

**การบำบัดน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรแบบกระจายบนดิน โดยระบบน้ำไหลนอง**

**นางสาวอลิสรา      จิตรมณี**

**วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2544  
ISBN 974-533-018-3**

**LAND TREATMENT OF SWINE WASTEWATER  
USING OVERLAND FLOW SYSTEM**

**MISS ALISSARA CHITMANEE**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Environmental Engineering**

**Suranaree University of Technology**

**Academic Year 2001**

**ISBN 974-533-018-3**

## การบำบัดน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรแบบกระจายบนดิน โดยระบบน้ำไหลนอง

สภามหาวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จงจินต์ ผลประเสริฐ)

ประธานกรรมการ  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุวรรณ ถังมณี)

กรรมการ

.....  
(ดร.ธรรมรัตน์ กุตะเทพ)

กรรมการ

.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ทวิช จิตรสมบูรณ์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

.....  
(รองศาสตราจารย์ น.อ.ดร.วรพจน์ จำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

อลิสรา จิตรมณี : การบำบัดน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรแบบกระจายบนดิน โดยระบบน้ำไหลนอง

(Land Treatment of Swine Wastewater Using Overland Flow System)

อาจารย์ที่ปรึกษา : ผศ. ดร. จงจินต์ ผลประเสริฐ, 82 หน้า.

ISBN 974-533-018-3

ได้บำบัดน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรแบบกระจายบนดินโดยระบบน้ำไหลนอง เพื่อศึกษาหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์, ปริมาณและการเจริญเติบโตของหญ้างามที่เก็บเกี่ยวได้ การวิจัยใช้น้ำตัวอย่างจากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นจากบ่อฝังและน้ำผิวดินจากอ่างเก็บน้ำของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และปลูกหญ้างามเป็นพืชคลุมดิน โดยน้ำตัวอย่างที่เป็นน้ำเสียจะถูกระบายลงสู่แปลงที่มีความชัน 2%, 4%, 6% และ 8% และส่วนที่เป็นน้ำผิวดินจะถูกระบายลงสู่แปลงที่มีความชัน 2% ซึ่งแต่ละแปลงทดลอง ได้รับน้ำเสียด้วยอัตราการไหลที่แตกต่างกัน 4 ค่า ได้แก่ 0.017, 0.02, 0.025 และ 0.03  $m^3/m^2-d$  น้ำทิ้งฟาร์มสุกรมี ลักษณะสมบัติ ดังนี้ คือ COD = 683 mg/L, BOD = 317 mg/L, TSS = 325 mg/L, TP = 93 mg/L,  $NO_3^- - N = 0.7$  mg/L, TKN = 66 mg/L และโคลิฟอร์มแบคทีเรีย =  $2.3 \times 10^7$  cells/100 mL

ผลการทดลองแสดงประสิทธิภาพการบำบัดของน้ำทิ้งฟาร์มสุกร ด้วยอัตราการลดค่า COD = 42-49%, BOD = 37-49%, TSS = 36-42%, TP = 28-30%,  $NO_3^- - N = 14-18%$ , TKN = 37-45% และโคลิฟอร์มแบคทีเรีย = 52-54% สำหรับการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จากสมการ  $C/C_0 = A \cdot \exp(-kZ/q)$  ได้ ค่าคงที่ k อยู่ในช่วง 0.37-0.49 cm/h ค่าคงที่ A มีค่า 0.61 เมื่อศึกษาการเปรียบเทียบอัตราการเจริญเติบโตของหญ้างาม พบว่า การเจริญเติบโตของหญ้างามมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน คือ ในแปลงทดลองที่ใช้น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร ลักษณะหญ้างามขึ้นหนาแน่นเต็มแปลง ลักษณะลำต้นอวบมีสีเขียวเข้ม และมีผลผลิตน้ำหนักแห้งอยู่ในช่วง 20-87  $g/m^2-d$  ส่วนในแปลงทดลองที่ใช้น้ำผิวดินจากอ่างเก็บน้ำ มีปริมาณหญ้างามขึ้นเบาบาง ลักษณะลำต้นผอม มีสีเขียวปนเหลือง และมีผลผลิตน้ำหนักแห้งต่ำกว่า 10 เท่าหญ้างามที่ได้สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ เช่น การเลี้ยงปศุสัตว์ เป็นต้น

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ปีการศึกษา 2544

ลายมือชื่อนักศึกษา \_\_\_\_\_

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา \_\_\_\_\_

**ALISSARA CHITMANEE : LAND TREATMENT OF SWINE WASTEWATER USING  
OVERLAND FLOW SYSTEM**

**THESIS ADVISOR : ASSIST. PROF CHONGCHIN POLPRASERT, Ph.D.**

**82 PP. ISBN 974-533-018-3**

A pilot-scale overland-flow system was used to study the treatment of swine wastewater so as to determine the mathematical models to describe the organic degradation and the growth of grass, *Bracharia mutica*. In this study, pre-settled swine wastewater, in parallel with the reservoir water, were applied to the plots of land covered with the grass. Swine wastewater was drained to the land plots with the slopes of 2, 4, 6, and 8 percent. Being used as control, a land plot with the slope of 2 percent received the reservoir water. The surface loading rates of 0.017, 0.02, 0.025, and 0.03 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>-d were introduced to each land plot. The average concentrations of swine wastewater were: COD = 683 mg/L, BOD = 317 mg/L, Total Suspended Solids (TSS) = 325 mg/L, Total Phosphorus (TP) = 93 mg/L, nitrate nitrogen (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N) = 0.7 mg/L, Total Kjeldahl Nitrogen (TKN) = 66 mg/L, and coliform bacteria = 2.3×10<sup>7</sup> cells/100 mL.

In treating the swine wastewater, the removal efficiencies were found to be 42 – 49% for COD, 37 – 49% for BOD, 36 – 42% for TSS, 28 – 30% for TP, 14 – 18% for NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, 37 – 45% for TKN, and 52 – 54% for coliform bacteria. From the equation,  $C/C_0 = A \cdot \exp(-kZ/q^n)$ , the constants – k and A – were found to be in the range of 0.37 – 0.49 cm/h and 0.61, respectively. By comparing the growth rates, the grass grown by the addition of swine wastewater was dense with dark green in color, well-rounded trunk and the dry-weight productivity of 20 – 87 g/m<sup>2</sup>-d. Meanwhile, the grass grown by the addition of reservoir water was low in density with yellow green in color, thin trunk and the dry-weight productivity of 10 times lower. Such the harvested grass can be utilized as cattle feed, for example.

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
ปีการศึกษา 2544

ลายมือชื่อนักศึกษา \_\_\_\_\_  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา \_\_\_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่ได้ กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ช่วยเหลือ อย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการและด้านการดำเนินการวิจัยดังต่อไปนี้

- ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จงจินต์ ผลประเสริฐ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
- รองศาสตราจารย์ ดร.สุวรรณ ถังมณี กรรมการสอบวิทยานิพนธ์
- ดร.ธรรมรัตน์ กุตะเทพ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์
- ฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ใช้น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร
- เพื่อน ๆ ร่วมชั้นเรียนระดับปริญญาโทที่ให้กำลังใจและคำปรึกษาโดยตลอด
- ห้างหุ้นส่วนจำกัด จิตรมณีค้าวัสดุก่อสร้าง ที่ช่วยเหลือและสนับสนุนในการทำ

วิจัย

ท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การเลี้ยงดูอบรมและส่งเสริมการศึกษาเป็นอย่างดี ตลอดมาในอดีต จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ง
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฌ
สารบัญรูป	ฎ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ</b>	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
<b>2 ทัศนั้วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	3
2.1 การบำบัดน้ำเสียแบบกระจายบนดิน	3
2.2 กลไกการกำจัดระบบน้ำไหลนอง	6
2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดแบบกระจายบนดิน โดยระบบน้ำไหลนอง	9
2.4 การออกแบบระบบน้ำไหลนอง	14
2.5 การศึกษาแบบจำลองระบบน้ำไหลนองที่ผ่านมา	17
2.6 การบำบัดน้ำทิ้งฟาร์มสุกร โดยระบบน้ำไหลนอง	19
2.7 ปริมาณหญ้าขี้เฒ่าที่เก็บเกี่ยวได้	20
<b>3 วิธีดำเนินการวิจัย</b>	21
3.1 การศึกษาสารติดตาม	21
3.2 การวิเคราะห์คุณภาพน้ำตัวอย่าง	22
3.3 การสร้างแบบจำลอง	23
3.4 สถานที่ทำการวิจัย	23
3.5 น้ำตัวอย่าง	23

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.6 การดำเนินการวิจัย	25
3.7 การเก็บรวบรวมและบันทึกข้อมูล	27
3.8 การวิเคราะห์ข้อมูล	28
3.9 ตัวแปรที่ทำการวิจัย	28
<b>4 ผลการทดลองและการวิจารณ์ผล</b>	29
4.1 การศึกษาสารติดตาม	29
4.2 การวิเคราะห์คุณภาพน้ำตัวอย่าง	31
4.3 ประสิทธิภาพของระบบน้ำไหลนอง	32
4.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	42
4.5 อัตราการเจริญเติบโตของหญ้าขน	46
4.6 ปริมาณหญ้าขนที่เก็บเกี่ยวได้	48
4.7 การใช้ประโยชน์จากหญ้าขน	51
4.8 ตัวอย่างการออกแบบระบบน้ำไหลนอง	52
<b>5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ</b>	55
5.1 สรุปผลการวิจัย	55
5.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัยต่อไป	56
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ผลการศึกษาสารติดตาม	57
ภาคผนวก ข ผลการทดลองและประสิทธิภาพของระบบ	59
ภาคผนวก ค ผลการทดลองสถิติสมการถดถอยเชิงเส้น	75
เอกสารอ้างอิง	79
ประวัติผู้เขียน	82



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 อัตราที่เหมาะสมกับการบำบัดขั้นต้นแบบต่าง ๆ	12
2-2 ค่าคงที่ A และ k	18
2-3 สรุปค่าสัมประสิทธิ์แบบจำลอง BOD <sub>5</sub> และ TOC	19
3-1 วิธีการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ	22
3-2 จำนวนสุกรของฟาร์มสุกรมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	25
3-3 กำหนดกาลและสภาพการทดลองระบบน้ำไหลนอง	27
3-4 ตัวแปรที่ทำการวิจัย	28
4-1 การวิเคราะห์คุณสมบัติน้ำตัวอย่าง	32
4-2 การวิเคราะห์คุณภาพน้ำก่อนและหลังการบำบัดที่อัตราการไหล 0.10 m <sup>3</sup> /d	38
4-3 ประสิทธิภาพของระบบน้ำไหลนอง	39
4-4 การพิจารณาระดับนัยสำคัญ	42
4-5 การพิจารณาค่าคงที่ ( $\beta_1$ )	43
4-6 การพิจารณาค่าแปรปรวนของความคลาดเคลื่อน	43
4-7 เปรียบเทียบค่า k และ A	44
4-8 ผลผลิตน้ำหนักแห้ง	49
ก-1 ผลการทดลองและการคำนวณของการทำ Tracer, Q = 0.10 m <sup>3</sup> /d	57
ข-1 ผลการวิเคราะห์ค่า COD (mg/L) ที่อัตราการไหล 0.10 m <sup>3</sup> /d	59
ข-2 ผลการวิเคราะห์ค่า COD (mg/L) ที่อัตราการไหล 0.12 m <sup>3</sup> /d	62
ข-3 ผลการวิเคราะห์ค่า COD (mg/L) ที่อัตราการไหล 0.15 m <sup>3</sup> /d	64
ข-4 ผลการวิเคราะห์ค่า COD (mg/L) ที่อัตราการไหล 0.18 m <sup>3</sup> /d	65
ข-5 ผลการทดสอบทางสถิติเมื่อระบบคงที่ ของอัตราการไหล 0.10 m <sup>3</sup> /d	66
ข-6 การวิเคราะห์คุณภาพน้ำเมื่อระบบคงที่ ของอัตราการไหล 0.10 m <sup>3</sup> /d	66
ข-7 ผลการทดสอบทางสถิติเมื่อระบบคงที่ ของอัตราการไหล 0.12 m <sup>3</sup> /d	67
ข-8 การวิเคราะห์คุณภาพน้ำเมื่อระบบคงที่ ของอัตราการไหล 0.12 m <sup>3</sup> /d	67

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข-9 ผลการทดสอบทางสถิติเมื่อระบบคงที่ ของอัตราการไหล 0.15 m <sup>3</sup> /d	68
ข-10 การวิเคราะห์คุณภาพน้ำเมื่อระบบคงที่ ของอัตราการไหล 0.15 m <sup>3</sup> /d	68
ข-11 ผลการทดสอบทางสถิติเมื่อระบบคงที่ ของอัตราการไหล 0.18 m <sup>3</sup> /d	69
ข-12 การวิเคราะห์คุณภาพน้ำเมื่อระบบคงที่ ของอัตราการไหล 0.18 m <sup>3</sup> /d	69
ข-13 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรแบบระบบน้ำไหลนอง ที่ความชัน 2%	70
ข-14 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรแบบระบบน้ำไหลนอง ที่ความชัน 4%	71
ข-15 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรแบบระบบน้ำไหลนอง ที่ความชัน 6%	72
ข-16 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรแบบระบบน้ำไหลนอง ที่ความชัน 8%	73
ข-17 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำผิวดินจากอ่างเก็บน้ำ ที่ความชัน 2%	74
ค-1 ตรวจสอบปฏิกิริยาอันดับศูนย์	75
ค-2 ตรวจสอบปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง	76
ค-3 ตรวจสอบปฏิกิริยาอันดับศูนย์	77
ค-4 การคำนวณหาค่า Z	78

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2-1 ระบบอัตราไหลช้า	4
2-2 ระบบอัตราไหลซึมเร็ว	4
2-3 ระบบน้ำไหลนอง	5
2-4 วัฏจักรของวงจรไนโตรเจน	8
2-5 ลักษณะต้นหญ้าขน	15
3-1 แบบจำลองระบบน้ำไหลนอง	24
3-2 การจัดการน้ำเสียฟาร์มสุกรของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	26
4-1 ความสัมพันธ์ระหว่าง C กับ time ของการศึกษาสารติดตาม	30
4-2 แปลงทดลองน้ำเสียฟาร์มสุกรที่ความชันต่าง ๆ ด้วยอัตราการไหล 0.30 m <sup>3</sup> /d	34
4-3 แปลงทดลองน้ำอ่างเก็บน้ำที่ความชัน 2% ด้วยอัตราการไหล 0.30 m <sup>3</sup> /d	34
4-4 แปลงทดลองน้ำเสียฟาร์มสุกรที่ความชันต่าง ๆ ด้วยอัตราการไหล 0.36 m <sup>3</sup> /d	35
4-5 แปลงทดลองน้ำอ่างเก็บน้ำที่ความชัน 2% ด้วยอัตราการไหล 0.36 m <sup>3</sup> /d	35
4-6 แปลงทดลองน้ำเสียฟาร์มสุกรที่ความชันต่าง ๆ ด้วยอัตราการไหล 0.45 m <sup>3</sup> /d	36
4-7 แปลงทดลองน้ำอ่างเก็บน้ำที่ความชัน 2% ด้วยอัตราการไหล 0.45 m <sup>3</sup> /d	36
4-8 แปลงทดลองน้ำเสียฟาร์มสุกรที่ความชันต่าง ๆ ด้วยอัตราการไหล 0.54 m <sup>3</sup> /d	37
4-9 แปลงทดลองน้ำอ่างเก็บน้ำที่ความชัน 2% ด้วยอัตราการไหล 0.54 m <sup>3</sup> /d	37
4-10 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำผิวดินจากอ่างเก็บน้ำ	41
4-11 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln C/C_0$ กับ Z	45
4-12 ผลผลิตน้ำหนักแห้งของหญ้าขน	47
4-13 เปรียบเทียบการเจริญเติบโตของหญ้าขน	49
4-14 ปริมาณหญ้าขนที่เก็บเกี่ยวได้	50

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญของปัญหา

ในอดีตที่ผ่านมาประชากรมีจำนวนน้อย แหล่งน้ำทุกแหล่งมีคุณภาพดีและมีปริมาณน้ำพอเหมาะต่อการใช้อุปโภคและบริโภคของประชาชน รวมทั้งการเกษตรกรรมได้เป็นอย่างดี จึงไม่มีปัญหาน้ำเน่าเสียและขาดแคลน แต่ในระยะหลังมีการเจริญเติบโตของประชากรเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เป็นผลให้เกิดความต้องการใช้น้ำเพิ่มมากขึ้น ประกอบกับปัญหาคุณภาพน้ำเสื่อมโทรม อันเนื่องมาจากการระบายน้ำเสียจากชุมชน, อุตสาหกรรม และพื้นที่เกษตรกรรมลงสู่แม่น้ำ ทำให้คุณภาพไม่เหมาะต่อการใช้ประโยชน์และเป็นปัญหาที่รุนแรงเพิ่มขึ้น ดังนั้น จึงมีความจำเป็นที่ประชาชนทั้งภาครัฐ, เอกชนและประชาชนทั่วไป ต้องช่วยกันแก้ปัญหาผลกระทบที่มีต่อปริมาณและคุณภาพน้ำ เพื่อให้มีน้ำใช้ควบคู่ไปกับการใช้ประโยชน์อย่างมีประสิทธิภาพ รวมทั้งการนำน้ำกลับมาใช้ประโยชน์

ในที่นี้จะพิจารณาน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรเป็นหลัก เนื่องจากประชากรส่วนใหญ่ในประเทศไทยประกอบอาชีพเกษตรกรรมมีการทำฟาร์มปศุสัตว์มาก โดยเฉพาะฟาร์มสุกร น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรเป็นปัญหาที่น่าสนใจที่เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดภาวะมลพิษ ที่ส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมทั้งในดินน้ำ และอากาศ รวมทั้งสุขภาพและอนามัยของประชาชนผู้อยู่อาศัยในบริเวณใกล้เคียงฟาร์มสุกร และในปัจจุบัน ฟาร์มสุกรส่วนใหญ่ยังไม่มีการจัดการกำจัดที่เหมาะสมก่อนระบายลงสู่แหล่งน้ำ น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรส่วนใหญ่เกิดจากการล้างคอก ซึ่งมีปริมาณต่อวันสูงถึง 30-40 ลิตรต่อตัวต่อวัน มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์, ของแข็งแขวนลอยรวม, สารอาหารประเภทไนโตรเจนและฟอสฟอรัสสูงด้วย เมื่อมีการระบายน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ จะก่อให้เกิดสภาพความเน่าเสีย การตื้นเขินของแหล่งน้ำ และการเจริญเติบโตของวัชพืชได้ง่าย ดังนั้น จึงต้องทำการบำบัดน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรให้มีคุณภาพดีขึ้น ก่อนที่จะปล่อยลงสู่ที่สาธารณะหรือแม่น้ำลำคลอง

