

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน
สำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง
โดยวิธีการระบุเอกลักษณ์

นายอรรถวิโรจน์ เขียวนาค

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2553

**MATHEMATICAL MODEL OF AN ANAEROBIC
DIGESTION FOR SHRIMP CULTURE POND
SEDIMENT IN BIOGAS PROCESS USING
SYSTEM IDENTIFICATION**

Adtavirod Kheawnak

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering
Suranaree University of Technology**

Academic Year 2010

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนสำหรับการ
การผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งโดยวิธีการระบุเอกลักษณ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.กิริติ สุกัญญา)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(รศ. ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว)

กรรมการ

(ผศ. ดร.พญศักดิ์ จุลยุเสนา)

กรรมการ

(อ. ดร.วุฒิ ด่านกิตติกุล)

รักษาการแทนรองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. น.อ. ดร.วรพจน์ จำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

อรรถวิโรจน์ เขียวนาค : แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการย่อยสลายแบบ
ไร้ออกซิเจนสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งโดยวิธีการ
ระบุเอกลักษณ์ (MATHEMATICAL MODEL OF AN ANAEROBIC DIGESTION FOR
SHRIMP CULTURE POND SEDIMENT IN BIOGAS PROCESS USING SYSTEM
IDENTIFICATION) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล,
119 หน้า.

ก๊าซชีวภาพเป็นหนึ่งในประเภทของการพัฒนาพลังงานที่ยั่งยืนซึ่งมีความสำคัญต่อการ
วางแผนพลังงานทางด้านสิ่งแวดล้อมของประเทศไทย การศึกษาและวิเคราะห์แบบจำลองทาง
คณิตศาสตร์ของกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพสามารถอธิบายตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการผลิตก๊าซ
ชีวภาพ และการบำบัดตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งโดยกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนเพื่อลด
ปริมาณของเสียและผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งมีสัดส่วนก๊าซมีเทนที่สามารถนำมาใช้เป็นพลังงาน
ทดแทนได้ วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอวิธีการประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และตัวแปรของ
กระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนของตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งในการผลิตก๊าซชีวภาพโดย
การหมักแบบแบคทีเรีย โดยใช้หลักการของสมการสมดุลมวลในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
และปฏิกิริยาของสารอินทรีย์ที่ถูกย่อยสลายไปเป็นก๊าซชีวภาพ เปรียบเทียบกับข้อมูลผลการทดลอง
อุณหภูมิ PH อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพและคุณสมบัติทางชีวเคมีของตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง
ผลที่ได้สามารถทำนายปริมาณของก๊าซชีวภาพ และปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดก๊าซชีวภาพได้

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา 2553

ลายมือชื่อนักศึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

ADTAVIROD KHEAWNAK : MATHEMATICAL MODEL OF AN
ANAEROBIC DIGESTION FOR SHRIMP CULTURE POND SEDIMENT
IN BIOGAS PROCESS USING SYSTEM IDENTIFICATION. THESIS
ADVISOR : ASST. PROF. JIRAPHON SRISERTPHOL, Ph.D., 119 PP.

MATHEMATICAL MODEL/ PARAMETER/ SHRIMP POND SEDIMENT

The biogas is one type of energy and sustainable development which is important to the energy and environmental planning of Thailand. The study and analysis of the mathematical model of the biogas process can be explained the variables that affect the process of biogas production. A treatment of shrimp culture pond sediment by anaerobic digestion process could also reduce the amount of waste and produce biogas, which account for methane gas that can be used as renewable energy. The thesis has proposed a mathematical model to estimate parameters of anaerobic digestion of shrimp pond sediments in the production of biogas by batch fermentation. The principles of mass balance equations are defined the mathematical models. And reactions of organic compounds are decomposed to biogas. The mathematical models are compared to the experimental data, including temperature, PH, biogas flow rate and biochemical properties of shrimp culture sediment. The results obtained can be used to estimate biogas flow rate and factors affecting the rate of biogas.

School of Mechanical Engineering

Academic Year 2010

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ทุกประการ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคลต่าง ๆ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัย ดังนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความรู้ และคำปรึกษาแนะนำในการทำงานวิจัย รวมทั้งให้คำแนะนำในการดำเนินชีวิตด้วยความเมตตาโดยตลอด และสละเวลาตรวจสอบแก้ไขให้วิทยานิพนธ์มีความถูกต้องสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

รองศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์ ที่ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในการดำเนินงานวิจัย และให้โอกาสการทำงานในหลายด้านด้วยความกรุณาเสมอมา

ศาสตราจารย์ นาวาอากาศโท ดร.สราวุฒิ สุจิตจร ที่ให้ความรู้ คำแนะนำด้านวิชาการ ที่เป็นประโยชน์ในการดำเนินงานวิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว ที่ให้ความรู้ คำแนะนำด้านวิชาการ และเป็นแบบอย่างที่ดีในการทำวิจัยแก่ผู้ทำวิจัย

รองศาสตราจารย์ นาวาอากาศเอก ดร.วรพจน์ ขำพิศ รองศาสตราจารย์ ดร.ทวิช จิตรสมบูรณ์ และคณาจารย์ทุกท่าน ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ด้วยความเมตตากรุณา

คุณอาภรณ์พรรณ ศรีอัครวิทยา คุณกัศกร ต่อชีพ คุณสายฝน สิบพลกรัง และคุณวารินทร์ พุทธิรัตน์ เจ้าหน้าที่ประจำสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ ที่อำนวยความสะดวกในด้านธุรการต่าง ๆ

วิศวกรศูนย์เครื่องมือและเจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือที่ให้คำแนะนำ และอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือต่าง ๆ

คุณประสิทธิ์ ศรีนคร อาจารย์ชาญยุทธ ขจรไตรเดช คุณสุพจน์ ปลั่งพิมาย คุณเจิมธง ปรารณารักษ์ และพี่ ๆ เพื่อน ๆ บัณฑิตทุกท่านที่ให้กำลังใจมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การเลี้ยงดูอบรม และสนับสนุนด้านการศึกษาเป็นอย่างดี จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมา

อรรณวิโรจน์ เขียวนาค

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฐ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของเบื้องต้น	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.6 การจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	3
2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 บทนำ.....	4
2.2 กระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน.....	4
2.3 ปรัชญ่วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.4 สรุป.....	10
3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	11
3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากการวิเคราะห์โดยทฤษฎี	11

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2	อิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์	18
3.2.1	อิทธิพลของความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่มีผล กับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์	18
3.2.2	อิทธิพลของ (PH) ที่มีผลกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์	20
3.2.3	อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์	21
3.2.4	อิทธิพลของผลิตภัณฑ์ที่มีผลกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์	21
3.3	ผลการทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหา แบบจำลองที่จะนำไปใช้งาน	22
3.4	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	29
3.5	สรุป	32
4	การระบุเอกลักษณ์ของระบบด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์	33
4.1	กล่าวนำ	33
4.2	แนวคิดในการระบุเอกลักษณ์ระบบ	33
4.3	พื้นฐานการระบุเอกลักษณ์	34
4.4	เทคนิคทางปัญญาประดิษฐ์	36
4.4.1	การค้นหาแบบตามเชิงปรับตัว	37
4.4.2	การค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึม	44
4.5	วิธีการระบุเอกลักษณ์ระบบด้วยเทคนิคทางปัญญาประดิษฐ์	52
4.6	สรุป	54
5	ผลการประมาณค่าสัมประสิทธิ์	55
5.1	ผลการทดลองในการเก็บข้อมูล	55
5.1.1	ผลการทดลองครั้งที่ 1	55
5.1.2	ผลการทดลองครั้งที่ 2	59
5.2	การกำหนดขอบเขตในการระบุเอกลักษณ์	62

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.3 ผลการประมาณค่าสัมประสิทธิ์.....	69
5.3.1 ผลการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองที่ 1	71
5.3.2 ผลการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองที่ 2	74
5.4 สรุป.....	78
6 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	79
6.1 สรุป.....	79
6.2 ข้อเสนอแนะ	79
รายการอ้างอิง	80
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. อุปกรณ์ที่ใช้ในการติดตั้งและการเปรียบวัดเครื่องมือทดลอง	83
ภาคผนวก ข. การเก็บข้อมูลโดยใช้โปรแกรม Labview.....	87
ภาคผนวก ค. การใช้งานโปรแกรม MATLAB ส่วนของ Toolbox GA	92
ภาคผนวก ง. โปรแกรมที่ใช้ในการทดสอบของ GA	100
ภาคผนวก จ. โปรแกรมที่ใช้ในการทดสอบของ ATS.....	104
ภาคผนวก ฉ. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา.....	107
ประวัติผู้เขียน	119

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	ค่าสัมประสิทธิ์ของ Monod.....25
3.2	ค่าสัมประสิทธิ์ของ Haldane25
3.3	ค่าสัมประสิทธิ์ของ Arrhenius26
3.4	ค่าสัมประสิทธิ์ของ PH27
3.5	ค่าสัมประสิทธิ์ของผลผลิต28
4.1	ความหมายของคำ ศัพท์ที่ใช้ในการอธิบายการทำงาน40
5.1	ตารางแสดงข้อมูลผลการทดสอบของตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง.....58
5.2	ผลวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ.....59
5.3	ตารางแสดงข้อมูลผลการทดสอบของตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งครั้งที่ 2.....61
5.4	ผลวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพครั้งที่ 2.....62
5.5	การตอบสนองของจำนวนรอบ63
5.6	การตอบสนองของจำนวนประชากร.....64
5.7	ผลของการระบุเอกลักษณ์.....64
5.8	ตารางค่าสัมประสิทธิ์โดยประมาณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....70

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนของสารอินทรีย์ 5
3.1	กระบวนการที่มีการไหลเข้าออกตลอดเวลา 13
3.2	ปฏิกิริยาแบบเบตซ์ 14
3.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารอินทรีย์กับ การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ของแบบจำลอง Monod 19
3.4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารอินทรีย์กับ การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ของแบบจำลอง Haldane 20
3.5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง PH กับ การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์..... 20
3.6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับ การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์..... 21
3.7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลผลิตกับ การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์..... 22
3.8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับ ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ 23
3.9	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิ 23
3.10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับ PH 24
3.11	แสดงการเปรียบเทียบระหว่างการประมาณค่ากับการทดลองจริงของ Monod 25
3.12	แสดงการเปรียบเทียบระหว่างการประมาณค่ากับการทดลองจริงของ Haldane 26
3.13	แสดงการเปรียบเทียบระหว่างการประมาณค่ากับการทดลองจริงของ Arrhenius..... 27
3.14	แสดงการเปรียบเทียบระหว่างการประมาณค่ากับการทดลองจริงของ PH 28
3.15	แสดงการเปรียบเทียบระหว่างการประมาณค่ากับการทดลองจริงของผลผลิต..... 29
4.1	การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 34
4.2	ระบบเปิด 35
4.3	แผนภาพบล็อกการทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ 35

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 การค้นหาสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองระบบด้วยการระบุเอกลักษณ์	36
4.5 สุ่มคำตอบ S_0 ในพื้นที่ค้นหา.....	41
4.6 คำตอบพื้นที่รอบข้าง S_0	41
4.7 กำหนดค่าใหม่ให้กับ S_0	42
4.8 การค้นหาคำตอบในรอบต่อไป.....	42
4.9 แสดงลักษณะของโครโมโซม.....	45
4.10 แผนภูมิสายงานแสดงกระบวนการเงินเนติอัลกอริทึม	46
4.11 โครโมโซมยาว 8 บิต ใช้แทนคำตอบของปัญหา	47
4.12 แผนภูมิของการคัดเลือกชนิดวงล้อรูเล็ต	49
4.13 แผนภูมิของการคัดเลือกแบบ Stochastic Universal Sampling	49
4.14 แสดงแผนภูมิแสดงการเกิดผสมข้ามพันธุ์แบบ 1 จุด โดยที่หัวของลูกศรคือจุดกำหนดให้เกิดการผสมข้ามพันธุ์	50
4.15 แสดงแผนภูมิแสดงการเกิดผสมข้ามพันธุ์แบบ 2 จุด โดยที่หัวของลูกศรคือจุดกำหนดให้เกิดการผสมข้ามพันธุ์.....	51
4.16 แสดงแผนภูมิแสดงการเกิดผสมข้ามพันธุ์ชนิดยูนิฟอร์ม	51
4.17 การกลายพันธุ์ของโครโมโซมเลขฐานสอง การกลายพันธุ์โดยการกลับบิตของข้อมูล	52
4.18 การระบุเอกลักษณ์ระบบโดยเทคนิคทางปัญญาประดิษฐ์.....	53
5.1 แสดงปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพของการทดลองครั้งที่ 1	56
5.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของการทดลองครั้งที่ 1	56
5.3 แสดงค่า PH ที่เปลี่ยนแปลงของการทดลองครั้งที่ 1	57
5.4 แสดงปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพของการทดลองครั้งที่ 2	59
5.5 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของการทดลองครั้งที่ 2	60
5.6 แสดงค่า PH ที่เปลี่ยนแปลงของการทดลองครั้งที่ 2	60
5.7 ผลการตอบสนองของจำนวนรอบของ การระบุเอกลักษณ์ของระบบ	63

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.8 ผลการตอบสนองของจำนวนประชากรของ การระบุเอกลักษณ์ของระบบ	64
5.9 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างการประมาณค่ากับการทดลองจริง.....	65
5.10 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างการประมาณค่ากับการทดลองจริงแบบย้อนกลับ	66
5.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของการเจริญเติบโตของ จุลินทรีย์กับสารอินทรีย์	67
5.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับ PH.....	67
5.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของการเจริญเติบโต ของจุลินทรีย์กับอุณหภูมิ.....	68
5.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของการเจริญเติบโต ของจุลินทรีย์กับปริมาณการเกิดก๊าซ	68
5.15 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างการประมาณกับการทดลองของครั้งที่ 1	71
5.16 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างการประมาณกับการทดลองของครั้งที่ 2	72
5.17 กราฟแสดงการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับ ปริมาณการเกิดก๊าซของแบบจำลองที่ 1	72
5.18 กราฟแสดงการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับ PH ของแบบจำลองที่ 1	73
5.19 กราฟแสดงการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับ สารอินทรีย์ของแบบจำลองที่ 1	73
5.20 กราฟแสดงการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับ อุณหภูมิของแบบจำลองที่ 1	74
5.21 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างการประมาณกับ การทดลองของครั้งที่ 1	74
5.22 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างการประมาณกับ การทดลองของครั้งที่ 2	75
5.23 กราฟแสดงการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับ ปริมาณการเกิดก๊าซของแบบจำลองที่ 2	75

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.24 กราฟแสดงการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับ PH ของแบบจำลองที่ 2.....	76
5.25 กราฟแสดงการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับ สารอินทรีย์ของแบบจำลองที่ 2	76
5.26 กราฟแสดงการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับ อุณหภูมิของแบบจำลองที่ 2	77
ก.1 ชุดอุปกรณ์.....	84
ก.2 ชุดวัดอุณหภูมิ	85
ก.3 แสดงตัวอย่างของอิเล็กทรอนิกส์บอร์ดค่าพีเอชแบบแก้ว	86
ก.4 ชุดวัดปริมาณก๊าซชีวภาพ	86
ข.1 หน้าโปรแกรมแสดงผล 1	88
ข.2 หน้าโปรแกรมแสดงผล 2	89
ข.3 โปรแกรมการวัดอุณหภูมิ	90
ข.4 โปรแกรมการวัด PH.....	90
ข.5 โปรแกรมการวัดก๊าซชีวภาพ.....	91
ค.1 แผนภาพแสดงหน้าต่างของ GAT	93
ค.2 แผนภาพแสดงการใส่ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และจำนวนสัมประสิทธิ์	94
ค.3 แผนภาพแสดงการใส่ค่า Population Size	94
ค.4 แผนภาพแสดงการเลือก Selection	95
ค.5 แผนภาพแสดงการเลือกจำนวนรอบและ ค่าคลาดเคลื่อนของการทำงานของ GA.....	96
ค.6 แผนภาพแสดงการเลือกแสดงกราฟของการทำงานของ GA.....	96
ค.7 แผนภาพแสดงการเริ่มโปรแกรม.....	97
ค.8 แผนภาพแสดงการตอบสนองจากการประมาณ ค่าตัวแปรเทียบกับข้อมูลเอาต์พุต	98
ค.9 แผนภาพแสดงการเก็บค่าสัมประสิทธิ์	98
ค.10 แผนภาพแสดงค่าสัมประสิทธิ์.....	99

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

X	ความเข้มข้นของประชากรจุลินทรีย์ในระบบ (g/l)
μ	ค่าเฉพาะของอัตราการเติบโตจำเพาะของจุลินทรีย์ (d^{-1})
V	ปริมาณอาหารเลี้ยงเชื้อภายในระบบ (l)
t	เวลา (d)
F_{out}	อัตราการไหลออก (l/d)
S	ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ (g/l)
F_{in}	อัตราการไหลเข้า (l/d)
k_1	ค่าสัมประสิทธิ์
Q	อัตราการผลิตก๊าซ (l/day)
B	ความเข้มข้นของผลผลิต (l)
ν	ค่าเฉพาะของอัตราการเกิดผลผลิตก๊าซ ($l^2/g \cdot d$)
D	ปริมาณการเจือจาง (d^{-1})
P	ความดัน (psi)
PH	ความเป็นกรดเป็นด่าง (PH)
T	อุณหภูมิ ($^{\circ}C$)
μ_0	ค่าสูงสุดของการเกิดปฏิกิริยา (d^{-1})
k_m k_H	ค่าคงที่ของสัมประสิทธิ์
k_Q a_1 a_2 a_3	ค่าสัมประสิทธิ์
a b c	ค่าสัมประสิทธิ์
E_1 E_2	ค่าพลังงานของก๊าซ (J/g.mole)
R	ค่าคงที่ของก๊าซ (J/g)
radius	ขอบเขตของการสุ่มในแต่ละรอบของการทำงาน
number_neighbor	จำนวนค่าใกล้เคียงที่ต้องการสุ่มในแต่ละพื้นที่การค้นหา
neighbor_list	ส่วนที่เก็บค่าใกล้เคียงตามจำนวนที่กำหนด (tabu list)
best_neighbor	ค่าใกล้เคียงที่เป็นคำตอบวงแคบเฉพาะถิ่น
best_error	ค่าความคลาดเคลื่อนที่เป็นไปได้จากคำตอบวงแคบเฉพาะถิ่น
overall_neighbor	ค่าใกล้เคียงที่เป็นค่าที่ดีที่สุดสำหรับคำตอบที่เป็นวงกว้าง

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

<i>overall_best_error</i>	ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าที่ดีที่สุดสำหรับคำตอบที่เป็นวงกว้าง
<i>n</i>	จำนวนรอบในการค้นหาคำตอบ
<i>xlimit</i>	ขอบเขตของสัมประสิทธิ์แต่ละตัว
w_0	ค่าเริ่มต้นในแต่ละพื้นที่การค้นหา
$w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$	ค่าที่เก็บไว้ใน neighbor_list
<i>Cost</i>	ค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function)
$X(0)$	ปริมาณจุลินทรีย์เริ่มต้นโดยประมาณ (g/l)
GA	จินเนติกอัลกอริทึม
ATS	การค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว
Model 1	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ 1
Model 2	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ 2
GA-1	จินเนติกอัลกอริทึมของการทดลองที่ 1
GA-2	จินเนติกอัลกอริทึมของการทดลองที่ 2
ATS-1	การค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวของการทดลองที่ 1
ATS-2	การค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวของการทดลองที่ 2

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการเลี้ยงกุ้งทะเลในประเทศไทยมีการเลี้ยงอย่างหนาแน่น และจากการเลี้ยงกุ้งทะเลนั้นพบว่ามีความเสี่ยงที่ต้องการทั้งหรือต้องการกำจัดออกจากบ่อเลี้ยงกุ้งเพราะจะส่งผลต่อการเลี้ยงกุ้งครั้งต่อไปซึ่งอาจจะทำให้กุ้งเกิดโรคและทำให้กุ้งตายได้ เมื่อนำของเสียเหล่านั้นออกจากบ่อจะมีการถ่ายไปยังบ่อพักแต่เมื่อบ่อเต็มของเสียเหล่านั้นจะไหลไปยังแหล่งน้ำธรรมชาติและทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ในขณะที่บางแห่งอาจจะมีการดักของเสียไว้ข้างบ่อหรือในตำแหน่งที่ได้กำหนดไว้ซึ่งพบว่าตำแหน่งที่ทำการทิ้งของเสียไว้จะไม่สามารถนำพื้นที่บริเวณนั้นมาใช้ประโยชน์ได้จนกว่าจะมีการย่อยสลายของของเสียนั้นแล้ว ของเสียที่กล่าวถึงนั้นจะถูกเรียกในงานวิจัยนี้ว่าตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง (ตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งนี้คือซากแพลงก์ตอนพืช ซากแพลงก์ตอนสัตว์ สิ่งขับถ่ายจากตัวกุ้ง (มูลกุ้ง) ตะกอนน้ำ ตะกอนดิน หรือสารแขวนลอยอื่น ๆ ทั้งหมดรวมกันแล้วเป็นของเสียที่อยู่ภายในบ่อเลี้ยงกุ้ง ซึ่งจะกองรวมกันอยู่ตรงกลางพื้นบ่อ มีลักษณะเป็นโคลนเหลว (Sludge) สีดำเข้มมีกลิ่นเหม็นเล็กน้อย) ดังนั้นจึงต้องการนำเอาตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งมาใช้ประโยชน์ไม่ว่าจะมากหรือน้อย เพื่อจะได้ให้เกิดการย่อยสลายของตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งบางส่วนเพื่อลดผลกระทบไม่มากนักน้อย เพราะเมื่อนำตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งทิ้งไว้โดยไม่ทำอะไรก็จะมีการย่อยสลายของของเสียที่ทำให้เกิดก๊าซมีเทนและก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นนั้นถูกปล่อยสู่บรรยากาศซึ่งเป็นผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในรูปแบบหนึ่ง ดังนั้นจึงนำเอากระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนมาใช้ในการหมักของเสียจากบ่อเลี้ยงกุ้งมาเปลี่ยนเป็นก๊าซชีวภาพซึ่งก๊าซชีวภาพเหล่านี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากมายไม่ว่าจะใช้ในครัวเรือนหรืออาจจะใช้ในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรม ซึ่งการใช้ในครัวเรือนนั้นสามารถใช้ในการหุงต้มได้โดยตรงแต่อาจจะมีความเสี่ยงจากแอมโมเนียบ้างเล็กน้อยหรืออาจจะใช้กับรถยนต์ได้แต่ต้องทำก๊าซชีวภาพให้มีก๊าซมีเทนบริสุทธิ์ขึ้นโดยทำการกรองก๊าซที่ผสมให้น้อยลง การที่จะนำกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนของตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งมาใช้ประโยชน์นั้นจำเป็นต้องทำการเรียนรู้ถึงพฤติกรรม การตอบสนองของกระบวนการ เมื่อต้องทำการศึกษาดังพฤติกรรมของกระบวนการ จำเป็นจะต้องรู้ถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แต่อย่างไรก็ดีได้มีผู้ที่ทำการศึกษาดังกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะทำการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมกับการทดลอง ในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนมีปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการศึกษา

ชีวภาพนั้นมีมาก และได้ทำการระบุเอกลักษณ์ของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนเพื่อจะทำการศึกษาและเข้าใจถึงกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนให้มากขึ้น และสามารถประมาณปริมาณอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพได้โดยต้องกำหนดขอบเขตของกระบวนการและต้องทำการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้นั้นได้อย่างถูกต้องจึงจะทำการประมาณปริมาณก๊าซชีวภาพได้ถูกต้องมากยิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อระบุเอกลักษณ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งโดยกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนสำหรับกระบวนการแบคทีเรียโดยใช้แบบจำลองแบบขั้นตอนเดียว

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนซึ่งได้จากแบบจำลองของ (Bastin, G., and Dochain, D., 1991)
2. อัลกอริทึมที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ และการทดลองจริงโดยใช้โปรแกรม MATLAB
3. ในการทดลองจะทำโดยให้กระบวนการดำเนินด้วยตัวเองโดยไม่ให้พลังงานในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1. วิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนสำหรับกระบวนการแบคทีเรีย
2. สร้างอัลกอริทึมเพื่อใช้ในการจำลองสถานการณ์และทดลองระบุเอกลักษณ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนของตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งโดยวิธีการระบุเอกลักษณ์
3. ค่า PH ที่ใช้ในการหมักตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งอยู่ในช่วง 5.0 - 8.0
4. อุณหภูมิที่ใช้ในการหมักตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งอยู่ในช่วง 20 - 40°C
5. แบบจำลองที่ใช้เป็นแบบจำลองแบบขั้นตอนเดียว (Bastin, G., and Dochain, D., 1991)
6. ปริมาณของตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งที่ใช้ในการหมักมีปริมาณ 80 ลิตร

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

วิธีการระบุเอกลักษณ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งโดยกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนสำหรับกระบวนการแบคที

1.6 การจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 6 บท 6 ภาคผนวก ซึ่งมีรายละเอียดโดยย่อ ดังนี้

บทที่ 1 บทนำกล่าวถึงความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ และเป้าหมายของงานวิจัย ตลอดจนขอบเขต และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน ปฏิกิริยารวมรวม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 กล่าวถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน สำหรับกระบวนการแบคที

บทที่ 4 กล่าวถึงการระบุเอกลักษณ์ และวิธีการนำเทคนิคทางปัญญาประดิษฐ์มาประยุกต์ใช้ในการระบุเอกลักษณ์

บทที่ 5 ผลการประมาณค่าสัมประสิทธิ์โดยวิธีการระบุเอกลักษณ์ เพื่อเปรียบเทียบผลกับผลที่ได้จากการทดลอง

บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

ปรีทศวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักคือการระบุเอกลักษณ์ของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน ซึ่งมีการพัฒนาทางด้านคณิตศาสตร์และการระบุเอกลักษณ์อย่างต่อเนื่องตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน บทนี้ได้นำเสนอการปรีทศวรรณกรรมและงานวิจัยที่มีปรากฏมาก่อนแล้ว

2.2 กระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน

ก๊าซชีวภาพหมายถึงก๊าซที่ได้จากการย่อยสลายสารอินทรีย์จากสิ่งมีชีวิตทั้งที่เป็นพืชและสัตว์ ในสภาวะไร้ออกซิเจนโดยมีจุลินทรีย์หลายชนิดเป็นตัวย่อยสลาย ก๊าซชีวภาพเป็นก๊าซผสมระหว่างก๊าซมีเทน (CH_4) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นส่วนใหญ่ ก๊าซที่เกิดจากกระบวนการหมักจะมีปริมาณที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่ใช้และสภาวะของกระบวนการหมัก ก๊าซชีวภาพมีคุณสมบัติเป็นเชื้อเพลิงที่สามารถทดแทนเชื้อเพลิงจากแหล่งอื่นได้เช่นฟืน ถ่าน น้ำมัน ก๊าซหุงต้ม เป็นต้น ก๊าซชีวภาพสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการหุงต้มได้โดยตรงเหมือนก๊าซแอลพีจี ซึ่งมีความสะดวกในการใช้งานมากกว่าการใช้ฟืนหรือถ่านทั้งยังปราศจากควันและเขม่าด้วย จึงทำให้สถานที่ที่ใช้ก๊าซนี้มีความสะอาดกว่า ก๊าซชีวภาพยังสามารถให้พลังงานด้านแสงสว่างเมื่อนำมาใช้กับตะเกียงหรือเครื่องปั่นไฟรวมทั้งให้พลังงานความร้อน นอกจากนั้นยังสามารถนำไปใช้กับเครื่องยนต์ชนิดต่าง ๆ แทนน้ำมันเชื้อเพลิงได้อีกด้วย ก๊าซชีวภาพที่สามารถใช้เป็นพลังงานเชื้อเพลิงได้จะต้องมีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบไม่น้อยกว่าร้อยละ 50

จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องในการผลิตก๊าซชีวภาพสามารถแบ่งได้เป็นสองกลุ่มตามความต้องการใช้ออกซิเจนคือกลุ่มกึ่งไม่ใช้ออกซิเจน (Facultative Anaerobic Bacteria) และกลุ่มไม่ใช้ออกซิเจน (Obligate Anaerobic Bacteria) หรือแบ่งเป็นสามกลุ่มตามปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือแบคทีเรียที่สร้างกรด (Acid Former Bacteria) แบคทีเรียที่เป็นตัวสร้างมีเทน (Methane Former Bacteria) และแบคทีเรียลดออกซิเจนจากซัลเฟต (Sulfate Reducing Bacteria)

สำหรับกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนของสารอินทรีย์ ซึ่งเป็นสารประกอบจำพวก โปรตีน คาร์โบไฮเดรต และไขมันทั้งที่อยู่ในรูปของแข็งและสารละลาย กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนแบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอนคือ

ขั้นตอนที่ 1 : Solubilisation หรือ Hydrolysis

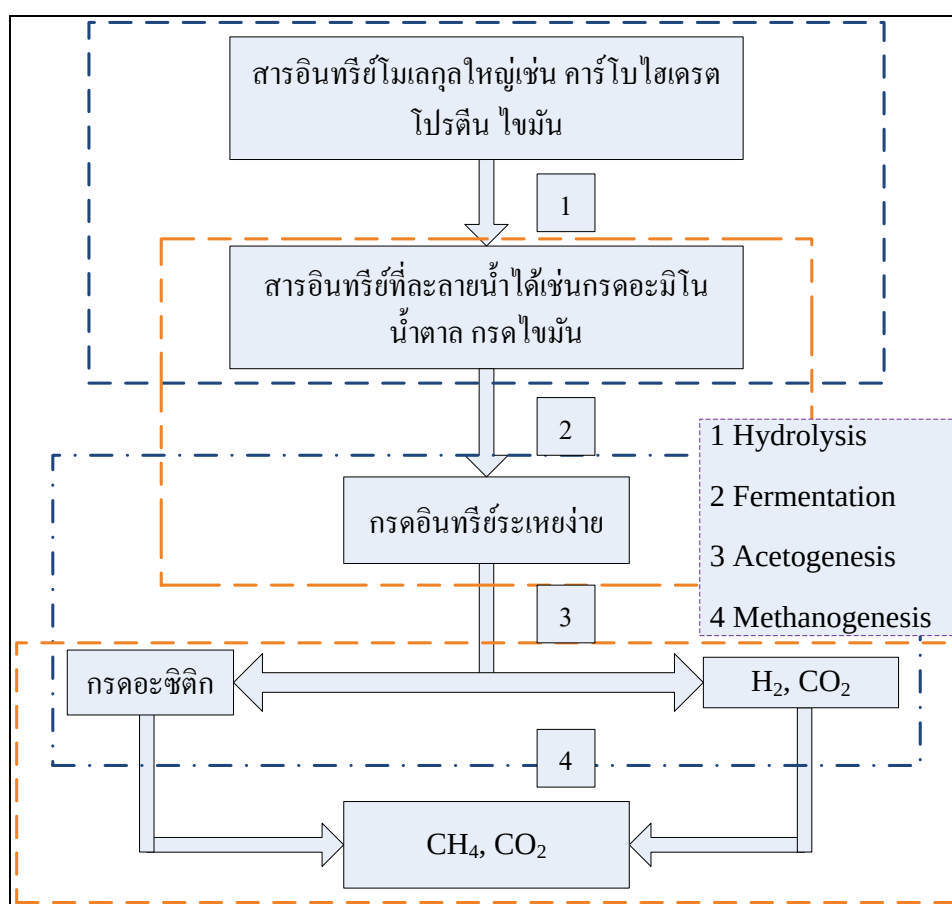
ขั้นตอนที่ 2 : Acidogenesis (Fermentation)

ขั้นตอนที่ 3 : Acetogenesis

ขั้นตอนที่ 4 : Methanogenesis

การแบ่งขั้นตอนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนอาจแบ่งได้สองระดับตามผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนคือการย่อยสลายแบบไม่มีการสร้างมีเทนและการย่อยสลายแบบมีการสร้างมีเทน

การย่อยสลายแบบไม่มีการสร้างมีเทนสามารถแบ่งออกได้เป็นสองส่วนคือกระบวนการที่เกิดภายนอกเซลล์และกระบวนการที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ กระบวนการที่เกิดภายนอกเซลล์ได้แก่ขั้นตอนที่ 1 และกระบวนการที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ได้แก่ขั้นตอนที่ 2 และขั้นตอนที่ 3 และการย่อยสลายแบบมีการสร้างมีเทนได้แก่ขั้นตอนที่ 4 ดังแสดงในรูป 2.1



รูปที่ 2.1 กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนของสารอินทรีย์
ขั้นตอนที่ 1 การย่อย (Solubilisation หรือ Hydrolysis)

ในขั้นตอนนี้สารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต ไขมันและโปรตีน รวมทั้ง คาร์โบไฮเดรตที่ย่อยสลายยากได้แก่ เซลลูโลส (Cellulose) และสารประกอบประเภท ไฟเบอร์พืชเช่น ลิกนิน (Lignin) และเฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) จะถูกแบคทีเรียย่อยสลายโดย เอนไซม์ที่ปล่อยออกมาภายนอกเซลล์ (Extracellular Enzyme) ให้กลายเป็นสารประกอบเชิงเดี่ยวหรือสารอินทรีย์โมเลกุลเล็กสำหรับใช้ในกระบวนการสร้างกรด แบคทีเรียที่ทำหน้าที่ในการย่อยสลายคือแบคทีเรียจำพวกแฟคัลเททีฟ โดยกลุ่มของแบคทีเรียในขั้นตอนนี้แบ่งได้ตาม ชนิดของเอนไซม์ที่ใช้ในการย่อยสลายสารต่างชนิดกัน ได้ดังนี้คือ เซลลูโลติก โลโปไลติก และโปรทีโอไลติก ความเร็วของกระบวนการย่อยสลายในขั้นตอนนี้ขึ้นอยู่กับเอนไซม์ที่ถูกปล่อยออกมาจากแบคทีเรีย เอนไซม์ที่ปล่อยออกมาจะมีความเฉพาะเจาะจงมากในการเข้าทำปฏิกิริยาโดยจะเลือกชนิดของปฏิกิริยา และชนิดของของสารที่เข้าทำปฏิกิริยา รวมถึงการทำงานของเอนไซม์ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการเช่น ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ ความเข้มข้นของเอนไซม์ อุณหภูมิ และการสัมผัสระหว่างเอนไซม์กับสารอินทรีย์ เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 2 กระบวนการ Acidogenesis (Fermentation)

ในขั้นตอนนี้จะใช้สารที่ได้จากการย่อยสลายในขั้นตอนแรกเป็นสารตั้งต้น สำหรับแบคทีเรียประเภทสร้างกรด โดยแบคทีเรียกลุ่มนี้จะเปลี่ยนสารอาหารดังกล่าวให้เป็นกรดอินทรีย์เช่น กรดอะซิติก (Acetic Acid) กรดโพรไพโอนิก (Propionic Acid) กรดวาเลอริก (Valeric Acid) และกรดแลคติก (Lactic Acid) โดยกรดที่เกิดขึ้นทั้งหมดมีส่วนของกรดอะซิติก สูงสุด และมีการเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในขั้นตอนนี้ด้วยแบคทีเรียสร้างกรดมีอัตราการเจริญเติบโตสูงและทนทานต่อสภาพแวดล้อมได้ดี เป็นผลสืบเนื่องมาจากการอยู่ร่วมกันของแบคทีเรียหลายสปีชีส์ กรณีที่กลุ่มของแบคทีเรียสร้างกรดมีการสร้างกรดมากเกินไป จะก่อให้เกิดปัญหากับระบบผลิตก๊าซชีวภาพโดยรวม เนื่องจากแบคทีเรียสร้างมีเทนจะถูกยับยั้งการทำงานเนื่องจากเกิดกรดที่สร้างจากกระบวนการ Acidogenesis มากเกินไปทำค่า PH ของระบบลดลงอยู่ในช่วงที่เป็นกรดมากทำให้เกิดความไม่เหมาะสมกับการดำรงชีพของกลุ่มแบคทีเรียสร้างมีเทนได้ สำหรับแบคทีเรียในขั้นตอนการสร้างกรดคือแบคทีเรียในกลุ่มของ Fermentative Bacteria ที่สามารถทำปฏิกิริยา Hydrolysis ได้

ขั้นตอนที่ 3 กระบวนการ Acetogenesis

การที่แบคทีเรียสร้างมีเทนต้องการสารอาหารที่มีความเฉพาะเจาะจงสูง โดยสารอาหารที่แบคทีเรียสร้างมีเทนสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ประกอบไปด้วย กรดอะซิติก กรดฟอร์มิก ไฮโดรเจน เมทานอล และเมธิลามีน แต่ไม่สามารถใช้กรดไขมันระเหยง่ายที่มีคาร์บอนอะตอมเกินกว่าสองอะตอมเช่น กรดโพรพิโอนิก กรดบิวทิริก เป็นสารอาหารในการผลิตก๊าซมีเทนโดยตรงได้ ดังนั้นในกรณีที่ไขมันระเหยง่ายที่สร้างขึ้นอยู่ในรูปของกรดอินทรีย์ที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม

แบคทีเรียสร้างมีเทนไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ เกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ในระบบ เพื่อให้ระบบอยู่ในสภาพที่เหมาะสมต่อการดำรงชีพของแบคทีเรีย จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องทำการย่อยสลายกรดอินทรีย์เหล่านั้นให้มีอะตอมของคาร์บอนที่ลดลง เพื่อให้ปฏิกิริยาดำเนินต่อไปได้

ขั้นตอนที่ 4 การสร้างมีเทน (Methanogenesis)

กรดอินทรีย์โมเลกุลเล็ก ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดจากขั้นตอนการสร้างกรดจะถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยแบคทีเรียชนิดสร้างก๊าซมีเทน การเกิดก๊าซมีเทนเกิดได้ 2 แบบ แบบแรกคือเกิดจากการเปลี่ยนกรดอินทรีย์ไปเป็นก๊าซมีเทน ซึ่งก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนนี้มีปริมาณเป็น 70% ของก๊าซมีเทนสามารถเกิดขึ้นได้ในระบบ และอีกส่วนหนึ่งจะเกิดจากการรีดิวซ์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนให้กลายเป็นก๊าซมีเทน แบคทีเรียสร้างมีเทนเจริญเติบโตได้ช้าและสภาพแวดล้อมมีผลต่อการเจริญเติบโตค่อนข้างมาก ทำให้ช่วง PH ที่เหมาะสมต่อการทำงานของแบคทีเรียชนิดนี้แคบ โดยสามารถเจริญเติบโตได้ดีในช่วงประมาณ 6.8 - 7.2 และแบคทีเรียในกลุ่มที่มีอัตราการเจริญเติบโตเจริญเติบโตช้าหรือการเพิ่มขึ้นของจำนวนเซลล์ใหม่ต่ำ ต้องการสารอาหารที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อนดังนั้นการเติบโตของแบคทีเรียสร้างมีเทน จึงขึ้นอยู่กับแบคทีเรียที่สร้างกรด โดยแบคทีเรียทุกกลุ่มต้องทำงานอย่างสัมพันธ์กัน ดังนั้นเมื่อพิจารณากลุ่มของแบคทีเรียที่อยู่ร่วมกันในระบบการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน พบว่ากลุ่มของแบคทีเรียสร้างมีเทนจะเป็นกลุ่มแบคทีเรียหลักในการควบคุมความเร็วในการเกิดปฏิกิริยาทั้งหมดในระบบ เนื่องจากแบคทีเรียกลุ่มนี้มีอัตราการเติบโตช้าที่สุด และมีข้อจำกัดด้านสภาพแวดล้อมของระบบมากกว่าแบคทีเรียกลุ่มอื่น ๆ

ปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน

ปัจจัยที่มีผลต่อระบบสามารถจำแนกออกเป็น 2 ลักษณะคือ

- ปัจจัยทางด้านสภาพแวดล้อม ได้แก่ PH อุณหภูมิ ความเป็นด่าง สารพิษ สารยับยั้งและลักษณะของของเสีย
- ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเดินระบบ ได้แก่ การกวนผสม อัตราการระบายทุกสารอินทรีย์และเวลากักเก็บ

2.3 ปรัชญ่วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

Simeonov, I. (1994) ได้ศึกษาแบบจำลองและควบคุมกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนของของเสียจากสิ่งมีชีวิต โดยใช้ถังหมักที่มีการกวนในการหมักของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน โดยพิจารณาอัตราการเกิดก๊าซมีเทน สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการควบคุมเป็นสมการไม่เป็นเชิงเส้น และในกระบวนการจะป้อนข้อมูลเข้า 2 ข้อมูลและปริมาณของสิ่งที่ผลิตได้ 1 ข้อมูล และยังมีตัวแปรที่ไม่สามารถวัดได้ ในการทดลองจะมีการเติมสารเข้าในกระบวนการและทำการจำลองสมการที่เป็นสมการไม่เป็นเชิงเส้นให้เป็นสมการเชิงเส้นและทำการประยุกต์ใช้กลองดำในการศึกษาในหัวข้อนี้ แบบจำลองเชิงเส้นทำการประมาณค่าในช่วงความมั่นคงของระบบ ซึ่งสมการนี้มีเสถียรภาพ สามารถสังเกตได้ และสามารถควบคุมได้ และทำการควบคุมแบบ PI กับ PID กับสมการไม่เป็นเชิงเส้นและทำการจำลองกระบวนการเพื่อทำการศึกษา

Simeonov, I., Momchev, V., and Grancharov, D. (1996) ศึกษาแบบจำลองทางพลศาสตร์ของช่วงอุณหภูมิมีโซฟิลิกในการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนของมูลสัตว์ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์เปลี่ยนแปลงตามเวลาซึ่งอธิบายพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนทั้งกระบวนการแบบต่อเนื่องและกระบวนการต่อเนื่อง ในการพิจารณากระบวนการแบบต่อเนื่องมีแนวทางในการหาค่าสัมประสิทธิ์จากผลการทดลองเก็บข้อมูล และสามารถทำการจำลองสถานการณ์ได้ดี

Husain, A. (1998) ได้ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทางจลนศาสตร์ของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน โดยพิจารณาแบบจำลองทางพลศาสตร์ที่สถานะคงตัว ได้พัฒนาแบบจำลองทางพลศาสตร์จาก Hill (Auburn University, AL) สมการได้ทำนายความเข้มข้นของสารอินทรีย์และจุลินทรีย์จากอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพในปฏิกิริยาของถังหมักแบบกวน ในการผลิตก๊าซชีวภาพจากกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน

