลเชิงปริมาตร ปริมาณสารอาหารที่ใช้ในการเลี้ยงสาหร่ายอาจมีค่าไม่เพียงพอ ทำให้สาหร่ายเพิ่มจำนวนได้น้อยหรือในกรณีที่สารอาหารมากเกินไป สาหร่ายอาจใช้สารอาหารดังกล่าวไม่ทัน ทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตสาหร่ายไม่เป็นไปตามสัดส่วนของอาหารที่ใส่ ซึ่งปริมาณการผลิตสาหร่ายด้วยวิธีนี้ แสดงไว้ในรูปที่ 11.5 (ก)
2. ระบบการเปลี่ยนแปลงระดับความลึกของน้ำภายในถัง (Variable Depth) การเลี้ยงสาหร่ายด้วยระบบนี้เป็นการแก้ไขข้อบกพร่องของระบบการผลิตสาหร่ายระบบที่ 1 เพราะจากการเปลี่ยนแปลงระดับความลึกของน้ำภายในถังมีผลต่อการส่งแสงผ่านลงไปยังสาหร่าย กล่าวคือ เมื่อระดับน้ำภายในถังลดลงกระบวนการสังเคราะห์แสงมักเกิดได้ดีเพราะแสงสามารถส่องไปทั่วบ่อ และเมื่อความเข้มข้นของสารอาหารในน้ำเสียน้ำมีค่ามากเกินไป ควรทำการเจือจางสารอาหารหรือลดความเข้มข้นของมลสารที่มีอยู่ในน้ำเสียลง ปริมาณของสาหร่ายที่ได้จากการเลี้ยงด้วยระบบนี้จึงมักมีค่ามากที่สุด ดังแสดงไว้ในรูปที่ 11.5 (ข) เพราะมีการรักษาสภาพแวดล้อมให้เหมาะต่อการสังเคราะห์แสงของสาหร่าย
3. การใช้ระบบการเลี้ยงแบบผสม (Dual Function) เป็นการใช้ผลิตสาหร่ายด้วยระบบการผลิตสาหร่ายทั้ง 2 ระบบแรกร่วมกัน โดยควบคุมทั้งเวลาในการกักเก็บให้มีค่าคงที่และระดับความลึกของน้ำภายในถังเลี้ยงสาหร่าย ระบบการเลี้ยงสาหร่ายแบบนี้จึงเป็นการนำเอาข้อดีของแต่ละระบบมารวมกัน เนื่องจากการควบคุมระบบการผลิตสาหร่ายทั้งในส่วนจากระดับความลึกจากระดับน้ำภายในถัง อาจทำให้สาหร่ายได้รับปริมาณสารอาหารเสริมสร้างไม่เพียงพอ หรือเกิดการปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงทั้ง 2 ลักษณะไม่ทัน อาจทำให้สาหร่ายต้องใช้เวลาช่วงหนึ่งในการปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงที่อาจเกิดขึ้นทั้ง 2 ลักษณะพร้อมกัน ปริมาณสาหร่ายที่ผลิตด้วยระบบนี้จึงมีค่ามากกว่าระบบที่ 1 แต่ใกล้เคียงหรือเท่ากับระบบที่ 2 ดังแสดงไว้ในรูปที่ 11.5 (ค)

Area (km <sup>2</sup> )	0.100	0.125	0.100 / 0.100
Retention Time (days)	3	2.5-5	3/6
Depth (m)	0.45	0.3-0.6	0.45



รูปที่ 11.5 เปรียบเทียบปริมาณของสาหร่ายที่เกิดขึ้น ในระบบการผลิตสาหร่ายด้วย

ก. ระบบที่ 1 (ระบบควบคุมระยะเวลาในการกักเก็บให้มีค่าคงที่

(Constant retention time)

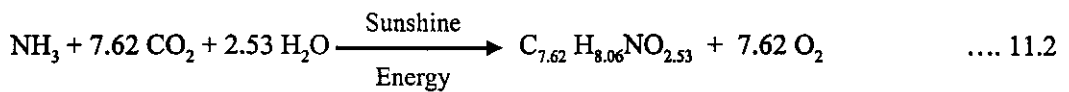
ข. ระบบที่ 2 (ระบบเปลี่ยนแปลงระดับความลึกของน้ำภายในถัง : Variable depth)

ค. ระบบที่ 3 (ระบบผสม : Dual function)

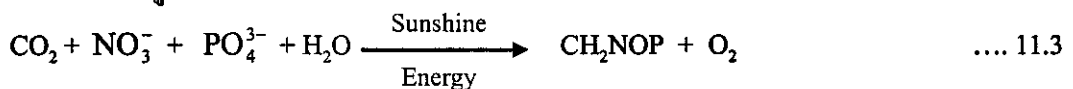
ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตสาหร่าย ได้แก่

1. แหล่งคาร์บอน และอาหารเสริมสร้าง (Carbon & Nutrient Sources)
2. อุณหภูมิ (Temperature)
3. ความเข้มของแสง (Light Intensity)
4. ระบบการกวน หรือวิธีการกวน (Mixing Operation)
5. ความลึกของบ่อ (Pond Depth)
6. ระยะเวลาในการกักเก็บน้ำ (Hydraulic Retention Time : HRT)

- แหล่งของคาร์บอน และอาหารเสริมสร้าง อาหารเสริมสร้างในการเลี้ยงสาหร่าย ได้แก่ สารประกอบไนโตรเจนและฟอสฟอรัส เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วสารประกอบไนโตรเจนมักเติมในรูปของสารประกอบแอมโมเนียหรือสารแอมโมเนีย ซึ่งสาหร่ายนำไปในกระบวนการสังเคราะห์แสงโดยสาหร่ายนำไนโตรเจนที่อยู่ในรูปของแอมโมเนียมาใช้ในการสร้างเซลล์ ปฏิกริยาชีวเคมีที่เกิดขึ้นจากการใช้สารแอมโมเนียในโตรเจนเป็นดังสมการที่ 11.2 สมการดังกล่าวพัฒนาขึ้นมาโดย Oswald และGotaas ในปี ค.ศ. 1956 อย่างไรก็ตามปริมาณแอมโมเนียในถังเลี้ยงสาหร่ายควรมีการควบคุม เพราะสาหร่ายนำไปใช้ประโยชน์ได้เพียง 10% ของเซลล์สาหร่าย เช่น ความเข้มข้นของสาหร่าย มีค่า 200 mg/L ปริมาณไนโตรเจนที่ใช้ไปโดยสาหร่าย มีค่า 20 mg/L ส่วนปริมาณของไนโตรเจนที่เกินไป อาจมีผลต่อ หากปริมาณไนโตรเจนในน้ำภายในถัง มีค่ามากเกินไป อาจเกิดสภาพเป็นพิษต่อสาหร่ายขึ้นได้



ส่วนฟอสฟอรัสที่เติมลงในถังนั้นไม่มีการจำกัดปริมาณ เนื่องจากสาหร่ายนำไปใช้ประโยชน์ได้ค่อนข้างง่าย ถึงแม้ว่าสาหร่ายต้องการในปริมาณที่น้อยกว่าไนโตรเจนก็ตาม แต่ผลของฟอสฟอรัสที่ตกค้างในถังเลี้ยงสาหร่ายไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อเซลล์สาหร่าย ปฏิกริยาชีวเคมีที่เกิดขึ้นจากการใช้ฟอสฟอรัส เป็นดังสมการที่ 11.3 ซึ่งเป็นการพิจารณาการใช้ทั้งธาตุไนโตรเจนและฟอสฟอรัส ในกระบวนการสังเคราะห์แสง สมการดังกล่าวถูกพัฒนาขึ้นมาโดย Oswald ในปี ค.ศ. 1988