การบำบัดน้ำเสียแบบธรรมชาติจะมีน้ำ ดิน พืช และจุลินทรีย์มาเกี่ยวข้องกัน ซึ่งจะช่วยกันบำบัดน้ำเสียหรือช่วยกันปรับสภาพน้ำเสียให้เป็นน้ำที่มีสารปนเปื้อนลดน้อยลง โดยไม่ต้องอาศัยเครื่องจักรกลต่าง ๆ มาทำการบำบัดน้ำเสีย วิธีนี้เป็นวิธีที่ประหยัดการใช้พลังงานไฟฟ้า สำหรับการบำบัดน้ำเสียแบบธรรมชาติของฟาร์มสุกรนี้ จะใช้วิธีการบำบัดแบบกระจายบนดินโดยระบบ

น้ำไหลนอง (Overland Flow System) คือ การนำน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นจากบ่อฝั้ง มาระบายลงบนผิวดินที่มีความลาดชัน 2-8 % และปลูกพืชคลุมดิน น้ำทิ้งจะได้รับการบำบัดขณะที่ไหลผ่านพืชคลุมดินมา ทำให้เกิดสภาพต่าง ๆ คือ การตกตะกอน การกรอง เกิดปฏิกิริยาชีวเคมีและการดูดซับ พวกรไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำเสียจะถูกนำไปใช้โดยพืชที่ ปลูกคลุมดิน ทำให้มีคุณภาพที่ดีขึ้น และสามารถเก็บเกี่ยวพืชคลุมดินไปใช้ประโยชน์กลับคืนมาในเวลาเดียวกัน

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ COD ของการบำบัดน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรแบบกระจายบนดิน โดยระบบน้ำไหลนอง
2. เพื่อศึกษาปริมาณและการเจริญเติบโตของหญ้าขนที่เก็บเกี่ยวได้

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ศึกษาถึงประสิทธิภาพของการบำบัดแบบกระจายบนดินของน้ำทิ้งฟาร์มสุกร โดยระบบน้ำไหลนอง ซึ่งจะศึกษาความเหมาะสมของอัตราภาระทางชลศาสตร์ (Hydraulic loading rate) ที่แตกต่างกัน

1. การศึกษาวิจัยวิเคราะห์ค่า Biochemical Oxygen Demand (BOD), Chemical Oxygen Demand (COD), Total Suspended Solids (TSS), Total Phosphorus (TP), Nitrate Nitrogen ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ), Total Kjeldahl Nitrogen (TKN) และโคลิฟอร์มแบคทีเรีย เพื่อเป็นบรรทัดฐานของการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบ
2. การศึกษาหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการบำบัดแบบกระจายบนดิน โดยระบบน้ำไหลนอง ได้พิจารณาตัวแปรที่สำคัญ คือ อัตราภาระทางชลศาสตร์ และความชัน
3. การศึกษาวิจัยปริมาณและการเจริญเติบโตของหญ้าขนที่เก็บเกี่ยวได้

## บทที่ 2

### ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 การบำบัดน้ำเสียแบบกระจายบนดิน

การบำบัดน้ำเสียแบบกระจายบนดิน เป็นการบำบัดแบบธรรมชาติวิธีหนึ่ง ซึ่งเป็นการระบายน้ำเสียในปริมาณที่เหมาะสมลงสู่ดิน กลไกการบำบัดน้ำเสียแบบกระจายบนดินมีปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นทั้งทางกายภาพ, เคมี และชีววิทยา การบำบัดวิธีนี้จะทำให้ควบคุมการทำงานและบำรุงรักษาง่าย ใช้พลังงานต่ำ ซึ่งเป็นวิธีที่ประหยัดค่าใช้จ่าย แต่ต้องใช้พื้นที่มาก จึงเหมาะกับประเทศกำลังพัฒนาโดยเฉพาะในชนบทซึ่งที่ดินมีราคาถูก การบำบัดแบบนี้เหมาะสมกับลักษณะน้ำเสียที่มีแร่ธาตุ อาหารและมีสารอินทรีย์ต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อพืช แต่ถ้าเป็นน้ำเสียที่มีสารพิษไหลปะปนมา ต้องคำนึงถึงปริมาณสารพิษและชนิดของสารพิษด้วย การบำบัดน้ำเสียแบบกระจายบนดินมี 3 วิธี คือ ระบบอัตราไหลช้า (Slow Rate System), ระบบไหลซึมเร็ว (Rapid Infiltration System) และ ระบบน้ำไหลนอง (Overland Flow System) ประสิทธิภาพเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับสภาพท้องถิ่น เช่น ลักษณะดิน อากาศ ชนิดของพืชคลุมดิน เป็นต้น

##### 2.1.1 ระบบอัตราไหลช้า

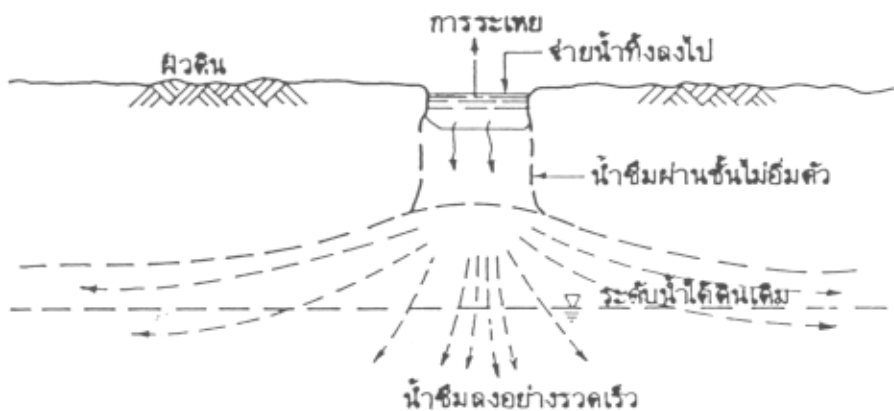
การบำบัดน้ำเสียแบบกระจายบนดิน โดยระบบอัตราไหลช้า เป็นการบำบัดโดยการกระจายน้ำเสียลงบนพื้นดินที่มีพืชปกคลุมดิน โดยวิธีการกระจายน้ำเสียตามร่องน้ำทั่วบริเวณ และวิธีการฉีดพ่นกระจายฝอยน้ำ (Sprinkler System) การบำบัดอาศัยกระบวนการทางกายภาพ, เคมี และชีวภาพ น้ำเสียจะถูกบำบัดโดยการระเหยออกไป ถูกดูดซับด้วยพืช และไหลซึมลงใต้ดิน ระบบนี้ลักษณะดินต้องเป็นดินที่น้ำซึมผ่านได้ดี วิธีนี้สามารถรับน้ำได้ในอัตรา 0.6-6.0 เมตร/ปี โดยปกติจะรดน้ำในอัตรา 1.3-10.0 เซนติเมตร/สัปดาห์ และควรมีความลาดของพื้นที่ต่ำ (US. EPA., 1981) ระบบนี้ทำให้เกิดการหมุนเวียนการใช้ น้ำ, ผลผลิตของพืช และการเปลี่ยนน้ำเสียให้เป็นน้ำใช้สำหรับการเกษตรในฤดูแล้ง ซึ่งเป็นการอนุรักษ์น้ำ (Reed and Crites, 1984) ระบบนี้ศึกษาการกำจัดมลสารสูง ต้องการพื้นที่กว้าง และการกระจายของมลสารมีผลต่อดินและพืชน้อยมาก (US. EPA., 1976) ลักษณะของระบบนี้ดังรูปที่ 2-1



รูปที่ 2-1. ระบบอัตราไหลช้า

### 2.1.2 ระบบไหลซึมเร็ว

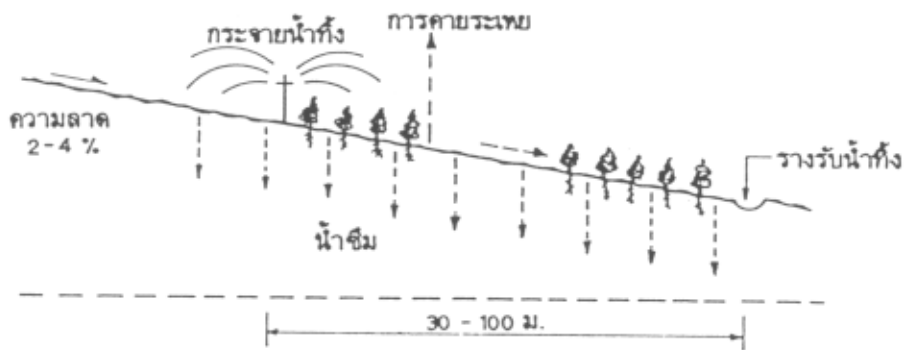
การบำบัดน้ำเสียแบบกระจายบนดิน โดยระบบอัตราไหลซึมเร็ว เป็นการปล่อยน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นแล้ว (ตกตะกอน) มาลงที่บ่อหรือร่องรับน้ำเสีย ซึ่งจะเกิดการระเหยออก และการซึมลงดิน วิธีนี้จะปล่อยให้น้ำเสียไหลเข้าในอัตราที่สูงกว่าระบบอัตราไหลช้า ระบบนี้จะมี การสูบน้ำใต้ดินขึ้นมา เพื่อปล่อยลงบนพื้นที่อีกครั้ง สามารถรับน้ำเสียได้ในอัตรา 6-125 เมตร/ปี โดยปกติจะปล่อยน้ำเสียในอัตรา 10-240 เซนติเมตร/สัปดาห์ (US. EPA., 1981) ระบบนี้ต้องการพื้นที่น้อย (Rajagopal et al, 1980) กระบวนการซึมผ่านศักยภาพการกักจลสารต่ำ (US. EPA., 1976) ลักษณะของระบบนี้ดังรูปที่ 2-2



รูปที่ 2-2. ระบบอัตราไหลซึมเร็ว

### 2.1.3 ระบบน้ำไหลนอง

การบำบัดน้ำเสียระบบน้ำไหลนอง เป็นการปล่อยน้ำเสียที่ออกจากท่อเจาะรู หรือ หัวกระจายน้ำเสียซึ่งอยู่ที่สูงไหลจากระบบจ่ายผ่านพืชต่าง ๆ ที่ปลูกอยู่บริเวณที่น้ำไหลผ่านลงมา จนถึงรางรองรับน้ำทิ้ง เพื่อระบายน้ำทิ้งต่อไป ด้วยความลาดชันประมาณ 2-8 % ขณะที่น้ำไหลผ่านพืชต่าง ๆ ลงมา ทำให้เกิดสภาพต่าง ๆ คือ การตกตะกอน การกรอง เกิดปฏิกิริยาชีวเคมีและการดูดซับ พวกไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำเสียจะถูกนำไปใช้โดยพืชที่ปลูกคลุมดิน ระบบนี้สามารถกำจัด BOD และ SS ได้ 95-99 % , กำจัดไนโตรเจน 70-90 % และกำจัดฟอสฟอรัส 50-60 % (Polprasert, 1996) ระบบนี้สามารถรดน้ำได้ปริมาณ 3.0-20 เมตร/ปี โดยปกติจะรดน้ำเสียได้ในอัตรา 6.0-40.0 เซนติเมตร/สัปดาห์ (US. EPA., 1981) ลักษณะของระบบนี้ดังรูปที่ 2-3



รูปที่ 2-3. ระบบน้ำไหลนอง

การบำบัดแบบกระจายบนดินของทั้ง 3 ระบบ จะมีประสิทธิภาพดีและประสบผลสำเร็จ ต้องมีการผ่านการบำบัดขั้นต้นก่อน เนื่องจากน้ำเสียนั้นอาจมีความเข้มข้นของสารต่าง ๆ สูง ทำให้เกิดความเสียหายต่อระบบหรือระบบล้มเหลวได้ การบำบัดขั้นต้นจะเป็นเพียงการนำน้ำเสียผ่านตะแกรงเพื่อกำจัดวัสดุขนาดใหญ่, ผ่านบ่อพักหรือบ่อตกตะกอนหรือบ่อคงตัว เพื่อลดปริมาณสารแขวนลอย, บ่อเติมอากาศหรือบ่อตะกอนเร่ง เป็นต้น ในการวิจัยครั้งนี้ น้ำเสียจะผ่านการบำบัดขั้นต้น โดยผ่านบ่อฝังก่อนมาทำการบำบัดแบบกระจายบนดิน โดยระบบน้ำไหลนอง



## 2.2 กลไกการกำจัดระบบน้ำไหลนอง

การบำบัดแบบกระจายบนดิน โดยระบบน้ำไหลนอง เกี่ยวข้องกับกระบวนการทางกายภาพ, เคมี และชีวภาพ ที่เกิดขึ้นในสภาพแวดล้อมของดินและน้ำ การบำบัดแบบกระจายบนดิน โดยระบบน้ำไหลนองนี้ สามารถกำจัดหรือแยกสิ่งปนเปื้อนออกจากน้ำเสียได้ในระดับหนึ่ง ซึ่งสิ่งปนเปื้อนในที่นี้ได้แก่ ของแข็งแขวนลอย, สารอินทรีย์, ไนโตรเจน, ฟอสฟอรัส ธาตุอื่น ๆ และจุลชีพ

### 2.2.1 ของแข็งแขวนลอย

ของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียที่ไหลผ่านบนดินสามารถถูกกำจัด หรือแยกออกมาจากน้ำเสียได้ โดยอาศัยการตกตะกอน กรองผ่านชั้นดิน การกรองผ่านรากพืชต่าง ๆ พบว่าน้ำเสียมักจะไปอุดตันบริเวณผิวชั้นบนของพื้นที่ ดังนั้นจึงต้องออกแบบให้ระบบสามารถลดปัญหาดังกล่าวให้มากที่สุด

ในระบบอัตราไหลช้า และระบบไหลซึมเร็ว การกำจัดของแข็งแขวนลอยอาศัยกระบวนการกรองผ่านชั้นดิน และมีประสิทธิภาพการกำจัดดีกว่าระบบน้ำไหลนอง ส่วนระบบน้ำไหลนองการกำจัดของแข็งแขวนลอยอาศัยการตกตะกอนและการดักจับของพืช ประสิทธิภาพการกำจัดจะดีเมื่อน้ำนั้นผ่านตะแกรงหรือการบำบัดขั้นต้น (Reed and Crites, 1984)

Abrahams and Atkinson (1993) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับการตกตะกอน จากการศึกษาในระบบน้ำไหลนองในห้องทดลอง พบว่าความเร็วของน้ำลดลง การตกตะกอนเพิ่มขึ้น และการเพิ่มขึ้นของการกระจายทำให้เกิดการชนกันเพิ่มขึ้นพร้อมกับการตกตะกอนเพิ่มขึ้น

### 2.2.2 สารอินทรีย์

สารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำเสียจำเป็นต้องถูกกำจัดออก ซึ่งสามารถกำจัดได้โดยอาศัยกระบวนการทางชีวภาพแบบแอโรบิก คือพวกจุลชีพที่เกาะอยู่ตามผิวเม็ดดินต่าง ๆ จะอาศัยออกซิเจนจากบรรยากาศ ดำรงชีวิตอยู่ได้และจะทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย และการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบแอนแอโรบิกก็มีบางส่วนเกิดขึ้นภายในชั้นดินบ้าง แต่มีไม่มาก ดังนั้น

ควรคำนึงถึงปริมาณออกซิเจนที่ใช้ในระบบคือ ปริมาณออกซิเจนถ่ายเทเข้าสู่ระบบต้องมีมากกว่า ปริมาณออกซิเจนที่ต้องการใช้ในระบบ

### 2.2.3 ไนโตรเจน

ไนโตรเจนในน้ำเสียมักจะอยู่ในรูปของสารอินทรีย์ และแอมโมเนีย สารไนโตรเจนเหล่านี้จะก่อให้เกิดปัญหาน้ำเน่าเสียได้ เพราะเป็นสารที่ทำให้เกิดความจำเป็นต้องใช้ออกซิเจนค่อนข้างมากสารหนึ่ง ถ้าเกิดการขาดออกซิเจนในน้ำจะทำให้เกิดปัญหากลิ่นเหม็นได้ ไนโตรเจนจะถูกกำจัดโดยเป็นสารอาหารของพืช, การระเหยของแอมโมเนีย และขบวนการไนตริฟิเคชัน/ดีไนตริฟิเคชัน ระบบน้ำไหลนองสามารถกำจัดไนโตรเจนในน้ำเสียชุมชนได้ถึง 70 % โดยพืช 20 % , จากการระเหยของแอมโมเนีย 10 % และขบวนการไนตริฟิเคชัน/ดีไนตริฟิเคชัน อย่างละ 20 % (Reed and Crites, 1984)