Lo, C.H., Chow, K.M., Wong, Y.K., and Rad, A.B. (2001) ได้ศึกษาคุณสมบัติการระบุเอกลักษณ์ของระบบกับการใช้จินเนติกอัลกอริทึมแบบต่อเนื่อง ปัญหาหลักในการสร้างแบบจำลองอย่างต่อเนื่องในการระบุเอกลักษณ์ของระบบ เทคนิคที่มีคุณภาพจากข้อจำกัดในการกรองสัญญาณปนเปื้อน โดยใช้การผสมผสานจินเนติกอัลกอริทึมและหลักเหตุผล เมื่อให้อินพุตเข้าไปกับระบบแล้วทำการกรองสัญญาณและทำนายข้อกำหนดที่เหมาะสม

Batstone, D.J., Keller, J., Angelidaki, I., Kalyuzhnyi, S.V., Pavlostathis, S.G., Rozzi, A., Sanders, W.T., Siegrist, H., and Vavilin, V.A. (2002) ใช้หลักการทางชีวเคมี สมการ kinetic rate equation และ mass balance ในการสร้างสมการ Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM1)

Noykova, N., Muller, T.G., Gyllenberg, M., and Timmer, J. (2002) ได้ศึกษาการวิเคราะห์การวัดปริมาณของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนของน้ำเสียโดยการระบุเอกลักษณ์และการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ โดยใช้สมการแบบอันดับ 5 มีการแยกแบบที่เรียออกเป็นสองกลุ่ม และได้วิเคราะห์ปริมาณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากข้อมูลการทดลอง และทำการประมาณค่าสัมประสิทธิ์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เปรียบเทียบกับผลการทดลองเพื่อนำไปควบคุม

Muller, T.G., Noykova, N., Gyllenberg, M., and Timmer, J. (2002) ได้ศึกษาการระบุค่าสัมประสิทธิ์ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนของน้ำเสียที่สร้างขึ้นเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ในรูปทั่วไป โดยใช้สมการอนุพันธ์อันดับสอง และแสดงโครงสร้างการระบุเอกลักษณ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

Simeonov, I., and Stoyanov, S. (2003) ได้ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และควบคุมกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนของของเสียจากสิ่งมีชีวิต ซึ่งเป็นสมการแบบไม่เป็นเชิงเส้น และทำการหาค่าสัมประสิทธิ์โดยใช้วิธีที่ดีที่สุดบนสมการไม่เป็นเชิงเส้นและทำการพัฒนาการควบคุมอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพและทำการจำลองสถานการณ์จากข้อมูลที่ทดลองได้

Kikuchi, S., Tominaga, D., Arita, M., Takahashi, K., and Tomita, M. (2003) ได้ศึกษาแบบจำลองพลวัตของเครือข่ายของจินเนติกอัลกอริทึม และได้นำเสนอการทำนายโครงสร้างแบบจำลองทางพลวัตโดยใช้จินเนติกอัลกอริทึมในโดเมนความถี่

Andrews John, F. (2004) ได้ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการต่อเนื่องของการยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ของสารอินทรีย์และได้นำทฤษฎีการควบคุมมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนเพื่อให้ได้อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพให้ได้มากที่สุดโดยการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารอินทรีย์ เริ่มใส่ acetic acid เข้าไป โดยใช้วิธี non-linear optimization ในการจำลองสถานการณ์

Feng, Y., Behrendt, J., Wendland, C., and Otterpohl, R. (2006) ได้ทำการจำลองสถานการณ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ADM1 ของน้ำเสียเทียบกับผลการทดลอง

Boubaker, F., and Cheikh Ridha, B. (2008) ได้ทำการจำลองสถานการณ์ของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนและทำนายผลของ alkalinity ammonium และไนโตรเจน โดยใช้โปรแกรม MATLAB

Mu, S.J., Zeng, Y., Wu, P., Lou, S.J., and Tartakovsky, B. (2008) ใช้หลักการทางชีวเคมีในการสร้างสมการ kinetic rate equation และ mass balance ของ Anaerobic Digestion Model No 1 (ADM1) โดยใช้วิธี Orthogonal collocation ในการแก้ปัญหาเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์โดยการเปรียบเทียบกับผลการทดลอง

Giriraj Kumar, S.M., Jain, R., Anantharaman, N., Dharmalingam, V., and Sheriffa Begum, K.M.M. (2008) ได้ศึกษาการควบคุมแบบ PID ในกระบวนการทางเคมี โดยใช้เงินเนติกอัลกอริทึมปรับค่าตัวควบคุมแบบ PID ที่มีผลต่อเสถียรภาพและประสิทธิภาพของการควบคุม และได้ทำการเปรียบเทียบกับวิธีเดิม พบว่าการใช้เงินเนติกอัลกอริทึมทำให้ประสิทธิภาพในการควบคุมแบบ PID สำหรับกระบวนการเคมีดีขึ้น

Abu Qdais, H., Bani Hani, K., and Shatnawi, N. (2009) ได้ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการผลิตก๊าซชีวภาพจากของเสียโดยใช้เครื่องข่ายเงินเนติกอัลกอริทึม เปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้ทำการเก็บค่าอุณหภูมิ ของแฉ่งทั้งหมดกับของแฉ่งที่ระเหยได้ และค่า PH เพื่อทำนายการเกิดก๊าซชีวภาพ

Derbal, K., Bencheikh lehocine, M., Cecchi, F., Meniai, A.H., and Pavan, P. (2009) ได้ทำการจำลองสถานการณ์ของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนของของเสียจากกระบวนการบำบัดมารวมกับของเสียอื่น ๆ โดยใช้แบบจำลอง ADMM

2.4 สรุป

จากงานวิจัยที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นได้มีการศึกษากระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยใช้วิธีการหมักแบบไร้ออกซิเจน ซึ่งใช้สารอินทรีย์จากสิ่งมีชีวิตที่เป็นพืชและสัตว์เป็นสารตั้งต้น โดยมีจุลินทรีย์เป็นตัวย่อยสลายสารอินทรีย์ให้กลายเป็นก๊าซชีวภาพ และได้มีการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการเกิดก๊าซชีวภาพ โดยใช้สมการสมดุลมวลและใช้วิธีการระบุเอกลักษณ์เพื่อทำการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เปรียบเทียบกับข้อมูลจากการทดลอง การประมาณการเกิดก๊าซชีวภาพและควบคุมการเกิดก๊าซชีวภาพในกระบวนการหมักแบบต่อเนื่อง ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการระบุเอกลักษณ์ภายใต้โครงสร้างของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการแบคทีเรีย โดยมีการเติมสารอินทรีย์จากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพตอนเริ่มต้นเพียงครั้งเดียว

บทที่ 3

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในการวิเคราะห์ระบบหรือกระบวนการต่าง ๆ นั้นจำเป็นต้องทราบถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบนั้น การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนสามารถหาได้จากแบบจำลองที่ได้เคยมีการศึกษาไว้แล้ว ซึ่งจะทำให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์พื้นฐานของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน จากนั้นนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาวิเคราะห์เพื่อทำเก็บข้อมูลจากการทดลอง ซึ่งในการทดลองมีตัวแปรที่มีผลกระทบกับกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนหลายตัวแปร เพื่อนำไปใช้ในการประมาณค่าสัมประสิทธิ์

การประมาณค่าสัมประสิทธิ์ (Parameter Estimation) เป็นวิธีช่วยในการหาค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนได้ โดยการวัดอินพุตและเอาต์พุตของระบบแล้วนำข้อมูลเหล่านี้ไปวิเคราะห์หาค่าของสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ ที่สำคัญเพื่อใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบต่อไป โดยงานวิจัยนี้ศึกษาถึงกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนของตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งแบบแบตช์ เพื่อใช้ในการศึกษาวิเคราะห์และอธิบายพฤติกรรมของระบบในเชิงวิศวกรรม

3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากการวิเคราะห์โดยทฤษฎี

การย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนสามารถเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เกิดจากสารอินทรีย์ถูกย่อยสลายกลายเป็นก๊าซชีวภาพโดยใช้หลักการพื้นฐานของกฎอนุรักษ์มวล การทำสมดุลมวลสารเป็นการคำนวณเบื้องต้นในทางวิศวกรรมเคมี ระบบในที่นี้จะหมายถึงการทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์โดยผ่านหน่วยปฏิบัติการย่อยหลายหน่วย เราอาจสนใจหน่วยย่อยหน่วยใดหน่วยหนึ่งเป็นระบบ หรือ 2 - 3 หน่วยย่อยรวมกันเป็นหนึ่งระบบ ซึ่งในการเปลี่ยนแปลงนั้นอาจเป็นการเกิดปฏิกิริยา การถ่ายเทของเหลว การย่อยหรือการลดขนาด หรือการเพิ่มขนาด การกำเนิดและการถ่ายเทความร้อน การกลั่น การดูดซับ การทำปฏิกิริยาชีวเคมี ที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพหรือการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของสารตั้งต้น ในการวิเคราะห์ที่จะทำสมการสมดุลมวลของสิ่งใด สิ่งที่เป็นไปได้คือ

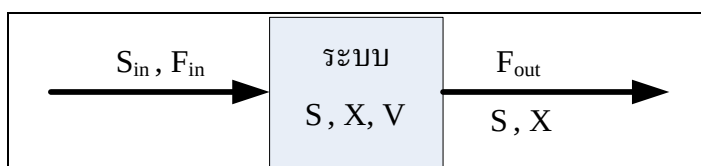
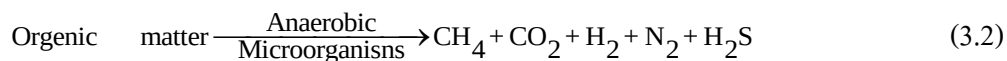
1. มวลรวม
2. โมลรวม
3. มวลของสารองค์ประกอบ
4. โมลของสารองค์ประกอบ
5. มวลของอะตอม
6. โมลของอะตอม
7. ปริมาตร (ถ้าเป็นไปได้)

การทำสมดุลมวลสารจะเหมือนกับการทำสมดุลเงิน หรือบัญชีเงินฝาก ซึ่งจะมีทั้งเงินที่เข้าและออกจากบัญชี ยอดเงินที่เข้าและออกที่ไม่เท่ากันจะทำให้มีการสะสมหรือลดจำนวนเงินในบัญชี เพียงแต่ในสมดุลมวลสารไม่มีการคิดดอกเบี้ยที่เกิดขึ้น แต่อาจมีการเกิดขึ้นของสารตัวใหม่หรือสารผลิตภัณฑ์แทน ดังนั้นถ้าพิจารณาระบบที่มีมวลสารไหลผ่านเข้าออก สมการหลักของสมดุลมวลสารคือ

$$\text{อัตราการสะสม} = \text{อัตราการไหลเข้า} - \text{อัตราการไหลออก} + (- \text{อัตราการย่อยสลายหรือ} + \text{อัตราการสร้าง}) \quad (3.1)$$

จากสมการที่ 3.1 สามารถใช้สมการสมดุลได้ แต่ไม่สามารถใช้ได้ทันทีกับปริมาตรเพราะในบางกรณีเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลง ความหนาแน่นของสารแต่ละตัวอาจไม่เท่าเดิม หรือมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเมื่อมีการผสมกันขององค์ประกอบย่อยในกระบวนการ เราจึงใช้ปริมาตรมาทำสมดุลมวลสารไม่ได้ยกเว้นจะใช้ได้ก็ต่อเมื่อปริมาตรคงที่เท่านั้น อัตราการสะสมของมวลหรือโมลจะเพิ่มขึ้นหรือลดลง เมื่อคุณสมบัติของระบบแปรเปลี่ยนตลอดเวลา เราเรียกกระบวนการนั้นว่า Unsteady State หรือ Transient Process ในทางตรงกันข้ามถ้าสมบัติของระบบหรือสถานะของระบบ (เช่นอุณหภูมิ ความดัน มวลสารในระบบ) และอัตราของมวลสารที่ไหลเข้าและไหลออกคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงกับเวลา เราเรียกกระบวนการนี้ว่า Steady State ในกระบวนการนี้จะไม่มีการสะสมของมวลสารในระบบ ส่วนคำว่า Continuous Process นั้นจะหมายถึงกระบวนการที่มีสารไหลเข้าออกระบบตลอดเวลา

ในการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนสามารถเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นของแบบจำลองแบบขั้นตอนเดียวโดยที่ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเกิดจากสารอินทรีย์ถูกย่อยสลายด้วยกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนกลายเป็นก๊าซชีวภาพ



รูปที่ 3.1 กระบวนการที่มีการไหลเข้าออกตลอดเวลา

จากรูปที่ 3.1 การสะสมสุทธิของชีวมวลในระบบสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\frac{d(VX)}{dt} = \mu VX - F_{out} X \quad (3.3)$$

จากสมการที่ 3.3 การสะสมของชีวมวลต่อเวลาเท่ากับปริมาณการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ลบกับปริมาณของจุลินทรีย์ที่ออกจากระบบ

X	= ความเข้มข้นของประชากรจุลินทรีย์ในระบบ (g/l)
μ	= ค่าเฉพาะของอัตราการเติบโตจำเพาะของจุลินทรีย์ (d^{-1})
V	= ปริมาณอาหารเลี้ยงเชื้อภายในระบบ (l)
t	= เวลา (d)
F_{out}	= อัตราการไหลออก (l/d)

จากรูปที่ 3.1 การสะสมสุทธิของสารอินทรีย์ในระบบสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\frac{dVS}{dt} = -k_1 \mu VX + F_{in} S_{in} - F_{out} S \quad (3.4)$$

จากสมการที่ 3.4 การสะสมของสารอินทรีย์ต่อเวลาเท่ากับการย่อยสลายของสารอินทรีย์บวกกับปริมาณของสารอินทรีย์ที่เข้าลบกับปริมาณของสารอินทรีย์ที่ออก

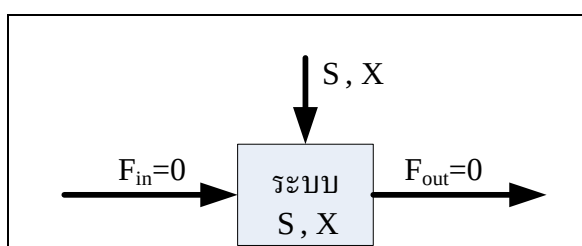
$$\begin{aligned} S &= \text{ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ (g/l)} \\ F_{in} &= \text{อัตราการไหลเข้า (l/d)} \\ k_d &= \text{ค่าคงที่} \end{aligned}$$

จากรูปที่ 3.1 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณในระบบสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\frac{dV}{dt} = F_{in} - F_{out} \quad (3.5)$$

จากสมการที่ 3.5 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณอาหารเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ภายในระบบต่อเวลาเท่ากับอัตราการไหลเข้าลบอัตราการไหลออก

วิธีการหมักของกระบวนการการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน มีหลายวิธีแต่ได้เลือกใช้กระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนแบบแบตช์ (The batch reactor) การทำงานของกระบวนการนี้คือปริมาณหรืออัตราการไหลเข้าและไหลออกมีค่าเท่ากับศูนย์ (กระบวนการนี้จะมีการเติมสารเพียงครั้งเดียว) ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ปฏิกริยาแบบแบตช์

การใช้กระบวนการแบตช์นั้นเนื่องมาจากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งมีความหนืดซึ่งกระบวนการแบตช์มีการเติมสารเพียงครั้งเดียวจนกว่าจะจบกระบวนการแล้วจึงนำสารนั้นออกมา เหมาะอย่างมากกับกระบวนการนี้เนื่องจากสภาพของตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งเป็นของแข็งและสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$F_{in} = F_{out} = 0 \quad (3.6)$$

จากสมการที่ 3.3 3.4 3.5 และ 3.6 เมื่อไม่ได้มีการเติมตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งตลอดเวลาหรือเป็นกระบวนการแบคทีเรียและกำหนดให้ปริมาณภายในกระบวนการมีปริมาณคงที่ จะสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\frac{d(X)}{dt} = \mu X \quad (3.7)$$

$$\frac{d(S)}{dt} = -k_1 \mu X \quad (3.8)$$

สมการของการผลิตก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากสมการสมดุลมวลของผลผลิต

$$\frac{dB}{dt} = \nu X - DB - Q \quad (3.9)$$

Q	= อัตราการผลิตก๊าซ (l/day)
B	= ความเข้มข้นของผลผลิต (l)
ν	= ค่าเฉพาะของอัตราการเกิดผลผลิตก๊าซ (l ² /g-d)
D	= ปริมาณการเจือจาง (d ⁻¹)

จากสมการที่ 3.9 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณของผลผลิตที่เป็นของเหลวต่อเวลาเท่ากับปริมาณผลผลิตที่จุลินทรีย์สร้างขึ้นลบกับปริมาณผลผลิตที่เป็นของเหลวที่ไหลออกลบกับปริมาณผลผลิตที่เป็นก๊าซแต่ในกระบวนการที่ทำการศึกษานั้นสนใจก๊าซเป็นผลผลิตเพียงอย่างเดียวดังนั้นสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$Q = \nu X \quad (3.10)$$

ในเทอมของ νX คืออัตราการเกิดผลผลิตที่จุลินทรีย์สร้างขึ้น สำหรับผลผลิตที่สนใจเป็นก๊าซ ทำให้ผลผลิตที่เป็นของเหลวถูกตัดทิ้งตั้งนั้น ($B = 0$) และได้มีการกำหนดให้ค่าเฉพาะของอัตราการเกิดผลผลิตจะได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\nu = k_2 \mu \quad (3.11)$$

การเกิดของก๊าซชีวภาพนั้นเกิดจากการสร้างโดยจุลินทรีย์ซึ่งสามารถเขียนสมการได้ดังสมการต่อไปนี้

$$Q = k_2 \mu X \quad (3.12)$$

จากสมการที่ผ่านมามีพบว่าสิ่งที่มีผลกับระบบนั้นคือการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ การย่อยสลายของจุลินทรีย์ซึ่งเราไม่สามารถวัดได้ ดังนั้นจึงจะมาวิเคราะห์ถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ซึ่งการเติบโตของจุลินทรีย์นั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความเป็นกรดเป็นด่าง ความเข้มข้นของสารอินทรีย์และอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพซึ่งสามารถเขียนสมการดังนี้

$$\mu(t) = \mu(S)\mu(X)\mu(P)\mu(PH)\mu(T)... \quad (3.13)$$

P	= ความดัน (psi)
PH	= ความเป็นกรดเป็นด่าง (PH)
T	= อุณหภูมิ (K)

ซึ่งปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้ได้มีผู้ที่ทำการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไว้แล้ว โดยสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ จากการทดลองและทำการหาสมการที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ซึ่ง

อิทธิพลของสารอินทรีย์ที่มีผลกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์มีผู้ที่ทำการหาสมการได้ดังนี้

Monod type

$$\mu(S) = \frac{\mu_0 S}{k_m + S} \quad (3.14)$$

Haldane type

$$\mu(S) = \frac{\mu_0 S}{k_H + S + S^2 / k_I} \quad (3.15)$$

ซึ่ง μ_0 = ค่าสูงสุดของการเกิดปฏิกิริยา (d^{-1})
 k_m k_H = ค่าคงที่ของสัมประสิทธิ์

อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์มีผู้ที่ทำการหาสมการได้ดังนี้
 Arrhenius type

$$\mu(T) = a_1 \exp(-E_1 / RT) - a_2 \exp(-E_2 / RT) - a_3 \quad (3.16)$$

อิทธิพลของ PH ที่มีผลกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์มีผู้ที่ทำการหาสมการได้ดังนี้
 PH by parabolic law

$$\mu(PH) = a(PH)^2 + b(PH) + c \quad (3.17)$$

อิทธิพลของผลผลิตที่มีผลกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์มีผู้ที่ทำการหาสมการได้ดังนี้

$$\mu(Q) = \frac{k_Q}{k_Q + Q} \quad (3.18)$$

ซึ่ง k_Q a_1 a_2 a_3 a b c = ค่าสัมประสิทธิ์
 E_1 E_2 = ค่าพลังงานของก๊าซ (J/g.mole)
 R = ค่าคงที่ของก๊าซ (J/g)

เมื่อเรารู้ถึงแบบจำลองพื้นฐานแล้วเราก็สามารถทำการประมาณการเปลี่ยนแปลงของ จุลินทรีย์ได้ โดยทำการทดลองเก็บข้อมูลของสิ่งที่เราสนใจในที่นี้คือก๊าซชีวภาพและปริมาณของที่เราให้เข้าไปกับการทดลองในที่นี้คือตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งแล้วจากนั้นทำการระบุเอกลักษณ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

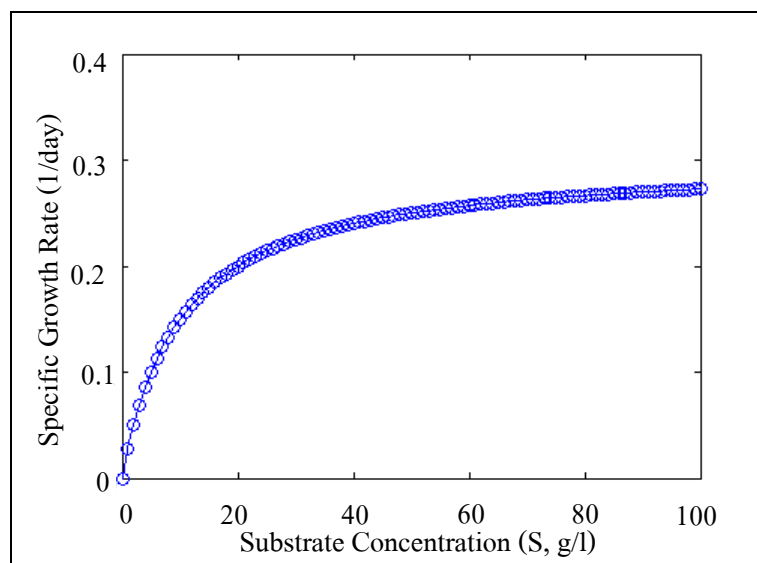
3.2 อิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

การตอบสนองของอิทธิพลที่เกิดขึ้นกับผลผลิตนั้นไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงโดยตรงกับ สารอินทรีย์แต่จะมีการเปลี่ยนแปลงจากการย่อยสลายของจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดก๊าซชีวภาพ ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์หลายปัจจัย เมื่อกระบวนการไม่ได้มีการควบคุม สภาพแวดล้อมภายนอก และตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งนั้นไม่ได้มีจุลินทรีย์เพียงชนิดเดียว กระบวนการเกิดก๊าซชีวภาพนั้นมีจุลินทรีย์อยู่สองกลุ่มที่ทำการย่อยสลายจากสารอินทรีย์จนมาเป็น ก๊าซชีวภาพ ทั้งสองกลุ่มนี้ต้องทำงานร่วมกันและสอดคล้องกัน ซึ่งปัจจัยที่ได้นำมาวิเคราะห์คือ อุณหภูมิ ความเป็นกรดเป็นด่าง ความเข้มข้นของสารอินทรีย์และอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ สามารถแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

3.2.1 อิทธิพลของความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่มีผลกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

อิทธิพลของความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่มีผลกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ซึ่งได้มีผู้ศึกษาไว้ 2 แบบจำลองคือ

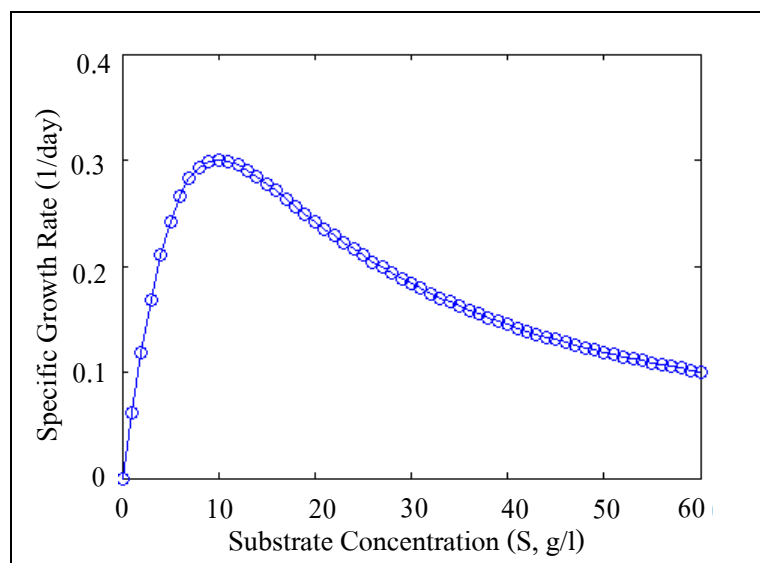
3.2.1.1 อิทธิพลของความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่มีผลกับการเจริญเติบโตของ จุลินทรีย์ของแบบจำลอง Monod จะเป็นไปตามสมการที่ 3.14 และได้แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารอินทรีย์กับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ของแบบจำลอง Monod

ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารอินทรีย์กับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ของแบบจำลอง Monod เมื่อความเข้มข้นของสารอินทรีย์มีปริมาณมากขึ้นการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ก็มีปริมาณเพิ่มขึ้นจนถึงค่าหนึ่งแล้วจะค่อย ๆ คงที่ ในทางตรงข้ามเมื่อความเข้มข้นของสารอินทรีย์มีปริมาณน้อยเกินไปจะทำให้การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์น้อยด้วยเช่นกัน

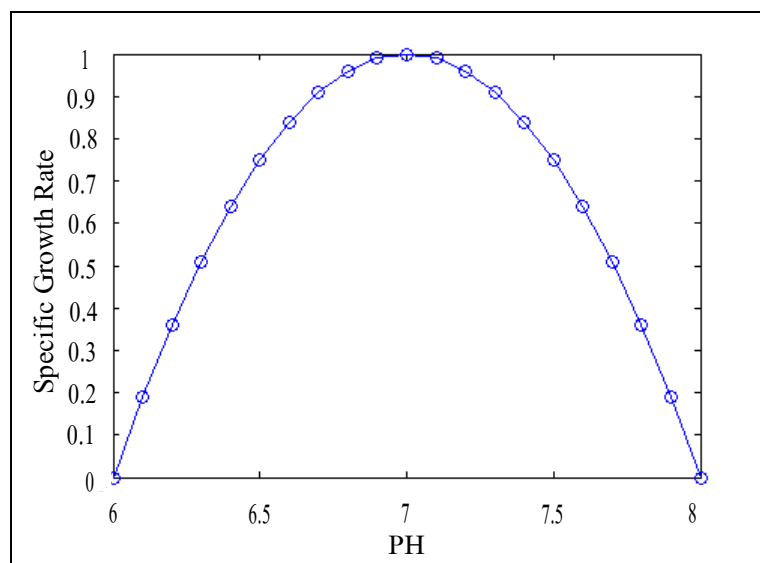
3.2.1.2 อิทธิพลของความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่มีผลกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ของแบบจำลอง Haldane จะเป็นไปตามสมการที่ 3.15 และแสดงได้ดังรูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารอินทรีย์กับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ของแบบจำลอง Haldane เมื่อสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นทำให้มีการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์มีปริมาณเพิ่มขึ้นจนถึงค่าหนึ่งแล้วเมื่อเพิ่มเข้าไปอีกจะทำให้การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์มีปริมาณลดลง



รูปที่ 3.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารอินทรีย์กับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ของแบบจำลอง Haldane

3.2.2 อิทธิพลของ PH ที่มีผลกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

อิทธิพลของ PH ที่มีผลกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ได้มีผู้ศึกษาไว้แล้วซึ่งเป็นไปตามสมการ 3.17 และแสดงได้ดังรูปที่ 3.5

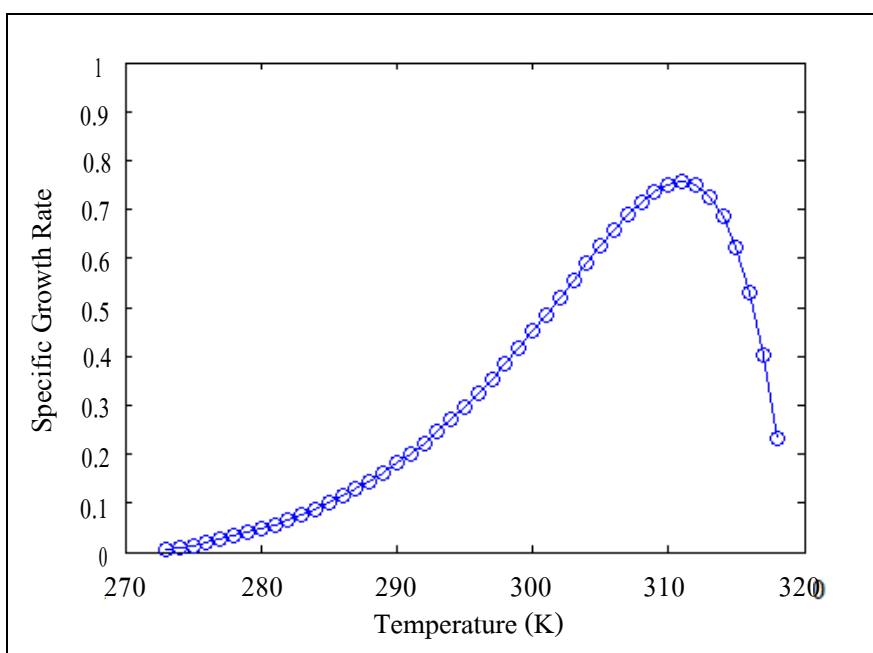


รูปที่ 3.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง PH กับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์เกิดได้ในช่วงระหว่าง PH 6 - 8 ซึ่งเจริญเติบโตได้ดีที่สุดอยู่ที่ PH เท่ากับ 7 กราฟการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์มีลักษณะคล้ายกับระฆังคว่ำ ซึ่งถ้า PH น้อยกว่า 6 หรือ PH มากกว่า 8 จุลินทรีย์จะไม่มี การเจริญเติบโตได้ ซึ่งทำให้จุลินทรีย์ตายนั่นเอง

3.2.3 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ได้มีผู้ศึกษาไว้แล้วซึ่งเป็นไปตามสมการ 3.16 และแสดงได้ดังรูปที่ 3.6

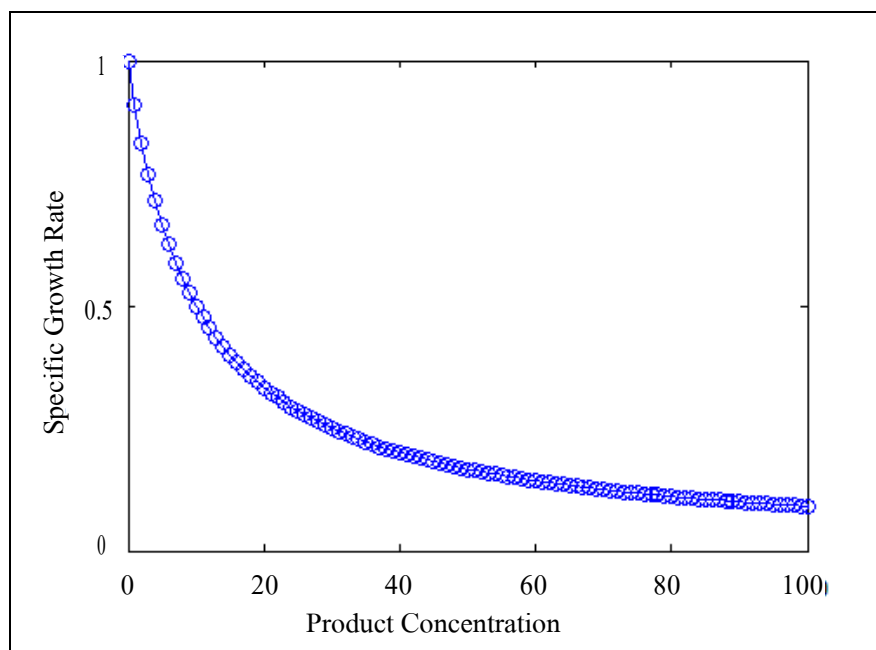


รูปที่ 3.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์จะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ซึ่งอุณหภูมิที่ทำให้การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์เกิดได้ดีนั้นอยู่ในช่วงระหว่าง 305 - 315 K

3.2.4 อิทธิพลของผลิตภัณฑ์ที่มีผลกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

อิทธิพลของผลิตภัณฑ์ที่มีผลกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ได้มีผู้ศึกษาไว้แล้วซึ่งเป็นไปตามสมการ 3.18 และแสดงได้ดังรูปที่ 3.7



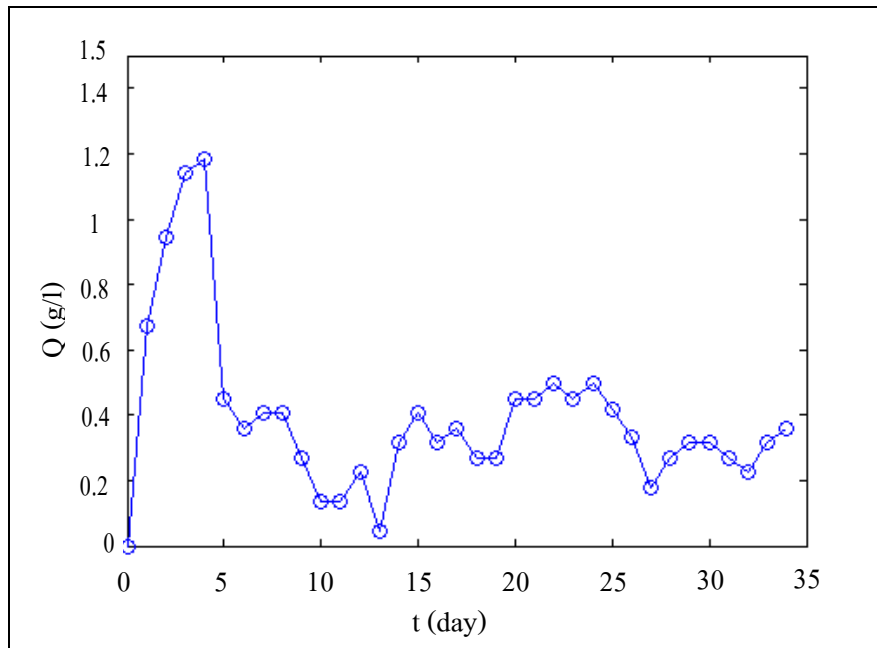
รูปที่ 3.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลผลิตกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์จะมีความสัมพันธ์กับผลผลิตซึ่งเมื่อมีปริมาณสารอินทรีย์คงที่และสถานะแวดล้อมคงที่ เมื่อเกิดผลผลิตน้อยจะแสดงว่าปริมาณจุลินทรีย์ยังน้อยอยู่ จึงทำให้มีการสร้างจุลินทรีย์ได้มากขึ้น เมื่อผลผลิตมากแสดงว่าปริมาณจุลินทรีย์มีมากแล้วทำให้มีการสร้างจุลินทรีย์ได้น้อยลง

ในงานวิจัยนี้จะได้ใช้แนวโน้มที่ได้จากผู้ที่เคยศึกษาไว้แล้วนำมาเปรียบเทียบเพื่อยืนยันการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง

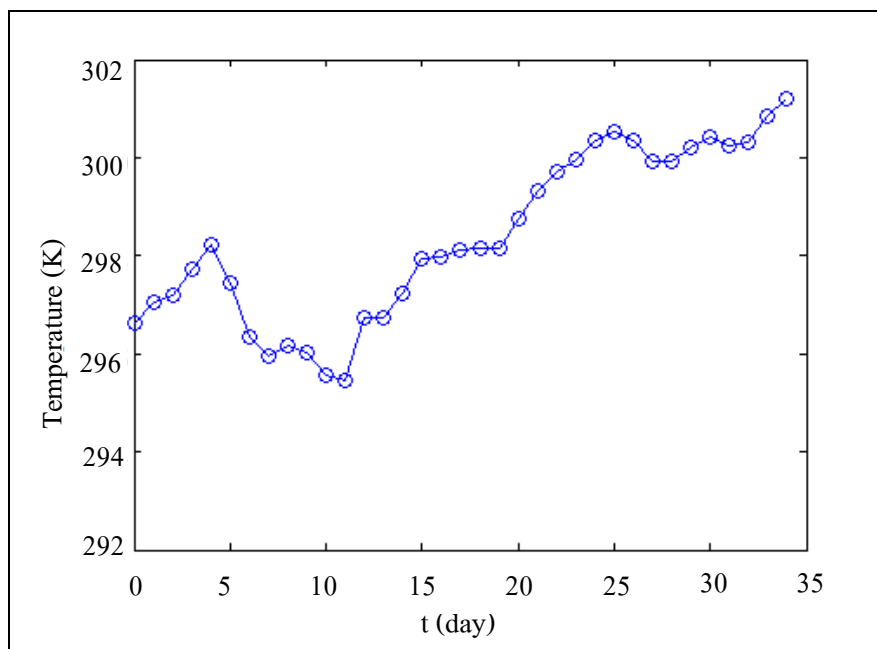
3.3 ผลการทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาแบบจำลองที่จะนำไปใช้งาน

ในบทนี้จะทำการทดสอบแบบจำลองย่อย ๆ เพื่อดูความสัมพันธ์ของแต่ละแบบจำลองว่ามีผลกระทบกับกระบวนการที่ได้ทำการทดลองหรือไม่ ซึ่งจากการทดลองที่ได้ทำนั้น ได้ทำการทดลองจากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งปริมาณ 80 ลิตร โดยการหมักในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนแบบแบคทีเรีย การหมักที่อุณหภูมิห้องอยู่ในช่วง 295 - 302 K และปริมาณอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพของตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งเกิดขึ้น ดังแสดงได้รูปที่ 3.8



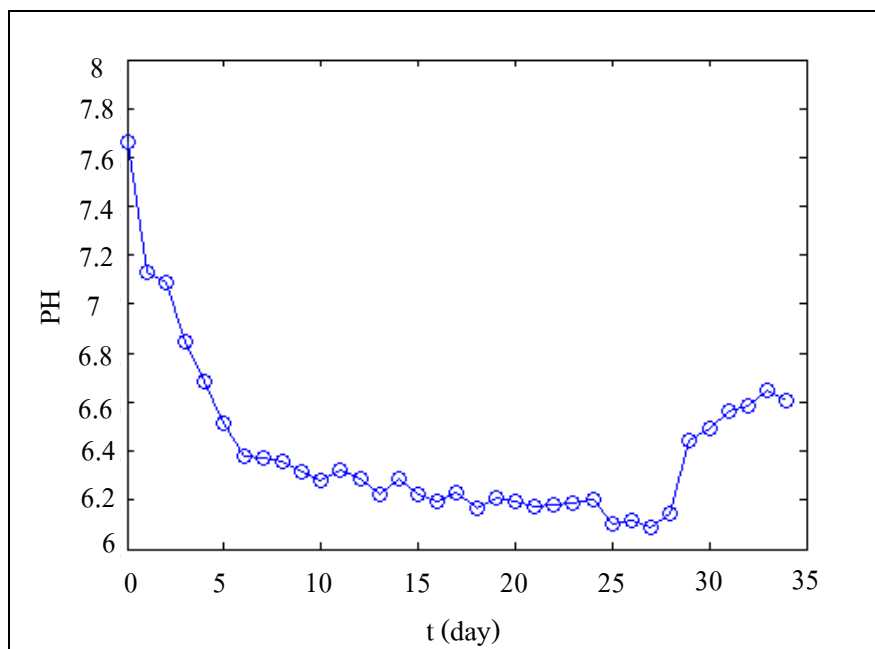
รูปที่ 3.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ

อุณหภูมิจะมีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิห้องโดยสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิ

การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดเป็นด่าง ระหว่าง 5.8 – 7.8 แต่ละวันดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับ PH

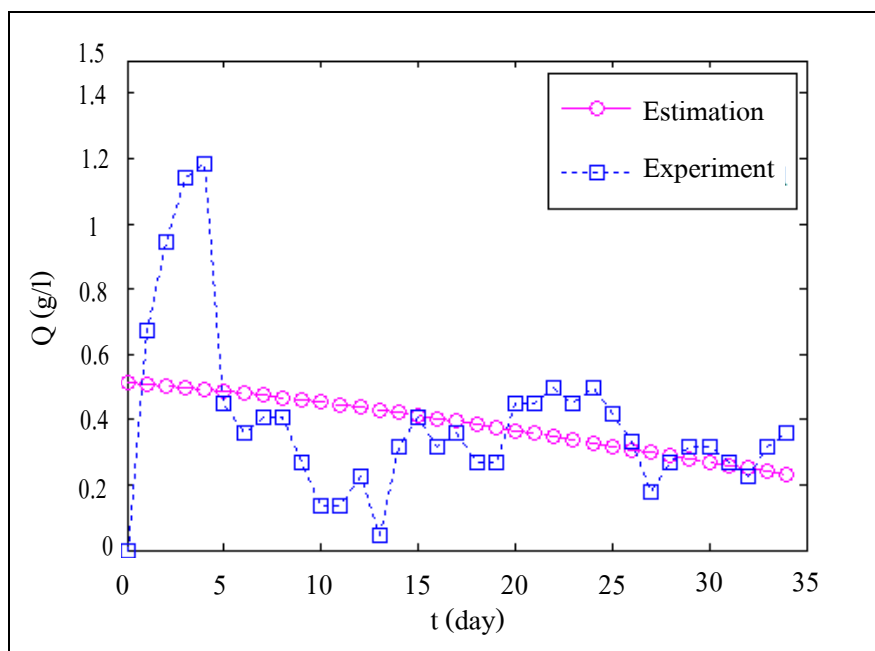
ผลการทดลองที่มีการเก็บข้อมูลเป็นเวลา 35 วัน ได้ก๊าซชีวภาพสะสมทั้งหมด 13,255 ลูกบาศก์เซนติเมตร และผลิตก๊าซชีวภาพเฉลี่ยได้ประมาณ 424.35 ลูกบาศก์เซนติเมตร สำหรับค่าที่ใช้ใส่ในสมการแบบขั้นตอนเดียวคืออินทรีย์วัตถุมีค่าเท่ากับ 73.5 g/l (S) เป็นสารอินทรีย์เริ่มต้นในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน ในการระบุเอกลักษณ์ของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน เพื่อประมาณค่าสัมประสิทธิ์ ซึ่งได้ทำการกำหนดขอบเขตที่จะทำการใช้ในโปรแกรม MATLAB ดังนี้