อย่างไรก็ตามองค์ประกอบของธาตุฟอสฟอรัส ที่ช่วยในการสร้างเซลล์สาหร่าย มีค่า 1.5% และธาตุอื่นๆ ที่ช่วยในการสร้างความแข็งแรงของเซลล์สาหร่าย ได้แก่ แมกนีเซียม มีค่าประมาณ 1% และโปแตสเซียมมีค่าประมาณ 0.5%

- ระดับความลึกของน้ำภายในถังเลี้ยงสาหร่าย มีผลกระทบโดยตรงต่อการส่องผ่านของแสงถ้าระดับน้ำมีความลึกไม่มาก แสงแดดสามารถส่องผ่านลงไปถึงพื้นของถังได้ ทำให้การสังเคราะห์แสงเกิดได้ดี ถ้าความเข้มของแสงแดดมากเกินไปอาจทำให้สาหร่ายตายได้ เพราะอุณหภูมิของน้ำมีค่าสูงเกินไป ระดับความลึกของน้ำภายในถังเลี้ยงสาหร่าย ควรอยู่ในช่วง 0.3 ถึง 0.6 เมตร สำหรับระบบการผลิตสาหร่ายแบบรวดเร็ว สมการที่ใช้คำนวณหาความเข้มของแสงที่ระดับความลึกของระดับน้ำ พัฒนาโดย Oswald และGotaas ในปี ค.ศ. 1957 ซึ่งเรียกว่า กฎของเบียร์ แลมเบิร์ต (Beer Lambert 's Law) ดังแสดงไว้ในสมการที่ 11.4

$$\frac{I_z}{I_i} = e^{-Ca * \alpha * z} \quad \dots 11.4$$

เมื่อ	Ii	คือ	ความเข้มของแสงแคดที่ผิวหน้า มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 20,000 ฟุตแรงเทียน (ft-candle)
	Iz	คือ	ความเข้มของแสงแคด ซึ่งทำการวัดที่ระดับความลึก z เมตร หน่วยฟุตแรงเทียน (ft-candle)
	$\alpha$	คือ	สัมประสิทธิ์การดูดซับแสงแคดของสาหร่าย มีค่าอยู่ในช่วง $1 \cdot 10^{-3}$ ถึง $2 \cdot 10^{-3}$ นิยมกำหนดให้เท่ากับ $1.5 \cdot 10^{-3}$
	Ca	คือ	ความเข้มข้นของสาหร่าย หน่วย mg/L
	z	คือ	ระดับความลึกของระดับน้ำภายในถัง หน่วยเมตร

สมมติว่า ที่ระดับความลึกของน้ำภายในถังเลี้ยงสาหร่าย เท่ากับ z เมตร แสงแคดมีการส่องผ่านน้อยมาก หรือถูกดูดซับหมด ดังนั้นสมการที่ 11.4 เขียนใหม่ได้ตั้งสมการที่ 11.5

$$z = \frac{\ln(I_i)}{Ca \cdot \alpha} \quad \dots 11.5$$

จากการทดลองของ Oswald ในปี ค.ศ. 1963 พบว่า ระดับความลึกของน้ำภายในถัง ในช่วง 8 ถึง 10 นิ้ว หรือในช่วง 20 เซนติเมตร ถึง 25 เซนติเมตร อัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายมีค่ามากที่สุด อย่างไรก็ตามระดับน้ำภายในถังผลิตสาหร่าย ควรมากกว่า 20 เซนติเมตร เพราะช่วยรักษาปริมาณของสาหร่าย และระยะเวลาในการกักเก็บสาหร่ายให้เป็นไปตามต้องการ

แฟลคเตอร์แปลงหน่วยที่ช่วยเปลี่ยนค่าความร้อนในรูปของแรงเทียน ไปเป็นค่าความร้อนที่ได้จากแสงแคด หรือแสงแคดเทียม แสดงไว้ในตารางที่ 11.2 และค่าความร้อนเทียบเท่าของสาหร่าย จากการศึกษานักวิทยาศาสตร์ ซึ่งทำการทดลองที่ความยาวคลื่นแสง ในช่วง 400-700 นาโนเมตร เมื่อ 1 นาโนเมตร เท่ากับ  $10^{-9}$  เมตร แสดงไว้ในตารางที่ 11.3

ตารางที่ 11.2 แฟลคเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณเกี่ยวกับค่าความร้อนของแสงแคด หรือแสงแคดเทียม

หน่วย (Units)	$\frac{\text{g-cal}}{\text{cm}^2 - \text{day}}$	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ หรือ $\frac{\text{J}}{\text{m}^2 - \text{s}}$	$\frac{\text{Btu}}{\text{ft}^2 - \text{h}}$
$\frac{\text{g-cal}}{\text{cm}^2 - \text{day}}$	1	0.485	0.154
$\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ หรือ $\frac{\text{J}}{\text{m}^2 - \text{s}}$	2.06	1	0.317
$\frac{\text{Btu}}{\text{ft}^2 - \text{h}}$	6.51	3.155	1

ตารางที่ 11.3 ค่าความร้อนเทียบเท่า

ค่าความร้อนเทียบเท่า	ที่มา
1 ft – candle = 0.0206 g-cal/cm <sup>2</sup> -day	Kreith and Kreider (1978)
1 ft – candle = 0.0936 g-cal/cm <sup>2</sup> -day	Wetzel and Likens (1979)
1 ft – candle = 0.0913 g-cal/cm <sup>2</sup> -day	Golterman (1975)
1 ft – candle = 0.0933 g-cal/cm <sup>2</sup> -day	Coombs and Hall (1982)
1 ft – candle = 0.1119 g-cal/cm <sup>2</sup> -day	Coombs and Hall (1982)
1 ft – candle = 0.0720 g-cal/cm <sup>2</sup> -day	Bickford and Dunn (1972)

- **ระยะเวลาในการกักเก็บน้ำ (HRT)** สมการคำนวณหาเวลาในการกักเก็บน้ำภายในถังผลิตสาหร่าย ซึ่งพัฒนาขึ้นมาโดย Oswald และ Gotaas ในปี ค.ศ. 1957 แสดงไว้ในสมการที่ 11.5 หรือสมการที่ 11.6

$$\text{HRT} = \frac{\text{Ca} \cdot \text{h} \cdot \text{z}}{1,000 \cdot \text{F} \cdot \text{Io} \cdot \text{Tc}} \quad \dots 11.5$$

$$\text{HRT} = \frac{\text{L}_T \cdot \text{h} \cdot \text{z}}{1,000 \cdot \text{F} \cdot \text{Io} \cdot \text{Tc} \cdot \text{P}} \quad \dots 11.6$$

- เมื่อ HRT คือ ระยะเวลาในการกักเก็บน้ำ หน่วยวัน
- h คือ ค่าความร้อนที่ได้จากสาหร่าย หน่วย kg-cal/g  
สำหรับน้ำเสียจากบ้านเรือน ค่าความร้อนจากสาหร่าย เท่ากับ 6 kg-cal/g
- F คือ ประสิทธิภาพของปฏิกิริยาชีวเคมี ของพลังงานแสงแดด ซึ่งเปลี่ยนไปเป็นพลังงานเคมีภายในเซลล์ของสาหร่าย มีค่าเพียง 10% หรือเท่ากับ 0.1 ของพลังงานแสงแดดที่เซลล์สาหร่ายได้รับ
- Io คือ ความเข้มของแสงแดด ที่ถูกดูดซึมลงสู่ได้น้ำ ซึ่งวัดจากผิวน้ำลงไป มีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 800 g-cal/cm<sup>2</sup>-day
- Tc คือ สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนค่าอุณหภูมิ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 11.4 ไม่มีหน่วย
- L<sub>T</sub> คือ ค่าบีโอดีหรือค่าซีโอดีในน้ำเสียหรือน้ำที่ป้อนเข้าสู่ถัง หน่วย mg/L
- p คือ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของออกซิเจนที่เกิดขึ้นต่อน้ำหนักของสาหร่ายที่เกิดขึ้น มีค่าอยู่ในช่วง 1.25 ถึง 1.75 ในการออกแบบนิยมใช้ค่าดังกล่าวเท่ากับ 1.58