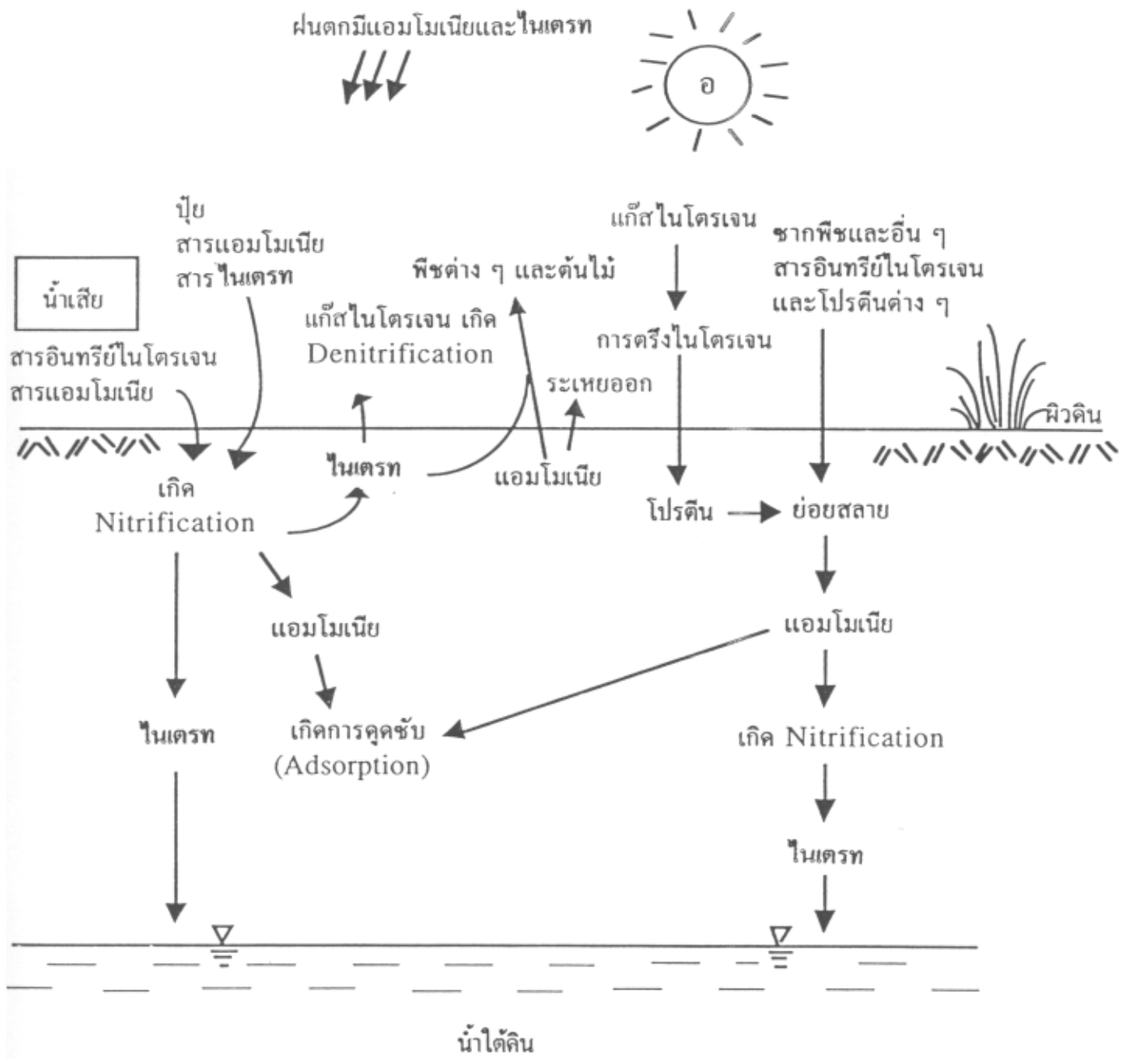
ไนเตรทหายไปโดยพืชนำไปใช้ และการเปลี่ยนรูปไปเป็นแก๊สไนโตรเจน โดยขบวนการดีไนตริฟิเคชัน การย่อยสลายของสารอินทรีย์ไนโตรเจนจะเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ ส่วนของแอมโมเนียหายไปโดยการระเหย, พืชนำไปใช้ และการดูดซับในดิน วัฏจักรของวงจรไนโตรเจน ดังรูปที่ 2-4

### 2.2.4 ฟอสฟอรัส

โดยทั่วไปการกำจัดฟอสเฟตออกจากน้ำเสียสามารถทำได้ โดยวิธีทางชีวภาพที่มีระบบขาดอากาศชั่วคราว และระบบเติมอากาศสลับกันไปมา และอาจสามารถกำจัดได้โดยทางเคมี ซึ่งทำให้เกิดปัญหาตะกอนเกิดขึ้นมาก ในการกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียด้วยวิธีนี้ สามารถกระทำได้โดยหลักการดูดซับ แต่อาจมีปัญหาก่อการอึดตัวของปริมาณฟอสเฟตบริเวณชั้นดินบางบริเวณได้ การกำจัดฟอสฟอรัสในระบบน้ำไหลนองกำจัดได้ถึง 50-60 % (Polprasert, 1996)

### 2.2.5 ธาตุอื่น ๆ

ธาตุอื่น ๆ ในที่นี้บางตัวเป็นธาตุที่จำเป็นสำหรับพืช แต่ธาตุบางตัวจะเป็นธาตุที่มีพิษ เมื่อมีปริมาณมากเกินไป ซึ่งจะมีผลต่อจุลชีพต่าง ๆ อาทิ โครเมียม แคดเมียม ปรอท เป็นต้น



รูปที่ 2-4. วงจรของวงจรไนโตรเจน

เมื่อน้ำเสียผ่านการบำบัดแล้ว ชาติต่าง ๆ จะถูกจับไว้ โดยอาศัยการดูดซับ การตกผลึกและการแลกเปลี่ยนประจุ โดยทั่วไปจะต้องมีค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำเสียหรือบริเวณพื้นที่บำบัดน้ำเสียมากกว่า 7 จึงจะได้ประสิทธิภาพของการบำบัดอยู่ในระดับสูง แต่ถ้าค่าความเป็นกรด-ด่าง ต่ำกว่า 7 จะเกิดปัญหากับชาติต่าง ๆ โดยเฉพาะตัวที่มีพิษจะละลายปนกับน้ำออกจากระบบ

## 2.2.6 จุลชีพ

การบำบัดแบบกระจายบนดิน โดยระบบน้ำไหลนองสามารถกำจัดพวกจุลชีพต่าง ๆ ก่อนข้างได้ผลดี เพราะอาศัยทั้งการตก การดูดซับ และการตกตะกอน เป็นต้น ถ้าบริเวณพื้นที่ที่มีพืชขึ้นมากจะช่วยกำจัดจุลชีพได้มากขึ้น แต่พบว่ายังไม่เพียงพอเมื่อต้องการกำจัดจุลชีพต่าง ๆ ให้หมดสิ้น ซึ่งในบางแห่งต้องอาศัยสารเคมีช่วยในการกำจัด เช่น การเติมคลอรีนในการกำจัด

## 2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดแบบกระจายบนดิน โดยระบบน้ำไหลนอง

การบำบัดแบบกระจายบนดิน โดยระบบน้ำไหลนอง ให้มีประสิทธิภาพและประสพผลสำเร็จ มีปัจจัยสำคัญที่ต้องพิจารณาได้แก่ ลักษณะน้ำเสีย, การเลือกพื้นที่, ภูมิอากาศ, อัตราการระเหยทางชลศาสตร์, อัตราไหลของน้ำเสียบนพื้นที่บำบัด, ระยะเวลาที่ปล่อยน้ำเสียลงบนพื้นที่, ขนาดของพื้นที่ที่ต้องการ และพืชคลุมดิน

### 2.3.1 ลักษณะน้ำเสีย

ลักษณะน้ำเสียจากสัตว์ เป็นน้ำเสียที่มีสารอาหารและธาตุที่เป็นปุ๋ยของพืช (Hegg and Turner, 1983) เหมาะสมกับการบำบัดแบบกระจายบนดิน โดยระบบน้ำไหลนอง น้ำเสียที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ คือ น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร

ของเสียที่เกิดจากฟาร์มสุกร แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นของแข็ง ได้แก่ มูลสุกรและเศษอาหารที่ตกค้างอยู่ในคอก มูลสุกรที่เก็บรวบรวมได้ส่วนใหญ่จะนำไปตากแห้งเพื่อนำไปขายหรือทำเป็นปุ๋ย และอีกส่วนเป็นของเหลว ได้แก่ ของเหลวที่เกิดจากการล้างคอกด้วยน้ำและปัสสาวะสุกร การทำความสะอาดคอกสุกรจะแตกต่างกันไปตามแต่ละท้องถิ่น ฟาร์มสุกร

ขนาดเล็กที่อยู่ห่างไกลหรือขาดแคลนน้ำจะไม่ทำการฉีดน้ำล้างทำความสะอาดคอก หากแต่จะทำความสะอาดโดยการเก็บกวาดมูลสุกรออกจากคอกแล้วนำไปตากแห้งเพื่อขายต่อไป ในกรณีเช่นนี้จะไม่เกิดปัญหามลพิษต่อแหล่งน้ำธรรมชาติมากนัก ส่วนฟาร์มสุกรที่อยู่ใกล้แหล่งน้ำหรือไม่ประสบปัญหาการขาดแคลนน้ำ จะทำความสะอาดคอกสุกรด้วยการฉีดน้ำล้างคอกทุกวัน ทำให้เกิดปัญหามลพิษต่อแหล่งน้ำธรรมชาติ

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (2532) ได้ศึกษาพบว่าปริมาณน้ำที่ใช้ล้างคอกมีค่าประมาณ 30-40 ลิตรต่อตัวต่อวัน โดยล้างคอกวันละครั้ง ครั้งละ 1-2 ชั่วโมง ส่วนลักษณะของน้ำทิ้งที่ตรวจพบความสกปรกทั้งที่อยู่ในรูปสารอินทรีย์ (BOD), โปรทและสารเคมีกำจัดศัตรูพืช โดยพบว่าปริมาณความสกปรกในรูปสารอินทรีย์มีค่าเฉลี่ยประมาณ 3000 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือคิดเป็น 120-136 กรัมต่อตัวต่อวัน เทียบเท่ากับความสกปรกที่เกิดจาก 2-3 คน (40-50 กรัมต่อคนต่อวัน) โปรทมีความเข้มข้น 0.0023 มิลลิกรัมต่อลิตร (0.033 มิลลิกรัมต่อตัวต่อวัน) และปริมาณสารเคมีกำจัดศัตรูพืชเท่ากับ 0.0002 มิลลิกรัมต่อลิตร (0.0064 มิลลิกรัมต่อตัวต่อวัน) และการวิเคราะห์ห้้น้ำเสียฟาร์มสุกรที่สถานีวิจัยและศูนย์อบรมการเกษตรแม่เหียะ เชียงใหม่ พบว่าปริมาณน้ำที่ใช้ล้างคอกสุกรแตกต่างกันในแต่ละวัน การล้างคอกสุกรจะทำทุกวันในช่วงเช้าเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ผลจากการวัดปริมาณน้ำอาทิตย์ละครั้ง พบว่าน้ำที่ใช้ล้างคอกมีปริมาตรระหว่าง 5-15 ลูกบาศก์เมตรต่อสัปดาห์ ซึ่งจำนวนลูกสุกรทั้งหมดอยู่ระหว่าง 150-300 ตัว การวิเคราะห์ของเสียในน้ำล้างคอกสุกร พบว่ามีของแข็งวัดได้โดยเฉลี่ยประมาณ 0.33 % ของน้ำหนักสุกร (บุษบา, 2537)

### 2.3.2 การเลือกพื้นที่

ความเหมาะสมสำหรับการเลือกพื้นที่ของการบำบัดแบบกระจายบนดิน โดยระบบน้ำไหลนอง ต้องคำนึงถึงลักษณะทางภูมิศาสตร์และลักษณะของดิน พื้นที่ที่เหมาะสมกับระบบต้องการความลาดชันของพื้นที่ 2-8 % (US. EPA., 1981) ถ้าความลาดชันของพื้นที่น้อยกว่า 2 % จะทำให้เกิดน้ำขังได้ ส่วนถ้าความลาดชันของพื้นที่มากเกินไป จะทำให้เกิดการชะเซาะผิวน้ำดิน พื้นที่ที่มีความยาวความลาดอยู่ในช่วง 30-100 เมตร (Hegg and Turner, 1983) ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของพื้นที่และความลาดชันของพื้นที่ ส่วนลักษณะดินที่เหมาะสมกับระบบนี้เป็นดินที่น้ำสามารถซึมผ่านได้ดี ได้แก่ ดินร่วนปนดินเหนียว (Clay loam) และ ดินเหนียว (Clay) ความหนาของชั้นดินประมาณ 0.30-0.60 เมตร (US. EPA., 1981)

### 2.3.3 ภูมิอากาศ

การบำบัดแบบกระจายบนดิน โดยระบบน้ำไหลนอง จะขึ้นกับกิจกรรมของ จุลินทรีย์ที่ผิวหน้าดิน หรือบริเวณใกล้ ๆ ผิวหน้าดิน ในเขตพื้นที่ภูมิอากาศอบอุ่นประสิทธิภาพ ของระบบจะดีกว่าในเขตพื้นที่อากาศหนาว เนื่องจากภูมิอากาศอบอุ่นจะเกิดกิจกรรมของ จุลินทรีย์ที่บริเวณผิวหน้าดินสูง

Turner et al (1994) รายงานถึงการศึกษาในระบบน้ำไหลนอง เป็นเวลา 6 เดือน ของการกำจัดฟอสฟอรัสจากน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดขั้นที่ 2 จำนวน 5 แปลง การกำจัด ฟอสฟอรัสสูงเกิดที่อัตราไหลของน้ำเสียบนพื้นที่บำบัดต่ำ ค่าเฉลี่ยการกำจัดฟอสฟอรัสได้ 77 % สำหรับฤดูร้อน และ 52 % สำหรับฤดูหนาว

### 2.3.4 อัตราการชะล้างสาร

อัตราการชะล้างสาร หมายถึง ปริมาณน้ำเสียที่ไหลต่อพื้นที่ต่อเวลา ใน หน่วย เช่นลิเมตร/วัน หรือ มิลลิเมตร/สัปดาห์ อัตราการชะล้างสารมีค่าแตกต่างกันตามการ บำบัดขั้นต้นดังแสดงในตารางที่ 2-1 อัตราการชะล้างสารในการบำบัดแบบกระจายบนดิน จะเกี่ยวพันถึงสมดุลของน้ำ โดยพิจารณาถึงการกรอง การระเหย สภาพดินและภูมิอากาศ (Bolneni, 1979) ถ้าในเขตพื้นที่ภูมิอากาศอบอุ่นอากาศร้อนมีการระเหยของน้ำเพิ่มขึ้น จะต้องการ อัตราการชะล้างสารเพิ่มขึ้น เพื่อรักษาสมดุลของน้ำ ในทางกลับกัน ในเขตพื้นที่ภูมิอากาศ หนาว อากาศเย็นมีการระเหยของน้ำลดลง จะต้องการอัตราการชะล้างสารลดลง เพื่อรักษา สมดุลของน้ำเช่นเดียวกัน

### 2.3.5 อัตราไหลของน้ำเสียบนพื้นที่บำบัด

อัตราไหลของน้ำเสียบนพื้นที่บำบัด หมายถึง ปริมาณของน้ำเสียต่อเวลาต่อ ความกว้าง ในหน่วย ลบ.ม./ม.-ชม. อัตราไหลของน้ำเสียบนพื้นที่บำบัดมีค่าแตกต่างกันตามการ บำบัดขั้นต้น ดังแสดงในตารางที่ 2.1 อัตราไหลของน้ำเสียบนพื้นที่บำบัดขึ้นกับภูมิอากาศเช่น เดียวกันกับอัตราการชะล้างสาร คือ ในเขตพื้นที่ภูมิอากาศอบอุ่นต้องการอัตราไหลของน้ำ เสียบนพื้นที่บำบัดสูงกว่าในเขตพื้นที่ภูมิอากาศหนาว

ตารางที่ 2-1. อัตราที่เหมาะสมกับการบำบัดขั้นต้นแบบต่าง ๆ (US. EPA., 1981)

การบำบัด ขั้นต้น	อัตราการระทาง ชลศาสตร์ ชม./วัน	อัตราไหลของน้ำ เสียบนพื้นที่บำบัด ลบ.ม./ม.-ชม.	ระยะเวลาที่ปล่อย น้ำเสียลงบนพื้นที่ ชม./วัน	ความถี่ วัน/ สัปดาห์	ความยาว ความลาด ม.
ตะแกรง	0.9-3	0.07-0.12	8-12	5-7	36-45
บ่อดก	1.4-4	0.08-0.12	8-12	5-7	30-36
ตะกอน					
บ่อกดตัว	1.3-3.3	0.03-0.10	8-18	5-7	45
การบำบัด ทางชีวภาพ	2.8-6.7	0.10-0.20	8-12	5-7	30-36

US. EPA. (1981) ได้กำหนดสมการความสัมพันธ์ของอัตราการระทางชลศาสตร์, อัตราไหลของน้ำเสียบนพื้นที่บำบัด, ระยะเวลาที่ปล่อยน้ำเสียลงบนพื้นที่ และความยาวความลาดของพื้นที่ ดังสมการ 2-1

$$L_w = \frac{(R_a)(P)}{S}(100 \text{ cm / m}) \quad (2-1)$$

โดยที่  $L_w$  = อัตราการระทางชลศาสตร์, ชม./วัน  
 $R_a$  = อัตราไหลของน้ำเสียบนพื้นที่บำบัด, ลบ.ม./ม.-ชม.  
 $P$  = ระยะเวลาที่ปล่อยน้ำเสียลงบนพื้นที่, ชม./วัน  
 $S$  = ความยาวความลาดของพื้นที่, ม.

### 2.3.6 ระยะเวลาที่ปล่อยน้ำเสียลงบนพื้นที่

ช่วงระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับระยะเวลาที่ปล่อยน้ำเสียลงบนพื้นที่ คือ 6-8 ชม. และหยุดปล่อยน้ำเสีย 16-18 ชม. ระยะเวลาเดินระบบ 5-6 วัน/สัปดาห์ (Polprasert, 1996)

จากการศึกษาการบำบัดแบบกระจายบนดิน โดยระบบน้ำไหลนอง ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ (2535) พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย เมื่อระบายน้ำเสียแบบต่อเนื่อง (24 ชม./วัน) และแบบเป็นช่วง ๆ (8 ชม./วัน) ในช่วงค่าอัตราการไหลของน้ำเสียบนพื้นที่บำบัดเดียวกัน ประสิทธิภาพไม่ได้แตกต่างกันอย่างชัดเจน

### 2.3.7 ขนาดของพื้นที่ที่ต้องการ

ขนาดพื้นที่รับน้ำไหลนองที่ต้องการ สามารถคำนวณได้จากสมการ 2-2 (เกรียงศักดิ์, 2539)

$$A = \frac{\left[ Q + \frac{V_s}{24} \right] \left[ \frac{T_s + 365}{365} \right]}{R_a T_a} ST_c \quad (2-2)$$

โดยที่ $A$	=	พื้นที่สำหรับรองรับน้ำไหลนอง, ตร.ม.
$Q$	=	อัตราไหลเข้าของน้ำเสีย, ลบ.ม./ชม.
$V_s$	=	ปริมาณน้ำที่ได้เกินหรือที่สูญหายไปในช่วงเก็บกักน้ำเสีย, ลบ.ม./วัน
$T_s$	=	ระยะเวลาของการเก็บกักไว้, วัน
$S$	=	ความยาวความลาด, ม.
$T_c$	=	รอบเวลาทำงาน, ชม.
$R_a$	=	ปริมาณน้ำเสียไหลบนพื้นที่บำบัด, ลบ.ม./ม.ชม.
$T_a$	=	ระยะเวลาที่น้ำเสียไหลบนพื้นที่บำบัด, ชม.