1. ให้ทำการประมาณค่าจำนวน 500 รอบ
2. ใช้จำนวนประชากรเท่ากับ 300
3. ให้หาค่าอยู่ในช่วงค่าบวกเท่านั้น

3.3.1 แบบจำลองของ Monod โดยใช้สมการที่ 3.7 3.8 3.12 และสมการที่ 3.14 ซึ่งได้ค่าของจุลินทรีย์เริ่มต้นในการประมาณจากโปรแกรมเท่ากับ 12.8661 g/l ได้ค่าสัมประสิทธิ์ดังตารางที่ 3.1 และสามารถแสดงดังรูปที่ 3.11

ตารางที่ 3.1 ค่าสัมประสิทธิ์ของ Monod

ตัวแปร	μ_0	k_1	k_2	k_s	Error
ค่าสัมประสิทธิ์	0.02953	10.4451	3.8605	137.3388	2.0038

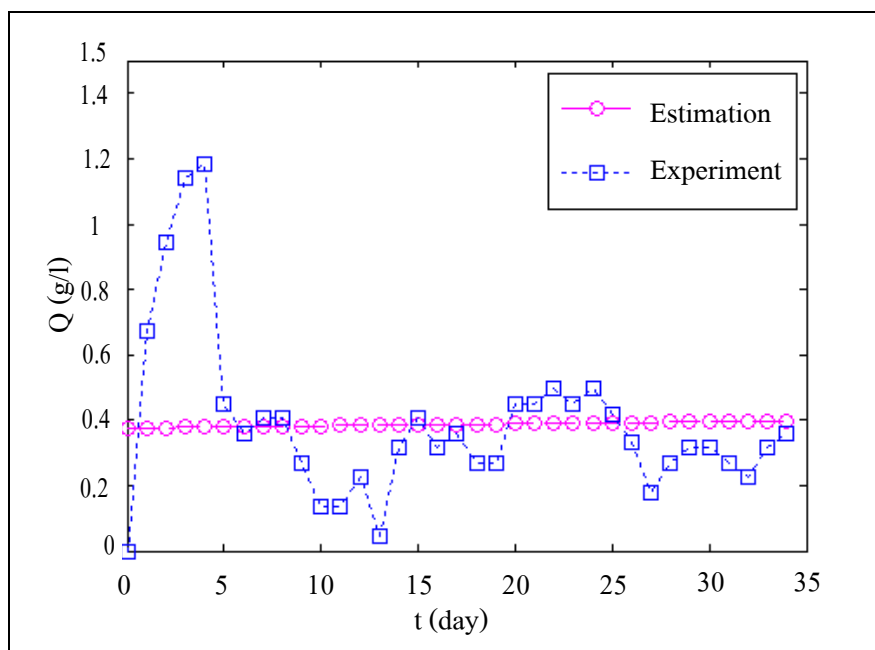


รูปที่ 3.11 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างการประมาณค่ากับการทดลองจริงของ Monod

3.3.2 แบบจำลองของ Haldane โดยใช้สมการที่ 3.7 3.8 3.12 และสมการที่ 3.15 ซึ่งจะได้ค่าจากการระบุเอกลักษณ์ของค่าของจุลินทรีย์เริ่มต้นเท่ากับ 14.8669 g/l และได้ค่าสัมประสิทธิ์ดังตารางที่ 3.2 และสามารถแสดงดังรูปที่ 3.12

ตารางที่ 3.2 ค่าสัมประสิทธิ์ของ Haldane

ตัวแปร	μ_0	k_1	k_2	k_H	k_I	Error
ค่าสัมประสิทธิ์	0.2127	1.1957e-05	15.5979	68.8532	0.5689	2.2681

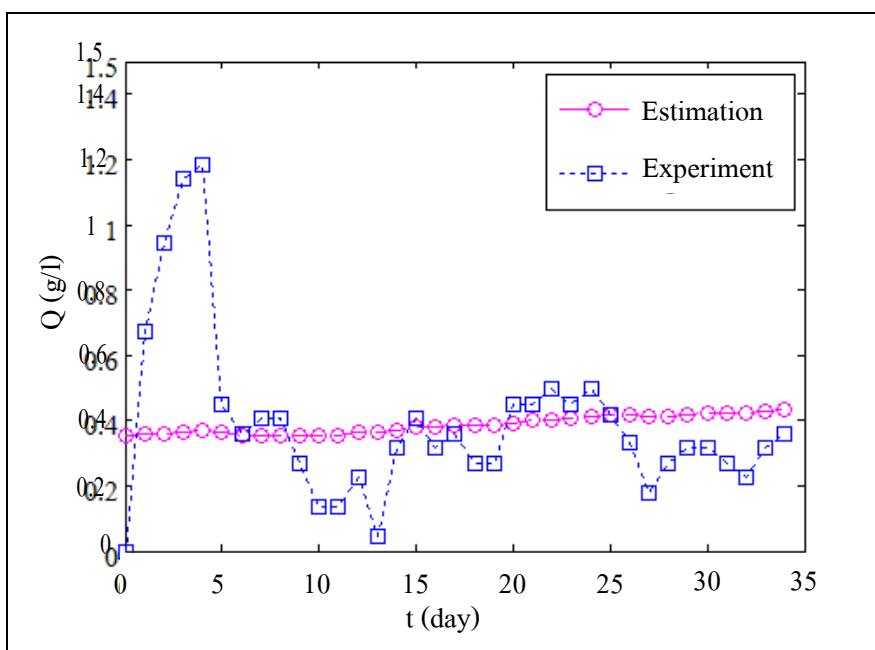


รูปที่ 3.12 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างการประมาณค่ากับการทดลองจริงของ Haldane

3.3.3 แบบจำลองของ Arrhenius โดยใช้สมการที่ 3.7 3.8 3.12 และสมการที่ 3.16 ซึ่งจะได้ค่าจากการระบุเอกลักษณ์ของค่าของจูลินทรีย์เริ่มต้นเท่ากับ 10.7193 g/l และได้ค่าสัมประสิทธิ์ดังตารางที่ 3.3 และสามารถแสดงดังรูปที่ 3.13

ตารางที่ 3.3 ค่าสัมประสิทธิ์ของ Arrhenius

ตัวแปร	μ_0	k_2	a_1	a_2	a_3	E_1	E_2	Error
ค่าสัมประสิทธิ์	1.7605	12.0445	1.7605	7.55e-06	1.7362	3.654	0.07403	2.3095

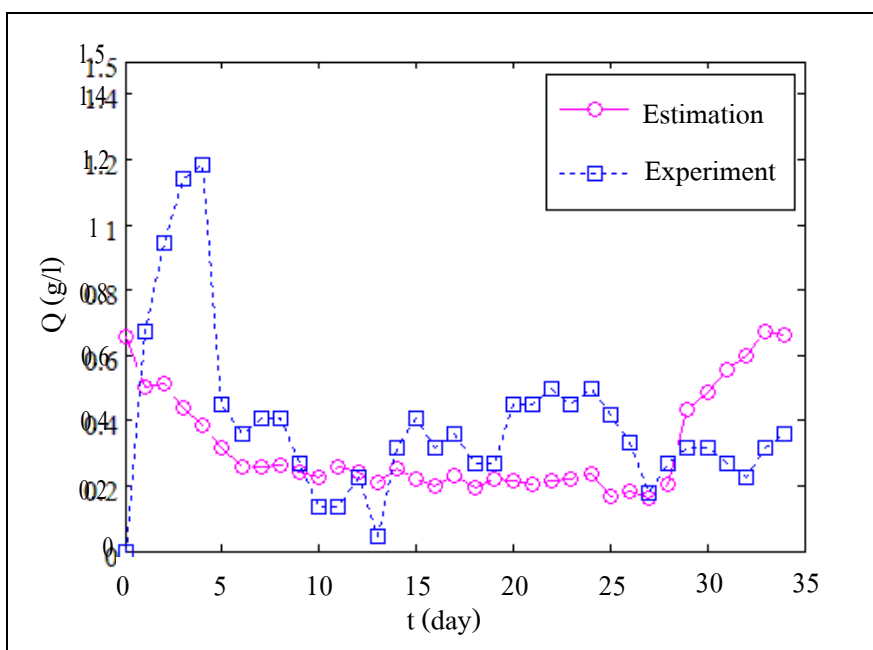


รูปที่ 3.13 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างการประมาณค่ากับการทดลองจริงของ Arrhenius

3.3.4 แบบจำลองของ PH โดยใช้สมการที่ 3.7 3.8 3.12 และสมการที่ 3.17 ซึ่งจะได้ค่าจากการระบุเอกลักษณ์ของค่าจุลินทรีย์เริ่มต้นเท่ากับ 2.3986242 g/l และได้ค่าสัมประสิทธิ์ดังตารางที่ 3.4 และสามารถแสดงดังรูปที่ 3.14

ตารางที่ 3.4 ค่าสัมประสิทธิ์ของ PH

ตัวแปร	k_2	a	b	c	Error
ค่าสัมประสิทธิ์	3.0889	1.0806e-08	0.04929	0.2894	2.8577

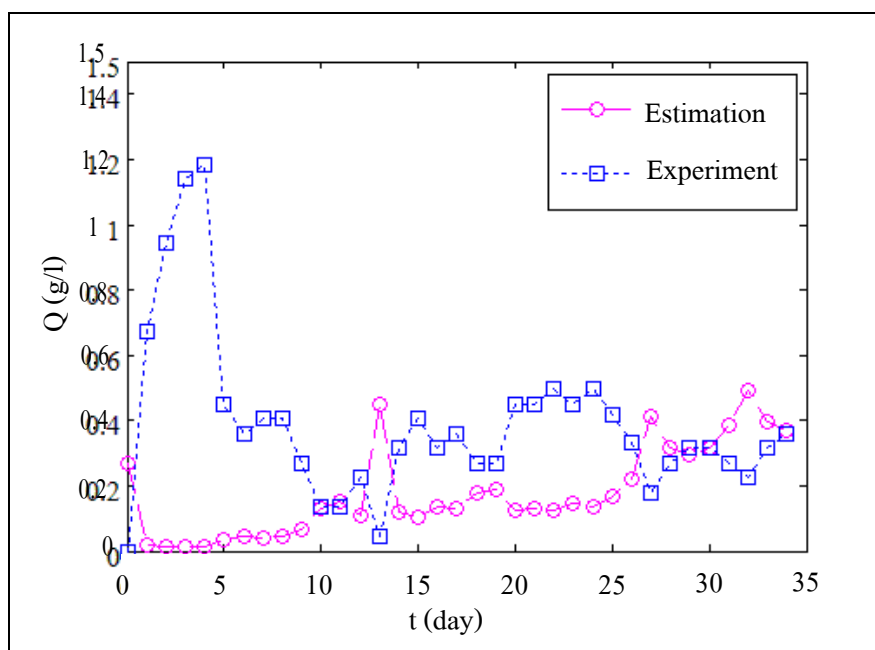


รูปที่ 3.14 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างการประมาณค่ากับการทดลองจริงของ PH

3.3.5 ในแบบจำลองของผลผลิต โดยใช้สมการที่ 3.7 3.8 3.12 และสมการที่ 3.18 ซึ่งจะได้ค่าจากการระบุเอกลักษณ์ของค่าของจุลินทรีย์เริ่มต้นเท่ากับ 0.3359 g/l และได้ค่าสัมประสิทธิ์ดังตารางที่ 3.5 และสามารถแสดงดังรูปที่ 3.15

ตารางที่ 3.5 ค่าสัมประสิทธิ์ของผลผลิต

ตัวแปร	k_Q	k_2	Error
ค่าสัมประสิทธิ์	0.02142	0.7995	5.7775



รูปที่ 3.15 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างการประมาณค่ากับการทดลองจริงของผลผลิต

จากการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ที่แสดงดังรูปที่ 3.11 - 3.15 และตารางที่ 3.1 - 3.5 พบว่า ผลที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ของแต่ละแบบจำลองนั้นไม่สอดคล้องกับผลการทดลองที่เกิดขึ้นได้ ดังนั้นจึงทำการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์เข้าไปสองเทอมคือเทอมของสมการที่มีอิทธิพลจากสารอินทรีย์กับเทอมของอิทธิพลที่เกิดจากผลผลิต ซึ่งเป็นตัวเศษของสารอินทรีย์และผลผลิต เมื่อเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนจากตารางที่ 3.1 - 3.2 แล้วพบว่าสมการของที่ได้จากแบบจำลองของ Monod มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าสมการที่ได้จากแบบจำลองของ Haldane ดังนั้นจึงได้นำสมการแบบจำลองของ Monod ไปใช้ในการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ต่อไป

3.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ในข้อ 3.3 และการศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลในข้อ 3.2 พบว่าแบบจำลองที่ทำการทดสอบนั้นมีอิทธิพลในการผลิตก๊าซชีวภาพของตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง ซึ่งในการประมาณค่าสัมประสิทธิ์นั้นสามารถแบ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ออกเป็นสองแบบจำลองดังต่อไปนี้

3.4.1 แบบจำลองที่ 1 ซึ่งเป็นแบบจำลองที่มีการบวกค่าคงที่เพิ่มโดยมีสมการพื้นฐานสามสมการคือ สมการที่ 3.7 3.8 และ 3.12 เป็นสมการมาตรฐานของทั้งสองแบบจำลองคือ

$$\frac{d(X)}{dt} = \mu X \quad (3.7)$$

$$\frac{d(S)}{dt} = -k_1 \mu X \quad (3.8)$$

$$Q = k_2 \mu X \quad (3.12)$$

และสมการแสดงความสัมพันธ์ของแบบจำลองของการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 3.13 ดังต่อไปนี้

$$\mu(t) = \mu(S)\mu(P)\mu(PH)\mu(T) \quad (3.13)$$

และสมการย่อยของการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์เขียนได้ดังสมการที่ 3.16 - 3.20 ดังต่อไปนี้

$$\mu(S) = \frac{\mu_{\max} S}{k_s + S} + k(s) \quad (3.19)$$

$$\mu(Q) = \frac{k_Q}{k_Q + Q} + k_3(Q) \quad (3.20)$$

$$\mu(T) = a_1 \exp(-E_1 / RT) - a_2 \exp(-E_2 / RT) - a_3 \quad (3.16)$$

$$\mu(PH) = a(PH)^2 + b(PH) + c \quad (3.17)$$

3.4.2 แบบจำลองที่ 2 ซึ่งเป็นแบบจำลองมาตรฐาน โดยต้องมีสมการพื้นฐานสามสมการ คือ สมการที่ 3.7 3.8 และ 3.12 เป็นสมการหลักของทั้งสองแบบจำลองคือ

$$\frac{d(X)}{dt} = \mu X \quad (3.7)$$

$$\frac{d(S)}{dt} = -k_1 \mu X \quad (3.8)$$

$$Q = k_2 \mu X \quad (3.12)$$

สมการแสดงความสัมพันธ์ของแบบจำลองของการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 3.13 ดังต่อไปนี้

$$\mu(t) = \mu(S)\mu(P)\mu(PH)\mu(T) \quad (3.13)$$

และสมการย่อยของการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์เขียนได้ดังสมการที่ 3.15 - 3.18 ดังต่อไปนี้

$$\mu(S) = \frac{\mu_{\max} S}{k_S + S} \quad (3.15)$$

$$\mu(Q) = \frac{k_Q}{k_Q + Q} \quad (3.18)$$

$$\mu(T) = a_1 \exp(-E_1 / RT) - a_2 \exp(-E_2 / RT) - a_3 \quad (3.16)$$

$$\mu(pH) = a(pH)^2 + b(pH) + c \quad (3.17)$$

จากแบบจำลองทั้งแบบจำลองที่หนึ่งและแบบจำลองที่สองจะใช้ในการเปรียบเทียบกันในการระบุเอกลักษณ์เพื่อหาว่าแบบจำลองใดมีความเหมาะสมกับการนำมาประมาณการเกิดก๊าซชีวภาพมากที่สุด

3.5 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงที่มาของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนของตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นมาจากการใช้หลักการสมดุลมวลในการประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งแบบจำลองนี้ไม่ใช่แบบจำลองที่ถูกต้อง แต่เป็นเพียงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยประมาณ เพื่อนำไปใช้ในการระบุเอกลักษณ์เพื่อหาค่าโดยประมาณของค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งแบ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยประมาณออกเป็นสองแบบจำลองที่ได้ทำการเสนอในบทนี้ เพื่อนำไปใช้ในการประมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ

บทที่ 4

การระบุเอกลักษณ์ของระบบด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์

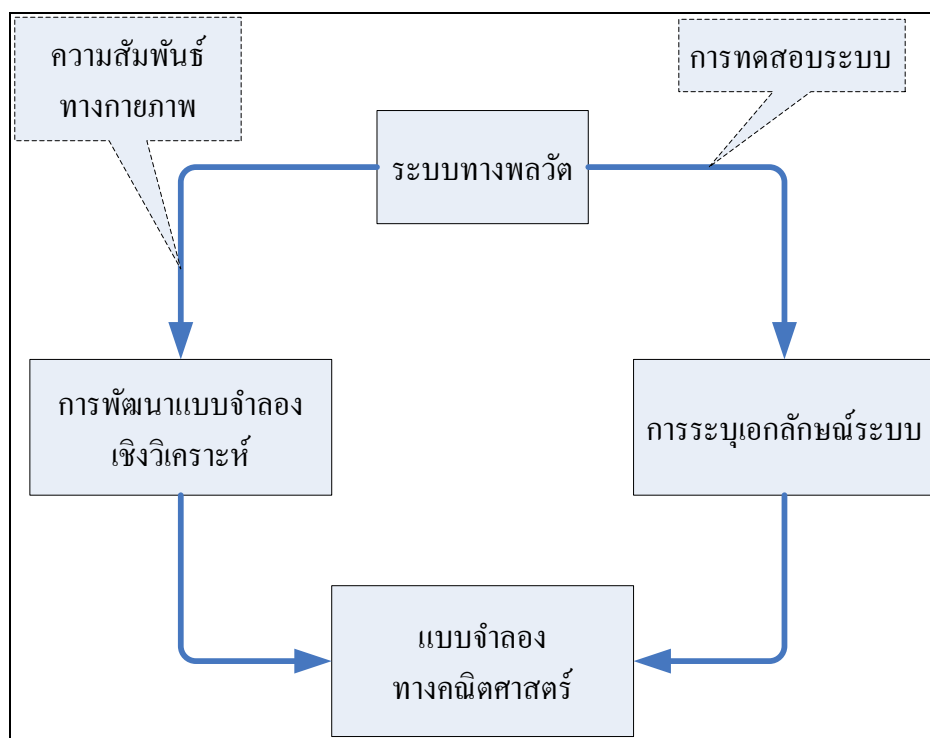
4.1 กล่าวนำ

การระบุเอกลักษณ์ของระบบจะใช้ข้อมูลเกี่ยวกับอินพุตและเอาต์พุตของระบบ โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ศึกษาจากบทที่ 3 และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้รับการแบ่งออกเป็นสองประเภทคือ แบบจำลองเฉพาะกรณี (tailor-made model) และแบบจำลองทั่วไป (ready-made model) แบบจำลองเฉพาะกรณีได้รับการพัฒนาขึ้นจากความสัมพันธ์ทางกายภาพพื้นฐานของระบบ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ปรากฏในแบบจำลองประเภทนี้ สื่อความหมายทางกายภาพของระบบเป็นสำคัญ และแบบจำลองทั่วไป เป็นแบบจำลองที่ได้รับการประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวางค่าสัมประสิทธิ์ที่ปรากฏในแบบจำลองทั่วไป ไม่สื่อความหมายทางกายภาพของระบบ แต่ถูกใช้เพื่ออธิบายถึงความสัมพันธ์ของตัวแปรอินพุตและเอาต์พุตของระบบ แบบจำลองประเภทนี้เป็นรูปลักษณ์ที่ใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางในวิทยาการระบบควบคุม และได้ประยุกต์ใช้วิธีทางปัญญาประดิษฐ์มาใช้ในการแก้ปัญหาสำหรับงานที่ต้องการหาคำตอบที่เหมาะสมในการระบุเอกลักษณ์ นอกจากนี้ยังได้นำเสนอแนวทางการระบุเอกลักษณ์ และทำการทดลองเพื่อบันทึกข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตอย่างเพียงพอในการนำไปใช้

4.2 แนวคิดในการระบุเอกลักษณ์ระบบ

การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบพลวัต จะอาศัยความสัมพันธ์ทางกายภาพของระบบ ซึ่งเป็นกฎทางธรรมชาติที่สามารถอธิบายพฤติกรรมทางพลวัตด้วยสมการทางคณิตศาสตร์เช่น กฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน เป็นต้น วิธีดังกล่าวเป็นพื้นฐานของการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบพลวัตต่าง ๆ ซึ่งอาจเรียกแบบจำลองที่ได้จากวิธีดังกล่าวว่าแบบจำลองเชิงทฤษฎี (theoretical model) หรือแบบจำลองเชิงวิเคราะห์ (analytical model) ในระบบที่มีความซับซ้อนสูง อาจประสบปัญหาในเรื่องของการหาสมการทางคณิตศาสตร์มาใช้อธิบายความสัมพันธ์ทางกายภาพของระบบ ส่งผลให้ไม่สามารถพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอย่างถูกต้องได้ อีกวิธีการหนึ่งที่ถูกนำมาใช้แก้ปัญหาดังกล่าวคือ การทดสอบระบบด้วยสัญญาณอินพุตที่เหมาะสม สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของระบบได้รับการบันทึก และคำนวณด้วยกระบวนการทางคณิตศาสตร์ เพื่อพัฒนาแบบจำลองที่เหมาะสมให้กับระบบ วิธีการพัฒนา

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวเรียกว่า การระบุเอกลักษณ์ของระบบ (system identification) แสดงดังรูปที่ 4.1 อธิบายกระบวนการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้งสองแนวทางที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น



รูปที่ 4.1 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบพลวัต อาจมีรูปแบบที่แตกต่างกันไป เช่น อยู่ในรูปของฟังก์ชันถ่ายโอน สมการอนุพันธ์สามัญ (ODE) หรือสมการอนุพันธ์ย่อย (PDE) ทั้งนี้รูปแบบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของระบบเป็นสำคัญ ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้นแล้วว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ให้ความสนใจในขณะนี้ เป็นแบบจำลองที่ใช้ความสัมพันธ์ทางกายภาพของระบบมาพัฒนาเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และได้ประยุกต์ใช้วิธีทางปัญญาประดิษฐ์มาใช้ในการระบุเอกลักษณ์ของระบบพลวัตในงานวิจัยนี้ต่อไป

4.3 พื้นฐานการระบุเอกลักษณ์

ก่อนจะทราบถึงการระบุเอกลักษณ์จำเป็นต้องเข้าใจถึงพฤติกรรมต่างๆ ของระบบ และทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบขึ้นมาก่อน เพื่อความสะดวกในการศึกษา วิเคราะห์

และสามารถคาดการณ์ได้ว่าระบบจะมีพฤติกรรมอย่างไรเมื่ออยู่ภายใต้อินพุตต่าง ๆ ในการวิเคราะห์ระบบจำเป็นต้องใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ถูกต้อง ระบบถึงมีความผิดพลาดน้อย ซึ่งเป็นการยากในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และยากในการหาเครื่องมือในการวัดค่าต่าง ๆ ซึ่งในทางปฏิบัติงาน สิ่งที่จะได้จากระบบคือ อินพุตและเอาต์พุตจากระบบเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ในการวิเคราะห์ระบบจำเป็นต้องใช้ข้อมูลของอินพุตและเอาต์พุตของระบบเพื่อจะใช้ในการระบุเอกลักษณ์ของระบบได้



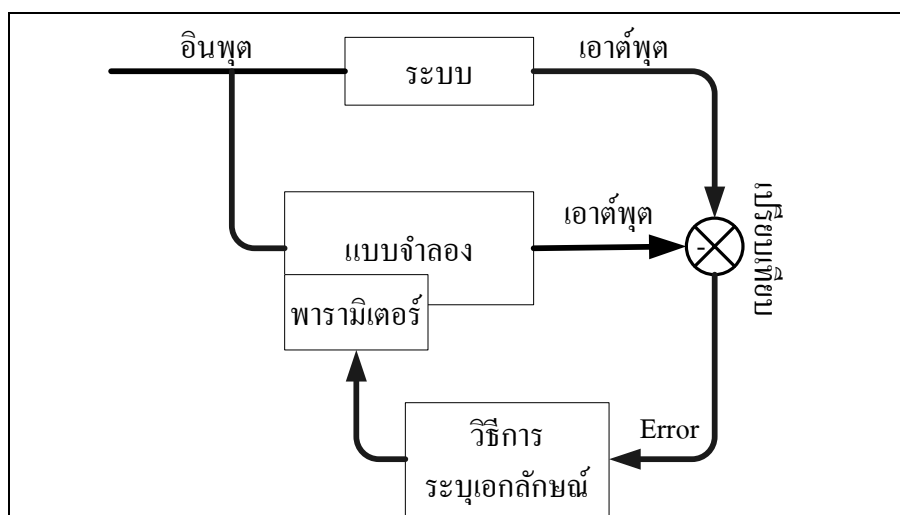
รูปที่ 4.2 ระบบเปิด

ระบบจะแสดงพฤติกรรมออกมาในลักษณะต่าง ๆ ตามแต่อินพุตหรือแรงที่ป้อนให้กับระบบ และถ้าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความถูกต้อง เมื่อถูกกระทำด้วยอินพุต สมการทางคณิตศาสตร์จะแสดงพฤติกรรมใกล้เคียงหรือเหมือนกับระบบ กล่าวคือ ความแตกต่างของเอาต์พุต (Error) จะต้องมีค่าน้อย แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงมีความถูกต้องสูงดังแสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งเปรียบเทียบการตอบสนองของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับเอาต์พุตที่ได้จากการวัดของระบบ



รูปที่ 4.3 แผนภาพบล็อกการทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ

การระบุเอกลักษณ์เป็นกระบวนการหลักอย่างหนึ่งที่ใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ โดยโครงสร้างทั่วไปในการหาค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองแสดงดังรูปที่ 4.4 พิจารณาระบบมีแบบจำลองที่ยังไม่ทราบสัมประสิทธิ์



รูปที่ 4.4 การค้นหาสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองระบบด้วยการระบุเอกลักษณ์

การระบุเอกลักษณ์คือการหาค่าสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ ที่ทำให้แบบจำลองตอบสนองต่อเอาต์พุตของระบบเหมือนกับเอาต์พุตของแบบจำลอง ดังนั้นกลไกการค้นหาสัมประสิทธิ์โดยวิธีการระบุเอกลักษณ์ จะอาศัยการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของแบบจำลองกับระบบจริง แล้วทำการปรับค่าสัมประสิทธิ์ไปในทิศทางที่ทำให้ค่าความแตกต่างระหว่างเอาต์พุตทั้งสองลดลง หรือเป็นไปตามเงื่อนไขที่กำหนด การระบุเอกลักษณ์สามารถแบ่งออกเป็นหลายแนวทางคือการระบุเอกลักษณ์ระบบพลวัตด้วยวิธีการดั้งเดิม และการระบุเอกลักษณ์ระบบด้วยเทคนิคทางปัญญาประดิษฐ์ เป็นต้น ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการระบุเอกลักษณ์ระบบด้วยเทคนิคทางปัญญาประดิษฐ์มาใช้ในการประมาณค่าสัมประสิทธิ์

4.4 เทคนิคทางปัญญาประดิษฐ์

ความหมายของปัญญาประดิษฐ์ คือการคิดเป็นขบวนการที่ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนใหญ่คือ

1. การสร้างวิธีการแทนสิ่งที่อยู่ในใจของปัญหาปัจจุบัน
2. การดึงข้อมูลที่เกี่ยวข้อง
3. การจัดการกับการแทนค่าทางปัญญานั้นออกมาเป็นคำตอบ

ถ้าจะอธิบายขั้นตอนทั้ง 3 ให้ชัดเจนยิ่งขึ้น ก็คือ เมื่อคนเราต้องการแก้ปัญหาที่กำลังประสบ คนจะทำการแทนปัญหานั้นให้อยู่ในรูปสัญลักษณ์ ที่สมองสามารถตีความได้ จากนั้นก็ทำการดึงข้อมูลที่เคยมีอยู่ ไม่ว่าจะเป็นอยู่ในสมองหรือที่อื่น ที่อยู่ในรูปของสัญลักษณ์เช่นกัน มาเปรียบเทียบเพื่อดูว่าเคยมีประสบการณ์เช่นนั้นมาก่อนหรือไม่ ถ้ามีประสบการณ์นั้นก็จะถูกนำมาปรับใช้ ถ้าไม่มีก็จะพยายามที่จะหาวิธีการจัดการกับปัญหานั้น ในลักษณะของสัญลักษณ์ออกมาเป็นคำตอบ

การทำงานของสมองเช่นนี้ คนจะต้องมีส่วนที่เป็นหน่วยความจำอยู่สองประเภทคือ ประเภทแรกหน่วยความจำถาวรที่ใช้เก็บบทเรียน และประสบการณ์นี้จะเก็บอยู่ในรูปของสัญลักษณ์ที่มาจากการแทนที่สิ่งที่มีอยู่ในใจดังกล่าวข้างต้น ประเภทที่สองหน่วยความจำดำเนินการ ส่วนนี้จะทำหน้าที่เป็นเสมือนหนึ่งกระดานทดที่ใช้เก็บข้อมูลที่ถูกแทนค่าในรูปสัญลักษณ์ สำหรับการประมวลผลและการเปรียบเทียบเพื่อการแก้ไขปัญหา เมื่อการดำเนินการเสร็จสิ้นข้อมูลนั้นจะถูกลบออกไป เมื่อได้คำตอบแล้ว ปัญหา คำตอบ และวิธีการที่ใช้ในการแก้ปัญหานั้นจะถูกเก็บไว้เพื่อใช้ในการอ้างอิงต่อไป จุดสำคัญของกระบวนการนี้ก็คือการสร้างวิธีการแสดงความรู้ เมื่อประสบกับปัญหาที่คุ้นเคยขึ้น ขบวนการสร้างวิธีการแสดงความรู้ที่เหมาะสมก็จะมีประสิทธิภาพมากขึ้น เพราะว่าประสบการณ์ในการหาข้อมูล และเทคนิคในการแก้ปัญหามีอยู่เดิมสามารถนำมาใช้ใหม่ได้ ทำให้ความต้องการในการใช้ความจำดำเนินงานลดลง

จากความเข้าใจดังกล่าวข้างต้น ทำให้มนุษย์มีความพยายามในการสร้างเครื่องมือเพื่อทำหน้าที่แทนความฉลาดของมนุษย์เพื่อช่วยมนุษย์แก้ปัญหา ก่อนหน้านั้นมนุษย์มีการพัฒนาเครื่องคิดเลขในอดีตนกลายเป็นเครื่องคอมพิวเตอร์ในปัจจุบัน การประยุกต์ใช้งานของปัญญาประดิษฐ์มีความหลากหลายสาขาแต่ในงานวิจัยนี้จะเน้นไปทางด้านเทคนิคการค้นหาของปัญญาประดิษฐ์ ซึ่งเป็นการหาอัลกอริทึมที่สามารถหาคำตอบใกล้เคียงที่สุดในเวลาที่เร็วที่สุด จากฐานข้อมูลเป็นเป้าหมาย ซึ่งการได้คำตอบใกล้เคียงที่สุด และการใช้เวลาน้อยที่สุด คือหัวใจสำคัญ 2 ประการ แต่ในบางครั้งข้อมูลมีจำนวนมากหมายถึงศักยภาพของคอมพิวเตอร์ ทำให้ค้นหาคำตอบในเวลาที่ยากได้ ดังนั้นต้องทำการผ่อนปรนกับความพยายามในเรื่องการได้คำตอบใกล้เคียงที่สุด หรือการใช้เวลาน้อยที่สุด เรื่องใดเรื่องหนึ่ง ดังนั้นจึงได้นำศาสตร์ของปัญญาประดิษฐ์มาประยุกต์ใช้ในการหาคำตอบตามเงื่อนไขที่กำหนดให้โดยอาศัยประสบการณ์ในการหาค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่เหมาะสมที่สุด ในงานวิจัยนี้ได้นำวิธีการค้นหาแบบตาบอด และการค้นหาโดยใช้วิธีจินเนติกอัลกอริทึม

4.4.1 การค้นหาแบบตาบอดเชิงปรับตัว

การระบุเอกลักษณ์ระบบไม่เชิงเส้นโดยใช้การประยุกต์การค้นหาแบบตาบอดเชิงปรับตัวเพื่อค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของแบบจำลอง การค้นหาแบบตาบอดเชิงปรับตัวเป็นเทคนิคการหาคำตอบทางปัญญาประดิษฐ์ที่ทรงประสิทธิภาพเทคนิคหนึ่ง สำหรับหาคำตอบที่

ใกล้เคียงที่สุด วิธีการดังกล่าวสามารถหลีกเลี่ยงค่าตอบวงแคบเฉพาะถิ่น (local optimum) และดำเนินการค้นหาคำตอบต่อไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งได้คำตอบที่ใกล้เคียงความเป็นวงกว้าง (near global optimum) ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงอธิบายถึงการทำงานของอัลกอริทึมที่ใช้ในการค้นหาสัมประสิทธิ์ลักษณะเฉพาะไม่เป็นเชิงเส้นสำหรับงานวิจัยนี้

4.4.1.1 แนวคิดพื้นฐานของตาบู่

คำว่า ‘tabu’ มีความหมายตามพจนานุกรมทั่ว ๆ ไปว่า ‘ต้องห้าม’ ในโครงสร้างของตาบู่ จึงมีองค์ประกอบที่มีสถานะต้องห้ามหรือองค์ประกอบที่ไม่สามารถใช้งานได้อยู่ด้วย อย่างไรก็ตามสถานะขององค์ประกอบดังกล่าวไม่จำเป็นจะต้องคงสภาพเช่นนั้นตลอดไป แต่จะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาและสถานะต่าง ๆ ภายในระบบ ขั้นตอนการทำงานของตาบู่ ใช้หลักแนวคิดดังกล่าวในการพิจารณาเส้นทางที่คาดว่าจะนำไปสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุด โดยที่การค้นหาจะไม่หยุดอยู่ที่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น ที่ซึ่งหมายความว่าเส้นทางรอบ ๆ ในจุดนั้น ๆ ไม่สามารถให้คำตอบที่ดีกว่าคำตอบในปัจจุบันอีกแล้ว

ตาบู่ใช้หลักแนวคิดที่ทำให้การค้นหาคำตอบเป็นไปอย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ เส้นทางต่าง ๆ ที่อยู่รอบ ๆ คำตอบในขณะนั้นสามารถให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการตัดสินใจว่าจะเลือกคำตอบใหม่ในเส้นทางใด ซึ่งแตกต่างไปจากการเลือกค้นหาคำตอบด้วยวิธีสุ่ม (random search) ดังนั้นการเลือกเส้นทางค้นหาคำตอบ ซึ่งในบางครั้งไม่ได้ให้คำตอบที่ดีกว่าคำตอบปัจจุบันอาจจะเป็นกลยุทธ์ที่สามารถนำไปสู่การค้นหาคำตอบที่ดีกว่าต่อไปได้ (จุดประสงค์หลักในที่นี้ก็คือการหลุดพ้นจากคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่นนั่นเอง)

4.4.1.2 องค์ประกอบพื้นฐานของการค้นหาคำตอบแบบตาบู่

ตาบู่ได้เพิ่มเติมขั้นตอนและเงื่อนไขในการค้นหาคำตอบพื้นที่รอบข้าง โดยมีจุดประสงค์หลักคือ เพื่อหลุดพ้นจากคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น (local optimum avoidance) คำตอบที่ดีที่สุดในกลุ่มคำตอบพื้นที่รอบข้างจะมีค่าการประเมินที่สูงที่สุด ถ้าคำตอบใหม่มีค่าการประเมินที่ดีกว่าคำตอบปัจจุบัน การค้นหาคำตอบจะทำการเดินไปยังทิศทางนั้น และเมื่อใดที่ค่าการประเมินของคำตอบพื้นที่รอบข้างไม่ได้ดีกว่าคำตอบปัจจุบัน การค้นหาคำตอบที่ดีกว่าจะสิ้นสุดลง ซึ่งในกรณีนี้เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นในการค้นหาคำตอบพื้นที่รอบข้าง คำตอบที่ได้ในขณะนี้จะเป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่นในทางตรงข้ามตาบู่ยอมให้มีการเดินไปยังคำตอบใหม่มีค่าการประเมินที่ไม่ดีกว่าคำตอบปัจจุบัน จุดประสงค์สำคัญก็เพื่อให้สามารถหลุดพ้นจากคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่นได้นั่นเอง และเพื่อหลีกเลี่ยงเส้นทางการค้นหาคำตอบที่ทำให้เกิดการวนรอบอยู่กับที่ (cycle avoidance) เส้นทางบางเส้นทางสามารถนำไปสู่การวนรอบอยู่กับที่ ทำให้ไม่สามารถหลุดออกไปจากสถานะปัจจุบันได้ (ดังนั้นไม่สามารถเปลี่ยนเส้นทางที่นำไปสู่คำตอบที่ดีกว่าได้) ตัวอย่างของเส้นทางดังกล่าว

ได้แก่การเดินย้อนกลับ (inverse move) ซึ่งในบางโอกาสจะทำให้การค้นหาคำตอบเกิดการเดินไปกลับโดยไม่มีที่สิ้นสุดได้ดังนั้นในตาบู่ จึงมีการตั้งค่าสถานะของการเดินที่เพิ่งถูกใช้ให้เป็นสถานะต้องห้าม (tabu) เพื่อไม่ให้ใช้การเดินนี้อีกภายในระยะเวลาที่กำหนด (นั่นคือถ้าเวลาผ่านไปภายในระยะเวลาที่กำหนดไว้แล้วสถานะของการเดินนั้นจะถูกยกเลิกการเป็นสถานะต้องห้าม)

ด้วยความสามารถใหม่ที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นได้ว่า ตาบู่ได้มีการใช้ข้อมูลของการค้นหาคำตอบในอดีตมาช่วยตัดสินใจการเดินว่าควรจะไปในทิศทางใด องค์ประกอบใหม่ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในโครงสร้างของตาบู่ ที่ทำให้การค้นหาคำตอบมีประสิทธิภาพสูงขึ้นนี้ได้แก่ เงื่อนไขของความคงอยู่ล่าสุด (recency condition) การใช้เงื่อนไขของความคงอยู่นี้เป็นการติดตามการค้นหาคำตอบในช่วงเวลาที่ผ่านมา เมื่อคำตอบหนึ่งถูกค้นพบแล้ว การเดินที่นำไปสู่คำตอบนั้นจะถูกตั้งเป็นสถานะต้องห้าม คำตอบที่ถูกค้นพบด้วยการเดินนี้จะถือเป็นคำตอบล่าสุดและจะไม่ถูกค้นอีกภายในระยะเวลาหนึ่ง และเงื่อนไขของความซ้ำซาก (frequency condition) ในลักษณะเดียวกันเราสามารถบันทึกจำนวนครั้งที่การเดินหนึ่ง ๆ ถูกเรียกใช้ได้ตาบู่ ถือว่าถ้ารูปแบบการเดินใดถูกเรียกใช้เป็นจำนวนมากครั้งเกินไป (เกินจำนวนที่ตั้งเอาไว้) การเดินนั้นควรจะถูกต้องห้ามหรือถูกตั้งเป็นสถานะต้องห้าม เพื่อหลีกเลี่ยงเส้นทางการค้นหาคำตอบที่ทำให้เกิดการวนรอบอยู่กับที่ เงื่อนไขของความคงอยู่ล่าสุดและเงื่อนไขของความซ้ำซากจะถูกใช้ร่วมกันเสมอเนื่องจากเงื่อนไขเพียงอย่างเดียวอย่างหนึ่งไม่เพียงพอ เราสามารถกล่าวได้ว่าเงื่อนไขทั้งสองเป็นส่วนเติมเต็ม หรือ complimentary ซึ่งกันและกัน กล่าวคือการเดินใดถูกตั้งค่าให้มีสถานะต้องห้ามด้วยเงื่อนไขของความซ้ำซาก และได้คงสถานะต้องห้ามนานเกินระยะเวลาที่กำหนดไว้การเดินนั้นจะสามารถถูกตั้งค่ากลับสู่สถานะปกติได้ด้วยเงื่อนไขของความคงอยู่ล่าสุด

ตาบู่ยังมีอีก 2 องค์ประกอบอื่น ๆ อันเป็นกลไกสำคัญที่ทำให้การค้นหาคำตอบมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นได้แก่กลไกการเน้น (intensification) และกลไกการแปรเปลี่ยน (diversification) กลยุทธ์ทั้งสองอย่างมีผลต่อการเลือกเส้นทางในการค้นหาคำตอบคือ กลไกการเน้น คือการค้นหาคำตอบที่เน้นไปยังกลุ่มคำตอบที่ได้ค้นพบแล้วว่าเป็นคำตอบที่ดีโดยใช้ข้อมูลที่ได้บันทึกจากการค้นหาคำตอบที่ผ่านมาในอดีต กลยุทธ์นี้ทำตาบู่กลับไปค้นหาคำตอบในย่านที่เคยเจอคำตอบที่ดีและทำการค้นหาในย่านนั้นอย่างละเอียดขึ้น ส่วนประกอบของคำตอบที่น่าจะเป็นประโยชน์หรือเส้นทางที่นำไปสู่คำตอบนั้น จะถูกใช้เป็นข้อมูลโดยกลไกการเน้นในการค้นหาคำตอบใหม่ได้ และกลไกการแปรเปลี่ยน ในทางตรงกันข้ามเป็นกลยุทธ์ที่ส่งเสริมให้ตาบู่ไปทำการสำรวจย่านที่ยังไม่เคยถูกสำรวจมาก่อน ซึ่งอาจจะทำให้ได้คำตอบที่มีความแตกต่างไปจากกลุ่มคำตอบที่ได้ถูกสำรวจมาก่อนที่จะทำกลยุทธ์นี้ ในบางครั้งการเลือกเส้นทางอื่นที่ยังไม่เคยสำรวจและแตกต่างไปจากแนวทางของเส้นทางเดิมอาจจะทำให้มีโอกาสเจอคำตอบที่ดีกว่าได้เช่นกัน