ตารางที่ 11.4 ค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนค่าอุณหภูมิ

อุณหภูมิเฉลี่ย (Mean temperature)		Photosynthetic temperature coefficient : Tc
C	F	
0	32	-
5	41	0.26
10	50	0.49
15	59	0.87
20	68	1.00
25	77	0.91
30	86	0.82
35	95	0.69
40	104	-

จากสมการที่ 11.5 และสมการที่ 11.6 เมื่อจัดรูปสมการใหม่และลดจำนวนตัวแปรลง จะได้ดังสมการที่ 11.8

$$Ca = \frac{L_T}{p} \quad \dots 11.8$$

- **ภาระสารอินทรีย์ (Organic Loading Rate : OLR)** ค่าภาระสารอินทรีย์มีผลโดยตรงต่อการนำเอาสารอาหารไปใช้ประโยชน์โดยสาหร่าย เพราะค่าภาระสารอินทรีย์ที่มากเกินไปอาจทำให้เกิดสภาพไร้อากาศขึ้นได้ และยังขัดขวางการส่องผ่านแสงแดดด้วย ในทำนองตรงกันข้ามค่าภาระสารอินทรีย์ที่น้อยเกินไป อาจทำให้สาหร่ายขาดแคลนอาหาร การเจริญเติบโตของสาหร่ายเป็นไปได้ จากรายงานการวิจัยของ HUS ในปี ค.ศ. 1970 ซึ่งศึกษาอัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายที่เกิดขึ้นจากการผลิตสาหร่ายจากของเสียจากบ้านเรือนของประเทศไทย โดยลดความเข้มข้นของของเสียดังกล่าวเสียก่อน ผลจากการทดลอง พบว่า สภาพที่เหมาะสมของการทดลอง เป็นดังนี้ ระดับความลึกของน้ำภายในถัง เท่ากับ 0.35 เมตร และเวลากักเก็บน้ำเสีย เท่ากับ 1.5 วัน ที่ค่าภาระสารอินทรีย์ เท่ากับ 300 Lb/Acre-day หรือ 336 kg/ha-day ประสิทธิภาพของการลดค่าบีโอดีสูงถึง 95% ค่าบีโอดีในน้ำทิ้งที่ออกจากถังผลิตสาหร่าย ไม่ต่ำกว่า 10 mg/L และอัตราการเพิ่มปริมาณสาหร่ายที่เกิดขึ้น เท่ากับ 350 Lb/Acre-day หรือ 390 kg/ha-day



- กระบวนการกวนและการหมุนเวียนการไหลของน้ำภายในถัง (Mixing Operation & Recirculation) สำหรับในระบบการผลิตแบบรวดเร็ว สำหรับอยู่ในรูปของของแข็งแขวนลอยและแบคทีเรียที่มีอยู่ในน้ำ จะช่วยย่อยสลายสารอินทรีย์ที่อยู่ในรูปของฟล็อกหรือของแข็งแขวนลอยขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพของกระบวนการกวนมีค่าลดลง ความเร็วของน้ำ ควรมีค่า 15 เซนติเมตรต่อวินาที

ออกแบบระบบการผลิตสาหร่ายแบบรวดเร็ว ควรใช้หลักเกณฑ์ในการออกแบบดังตารางที่ 11.5

ตารางที่ 11.5 หลักเกณฑ์ในการออกแบบระบบการผลิตสาหร่ายแบบรวดเร็ว

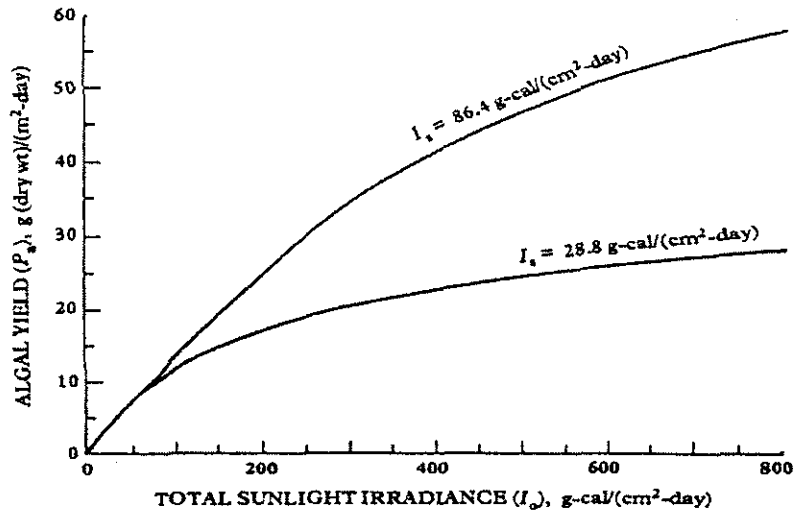
Pond depth (z) : m	0.3 – 0.6
HRT : days	1.5 – 8
HRT / z : day/m	6 – 12
BOD loading : kg/ha-m	75 – 300
Mixing linear velocity : cm/s	5 – 15
Channel length/width ratio	มากกว่า 2

อัตราการผลิตสาหร่าย ปริมาณของสาหร่ายที่เกิดขึ้นคำนวณหาได้จากสมการที่ 11.9 ซึ่งทำการพัฒนาโดย Goldman ในปี ค.ศ. 1979

$$Pa = 0.28 * Is * \ln\left(0.45 * \frac{Io}{Is} + 1\right) \quad \dots 11.9$$

เมื่อ Pa คือ อัตราการผลิตสาหร่ายในรูปน้ำหนักแห้ง หน่วย  $g/cm^2\text{-day}$  และบางครั้งอาจหาค่าดังกล่าวได้จากรูปที่ 11.6 ซึ่งประกอบไปด้วยกราฟ 2 เส้น คือ ที่ความเข้มข้นตัวของแสงแดด  $86.4 g\text{-cal}/cm^2\text{-day}$  และ  $28.8 g\text{-cal}/cm^2\text{-day}$

Is คือ ความเข้มของแสงแดด หน่วย  $g\text{-cal}/cm^2\text{-day}$  ค่าดังกล่าวขึ้นกับอุณหภูมิของอากาศในขณะนั้น ดังแสดงไว้ในตารางที่ 11.6



รูปที่ 11.6 ค่าอัตราการผลิตสาหร่าย ที่ความเข้มของแสงแดดอิมิตัว เท่ากับ 86.4 g-cal/ cm<sup>2</sup>-day และ 28.8 g-cal/ cm<sup>2</sup>-day ตามลำดับ

ตารางที่ 11.6 ความเข้มอิมิตัวของแสงแดด ที่อุณหภูมิต่างๆ

Species	Temperature (C)	I <sub>s</sub>	
		Illuminance (ft-candle)	Irradiance (g-cal/cm <sup>2</sup> -day)
<b>Freshwater</b>			
Chlororella pyrenoidosa	25	-	51.8
	25	500	36.0
	26	-	82.1
Chlorella vulgaris	25	250	18.0
Scenedesmus obliquus	25	500	36.0
Chlamydomonas reinhardtii	25	500	36.0
Chlorella (7-11-05)	39	1,400	100.8
<b>Marine</b>			
Green algae	20	500	36.0
Diatoms	20	1,000	72.0
Dinoflagellates	20	2,500	180.0
Phaeodactylum tricornutum	18	-	82.1