เมื่อได้ขนาดพื้นที่รับน้ำไหลนองจากสมการแล้ว ควรเพิ่มพื้นที่สำหรับให้พื้นที่บางส่วนได้พักการใช้งานหนึ่งปีประมาณ 25 % และเพิ่มขนาดพื้นที่สำหรับถนนในพื้นที่โครงการอีก 10 % ดังนั้น ขนาดพื้นที่ทั้งหมดสำหรับระบบไหลนองจะมีค่าเท่ากับ 1.4 เท่าของพื้นที่รับน้ำไหลนองที่คำนวณได้จากสมการ

### 2.3.8 พืชคลุมดิน

พืชคลุมดินที่เหมาะสมกับการบำบัดแบบกระจายบนดิน โดยระบบน้ำไหลนองจะต้องรักษาเสถียรภาพของดินเพื่อป้องกันการกัดเซาะ เป็นพืชที่ทนน้ำ และช่วยในกระบวนการกำจัดสารต่าง ๆ ได้แก่พืชจำพวกคันหญ้า ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้จะใช้คันหญ้าน

หญ้านมีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Brachiaria mutica* (Forsk.) และมีชื่อสามัญว่า Paragrass หรือ Mauritius หญ้าชนิดนี้มีอายุหลายปี ลำต้นหยวบ ลำต้นมีทั้งส่วนที่ตั้งตรง



และส่วนที่เป็นเถาเลื้อยทอดเอนไปตามผิวดิน จัดเป็นพวกมีไหล (Stoloniferous) ส่วนของลำต้นที่ทอดนอนไปตามผิวดินอาจยาว 240-270 เซนติเมตร ข้อที่สัมผัสผิวดินจะมีรากเติบโตห้อยลึกลงไปในดินแต่ไม่ลึกมากนัก และมีหน่อยาวเจริญเติบโตขึ้นมา ลำต้นที่ตั้งตรงขึ้นไปสูง 60-90 เซนติเมตร ใบกว้าง 8-20 มิลลิเมตร ใบและกาบใบจะมีขนสีขาวปกคลุมจำนวนมาก หน่อขงมีระบบรากฝอยสั้น (สาขันธ์, 2540) ดังรูปที่ 2-5

มีการปลูกหน่อขงแพร่หลายทั่วประเทศ และเป็นที่ยึดกันดีของเกษตรกร มันเจริญเติบโตเป็นวัชพืชในที่รกร้าง ริมคูน้ำ ริมหนอง ตลอดจนที่ชื้นแฉะทั่วไป โดยอาศัยส่วนของลำต้นที่ทอดยาวออกไปและใช้แพร่พันธุ์ได้ หน่อขงเป็นหญ้าที่สำคัญต่ออาชีพการเลี้ยงสัตว์ของประเทศไทยในปัจจุบัน หน่อขงมีการปรับตัวเข้ากับสภาพแวดล้อม ชอบขึ้นในที่ชื้นแฉะและบริเวณที่ราบลุ่มของเขตร้อนและกึ่งร้อนที่มีฝนตกไม่น้อยกว่า 1000 มิลลิเมตรต่อปี มันทนทานต่อสภาพน้ำท่วมขังเป็นระยะเวลานาน ๆ ได้ดีกว่าหญ้าชนิดอื่น แต่ไม่ทนทานต่อสภาพที่แล้งจัดเป็นระยะเวลานาน อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตอยู่ระหว่าง 15-21 °C (สาขันธ์, 2540) ดินที่เหมาะสมที่สุดในการปลูกหน่อขงคือ ดินที่มีความอุดมสมบูรณ์สูง เนื้อดินเป็นดินร่วนปนดินเหนียว (Clay loam) ถึงดินเหนียว (Clay) มีความสามารถในการอุ้มน้ำสูง

การเก็บเกี่ยวหน่อขงจะได้คุณภาพดีเมื่อตัดในระยะที่เหมาะสมก่อนที่ลำต้นจะแห้ง โดยทั่วไปการตัดครั้งแรกสามารถกระทำเมื่อมันมีอายุ 9-11 สัปดาห์หลังปลูก หลังจากนั้นสามารถตัดได้ทุก 3-4 สัปดาห์ การตัดจะกระทำเมื่อหน่อขงมีความสูงประมาณ 60-75 เซนติเมตร เพราะหลังจากนี้มันจะเริ่มแข็งและสูญเสียคุณค่าทางอาหาร (สมพร, 2527)

## 2.4 การออกแบบระบบน้ำไหลนอง

การออกแบบระบบน้ำไหลนองแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือวิธี CRREL Method เป็นการศึกษาคณะ U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory (CRREL) โดยพิจารณาบนพื้นฐานของระยะเวลาเก็บกักบนความชื้น ส่วนอีกวิธี คือวิธี UCD Method เป็นการศึกษาคณะ University of California, Davis (UCD) โดยพิจารณาความยาวพื้นที่ลาดและอัตราการไหลของน้ำเสียนบนพื้นที่บำบัด (US. EPA., 1981)



รูปที่ 2-5. ลักษณะคันหญ้าจน

### 2.4.1 CRREL Method

CRREL Method เป็นแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาเก็บกักและมวลการลดลงของ BOD แสดงดังสมการ (2-3)

$$E = (1 - Ae^{-kt})100 \quad (2 - 3)$$

โดยที่	<b><i>E</i></b>	=	เปอร์เซ็นต์การกำจัดมลสารของ BOD
	<b><i>A</i></b>	=	BOD ของสารส่วนที่ไม่ตกตะกอน (ค่าคงที่ = 0.52)
	<b><i>k</i></b>	=	ค่าคงที่เฉลี่ยทางจลศาสตร์ (0.03 min <sup>-1</sup> )
	<b><i>t</i></b>	=	ระยะเวลาเก็บกัก, min

การคำนวณหาระยะเวลาเก็บกัก หาได้จากสมการ (2-4)

$$t = \frac{(0.078Z)}{qG^{\frac{1}{3}}} \quad (2 - 4)$$

โดยที่	<b><i>q</i></b>	=	อัตราไหลของน้ำเสียบนพื้นที่บำบัดเฉลี่ย ( $q_{\text{applied}} + q_{\text{infiltration}}/2$ ) m <sup>3</sup> /m-h
	<b><i>Z</i></b>	=	ความยาวความลาด, m
	<b><i>G</i></b>	=	ความชัน, m/m
	<b><i>t</i></b>	=	ระยะเวลาเก็บกัก, min

### 2.4.2 UCD Method

UCD Method เป็นแบบจำลองที่อธิบายถึงการกำจัด BOD ในเทอมของความยาวความลาดและอัตราการไหลของน้ำเสียบนพื้นที่บำบัด แสดงดังสมการ (2-5)

$$\frac{C_z}{C_0} = Ae^{\left(-\frac{kz}{q^n}\right)} \quad (2 - 5)$$

โดยที่	$Z$	=	ความยาวความลาด, เมตร
	$C_0$	=	ความเข้มข้น BOD เริ่มต้น, mg/L
	$C_z$	=	ความเข้มข้น BOD ที่ระยะความยาวความลาด $Z$ , mg/L
	$k$	=	อัตราสัมประสิทธิ์, m/h
	$A$	=	ค่าคงที่
	$n$	=	ค่าคงที่
	$q$	=	อัตราการไหลของน้ำเสียบนพื้นที่บำบัด, m <sup>3</sup> /m-h

## 2.5 การศึกษาแบบจำลองระบบน้ำไหลนองที่ผ่านมา

Witherow and Bledsoe (1986) ได้ศึกษาการออกแบบจำลองระบบน้ำไหลนอง โดยใช้สมการจาก “Process Design Manual for Land Treatment of Municipal Wastewater” (US EPA., 1981) โดยพัฒนาระบบน้ำไหลนองจากการบำบัดน้ำเสียจากอาหารและน้ำเสียชุมชน ซึ่งใช้สมการอธิบาย 2 สมการ โดยพิจารณาค่าความเข้มข้นของ BOD ดังสมการ (2-5) และ (2-6)

$$\frac{C_z}{C_0} = Ae^{\left(-\frac{kz}{q^n}\right)} \quad (2-5)$$

$$\frac{M_z}{M_0} = Ae^{\left(-\frac{kz}{G^{\frac{1}{3}q}\right)} \quad (2-6)$$

โดยที่	$M_0$	=	น้ำหนัก BOD เริ่มต้น, kg
	$M_z$	=	น้ำหนัก BOD ที่ระยะความยาวความลาด $Z$ , kg
	$q$	=	ค่าเฉลี่ยอัตราการไหลที่จุดเข้าและออก, m <sup>3</sup> /m-h
	$G$	=	ความชัน, m/m

ความแตกต่างของสมการ (2-5) และสมการ (2-6) คือสมการ (2-5) จะไม่พิจารณาค่าความชัน, น้ำหนักของ BOD และอัตราการไหลเฉลี่ย วัตถุประสงค์หลักของการศึกษาครั้งนี้ จะศึกษา

เฉพาะสมการ (2-5) เท่านั้น ซึ่งหาค่าคงที่ A และอัตราสัมประสิทธิ์ของ BOD, TSS, TOC และ NH<sub>4</sub>-N ดังตารางที่ 2-2 ในการวิเคราะห์หาค่าคงที่ A และอัตราสัมประสิทธิ์ กำหนดใช้ค่า n = 0.5 จาก “Process Design Manual for Land Treatment of Municipal Wastewater” (US. EPA., 1981)

ตารางที่ 2-2. ค่าคงที่ A และ k

มลสาร	A	k (m/h)
TSS	0.44-0.96	0.024-0.056
BOD <sub>5</sub>	0.58-0.88	0.030-0.046
TOC	0.57-0.88	0.016-0.039
NH <sub>4</sub> -N	0.99-1.12	0.016-0.054

Smith and Shroeder (1985) ได้ทำการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการบำบัดแบบกระจายบนดินโดยระบบน้ำไหลนองของ BOD<sub>5</sub> และ TOC โดยใช้น้ำเสียที่ผ่านตะแกรงและน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดขั้นต้น ซึ่งผลที่ได้แสดงดังสมการ (2-7) และ (2-8)

BOD<sub>5</sub> model

$$\frac{(C - 5)}{C_0} = Ae^{-\frac{kZ}{q^n}} \quad (2-7)$$

TOC model

$$\frac{(C - 7)}{C_0} = A'e^{-\frac{kZ}{q^n}} \quad (2-8)$$

จากสมการ (2-7) และ (2-8) หมายถึงน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดโดยระบบน้ำไหลนองแล้ว จากแปลงทดลอง ค่าความเข้มข้นของ BOD<sub>5</sub> ที่วัดได้ที่จุดสุดท้ายออกมาไม่เป็นศูนย์ มีค่าอยู่ในช่วง 3-5 mg/L ส่วน TOC มีค่าอยู่ในช่วง 5-7 mg/L และจากผลการทดลองที่ได้ ค่า k และ n ดังตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2-3. สรุปค่าสัมประสิทธิ์แบบจำลอง BOD<sub>5</sub> และ TOC

การประยุกต์ใช้น้ำเสีย	ค่าสัมประสิทธิ์	
	k	n
การบำบัดขั้นต้น		
BOD <sub>5</sub>	0.043	0.136
TOC	0.038	0.170
น้ำเสียผ่านตะแกรง		
BOD <sub>5</sub>	0.030	0.402
TOC	0.032	0.350

## 2.6 การบำบัดน้ำทิ้งฟาร์มสุกร โดยระบบน้ำไหลนอง

Boda and Willrich (1976) ได้ศึกษาการบำบัดแบบกระจายบนดินของน้ำทิ้งฟาร์มสุกร จากบ่อคั้ง โดยระบบน้ำไหลนอง สรุปได้ว่า การบำบัดโดยวิธีนี้เป็นสาเหตุให้ความเข้มข้นของน้ำเสียลดลง และมวลสารของมวลสารลดลง การกำจัด BOD และความขุ่น กำจัดได้มากขึ้นเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้าม ความเข้มข้นของ PO<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub>-N และความเค็มจะถูกกำจัดได้ น้อยลงเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น

อัตราการไหลของน้ำเสียบนพื้นที่บำบัดที่มีค่าต่ำ จะมีร้อยละของการลดมวลสารสูงกว่าที่อัตราการไหลของน้ำเสียบนพื้นที่บำบัดที่มีค่าสูง อย่างไรก็ตาม คุณสมบัติของน้ำเสียที่จะบำบัดไม่มีผลต่ออัตราการไหลของน้ำเสียบนพื้นที่บำบัด

ในช่วงอากาศหนาว ร้อยละการลดลงของความเข้มข้นของความขุ่นและฟิโคลโคลิฟอร์มมีค่าสูงกว่าช่วงอากาศอบอุ่น ส่วนร้อยละการลดลงของความเข้มข้นของ PO<sub>4</sub> และความเค็ม ในช่วงอากาศอบอุ่นมีค่าสูงกว่าช่วงอากาศหนาว การเกิดไนตริฟิเคชันสูงในช่วงอากาศอบอุ่น

Hegg and Turner (1983) ได้ศึกษาการบำบัดแบบกระจายบนดินของน้ำเสียจากสัตว์ โดยระบบน้ำไหลนอง ซึ่งอัตราการไหลของน้ำเสียบนพื้นที่บำบัดที่มีค่าสูง 130 มิลลิเมตร/สัปดาห์ การกำจัด COD ต่ำกว่าอัตราการไหลของน้ำเสียบนพื้นที่บำบัดที่มีค่าต่ำ 40 มิลลิเมตร/สัปดาห์ การกำจัดไนโตรเจนรวมมีค่ามากกว่า 50 % ยกเว้นที่อัตราการไหลของน้ำเสียบนพื้นที่บำบัดที่มีค่าสูง และการกำจัดฟอสฟอรัสรวมมี ค่าสูงถึง 80 % เนื่องจากฟอสฟอรัสถูกดูดซึมโดยดินและพืช

## 2.7 ปริมาณเหย้าขนที่เก็บเกี่ยวได้

ปริมาณเหย้าขนที่เก็บเกี่ยวได้ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ได้แก่ การนำไปเป็นอาหารสัตว์ ซึ่งการที่นำเหย้าขนที่เก็บเกี่ยวได้ไปใช้ประโยชน์ ก็ถือว่าการบำบัดน้ำทิ้งแบบระบบน้ำไหลนองนี้ นอกจากจะช่วยทำให้ได้น้ำมีคุณภาพดีขึ้น แล้วยังได้พืชคลุมดินมาใช้ประโยชน์กลับคืนมาในเวลาเดียวกัน ดังนั้น การศึกษาปริมาณเหย้าขนที่เก็บเกี่ยวได้ในแต่ละช่วงเวลา สามารถนำมาทำนายการเจริญเติบโตหรือการเพิ่มขึ้นของประชากรเหย้าขนได้ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบระบบ

การทำนายปริมาณเหย้าขนที่เก็บเกี่ยวได้ จะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาแก้ปัญหา คือ Logistic growth เป็นรูปแบบการเจริญเติบโตแบบเอส (S-Shapes) สมมุติฐานดังสมการ (2-9) (Master, 1998)

$$\frac{dN}{dt} = rN \left( 1 - \frac{N}{K} \right) \quad (2-9)$$

โดยที่  $\frac{dN}{dt}$  คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงประชากร,  $r$  คืออัตราการเจริญเติบโต,  $N$  คือจำนวนประชากร และ  $K$  คือ Carrying capacity (ความสามารถในการเก็บเกี่ยวได้) ซึ่งสามารถแก้สมการได้ดังสมการ (2-10)

$$N = \frac{K}{1 + e^{-r(t-t^*)}} \quad (2-10)$$

โดยที่  $t^*$  คือเวลาที่  $N = K/2$  เมื่อแทน  $t = 0$  สามารถแก้  $t^*$  ได้ดังสมการ (2-11)

$$t^* = \frac{1}{r} \ln \left( \frac{K}{N_0} - 1 \right) \quad (2-11)$$

โดยที่  $N_0$  คือ จำนวนประชากรเริ่มต้น

### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินการวิจัย

เพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ COD, ปริมาณการเจริญเติบโตของหญ้าขนที่เก็บเกี่ยวได้ การทดลองระบบน้ำไหลนองทั้งหมดกระทำที่บริเวณอาคารศูนย์เครื่องมือ 5 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยใช้น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นจากบ่อฝัง และน้ำผิวดินจากอ่างเก็บน้ำ ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ทั้งนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 5 ชุด

การทดลองชุดที่ 1-4 เป็นการปลูกหญ้าขนเป็นพืชคลุมดิน แต่ละการทดลองจะทำการศึกษาที่ความชื้น 2%, 4%, 6% และ 8% และอัตราการไหลที่แตกต่างกัน 4 ค่า ใช้ระยะเวลาปล่อยน้ำเสียลงบนพื้นที่ 8 ชั่วโมงต่อวัน ทำการเก็บตัวอย่างน้ำทุกวัน จนระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ โดยพิจารณาจากการตรวจสอบทางสถิติสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของ COD มีค่าไม่เกิน 5% เพื่อนำไปวิเคราะห์คุณภาพน้ำ นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการบำบัดแบบกระจายบนดิน โดยระบบน้ำไหลนอง, ศึกษาปริมาณและการเจริญเติบโตของหญ้าขนที่เก็บเกี่ยวได้ โดยพิจารณาผลผลิตที่เก็บเกี่ยวได้เป็นผลผลิตน้ำหนักเปียกและน้ำหนักแห้ง