นอกจากองค์ประกอบต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นแล้วยังมีองค์ประกอบอื่นที่เป็นส่วนสำคัญในการออกแบบการค้นหาแบบตานั้นก็คือ เกณฑ์ความทะเยอทะยาน (aspiration criteria) ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่สามารถทำให้เกิดการเดินไปในทิศทางที่ต้องการ ถึงแม้ว่าการเดินนั้นจะมีสถานะต้องห้าม โดยที่การเดินดังกล่าวจะถูกลบออกก็ต่อเมื่อคำตอบที่ได้ดีกว่าทุกคำตอบที่เคยค้นพบมา (ตานั้นจะต้องทำการเก็บบันทึกผลการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดเอาไว้เพื่อใช้ในการตรวจสอบเงื่อนไข)

4.4.1.3 กลไกการทำงานของวิธีการค้นหาแบบตานั้น

ความหมายของคำศัพท์สามารถอธิบายได้ดังตารางที่ 4.1

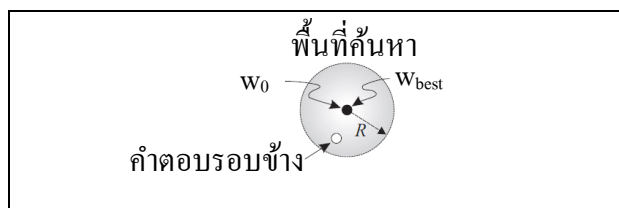
ตารางที่ 4.1 ความหมายของคำศัพท์ที่ใช้ในการอธิบายการทำงาน

คำศัพท์	ความหมาย
<i>radius</i>	ขอบเขตของการสุ่มในแต่ละรอบของการทำงาน
<i>number_neighbor</i>	จำนวนค่าใกล้เคียง (neighborhood) ที่ต้องการสุ่มในแต่ละพื้นที่การค้นหา
<i>neighbor_list</i>	ส่วนที่เก็บค่าใกล้เคียงตามจำนวนที่กำหนด (tabu list)
<i>best_neighbor</i>	ค่าใกล้เคียงที่เป็นคำตอบวงแคบเฉพาะถิ่น
<i>best_error</i>	ค่าความคลาดเคลื่อนที่เป็นได้จากคำตอบวงแคบเฉพาะถิ่น
<i>overall_neighbor</i>	ค่าใกล้เคียงที่เป็นค่าที่ดีที่สุดสำหรับคำตอบที่เป็นวงกว้าง
<i>overall_best_error</i>	ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าที่ดีที่สุดสำหรับคำตอบที่เป็นวงกว้าง
<i>n</i>	จำนวนรอบในการค้นหาคำตอบ
<i>xlimit</i>	ขอบเขตของสัมประสิทธิ์แต่ละตัว
w_0	ค่าเริ่มต้นในแต่ละพื้นที่การค้นหา
$w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$	ค่าที่เก็บไว้ใน <i>neighbor_list</i>
<i>cost</i>	ค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function)

หลักการทำงาน

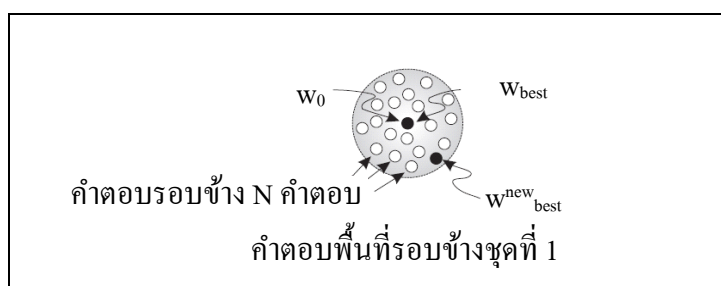
ขั้นตอนที่ 1 กำหนดให้ t เป็นจำนวนรอบของการค้นหา และ $t_{\max}$ เป็นจำนวนรอบสูงสุดที่จะทำการค้นหา

ขั้นตอนที่ 2 ทำการสุ่มคำตอบเริ่มต้น w_0 ภายในพื้นที่ค้นหารอบข้างในรัศมี R ขณะนี้ w_0 มีสถานะเป็นคำตอบที่ดีที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่นกำหนดให้ค่า $w_0 = w_{\text{best}}$
 ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 สุ่มคำตอบ w_0 ในพื้นที่ค้นหา

ขั้นตอนที่ 3 ทำการสุ่มเลือกคำตอบใหม่ N คำตอบโดยทำการเดินรอบ ๆ คำตอบ w_0 ภายในพื้นที่ค้นหา กำหนดให้ $w_1(r)$ เป็นเซตของคำตอบที่ประกอบไปด้วยคำตอบใหม่ทั้งหมด N คำตอบ ดังรูปที่ 4.6

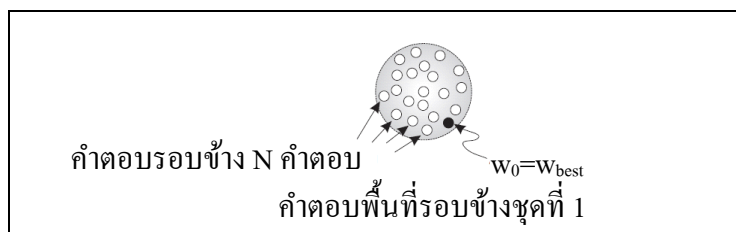


รูปที่ 4.6 คำตอบพื้นที่รอบข้าง w_0

ขั้นตอนที่ 4 ทำการประเมินค่าคำตอบที่อยู่ภายใน $w_1(r)$ โดยฟังก์ชันวัตถุประสงค์แล้วเลือกคำตอบที่ดีที่สุด กำหนดให้คำตอบนั้นเป็น w_{best}^{new} ดังรูปที่ 4.6

ขั้นตอนที่ 5 ถ้า w_{best} ดีกว่า w_{best}^{new} แล้ว กำหนดให้ $w_{best} = w_{best}^{new}$ ถ้าไม่มีคำตอบใดที่ดีกว่า w_{best} ให้ไปยังขั้นตอนที่ 6

ขั้นตอนที่ 6 กำหนดค่า $w_0 = w_{best}$ ดังรูปที่ 4.7

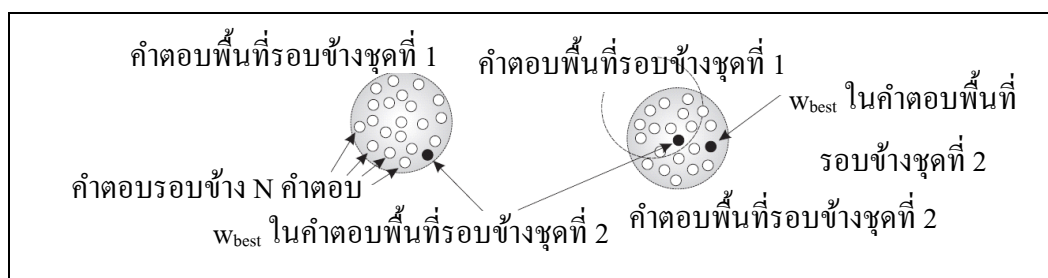


รูปที่ 4.7 กำหนดค่าใหม่ให้กับ S_0

ขั้นตอนที่ 7 ถ้า w_{best} ไม่อยู่ใน neighbor list ให้ทำการบันทึก w_{best}^{new} ลงใน neighbor list

ขั้นตอนที่ 8 ถ้า $t > t_{max}$ ให้ยุติการค้นหา คำตอบที่ได้จะเป็นคำตอบที่ดีที่สุดตั้งแต่ทำการค้นหา

ขั้นตอนที่ 9 ถ้า $t < t_{max}$ ให้กลับไปเริ่มที่ข้อ 2 ใหม่และทำการค้นหาจนกระทั่งถึงเป้าหมายที่ตั้งไว้ ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 การค้นหาคำตอบในรอบต่อไป

อัลกอริทึมการค้นหาแบบดาบฐานข้างต้น เป็นการประยุกต์ใช้งานความแตกต่างในการนำเอา TS ไปประยุกต์ใช้กับงานด้านต่าง ๆ มีเพียงฟังก์ชันวัตถุประสงค์เท่านั้น และกลไกของดาบสามารถนำไปใช้กับปัญหาต่าง ๆ ได้โดยสิ่งที่ต้องใช้พิจารณาปรับแก้ก็คือค่าสัมประสิทธิ์ของดาบ เช่นขนาดของรายการต้องห้าม ค่าระยะเวลาการคงอยู่ของสถานะต้องห้าม เป็นต้น ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าสำหรับปัญหาที่แตกต่างกันค่าสัมประสิทธิ์ของดาบนี้จะมีค่าที่เหมาะสมกับปัญหาแตกต่างกันด้วย ในระหว่างการค้นหาคำตอบของดาบ จะทำการเลือกคำตอบด้วยกลไกของดาบพื้นฐาน พร้อมทั้งประเมินสถานะของคำตอบผ่านค่าวัตถุประสงค์จากฟังก์ชัน

วัตถุประสงค์ ของกลไกการทำงานของตามูจึงเปรียบเสมือนกับกระบวนการหาค่าเหมาะสมของสัมประสิทธิ์ของระบบนั่นเอง

4.4.1.4 การค้นหาแบบตามูชนิดปรับตัวได้

ในหลาย ๆ กรณีการค้นหาแบบตามูพื้นฐานยังมีประสิทธิภาพที่ไม่เพียงพอต่อการประยุกต์ใช้งาน จึงมีผู้นำเอาโครงสร้างของการค้นหาแบบตามูไปทำการปรับปรุง ซึ่งในที่นี้เป็นการปรับปรุงที่เรียกว่าการค้นหาแบบตามูชนิดปรับตัวได้ (Adaptive Tabu Search, ATS) ซึ่งเป็นอัลกอริทึมที่ได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยกลุ่มวิจัย สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี การปรับปรุงดังกล่าวได้ทำการเพิ่ม 2 กลไกเข้าไปในการค้นหาแบบตามูธรรมดา กลไกดังกล่าวคือการเดินย้อนรอยและการปรับรัศมีการค้นหา ดังรายละเอียดในหัวข้อต่อไปนี้

การเดินย้อนรอย (Back Tracking)

การเดินย้อนรอยเป็นขั้นตอนที่อนุญาตให้ระบบค้นหาทำการกลับไปค้นหาพื้นที่คำตอบเก่าที่เคยถูกค้นหามาแล้ว คำตอบที่ดีกว่าจะถูกเลือกจากพื้นที่คำตอบที่ถูกย้อนรอยนี้และคำตอบปัจจุบัน โดยจากการกำหนดคำตอบใหม่ให้เป็นจุดเริ่มต้นในการค้นหา พื้นที่ในการค้นหาใหม่ก็จะเกิดขึ้นด้วย นั่นหมายความว่า การค้นหามีโอกาสที่จะหลุดออกจากคำตอบที่เป็นแบบวงแคบเฉพาะถิ่น คำตอบใหม่ที่ถูกใช้เป็นจุดเริ่มต้นนี้ไม่จำเป็นจะต้องเป็นคำตอบที่ดีที่สุดในพื้นที่ปัจจุบัน การเดินย้อนรอยจึงเป็นกลไกหนึ่ง ที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการหลุดจากคำตอบที่เป็นแบบวงแคบเฉพาะถิ่นได้เป็นอย่างดี

การปรับรัศมีการค้นหา (Adaptive Radius)

ขบวนการการปรับรัศมีการค้นหาจะทำการลดรัศมีการค้นหาในระหว่างการค้นหา ซึ่งการลดจะดำเนินไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งการค้นหาเข้าใกล้คำตอบที่ดีที่สุดแบบวงกว้าง โดยปกติแล้วรัศมีการค้นหาคำตอบในแต่ละรอบของการค้นหานั้นถือเป็นองค์ประกอบสำคัญอย่างหนึ่ง รัศมีการค้นหาที่กว้างจะให้ผลของการค้นหาที่หยาบ ซึ่งอาจจะมีผลให้การค้นหาพลาดคำตอบที่ต้องการได้ในทางตรงกันข้าม ถ้ารัศมีการค้นหาคำตอบมีขนาดเล็ก การค้นหาคำตอบจะต้องใช้เวลาที่มากขึ้นยิ่งไปกว่านั้น รัศมีการค้นหาคำตอบที่เล็กมาก ๆ อาจจะทำให้ระบบไม่สามารถครอบคลุมพื้นที่ของคำตอบที่ต้องการค้นหาได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นการปรับค่ารัศมีการค้นหาให้เหมาะสมกับสถานการณ์การค้นหาคำตอบในขณะหนึ่ง ๆ จึงสามารถเพิ่มค่าประสิทธิภาพของการค้นหาได้ใน ATS จึงได้พัฒนาการปรับรัศมีการค้นหาให้เหมาะสมในระหว่างการค้นหาคำตอบ โดยการใช้ค่าการประเมินเป็นองค์ประกอบในการพิจารณาปรับค่ารัศมีการค้นหา กล่าวคือเมื่อคำตอบปัจจุบันให้ค่าการประเมินที่ดีขึ้น รัศมีการค้นหาจะลดลง

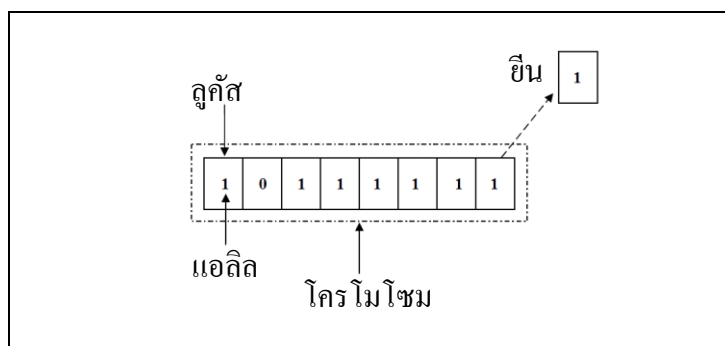
4.4.2 จินเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm, GA)

4.4.2.1 บทนำ

จินเนติกอัลกอริทึมเป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการค้นหาและแก้ปัญหาเพื่อให้ได้จุดที่เหมาะสมที่สุด ได้รับการพัฒนาโดยการจำลองวิธีการมาจากกระบวนการทางพันธุกรรม สำหรับหลักการของวิธีการนี้คือสิ่งมีชีวิตทั้งหลายมีทั้งส่วนที่ดีและส่วนที่ไม่ดี ซึ่งลักษณะที่ดีจะได้รับการสนับสนุนให้มีการถ่ายทอดพันธุกรรมจากบรรพบุรุษสู่รุ่นลูกหลาน โดยวิธีนี้ข้อมูลจะถูกพิจารณาในรูปแบบของการเข้ารหัสที่เรียกว่าโครโมโซมซึ่งจะมีการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมจากบรรพบุรุษสู่รุ่นลูกหลาน โดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) ที่สอดคล้องกับปัญหาในการพิจารณาหาค่าความเหมาะสม (Fitness Value) ของโครโมโซมที่มีต่อปัญหา ในการคำนวณจะใช้ตัวดำเนินการทางพันธุกรรมมากระทำกลุ่มของโครโมโซมเริ่มต้นจนได้โครโมโซมรุ่นใหม่ที่มีค่าความเหมาะสมกับปัญหามากขึ้น และกระทำซ้ำจนกระทั่งได้โครโมโซมที่แทนคำตอบที่ถูกต้องหรือเหมาะสมที่สุดกับปัญหา โดยจินเนติกอัลกอริทึมจะมีลักษณะที่เป็นพื้นฐานดังนี้

1. จินเนติกอัลกอริทึมจะไม่ใช้ค่าของจุดต่าง ๆ ในเซตของการค้นหาโดยตรง แต่จะทำการเข้ารหัสแก่จุดนั้น ๆ แทน
2. จินเนติกอัลกอริทึมจะทำการค้นหาโดยใช้กลุ่มของค่าเริ่มต้น
3. จินเนติกอัลกอริทึมจะใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการวัดค่าความเหมาะสมของตัวแปรที่ต้องการค้นหากับปัญหาที่ต้องการพิจารณา
4. จินเนติกอัลกอริทึมจะใช้ตัวดำเนินการทางพันธุกรรม (Genetic Operators) กระทำกับกลุ่มข้อมูลที่ถูกเข้ารหัสระหว่างการคำนวณในขั้นตอนของการกำเนิดใหม่ (Reproduction)

เนื่องจากจินเนติกอัลกอริทึมเป็นกระบวนการคำนวณที่เลียนแบบกลไกการวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิต ดังนั้นในกระบวนการคำนวณของจินเนติกอัลกอริทึมจึงมีคำศัพท์เฉพาะทางชีววิทยาเข้ามาเกี่ยวข้องด้วยโดยอธิบายได้ดังนี้ กระบวนการจินเนติกอัลกอริทึมจะเริ่มต้นด้วยการสุ่มเซตผลเฉลยที่เกิดจากการเข้ารหัสโดยใช้สายของตัวอักษร (String) ซึ่งเทียบได้กับโครโมโซม (Chromosome) เพื่อแทนผลเฉลยจริงของปัญหา ซึ่งโครโมโซมเหล่านี้จะประกอบด้วยส่วนประกอบย่อยคือตัวอักษร (Character) คือ ยีน (Gene) โดยบริเวณที่อยู่ของยีนบนโครโมโซมคือ ลูคัส (Locus) และสถานะของยีนที่อยู่บนโครโมโซมเรียกว่าแอลลีล (allele) ลักษณะเฉพาะของโครโมโซมที่ถูกเข้ารหัสเหล่านี้เทียบได้กับจีโนไทป์ (Genotype) และเมื่อมีการถอดรหัสโครโมโซมจะได้ผลเฉลยจริงของปัญหาซึ่งผลเฉลยจริงของปัญหานี้จะเทียบได้กับฟีโนไทป์ (Phenotype) ซึ่งลักษณะของโครโมโซมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.9

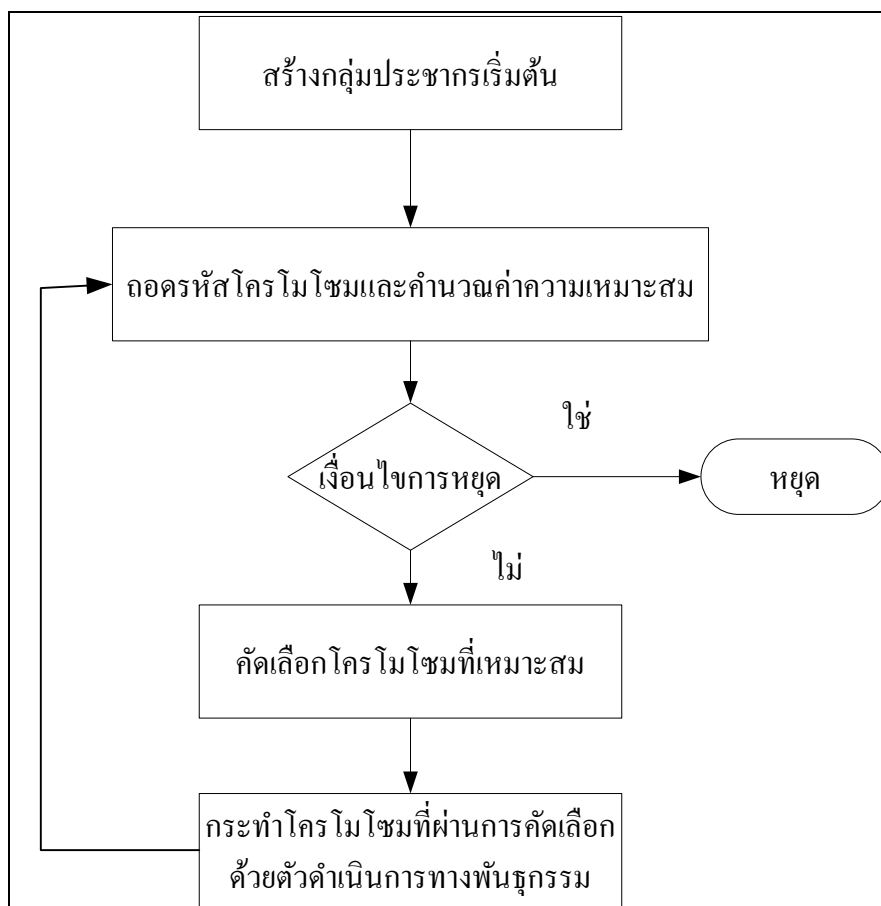


รูปที่ 4.9 แสดงลักษณะของโครโมโซม

4.4.2.2 จีแนติกอัลกอริทึมอย่างง่าย (Simple Genetic Algorithm)

กระบวนการจีแนติกอัลกอริทึมอย่างง่าย ซึ่งได้อธิบายถึงองค์ประกอบพื้นฐานตลอดจนถึงกลไกของจีแนติกอัลกอริทึม โดยกระบวนการของจีแนติกอัลกอริทึมอย่างง่ายแสดงผังแผนภูมิสายงานในรูปที่ 4.10 และอธิบายเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

1. สร้างกลุ่มของโครโมโซมซึ่งเป็นประชากร (Population) เริ่มต้นโดยการสุ่ม
2. ถอดรหัสโครโมโซมทุกโครโมโซมเพื่อให้ได้ตัวแปรจริงของปัญหา
3. นำตัวแปรจริงของปัญหาที่ได้มาคำนวณค่าวัตถุประสงค์ของแต่ละโครโมโซมในประชากร
4. คำนวณค่าความเหมาะสม (Fitness Value) ของโครโมโซมจากค่าวัตถุประสงค์
5. สร้างประชากรชุดใหม่จากประชากรชุดเก่าด้วยการคัดเลือก (Selection) โดยพิจารณาจากค่าความเหมาะสม
6. นำประชากรที่ผ่านการคัดเลือกมากระทำด้วยตัวดำเนินการทางพันธุกรรม (Genetic Operators) อันได้แก่ การผสมข้ามพันธุ์ (Crossing Over) และการกลายพันธุ์ (Mutation) เป็นต้น
7. กลับไปทำตามขั้นตอนที่ 2 ถึง 6 จนกระทั่งผู้เข้าสู่คำตอบของปัญหาที่ต้องการหรือเท่ากับจำนวนรอบของการทำซ้ำที่กำหนดไว้ ซึ่งจำนวนหนึ่งรอบจากขั้นตอนที่ 2 ถึง 6 เรียกว่าหนึ่งรุ่นของการคำนวณ (Generation)

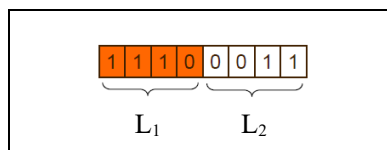


รูปที่ 4.10 แผนภูมิสาขางานแสดงกระบวนการจินเนติกอัลกอริทึม

จากกระบวนการข้างต้นจะเห็นว่ากระบวนการหลัก ๆ ของจินเนติกอัลกอริทึมอย่างง่ายมี 5 ขั้นตอนได้แก่ การเข้ารหัสโครโมโซม (Chromosome Coding) การประเมินค่าความเหมาะสม (Fitness Evaluation) การคัดเลือก การผสมข้ามพันธุ์ และการกลายพันธุ์ ซึ่งกระบวนการเหล่านี้จะได้อธิบายรายละเอียดดังนี้

1. การเข้ารหัสโครโมโซม

จินเนติกอัลกอริทึมจะทำการคำนวณในปริภูมิของตัวแปรที่เกิดจากการเข้ารหัสตัวแปรที่ต้องการค้นหา โดยทั่วไปรูปแบบของรหัสที่ใช้มักจะอยู่ในรูปของเลขฐานสอง ซึ่งโครโมโซมที่ใช้แทนคำตอบของปัญหาแต่ละปัญหาประกอบไปด้วยเซตของยีน 0 หรือ 1 ส่วนความยาวของโครโมโซมจะถูกกำหนดตามความต้องการซึ่งมักจะขึ้นอยู่กับลักษณะของปัญหา โดยตัวอย่างของโครโมโซมที่เป็นเลขฐานสองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 โครโมโซมยาว 8 บิต ใช้แทนคำตอบของปัญหา

2. การประเมินความเหมาะสม (Fitness Evaluation)

โดยทั่วไปค่าความเหมาะสมของแต่ละ โครโมโซมจะมีความสัมพันธ์กับค่าวัตถุประสงค์ที่คำนวณได้จากการถอดรหัสโครโมโซมแต่ละโครโมโซมไปเป็นตัวแปรจริงของปัญหาแทนตัวแปรที่ได้จากการถอดรหัสลงในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ซึ่งใช้วัดคุณสมบัติของโครโมโซมว่าเหมาะสมกับปัญหานั้น ๆ เพียงใด โดยถ้าเป็นปัญหาในการหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดหรือปัญหาการหาจุดสูงสุด เราสามารถนำค่าวัตถุประสงค์ไปใช้เป็นค่าความเหมาะสมได้เลย แต่ถ้าเป็นปัญหาในการหาเงื่อนไขน้อยที่สุด (Minimization) หรือปัญหาการหาจุดต่ำสุด ค่าความเหมาะสมจะหาได้โดย

$$\text{Fitness Value} = C_{\max} - \text{Objective Value} \quad (4.1)$$

โดยที่ $C_{\max}$ คือจำนวนจริงบวกที่มั่นใจว่ามากกว่าค่าความเหมาะสมที่ได้จากปริภูมิของการค้นหาเสมอ โดยที่ค่า $C_{\max}$ มักพิจารณาใช้ค่าสูงสุดของค่าวัตถุประสงค์ของประชากรชุดแรก

3. การคัดเลือก

จินเนติกอัลกอริทึมจะทำงานโดยการสนับสนุนให้โครโมโซมที่มีความเหมาะสมสามารถสืบทอดไปยังรุ่นต่อไปของการคำนวณ โดยใช้กระบวนการการคัดเลือกโดยโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมมากจะมีโอกาสที่จะถูกเลือกไปเป็นประชากรรุ่นใหม่มากกว่าโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมน้อย เทคนิคของการคัดเลือกที่นิยมใช้มีสองชนิดได้แก่ การคัดเลือกชนิดวงล้อรูเลต (Roulette Wheel Selection) และการคัดเลือกชนิด Stochastic Universal Sampling ซึ่งจะได้อธิบายในรายละเอียดดังนี้

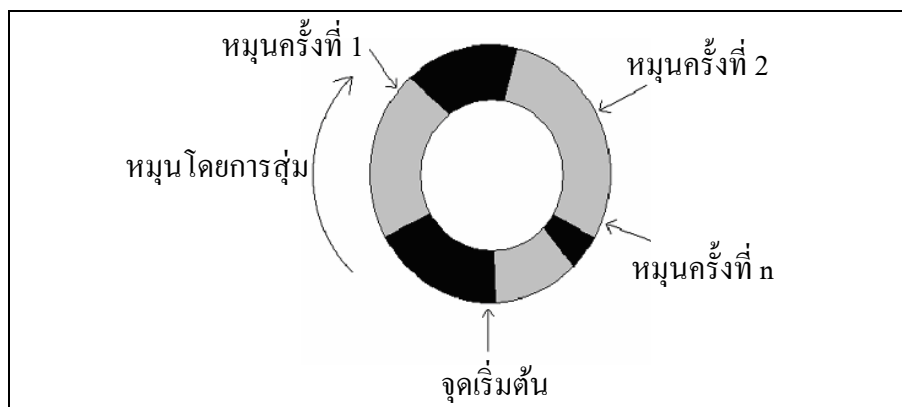
การคัดเลือกชนิดวงล้อรูเลต

การคัดเลือกชนิดวงล้อรูเลตเป็นเทคนิคที่ง่ายที่สุด เทคนิคนี้จะมีลักษณะที่เปรียบเทียบกับวงล้อรูเลตที่มีช่องไม่เท่ากัน โดยช่องของวงล้อรูเลตที่มีขนาดใหญ่จะเทียบได้กับโอกาสที่จะถูกเลือกของโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมมาก และในทางกลับกันช่องที่

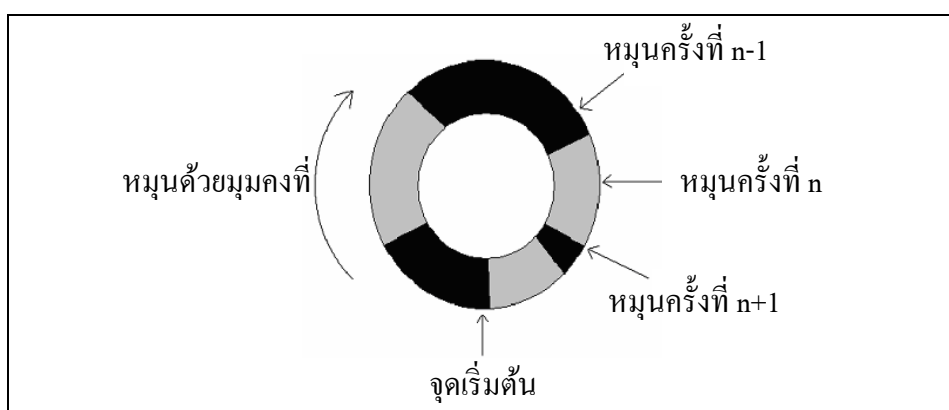
มีขนาดเล็กจะเทียบได้กับโอกาสที่จะถูกเลือกของโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมน้อย ซึ่งขนาดช่องของวงล้อรูเลตแต่ละช่องที่เทียบได้กับขนาดของโอกาสในการถูกเลือกของโครโมโซมแต่ละตัวจะได้จากอัตราส่วนของค่าความเหมาะสมของโครโมโซมแต่ละตัวกับค่าความเหมาะสมรวมของโครโมโซมทุกตัว ในการคัดเลือกกระทำโดยการกำหนดจุดคงที่จุดหนึ่ง จากนั้นทำการหมุนวงล้อรูเลตโดยการสุ่ม และเมื่อวงล้อรูเลตหยุดหมุน จุดที่กำหนดไว้ไปตรงกับตำแหน่งของช่องบนวงล้อช่องใดโครโมโซมที่ถูกแทนโดยช่องนั้นบนวงล้อจะถูกคัดเลือกไปเป็นโครโมโซมของประชากรรุ่นต่อไป จากนั้นทำการหมุนวงล้อโดยการสุ่มต่อไปเพื่อคัดเลือกโครโมโซมจนครบตามจำนวนประชากรเริ่มต้น แผนภูมิของการคัดเลือกชนิดวงล้อรูเลต สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.12 มีข้อสังเกตอยู่ว่าหากวงล้อรูเลตถูกหมุนโดยการสุ่มอย่างแท้จริงแล้วการคัดเลือกจะเป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการคือโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมมากจะมีโอกาสที่จะถูกเลือกมากและในทางตรงกันข้ามกับโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมน้อย แต่จำนวนครั้งของการหมุนของวงล้อรูเลตถูกจำกัดโดยจำนวนประชากร ซึ่งจะทำให้การคัดเลือกโดยวิธีนี้ไม่เป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการคัดเลือกอย่างแท้จริง คือ โครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมมากอาจจะมีโอกาสที่จะถูกเลือกน้อยกว่าหรือเท่ากับโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมน้อย ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยการใช้เทคนิคการคัดเลือกแบบ Stochastic Universal Sampling ซึ่งจะอธิบายต่อไป

การคัดเลือกแบบ Stochastic Universal Sampling

การคัดเลือกโดยเทคนิคนี้จะมีลักษณะคล้ายกับการคัดเลือกแบบวงล้อรูเลตจะแตกต่างกันเฉพาะที่การหมุนวงล้อรูเลต คือทำการหมุนวงล้อรูเลตไปเป็นมุมที่แน่นอนครั้งละ $360/n$ ในแต่ละครั้งของการหมุน โดยที่ n คือ จำนวนประชากรทั้งหมด การหมุนในแต่ละครั้งก็จะทำให้ได้โครโมโซมหนึ่งตัว ซึ่งเมื่อหมุน n ครั้งก็จะได้ประชากรครบตามจำนวนเดิม แผนภูมิของการคัดเลือกแบบ Stochastic Universal Sampling สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.13 การหมุนด้วยมุมที่คงที่นี้จะทำให้โครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมมากจะมีโอกาสที่จะถูกเลือกมาก และโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมน้อยจะมีโอกาสที่จะถูกเลือกน้อย ซึ่งสามารถแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นจากเทคนิคการคัดเลือกชนิดวงล้อรูเลตได้



รูปที่ 4.12 แผนภูมิของการคัดเลือกชนิดวงล้อรูเลต



รูปที่ 4.13 แผนภูมิของการคัดเลือกแบบ Stochastic Universal Sampling

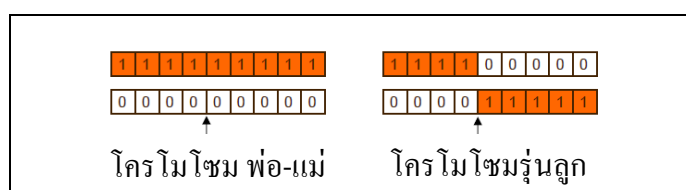
4. การผสมข้ามพันธุ์

ดังที่กล่าวไว้ข้างต้นว่าจินเนติกอัลกอริทึมจะคำนวณโดยใช้ตัวดำเนินการทางพันธุกรรมเพื่อเปลี่ยนแปลงโครโมโซมที่ผ่านกระบวนการคัดเลือกมาแล้ว โดยตัวดำเนินการทางพันธุกรรมชนิดหนึ่งที่มีผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงของโครโมโซมอย่างมากคือดำเนินการผสมข้ามพันธุ์ซึ่งกระบวนการนี้จะเริ่มต้นด้วยการเลือกโครโมโซมมาคู่หนึ่งจากโครโมโซมที่ผ่านกระบวนการคัดเลือกมาแล้วด้วยการสุ่ม ซึ่งโครโมโซมคู่นี้จะเรียกว่าโครโมโซมพ่อแม่ จากนั้นจะมีการแลกเปลี่ยนยีนกันระหว่างโครโมโซมพ่อแม่ ซึ่งจะได้โครโมโซมลูกมาสองตัว และใช้กระบวนการเดียวกันนี้กับโครโมโซมที่เหลืออยู่จนได้โครโมโซมลูกครบตามจำนวนประชากรเดิม โดยทั่วไปแล้วการผสมข้ามพันธุ์จะไม่ได้เกิดขึ้นกับทุกโครโมโซมพ่อแม่ที่

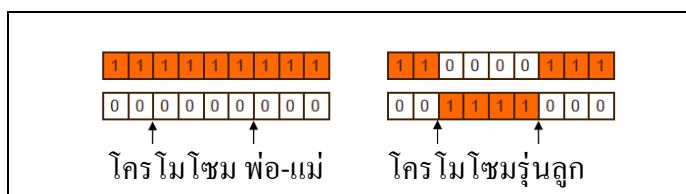
เลือกมา แต่จะมีการกำหนดความเป็นไปได้ในการเกิดการผสมข้ามพันธุ (Crossing Over Probability) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะมีค่าอยู่ในช่วง 0.7 ถึง 0.9 โดยหากไม่เกิดการผสมข้ามพันธุจะทำให้โครโมโซมลูกที่ได้มีลักษณะเหมือนโครโมโซมพ่อแม่ทุกประการ เทคนิคของการผสมข้ามพันธุที่ใช้กันมากมีสองเทคนิคคือ การผสมข้ามพันธุชนิดที่กำหนดจำนวนจุดให้เกิดการผสมข้ามพันธุ (n - Point Crossing Over) และการผสมข้ามพันธุชนิดยูนิฟอร์ม (Uniform) โดยรายละเอียดของทั้งสองเทคนิคนี้จะอธิบายดังนี้

การผสมข้ามพันธุชนิดผสมข้ามพันธุแบบหนึ่งมิติ

เทคนิคการผสมข้ามพันธุชนิดนี้จะมีการแลกเปลี่ยนยีนระหว่างโครโมโซมรุ่นลูกที่จับคู่กัน โดยที่การแลกเปลี่ยนยีนนี้จะเกิดขึ้นในด้านหนึ่งของจุดกำหนดให้เกิดการผสมข้ามพันธุ (Crossing - Over Site) แล้วสลับกันไปตามจุดของการเกิดผสมข้ามพันธุ โดยจำนวนจุดของการผสมข้ามพันธุ n จุดจะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 1 แผนภูมิแสดงการเกิดผสมข้ามพันธุแบบ 1 จุดและ 2 จุด สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.14 และ รูปที่ 4.15 ตามลำดับ จากรูปที่ 4.14 จะเห็นได้ว่าการแลกเปลี่ยนยีนจะเกิดขึ้นด้านขวาของจุดของการเกิดผสมข้ามพันธุ ในกรณีของการผสมข้ามพันธุแบบ 1 จุด ส่วนในกรณีของการผสมข้ามพันธุแบบ 2 จุดแสดงในรูปที่ 4.15 และจากทั้งสองกรณีข้างต้นหลังจากเกิดการผสมข้ามพันธุจะมีทั้งยีนของโครโมโซมพ่อและแม่ โดยรูปแบบของการแลกเปลี่ยนยีนจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งจุดของการเกิดผสมข้ามพันธุซึ่งจะถูกเลือกขึ้นมาโดยการสุ่ม



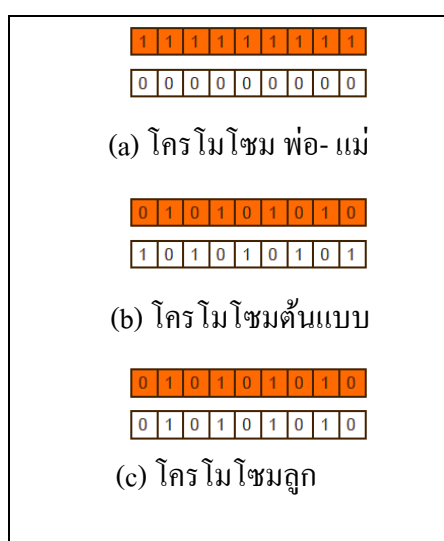
รูปที่ 4.14 แสดงแผนภูมิแสดงการเกิดผสมข้ามพันธุแบบ 1 จุดโดยที่หัวของลูกศรคือจุดกำหนดให้เกิดการผสมข้ามพันธุ



รูปที่ 4.15 แผนภูมิแสดงการเกิดผสมข้ามพันธุ์แบบ 2 จุด โดยที่หัวของลูกศร
คือจุดกำหนดให้เกิดการผสมข้ามพันธุ์

การผสมข้ามพันธุ์ชนิดยูนิฟอร์ม

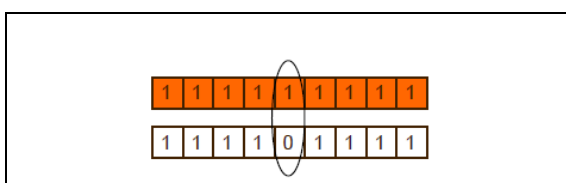
เทคนิคการผสมข้ามพันธุ์ชนิดตามที่กล่าวมาแล้วจะพิจารณาการแลกเปลี่ยนยีนระหว่างโครโมโซมพ่อแม่โดยพิจารณาจากจุดที่เกิดการผสมข้ามพันธุ์ แต่เทคนิคการผสมข้ามพันธุ์ชนิดยูนิฟอร์ม จะพิจารณาการแลกเปลี่ยนยีนระหว่างโครโมโซมพ่อแม่โดยใช้โครโมโซมต้นแบบของการผสมข้ามพันธุ์ ซึ่งเป็นสายตัวอักษรที่เป็นตัวเลขฐานสองที่มีความยาวเท่ากับโครโมโซมพ่อแม่ โดยในการเกิดผสมข้ามพันธุ์จะพิจารณาในทวินของโครโมโซมโดยการกำหนดว่ายีนของโครโมโซมรุ่นลูกจะมาจากโครโมโซมพ่อแม่ตัวใดจะตัดสินใจจากโครโมโซมต้นแบบของลูกแต่ละตัว หากยีนของโครโมโซมต้นแบบเป็น 0 จะใช้ยีนจากโครโมโซมพ่อแม่อีกตัวหนึ่ง แต่หากยีนของโครโมโซมต้นแบบเป็น 1 จะใช้ยีนจากโครโมโซมพ่อแม่ตัวเดิม แผนภูมิแสดงการเกิดผสมข้ามพันธุ์ชนิดยูนิฟอร์มสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 แสดงแผนภูมิแสดงการเกิดผสมข้ามพันธุ์ชนิดยูนิฟอร์ม

5. การกลายพันธุ์

การกลายพันธุ์เป็นตัวดำเนินการหนึ่งที่ใช้สร้างโครโมโซมใหม่จากโครโมโซมเดิมตัวหนึ่ง ซึ่งจะส่งผลให้โครโมโซมตัวใหม่นี้จะถูกเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อยโดยการกลับค่าสถานะของยีนตัวอย่างเช่นในกรณีการกลายพันธุ์ของโครโมโซมเลขฐานสองจะเกิดขึ้นโดยการกลับบิตของข้อมูล (Bit Flipped) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.17