ในปี ค.ศ. 1982 Oron และ Shelef ได้ทำการพัฒนาสมการประมาณค่าความเข้มข้นของสาหร่ายที่เกิดขึ้นในระบบการผลิตสาหร่ายแบบรวดเร็ว สมการดังกล่าวเป็นการพิจารณารวมปัจจัยต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อการผลิตสาหร่าย ดังแสดงไว้ในสมการที่ 11.10

$$Ca = a * \left(\frac{HRT}{z}\right)^b * (I_o)^\beta * T^v \quad \dots 11.10$$

เมื่อ T คือ อุณหภูมิของอากาศในขณะนั้น หน่วยองศาเซนเซียส  
a, b,  $\beta$  และ v คือ ค่าคงที่

จากสมการที่ 11.10 ค่าคงที่ที่ต้องการจากการทดลองในครั้งนี้ถึง 4 ค่า (a, b,  $\beta$  และ v) ซึ่งค่าดังกล่าวขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมในขณะนั้น ซึ่งไม่มีความสะดวกมากนักในการประมาณค่าอัตราการเจริญเติบโตของสาหร่าย เพราะต้องหาค่าดังกล่าวข้างต้นทุกครั้ง เมื่อสภาพแวดล้อมมีการเปลี่ยนแปลงไป จึงมีการพัฒนาสมการที่ 11.10 มาเป็นสมการที่ 11.11 เพื่อคำนวณหาความเข้มข้นของสาหร่ายที่ผลิตได้ และสมการหาอัตราการผลิตสาหร่ายในระบบการผลิตสาหร่ายแบบรวดเร็ว เป็นดังสมการที่ 11.12

$$Ca = 0.001475 * \left(\frac{HRT}{z}\right)^{1.71} * (I_o)^{0.70} * T^{1.30} \quad \dots 11.11$$

$$\left. \begin{aligned} Pa &= Ca * \frac{z}{HRT} \\ &= 0.001475 * \left(\frac{HRT}{z}\right)^{0.71} * (I_o)^{0.70} * T^{1.30} \end{aligned} \right\} \quad \dots 11.12$$

จากสมการที่ 11.11 และสมการที่ 11.12 พบว่า ความสัมพันธ์ของอัตราการผลิตสาหร่ายกับค่าภาระสารอินทรีย์ในน้ำเสีย เป็นดังสมการที่ 11.13

$$Pa = \frac{L_T}{p} * \frac{z}{HRT} \quad \dots 11.13$$

ตัวอย่างที่ 11.1 จงออกแบบระบบการผลิตสาหร่ายแบบรวดเร็วจำนวน 1 ใบ ข้อมูลในการออกแบบเป็นดังข้างล่าง

- อัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมของน้ำเสียที่ไหลเข้าถัง เท่ากับ  $500 \text{ m}^3/\text{day}$
- ค่าซีโอดีในน้ำเสีย มีค่าเท่ากับ  $400 \text{ mg/L}$
- ค่า  $p = 1.5 \text{ g O}_2 / \text{g Algae}$
- ประสิทธิภาพของระบบ มีค่าเท่ากับ 0.1
- ค่าสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิเท่ากับ 0.9
- ค่าความเข้มของแสงแดดเริ่มต้น ที่ผิวน้ำ เท่ากับ  $400 \text{ g-cal/cm}^2\text{-day}$
- ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับจำเพาะ เท่ากับ  $1.5 * 10^{-3}$
- กำหนดให้ค่าความร้อนเทียบเท่า  $1\text{ft-candle} = 0.0360 \text{ g-cal/cm}^2\text{-day}$
- ความยาวของถัง เท่ากับ 100 เมตร
- ความกว้างของแผ่นกั้น เท่ากับ 4 เมตร

วิธีทำ จากสมการที่ 11.8 
$$Ca = \frac{L_T}{p} \quad \dots 11.8$$

แทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ 11.8

จะได้ 
$$Ca = \frac{400 \text{ mg/L}}{1.5} = 266.7 \text{ mg/L}$$

จากสมการที่ 11.5 
$$z = \frac{\ln(I_i)}{Ca * \alpha} \quad \dots 11.5$$

ค่าความร้อนเทียบเท่า  $1\text{ft-candle} = 0.0360 \text{ g-cal/cm}^2\text{-day}$

เพราะฉะนั้น ความเข้มของแสงที่ผิวน้ำ 
$$I = \frac{400 \text{ g-cal}}{\text{cm}^2\text{-day}} * \frac{1 \text{ ft candle}}{1 \text{ g-cal/cm}^2\text{-day}} = 11,100 \text{ ft-candle}$$

แทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ 11.5

จะได้ 
$$z = \frac{\ln(11,100)}{266.7 \text{ mg/L} * 1.5 * 10^{-3} \text{ cm-L/mg}} = 23.3 \text{ cm}$$

มีค่าโดยประมาณ 25 เซนติเมตร

จากสมการที่ 11.6 
$$\text{HRT} = \frac{Ca * h * z}{1,000 * F * I_o * T_c} \quad \dots 11.6$$

แทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ 11.6

จะได้ HRT =  $\frac{266.7 \text{ mg/L} * 6 \text{ kg-cal/g} * 25 \text{ cm}}{1,000 * 0.1 * 400 \text{ g-cal/cm}^2 \text{-day} * 0.9}$   
 = 1.11 days  
 มีค่าโดยประมาณ 1.2 days

จากความสัมพันธ์ที่ว่า  $V = Q * t$  .....1\*

แทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ 1\*

จะได้  $V = 500 \text{ m}^3/\text{day} * 1.2 \text{ days}$   
 =  $600 \text{ m}^3$   
 = Surface Area \* Depth

ดังนั้น Surface Area =  $600 \text{ m}^3 / 0.25 \text{ m}$   
 =  $2,400 \text{ m}^2$   
 = ความยาวของถัง \* ความกว้างของถัง .....2\*

แทนค่าที่ทราบค่าลงในสมการที่ 2\*

จะได้ ความกว้างของถัง =  $2,400 \text{ m}^2 / 100 \text{ m}$   
 = 24 m

จากความสัมพันธ์ที่ว่า “จำนวนช่องว่างที่น้ำไหลเท่ากับความกว้างทั้งหมดของถัง/ระยะห่างของช่องว่าง”

เพราะฉะนั้น จำนวนช่องว่าง =  $24 \text{ m} / 4 \text{ m}$   
 = 6 ช่อง (Channels) หรือส่วน (Compartments)

จำนวนแผ่นกั้นขนาดความกว้าง 4 เมตร = 6 - 1 แผ่น  
 = 5 แผ่น

อุณหภูมิของบรรยากาศในขณะนั้น เท่ากับ 30 C

จากสมการที่ 11.11  $Ca = 0.001475 * \left(\frac{HRT}{z}\right)^{1.71} * (Io)^{0.70} * T^{1.30}$  .... 11.10

แทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ 11.11

จะได้  $Ca = 0.001475 * \left(\frac{1.2}{0.25}\right)^{1.71} * (400)^{0.70} * 30^{1.30}$   
 = 119 mg/L