การทดลองชุดที่ 5 เป็นชุดควบคุม มีการปลูกหญ้าขนเป็นพืชคลุมดิน แต่จะใช้น้ำผิวดินจากอ่างเก็บน้ำของมหาวิทยาลัย การทดลองจะทำการศึกษาที่ความชื้น 2% และอัตราการไหลที่แตกต่างกัน 4 ค่า ใช้ระยะเวลาปล่อยน้ำเสียลงบนพื้นที่ 8 ชั่วโมงต่อวัน ทำการเก็บตัวอย่างน้ำทุกวัน จนระบบเข้าสู่สภาวะคงที่นำไปวิเคราะห์คุณภาพน้ำ, ศึกษาปริมาณและการเจริญเติบโตของหญ้าขนที่เก็บเกี่ยวได้เปรียบเทียบกับกรทดลองชุดที่ 1

#### 3.1 การศึกษาสารติดตาม

การศึกษาสารติดตาม (Tracer study) ของการบำบัดแบบกระจายบนดิน โดยระบบน้ำไหลนอง ใช้วิธีการแบบ slug feed โดยทำการใส่สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้น 25 กรัมต่อลิตร ทดลองที่อัตราการไหล 0.10 ลบ.ม.ต่อวัน ทำการเก็บตัวอย่างมาวิเคราะห์หาคลอไรด์ นำผลที่ได้มาคำนวณโดยวิธี “Method of moment” ดังสมการ (3-1) ถึง (3-3)



$$T_{\text{mean}} = \frac{\sum_{i=0}^t t_i c_i \Delta t}{\sum_{i=0}^t c_i \Delta t} \quad (3-1)$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=0}^t t_i c_i \Delta t}{\sum_{i=0}^t c_i \Delta t} - T_{\text{mean}}^2 \quad (3-2)$$

$$2d + 8d^2 = \frac{\sigma^2}{T_{\text{mean}}^2} \quad (3-3)$$

### 3.2 การวิเคราะห์คุณภาพน้ำตัวอย่าง

ทำการวิเคราะห์คุณภาพน้ำตัวอย่าง อันได้แก่ DO, pH, อุณหภูมิ, TSS, BOD, COD, TP,  $\text{NO}_3^-$ -N, TKN และ Coliform bacteria ตามวิธีการใน “Standard Methods” (1992) สรุปในตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1. วิธีการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์
ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำ (Dissolved Oxygen, DO; mg/L)	DO meter
ความเป็นกรด-เบส (pH)	pH meter
อุณหภูมิ (Temperature; $^{\circ}\text{C}$ )	Mercury thermometer
Total Suspended Solids (TSS; mg/L)	Dried at 103-105 $^{\circ}\text{C}$
Biochemical Oxygen Demand (BOD; mg/L)	5-Day BOD test
Chemical Oxygen Demand (COD; mg/L)	Open Dichromate Reflux
Total Phosphorus (TP; mg/L)	Colorimetric
Nitrate Nitrogen ( $\text{NO}_3^-$ -N; mg/L)	Colorimetric
Total Kjeldahl Nitrogen (TKN; mg/L)	Macro-Kjeldahl
Coliform Bacteria (Cells/100 mL)	Spread Plate Method

### 3.3 การสร้างแบบจำลอง

ทำการสร้างแบบจำลองระบบน้ำไหลนองจำนวน 5 แปลง แต่ละแปลงมีขนาดกว้าง 1.5 เมตร ยาว 4 เมตร มีความลาดชัน 2%, 4%, 6%, 8% และแปลงควบคุมมีความลาดชัน 2% ภายในแปลงปูพื้นด้วยพลาสติก เพื่อป้องกันการรั่วซึม ก่อนใส่ดินหนา 0.30 เมตร ซึ่งจะบดอัดเล็กน้อย แล้วทำการปลูกต้นหญ้าขนเป็นพืชคลุมดินในแต่ละแปลง โดยการใช้ท่อนพันธุ์คือ ส่วนของลำต้นที่ติดกับราก การกระจายน้ำบนแปลงทดลองใช้วิธีท่อเจาะรูด้านข้าง โดยใช้ ท่อ PVC ขนาด 18 มิลลิเมตร ต่อกับถังเก็บน้ำเสียที่นำมาจากบ่อฝังของฟาร์มสุกร ควบคุมปริมาณน้ำเข้าแปลงด้วยประตุน้ำ น้ำที่ถึงจากแปลงทดลองนั้นจะไหลลงสู่รางรับน้ำทิ้ง ดังรูปที่ 3-1

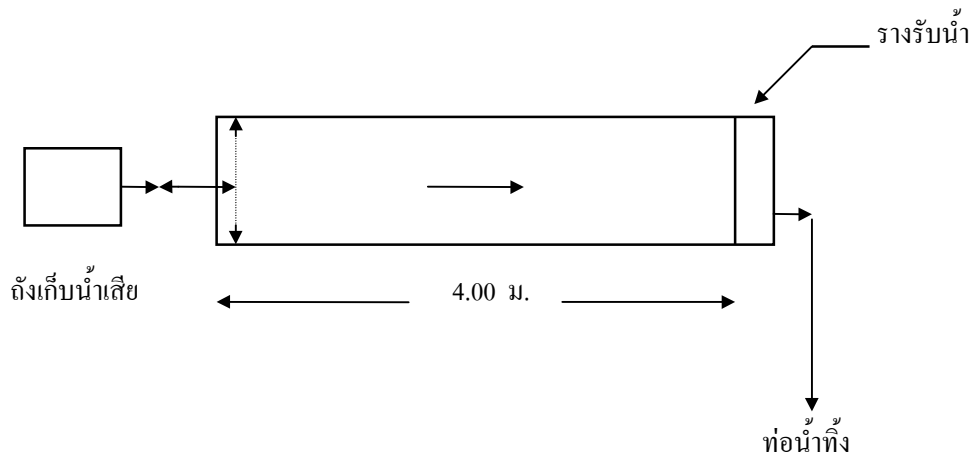
### 3.4 สถานที่ทำการวิจัย

สถานที่ทำการทดลอง การทดลองทั้งหมดกระทำที่บริเวณอาคารศูนย์เครื่องมือ 5 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และการวิเคราะห์คุณภาพน้ำใช้ห้องปฏิบัติการสาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม อาคารศูนย์เครื่องมือ 5 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

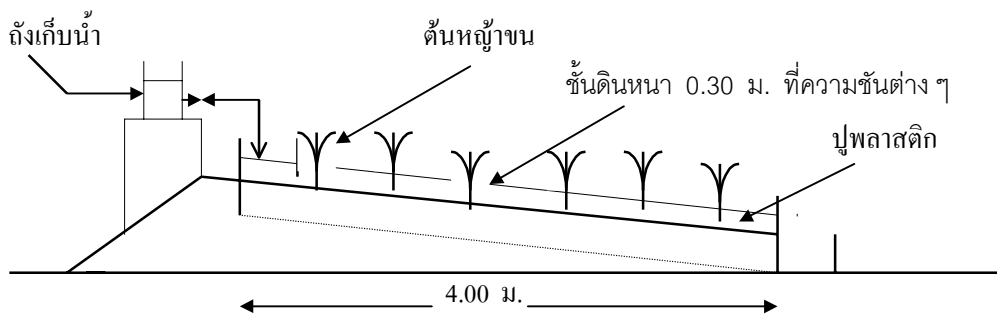
### 3.5 น้ำตัวอย่าง

น้ำตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัย เป็นน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และน้ำผิวดินจากอ่างเก็บน้ำของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

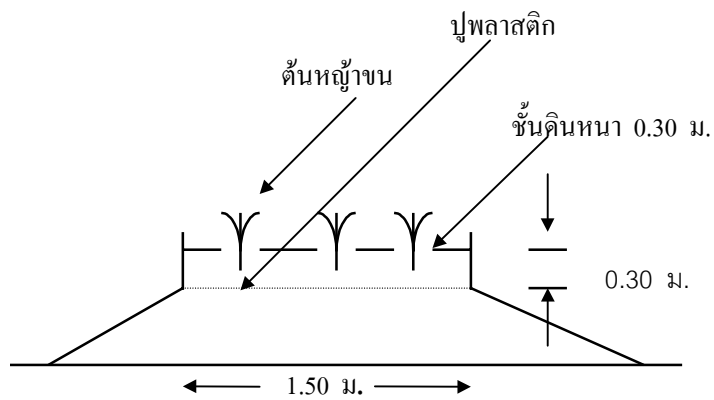
ฟาร์มสุกรมหาวิทยาลัย มีจำนวนสุกรทั้งหมดประมาณ 800 ตัว รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 3-2 มีปริมาตรน้ำเสียประมาณ 28,000 ลิตรต่อวัน มีการล้างทำความสะอาดโรงเรือน 2 ครั้งต่อวัน เวลาเช้า-เย็น ครั้งละประมาณ 30 นาที น้ำเสียจะผ่านการบำบัดตามลำดับขั้นตอนดังนี้ คือ น้ำเสียที่เกิดจากการล้างคอกไหลลงบ่อดักตะกอนบ่อแรก มูลสุกรที่ติดมากับน้ำเสียจะผ่านเข้าเครื่องเหวี่ยงรีดน้ำเพื่อนำไปใช้เป็นปุ๋ยต่อไป หลังจากนั้น น้ำเสียจะไหลลงบ่อดักตะกอนบ่อที่ 2



(ก) แปลน



(ข) รูปตัดตามยาว



(ค) รูปตัดตามขวาง

รูปที่ 3-1. แบบจำลองระบบน้ำไหลนอง

แต่ละบ่อมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 เมตร ลึก 5 เมตร เมื่อน้ำเสียผ่านบ่อตกตะกอนแล้วจะไหลลงสู่บ่อฝิ่ง ซึ่งมีบ่อฝิ่งจำนวน 2 บ่อ แต่ละบ่อมีขนาด 20\*20 เมตร ลึก 2-3 เมตร ดังรูปที่ 3-2 น้ำเสียจากบ่อฝิ่งจะไม่มี การปล่อยลงพื้นที่อื่น ปล่อยให้ระเหยเองตามธรรมชาติ น้ำเสียที่ใช้ทำการทดลองจะนำมาจากบ่อฝิ่งบ่อที่สอง

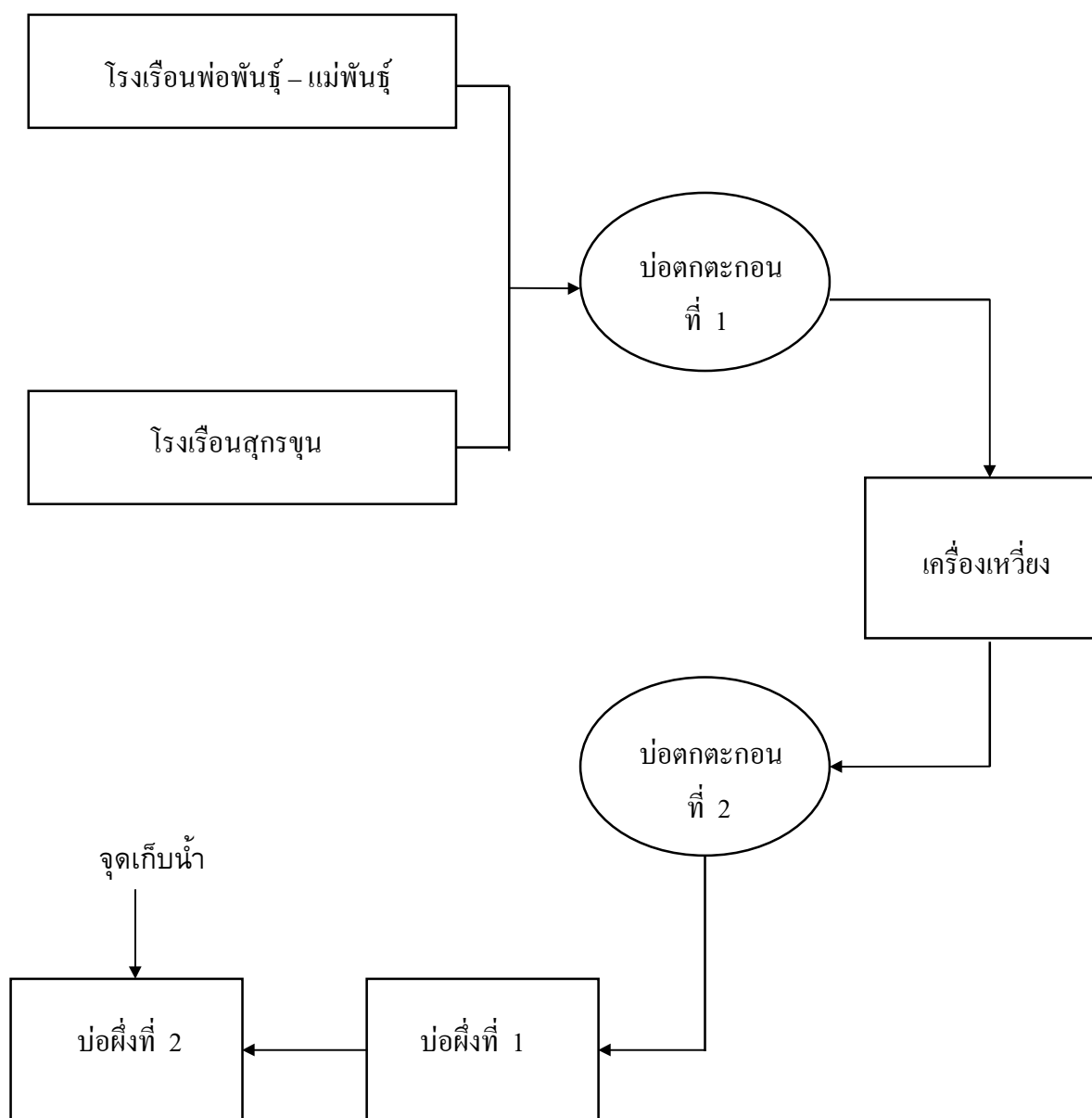
ตารางที่ 3-2. จำนวนสุกรของฟาร์มสุกรมมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (สำรวจเมื่อกรกฎาคม 2542)

ประเภท	น้ำหนักตัว (กิโลกรัม)	จำนวน (ตัว)
สุกรเล็ก	15	114
สุกรหย่านม	30	221
สุกรขุน	70	150
สุกรขุน	90	200
แม่สุกร ไม่อู้มท้อง	125	75
แม่สุกรเลี้ยงลูก	170	30
พ่อพันธุ์	160	8

### 3.6 การดำเนินการวิจัย

ก่อนการดำเนินการวิจัย ทำการเตรียมแปลงทดลองจำนวน 5 แปลง ซึ่งแต่ละแปลงมีขนาดกว้าง 1.5 เมตร ยาว 4 เมตร มีความลาดชัน 2%, 4%, 6%, 8% และแปลงควบคุมมีความลาดชัน 2% ภายในแปลงปูพื้นด้วยพลาสติก ใ้ส่ดินหนา 0.30 เมตร และดำเนินการวิจัยตามขั้นตอนดังนี้คือ

1. ทำการปลูกต้นหญ้าขนบนแปลงทดลองทั้ง 5 แปลง โดยให้ระยะปลูกระยะระหว่างต้นและระยะระหว่างแถวเท่ากันคือ 50\*50 เซนติเมตร ใช้ระยะเวลาประมาณ 2 สัปดาห์ เพื่อให้ต้นหญ้าขนลำต้นตั้งตรง
2. กำหนดอัตราการไหล, อัตราการไหลของน้ำเสียบนพื้นที่บำบัด และระยะเวลาที่ปล่อยน้ำเสีลงบนพื้นที่ ดังแสดงในตารางที่ 3-3
3. ปล่อยน้ำเสียเข้าสู่ระบบการทดลองทั้ง 4 ชุด และปล่อยน้ำสะอาดเข้าสู่ระบบการทดลองชุดที่ 5 ตามข้อกำหนดในตารางที่ 3-3 แล้วทำการเก็บตัวอย่างน้ำทุกวัน จุดที่เก็บตัวอย่างเลือกจุดน้ำเข้า และจุดน้ำออกแล้วนำไปวิเคราะห์คุณภาพน้ำ



รูปที่ 3-2. การจัดการน้ำเสียฟาร์มสุกรของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 3-3. กำหนดกาลและสภาพการทดลองระบบน้ำไหลนอง

	การทดลองครั้งที่			
	1	2	3	4
อัตราการไหล ( $m^3/d$ )	0.10	0.12	0.15	0.18
อัตราการทางชลศาสตร์ (cm/d)	1.7	2.0	2.5	3.0
อัตราการไหลของน้ำเสียนบนพื้นที่บำบัด <sup>(1)</sup> ( $cm^3/cm-h$ )	85	100	125	150
ระยะเวลาที่ปล่อยน้ำเสียนบนพื้นที่	← 8 ชั่วโมง/วัน →			
ระยะเวลาทดลอง	← ระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ →			
การเก็บน้ำตัวอย่างน้ำ	← ทุกวัน →			

<sup>(1)</sup> คำนวณจากสมการ (2-1)

### 3.7 การเก็บรวบรวมและบันทึกข้อมูล

ทำการเก็บน้ำตัวอย่างมาวิเคราะห์คุณภาพน้ำทุกวัน จนกว่าระบบจะเข้าสู่สภาวะคงที่ โดยการเก็บน้ำตัวอย่างซึ่งจะพิจารณาดังนี้ คือ

1. จะทำการเก็บน้ำตัวอย่างที่จุดน้ำเข้า และจุดน้ำออก มาวิเคราะห์หาค่า COD, DO, pH และอุณหภูมิ เพื่อประเมินการเข้าสู่สภาวะคงที่ของระบบ
2. จะทำการเก็บน้ำตัวอย่างที่จุดน้ำเข้า และจุดน้ำออก มาวิเคราะห์หาค่า TSS, BOD, TP,  $NO_3^-$ -N, TKN และ Coliform bacteria หลังจากระบบเข้าสู่สภาวะคงที่แล้ว