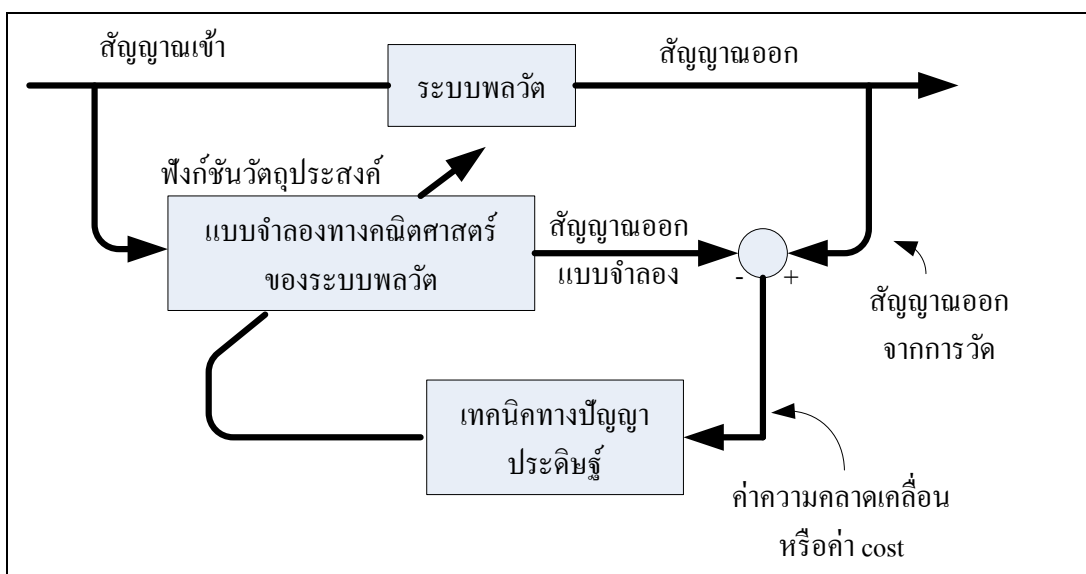


รูปที่ 4.17 การกลายพันธุ์ของโครโมโซมเลขฐานสองการกลายพันธุ์โดยการกลับบิตของข้อมูล

จากรูปที่ 4.17 บริเวณที่เกิดการกลายพันธุ์ คือ ตำแหน่งบิตที่ 4 ของโครโมโซม โดยยีนที่ตำแหน่งนี้จะถูกเปลี่ยนจาก 1 เป็น 0 ซึ่งการเกิดการกลายพันธุ์จะไม่ได้เกิดขึ้นในทุกตำแหน่งของยีนบนโครโมโซม แต่การกลายพันธุ์จะถูกกำหนดโดยความน่าจะเป็นในการกลายพันธุ์ (Mutation Probability) การผสมข้ามพันธุ์จะเป็นตัวดำเนินการหลักที่มีผลอย่างมากต่อการคำนวณของจินเนติกอัลกอริทึม ส่วนการกลายพันธุ์แม้จะมีโอกาสในการเกิดน้อยกว่าจึงทำให้มีผลต่อการคำนวณน้อยแต่ก็เป็นตัวดำเนินการหนึ่งที่สามารถสร้างโครโมโซมที่มีความเหมาะสมกว่าประชากรรุ่นพ่อแม่ได้

4.5 วิธีการระบุเอกลักษณ์ระบบด้วยเทคนิคทางปัญญาประดิษฐ์

ในงานวิจัยนี้จะประยุกต์เทคนิคการค้นหาทางปัญญาประดิษฐ์ เพื่อระบุเอกลักษณ์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบพลวัต กระบวนการระบุเอกลักษณ์ระบบยังคงใช้แนวคิดดั้งเดิม คืออาศัยข้อมูลความรู้เกี่ยวกับอินพุตและเอาต์พุตของระบบ เพียงแต่กระบวนการคำนวณเพื่อการค้นหาค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลอง จะใช้เทคนิคการค้นหาทางปัญญาประดิษฐ์ เป็นตัวปฏิบัติการซึ่งมีแนวทางปฏิบัติดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.18 การระบุเอกลักษณ์ระบบโดยเทคนิคทางปัญญาประดิษฐ์

1. กำหนดให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบพลวัตที่สนใจ เป็นส่วนประกอบหลักของฟังก์ชันวัตถุประสงค์
2. คำคำตอบที่ได้จากเทคนิคทางปัญญาประดิษฐ์คือสัมประสิทธิ์ของแบบจำลอง
3. กลไกการระบุเอกลักษณ์ระบบยังคงใช้แนวคิดดั้งเดิมคืออาศัยข้อมูลความรู้เกี่ยวกับอินพุต (จากตัวตรวจรู้) และเอาต์พุต (จากตัวตรวจรู้) ของระบบ โดยประยุกต์ใช้เทคนิคการค้นหาทางปัญญาประดิษฐ์เพื่อทำการค้นหาค่าสัมประสิทธิ์ที่เหมาะสมของแบบจำลอง ที่ทำให้ค่าเอาต์พุตจากการจำลองสถานการณ์มีค่าใกล้เคียงกับเอาต์พุตของระบบจริงมากที่สุด โดยพิจารณาจากค่าความคลาดเคลื่อน หรือค่า cost ของกระบวนการค้นหา เมื่อการค้นหาค่าสัมประสิทธิ์ที่สามารถทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าน้อยที่สุดเท่าที่ยอมรับได้ นั่นคือค่าสัมประสิทธิ์ในแบบจำลองที่ได้จากการค้นหา รวมทั้งแบบจำลองที่ใช้ สามารถนำมาอธิบายพลวัตของระบบได้อย่างสมเหตุสมผล กระบวนการระบุเอกลักษณ์ระบบโดยการประยุกต์ใช้เทคนิคทางปัญญาประดิษฐ์ดังรูปที่ 4.18

4.6 สรุป

ในบทที่ 4 นี้ได้กล่าวถึงวิธีการระบุเอกลักษณ์ และการประยุกต์ใช้การค้นหาโดยใช้เทคนิคทางปัญญาประดิษฐ์ในการระบุเอกลักษณ์เพื่อทำการค้นหาค่าสัมประสิทธิ์โดยประมาณที่เหมาะสมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้งสองแบบจำลอง โดยทำให้ค่าเอาต์พุตของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลที่เก็บได้จากการทดลองให้มากที่สุด ซึ่งได้ใช้วิธีการค้นหาแบบตามเชิงปรับตัวและการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึม เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์โดยประมาณที่ได้จากทั้งสองวิธีการมาเปรียบเทียบ และเปรียบเทียบผลการตอบสนองของกระบวนการ

บทที่ 5

ผลการประมาณค่าสัมประสิทธิ์

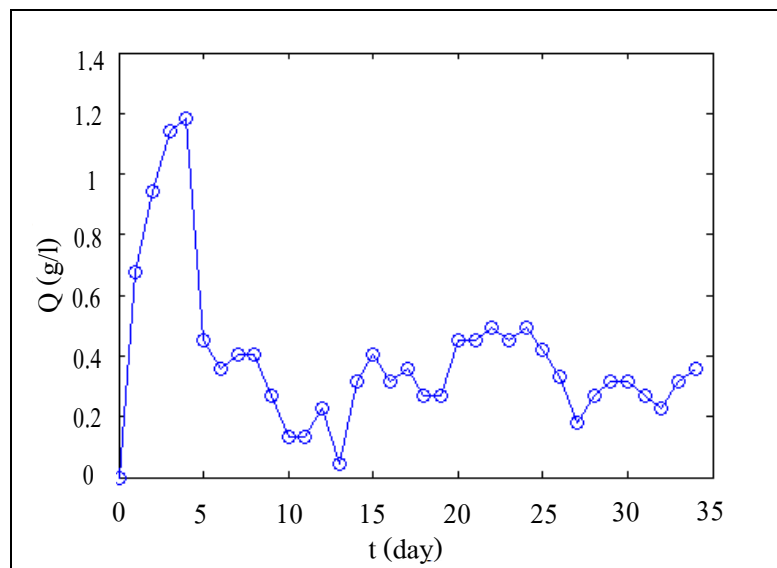
การประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนแบบแบคทีเรียของตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งโดยใช้วิธีทางปัญญาระดับ 2 วิธี คือ จินเนติกอัลกอริทึมและการค้นหาแบบตามเชิงปรับตัว ในการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากการเก็บข้อมูลอุณหภูมิ ค่า PH ปริมาณอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ และสารอินทรีย์ตั้งต้น ในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ เพื่อนำมาใช้ในการประมาณการผลิตก๊าซชีวภาพได้ โดยใส่สารอินทรีย์ของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนภายในถังหมักที่ปิดฝาสนิท ซึ่งได้ก๊าซชีวภาพ และได้ทำการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของทั้งสองแบบจำลองที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 และได้วิเคราะห์พฤติกรรมของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนจากการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนแบบแบคทีเรียของตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง และได้ทำการกำหนดขอบเขตในการระบุเอกลักษณ์

5.1 ผลการทดลองในการเก็บข้อมูล

ในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพของการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน ได้ทำการหมักเป็นแบบแบคทีเรีย ซึ่งเป็นการให้สารอินทรีย์เพียงครั้งเดียว โดยใช้ตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งปริมาณ 80 ลิตร และได้ทำการเก็บข้อมูลอุณหภูมิ ปริมาณอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ ค่า PH โดยนำมาใช้ในการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งได้ทำการทดลองสองครั้งสามารถแสดงได้ดังข้อ 5.1.1 และ 5.1.2

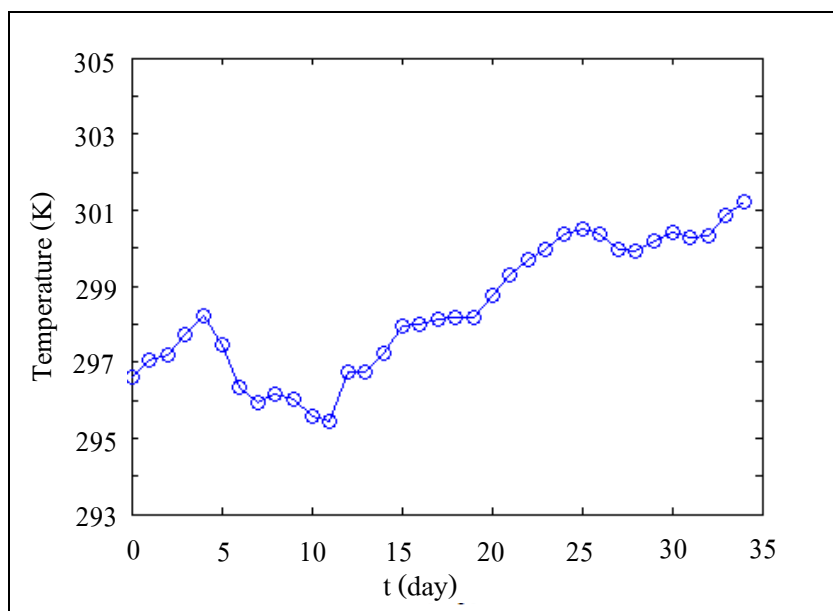
5.1.1 ผลการทดลองครั้งที่ 1

ในการเก็บข้อมูลสำหรับการทดลองที่ 1 ใช้เวลาในการเก็บข้อมูลทั้งหมด 35 วัน มีปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมทั้งหมด 13,255 ลูกบาศก์เซนติเมตร และผลิตก๊าซชีวภาพเฉลี่ยได้ประมาณ 424.35 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวันดังแสดงได้ในรูปที่ 5.1



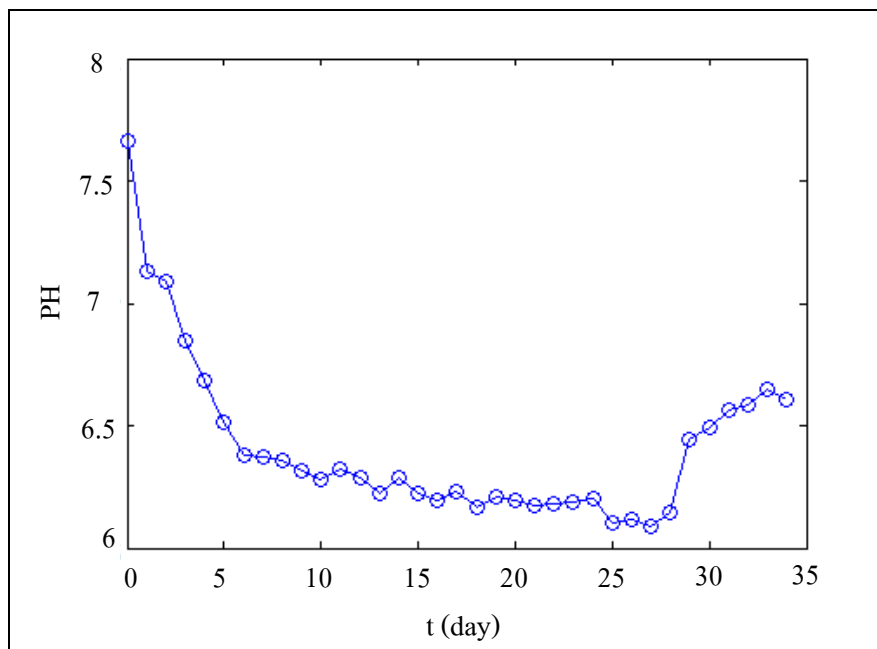
รูปที่ 5.1 แสดงปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพของการทดลองครั้งที่ 1

และอุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิห้องสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของการทดลองครั้งที่ 1

และมีการเปลี่ยนแปลงค่า PH ดังแสดงได้ในรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 แสดงค่า PH ที่เปลี่ยนแปลงของการทดลองครั้งที่ 1

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางชีวเคมีของตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งดังแสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ตารางแสดงข้อมูลผลการทดสอบของตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง

ลำดับที่	รายการทดสอบ	ตะกอนเลน จ.ตรัง (บ้านฉางหลวง)
		(mg/l)
1	ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (Positive potential of Hydrogen : PH)	7.7
2	ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total Solids : TS)	139,859
3	ปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (Total Dissolved Solids : TDS)	24,500
4	ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (Total Suspended Solids : TSS)	112,200
5	ปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมด (Total Volatile Solids : TVS)	22,653
6	ปริมาณของแข็งคงตัวทั้งหมด (Total Fixed Solids : TFS)	139,603
7	ค่าความต้องการออกซิเจนวัดโดยวิธีชีวภาพ (Biological Oxygen Demand : BOD)	2,334
8	ค่าความต้องการออกซิเจนวัดโดยวิธีเคมี (Chemical Oxygen Demand : COD)	7,840
9	อินทรีย์วัตถุ (Organic Matter : OM)	73,500

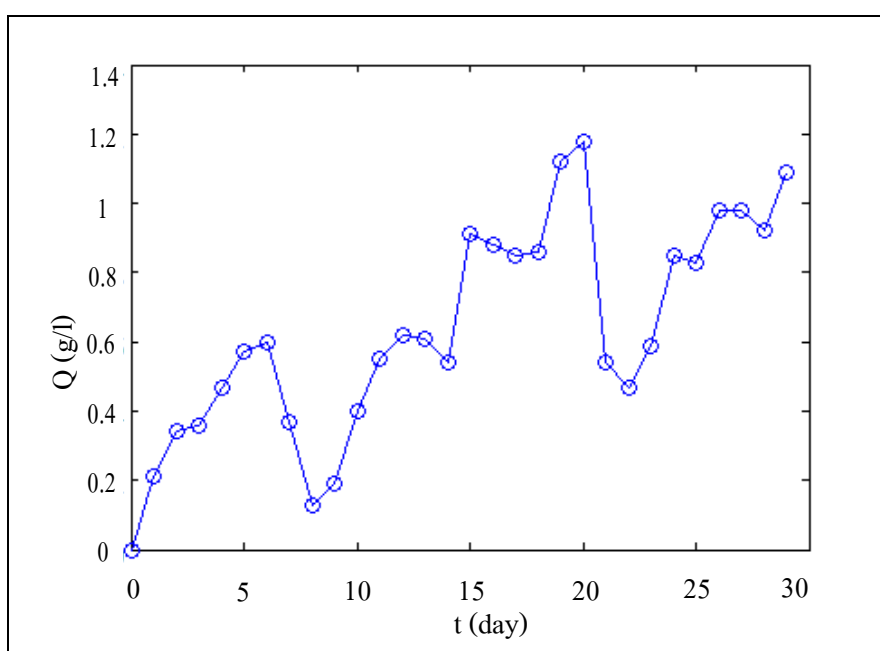
สำหรับอินทรีย์วัตถุมีค่าเท่ากับ 73.5 g/l (S) เป็นสารอินทรีย์เริ่มต้นในกระบวนการหมักก๊าซชีวภาพ และได้นำก๊าซชีวภาพที่ได้ทำการทดลองนำไปวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ	ผลวิเคราะห์(%)
ก๊าซมีเทน (CH_4)	44.34
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)	4.91
ก๊าซไนโตรเจน (N_2)	17.23
ก๊าซไฮโดรเจน (H_2)	ไม่พบ
ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S)	ไม่พบ

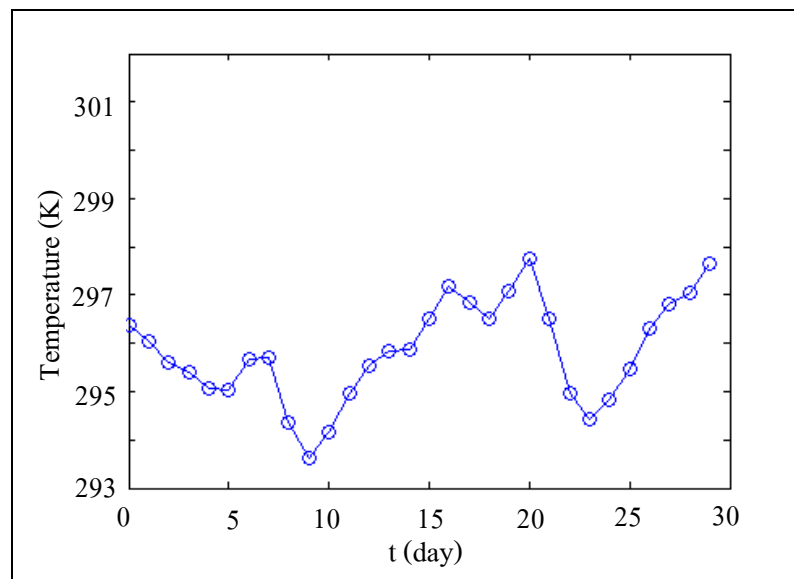
5.1.2 ผลการทดลองครั้งที่ 2

ในการเก็บข้อมูลสำหรับการทดลองที่ 2 ใช้เวลาในการเก็บข้อมูลทั้งหมด 30 วัน มีปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมทั้งหมด 19,010 ลูกบาศก์เซนติเมตร และผลิตก๊าซชีวภาพเฉลี่ยได้ประมาณ 633.667 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวันดังแสดงได้ในรูปที่ 5.4



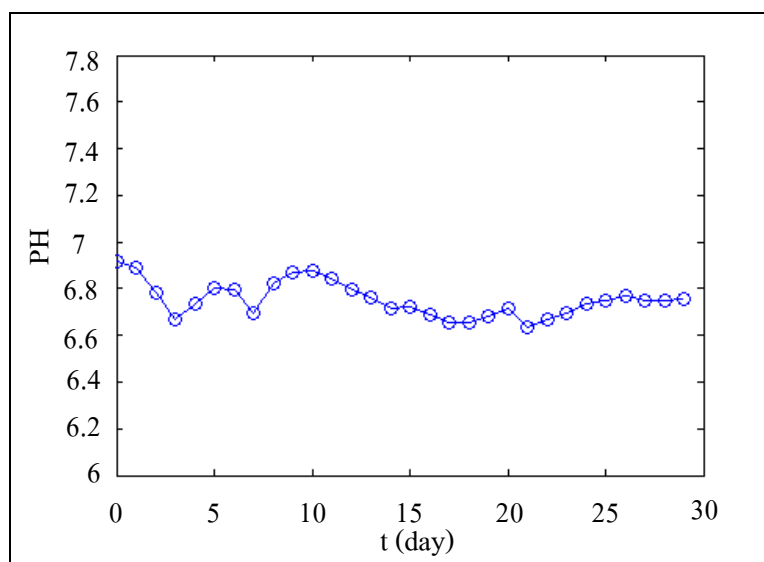
รูปที่ 5.4 แสดงปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพของการทดลองครั้งที่ 2

ในการวันอุณหภูมิในการทดลองครั้งที่ 2 แสดงได้ในรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของการทดลองครั้งที่ 2

และมีการเปลี่ยนแปลงค่า PH ดังแสดงได้ในรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 แสดงค่า PH ที่เปลี่ยนแปลงของการทดลองครั้งที่ 2

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางชีวเคมีของตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งดังแสดงในตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ตารางแสดงข้อมูลผลการทดสอบของตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งครั้งที่ 2

ลำดับที่	รายการทดสอบ	ตะกอนเลน จ.ตรัง (บ้านฉางหลวง)
		(mg/l)
1	ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (Positive potential of Hydrogen : PH)	8.3
2	ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total Solids : TS)	57,035
3	ปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (Total Dissolved Solids : TDS)	15,500
4	ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (Total Suspended Solids : TSS)	34,200
5	ปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมด (Total Volatile Solids : TVS)	8,712
6	ปริมาณของแข็งคงตัวทั้งหมด (Total Fixed Solids : TFS)	45,941
7	ค่าความต้องการออกซิเจนวัดโดยวิธีชีวภาพ (Biological Oxygen Demand : BOD)	735
8	ค่าความต้องการออกซิเจนวัดโดยวิธีเคมี (Chemical Oxygen Demand : COD)	6,227.2
9	อินทรีย์วัตถุ (Organic Matter : OM)	96,900

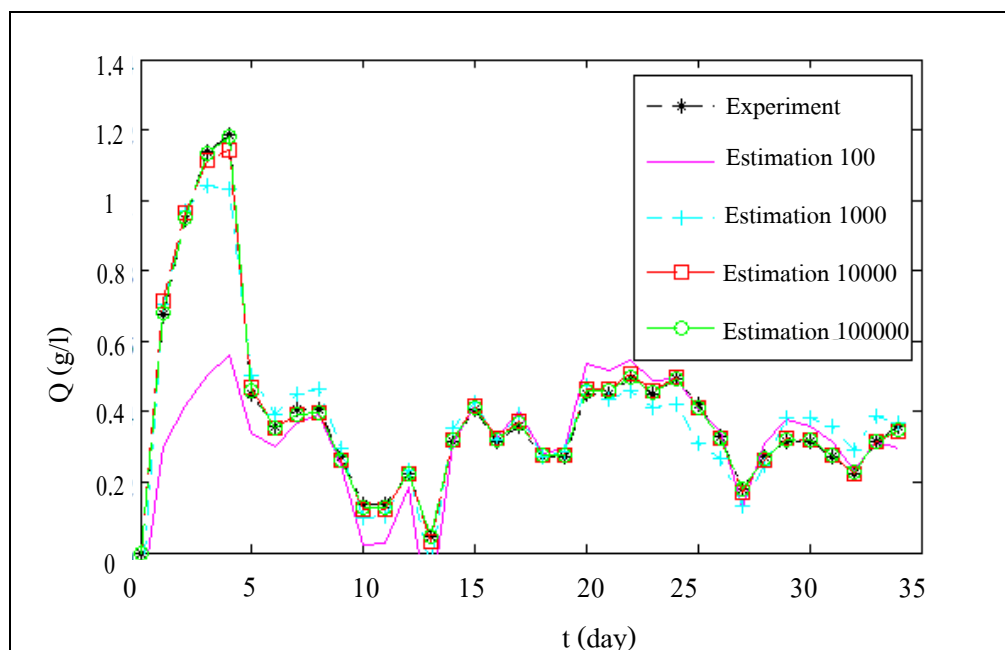
สำหรับค่าอินทรีย์วัตถุมีค่าเท่ากับ 96.9 g/l (S) เป็นสารอินทรีย์เริ่มต้นในกระบวนการเกิดก๊าซชีวภาพ และได้นำก๊าซชีวภาพที่ได้ทำการทดลองนำไปวิเคราะห์สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพครั้งที่ 2

องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ	ผลวิเคราะห์(%)
ก๊าซมีเทน (CH ₄)	12.87
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂)	1.73
ก๊าซไนโตรเจน (N ₂)	29.58
ก๊าซไฮโดรเจน (H ₂)	ไม่พบ
ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H ₂ S)	ไม่พบ

5.2 การกำหนดขอบเขตในการระบุเอกลักษณ์

การระบุเอกลักษณ์ของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนจะมีการหาค่าสัมประสิทธิ์ในตอนต้นนี้จะทำการกำหนดขอบเขตที่จะใช้ในโปรแกรมที่ทำการระบุเอกลักษณ์โดยจะทำการทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และทำการกำหนดขอบเขตที่ใช้ในการกำหนดให้กับโปรแกรมที่จะนำมาใช้งาน ในการศึกษาการกำหนดขอบเขตที่จะใช้ในโปรแกรมนั้น ซึ่งต้องทำการหาจำนวนรอบที่จะใช้ในการคำนวณ ถ้ามีจำนวนรอบในการคำนวณน้อยไป โปรแกรมจะไม่สามารถหาคำตอบที่ต้องการได้ หรือถ้ามีการสุ่มจำนวนประชากรน้อยเกินไปจะทำให้ไม่สามารถหาคำตอบที่เหมาะสม ซึ่งจากรูปที่ 5.7 พบว่าเมื่อเพิ่มจำนวนรอบมากขึ้นจะทำให้มีความถูกต้องมากขึ้น ถ้ามีจำนวนประชากรเท่ากัน ซึ่งแสดงในตารางที่ 5.4 โดยที่ 100000 รอบมีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.0035 และที่ 100 รอบมีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 1.3676

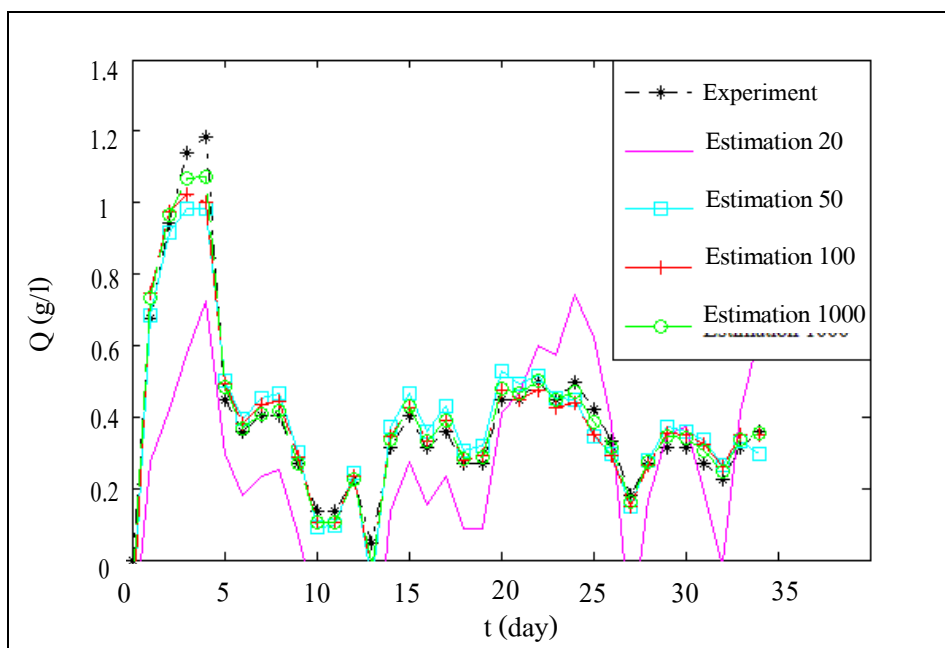


รูปที่ 5.7 ผลการตอบสนองของจำนวนรอบของการระบุเอกลักษณ์ของระบบ

ตารางที่ 5.5 การตอบสนองของจำนวนรอบ

จำนวนรอบ	100	1000	10000	100000
e_{ss}	1.3676	0.1457	0.0079	0.0035

การระบุเอกลักษณ์ต้องมีการกำหนดจำนวนประชากร เมื่อมีจำนวนประชากรมากก็จะทำให้เวลาที่โปรแกรมการระบุเอกลักษณ์มากขึ้นซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.8 พบว่าเมื่อให้จำนวนรอบเท่ากัน และเพิ่มจำนวนประชากร จะทำให้ค่าความผิดพลาดมีค่าน้อยลง แต่เวลาใช้มากขึ้น โดยในงานวิจัยนี้ได้กำหนดใช้ในโปรแกรมมีจำนวนประชากร 100 และจำนวนรอบ 100000 รอบ ซึ่งเพียงพอกับการระบุเอกลักษณ์ เพราะว่าเมื่อมีจำนวน 100000 รอบค่าความผิดพลาดมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ดังแสดงในรูปที่ 5.7 - 5.8 และตารางที่ 5.5 - 5.6 ซึ่งสามารถนำไปหาค่าสัมประสิทธิ์ได้



รูปที่ 5.8 ผลการตอบสนองของจำนวนประชากรของการระบุเอกลักษณ์ของระบบ

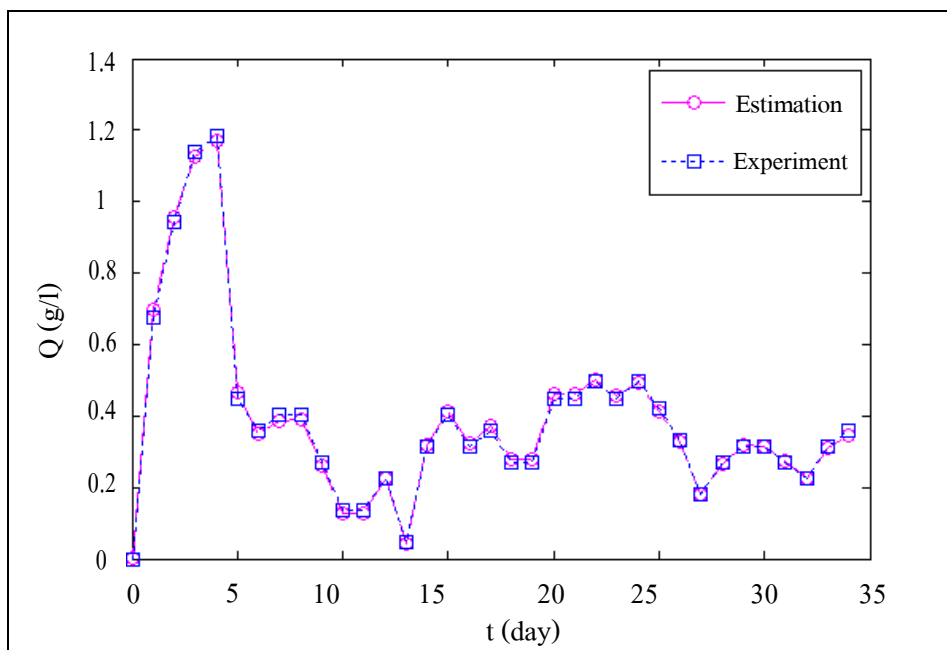
ตารางที่ 5.6 การตอบสนองของจำนวนประชากร

จำนวนประชากร	20	50	100	1000
e_{ss}	2.195	0.187	0.119	0.0475

ตารางที่ 5.7 ผลของการระบุเอกลักษณ์

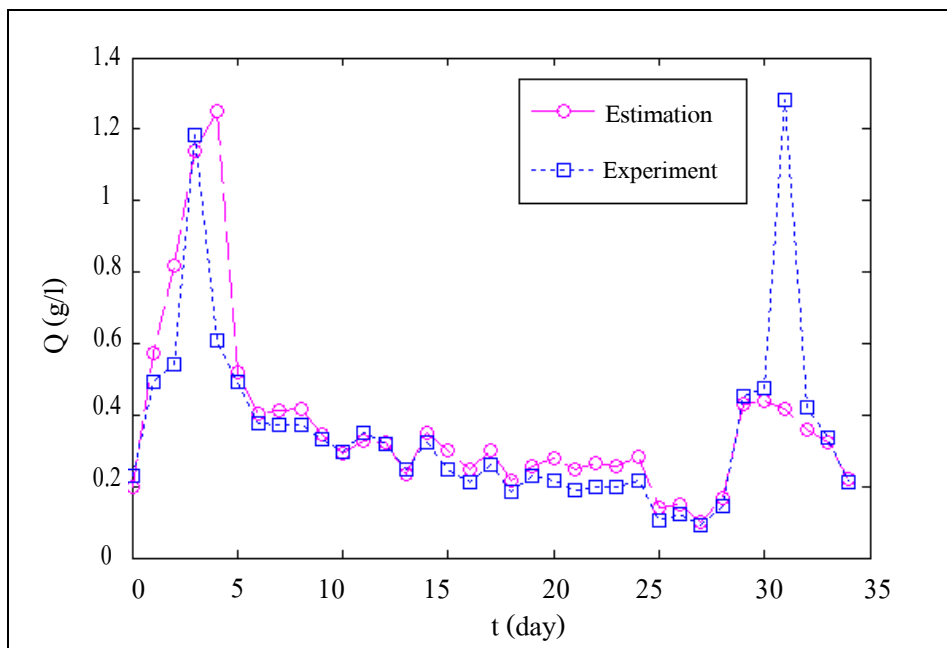
k_Q	k_3	a	b	C
7.141	0.999	2.505	23.007	123.91
μ_{max}	k_s	$k(s)$	a_1	-
1.622	1.168	1.579	2.309×10^{11}	-
a_3	k_1	k_2	a_2	-
0.065	4.600	5.670	3.322×10^{24}	-

เมื่อได้กำหนดจำนวนประชากร 100 และจำนวนรอบ 100000 รอบ โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ 1 ซึ่งสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ดังแสดงในตารางที่ 5.7 ซึ่งได้กำหนดค่า $E_1=16000$ J/g.mole, $E_2=34500$ J/g.mole and $R=1.98702411342312$ J/g



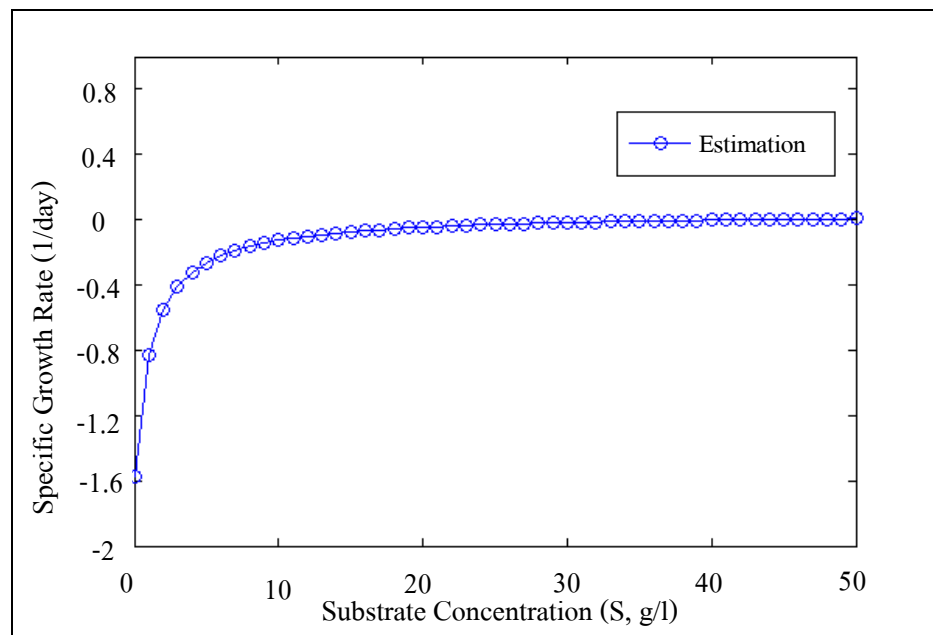
รูปที่ 5.9 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างการประมาณค่ากับการทดลองจริง

จากรูปที่ 5.9 พบว่ามีผลรวมความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.0035 ซึ่งดูจากการระบุเอกลักษณ์เทียบกับผลที่เกิดขึ้นพบว่ามีค่าความถูกต้องมาก และเมื่อได้ค่าสัมประสิทธิ์แล้วทำการทดสอบค่าที่ได้โดยการให้ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้แล้วทำการหาค่าที่ได้จากการทดลองกลับจะได้ว่า

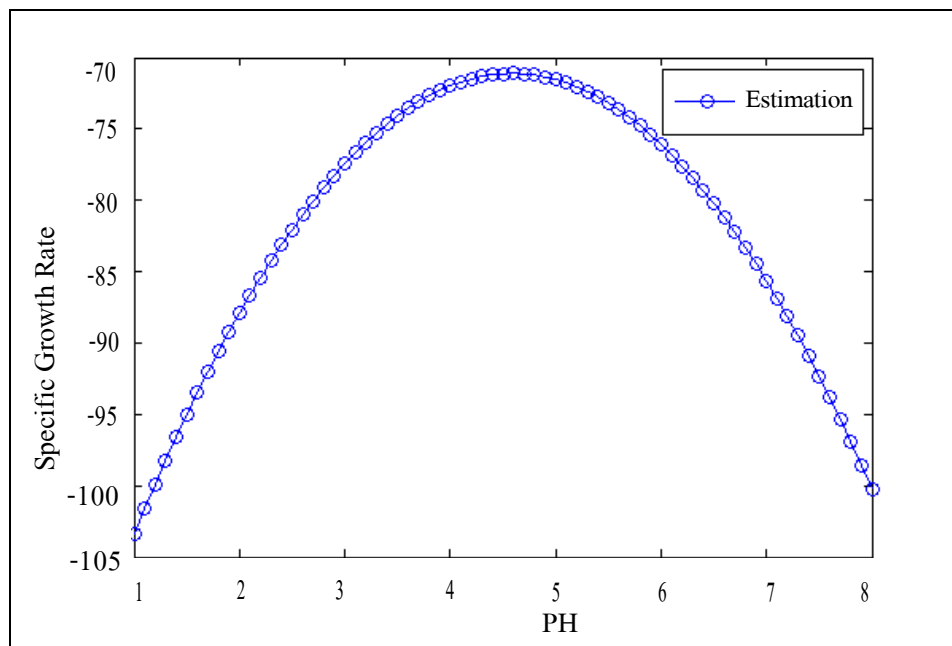


รูปที่ 5.10 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างการประมาณค่ากับการทดลองจริงแบบย้อนกลับ

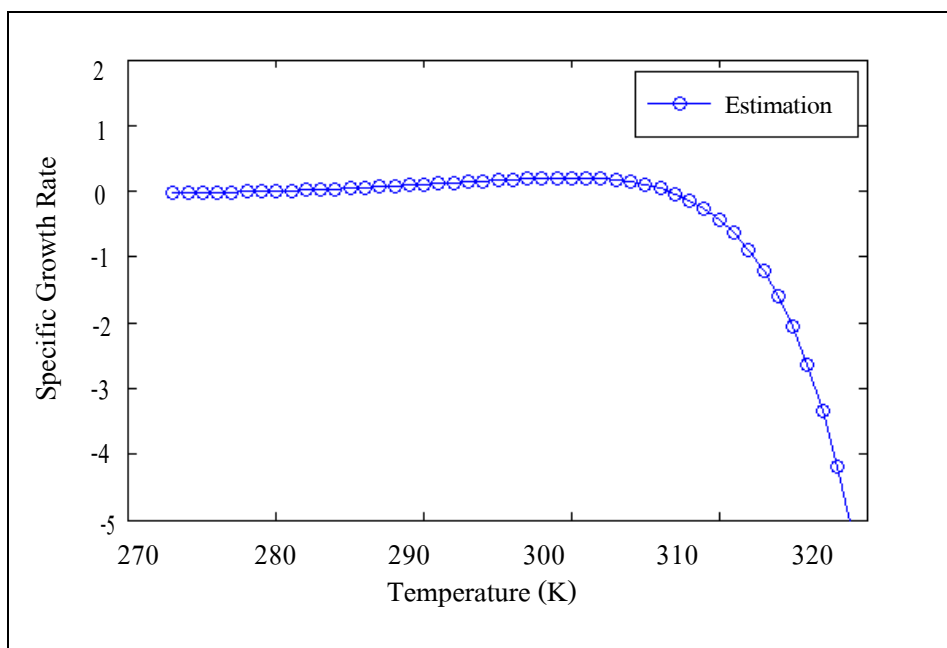
จากผลการระบุเอกลักษณ์จะเห็นได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ทำการศึกษา มีความสอดคล้องกับผลการทดลองได้ดี เพราะในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนนั้นมีการเปลี่ยนแปลงตามตัวแปรหลายตัวทั้ง อุณหภูมิ ค่า PH สารอินทรีย์ และปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพมีผลต่อกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน จากขอบเขตที่กำหนดให้กระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนโดยไม่ควบคุม และทำให้สามารถหาความสัมพันธ์ของการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับตัวแปรต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 5.11 - 5.14



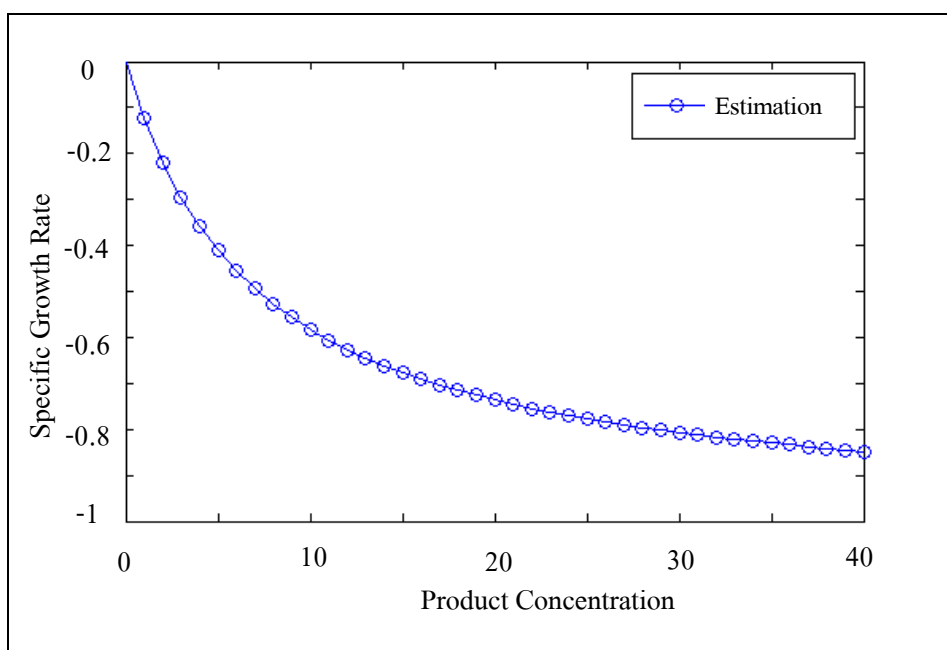
รูปที่ 5.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับสารอินทรีย์



รูปที่ 5.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับ PH



รูปที่ 5.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับอุณหภูมิ



รูปที่ 5.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับปริมาณการผลิตก๊าซ