จากสมการที่ 11.12  $Pa = Ca * \frac{z}{HRT}$  ..... 11.12

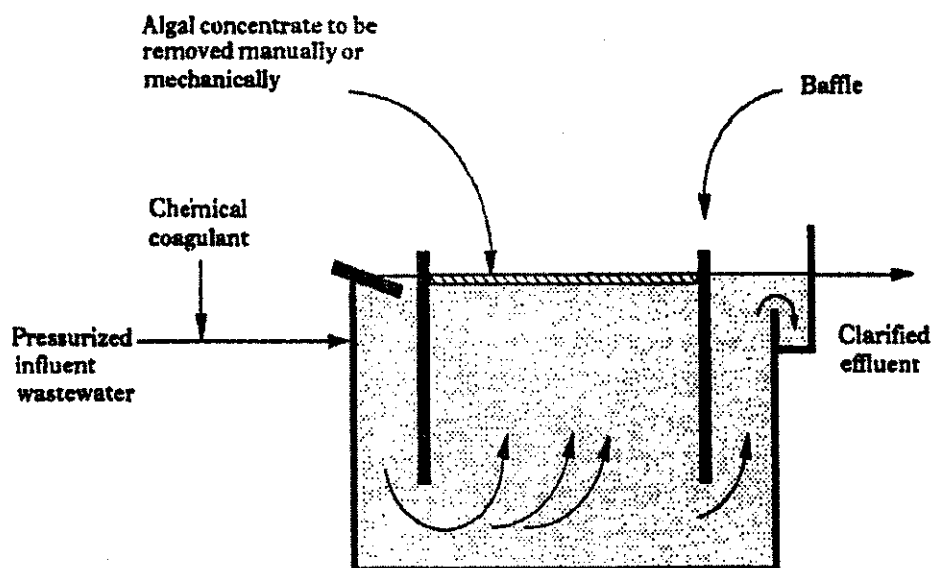
แทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ 11.12

จะได้  $Pa = 119 \text{ mg/L} * \frac{0.25 \text{ m}}{1.2 \text{ day}} * \frac{10^3 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} * \frac{1 \text{ g}}{10^3 \text{ mg}}$   
 =  $24.79 \text{ g/m}^2\text{-day}$   
 มีค่าโดยประมาณ  $25 \text{ g/m}^2\text{-day}$

$$\begin{aligned}
 \text{ปริมาณสาหร่ายทั้งหมดที่ผลิตได้ทั้งสิ้นใน 1 วัน} &= Pa * \text{Surface Area} \\
 \text{เพราะฉะนั้น ปริมาณสาหร่ายทั้งสิ้นที่ผลิตได้} &= \frac{25 \text{ g}}{\text{m}^2 \cdot \text{day}} * 2400 \text{ m}^2 \\
 &= 60,000 \text{ g/day} * (1 \text{ kg} / 10^3 \text{ g}) \\
 &= 60 \text{ kg/day}
 \end{aligned}$$

เทคโนโลยีการเก็บเกี่ยวสาหร่าย (Algae Harvesting Technology) หมายถึง กรรมวิธีในการนำเอาสาหร่ายที่ผลิตได้ออกจากถัง เพื่อนำไปใช้ประโยชน์หรือนำไปจำหน่าย เทคโนโลยีในการเก็บเกี่ยวสาหร่ายที่ผลิตได้นั้น อาจใช้คนหรือใช้อุปกรณ์ทางกลช่วย เพื่อผ่อนแรงและเวลาในการเก็บเกี่ยว เทคโนโลยีในการเก็บเกี่ยวสาหร่าย ได้แก่ การกรองแบบไมโคร การรีดน้ำแบบเบลต กระบวนการสร้างฟล็อกและการทำให้ตะกอนลอย

1. การกรองแบบไมโคร (Microstraing) เป็นกระบวนการกรองสาหร่าย โดยให้สาหร่ายเกิดการไหลผ่านแผ่นตะแกรง ซึ่งมีขนาดของรูเล็กมาก ทำให้สาหร่ายที่มีขนาดใหญ่กว่ารูของตะแกรง ถูกดักไว้ได้
2. การรีดน้ำแบบเบลต (Belt Filtration) เป็นกระบวนการใช้แผ่นเรียบ ซึ่งมีลักษณะคล้ายเข็มขัดขนาดใหญ่ เมื่อแผ่นดังกล่าวกดลงบนสาหร่าย ทำให้น้ำเกิดการไหลออกจากสาหร่ายผ่านช่องว่างของแผ่นดังกล่าว สาหร่ายก็ติดอยู่บนแผ่นดังกล่าว และถูกอัดเป็นแผ่น
3. กระบวนการสร้างฟล็อกและทำให้ตะกอนลอย (Flocculation & Flotation) กระบวนการสร้างฟล็อกมักเติมสารเคมีลงในบ่อที่เลี้ยงสาหร่าย ทำให้สาหร่ายมีขนาดใหญ่ขึ้นจะจมตัวลงสู่ก้นถังหรือเกิดการตกตะกอนได้ดีขึ้น ส่วนกระบวนการทำให้ตะกอนลอยเป็นการเติมอากาศลงไป เพื่อให้อากาศไปจับตัวกับตะกอนสาหร่าย เพื่อให้สาหร่ายลอยตัวขึ้นสู่ผิวน้ำได้จากแรงลอยตัวของฟอง อากาศที่ไปจับกับสาหร่าย ดังแสดงไว้ในรูปที่ 11.7



รูปที่ 11.7 กระบวนการทำให้ตะกอนลอย

**การใช้ประโยชน์ของสาหร่าย (Algae Utilization) ได้แก่**

1. เป็นแหล่งอาหาร และป้อนเข้าสู่กระบวนการต่างๆ เพื่อใช้แทนอาหารสำเร็จรูป (Food & Feed) สาหร่ายแต่ละชนิดที่ผลิตได้มีองค์ประกอบไนโตรเจน โปรตีน คาร์โบไฮเดรต และความชื้น ต่างกัน ดังแสดงไว้ในตารางที่ 11.7 และองค์ประกอบทางเคมีของสาหร่ายที่ผลิตต่อน้ำหนักแห้งของสาหร่าย 100 กรัม แสดงไว้ในตารางที่ 11.8

**ตารางที่ 11.7 องค์ประกอบของสาหร่ายแต่ละชนิด เมื่อเทียบกับถั่วเหลือง**

Components	Scenedesmus	Spirulina	Chlorella	Soya
Crude Protein	50-55	55-65	40-55	35-40
Lipids	8-12	2-6	10-15	15-20
Carbonates	10-15	10-15	10-15	20-35
Crude Fibre	5-12	1-4	5-10	3-5
Ash	8-12	5-12	5-10	4-5
Moisture	5-10	5-10	5-10	7-10

**ตารางที่ 11.8 องค์ประกอบทางเคมีของสาหร่าย หน่วย กรัมต่อน้ำหนักแห้งของสาหร่ายที่ผลิตได้ 100 กรัม (g/100 g Dry Weight of Algae Production)**

Component	Spirulina	Scenedesmus
Total Nitrogen	11.0	8.3
Non-protein Nitrogen	1.5	1.05
Protein-nitrogen	9.5	7.25
Available Lysine (g/100 g protein)	2.96	3.66
Ribonucleic Acid (RNA)	2.90	4.4
Deoxyribonucleic Acid (DNA)	1.00	1.6
Calcium	0.75	0.85
Phosphorus	1.42	1.9

\*\* From Becker, 1981: reproduced by permission of Turnep plc

3. เป็นแหล่งของสารเคมี (Source of Chemical Agent) โปรตีนในสาหร่ายนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายทาง เช่น ไขมันในอุตสาหกรรมสิ่งทอ สิ่งปรุงแต่งในอาหาร เครื่องสำอาง เป็นต้น

ปริมาณโปรตีนทั้งหมดที่มีอยู่ในสาหร่ายที่ผลิตได้ด้วยระบบการผลิตสาหร่ายแบบรวดเร็ว จากสาหร่ายชนิดต่างๆ แสดงไว้ในตารางที่ 11.9