จากรูปที่ 5.11 – 5.14 พบว่าการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์อยู่ในช่วงค่าติดลบ ซึ่งไม่สามารถเกิดขึ้น เนื่องจากจุลินทรีย์เป็นสิ่งมีชีวิตชนิดหนึ่ง ซึ่งต้องมีค่าน้อยที่สุดคือ 0 และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับรูปที่ 3.3 – 3.7 ในบทที่ 3 พบว่าการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกับ ค่า PH มาเทียบกันพบว่าแนวโน้มของกราฟที่เกิดขึ้นนั้นเป็นไปในทิศทางเดียวกัน แต่ค่าการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์อยู่ในช่วงค่าติดลบ เมื่อนำกราฟแสดงความสัมพันธ์ของการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับปริมาณการผลิตก๊าซมาเทียบกันพบว่าแนวโน้มของกราฟที่เกิดขึ้นนั้นเป็นไปในทิศทางเดียวกันแต่ค่าการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์อยู่ในช่วงค่าติดลบ เมื่อนำกราฟแสดงความสัมพันธ์ของการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับอุณหภูมิพบว่าแนวโน้มของกราฟที่เกิดขึ้นนั้นไม่เป็นไปในทิศทางเดียวกันและค่าการเจริญเติบโตของแบคทีเรียอยู่ในช่วงค่าติดลบ เมื่อนำกราฟแสดงความสัมพันธ์ของการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับสารอินทรีย์พบว่าแนวโน้มของกราฟที่เกิดขึ้นนั้นเป็นไปในทิศทางเดียวกันแต่ค่าการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์อยู่ในช่วงค่าติดลบ จากกราฟข้างต้นพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้นั้นยังคงไม่ถูกต้อง ดังนั้นจึงต้องทำการกำหนดขอบเขตของค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละตัวเพื่อที่จะทำให้กราฟการเจริญเติบโตของแบคทีเรียมีแนวโน้มใกล้เคียงกันและค่าที่ได้ยังคงเป็นบวก ซึ่งจะได้ในหัวข้อ 5.2 และ 5.3

5.3 ผลการประมาณค่าสัมประสิทธิ์

การทดลองโดยการเติมตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งเพียงครั้งเดียว ในการเก็บข้อมูลได้เก็บข้อมูลปริมาณสารอินทรีย์ก่อนทำการทดลอง และระหว่างการทดลองได้ทำการเก็บข้อมูลอุณหภูมิ ค่า PH ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพต่อวัน จากข้อมูลที่เก็บได้ต่อวันได้ใช้ในการระบุเอกลักษณ์โดยใช้โครงสร้างของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ศึกษาในบทที่ 3 ซึ่งได้แบ่งออกเป็นสองแบบจำลอง และได้ใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์สองวิธี ซึ่งได้ศึกษาไว้ในบทที่ 4 โดยกำหนดจำนวนประชากรเท่ากับ 100 และจำนวนรอบเท่ากับ 100000 รอบ ซึ่งสามารถประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังได้แสดงในตารางที่ 5.8

ตารางที่ 5.8 ตารางค่าสัมประสิทธิ์โดยประมาณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

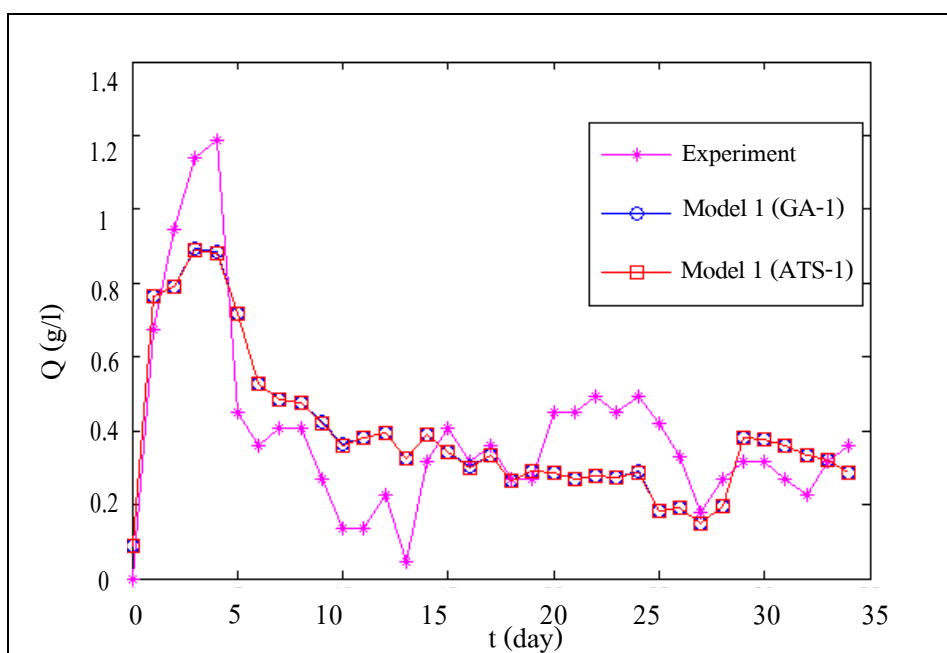
	การทดลองครั้งที่ 1				การทดลองครั้งที่ 2			
	Model 1 (GA-1)	Model 1 (ATS-1)	Model 2 (GA-1)	Model 2 (ATS-1)	Model 1 (GA-2)	Model 1 (ATS-2)	Model 2 (GA-2)	Model 2 (ATS-2)
k_Q	12	10.071	8	8.823	10	6.4487	500	490.5274
k_3	19.434	20.8781	-	-	28.6525	26.5361	-	-
$\mu_{\max}$	0.9316	0.9169	0.9	0.8	0.9156	0.9042	1	0.976
k_M	11.5905	10.7494	175	174.9997	14.7708	15.2738	184.3275	180.3563
k	-0.7947	-0.7906	-	-	-0.7419	-0.7079	-	-
a	-0.9949	-0.998	-1	-1	-0.9898	-0.9841	-1	-0.9834
b	13.5861	13.6281	13.8907	13.8973	13.5679	13.7112	13.9788	13.8754
c	-45.6025	-45.7441	-47.52	-47.5349	-46.2435	-47.4257	-47.9963	-47.9783
a_1	1.68E+11	1.68E+11	2.16E+11	2.16E+11	2.20E+11	1.68E+11	2.64E+11	2.40E+11
a_2	-5.10E+23	-5.10E+23	-1.12E+24	-9.80E+23	-5.10E+23	-5.85E+23	-8.16E+23	-1.04E+24
a_3	-0.0444	-0.0444	-0.0407	-0.0391	-0.0481	-0.043	-0.0407	-0.0369
k_1	2	2	119.8848	116.0544	9	9.4654	197.0307	199.0647
k_2	5	4.9988	21.5	21.5008	7	5.491	55.4039	58.5091
$x(0)$	5	4.9978	1.1	1.1	0.346	0.3355	0.05	0.051
Q	13,616	15,607	12,356	12,669	19,234	19,054	19,263	19,381
Q	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเท่ากับ 13,255 cm ³				ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเท่ากับ 19,010 cm ³			
Error	0.8515	0.852	1.6766	1.5382	0.6659	0.7281	0.7281	0.7454

จากการทดลองที่ 1 มีปริมาณการสะสมก๊าซชีวภาพเท่ากับ 13,255 ลูกบาศก์เซนติเมตรและการทดลองที่ 2 มีปริมาณการสะสมก๊าซชีวภาพเท่ากับ 19,010 ลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งการทดลองที่ 2 มีปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพมากกว่าการทดลองที่ 1 เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองที่ 1 และแบบจำลองที่ 2 สำหรับการทดลองที่ 1 พบว่าแบบจำลองที่ 1 โดยวิธีจิ้นเนติกอัลกอริทึมมีปริมาณการสะสมก๊าซชีวภาพโดยการประมาณใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่าแบบจำลองที่ 2 และสำหรับการทดลองที่ 2 พบว่าแบบจำลองที่ 1 โดยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวมีปริมาณการสะสมก๊าซชีวภาพโดยการประมาณใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่าแบบจำลองที่ 2 และเมื่อพิจารณาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่าสิ่งที่เป็นตัวแปรสำคัญในการเกิดก๊าซชีวภาพคืออัตราการผลิตของจุลินทรีย์กับค่าสัมประสิทธิ์ k_2 และเมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ของทั้งสอง

การทดลอง สำหรับแบบจำลองที่ 1 เมื่อทำการเปรียบเทียบค่า k_0 และค่า k มีค่าใกล้เคียงกันของทั้งสองการทดลอง แต่ค่า k_3 k_M k_1 และ k_2 ของการทดลองที่ 2 มีค่ามากกว่าการทดลองที่ 1 ซึ่งค่า k_3 และ k_M ซึ่งมีค่ามากทำให้ปริมาณการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์มีค่ามาก และ k_1 มีค่ามากทำให้เกิดปริมาณสารอินทรีย์ลดลงเร็ว และ k_2 มีค่ามากทำให้มีการเกิดก๊าซชีวภาพมาก ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการทดลอง และสำหรับแบบจำลองที่ 2 เมื่อทำการเปรียบเทียบค่า k_0 k_M k_1 และ k_2 ของการทดลองที่ 2 มีค่ามากกว่าการทดลองที่ 1 ซึ่ง k_1 มีค่ามากทำให้เกิดปริมาณสารอินทรีย์ลดลงเร็ว k_0 และ k_M มีค่ามากทำให้ปริมาณการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์มีค่ามาก และ k_2 มีค่ามากทำให้มีการเกิดก๊าซชีวภาพมาก ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการทดลอง และจากตารางที่ 5.8 สามารถแสดงเป็นกราฟได้โดยแยกออกเป็นสองแบบจำลองคือ

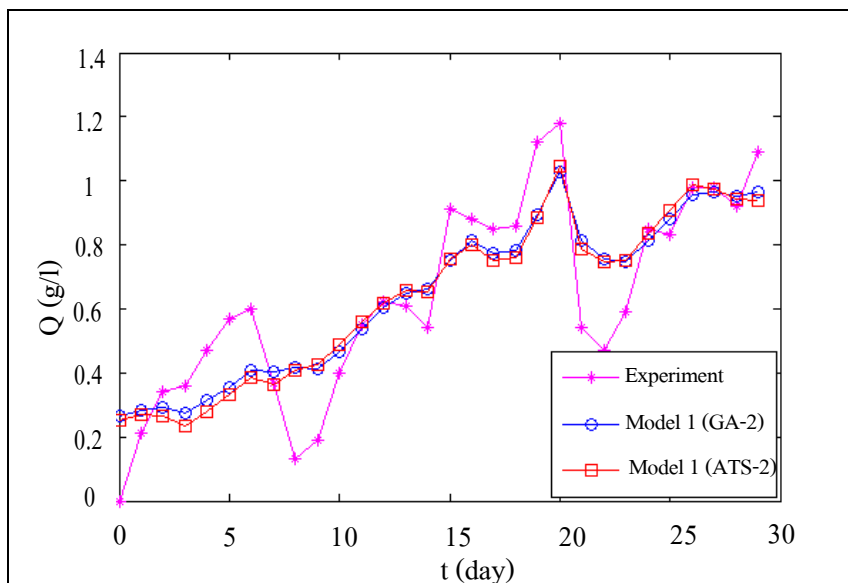
5.3.1 ผลจากการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองที่ 1

จากค่าสัมประสิทธิ์ของตารางที่ 5.8 สามารถแสดงการประมาณการเกิดก๊าซชีวภาพของการทดลองที่ 1 ได้ดังรูปที่ 5.15



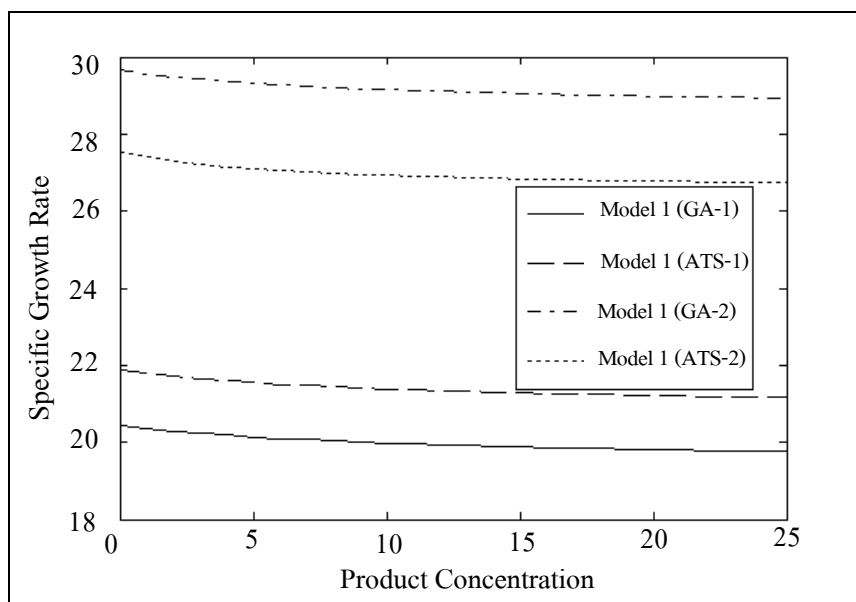
รูปที่ 5.15 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างการประมาณกับการทดลองครั้งที่ 1

และสามารถแสดงการประมาณผลการทดลองของการทดลองที่ 2 ได้ดังรูปที่ 5.16



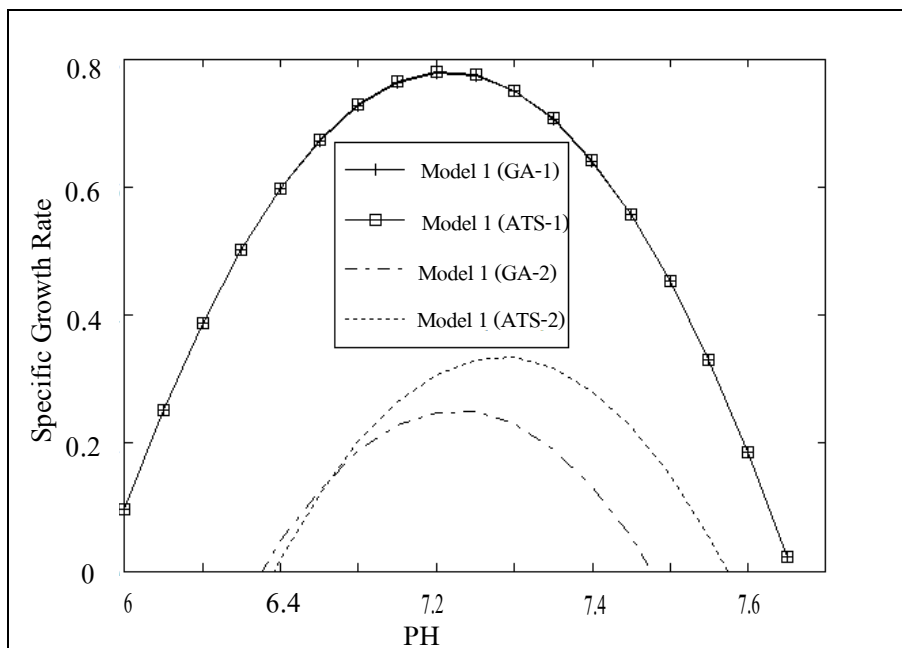
รูปที่ 5.16 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างการประมาณกับการทดลองครั้งที่ 2

และสามารถแสดงกราฟการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับปริมาณการผลิตก๊าซได้ดังรูปที่ 5.17



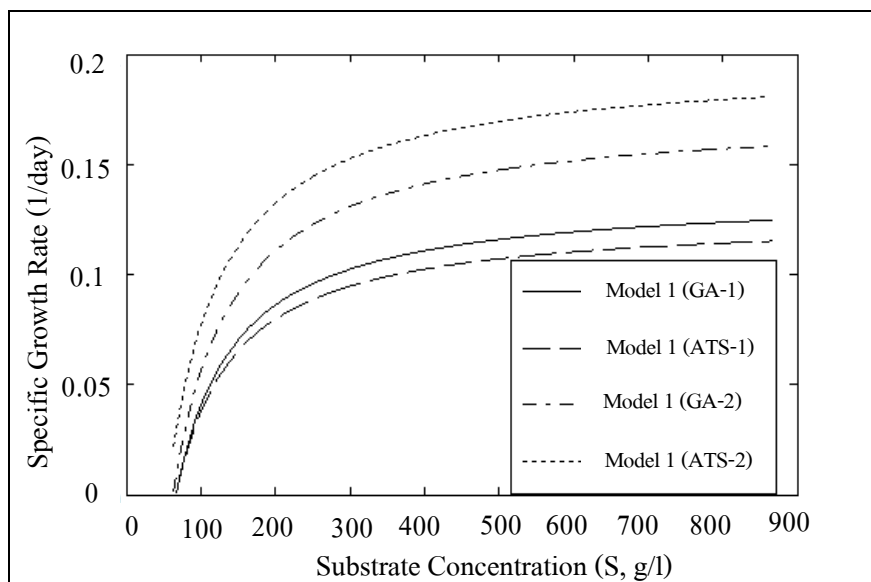
รูปที่ 5.17 กราฟแสดงการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับปริมาณการผลิตก๊าซของแบบจำลองที่ 1

และสามารถแสดงกราฟการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับ PH ได้ดังรูปที่ 5.18



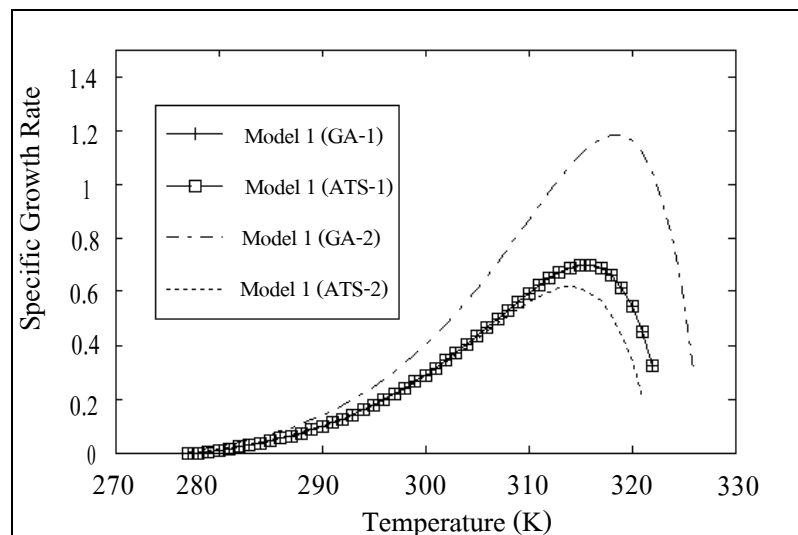
รูปที่ 5.18 กราฟแสดงการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับค่า PH ของแบบจำลองที่ 1

และสามารถแสดงกราฟการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับสารอินทรีย์ได้ดังรูปที่ 5.19



รูปที่ 5.19 กราฟแสดงการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับสารอินทรีย์ของแบบจำลองที่ 1

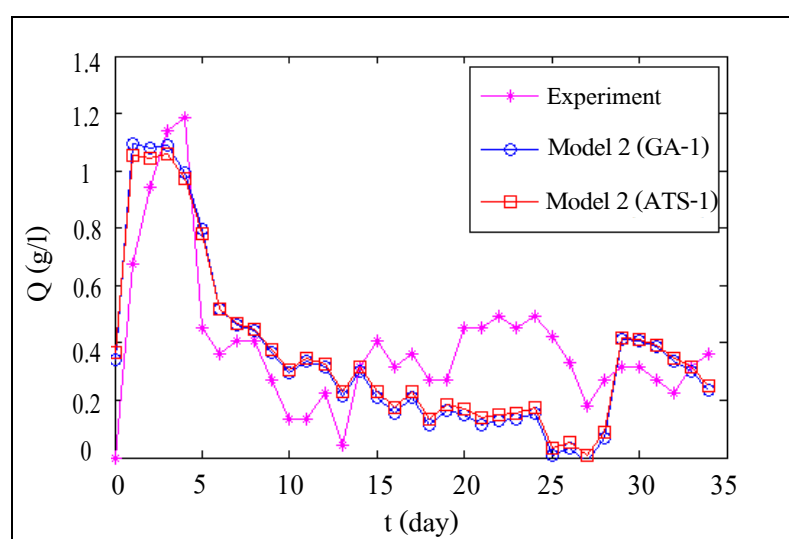
และสามารถแสดงกราฟการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับอุณหภูมิได้ดังรูปที่ 5.20



รูปที่ 5.20 กราฟแสดงการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับอุณหภูมิของแบบจำลองที่ 1

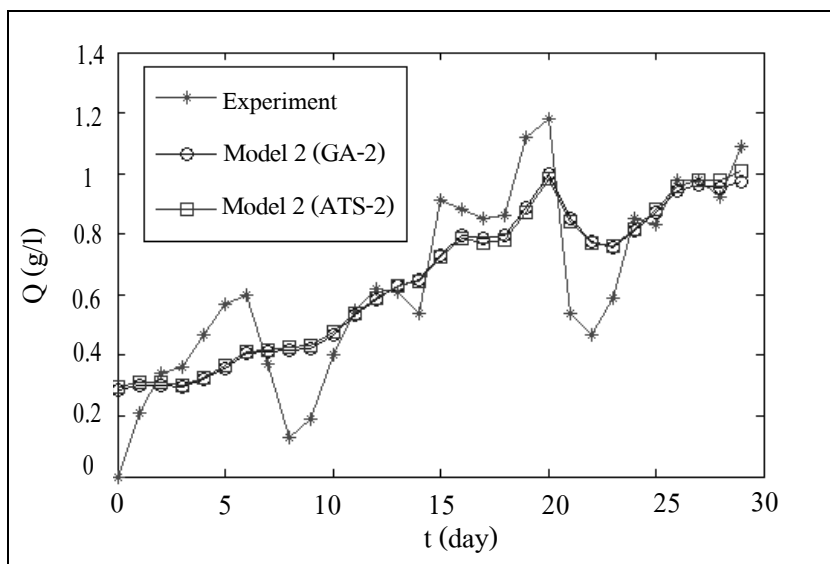
5.3.2 ผลจากการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองที่ 2

จากตารางที่ 5.8 สามารถแสดงกราฟการเปรียบเทียบระหว่างค่าสัมประสิทธิ์โดยประมาณกับผลการทดลองที่ 1 ได้ดังรูปที่ 5.21



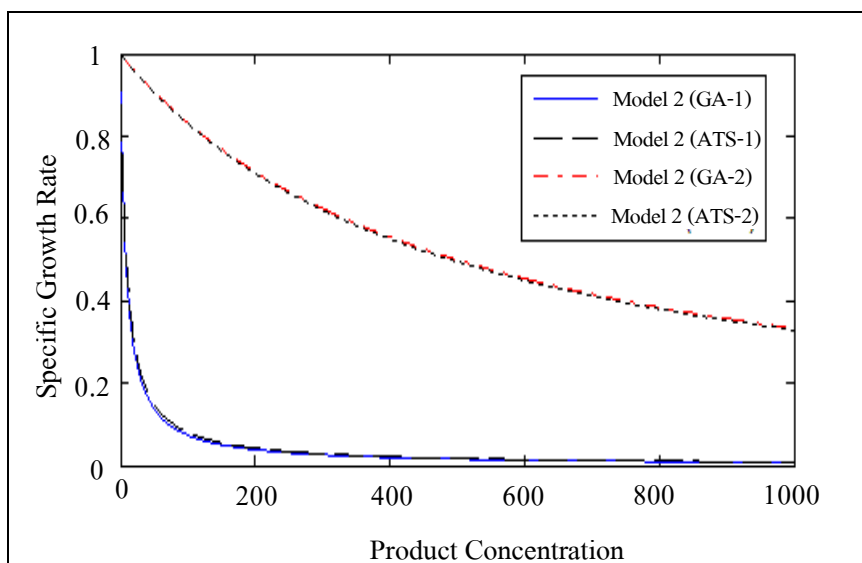
รูปที่ 5.21 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างการประมาณกับการทดลองของครั้งที่ 1

และแสดงกราฟการเปรียบเทียบระหว่างค่าสัมประสิทธิ์โดยประมาณกับผลการทดลองที่ 2 ได้ดังรูปที่ 5.22



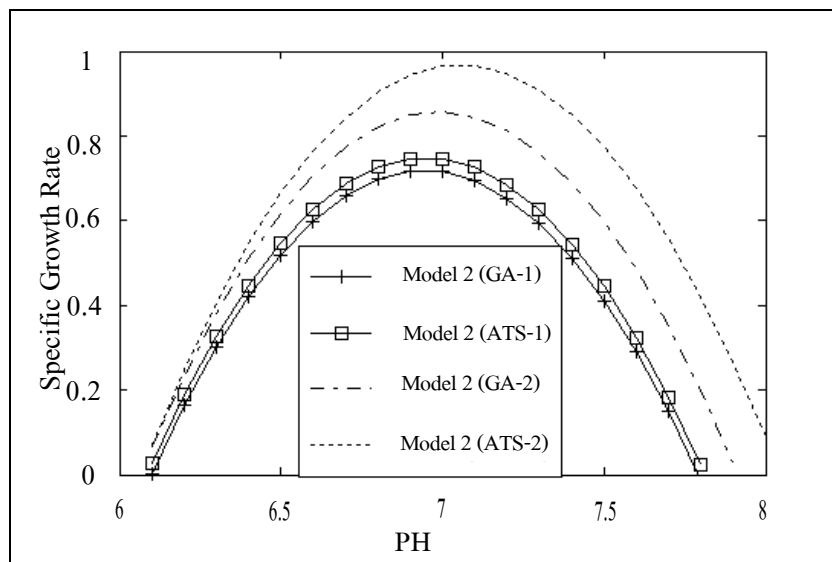
รูปที่ 5.22 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างการประมาณกับการทดลองของครั้งที่ 2

และสามารถแสดงกราฟการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับปริมาณการผลิตก๊าซได้ดังรูปที่ 5.23



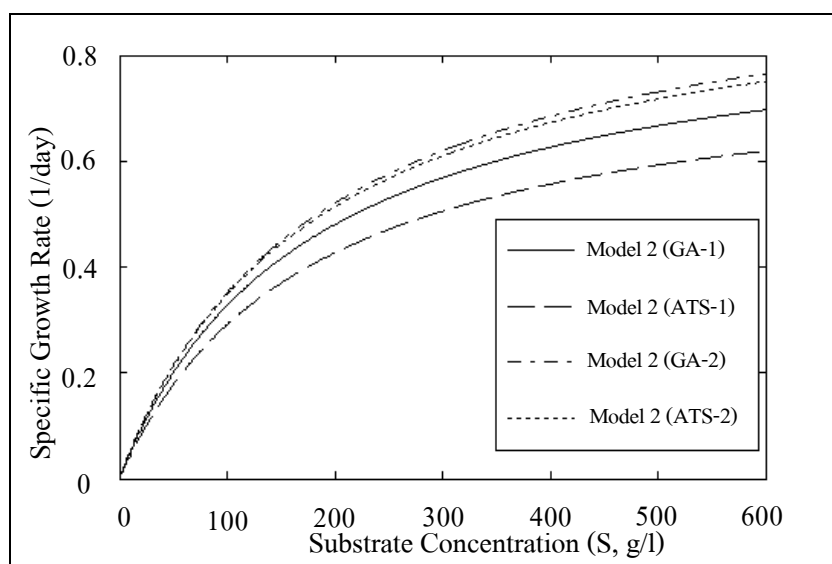
รูปที่ 5.23 กราฟแสดงการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับปริมาณการผลิตก๊าซของแบบจำลองที่ 2

และสามารถแสดงกราฟการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับค่า PH ได้ดังรูปที่ 5.24



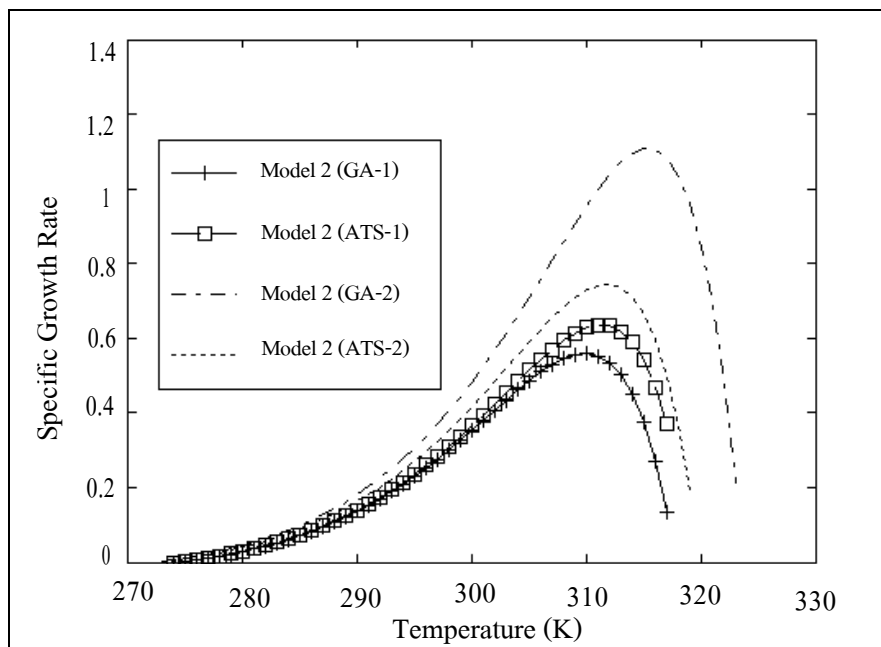
รูปที่ 5.24 กราฟแสดงการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับค่า PH ของแบบจำลองที่ 2

และสามารถแสดงกราฟการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับสารอินทรีย์ได้ดังรูปที่ 5.25



รูปที่ 5.25 กราฟแสดงการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับสารอินทรีย์ของแบบจำลองที่ 2

และสามารถแสดงกราฟการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับอุณหภูมิได้ดังรูปที่ 5.26



รูปที่ 5.26 กราฟแสดงการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับอุณหภูมิของแบบจำลองที่ 2

เมื่อทำการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์โดยประมาณของทั้งสองแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่าค่าสัมประสิทธิ์โดยประมาณนั้นมีความแตกต่างกันบ้างแต่สิ่งที่เหมือนกันนั้นคือความสัมพันธ์ของการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับอุณหภูมิ ค่า PH ปริมาณสารอินทรีย์และอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการทดลอง เมื่อมาเปรียบเทียบค่าความคาดเคลื่อนพบว่าแบบจำลองที่ 1 มีค่าความคาดเคลื่อนน้อยกว่าแบบจำลองที่ 2 ของทั้งสองแบบจำลอง และเมื่อเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับปริมาณการผลิตก๊าซของทั้งสองแบบจำลองพบว่าแบบจำลองที่ 1 เมื่อมีปริมาณการผลิตก๊าซเพิ่มขึ้น การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์จะค่อย ๆ ลดลงแบบจำลองที่ 2 เมื่อมีปริมาณการผลิตก๊าซเพิ่มขึ้น การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ลดลงอย่างรวดเร็ว และเมื่อเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับค่า PH ของทั้งสองแบบจำลองพบว่ามีความโน้มไปในทิศทางเดียวกัน แบบจำลองที่ 1 มีค่า PH อยู่ในช่วงค่าที่เป็นกรดส่วนแบบจำลองที่ 2 อยู่ในช่วง ค่า PH ที่เบี่ยงต่าง จากผลการทดลองพบว่าการผลิตก๊าซชีวภาพนั้นอยู่ในช่วงที่เป็นกรดมากกว่า และเมื่อเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับสารอินทรีย์ของทั้งสองแบบจำลองพบว่ามีความโน้มสอดคล้องกันคือเมื่อสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับอุณหภูมิของทั้งสองแบบจำลองพบว่าทั้งสอง

แบบจำลองมีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นเมื่อนำแบบจำลองทั้งสองเปรียบเทียบจากผลการเก็บข้อมูล ค่าความคลาดเคลื่อนและค่าสัมประสิทธิ์โดยประมาณพบว่าแบบจำลองที่ 1 มีความสอดคล้องมากกว่าแบบจำลองที่ 2

5.4 สรุป

ในบทนี้ เป็นการประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ 1 และ 2 โดยใช้วิธีระบุเอกลักษณ์ในการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ โดยใช้วิธีจินเนติกอัลกอริทึม และวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว โดยนำข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตจากการทดลองทั้งอุณหภูมิ ค่า PH ปริมาณการผลิตก๊าซ และปริมาณสารอินทรีย์เริ่มต้นพบว่าอัลกอริทึมทั้งสองวิธีที่ใช้ในการระบุเอกลักษณ์นั้นมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน และเมื่อเปรียบเทียบแบบจำลองที่ 1 กับแบบจำลองที่ 2 แล้วนั้นพบว่าแบบจำลองที่ 1 มีความสอดคล้องมากกว่า และอุณหภูมิภายในประเทศไทยนั้นสามารถใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพได้ ซึ่งอุณหภูมิที่ทำให้ผลิตก๊าซชีวภาพได้ดีนั้นควรอยู่ในช่วง 308 - 318 K และ ค่า PH ที่ทำให้ผลิตก๊าซชีวภาพได้ดีนั้นอยู่ในช่วง 6.5 - 7.5 และการระบุเอกลักษณ์ทำให้เข้าใจถึงพฤติกรรมทางพลวัตของกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพของการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนของกระบวนการแบคทีเรีย และนำไปสู่การประมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ

บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุป

ในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง ได้ผลผลิตเป็นก๊าซมีเทนที่พอเพียงเพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทน ซึ่งลักษณะทางกายภาพของตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งเป็นของแข็ง ในงานวิจัยได้เลือกวิธีการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนแบบแบคทีเรีย ในการผลิตก๊าซชีวภาพ สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้เฉลี่ย 201.6563 ลูกบาศก์เซนติเมตร/กิโลกรัม นั้นขึ้นอยู่กับค่าสารอินทรีย์ตั้งต้น ค่า BOD COD สภาพ PH อุณหภูมิของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้ศึกษาวิธีการระบุเอกลักษณ์ของระบบทางพลวัตภายใต้โครงสร้างของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนของตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งแบบแบคทีเรียในการผลิตก๊าซชีวภาพโดยใช้วิธีทางปัญญาประดิษฐ์มาประยุกต์ใช้เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์โดยประมาณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ทำการศึกษา ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้สร้างจากหลักการสมดุลมวล ซึ่งมีสองแบบจำลองคือแบบจำลองที่ 1 ได้เพิ่ม k , k_3 เข้าไปเป็นตัวชดเชยทางพลวัต และแบบจำลองที่ 2 เป็นแบบจำลองทั่วไป สามารถประมาณเกิดก๊าซชีวภาพอย่างสอดคล้องกันกับผลการทดลอง และอุณหภูมิที่ทำให้ผลิตก๊าซชีวภาพได้ดีนั้นอยู่ในช่วง 308 - 318 K และค่าความเป็นกรดเป็นด่างที่ทำให้ผลิตก๊าซชีวภาพได้ดีอยู่ในช่วง 6.5 - 7.5 และการระบุเอกลักษณ์ทำให้ทราบถึงพฤติกรรมทางพลวัตของกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพของการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนของกระบวนการแบคทีเรียที่ใช้ตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งเป็นวัตถุดิบ และนำไปสู่การประมาณปริมาณก๊าซชีวภาพ สำหรับการระบุเอกลักษณ์โดยวิธีจิ้นเนติกอัลกอริทึม และการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน

6.2 ข้อเสนอแนะ

โครงสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้นำเสนอมีความสามารถในการประมาณการผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งได้ แต่คุณสมบัติทางชีวเคมีตั้งต้นของตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งนั้นมีความแตกต่างกันมาก ขึ้นกับลักษณะการเลี้ยงกุ้งของแต่ละฟาร์ม ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องศึกษาลักษณะการเลี้ยงกุ้งกับค่าคุณสมบัติทางชีวเคมีก่อน

รายการอ้างอิง

- วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ (2548). การควบคุมระบบพลศาสตร์ (พิมพ์ครั้งที่2). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เดชา พวงดาวเรือง (2550). การระบุเอกลักษณ์ค่าสัมประสิทธิ์ของอนุกรมฟูรีเยร์ด้วยเทคนิคการค้นหาลักษณะเฉพาะ. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. 30. เม.ย.-มิ.ย. 2550 301-314.
- อาทิตย์ ศรีแก้ว (2552). ปัญญาเชิงคำนวณ. สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- Hill, D.T., and Barth, C.L. (1977). **A dynamic model for simulation of animal waste digestion.** J. Wat. Pol. Centr.Fed. 2129-2143.
- Bastin, G., and Dochain, D. (1991). **On-line estimation and adaptive control of bioreactors.** Elsevier Science Publishers. Amsterdam and N. Y.
- Simeonov, I., (1994). **Modelling and control of anaerobic digestion of organic waste.** Chemical and Biochemical Engineering. 8(2): 45-52.
- Simeonov, I., Momchev, V., and Grancharov, D. (1996). **Dynamic modeling of mesophilic digestion of animal waste.** Water Research. 30(5): 1087-1094.
- Husain, A., (1998). **Mathematical models of the kinetics of anaerobic digestion - a selected review.** Biomass and Bioenergy. 14(5/6): 561-571.
- Lo, C.H., Chow, K.M., Wong, Y.K., and Rad, A.B. (2001). **Qualitative system identification with the use of on-line genetic algorithms.** Simulation Practice and Theory. 8(6-7): 415-431.
- Batstone, D.J., Keller, J., Angelidaki, I., Kalyuzhnyi, S.V., Pavlostathis, S.G., Rozzi, A., Sanders, W.T., Siegrist, H., and Vavilin, V.A. (2002). **The IWA Anaerobic Digestion Model No 1 (ADM1).** Water Science and Technology. 45(10): 65-73.
- Noykova, N., Muller, T.G., Gyllenberg, M., and Timmer, J. (2002). **Quantitative analyses of anaerobic waste water treatment processes: identifiability and parameter estimation.** Biotechnology and Bioengineering, 78(1): 89-103.

- Muller, T.G., Noykova, N., Gyllenberg, M., and Timmer, J. (2002). **Parameter identification in dynamical models of anaerobic waste water treatment.** Mathematical Biosciences. 177-178: 147-160.
- Simeonov, I., and Stoyanov, S. (2003). **Modelling and Dynamic Compensator Control of the Anaerobic Digestion of Organic Wastes.** Chemical and Biochemical Engineering. 17(4): 285-292.
- Kikuchi, S., Tominaga, D., Arita, M., Takahashi, K., and Tomita, M. (2003). **Dynamic modeling of genetic networks using genetic algorithm and S-system.** Bioinformatics. 19(5): 643-650.
- Andrews John, F. (2004). **A mathematical model for the continuous culture of microorganisms utilizing inhibitory substrates.** Biotechnology and Bioengineering. 10(6): 707 – 723.
- Feng, Y., Behrendt, J., Wendland, C., and Otterpohl, R. (2006). **Implementation of the IWA anaerobic digestion model No.1 (ADM1) for simulating digestion of blackwater from vacuum toilets.** Water science and technology. 53(9): 253-263.
- Boubaker, F., and Cheikh Ridha, B. (2008). **Modelling of the mesophilic anaerobic co-digestion of olive mill wastewater with olive mill solid waste using anaerobic digestion model No. 1 (ADM1).** Bioresource Technology. 99(14): 6565-6577.
- Mu, S.J., Zeng, Y., Wu, P., Lou, S.J., and Tartakovsky, B. (2008). **Anaerobic digestion model no. 1-based distributed parameter model of an anaerobic reactor: I. Model development.** Bioresource Technology. 99(9): 3676-3684 .
- Giriraj Kumar, S.M., Jain, R., Anantharaman, N., Dharmalingam, V., and Sheriffa, Begum, K.M.M. (2008). **Genetic Algorithm Based PID Controller Tuning for a Model Bioreactor.** Indian Chemical Engineer Indian Institute of Chemical Engineers. 50(3): 214-226.
- Abu Qdais, H., Bani Hani, K., and Shatnawi, N. (2009). **Modeling and optimization of biogas production from a waste digester using artificial neural network and genetic algorithm.** Resources: Conservation and Recycling. 54(6): 359-363.

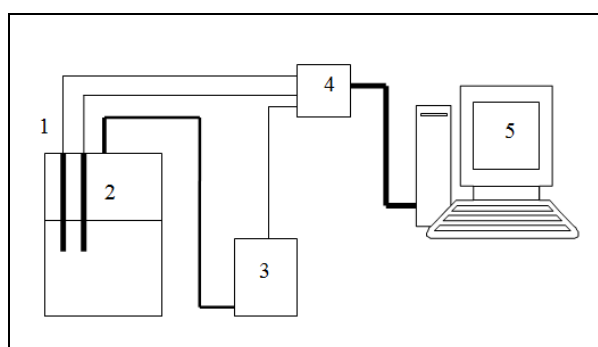
- Derbal, K., Bencheikh lehocine, M., Cecchi, F., Meniai, A.H., and Pavan, P. (2009). **Application of the IWA ADM1 model to simulate anaerobic co-digestion of organic waste with waste activated sludge in mesophilic condition** . Bioresource Technology. 100(4): 1539-1543.
- Ogata, K. (2002). **Modern Control Engineering (4th Edition)**. USA, Prentice Hall.
- Puangdownreong, D., Sujitjorn, S., and Kulworawanichpong, T. (2004). **Convergence Analysis of Adaptive Tabu Search**. ScienceAsia Journal of the Science Society of Thailand. 30(2): 183-190.
- Puangdownreong, D., Kulworawanichpong, T., and Sujitjorn, S. (2004). **Finite Convergence and Performance Evaluation of Adaptive Tabu Search**. LNCS (Lecture Notes in Computer Science), Springer-Verlag Heidelberg. 3215:710-717.

ภาคผนวก ก

อุปกรณ์ที่ใช้ในการติดตั้งและการเปรียบวัดเครื่องมือทดลอง

ก.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการติดตั้งและการเปรียบวัดเครื่องมือทดลอง

กระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนของตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง มีการวัดอุณหภูมิ PH และปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งจากการวัดที่ได้ส่งไปยังชุดควบคุม ชุดควบคุมจะทำหน้าที่ติดต่อสื่อสารกับคอมพิวเตอร์ ซึ่งมีโปรแกรมไว้สำหรับเก็บค่าและทำการเก็บข้อมูล และสามารถเขียนแผนภาพของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนของตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งได้ดังนี้



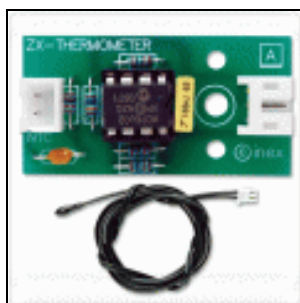
รูปที่ ก.1 ชุดอุปกรณ์

การทดลองสร้างขึ้นโดยใส่ตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งปริมาณ 80 ลิตรโดยการหมักแบบการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนซึ่งการหมักนั้นใช้การหมักที่อุณหภูมิห้องซึ่งอยู่ในช่วง 20 - 40°C โดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์เชื่อมต่อในการเก็บข้อมูล ตัวเซ็นเซอร์ที่ใช้วัดและเก็บข้อมูลนั้นมีค่า PH อุณหภูมิ (°C) และปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพแสดงดังรูปที่ 1 ซึ่ง 1 คืออุณหภูมิ (°C) 2 คือ PH 3 คือปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพ 4 คือตัวเชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์กับตัวเซ็นเซอร์ และ 5 คือคอมพิวเตอร์

1. อุณหภูมิ

ในการทดลองที่ได้ทำขึ้นนั้นใช้การวัดอุณหภูมิแบบเทอร์มิสเตอร์จำนวน 4 จุดคือภายในถังหมักก๊าซชีวภาพมีการวัดอุณหภูมิแบบเทอร์มิสเตอร์จำนวน 3 จุดและภายนอกอีก 1 จุด เทอร์มิสเตอร์คืออุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ตรวจจับอุณหภูมิ (Temperature-Sensing) ที่ทำจากวัสดุสารกึ่งตัวนำที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิโดยรอบเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อยจะส่งผลทำให้ค่าความต้านทานเปลี่ยนแปลงไปอย่างรวดเร็วและแปรผันตรงกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป ผลตอบสนองของเทอร์มิสเตอร์ขึ้นอยู่กับประเภทของวัสดุและสภาวะแวดล้อม สำหรับเทอร์มิสเตอร์ที่บรรจุอยู่ในอ่างน้ำมัน (ที่มีการสัมผัสความร้อนที่ดี) ผลตอบสนองของเวลาจะมีค่าประมาณ 0.5 วินาที แต่หากเป็นเทอร์มิสเตอร์ตัวเดียวกันที่อยู่ในอากาศ อาจจะใช้เวลาตอบสนองถึง 10 วินาที เทอร์มิสเตอร์แบบจานหรือแบบแท่งขนาดใหญ่ อาจจะมีผลตอบสนองต่อ

เวลาเป็น 10 วินาที หรือมากกว่า ถึงแม้ว่าจะมีการสัมผัสความร้อนที่ดีก็ตามและการนำไปใช้ต้องมีวงจรในการต่อของเทอร์มิสเตอร์ ได้ทำการเลือกใช้แผนวงจรวัดอุณหภูมิแบบขั้วต่อสาย ซึ่งได้ใช้เทอร์มิสเตอร์ชนิด NTC ค่า $R_{25^{\circ}\text{C}}$ 10K $\pm 3\%$ ซึ่งอุณหภูมิ 0 - 70°C จะมีความเป็นเส้นตรงสูงซึ่งเหมาะสมกับการใช้งานในช่วงที่ต้องการ

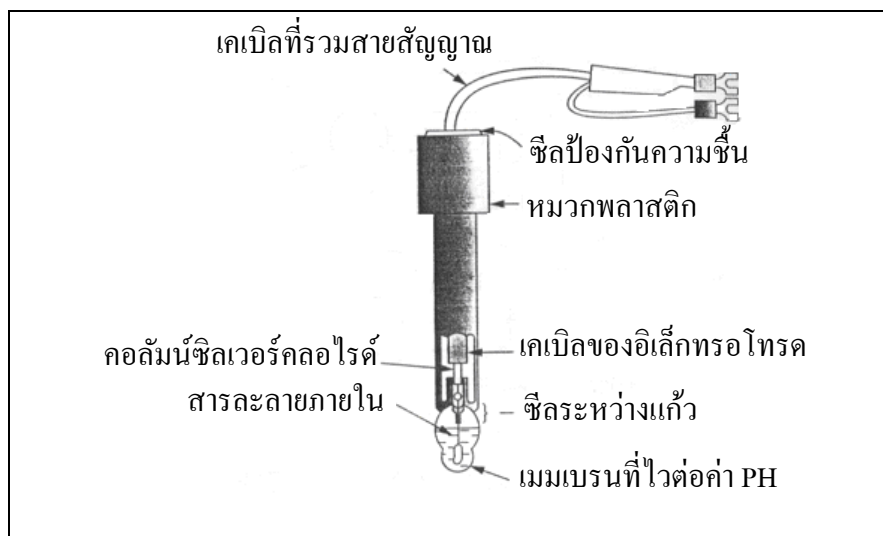


รูปที่ ก.2 ชุดวัดอุณหภูมิ

2. การวัด PH

ในงานป้องกันสิ่งแวดล้อมที่เป็นมลภาวะ ค่า PH เป็นกุญแจสำคัญของตัวแปรในการป้องกันสิ่งแวดล้อม เช่น จะเป็นตัวบอกความรุนแรงของสนิมซึ่งเข้ากันได้กับทางเคมี สำหรับการตรวจสอบคุณภาพของน้ำที่ผิวน้ำ น้ำใต้ผิวดิน น้ำฝน และน้ำเสีย เป็นต้น โดยปกติน้ำบริสุทธิ์จะมีค่าเป็นกลาง คือ PH 7.0

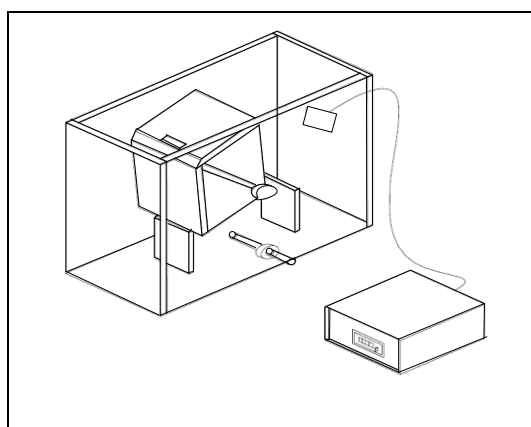
PH เซ็นเซอร์ คืออุปกรณ์ไฟฟ้าเคมี (electrochemical) ที่สร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้าซึ่งเป็นสัดส่วนกับค่า PH ของสารละลายที่นำไปวัด ส่วน PH มิเตอร์ก็ใช้หลักการที่กล่าวมา คือใช้หลักการวัดค่าความเป็นกรดหรือด่างที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย ซึ่งก็ใช้หลักการทางเคมีไฟฟ้าเหมือนกัน หลังจากนั้นก็นำค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นมาระหว่างอิเล็กโทรดอ้างอิง (reference electrode) กับอิเล็กโทรดวัด (sensing electrode) ไปขยายปรับสภาพและแสดงผลต่อไป ดังนั้นหัวเซ็นเซอร์ PH จึงต้องมีทั้งขั้ววัดและขั้วอ้างอิงอยู่ แล้วแต่ว่าจะแยกออกจากกันหรืออยู่รวมกัน ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ ก.3



รูปที่ ก.3 แสดงตัวอย่างของอิเล็กโทรดวัดค่าพีเอชแบบแก้ว

3. ชุดวัดปริมาณก๊าซชีวภาพ

โดยเครื่องนี้จะวัดผลรวมของปริมาตรที่เกิดขึ้นในแต่ละวัน แล้วแสดงออกมาเป็นตัวเลขบนวงจรนับสามารถแสดงได้ดังรูปที่ ก.4 ก๊าซที่เกิดขึ้นจะถูกส่งมาตามสายยางจากฝาของถังหมักจากนั้นจะผ่านมาทางด้านล่างของเครื่องวัด โดยใช้หลักการแทนที่น้ำ ภายในก๊าซมิเตอร์จะมีช่องบรรจุก๊าซที่สามารถพลิกไปมาได้ เมื่อก๊าซบรรจุเต็มช่องว่างของภาชนะวัด ก็จะพลิกกลับไปอีกด้านซึ่งในขณะเดียวกันมิเตอร์วัดก็จะคลิกไปหนึ่งหน่วย ซึ่งค่า 1 หน่วยนี้จะเท่ากับปริมาตรบรรจุของก๊าซใน 1 ช่องวัดก๊าซ



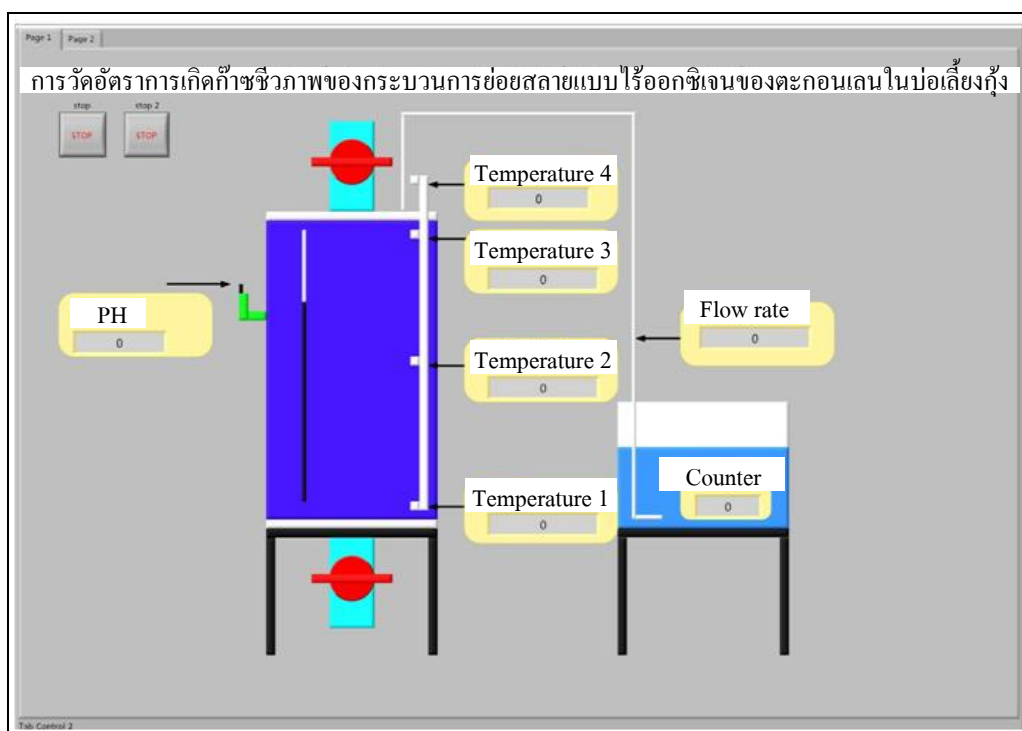
รูปที่ ก.4 ชุดวัดปริมาณก๊าซชีวภาพ

ภาคผนวก ข

การเก็บข้อมูลโดยใช้โปรแกรม Labview

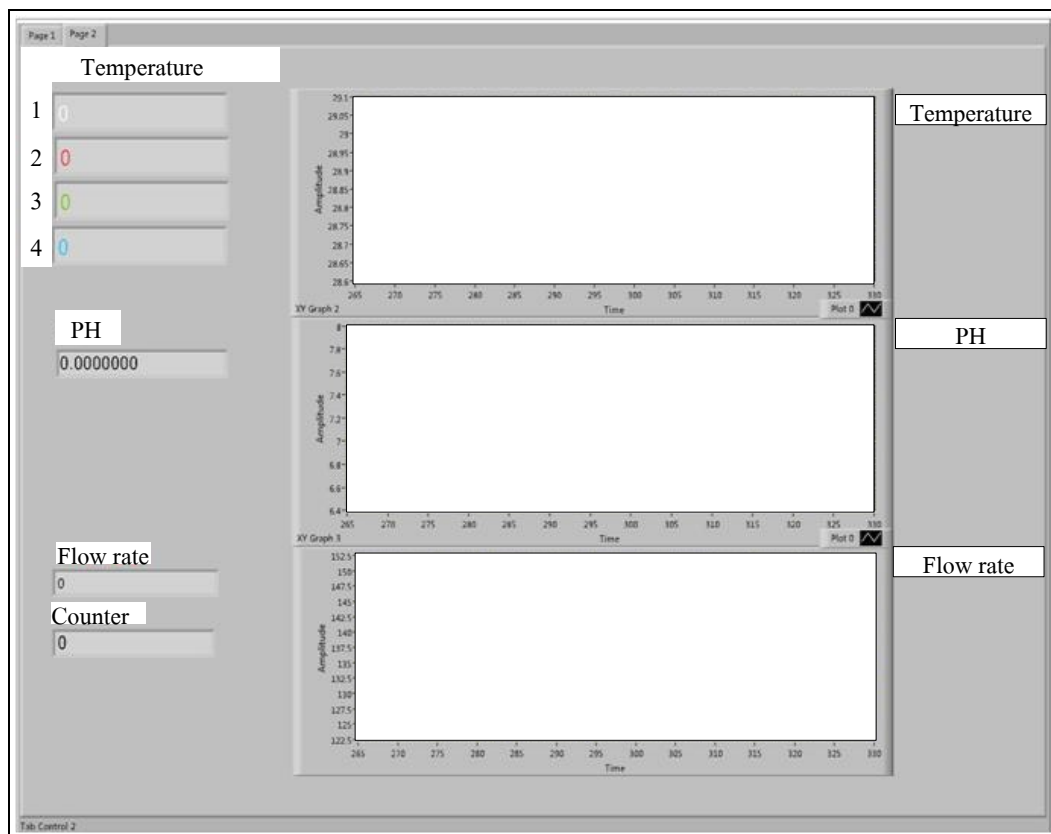
ข.1 การเก็บข้อมูลโดยใช้โปรแกรม Labview

1. โปรแกรมแสดงผล 1



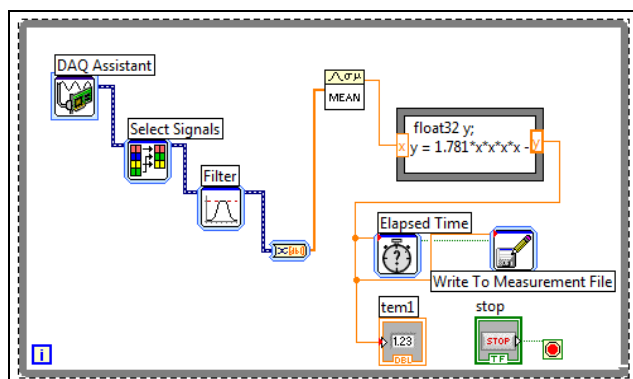
รูปที่ ข.1 หน้าโปรแกรมแสดงผล 1

2. โปรแกรมแสดงผล 2



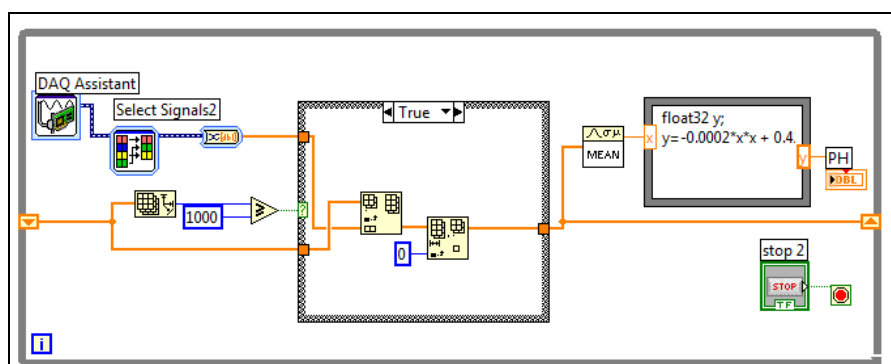
รูปที่ ข.2 หน้าโปรแกรมแสดงผล 2

3. โปรแกรมการวัดอุณหภูมิ



รูปที่ ข.3 โปรแกรมการวัดอุณหภูมิ

4. โปรแกรมการวัด PH



รูปที่ ข.4 โปรแกรมการวัด PH

ภาคผนวก ก

การใช้งานโปรแกรม MATLAB ส่วนของ Toolbox GA

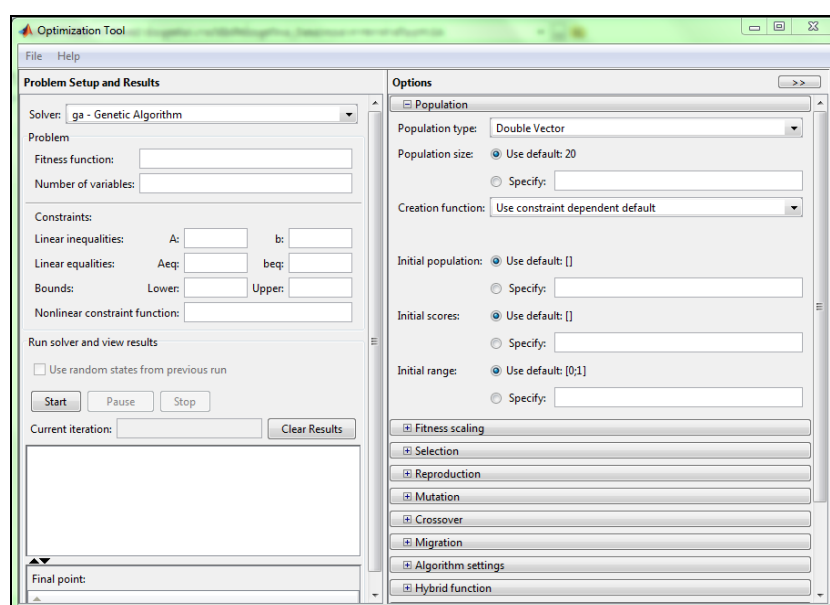
ก.1 การใช้โปรแกรม Genetic Algorithm ของ MATLAB

1. นำข้อมูลจากการทดลองไว้ใน Work Space ของโปรแกรม MATLAB แต่ในการแสดงตัวอย่างการใช้งานจะสร้างแบบจำลองของระบบโดยใช้ M-file ในภาคผนวก ก. โดยกำหนดตัวแปรและค่าของตัวแปรของระบบลงไปโดยข้อมูลที่ได้จากการทำงานของโปรแกรมเทียบกับข้อมูลจากการทดลอง โปรแกรมนี้เป็นการจำลองกระบวนการผลิตการชีวภาพแบบไร้ออกซิเจนของตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง ซึ่งกำหนดค่าอินพุตเป็น อุณหภูมิ PH แสดงดังรูปที่ 5.2 และ 5.3 และมีค่าเอาต์พุตคือค่าปริมาณก๊าซชีวภาพแสดงดังรูป 5.1 และได้ใส่ปริมาณสารอินทรีย์เริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 73.5 g/l

2. สร้างแบบจำลองวัตถุประสงค์ ใน M-file ของ MATLAB ในที่นี้คือฟังก์ชัน Model_monod ในภาคผนวก ค ซึ่งฟังก์ชันวัตถุประสงค์นี้มีค่าสัมประสิทธิ์ที่ต้องการหาค่า ทั้งหมด 14 ค่าคือ $X_1, X_2, X_3, \dots, X_{14}$

3. จากนั้นเรียกใช้ Genetic Algorithm tool หรือ GAT เป็น GUI (Graphic User Interface) ที่ช่วยให้สามารถใช้ GA ได้โดยไม่ต้องใช้คำสั่งจากตัวพร้อมรับคำสั่ง (Command Line) ในการเปิดใช้งาน GAT ทำได้โดยการเรียกคำสั่งในหน้าต่าง Command Window คำสั่งนี้จะปรากฏหน้าต่าง GA ดังรูปที่ ก.1 องค์ประกอบต่าง ๆ ของ GAT แสดงถึงสัมประสิทธิ์ของ GA

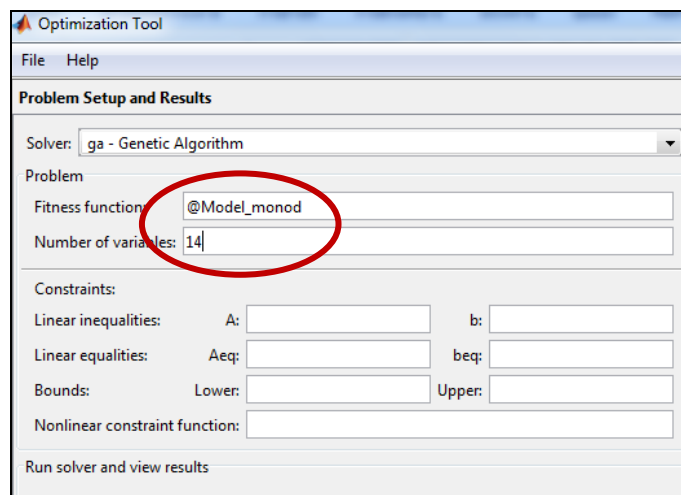
```
>>gatool
```



รูปที่ ก.1 แผนภาพแสดงหน้าต่างของ GAT

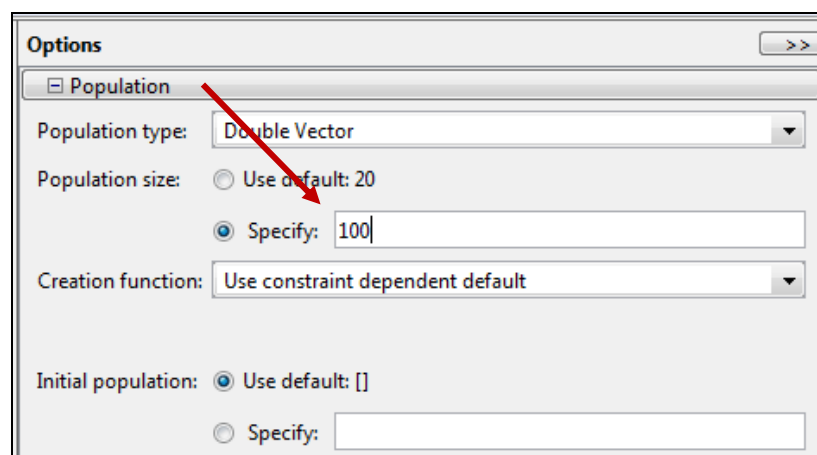
5. การใส่ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Fitness Function)

พิมพ์คำสั่ง @ Model_monod ในช่อง Fitness Function และจำนวนค่าตัวแปรใน Number of variables แสดงดังรูปที่ ค.2



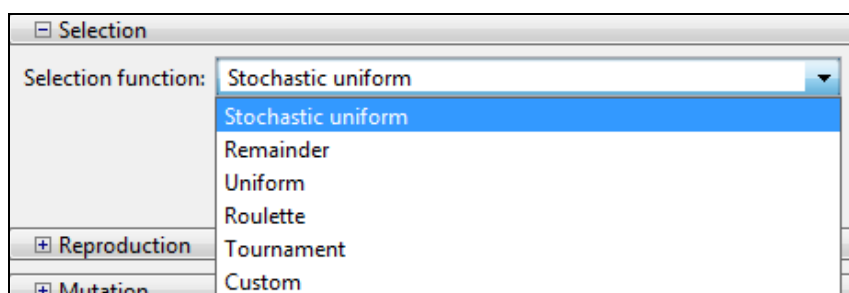
รูปที่ ค.2 แผนภาพแสดงการใส่ฟังก์ชันวัตถุประสงค์และจำนวนสัมประสิทธิ์

6. การใส่จำนวนประชากร (Population Size) โดยไปที่ **Option => Population** โปรแกรมจะกำหนดค่าพื้นฐานจำนวนการสุ่มหาให้เท่ากับ 20 ถ้าต้องการปรับทำได้โดยเลือก **Population Size => Specify** แล้วระบุจำนวน แสดงดังรูป ค.3



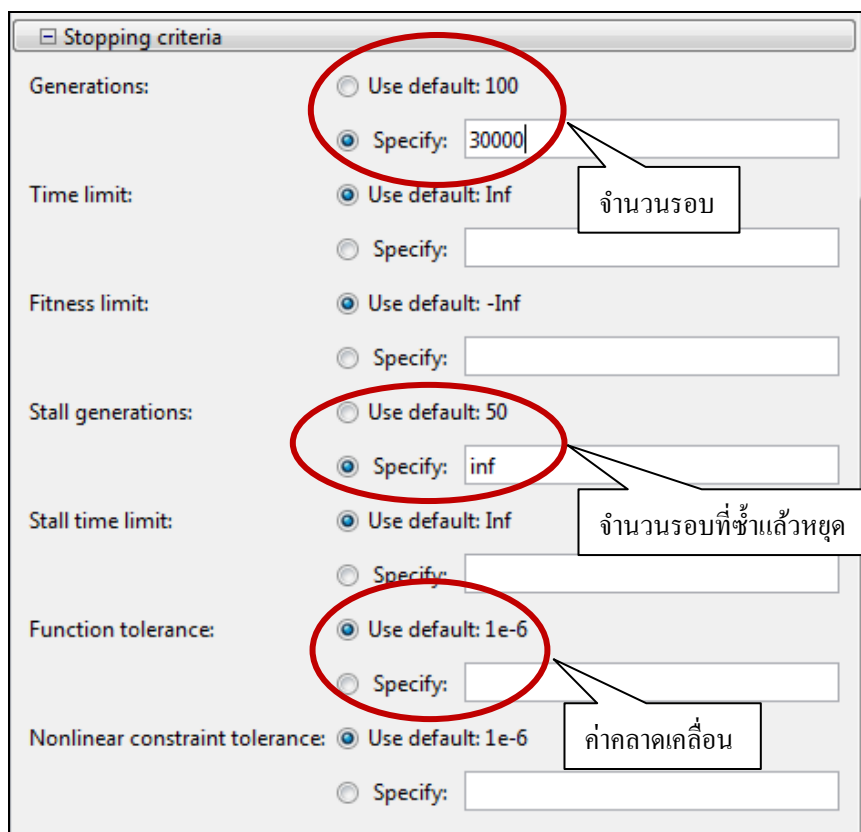
รูปที่ ค.3 แผนภาพแสดงการใส่ค่า Population Size

7. การกำหนดวิธีการคัดเลือกสายพันธุ์ (Selection) โดยไปที่ **Option => Selection** มีวิธีการเลือกประชากรลูกหลานมีหลายวิธีเช่นวิธีเป็นรูปแบบ (Uniform), วิธีจัดการแข่งขัน (Tournament), วิธีของวงล้อรูเล็ต (Roulette) และ วิธีการสุ่มเฟ้นครอบจักรวาล (Stochastic universal) แสดงดังรูปที่ ค.4



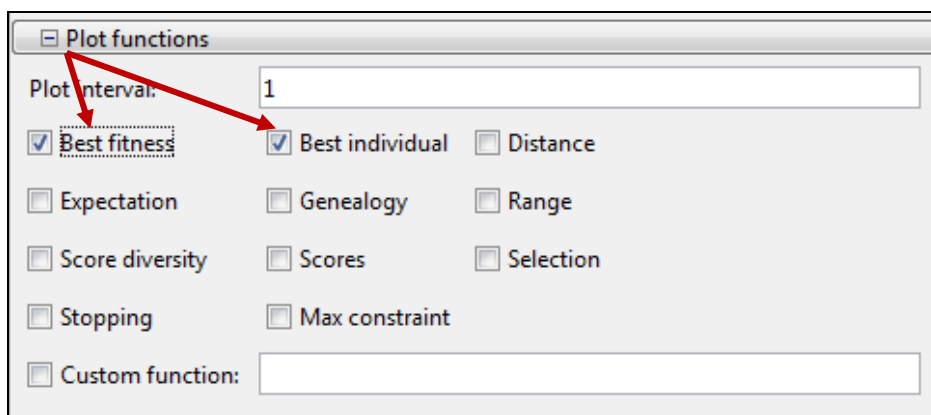
รูปที่ ค.4 แผนภาพแสดงการเลือก Selection

8. การกำหนดจำนวนรอบของการค้นหาและกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนทำได้โดยไปที่ **Option => Stopping criteria => Generations** เพื่อกำหนดจำนวนรอบ, กำหนดช่วงเวลาในการรัน โดย **Option => Stopping criteria => Time limit**, กำหนดจำนวนรอบที่มีคำตอบเท่าเดิมแล้วหยุดทำงานโดย **Option => Stopping criteria => Stall Generations**, กำหนดค่าความคลาดเคลื่อนของคำตอบโดย **Option => Stopping criteria => Function tolerance** แสดงดังรูปที่ ค.5



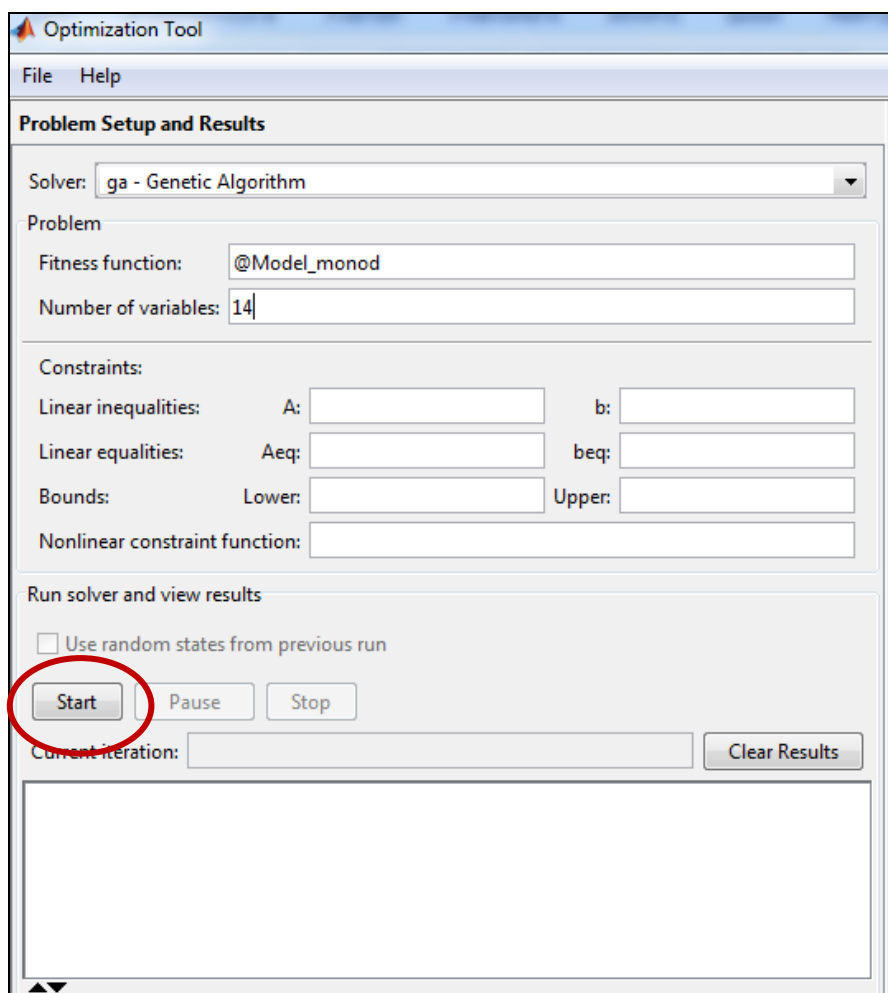
รูปที่ ค.5 แผนภาพแสดงการเลือกจำนวนรอบและค่าคลาดเคลื่อนของการทำงานของ GA

9. การแสดงกราฟ โดยเลือก **Option** => **Plot Function** => **Best fitness** และ **Best individual** แสดงดังรูปที่ ค.6

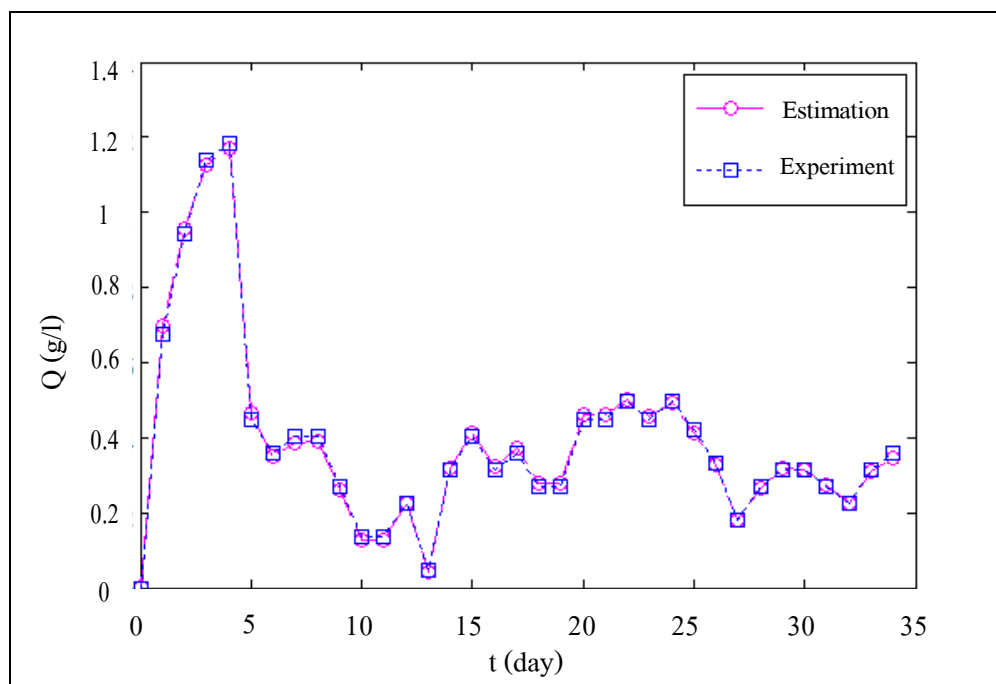


รูปที่ ค.6 แผนภาพแสดงการเลือกแสดงกราฟของการทำงานของ GA

10. Click Start เพื่อทำการเริ่มโปรแกรม ดังรูปที่ ค.7 โดยได้แผนภาพแสดงการตอบสนองจากการประมาณค่าสัมประสิทธิ์เทียบกับข้อมูลเอาต์พุตดังรูปที่ ค.8

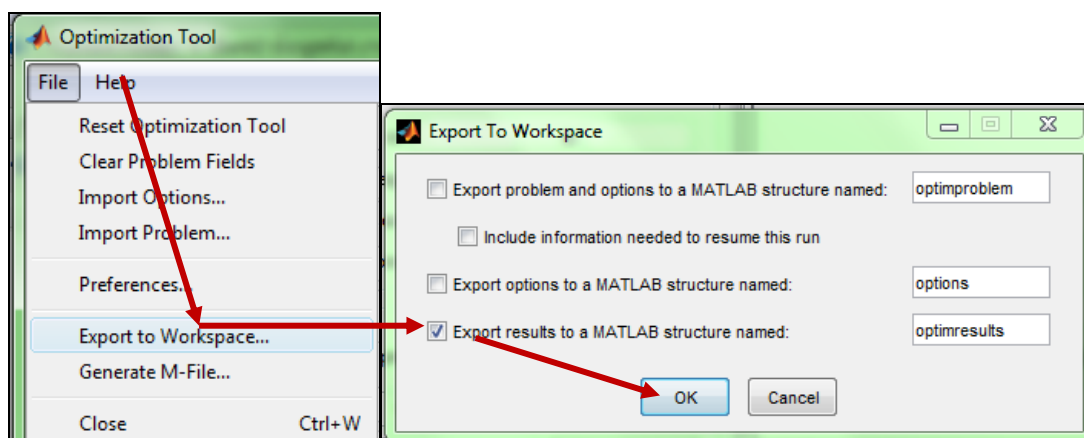


รูปที่ ค.7 แผนภาพแสดงการเริ่มโปรแกรม

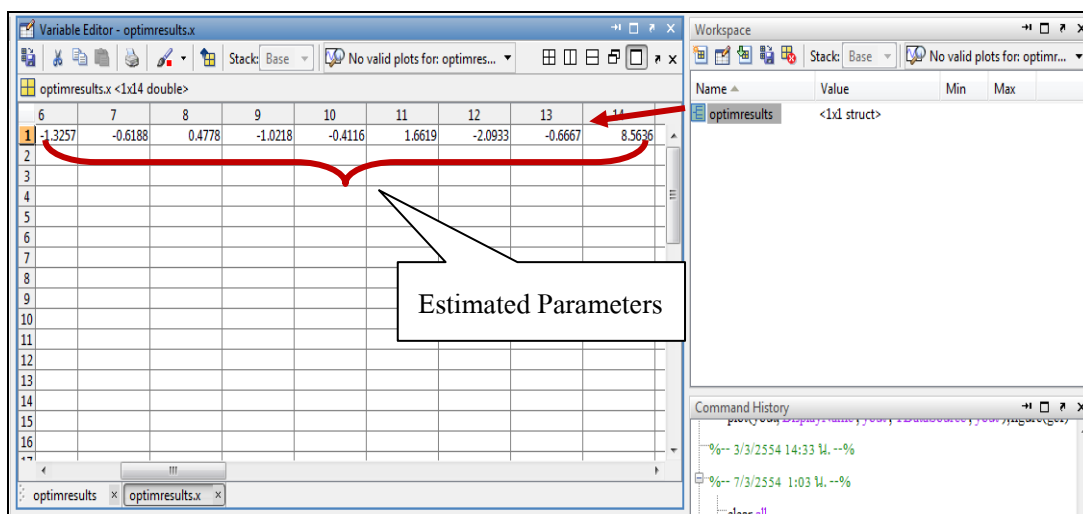


รูปที่ ค.8 แผนภาพแสดงการตอบสนองจากการประมาณค่าตัวแปรเทียบกับข้อมูลเอาต์พุต

11. การเก็บค่าตัวแปร โดยไปที่ File => Export to Workspace จะปรากฏหน้าต่าง แสดงดัง
รูป ค.10 และ ค.11



รูปที่ ค.9 แผนภาพแสดงการเก็บค่าสัมประสิทธิ์



รูปที่ ค.10 แผนภาพแสดงค่าสัมประสิทธิ์

ค.2 สรุป

ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการประมาณค่านั้นสามารถตอบสนองได้ดี ในการเปรียบเทียบกับเอาต์พุตที่ได้จากการทดลอง ซึ่งพบว่าวิธี GA นี้สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ได้

ภาคผนวก ง

โปรแกรมที่ใช้ในการทดสอบของ GA

ง.1 โปรแกรมที่ใช้ในการทดสอบของ GA

```
function f=Model_monod (x)

clc

load PH

load T

load Q

y(1)=x(1);
s(1)=73.5;
sum_error13=0;

for i=1:1:35

    u1(i)=(x(2)/(x(2)+Q(i)))-x(14);

    u2(i)=-1*x(3)*(pH(i))^2+14*x(4)*pH(i)-48*x(5);

    u4(i)=(x(6)*s(i)/(x(7)+s(i)))-x(6)*x(8);

    u3(i)=x(9)*2.4*10^11*exp(-16000/(1.98702411342312*(T(i)+273)))-x(10)*1.02*10^24*exp(-
34500/(1.98702411342312*(T(i)+273)))-x(11)*0.037;

    u(i)=u1(i)*u2(i)*u3(i)*u4(i);

    k1(i)=(u(i))*y(i);

    k2(i)=(u(i))*(y(i)+0.5*k1(i));

    y(i+1)=y(i)+k2(i);

    K1(i)=-x(12)*u(i)*y(i);

    K2(i)=-x(12)*u(i)*y(i)+0.5*K1(i);

    s(i+1)=s(i)+K2(i);

    Qes(i)=x(13)*u(i)*y(i);

    Qes13(i)=x(13)*u(i)*y(i);

    sum_error13=sum_error13+(Q(i)-Qes13(i))^2;

end

f=sum_error13

return
```

* _____ *

```

function f=Model_contois (x)

N=35;

load PH

load T

load Q

y(1)=x1(1);
s(1)=73.5;

sum_error=0;

k1(1)=0;
k2(1)=0;
K1(1)=0;
K2(1)=0;

for i=1:1:35

    u1(i)=(x1(2)/(x1(2)+Q(i)))-x1(14);

    u2(i)=-1*x1(3)*(pH(i))^2+14*x1(4)*pH(i)-48*x1(5);

    u4(i)=(x1(6)*s(i)/(x1(7)+s(i)))-x1(6)*x1(8);

    u3(i)=x1(9)*2.4*10^11*exp(-16000/(1.98702411342312*(T(i)+273)))-
x1(10)*1.02*10^24*exp(-34500/(1.98702411342312*(T(i)+273)))-x1(11)*0.037;

    u(i)=u1(i)*u2(i)*u3(i)*u4(i);

    k1(i)=(u(i))*y(i);

    k2(i)=(u(i))*(y(i)+0.5*k1(i));

    y(i+1)=y(i)+k2(i);

    K1(i)=-x1(12)*u(i)*y(i);

    K2(i)=-x1(12)*u(i)*y(i)+0.5*K1(i);

    s(i+1)=s(i)+K2(i);

    Qes(i)=x1(13)*u(i)*y(i);

    sum_error=sum_error+(Q1(i)-Qes(i))^2;

end

f=sum_error

return

```

```

function f=function_Haldane(x)

load PH
load T
load Q

y(1)=x(1);
s(1)=73.5;
sum_error=0;
Qes(1)=0;
for i=1:1:35

    u(i)=(x(2)/(x(2)+Q(i)))-x(4);

    u(i)=x(2)*(pH(i))^2+x(3)*pH(i)-x(4);

    u(i)=(x(2)*s(i)/(x(3)+s(i)+s(i)^2/x(4))-x(5));

    u(i)=x(2)*exp(-x(5)/((T(i)+273)))-x(3)*exp(-x(6)/(T(i)+273))-x(4);

    u(i)=u1(i)*u2(i)*u3(i)*u4(i);

    k1(i)=(u(i))*y(i);

    k2(i)=(u(i))*(y(i)+0.5*k1(i));

    y(i+1)=y(i)+k2(i);

    K1(i)=-x(6)*u(i)*y(i);

    K2(i)=-x(6)*u(i)*y(i)+0.5*K1(i);

    s(i+1)=s(i)+K2(i);

    Qes(i)=x(7)*u(i)*y(i);

    sum_error=sum_error+(Q(i)-Qes(i))^2;

end

f=sum_error;

return

```

* _____ *

ภาคผนวก จ

โปรแกรมที่ใช้ในการทดสอบของ ATS

จ.1 โปรแกรมที่ใช้ในการทดสอบของ ATS

%Obj

function f = obj(x1,x2,x3,x4,x5,x6,x7,x8,x9,x10,x11,x12)

load PH

load T

load Q

y(1)=x1;

s(1)=73.5;

sum_error=0;

for i=1:1:35

u1(i)=(x12/(x12)+Q(i));

u2(i)=x5*(pH(i))^2+14*x6*pH(i)+48*x7;

u4(i)=(x4*s(i)/(x11+s(i)));

u3(i)=x8*2.4*10¹¹*exp(-16000/(1.98702411342312*(T(i)+273)))+x9*1.02*10²⁴*exp(-34500/(1.98702411342312*(T(i)+273)))+x10*0.037;

u(i)=u1(i)*u2(i)*u3(i)*u4(i);

y(i+1)=y(i)+(u(i))*y(i);

s(i+1)=s(i)-(x2*u(i))*y(i);

Qes(i)=x3*u(i)*y(i);

sum_error=sum_error+(Q(i)-Qes(i))^2;

end

f=sum_error

return

* _____ *

```

%Obj
function f = obj(x1,x2,x3,x4,x5,x6,x7,x8,x9,x10,x11,x12,x13,x14)
load PH
load T
load Q
y(1)=x1;
s(1)=73.5;
sum_error=0;
for i=1:1:35
    u1(i)=(x14/(x14+Q(i)))+x5;
    u2(i)=x7*(pH(i))^2+14*x8*pH(i)+48*x9;
    u4(i)=(x6*s(i)/(x13+s(i))+x2);
    u3(i)=x10*2.4*10^11*exp(-16000/(1.98702411342312*(T(i)+273)))+x11*1.02*10^24*exp(-
34500/(1.98702411342312*(T(i)+273)))+x12*0.037;
    u(i)=u1(i)*u2(i)*u3(i)*u4(i);
    y(i+1)=y(i)+(u(i))*y(i);
    s(i+1)=s(i)-(x3*u(i))*y(i);
    Qes(i)=x4*u(i)*y(i);
    sum_error=sum_error+(Q(i)-Qes(i))^2;
end
f=sum_error;
return

```

* _____ *

ได้ใส่โปรแกรมเข้าไปในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของโปรแกรมการค้นหาลักษณะตามชนิด
 ปรับตัวได้ ซึ่งโปรแกรมการค้นหาลักษณะตามชนิดปรับตัวได้นั้นถูกพัฒนาขึ้นโดยกลุ่มวิจัย สาขาวิชา
 วิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก จ

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

Srinakorn, P., Kheawnak, A., Chamniprasart, K., and Srisertpol, J. (2010). **Analysis of Biogas Production Process from Shrimp Culture Pond Sediment by Batch Method.** in Proceedings of the 11th Thai Society of Agricultural Engineering Conference on Innovation in Agricultural Engineering for Sufficiency Economy and Empowered Communities. 6 – 7 May. Nakhonpathom. Thailand.