ตารางที่ 11.9 ปริมาณโปรตีนทั้งหมดที่มีอยู่ในสาหร่าย ในระบบการผลิตสาหร่ายแบบรวดเร็ว

Major Species	Total Lipids (Percentage of Dry Weight)	Neutral Lipids (Percentage of Dry Weight)
Chlorella	22.6	10.9
Euglena	11.0	8.9
Microactinium	17.4	6.0
Oocystis	19.9	13.5
Scenedesmus	22.2	10.4

4. เป็นปุ๋ย (Fertilizer) สาหร่ายที่ผลิตได้มีส่วนประกอบของสารอินทรีย์ค่อนข้างมาก ดังนั้นการนำเอาสาหร่ายหรือตะกอนที่เกิดขึ้นภายในระบบการผลิตสาหร่ายไปเป็นปุ๋ย จะทำให้พืชเจริญเติบโตเร็ว และไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการใช้สารเคมีดังกล่าว หรือหากมีก็มีผลกระทบเพียงเล็กน้อย
5. เป็นแหล่งพลังงาน (Energy) ค่าความร้อนเฉลี่ยที่ได้จากปฏิกิริยาการออกซิเดชันหรือการเผาไหม้สาหร่าย มีค่าประมาณ 6 กิโลแคลอรีต่อสาหร่ายจำนวน 1 กรัม (6 kg-cal/สาหร่าย 1 กรัมg Algae)

ตัวอย่างที่ 11.2 จงคำนวณหาปริมาณสาหร่ายที่ใช้ว่ามีค่ากี่กิโลกรัมในรูปของน้ำหนักแห้ง เมื่อต้องการสกัดเอาไนโตรเจนออกจากสาหร่าย จำนวน 1,000 กรัมต่อวัน จากเซลล์สาหร่ายสไปรูลิน่า (Spirulina) เพื่อนำไปใช้ประโยชน์

วิธีทำ

จากตารางที่ 11.8 โปรตีนทั้งหมด ในสาหร่ายสไปรูลิน่า (Spirulina) เท่ากับ 11 g/100 g Dry Weight

$$\text{ดังนั้น ปริมาณสาหร่ายทั้งหมด} = \frac{\text{Total Nitrogen Required per day}}{\text{Total Nitrogen (gram) in 100 g Dry Weight of Algae}} \dots 3^*$$

แทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ 3\*

$$\begin{aligned} \text{เพราะฉะนั้นปริมาณสาหร่ายทั้งหมด} &= \frac{1,000 \text{ g Total Nitrogen per day}}{11 \text{ g Nitrogen / 100 g Dry Weight of Algae}} \\ &= 9,091 \text{ g Dry Weight of Algae} * \frac{1 \text{ kg}}{1,000 \text{ g}} \\ &= 9.1 \text{ kg Dry Weight of Algae} \end{aligned}$$



**การนำเอาสารร้ายไปใช้ประโยชน์ ต้องคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ ดังนี้**

1. ปริมาณของเชื้อโรค และสารเคมีที่มีปะปนอยู่ในเซลล์สำหรับ
2. การสะสมของโลหะหนัก หรือสารพิษที่มีอยู่ในน้ำเสีย หรือในเซลล์ของสารร้ายที่ผลิตได้

## แบบฝึกหัดเพิ่มความเข้าใจ

- ชุมชนแห่งหนึ่งมีพื้นที่ในการสร้างบ่อเลี้ยงสาหร่าย ประมาณ 1 เฮกตาร์ กำหนดให้ 1 เฮกตาร์ เท่ากับ  $10^4$  ตารางเมตร การเลี้ยงสาหร่ายเป็นการเลี้ยงจากของเสียที่มีค่าซีโอดี เท่ากับ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร จงออกแบบระบบการผลิตสาหร่ายแบบรวดเร็ว จำนวน 1 บ่อ และขนาดความลึกของระดับน้ำภายในบ่อเลี้ยงสาหร่าย โดยอาศัยข้อมูลข้างล่าง
  - อัตราการไหลของน้ำเสียที่ไหลเข้าบ่อ เท่ากับ  $400 \text{ m}^3/\text{day}$
  - ค่า  $p$  เท่ากับ  $1.6 \text{ gO}_2/\text{g Algae}$
  - ประสิทธิภาพของระบบ เท่ากับ 0.1
  - ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับจำเพาะ เท่ากับ  $1.5 \cdot 10^{-3}$
  - ค่าสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิ เท่ากับ 0.8
  - ค่าความเข้มของแสงแดดที่ผิวน้ำ เท่ากับ  $500 \text{ g-cal/cm}^2\text{-day}$
  - ค่าความร้อนของสาหร่าย เท่ากับ  $6 \text{ kg-cal/g}$
  - ใช้สมการของ Wetzel and Likens ในการแปลงค่าความร้อน
  - บ่อเลี้ยงสาหร่ายยาว 100 เมตร
  - ระยะห่างระหว่างแผ่นกั้น เท่ากับ 3 เมตร
- จากคำถามข้อที่ 1 ถ้าเพิ่มอัตราการไหลของน้ำเสียที่ไหลเข้าบ่อเลี้ยงสาหร่ายเป็น 2 เท่า ขนาดของบ่อเลี้ยงสาหร่ายจะมีขนาดเท่าเดิมหรือไม่ เพราะเหตุใด หากมีค่าเปลี่ยนแปลงไป ขนาดบ่อเลี้ยงสาหร่าย และจำนวนแผ่นกั้นที่ใช้มีกี่แผ่น อัตราการผลิตสาหร่ายใน 1 วันมีค่ากี่กิโลกรัม ความกว้างของแผ่นกั้นให้กำหนดเอง
- อยากทราบว่า ปริมาณสาหร่ายสไปรูไลนาที่ใช้มีค่ากี่กิโลกรัมในรูปของน้ำหนักเปียก เมื่อสาหร่ายดังกล่าวมีน้ำประมาณ 75% เมื่อต้องการสกัดเอาโปรตีนออกจากสาหร่ายดังกล่าว ออกมาใช้ประโยชน์ประมาณ 1,200 กรัมต่อวัน
- จากคำถามข้อที่ 3 ปริมาณแคลเซียมที่สกัดได้จากสาหร่ายปริมาณดังกล่าวในคำถามข้อที่ 3 มีค่ากี่กิโลกรัมต่อวัน
- จากคำถามข้อที่ 3 ปริมาณฟอสฟอรัสที่สกัดได้จากสาหร่ายปริมาณดังกล่าวในคำถามข้อที่ 3 มีค่ากี่กิโลกรัมต่อวัน
- ปริมาณไลซีนที่สกัดได้จากสาหร่ายปริมาณดังกล่าวในคำถามข้อที่ 3 มีค่ากี่กิโลกรัมต่อวัน

## บทที่ 12

### การใช้ประโยชน์จากของเสีย (Waste Utilization)

การใช้ประโยชน์จากของเสีย (Waste Utilization) ถือว่าเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการจัดการของเสียให้มี ปริมาณของเสียเหลือน้อยที่สุด (Waste Minimization) การนำเอาของเสียกลับมาใช้ประโยชน์มีหลายวิธี เช่น การนำกลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง (Reuse) การนำกลับไปใช้ในกระบวนการผลิต (Recycle) เป็นต้น ของเสียส่วนที่เป็นสารอินทรีย์สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ด้วยวิธีชีวภาพ เช่น กระบวนการหมัก การผลิต ก๊าซชีวภาพ การผลิตสาหร่าย การทำไร้หรือการทำนาแบบสวนผสม เป็นต้น ซึ่งเป็นแนวทางหนึ่งตามพระราชดำริของพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวรัชกาลปัจจุบัน

การใช้ประโยชน์จากของเสียโดยเฉพาะในส่วนของสารอินทรีย์นั้น นอกจากช่วยลดปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นแล้วยังช่วยลดความเข้มข้นของมลสารในรูปต่างๆ นอกจากนี้ยังช่วยให้การควบคุมการทำงานและการเดินระบบบำบัดของเสียเป็นไปตามต้องการ การนำเอาของเสียมาใช้ประโยชน์ภายในประเทศยังไม่ประสบความสำเร็จตามความต้องการ เนื่องจากจิตสำนึกของประชาชนในการรักษาสังแวดล้อม ยังคงมีไม่มากเท่ากับต่างประเทศ อย่างไรก็ตามภาครัฐได้พยายามรณรงค์ให้เกษตรกรเกิดจิตสำนึกในการนำเอาของเสียที่เกิดขึ้นภายใต้กิจกรรมต่างๆ ภายในฟาร์มหรือพื้นที่การเกษตรกรรมกลับมาใช้ประโยชน์ ให้มากขึ้น เช่น ธุรกิจพีชอินทรีย์ ไบโอดีเซล เป็นต้น

แนวทางการใช้ประโยชน์จากของเสีย ได้แก่

1. การทำปุ๋ยหมัก ถ้านำของเสียสดมาหมักเพื่อผลิตเป็นปุ๋ย อาจเรียกปุ๋ยที่ได้ว่า ปุ๋ยน้ำ หรือปุ๋ยพืชสด หรือบางครั้งเรียกว่าปุ๋ยอินทรีย์หรือปุ๋ยชีวภาพ ในปัจจุบันนี้หน่วยงานทั้งภาครัฐและภาคเอกชน โดยเฉพาะอย่างยิ่งสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทย ได้ทำวิจัยศึกษาเรื่องนี้อย่างมากและเผยแพร่ผลงานวิจัยดังกล่าวออกสู่สาธารณชน นอกจากนี้แล้วยังมีหน่วยงานของภาคเอกชนได้ทำการวิจัยและผลิตปุ๋ยหมักจากของเสียดังกล่าว เพื่อจำหน่ายและรณรงค์ลดการใช้ปุ๋ยเคมี สิ่งที่ได้จากกระบวนการหมักช่วยลดปริมาณของเสีย สร้างรายได้จากการขายปุ๋ยอินทรีย์ ช่วยปรับปรุงสภาพดิน และยังช่วยลดการไหล ของเงินตราออก นอกประเทศอีกด้วย หรือการขาดดุลการค้าให้กับคู่ค้า
2. การผลิตก๊าซชีวภาพ ก๊าซชีวภาพเป็นสิ่งที่ได้จากกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนหรือจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน หรือจากระบบการฝังกลบขยะชุมชน ก๊าซชีวภาพที่ได้จากกระบวนการดังกล่าว ถือว่าเป็นพลังงานทดแทนอีกรูปหนึ่ง พลังงานที่มีการนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายทาง ในประเทศจีน เกือบทุกบ้านมีระบบผลิตก๊าซชีวภาพ และนำเอาก๊าซที่ได้ไปใช้ประโยชน์ต่างๆ และ

ในปัจจุบันนี้ต่างประเทศเริ่มหันมาให้ความช่วยเหลือประเทศกำลังพัฒนาไม่ว่ามาจากความช่วยเหลือของประเทศสาธารณรัฐเยอรมัน ภายใต้โครงการที่ชื่อว่า โครงการพลังงานยั่งยืนไทย-เยอรมัน (GTZ)

3. การนำของเสียมมาใช้เป็นอาหารสัตว์อื่นๆ ของเสียบางส่วน หรือสูตรอาหารบางชนิดที่ใช้ในฟาร์มเลี้ยงสัตว์ สามารถนำมาใช้เป็นอาหารเพื่อเลี้ยงปลา เป็ด ไก่ แนวคิดนี้เป็นส่วนหนึ่งของการเลี้ยงแบบผสมผสานตามแนวพระราชดำริของพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวองค์ปัจจุบัน ซึ่งเป็นการทำเกษตรแบบเพียงพอ ตามหลักทฤษฎีใหม่ของพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวฯ ซึ่งเกษตรกรทุกคนควรหันมาช่วยกันเผยแพร่แนวความคิดดังกล่าวและนำไปใช้อย่างจริงจังในทุกพื้นที่การเกษตร
4. การเลี้ยงสาหร่าย การนำเอาของเสี้ยวหรือน้ำเสี้ยวที่มีในส่วนของสารอินทรีย์ไปใช้ประโยชน์ เพื่อเลี้ยงสาหร่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งสาหร่ายเกลียวทอง ซึ่งมีมูลค่าค่อนข้างสูง เป็นที่ต้องการของ ต่างประเทศ หรือการเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ เพื่อผลิตเป็นเชื้อจุลินทรีย์สำเร็จรูป เพื่อจะนำไปใช้ในระบบบำบัดน้ำเสีย หรือในกระบวนการหมัก ในต่างประเทศการเพาะเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์จากของเสี้ยวภายในฟาร์ม ซึ่งมีการแข่งขันกันอย่างมากมายและถือเป็นธุรกิจที่ก่อให้เกิดรายได้ค่อนข้างดี ปัจจุบันนี้มีการคิดค้นสูตรอาหารที่ใช้ในการเลี้ยงสัตว์มากมายหลายสูตร ถ้าเกษตรกรในเมืองไทยได้รับความรู้ดังกล่าวและนำความรู้ดังกล่าวไปใช้ประโยชน์อย่างจริงจัง จะช่วยลดการนำเข้าเทคโนโลยีในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย ลดการสูญเสียเงินตราออกไปสู่ต่างประเทศ
5. การผลิตเป็นยากำจัดป้องกันและใช้ในการปรับสภาพของดิน ในพื้นที่เกษตรกรรมที่ไม่มีการปรับสภาพดินมานาน การปรับปรุงสภาพดินในพื้นที่ดังกล่าวทำได้จากการใช้สิ่งที่ได้จากการหมักทำปุ๋ยภาคตะกอนจุลินทรีย์ที่ได้จากการผลิตปุ๋ยชีวภาพ ในปัจจุบันนี้หน่วยงานและภาคเอกชนของประเทศ ไทยมีการพัฒนาเรื่องการใช้ประโยชน์จากของเสียการทำฟาร์ม เพื่อใช้ไล่แมลง และใช้เร่งการงอกของพืช
6. การนำเอาของเสี้ยวดังกล่าวที่เกิดขึ้นไปใช้ในการเพาะเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์เพื่อควบคุมแมลง ในปัจจุบันนี้มีการรณรงค์ในการนำของเสี้ยวที่เกิดขึ้นภายในฟาร์มเลี้ยงสัตว์ เพื่อผสมกับสมุนไพร ทำให้ได้ยาที่ใช้ในการควบคุมศัตรูพืชทางชีวภาพ ซึ่งบางอย่างมีคุณภาพดีกว่าสารเคมีบางชนิดและไม่มีผลกระทบต่อการตกค้างในสิ่งแวดล้อม
7. การรักษาสภาพของดินด้วยวิธีการทำดินหมัก ในประเทศไทยได้มีการเริ่มงานทางด้านนี้โดยกรมที่ดิน ในภาษาญี่ปุ่นดินหมัก เรียกว่า ไบโอยะ

สาเหตุที่การจัดการของเสียในลักษณะการนำเอาของเสียไปใช้ประโยชน์จากของเสียภายในฟาร์ม ภายในประเทศไทยยังไม่ประสบความสำเร็จเท่าที่ควร เป็นเพราะ