Srisertpol, J., Srinakorn, P., Kheawnak, A., Chamniprasart, K., and Srikhew, A. (2010). **Estimation Dynamical Model of an Anaerobic Digestion of Shrimp Culture Pond Sediment in a Biogas Process using Genetic Algorithm.** The 9th WSEAS International Conference on SYSTEM SCIENCE and SIMULTION in ENGINEERING (ICOSSE'10). 4 – 6 October. Iwate. Japan.



การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยครั้งที่ 11 ประจำปี 2553
6 – 7 พฤษภาคม 2553 อาคารศูนย์มหาวิทยาลัย ม.เกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน



การวิเคราะห์กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งโดยวิธีแบบแบตช์ Analysis of Biogas Production Process from Shrimp Culture Pond Sediment by Batch Method

ประสิทธิ์ ศรีนคร¹ อรรถวิโรจน์ เขียวนาคร¹ กนต์ธร ชำนิประศาสน์² และ จิระพล ศรีเสริมผล³
Prasit Srinakorn¹ Adtavirod Kheawnak¹ Kontorn Chamniprasart² and Jiraphon Srisertpol³

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้ได้วิเคราะห์กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งโดยวิธีแบบแบตช์ ซึ่งเป็นระบบการย่อยแบบไร้ออกซิเจน วิธีแบบแบตช์จะเป็นการใส่ตะกอนเลนครั้งเดียวตลอดการทดลอง โดยได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) ในถังหมัก, อุณหภูมิของตะกอนเลนในถังหมัก (T1), อุณหภูมิของน้ำในถังหมัก (T2), อุณหภูมิของก๊าซชีวภาพในถังหมัก (T3), อุณหภูมิของอากาศภายนอกถังหมัก (T4) และอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ ทั้งนี้ได้วิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งและก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น จากการทดลองได้ก๊าซชีวภาพสะสมทั้งหมด 13,255 ลูกบาศก์เซนติเมตร สามารถผลิตก๊าซชีวภาพเฉลี่ยได้ 424.355 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวัน โดยมีก๊าซมีเทน (CH_4) 44.34%, ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) 4.91%, และก๊าซไนโตรเจน (N_2) 17.23% ผลที่ได้จากการศึกษาสามารถนำไปออกแบบระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งให้มีประสิทธิภาพในการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง

คำสำคัญ: กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ, กระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนและการวิเคราะห์ทางชีวเคมี

ABSTRACT

This research was to study the analysis of biogas production process from shrimp culture pond sediment by batch method. This reaction is anaerobic digestion processes. Batch method was achieved by adding shrimp sediments in a reactor at one time to start reactions until finished reactions. The experiment was to study pH in the reactor, the temperature of sediment (T1) in the reactor, the temperature of the water (T2) in the reactor, the temperature of the biogas (T3) in the reactor, the temperature of the air (T4) outside the reactor and birth biogas rate. Study the analysis physical and chemical characteristics of sediments, biogas production yield and to analyze components of biogas were produced from shrimp culture pond sediment. From the experiment total biogas yield of 13,255 cm^3 and the ability of biogas production was 424.355 cm^3/day with methane (CH_4) producing was 44.34%, carbon dioxide (CO_2) was 4.91%, and nitrogen gas (N_2) was 17.23%. At get from the education can induce design biogas from shrimp culture pond sediment system has the efficiency, in the lead goes to apply true work.

Keywords: Biogas production process, Anaerobic Digestion and Biochemistry analysis

บทนำ

ตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง เป็นของเสียที่เกิดขึ้นจากการเลี้ยงกุ้งทะเล ประกอบด้วยซากแพลงก์ตอนพืช, ซากแพลงก์ตอนสัตว์, สิ่งขับถ่ายจากตัวกุ้ง (มูลกุ้ง), ตะกอนน้ำ, ตะกอนดิน, ปูนขาวหรือสารแขวนลอยอื่นๆ ทั้งหมดรวมกันแล้วเป็นของเสียที่อยู่ภายในบ่อเลี้ยงกุ้ง ซึ่งจะก่อรวมกันอยู่

ตรงกลางบริเวณพื้นบ่อ มีลักษณะเป็นโคลนเหลวและเหนียว สีดำเข้มมีกลิ่นเหม็นเล็กน้อย ตะกอนเลนที่เกิดขึ้นจากการเลี้ยงกุ้งทะเลประมาณ 3,000-6,000 ลิตร/ไร่ (ที่ระยะเวลาของการเลี้ยงกุ้งทะเลประมาณ 3-4 เดือน) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับจำนวนของตัวกุ้งที่ปล่อยลงไปเลี้ยงในบ่อและปริมาณของการให้อาหารในแต่ละครั้งด้วย (สำนักงานนโยบายและแผน

¹Graduate student, School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand, 30000

²Associate professor, School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand, 30000

³Assistant professor, School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand, 30000

สิ่งแวดล้อม, 2540) รายงานว่าการเลี้ยงกุ้งทะเลเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดมลพิษทางสภาพแวดล้อมชายฝั่ง โดยผ่านทางน้ำและตะกอนเลนที่ปล่อยทิ้งออกมาจากบ่อ (ดุสิต และคณะ, 2537) กล่าวว่าเกษตรกรมักปล่อยตะกอนเลนออกจากบ่อระหว่างการเลี้ยงหรือดูดตะกอนเลนออกจากบ่อเมื่อต้องการจะเตรียมบ่อใหม่ ตะกอนเลนดังกล่าวเป็นของเสียที่เกิดจากการเลี้ยงกุ้งและส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำโดยตรง จึงเป็นสาเหตุทำให้ระบบนิเวศป่าชายเลนเกิดมลภาวะและดินขึ้น

ก๊าซชีวภาพ (Biogas) คือก๊าซที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักและย่อยสลายของสารอินทรีย์โดยเชื้อจุลินทรีย์ (สิ่งมีชีวิตขนาดเล็กมาก) เชื้อจุลินทรีย์นี้สามารถมีชีวิตอยู่ได้โดยไม่ต้องอาศัยออกซิเจน สารอินทรีย์ทุกชนิดที่นำไปย่อยได้สามารถนำมาหมักเพื่อผลิตเป็นก๊าซชีวภาพได้ทั้งสิ้น จากการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพ (จิรวรรณ, 2546) ศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพและการกำจัดสารอินทรีย์ของวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมผลไม้บรรจุกระป๋อง มีสัดส่วนของก๊าซมีเทนเฉลี่ย 51.4% (สนั่น, 2538) ศึกษาการบำบัดของเสียและผลิตพลังงานจากมูลสุกร มีก๊าซมีเทนอยู่ 72% (สุรพล, 2526) ศึกษาวิเคราะห์ก๊าซชีวภาพจากการหมักมูลวัว มีก๊าซมีเทนอยู่ 60.3% และมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ 36.1% (อาริยา, 2546) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหาร มีองค์ประกอบของก๊าซมีเทน 61.26% เนื่องจากปัจจุบันนี้ก๊าซชีวภาพสามารถนำมาใช้ทดแทนหรือทดแทนการใช้เชื้อเพลิงต่างๆ ได้เป็นอย่างดี เช่น ทดแทนก๊าซหุงต้ม (LPG) ในครัวเรือน, ใช้กับเครื่องย่นกังนเกษตรหรืองานฟาร์มและผลิตกระแสไฟฟ้าใช้ในฟาร์ม ดังนั้นบทความนี้ได้นำเสนอผลของการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี พร้อมทั้งศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง

อุปกรณ์และวิธีการ

ตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง

ตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งที่ใช้ศึกษาครั้งนี้ เป็นตะกอนเลนจากฟาร์มเลี้ยงกุ้งทะเลของเกษตรกรบ้านฉางหลวง อำเภอสิเกา จังหวัดตรัง ซึ่งเป็นตะกอนเลนสดดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งที่ใช้ศึกษา

ระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

การผลิตก๊าซชีวภาพใช้ระบบการบำบัดหรือย่อยสลัดจ์ (Sludge) แบบไร้ออกซิเจนรูปแบบการย่อยอัตรามาตรฐาน (Standard-Rate Digestion) รูปแบบนี้จะเกิดการย่อยด้วยจุลินทรีย์ในสลัดจ์ทำให้เกิดก๊าซมีเทน ชุดถังหมักก๊าซชีวภาพใช้ถังพลาสติกขนาด 120 ลิตร ใส่ตะกอนเลนลงไป 80 ลิตรโดยใช้ครั้งเดียวตลอดการทดลอง (Batch) ภายในถังหมักจะติดตั้งตัวตรวจวัดพีเอช (pH) เพื่อวัดค่าความเป็นกรดเป็นด่าง ติดตั้งเทอร์มิสเตอร์ (Thermistor) เพื่อวัดอุณหภูมิของตะกอนเลน, อุณหภูมิของน้ำที่เกิดจากการย่อยสลัดจ์, อุณหภูมิของก๊าซชีวภาพและอุณหภูมิภายนอกถังหมัก ชุดการทดลองดังแสดงในรูปที่ 2

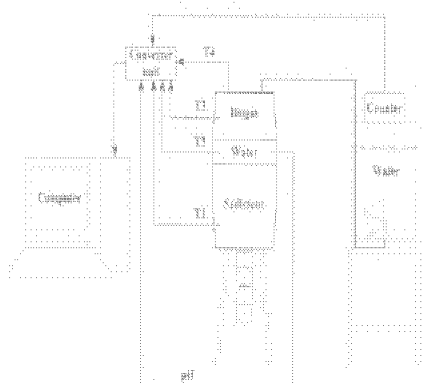
ระบบตรวจวัดการเกิดก๊าซชีวภาพ

ชุดตรวจวัดปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ เป็นเครื่องมือที่สร้างขึ้นโดยใช้หลักการแทนที่ของน้ำ และใช้ชุดเคาท์เตอร์ (Counter) นับจำนวนรอบ เป็นตัวตรวจวัดปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ โดยทำการเซตจำนวนรอบไว้ที่ 1 รอบเท่ากับก๊าซชีวภาพ 15 ลูกบาศก์เซนติเมตร

ระบบบันทึกข้อมูล

การบันทึกข้อมูลด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ ใช้โปรแกรม Lab View ในการวัดค่าและบันทึกข้อมูลของค่าความเป็นกรดเป็นด่าง, อุณหภูมิของ (ตะกอนเลน, น้ำ, ก๊าซชีวภาพและของอากาศภายนอกถังหมัก) และชุดตรวจวัดปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ โดยกำหนดให้บันทึกข้อมูลทุก ๆ 5 นาที ตลอดการทดลอง 1 เดือน

ชุดการทดลอง



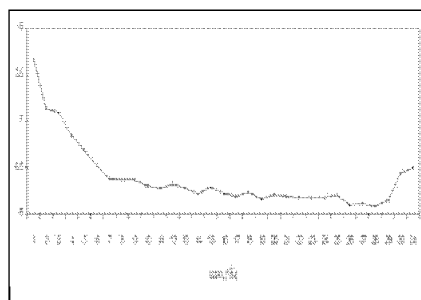
รูปที่ 2 ชุดการทดลอง

การเซตระบบของชุดการทดลองจะให้คอมพิวเตอร์บันทึกข้อมูลของค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) ของน้ำที่เกิดจากการย่อยสลาย, อุณหภูมิของตะกอนเลนในถังหมัก (T1), อุณหภูมิของน้ำในถังหมัก (T2), อุณหภูมิของก๊าซชีวภาพในถังหมัก (T3), อุณหภูมิของอากาศภายนอกถังหมัก (T4) และปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพจาก Counter นับรอบ เมื่อเริ่มเดินระบบของชุดการทดลอง ค่าเริ่มต้นของ pH, T1, T2, T3, T4 และ Counter มีค่าเท่ากับ 7.76, 24.57°C, 23.43°C, 23.86°C, 22.56°C และ 0 รอบ ตามลำดับ

ผลการทดลองและวิจารณ์

ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง

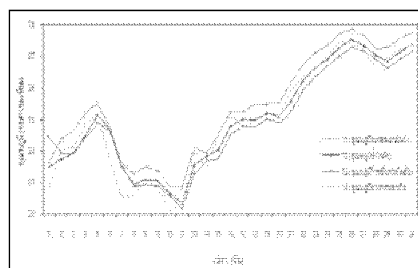
จากการทดลองค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) เริ่มต้นหมักก๊าซชีวภาพมีค่าเท่ากับ 7.76 ในช่วงวันที่ 1-7 ของการทดลองค่า pH ลดลงทุกวันและลดลงเร็วมาก โดยในวันที่ 7 มีค่า pH เท่ากับ 6.38 แสดงว่าแบคทีเรียเกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ ในช่วงวันที่ 8-28 ของการทดลองค่า pH ลดลงเล็กน้อยสลับเพิ่มขึ้นบ้างบางวัน โดยในวันที่ 28 มีค่า pH เท่ากับ 6.08 และช่วงวันที่ 29-31 ของการทดลองค่า pH เริ่มเพิ่มขึ้น แสดงว่าสารอาหารในตะกอนเลนลดน้อยลง มีผลให้แบคทีเรียลดการย่อยสลาย โดยในวันที่ 31 ค่า pH เพิ่มขึ้นเป็น 6.49 และตลอดการทดลอง 1 เดือน ค่า pH เฉลี่ย 6.49 ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH)

อุณหภูมิ

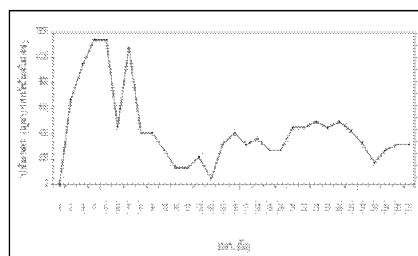
จากข้อมูลสรุปได้ว่าอุณหภูมิภายนอกถังหมัก มีการเปลี่ยนแปลงตามสภาพภูมิอากาศของแต่ละวัน โดยมีอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 27.34 °C และอุณหภูมิเฉลี่ยภายในถังหมักของตะกอนเลน, น้ำและก๊าซชีวภาพมีค่า 27.15 °C, 27.38 °C และ 27.76 °C ตามลำดับ และตลอดการทดลอง 1 เดือน อุณหภูมิของสภาพภูมิอากาศของแต่ละวันสูงสุดและต่ำสุดอยู่ที่ 27.46 °C และ 22.10 °C ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4



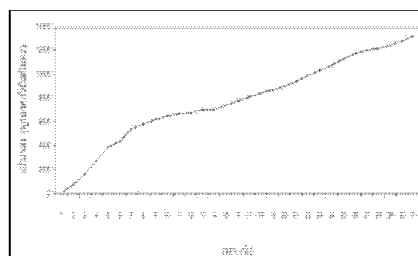
รูปที่ 4 อุณหภูมิ T1, T2, T3 และ T4

ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ

จากการทดลองพบว่าก๊าซชีวภาพที่ผลิตจากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกึ่งเกิดขึ้นเร็วมาก เมื่อเริ่มการทดลองในวันถัดมามีก๊าซชีวภาพเกิดขึ้น 675 ลูกบาศก์เซนติเมตร และเพิ่มปริมาณการเกิดมากขึ้นเรื่อย ๆ และในวันที่ 4 และ 5 ของการทดลองก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นมากที่สุด มีปริมาตร 1,140 ลูกบาศก์เซนติเมตร จากนั้นปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพลดน้อยลงและหลังจากวันที่ 14 ของการทดลองเกิดก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นอีกครั้งหนึ่งมีปริมาตรสูงสุด 495 ลูกบาศก์เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 5 เมื่อครบ 1 เดือนของการทดลองได้ก๊าซชีวภาพสะสมทั้งหมด 13,255 ลูกบาศก์เซนติเมตร ระบบสามารถผลิตก๊าซชีวภาพเฉลี่ยได้ 424.355 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวัน ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 5 ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ



รูปที่ 6 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม

องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

ผลวิเคราะห์ของก๊าซชีวภาพแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ	ผลวิเคราะห์(%)
ก๊าซมีเทน (CH ₄)	44.34
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂)	4.91
ก๊าซไนโตรเจน (N ₂)	17.23
ก๊าซไฮโดรเจน (H ₂)	ไม่พบ
ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H ₂ S)	ไม่พบ

ที่มา: ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

(กุมภาพันธ์ 2553)

คุณสมบัติของตะกอนเลน

จากการทดลองพบว่าค่าสมบัติทางกายภาพและเคมี TS, TDS, TSS, TVS, TFS, BOD, COD และ K มีค่าลดลงเท่ากับ 123,881 mg/l, 14,800 mg/l, 106,450 mg/l, 20,203 mg/l, 128,681 mg/l, 2,010 mg/l, 6,643 mg/l และ 154 mg/l ตามลำดับ และมีค่า N, P, OC และ OM เพิ่มขึ้นเท่ากับ 700 mg/l, 130.71 mg/l, 4,600 mg/l และ 7,800 mg/l ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลวิเคราะห์คุณสมบัติของตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง ก่อน-หลัง ผลิตก๊าซชีวภาพ

ลำดับที่	คุณสมบัติของตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้ง	ก่อน	หลัง	หมายเหตุ
1	ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (mg/l) (Positive potential of Hydrogen ; pH)	7.7	7.5	ลดลง 0.2
2	ปริมาณของแข็งทั้งหมด (mg/l) (Total Solids ; TS)	139,859 (13.99%)	15,978 (1.60%)	ลดลง 123,881 (12.39%)
3	ปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (mg/l) (Total Dissolved Solids ; TDS)	24,500 (2.45%)	9,700 (0.97%)	ลดลง 14,800 (1.48%)
4	ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (mg/l) (Total Suspended Solids ; TSS)	112,200 (11.22%)	5,750 (0.58%)	ลดลง 106,450 (10.65%)
5	ปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมด (mg/l) (Total Volatile Solids ; TVS)	22,653 (2.27%)	2,450 (0.25%)	ลดลง 20,203 (2.02%)
6	ปริมาณของแข็งคงตัวทั้งหมด (mg/l) (Total Fixed Solids ; TFS)	139,603 (13.96%)	10,922 (1.09%)	ลดลง 128,681 (12.87%)
7	ค่าความต้องการออกซิเจนชีวเคมี (mg/l) (Biological Oxygen Demand ; BOD)	2,334 (0.23%)	324 (0.03%)	ลดลง 2,010 (0.20%)
8	ค่าความต้องการออกซิเจนเคมี (mg/l) (Chemical Oxygen Demand ; COD)	7,840 (0.78%)	1,197 (0.12%)	ลดลง 6,643 (0.66%)
9	ไนโตรเจน (mg/l) (Total Nitrogen ; N)	4,300 (0.43%)	5,000 (0.5%)	เพิ่มขึ้น 700 (0.07%)
10	ฟอสฟอรัส (mg/l) (Total Phosphorus ; P)	6.24 (0.0006%)	136.95 (0.01%)	เพิ่มขึ้น 130.71 (0.013%)
11	โปตัสเซียม (mg/l) (Total Potassium ; K)	816.5 (0.082%)	662.5 (0.07%)	ลดลง 154 (0.02%)
12	คาร์บอน (mg/l) (Organic Carbon ; OC)	42,700 (4.27%)	47,300 (4.73%)	เพิ่มขึ้น 4,600 (0.46%)
13	อินทรีย์วัตถุ (mg/l) (Organic Matter ; OM)	73,500 (7.35%)	81,300 (8.13%)	เพิ่มขึ้น 7,800 (0.78%)

ที่มา: ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (มกราคม, กุมภาพันธ์ 2553)

สรุป

จากการศึกษาวิเคราะห์กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งโดยวิธีแบบแบคทีเรียพบว่าตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งสามารถนำมาผลิตเป็นก๊าซชีวภาพได้ โดยมีค่าสมบัติทางกายภาพและเคมี (TS, TDS, TSS, TVS, TFS, BOD, COD และ OM) ของตะกอนเลนเป็นตัวบ่งชี้ถึงคุณค่าทางอาหารที่จุลินทรีย์สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้และย่อยสลายได้ก๊าซชีวภาพออกมา และเมื่อเปรียบเทียบค่าสมบัติทางกายภาพและเคมีของตะกอนเลนก่อนหมักก๊าซชีวภาพกับหลังหมักก๊าซชีวภาพ จะเห็นได้เห็นว่าส่วนมากมีค่าลดลง ยกเว้น N, P, OC และ OM มีค่าเพิ่มขึ้น แสดงว่าตะกอนเลนหลังหมักก๊าซชีวภาพแล้วมีผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมน้อยลง สังเกตได้จากค่า BOD และ COD ซึ่งเป็นค่าบ่งชี้ถึงความสกปรกของน้ำเสีย ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบมีประสิทธิภาพการบำบัด BOD และ COD เท่ากับ 86.12% และ 84.73% ตามลำดับ ดังนั้นตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งเป็นวัตถุดิบที่สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ เป็นแนวทางในการบำบัดผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมจากตะกอนเลนและได้พลังงานมาใช้ด้วย แต่ตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งมีลักษณะเป็นโคลนเหลวและเหนียว ผลจากการศึกษาวิเคราะห์ในครั้งนี้จะนำไปสู่การออกแบบระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งให้มีประสิทธิภาพในการนำไปประยุกต์ใช้งานจริงต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- จิรวรรณ ชาลีวรรณ (2546). ผลของระยะเวลาเก็บกักต่อการเกิดก๊าซชีวภาพในการหมักแบบไร้ออกซิเจนอัตราการผลิตสูงของวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมผลไม้บรรจุกระป๋อง. วิทยานิพนธ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. วิทยานิพนธ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- ดุสิต ตันวิไล, คณิด ไชยาคำ, ยงยุทธ ปรีดาลัมพะบุตรและเชาว์ ศรีวิชัย (2537). การตรวจและติดตามคุณภาพน้ำและดินจากฟาร์มเลี้ยงกุ้งกุลาดำ จังหวัดปัตตานี. รายงานสัมมนาวิชาการประจำปี 2537 กรมประมง
- สนั่น ตั้งสถิต (2538). การบำบัดของเสียและผลิตพลังงานจากมูลสุกรโดยกระบวนการแอนแอโรบิกแบบ 2 ขั้นตอน. วิทยานิพนธ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. วิทยานิพนธ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สุรพล สุวคนธ์ (2526). การปรับปรุงคุณภาพของก๊าซชีวภาพให้ออกซิเจน. วิทยานิพนธ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. วิทยานิพนธ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (2540). รายงานสถานการณ์คุณภาพสิ่งแวดล้อม.

อารียา วิจิตรกุล (2546). การผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหารโดยกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน. วิทยานิพนธ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. วิทยานิพนธ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Estimation Dynamical Model of an Anaerobic Digestion of Shrimp Culture Pond Sediment in a Biogas Process using Genetic Algorithm

JIRAPHON SRISERTPOL¹, PRASIT SRINAKORN¹, ADTAVIROD KHEAWNAK¹
KONTORN CHAMNIPRASART¹ AND ARTHIT SRIKAEW²

¹School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering

²School of Electrical Engineering, Institute of Engineering

Suranaree University of Technology

111 University Avenue, Muang District, Nakhon Ratchasima, 30000

THAILAND

jiraphon@sut.ac.th

Abstract: - Biogas is one type of renewable energy which is important to the energy and environmental planning of Thailand. The study and analysis of the dynamical model of the biogas process can be explained the variables that affect biogas process and optimization. The indirect advantage of biogas production process for shrimp culture sediment was waste treatment. This paper presents a method of system identification and applies an artificial intelligence to estimate the mathematical model of anaerobic digestion with shrimp pond sediments in the biogas process which is a batch reaction. The principles of mass balance equations were defined the mathematical models. The equations is one stage nonlinear caused by the reaction of organic substances that are decomposed into biogas. This mathematical model was compared to the experimental data, including temperature, pH, biogas flow rate and biochemical properties of shrimp culture sediment.

Key-Words: - Mass Balance Equation, Anaerobic Digestion, Biogas Process, System Identification and Artificial Intelligence.

1 Introduction

The biogas is obtained from digesting crumble organic substances of the living things which are both plants and animals. This process is an anaerobic digestion caused by various kinds of microorganisms. The biogas is mostly mixed with methane (CH₄) and carbon dioxide (CO₂). Biogas which is produced from fermentative procedures has different quantities, depend on the raw materials and the condition of the fermentative procedures. The Biogas has properties like fuel. It is the renewal energy that is used to replace firewood, charcoal, oil, liquid petroleum gas, etc. It is also able to apply to cooking gas directly as same as liquid petroleum gas. This is more convenience for usability than using firewood or charcoal without smoke and ash. The biogas can be applied to use in lamps or electric generators for light generation. It is also used to generate heat and applied to use with all kind of engine instead of oil. The biogas that is used for fuel energy must contain more than 50% of methane. The biochemical properties of shrimp culture pond sediment are waste of the sea shrimp farming and have high BOD and COD. Shrimp farming plays an important but controversial role in the economy development of many countries in South-East Asia because of the high economic returns and catastrophic environmental impact of production in

coastal areas [1-3]. Many mathematical models that are available in literatures were studied and situated model of anaerobic digestion in biogas production from wastes and feces [4-8]. The parameters estimation and the specification of the identity of mathematical models for anaerobic digestion were also studied [9-10]. The control system of production was designed [11-12]. This paper presents a method of system identification and applies an artificial intelligence to estimate the mathematical model of anaerobic digestion with shrimp pond sediments in the biogas process which is a batch reaction. The principles of mass balance equations were defined the mathematical models. The equations is one stage nonlinear caused by the reaction of organic substances that are decomposed into biogas. This mathematical model was compared to the experimental data, including temperature, pH, biogas flow rate and biochemical properties of shrimp culture sediment.

2 Dynamical Model of the Process

The anaerobic digestion could be modeled as the equation with one stage nonlinear reaction scheme. The reaction of digested organic substances became biogas by using mass balance equation is obtained as follows:

$$\frac{dX}{dt} = (\mu - D)X \quad (1)$$

$$\frac{dS}{dt} = -k_1\mu X + D(S_m - S) \quad (2)$$

$$Q = k_2\mu X \quad (3)$$

where X is concentration of the biomass in the reactor (g/l). S is substrate concentration (g/l). S_m is the substrate concentration in the fluent. μ is the specific growth rate (d^{-1}). Q is biogas flow rate (l/day) and k_1, k_2 are anaerobic digestion constants in the biogas process, $D=0$, $S_m=0$. Then, we will have new algebraic equations as

$$\frac{dX}{dt} = \mu X \quad (4)$$

$$\frac{dS}{dt} = -k_1\mu X \quad (5)$$

We can be seen from equations (3), (4) and (5) that the specific growth rate is key parameter for the description of biomass growth, substrate consumption and production formation. The specific growth rate of bacteria depends on the temperature, pH, biogas flow rate and concentration of organic substances then expressed by the multiplication of individual terms, each of them refer to one of the influencing factors:

$$\mu(t) = \mu(S)\mu(Q)\mu(T)\mu(pH) \quad (6)$$

Meanwhile, the specific growth rate of bacteria was related to concentration of organic substances which are studied [8-9] as the following 3 equations

$$\text{Monod model: } \mu(S) = \frac{\mu_{max} S}{k_s + S} \quad (7)$$

$$\text{Contois model: } \mu(S) = \frac{\mu_{max} S}{k_m X + S} \quad (8)$$

$$\text{Haldane model: } \mu(S) = \frac{\mu_{max} S}{k_s + S + S^2/k_i} \quad (9)$$

Where μ_{max} is maximum specific growth rate (d^{-1}) and k_s, k_m, k_i, k are constants. The influence of temperature is often modeled by an Arrhenius type law:

$$\mu(T) = a_1 \exp(-E_1/RT) - a_2 \exp(-E_2/RT) - a_3 \quad (10)$$

Where T is the temperature ($^{\circ}C$), E_1, E_2 are gas energy (J/g.mole), R is the gas constant (J/g) and a_1, a_2, a_3 are constants.

For biogas process, Rozzi proposes treating the influence of pH by a parabolic law:

$$\mu(pH) = apH^2 + bpH + c \quad (11)$$

where a, b, c are constants.

The relationship between the specific growth rate of bacteria and the temperature could be presented as

$$\mu(Q) = \frac{k_q}{k_q + Q} + k_3 \quad (12)$$

where k_q, k_3 are constant.

In these equations the only modeling assumption is that the biomass growth term (μX) and the substrate consumption term ($k_1\mu X$) are proportional to the biomass concentration (X). This paper is add k_1, k_2 in equation (7), (8), (9) and (12) for dynamic compensation of useful system identification.

3 Problem Solution

3.1 Experimental setup

Experimental setup is designs for data collection of anaerobic digestion with shrimp culture pond sediment in the batch process, as shown in Fig.1. Where 1- Computer is to create a program LabVIEW for the measurement and collected data of temperature, pH and biogas flow rate. 2 - A digester tank is 80 liter with shrimp culture pond sediment. 3 - Measuring system for biogas flow rate. The experimental data were occurred in analog signal and convert to digital signal via conversion unit with model NI- USB6008.

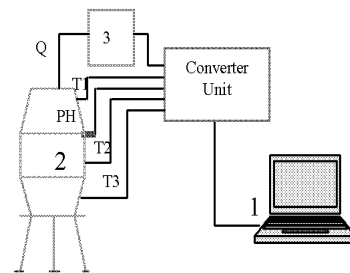


Fig.1 Experimental setup

3.2 Parameter Identification via Artificial Intelligence

The application of an appropriate identification methodology via artificial intelligence technique can be estimated the mathematical model of anaerobic

digestion with shrimp culture pond sediment in the biogas process, as shown Fig.2.

The investigation of the coefficients in the mathematical models (3), (4), (5), (7), (10), (11) and (12) is a very complex problem because of restricted information input temperature, pH, initial substrate concentration (s_0) and biogas flow rate ($Q(t)$) can be measured. Where $\tilde{Q}(t)$ is the biogas flow rate from the mathematical model of anaerobic digestion with shrimp culture pond sediment in the biogas process. $Q(t)$ was compared to the biogas flow rate result from the experiment setup. Their deviation value could be obtained with sum square error (e_{ss})

$$e_{ss} = \sum_{i=1}^N [Q(i) - \tilde{Q}(i)]^2 \quad (13)$$

The identical technique by Genetic Algorithm (GA) is the one method to seek answers by natural selection and GA. It will have the continually improve to find answers from one generation to the next generation like the evolution of living things [13-14]. The components of the GA cycle are populations, original species and new species. GA will have continually improved from narrow local solution to global solution. GA will finish when ending condition is consistent. Generally, the condition is amount of generations required or acceptable deviation value is required to accept the best chromosome in the group of populations.

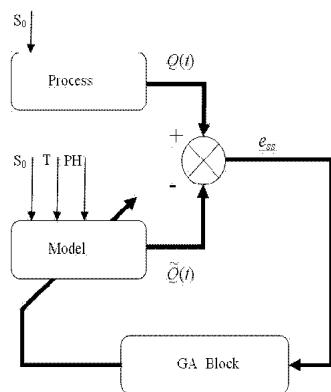


Fig.2 Identification method

3.3 Experimental and Identification Results

3.3.1 Experimental results

From the experiment setup, 80 liter shrimp culture pond sediment was put into a tank and fermented the

sediment by anaerobic digestion in batch reactor. The transient response of biogas flow rate in biogas process is shown in Fig.3. The collecting data of accumulative sum of biogas production in 30 days is 13,255 cm³ and average biogas production is 424.35 cm³/day. The reaction temperature varied with room temperature which is shown in Fig.4. and pH profile within 5.8-7.8 each day as shown in Fig.5.

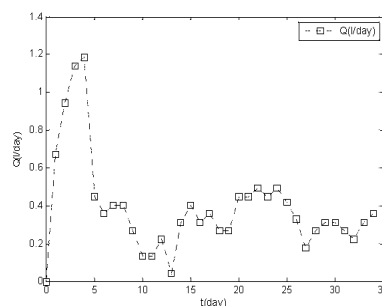


Fig.3 The transient response of biogas flow rate

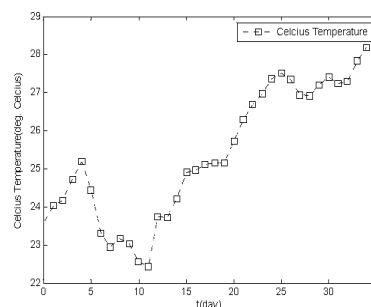


Fig.4 Temperature profile

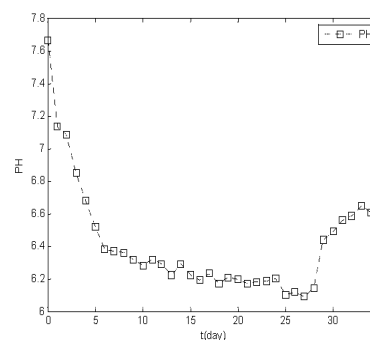


Fig.5 pH profile

There are three models that are available for finding variables in identity specification of anaerobic digestion with shrimp culture pond

sediment in the biogas process. The mathematical models depend on the change of bacteria which affected by organic substances and could find that Monod model has minimum error by initial substance concentration (organic matter) which 73.5 g/l. The biochemical properties of shrimp culture pond sediment and chemical compositions of biogas are shown in Table.1, 2.

Table 1
Biochemical Properties of Shrimp
Culture Pond Sediment

No	Biochemical properties	Before	After
1	pH	7.7	7.5
2	Total Solids ,mg/l	139,859	15,978
3	Total Dissolved Solids, mg/l	24,500	9,700
4	Total Suspended Solids, mg/l	112,200	5,750
5	Total Volatile Solids, mg/l	22,653	2,450
6	Total Fixed Solids, mg/l	139,603	10,922
7	Biological Oxygen Demand (BOD),mg/l	2,334	324
8	Chemical Oxygen Demand (COD),mg/l	7,840	1,197
9	Total Nitrogen, mg/l	4,300	5,000
10	Total Phosphorus, mg/l	6.24	136.95
11	Total Potassium, mg/l	816.5	662.5
12	Organic Carbon, g/l	42.7	47.3
13	Organic Matter, g/l	73.5	81.3

Table 2
Chemical Compositions of Biogas

Biogas compositions	Analyzer %
Methane ,CH ₄	44.34
Carbon dioxide, CO ₂	4.91
Nitrogen, N ₂	17.23
Hydrogen, H ₂	Non detected
Hydrogen sulfide, H ₂ S	Non detected

3.3.2 Identification results

The identical specification of the variable via equation (7) to estimate variables, we use specific growth rate of bacteria depend on the temperature, pH, biogas flow rate data, $E_1=16000$ J/g.mole, $E_2=34500$ J/g.mole and $R=1.987$ J/g [2].

The GA program is estimated variables with 100 population numbers and 100,000 GA cycles. The estimation-1 is model with dynamic compensation (k, k_3) and estimation -2 is model without dynamic compensation (k, k_3). The error of estimation-1 is 0.7239 and estimation-2 is 1.8596. The comparison between the responses of the mathematical model and the experimental data of biogas flow rate are shown in figure 6 and Table 3.

The identity specification of anaerobic digestion with shrimp culture pond sediment, the variables can be used to estimate mathematical models. The models should be tested with many cycles in order to gain the accurate variable. The variable that affect biogas flow rate should be controlled as well.

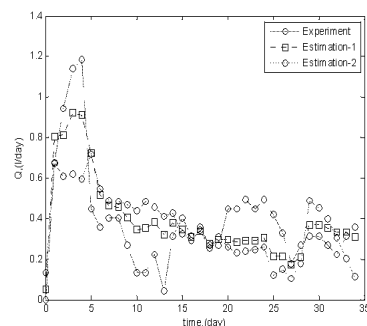


Fig. 6 The responses of biogas flow rate of experimental and estimation data

Table 3
Parameter Identification for Biogas Process

Parameters	Estimated Value-I	Estimated Value-II
k_1	0.119	2.714
k_2	3.614	0.477
μ_{max}	1.69	0.1
k_s	1.1087	20
k	-1.6654	--
a_1	2.4×10^{11}	1.92×10^{11}
a_2	-1.02×10^{23}	-8.16×10^{23}
a_3	-0.111	-0.0555
a	-5.601	-0.8257
b	76.108	11.347
c	-254.03	-38.4
k_q	9.99	1
k_3	17.084	--

4 Conclusion

The biochemical properties of shrimp culture pond sediment after biogas process were reducing BOD and COD which effected to soil pollution. This research presents the structure of the mathematical

model and parameter identification technique that is used to estimate dynamical model of anaerobic digestion with shrimp culture pond sediment in the biogas production process. The dynamical response of the mathematical model compared to the experimental data by Genetic Algorithm method. As the results of the study, the variable from identity specification can be used to estimate biogas flow rate and applied to design experimental equipments for batch reaction of biogas production from shrimp culture pond which is appropriate to requirement and usability.

Acknowledgement

The authors would like to thankfully acknowledge the research grant from Suranaree University of Technology (SUT).

References:

- [1] Pham Thi Anh., Carolien Kroeze., Simon R. Bush and Arthur P.j. Mol, "Water pollution by intensive brackish shrimp farming in south-east Vietnam: causes and options for control," *Agricultural Water Management*, Vol.97, No.6, 2010, pp. 872-882.
- [2] F.Paez-Osuna, "The environmental impact of shrimp aquaculture: a global perspective," *Environmental Pollution*, Vol.112, Issue.2, 2001, pp. 229-231.
- [3] Sutonya Thongrak, Tony Prato, Sommai Chiyvareesajja and William Kurtz, "Economic and water quality evaluation of intensive shrimp production systems in Thailand," *Agricultural Systems*, Vol.53, Issues 2-3, 1997, pp. 121-141.
- [4] Hill D. T, and Barth C. L, "A dynamic model for simulation of animal waste digestion," *Journal of the Water Pollution Control Federation*, Vol. 49, Issue 10, 1977, pp. 2129-2143.
- [5] Bastin G, and Dochain D, *On-line estimation and adaptive control of bioreactors*, Amsterdam, Elsevier, 1990, chapter 1.
- [6] Simeonov I, "Modelling and control of anaerobic digestion of organic waste," *Chemical and Biochemical Engineering*, Vol.8, No.2, 1994, pp. 45-52.
- [7] Simeonov I, Momchev V and Grancharov D, "Dynamic modeling of mesophilic digestion of animal waste," *Water Research*, Vol.30, No.5, 1996, pp. 1087-1094.
- [8] Husain A, "Mathematical models of the kinetics of anaerobic digestion - a selected review," *Biomass and Bioenergy*, Vol.14, No.5/6, 1998, pp. 561-571.
- [9] Simeonov I, "Mathematical modelling and parameters estimation of anaerobic fermentation processes," *Bioprocess Engineering*, Vol.21, No.4, 1999, pp. 377-381.
- [10] Noykova N, M,ller T, Gyllenberg M, and Timmer J, "Quantitative analyses of anaerobic waste water treatment processes: identifiability and parameter estimation," *Biotechnology and Bioengineering*, Vol.78, No.1, 2002, pp. 89-103.
- [11] Simeonov I, and Stoyanov S, "Modelling and Dynamic Compensator Control of the Anaerobic Digestion of Organic Wastes," *Chemical and Biochemical Engineering*, Vol.17, No.4, 2003, pp. 285-292.
- [12] Simeonov I, and Queinnec I., "Linearizing control of the anaerobic digestion with addition of acetate," *Control Engineering Practice*, Vol. 14, No.7, 2006, pp. 799-810.
- [13] Deacha Puangdownreong, "Identity coefficient of Fourier series with search technique an artificial intelligence," *KMUTT Research and Development Journal*. Vol.30 No.3, 2007, pp. 301-314.
- [14] Arthit Srikaew, *Computational Intelligence*, Bangkok, Suranaree University of Technology, 2009, chapter 3.

ประวัติผู้เขียน

นายอรรถวิโรจน์ เขียวนาค เกิดเมื่อวันที่ 3 ธันวาคม 2528 ที่อำเภอปักธงชัย จังหวัดนครราชสีมา เริ่มการศึกษาระดับประถมศึกษาปีที่ 1 - 6 ที่โรงเรียนบ้านเขาพญาปราบ และมัธยมศึกษาปีที่ 1 - 6 ที่โรงเรียนปักธงชัยประชานิรมิต สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2550 และได้ศึกษาคณะวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ขณะศึกษาได้เป็นผู้สอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล จำนวน 3 รายวิชา ได้แก่ (1) ปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล (2) วิชาเขียนแบบวิศวกรรม 1 และ (3) วิชาเขียนแบบวิศวกรรม 2 มีผลงานวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ 2 บทความ ดังที่ได้รวบรวมไว้ใน ภาคผนวก จ.