1. ขาดจิตสำนึกในการรักษาสภาพแวดล้อมหรือความเอาใจใส่ในสุขภาพเมื่อมีการใช้สารเคมี ซึ่งแตกต่างจากต่างประเทศ ที่ให้ความสำคัญในเรื่องของสวัสดิภาพ สุขภาพและสิ่งแวดล้อมเป็นเรื่องสำคัญมาก เมื่อต้องการพัฒนาในเรื่องใดก็ตาม
2. ขาดความสนับสนุนจากหน่วยงานของภาครัฐ ให้ความช่วยเหลือและถ่ายทอดความรู้อย่างจริงจังแก่เกษตรกร ประกอบกับเกษตรกรขาดประสบการณ์ในการปรับปรุงแนวทางทำการเกษตรแผนใหม่ ขาดการสนับสนุนในการสร้างระบบบำบัดของเสีย และค่าใช้จ่ายในการสร้างระบบบำบัดของเสีย รวมทั้งความรู้ในเรื่องของการเดินระบบบำบัดของเสีย ในปัจจุบันนี้แม้ว่าหน่วยงานพลังงานแห่งชาติ จะเข้ามาให้ความช่วยเหลือแก่ฟาร์มที่มีปริมาณของเสียมาก เพื่อนำของเสียดังกล่าวมาผลิตเป็นก๊าซชีวภาพก็ตาม งบประมาณรวมทั้งเจ้าหน้าที่ที่มีความรู้ความสามารถในเรื่องดังกล่าว ยังมีจำนวนน้อย และบางธุรกิจอาจได้รับความช่วยเหลือจากหน่วยงานความร่วมมือระหว่างประเทศ เช่น หน่วยงานความร่วมมือระหว่างรัฐบาลไทยและรัฐบาลญี่ปุ่น เป็นต้น ตัวอย่างของหน่วยงานที่ได้รับความช่วยเหลือในลักษณะดังกล่าว ได้แก่ โรงงานเส้นไหมเมืองเชียง ตำบลสามพราน จังหวัดนครปฐม ซึ่งได้มีการนำเอาก๊าซชีวภาพที่ได้จากระบบการบำบัดน้ำเสียไปใช้ประโยชน์ภายในโรงงาน เป็นต้น
3. ขาดวิธีการหรือเทคนิคที่เหมาะสมในการรวบรวมของเสียที่เกิดขึ้น การจัดการของเสียที่เกิดขึ้นเพื่อรอการเก็บขนก่อนนำไปบำบัดหรือใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ ต่อไป ซึ่งเป็นสาเหตุที่สำคัญที่ทำให้การใช้ประโยชน์จากของเสียจากฟาร์มเป็นไปได้ยาก ซึ่งเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นมานานแล้ว และพบเห็นมากในฟาร์มเลี้ยงสัตว์ภายในประเทศ ซึ่งต่างจากฟาร์มเลี้ยงสัตว์ของต่างประเทศที่ควบคุมปริมาณมลสารชนิดต่างๆ ที่มีอยู่ในฟาร์มเลี้ยงสัตว์
4. ขาดมาตรฐานในการควบคุมคุณภาพน้ำเสียที่ออกมาจากฟาร์มเลี้ยงสัตว์แต่ละชนิด และในแต่ละท้องที่ในปัจจุบันนี้หน่วยงานของรัฐเริ่มทำการรวบรวมจำนวนฟาร์มสัตว์ ปริมาณของเสียที่เกิดขึ้น และปริมาณสารอาหารที่ใช้ในการเลี้ยงสัตว์ของฟาร์มเลี้ยงสัตว์แต่ละแห่ง ตลอดจนให้ความช่วยเหลือในเดินระบบบำบัดของเสีย เพื่อให้ประสิทธิภาพของระบบบำบัดเป็นไปด้วยดี
5. กฎระเบียบข้อบังคับของหน่วยงานท้องถิ่น เช่น เทศบาล องค์การบริหารส่วนตำบล เป็นต้น ยังไม่มีการบังคับใช้อย่างจริงจัง และอย่างเสมอภาค โดยเฉพาะอย่างยิ่งในรายชื่อผู้ประกอบการ ซึ่งเป็นที่รู้จัก และมีอำนาจ หรือมีเงินทอง มักหลีกเลี่ยงกฎระเบียบข้อบังคับดังกล่าว ด้วยการคิดสินบน
6. การจัดการของเสียแบบศูนย์กลางของประเทศไทย ยังไม่มีการดำเนินการอย่างจริงจัง และไม่มีจัดสร้างกระบวนการบำบัดของเสียแพร่หลายไปทั่วประเทศ โดยเฉพาะในพื้นที่ของการทำฟาร์มปศุสัตว์

## แบบฝึกหัดเพิ่มความเข้าใจ

1. ให้อีกตัวอย่างการใช้ประโยชน์จากของเสียในฟาร์มเลี้ยงสัตว์มา 1 ตัวอย่าง พร้อมทั้งระบุการใช้ประโยชน์จากของเสียดังกล่าวด้วย
2. อยากทราบว่า การผลิตก๊าซชีวภาพสามารถผลิตจากมูลสัตว์ทุกชนิดได้หรือไม่ เพราะเหตุใด
3. ให้อีกตัวอย่างของการผลิตก๊าซชีวภาพจากฟาร์มเลี้ยงสัตว์มาสัก 1 ตัวอย่าง พร้อมทั้งวิเคราะห์แนวทางในการใช้ประโยชน์จากก๊าซที่ผลิตได้
4. ให้อธิบายขั้นตอนการผลิตคินหมักจากญี่ปุ่นที่เรียกว่า ไบโอะคะ
5. ให้อธิบายขั้นตอนการผลิตปุ๋ยมักของกรมส่งเสริมการเกษตรมาสัก 1 วิธี และปัญหาอุปสรรคที่เกษตรกรเมืองไทย ไม่ใช่น้อยหมักเป็นเพราะอะไร
6. การพิจารณาในการนำเอาของเสียในส่วนของสารอินทรีย์ ที่เกิดขึ้นจากการทำการปศุสัตว์ไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ ว่ามีหลักการอย่างไรบ้าง และแนวทางดังกล่าวมีความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติมากน้อยเพียงใด

## บรรณานุกรม

- สุกาญจน์ รัตนเลิศสุสรณ์ (2546) หลักการจัดการสิ่งแวดล้อม สำนักพิมพ์ สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี  
กรุงเทพมหานคร
- เกรียงศักดิ์ อุคมสินโรจน์ (2543) การจัดการเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม มิตรนราการพิมพ์ นนทบุรี
- Reynold D. T. and Richard A. P. (1996) Unit Operations and Processes in Environmental Engineering  
2<sup>nd</sup> edition PWS Publishing Company
- Master M. G. (1990) Introduction to Environmental Engineering 2<sup>nd</sup> edition Prentice-Hall International Inc.
- Price M. (1996) Introducing Groundwater 2<sup>nd</sup> edition Chapman & Hall
- Polprasert C. (1989) Organic Waste Recycling 2<sup>nd</sup> edition John Wiley & Sons
- ปราณี พันธุ์สินชัย (2541) มาตรฐานการจัดการสิ่งแวดล้อม สำหรับผู้บริหาร พิมพ์ครั้งที่ 2 โรงพิมพ์แห่ง  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร
- MetCalf & Eddy. (2003). Wastewater Engineering : Treatment and Reuse. 4<sup>th</sup> edition. McGraw-Hill Book  
Company
- Bertldi D. M. and et al . (1996) The Science of Composting Chapman & Hall
- Diaz F. G and et al. (1993) Composting and Recycling Lewis Publishers
- ภูรินทร์ อัครกุลธร (2544) การจัดการกของเสียฟาร์มเลี้ยงสุกร คณะเกษตรศาสตร์บางพระ  
สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล ชลบุรี