ทำการตัดหญ้าขนทุก 45 วัน หรือเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ แล้วทำการวัดน้ำหนักเปียกและน้ำหนักแห้ง เพื่อนำผลไปคำนวณหาผลผลิตน้ำแห้งของหญ้า

### 3.8 การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวอย่างจะถูกนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าเฉลี่ย (Mutiple factors ANOVA) ในการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างข้อมูล ณ ระดับความเชื่อมั่นทางสถิติ 95%, วิเคราะห์หาประสิทธิภาพของระบบและค่า

คงที่ต่าง ๆ ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และวิเคราะห์หาปริมาณและการเจริญเติบโตของหญ้า  
 ขนที่เก็บเกี่ยวได้จากแบบจำลองการเติบโตแบบ Logistic

### 3.9 ตัวแปรที่ทำการวิจัย

ตัวแปรที่ทำการวิจัยจะพิจารณาแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ ตัวแปรอิสระ, ตัวแปร  
 ตาม และตัวแปรควบคุม ซึ่งแสดงรายละเอียด ดังตารางที่ 3-4

ตารางที่ 3-4. ตัวแปรที่ทำการวิจัย

ตัวแปรอิสระ (Independent Variable)	ตัวแปรตาม (Dependent Variable)	ตัวแปรควบคุม (Control Variable)
อัตราการไหล อัตราการไหลของน้ำเสียนพื้นที่บำบัด อัตราการระเหยทางชลศาสตร์ ชนิดของน้ำที่ทำการทดลอง	DO TSS BOD COD TP NO <sub>3</sub> -N TKN อุณหภูมิ pH	ขนาดแปลงทดลอง ความลาดชัน ชนิดของพืช ชนิดของดิน

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิจารณ์ผล

#### 4.1 การศึกษาสารติดตาม

การศึกษาสารติดตาม (Tracer study) ของการบำบัดแบบกระจายบนดิน โดยระบบน้ำไหลนอง ใช้วิธีการแบบ slug feed โดยทำการใส่สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้น 25 กรัมต่อลิตร ทดลองที่อัตราการไหล 0.10 ลบ.ม.ต่อวัน ก่อนทำการทดลองตรวจสอบคลอไรด์ในน้ำประปา พบว่ามีคลอไรด์อยู่ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งข้อมูลดิบและการคำนวณแสดงในภาคผนวก ก

จากการศึกษาสารติดตามใช้การคำนวณโดยวิธี “Method of moment” ดังสมการ (3-1) ถึง (3-3) พบว่าค่าเวลากลาง ( $T_{\text{mean}}$ ) มีค่าเท่ากับ 173.36 นาที ส่วนค่าความแปรปรวนมีค่า 7780.3 และจำนวนการกระจาย ( $d$ ) มีค่า 0.094 ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง  $0 < d < 0.2$  บอกถึงถึงบำบัดน้ำเสียเป็นแบบท่อ และจะนำค่า  $T_{\text{mean}}$  มาคำนวณหาระยะทาง [ $Z=(Q/A)* T_{\text{mean}}$ ] ที่จะใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่อไปจากสมการ (4-1)

$$T_{\text{mean}} = \frac{\sum_{i=0}^t t_i c_i \Delta t}{\sum_{i=0}^t c_i \Delta t} \quad (3-1)$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=0}^t t_i^2 c_i \Delta t}{\sum_{i=0}^t c_i \Delta t} - T_{\text{mean}}^2 \quad (3-2)$$

$$2d + 8d^2 = \frac{\sigma^2}{T_{\text{mean}}^2} \quad (3-3)$$



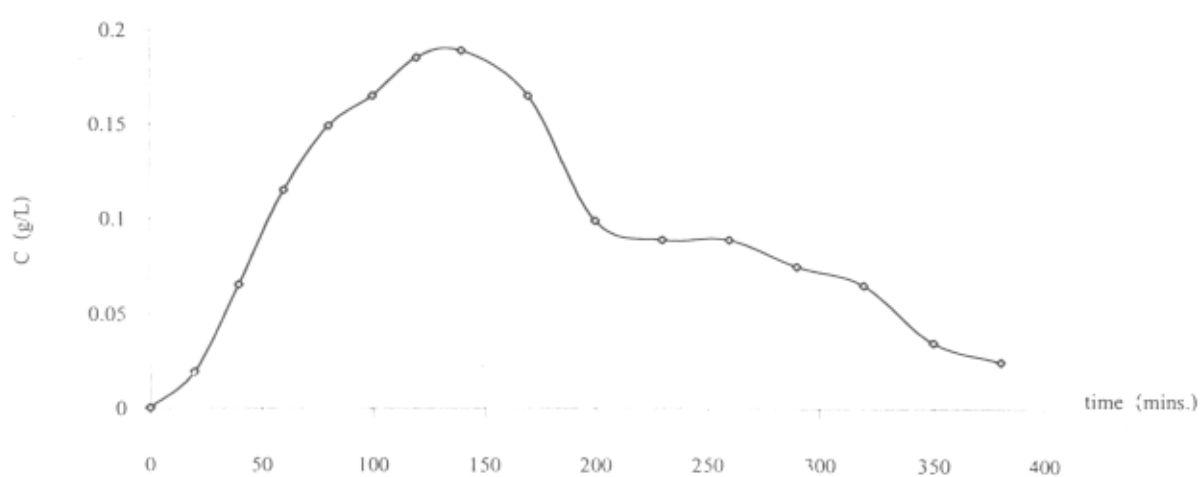
$$Q = \frac{\text{Volume}}{\text{time}} \quad (4-1)$$

$$= \frac{w \times h \times z}{t}$$

$$z = \frac{Q \times t}{w \times h}$$

$$= \frac{Q \times t}{A}$$

โดยที่	$Q$	=	อัตราการไหล, $\text{m}^3/\text{d}$
	$W$	=	ความกว้างแปลงทดลอง, m
	$h$	=	ความสูงของระดับน้ำ, m
	$Z$	=	ความยาวของแปลงทดลอง, m
	$t$	=	เวลา, min



รูปที่ 4-1. ความสัมพันธ์ระหว่าง C กับ time ของการศึกษาศารคดีตาม

รูปที่ 4-1 เป็นกราฟการศึกษาสารติดตามของความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของคลอไรด์ที่เหลืออยู่กับเวลา พบว่าลักษณะกราฟที่ได้เป็นรูปประฆังคว่ำ คือ เมื่อเริ่มต้นทดลองความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ออกมามีค่าน้อย และค่อย ๆ มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป จนกระทั่งถึงจุดจุดหนึ่งที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์มีค่าสูงที่สุด และจะค่อย ๆ ลดลงจนเกือบเป็นศูนย์ ที่กราฟมี ลักษณะเช่นนี้ อาจเนื่องมาจากในช่วงเริ่มต้นความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ยังไหลมาไม่ถึงหรือเพิ่งจะไหลมาถึงจุดออก เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ก็จะค่อย ๆ ไหลมายังจุดออกจนกระทั่งที่จุดออกวัดคลอไรด์ได้เกือบเป็นศูนย์

## 4.2 การวิเคราะห์คุณภาพน้ำตัวอย่าง

จากการทดลองระบบน้ำไหลนองได้ทำการวิเคราะห์คุณภาพน้ำตัวอย่างที่นำมาใช้ในการทดลอง ซึ่งได้แก่ น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร จากบ่อฝังและน้ำผิวดินจากอ่างเก็บน้ำ ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี แสดงดังในตารางที่ 4-1 โดยทำการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ อันได้แก่ DO, pH, อุณหภูมิ, COD, BOD, TSS, TP,  $\text{NO}_3^-$ -N, TKN และ Coliform bacteria ตามวิธีการใน “Standard Methods” (1992)

### 4.2.1 น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรจากบ่อฝัง ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

จากการวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร จากบ่อฝัง ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี แสดงในตารางที่ 4-1 โดยค่า DO, pH และอุณหภูมิ จะทำการวัดที่จุดเก็บน้ำ ซึ่งค่า DO เฉลี่ย 1.4 mg/L จะเห็นได้ว่าค่าออกซิเจนละลายในน้ำมีค่าน้อย ถึงแม้ว่าน้ำจะได้รับการบำบัดจากบ่อฝังมาก่อน แสดงว่าน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรมีความสกปรกสูง, pH อยู่ในช่วง 7.1-9.4 และอุณหภูมิ อยู่ในช่วง 19.5-33.5 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าไม่สูงมากนัก เนื่องจากการวัดอุณหภูมิอยู่ในช่วงฤดูหนาว และเก็บน้ำตัวอย่างมาวิเคราะห์ในห้องทดลองได้ค่า COD 666.3-705.6 mg/L, BOD 300-342 mg/L ซึ่งอัตราส่วนของ BOD/COD อยู่ในช่วง 0.43-0.51 ค่า COD และ BOD มีค่าสูง เนื่องจากน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรที่ผ่านการบำบัดจากบ่อฝังมาแล้ว มีปริมาณสารอินทรีย์มาก ทำให้ปริมาณออกซิเจนที่ใช้ในการออกซิเดชันสารอินทรีย์ และการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำสูง ส่วนค่า TSS 172-404 mg/L มีค่าสูง แสดงว่าในน้ำมีของแข็งแขวนลอยมาก ซึ่งรวมถึงสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์, TP 49.3-115.4 mg/L,  $\text{NO}_3^-$ -N 0.5-0.9 mg/L, TKN 42-83.7 mg/L และ Coliform bacteria  $1.2 \times 10^7$ - $2.9 \times 10^7$  cells/100 ml ค่า TP และ TKN มีค่าสูง ซึ่งในโตรเจน

และฟอสฟอรัสเป็นอาหารหลักที่สำคัญสำหรับการเจริญเติบโตของพวกจุลินทรีย์ต่าง ๆ และพืช ดังนั้น น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรที่ผ่านการบำบัดจากบ่อฝิ่งมีค่าไนโตรเจนและฟอสฟอรัสสูง ถ้ายังไม่ได้รับการบำบัดแล้วทิ้งลงสู่น้ำลำคลอง จะทำให้เกิดปัญหา คือมีการเจริญเติบโตของสาหร่ายมาก ซึ่งจะทำให้สิ่งแวดล้อมและระบบนิเวศน์ในแม่น้ำลำคลองนั้น ๆ เสื่อมเสียไปได้

ตารางที่ 4-1. การวิเคราะห์คุณสมบัติน้ำตัวอย่าง

พารามิเตอร์	น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร บ่อฝิ่งที่ 2		น้ำผิวดินจากอ่างเก็บน้ำสระ 1	
	ช่วง	ค่าเฉลี่ย	ช่วง	ค่าเฉลี่ย
DO (mg/L)	0.2-6.3	1.4	7.1-9.4	8.3
pH	7.1-9.4	7.8	6-8.6	7.0
อุณหภูมิ (C <sup>0</sup> )	19.5-33.5	28.4	19-32.8	27.6
COD (mg/L)	666.3-705.6	683.4	23.4-36.3	29.6
BOD (mg/L)	300-342	317	12.5-14.4	13.0
TSS (mg/L)	172-404	325.3	12-25	17.4
TP (mg/L)	49.3-115.4	92.6	-	-
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N (mg/L)	0.5-0.9	0.7	-	-
TKN (mg/L)	42-83.7	65.7	0.6-2.7	1.23
Coliform bacteria (cells/100 ml)	1.2x10 <sup>7</sup> -2.9x10 <sup>7</sup>	2.3x10 <sup>7</sup>	6.4x10 <sup>4</sup> -8.4x10 <sup>4</sup>	6.9x10 <sup>4</sup>

#### 4.2.2 น้ำผิวดินจากอ่างเก็บน้ำ ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

จากการวิเคราะห์คุณสมบัติของผิวดินจากอ่างเก็บน้ำ ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี แสดงในตารางที่ 4-1 โดยค่า DO, pH และอุณหภูมิ จะทำการวัดที่จุดเก็บน้ำ ซึ่งค่า DO อยู่ในช่วง 7.1-9.4 mg/L, pH อยู่ในช่วง 6-8.6 และอุณหภูมิ อยู่ในช่วง 19-32.8 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าไม่สูงมากนัก เนื่องจากการวัดอุณหภูมิอยู่ในช่วงฤดูหนาว และเก็บน้ำตัวอย่างมาวิเคราะห์ในห้องทดลอง ได้ค่า COD 23.4-36.3 mg/L, BOD 12.5-14.4 mg/L ซึ่งอัตราส่วนของ BOD/COD อยู่ในช่วง 0.36-0.54 ค่า COD และ BOD มีค่าไม่สูงมากนัก ค่า TSS 12-25 mg/L, TKN 0.6-2.7 mg/L และ Coliform bacteria 6.4x10<sup>4</sup>-8.4x10<sup>4</sup> cells/100 ml ส่วนค่า TP และ NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N มีค่าน้อยมากหรือเป็นศูนย์ โดยสรุปแล้ว จะเห็นได้ว่าค่าต่าง ๆ ของคุณสมบัติของน้ำผิว

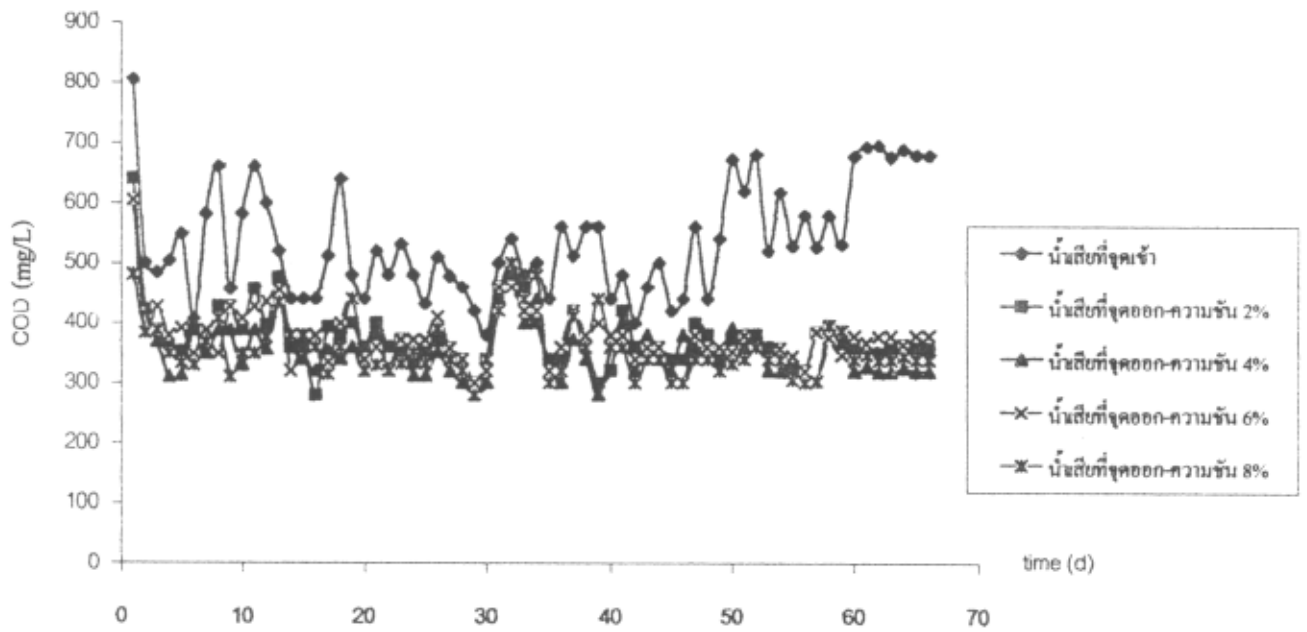
ดินจากอ่างเก็บน้ำ มีค่าไม่สูงมากนักหรือบางพารามิเตอร์ เช่น TP และ  $\text{NO}_3^-$ -N มีค่าน้อยมาก หรือเป็นศูนย์ เนื่องจากน้ำผิวดินจากอ่างเก็บน้ำ ยังเป็นน้ำที่ได้รับการปนเปื้อนน้อยมาก

### 4.3 ประสิทธิภาพของระบบน้ำไหลนอง

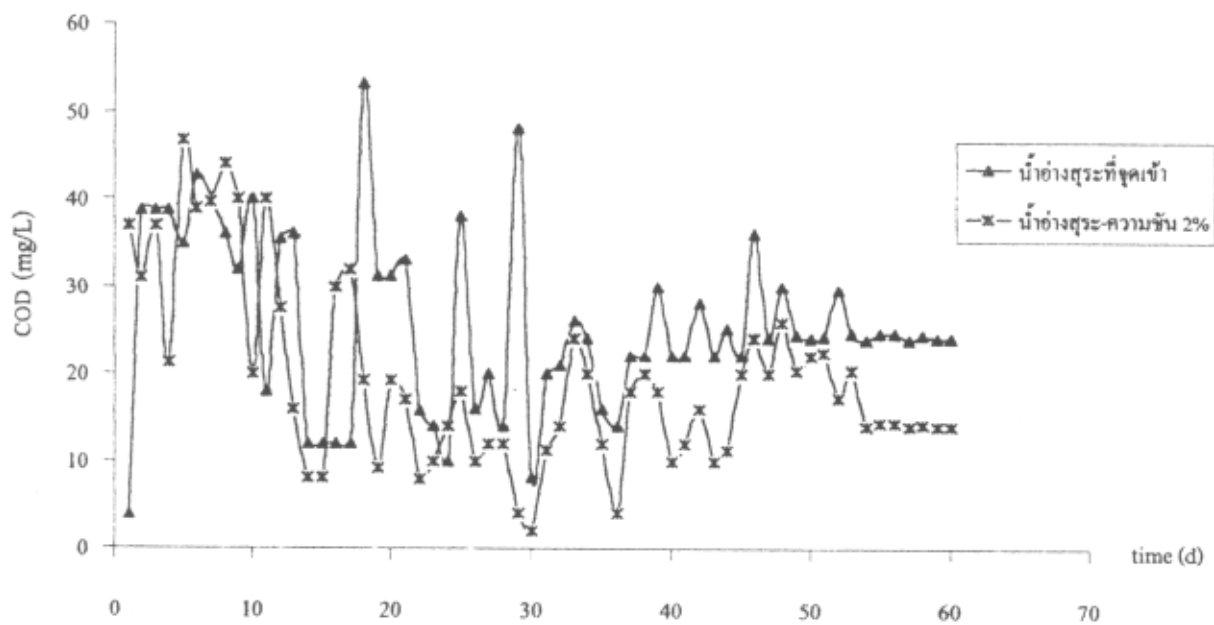
จากการทดลองระบบน้ำไหลนอง ใช้น้ำตัวอย่างจากน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร จากบ่อฝั่ง และน้ำผิวดินจากอ่างเก็บน้ำ ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยน้ำตัวอย่างที่เป็นน้ำเสียจะระบายลงสู่แปลงที่มีความชัน 2%, 4%, 6% และ 8% และส่วนที่เป็นน้ำผิวดินจะระบายเข้าสู่แปลงที่มีความชัน 2% ซึ่งแต่ละแปลงทดลองทำการศึกษาระบบด้วยอัตราการไหลที่แตกต่างกัน 4 ค่า ได้แก่ 0.10, 0.12, 0.15 และ 0.18 ลบ.ม.ต่อวัน แต่ละอัตราการไหลจะต้องทำการทดลองจนระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ การตรวจสอบทางสถิติพบว่า สัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของ COD มีค่าไม่เกิน 5% ซึ่งสามารถยอมรับได้ว่าระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ ซึ่งแสดงได้ดังรูป 4-2 ถึง 4-9 ส่วนผลการทดลองและการวิเคราะห์ทางสถิติแสดงใน ภาคผนวก ข

เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ ทำการศึกษาค่า COD, BOD, TSS, TP,  $\text{NO}_3^-$ -N, TKN และ Coliform bacteria ซึ่งประสิทธิภาพของระบบแสดงได้ในภาคผนวก ข การเปรียบเทียบการวิเคราะห์คุณภาพน้ำก่อนและหลังการบำบัด ดังในตารางที่ 4-2 จากการเปรียบเทียบคุณภาพน้ำหลังการบำบัดกับมาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมพบว่า น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดมีค่า BOD 166.5 mg/L ซึ่งมีค่ามากกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมที่กำหนดไว้คือ 20 mg/L ดังนั้น น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้วควรนำไปบำบัดต่อเพื่อให้ได้คุณภาพน้ำทิ้งตามมาตรฐานกำหนด

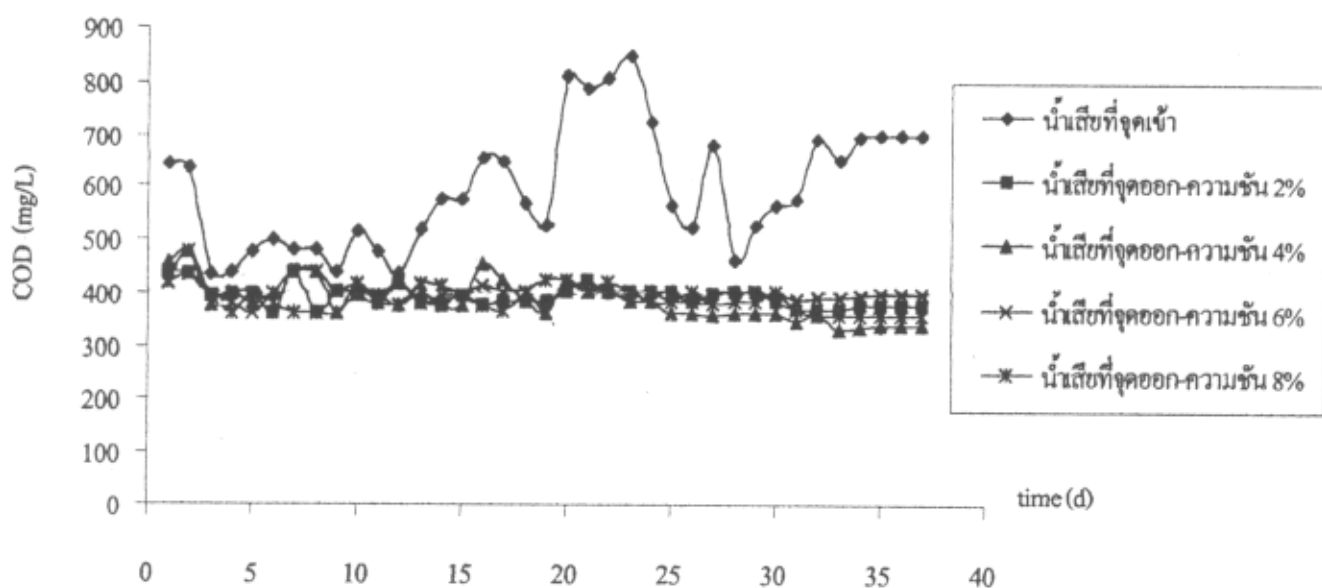
ตารางที่ 4-3 แสดงประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรแบบกระจายบนดิน โดยระบบน้ำไหลนองพบว่า ร้อยละการลดลงของ COD, BOD, TSS และ TKN มีค่าลดลงเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเนื่องมาจากเมื่ออัตราการไหลช้า ทำให้เกิดการตกตะกอน, การกรอง, การย่อยสลายสารอินทรีย์ และการดูดซึมได้ดีกว่าเมื่ออัตราการไหลสูงขึ้น เหมือนดังที่ Boda และ Willrich (1975) กล่าวไว้ว่าเช่นเดียวกัน คือ อัตราการไหลของน้ำเสียบนพื้นที่บำบัดที่มีค่าต่ำ จะมีร้อยละของการลดมลสารสูงกว่าอัตราการไหลของน้ำเสียบนพื้นที่บำบัดที่มีค่าสูง



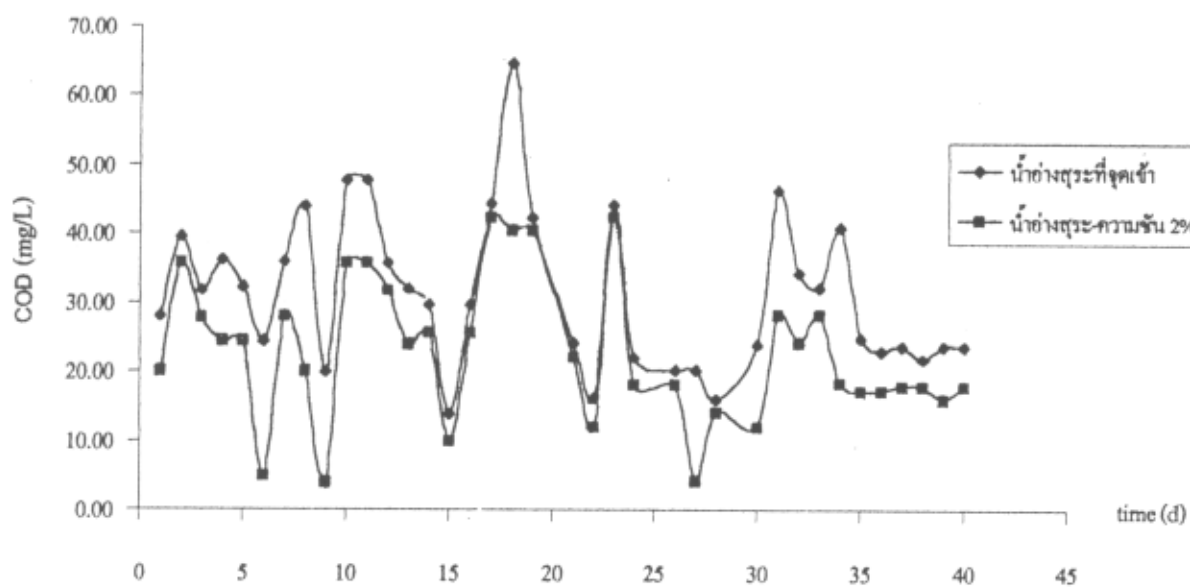
รูปที่ 4-2. แปลงทดลองน้ำเสียฟาร์มสุกรที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ด้วยอัตราการไหล  $0.10 \text{ m}^3/\text{d}$



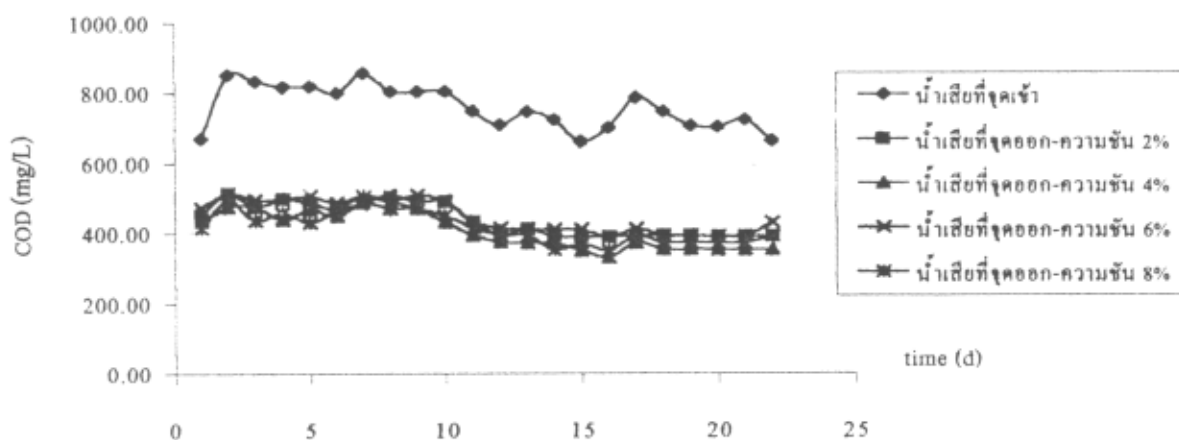
รูปที่ 4-3. แปลงทดลองน้ำอย่างสุระ 1 ที่ความเข้มข้น 2% ด้วยอัตราการไหล  $0.10 \text{ m}^3/\text{d}$



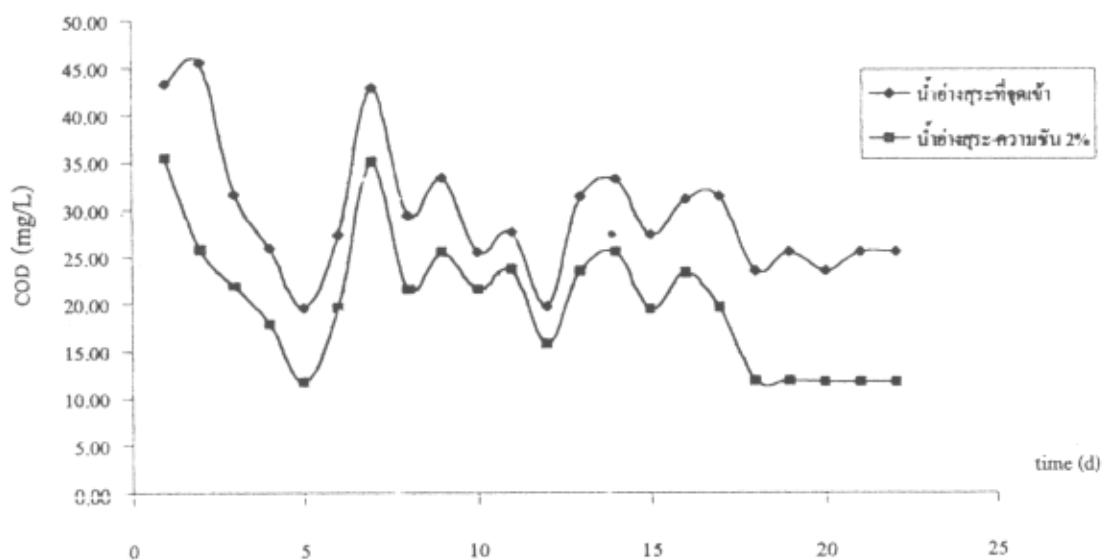
รูปที่ 4-4. แปลงทดลองน้ำเสียฟาร์มสุกรที่ความชื้นต่างๆ ด้วยอัตราการไหล  $0.12 \text{ m}^3/\text{d}$



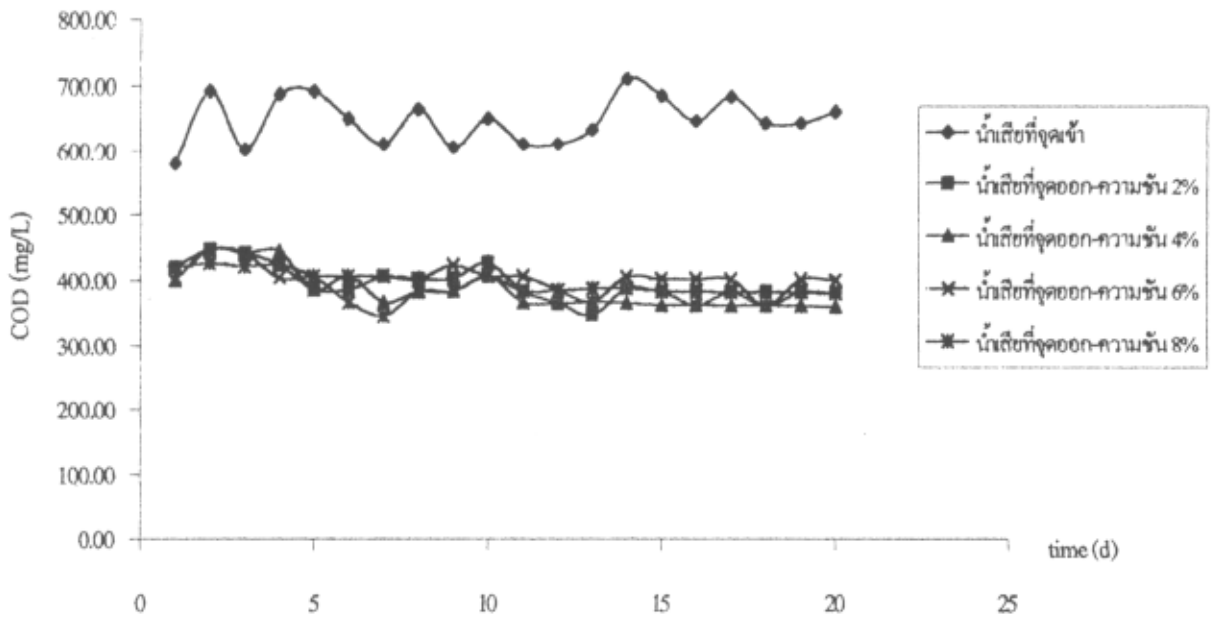
รูปที่ 4-5. แปลงทดลองน้ำอ่างสระ 1 ที่ความชื้น 2% ด้วยอัตราการไหล  $0.12 \text{ m}^3/\text{d}$



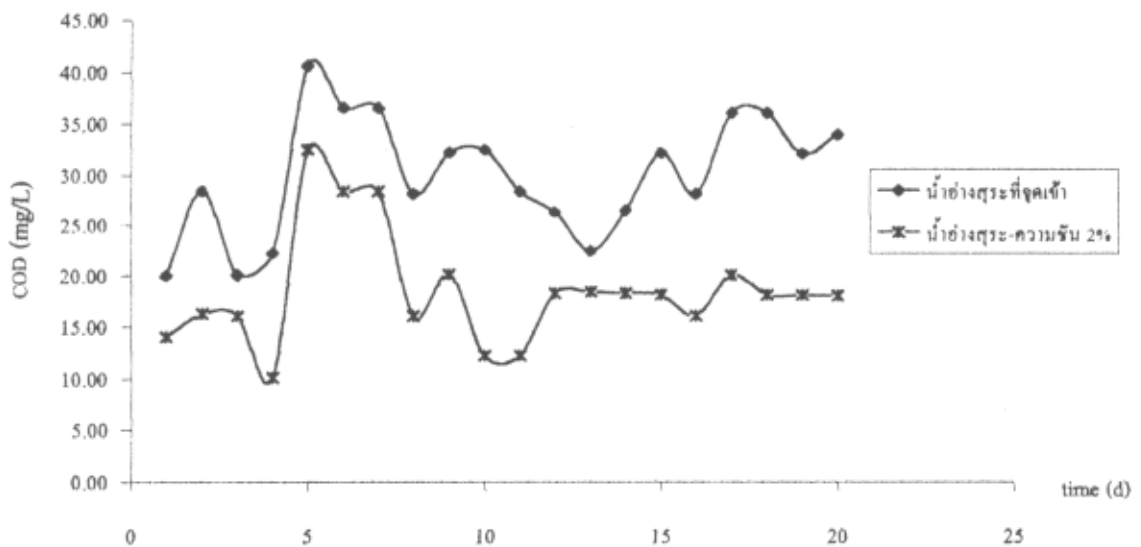
รูปที่ 4-6. แปลงทดลองน้ำเสียฟาร์มสุกรที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ด้วยอัตราการไหล  $0.15 \text{ m}^3/\text{d}$



รูปที่ 4-7. แปลงทดลองน้ำอย่างสุระ 1 ที่ความเข้มข้น 2% ด้วยอัตราการไหล  $0.15 \text{ m}^3/\text{d}$



รูปที่ 4-8. แปลงทดลองน้ำเสียฟาร์มสุกรที่ความชื้นต่างๆ ด้วยอัตราการไหล  $0.18 \text{ m}^3/\text{d}$



รูปที่ 4-9. แปลงทดลองน้ำอย่างสุระ 1 ที่ความชื้น 2% ด้วยอัตราการไหล  $0.18 \text{ m}^3/\text{d}$



ตารางที่ 4-2. การวิเคราะห์คุณภาพน้ำก่อนและหลังการบำบัดที่อัตราการไหล 0.10 m<sup>3</sup>/d

พารามิเตอร์	ค่าเฉลี่ยน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร		ค่าเฉลี่ยน้ำอ่างเก็บน้ำ	
	ก่อนการบำบัด	หลังการบำบัด	ก่อนการบำบัด	หลังการบำบัด
DO (mg/L)	1.4	6.8	8.3	8.4
PH	7.8	7.5	7.0	7.0
อุณหภูมิ (C <sup>0</sup> )	28.4	26.2	27.6	26.4
COD (mg/L)	683.4	349.6	29.6	14.0
BOD (mg/L)	317	166.5	13.0	12.1
TSS (mg/L)	325.3	206.3	17.4	4.1
TP (mg/L)	92.6	65.2	0	0
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N (mg/L)	0.7	0.6	0	0
TKN (mg/L)	65.7	34	1.2	1.0
Coliform bacteria (cells/100 ml)	2.3x10 <sup>7</sup>	5.6x10 <sup>6</sup>	6.9x10 <sup>4</sup>	2.57x10 <sup>4</sup>

ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรแบบกระจายบนดิน โดยระบบน้ำไหลนอง อัตราการลดค่า COD อยู่ในช่วง 42-49% และอัตราการลดค่า BOD อยู่ในช่วง 37-49% กลไกสำคัญ ๆ ที่ทำให้เกิดการลดค่า COD และ BOD คือการย่อยสลายสารอินทรีย์ทางเคมีและชีววิทยา

ตารางที่ 4-3. ประสิทธิภาพของระบบน้ำไหลนอง

ตัวแปร	%การกำจัด				
	อัตราการไหล (m <sup>3</sup> /d)				ค่าเฉลี่ย
	0.10	0.12	0.15	0.18	
COD	48.7	46.2	46.1	42.4	45.8±2.6
BOD	49.5	41.4	40.3	36.9	42.0±5.3
TSS	41.6	39.6	36.9	35.5	38.4±2.4
TP	28.5	29.7	29.6	28.0	28.9±0.8
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	17.9	15.5	15.0	13.9	15.6±1.7
TKN	45.0	41.4	38.2	36.9	40.4±3.6
โคลิฟอร์มแบคทีเรีย	53.7	52.3	52.0	52.1	52.5±0.8

เมื่อพิจารณาการลดค่า COD และ BOD จากอัตราการไหลพบว่า ที่อัตราการไหลต่ำ มีความสามารถในการบำบัดได้ดีกว่าที่อัตราการไหลสูงขึ้นตามลำดับ เนื่องจากที่อัตราการไหลช้า การย่อยสลายสารทางเคมีและชีววิทยาเกิดขึ้นได้ดีกว่าที่อัตราการไหลสูงขึ้น

ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยรวม (TSS) กล่าวได้ว่า อัตราการลดลงอยู่ในช่วง 36-42% กลไกสำคัญ ๆ ที่ ทำให้การลดค่า TSS คือ การตกตะกอน, การกรองผ่านชั้นดิน และกรองผ่านรากพืช เมื่อพิจารณาอัตราการลดค่า TSS จากอัตราการไหลพบว่า ที่อัตราการไหลต่ำมีความสามารถในการบำบัดได้ดีกว่าที่อัตราการไหลสูง เนื่องจากที่อัตราการไหลต่ำการตกตะกอน การกรองผ่านชั้นดินและกรองผ่านรากพืชเกิดขึ้นได้ดีกว่าที่ อัตราการไหลสูง

ประสิทธิภาพการกำจัดของฟอสฟอรัสรวม (TP), ไนเตรท-ไนโตรเจน ( $\text{NO}_3^-$ -N) และ ทีเคเอ็น (TKN) พบว่าอัตราการลดลงของฟอสฟอรัสรวมมีค่าอยู่ในช่วง 28-30% ในแต่ละอัตราการไหล อัตราการลดลงของฟอสฟอรัสรวมมีค่าไม่แตกต่างกัน กลไกสำคัญที่ทำให้เกิดการลดค่าฟอสฟอรัสรวม ได้แก่ การดูดติดผิว, การตกตะกอนและพืชนำไปใช้

ส่วนไนเตรท-ไนโตรเจน เนื่องจากในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยระบบน้ำไหลนอง มี ไนเตรท-ไนโตรเจน อยู่ในช่วง 0.46-0.69 มิลลิกรัมต่อลิตร และอัตราการลดลงอยู่ในช่วง 14-18% กลไกสำคัญที่ทำให้เกิดการลดไนเตรท-ไนโตรเจน คือ การเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน เนื่องจากในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยระบบน้ำไหลนองนี้มีค่า BOD ก่อนข้างสูง จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน และปฏิกิริยานี้จะเกิดในชั้นดินที่ไร้ออกซิเจน ซึ่งส่งผลให้ไนเตรท-ไนโตรเจน ถูกเปลี่ยนเป็นแก๊สไนโตรเจน และส่งผลต่อให้เกิดอัตราการลดลงของทีเคเอ็นในน้ำทิ้งได้ เมื่อพิจารณาค่าทีเคเอ็นพบว่า อัตราการลดลงอยู่ในช่วง 37-45% กลไกสำคัญที่ทำให้เกิดการลดค่าทีเคเอ็น คือการเกิดดีไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชันต่อเนื่องกันไป และพืชนำไปใช้

ดังนั้น จะเห็นได้ว่าอัตราการลดลงของฟอสฟอรัสรวม, ไนเตรท-ไนโตรเจน และ ทีเคเอ็น โดยรวมแล้วจะลดลงไม่มาก และน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยระบบน้ำไหลนองแล้วก็ยังมีความฟอสฟอรัสรวม, ไนเตรท-ไนโตรเจน และ ทีเคเอ็น สูงอยู่ จึงไม่น่าจะนำน้ำนี้ปล่อยลงสู่แม่น้ำลำคลอง เพราะจะทำให้เกิดการเจริญเติบโตของสาหร่ายมาก ซึ่งจะทำให้สิ่งแวดล้อมและระบบนิเวศน์ในแม่น้ำลำคลอนั้นเสื่อมเสียไปได้ จึงควรจะทำการบำบัดต่ออีก เพื่อลดค่าฟอสฟอรัสรวม, ไนเตรท-ไนโตรเจน และ ทีเคเอ็น

จากการศึกษาโคลิฟอร์มแบคทีเรีย ในน้ำทิ้งที่ผ่านระบบน้ำไหลนอง ประสิทธิภาพการกำจัดของโคลิฟอร์มแบคทีเรีย มีอัตราการลดลงถึง 52-54% กลไกสำคัญที่ทำให้โคลิฟอร์มแบคทีเรียลดลงคือ อาศัยการดัก, การดูดซับ และการตกตะกอน โดยเฉพาะถ้าเป็นบริเวณที่มีพืชขึ้นมากก็ยิ่งช่วยดักไว้เพิ่มขึ้น

สำหรับประสิทธิภาพการบำบัดน้ำผิวดินของอ่างเก็บน้ำ ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ความชัน 2% ดังรูปที่ 4-10 กลไกการกำจัดของ COD, BOD, TSS, TKN และ Coliform bacteria มีลักษณะเดียวกับการบำบัดด้วยน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร ส่วนฟอสฟอรัสรวมและไนโตรเจนในโตรเจนมีค่าน้อยมากหรือเป็นศูนย์ อาจเนื่องมาจากคุณสมบัติของน้ำผิวดินจากอ่างเก็บน้ำ มีค่าฟอสฟอรัสรวมและไนโตรเจนในโตรเจนมีค่าน้อยมากหรือเป็นศูนย์อยู่แล้ว จึงทำให้น้ำที่ผ่านระบบมีค่าเป็นศูนย์เช่นกัน

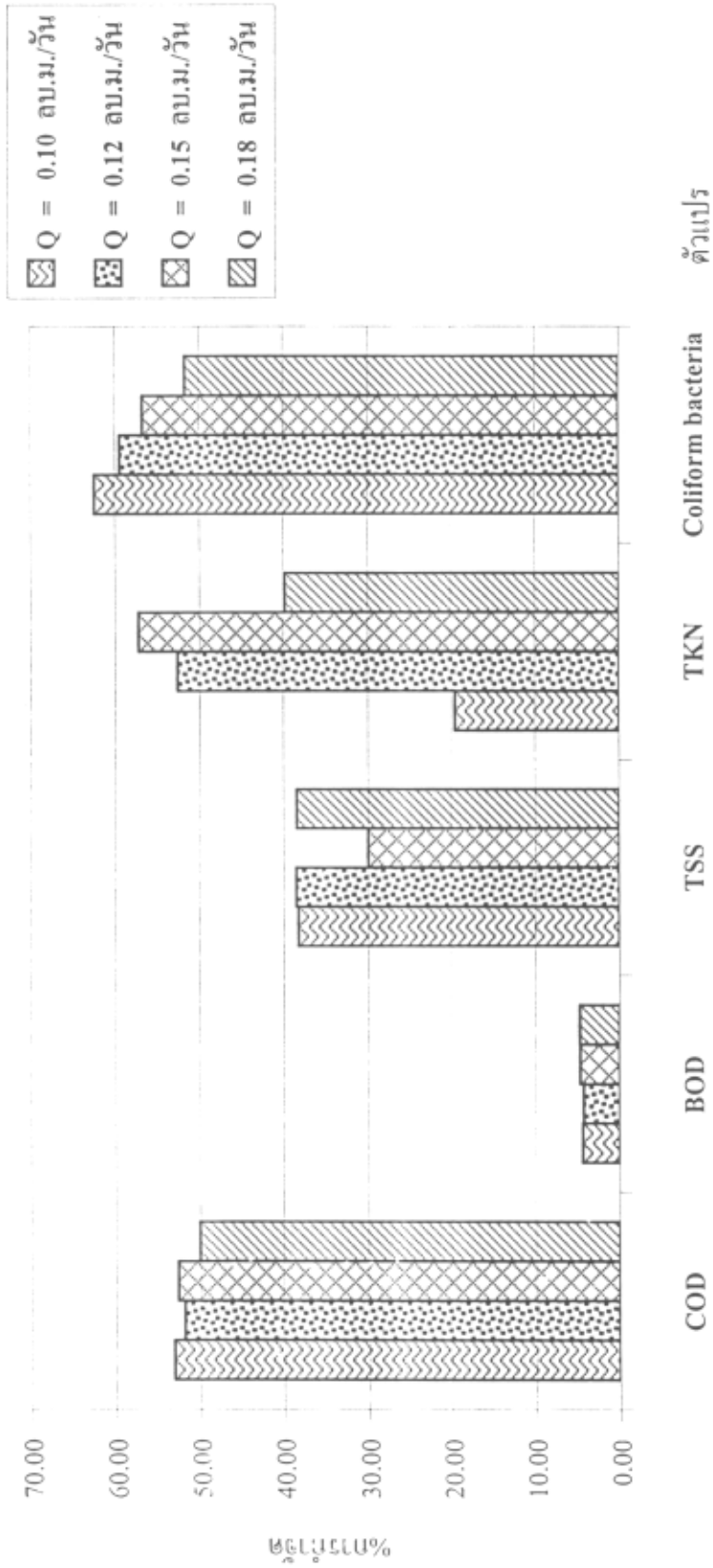
จากการศึกษาค่าความแปรปรวนของข้อมูล โดยการทดสอบทางสถิติค่าความแปรปรวนโดยใช้ ANOVA ทดสอบ พบว่าที่อัตราการไหลหนึ่ง ๆ ความแตกต่างของความชันไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดของระบบน้ำไหลนอง

#### 4.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการบำบัดน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรแบบกระจายบนดิน โดยระบบน้ำไหลนองไม่ได้ทำการทดสอบ CRREL Model และสมการ (2-6) เนื่องจากในการวิจัยครั้งนี้สนใจเฉพาะสมการ (2-5) ซึ่ง  $C/C_0$  เป็นตัวแปรตาม โดยทำการศึกษาอัตราอันดับการเกิดปฏิกิริยาของระบบ ซึ่งได้ทำการทดสอบอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับศูนย์, อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง และอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง ด้วยสถิติสมการถดถอยเชิงเส้น ผลการคำนวณแสดงใน ภาคผนวก ค ผลทดสอบทางสถิติสมการถดถอยเชิงเส้นโดยการพิจารณาระดับนัยสำคัญ, ค่าคงที่ ( $\beta_1$ ) และค่าแปรปรวนของความคลาดเคลื่อน ดังตาราง 4-4 ถึง 4-6

$$\frac{M_z}{M_0} = Ae^{\left(-\frac{kz}{G \frac{1}{3}q}\right)} \quad (2-6)$$

$$\frac{C}{C_0} = Ae^{\frac{-kz}{q^n}} \quad (2-5)$$



รูปที่ 4-10. ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากอ่างสระ 1

ตารางที่ 4-4. การพิจารณาระดับนัยสำคัญ

อันดับปฏิบัติการ	ค่าทางสถิติ ระดับนัยสำคัญ (Significant)	การยอมรับ ระดับนัยสำคัญ ไม่เกิน 0.05
ปฏิบัติการอันดับศูนย์	0-0.04	✓
ปฏิบัติการอันดับหนึ่ง	0-0.02	✓
ปฏิบัติการอันดับสอง	0-0.05	✓

เมื่อพิจารณาระดับนัยสำคัญไม่เกิน 0.05 ระบบสามารถยอมรับได้ว่าเป็นทั้งปฏิบัติการอันดับศูนย์, ปฏิบัติการอันดับหนึ่ง และปฏิบัติการอันดับสอง ซึ่งตามหลักความเป็นจริงแล้วแต่ละระบบควรจะต้องเกิดการเกิดปฏิบัติการของระบบเพียงอันดับเดียวเท่านั้น ดังนั้น จึงต้องพิจารณาต่อถึงค่าคงที่ ( $\beta_1$ ) โดยการทดสอบสมมติฐานดังนี้

$$H_0 : \beta_1 = 0 \quad \text{หรือ} \quad H_0 : Y \text{ และ } X \text{ ไม่มีความสัมพันธ์ในรูปเส้นตรง}$$

$$H_1 : \beta_1 \neq 0 \quad \text{หรือ} \quad H_1 : Y \text{ และ } X \text{ มีความสัมพันธ์ในรูปเส้นตรง}$$

ตารางที่ 4-5. การพิจารณาค่าคงที่ ( $\beta_1$ )

อันดับปฏิบัติการ	ค่าทางสถิติ ค่าคงที่ ( $\beta_1$ )	การยอมรับ สมมติฐาน $H_0 : \beta_1 = 0$ Y และ X ไม่มีความสัมพันธ์ในรูปเส้นตรง
ปฏิบัติการอันดับศูนย์	0.56-7.2	X
ปฏิบัติการอันดับหนึ่ง	0.004-0.016	X
ปฏิบัติการอันดับสอง	$3.4 \times 10^{-6}$ - $3.6 \times 10^{-5}$	✓

การทดสอบสมมติฐานใช้สถิติ  $F = MSR/MSE$  ทดสอบ จากการทดสอบพบว่าปฏิบัติการอันดับศูนย์และปฏิบัติการอันดับหนึ่งปฏิเสธสมมติฐาน  $H_0$  คือ Y และ X มีความสัมพันธ์ในรูปเส้นตรง ส่วนปฏิบัติการอันดับสองยอมรับสมมติฐาน  $H_0$  คือ Y และ X ไม่มีความสัมพันธ์ในรูปเส้นตรง ดังนั้น จะเห็นได้ว่าระบบไม่มีแนวโน้มเป็นปฏิบัติการอันดับสอง ดังแสดงในตารางที่ 4-5

ตารางที่ 4-6. การพิจารณาค่าแปรปรวนของความคลาดเคลื่อน

อันดับปฏิบัติการ	ค่าทางสถิติ ค่าแปรปรวนของความคลาดเคลื่อน (Sum Square of Error)	การยอมรับ ค่าแปรปรวนของความคลาดเคลื่อน มีค่าต่ำสุด
ปฏิบัติการอันดับศูนย์	$5.14 \times 10^3 - 1.63 \times 10^5$	X
ปฏิบัติการอันดับหนึ่ง	0.041-1.96	✓

เมื่อพิจารณาถึงค่าแปรปรวนของความคลาดเคลื่อน (Sum Square of Error : SSE) การพิจารณาความเหมาะสมสำหรับสมการถดถอยที่ดีที่สุด ค่า SSE จะมีค่าต่ำสุด (ทรงศิริ, 2541) ดังนั้น เมื่อเปรียบเทียบปฏิบัติการอันดับศูนย์และปฏิบัติการอันดับหนึ่ง พบว่าปฏิบัติการอันดับหนึ่งค่า SSE อยู่ในช่วง 0.041-1.96 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าปฏิบัติการอันดับศูนย์มาก ดังแสดงในตารางที่ 4-6

ดังนั้น จะเห็นได้ว่าการบำบัดน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรแบบกระจายบนดิน โดยระบบน้ำไหลนอง อัตราการเกิดปฏิกริยามีแนวโน้มเป็นปฏิกริยาอันดับหนึ่ง ซึ่งสามารถอธิบายได้ในรูปสมการที่ 2-5 หรือ 4-2

$$\frac{C}{C_0} = Ae^{\frac{-kZ}{q^n}} \quad (2-5)$$

หรือ

$$\ln \frac{C}{C_0} = \ln A - \frac{k}{q^n} Z \quad (4-2)$$

จากการศึกษาสมการ (2-7) และ (2-8) พบว่าสมการดังกล่าวแปรรูปมาจากสมการ (4-3)

$$\frac{(C - 5)}{C_0} = Ae^{\frac{-kZ}{q^n}} \quad (2-7)$$

$$\frac{(C - 7)}{C_0} = A' e^{\frac{-kZ}{q^n}} \quad (2-8)$$

$$\frac{(C - R)}{C_0} = Ae^{\frac{-kZ}{q^n}} \quad (4-3)$$

โดยที่ค่า  $R$  เป็นค่าความเข้มข้นที่เหลืออยู่ของน้ำเสียหลังจากที่ผ่านระบบน้ำไหลนองแล้ว ซึ่งจากการศึกษาของ Smith and Shroeder (1985) ค่าความเข้มข้นของ  $BOD_5$  ที่วัดได้ที่ จุดสุดท้ายออกมาไม่เป็นศูนย์ มีค่าอยู่ในช่วง 3-5 mg/L ส่วน TOC มีค่าอยู่ในช่วง 5-7 mg/L งานวิจัยดังกล่าวใช้น้ำเสียชุมชนที่ผ่านตะแกรงและน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดขั้นต้น ส่วนการวิจัยครั้งนี้ใช้น้ำเสียจากฟาร์มสุกร ดังนั้น จะเห็นได้ว่าลักษณะของน้ำเสียแตกต่างกัน จึงไม่สามารถที่จะใช้สมการดังกล่าวได้

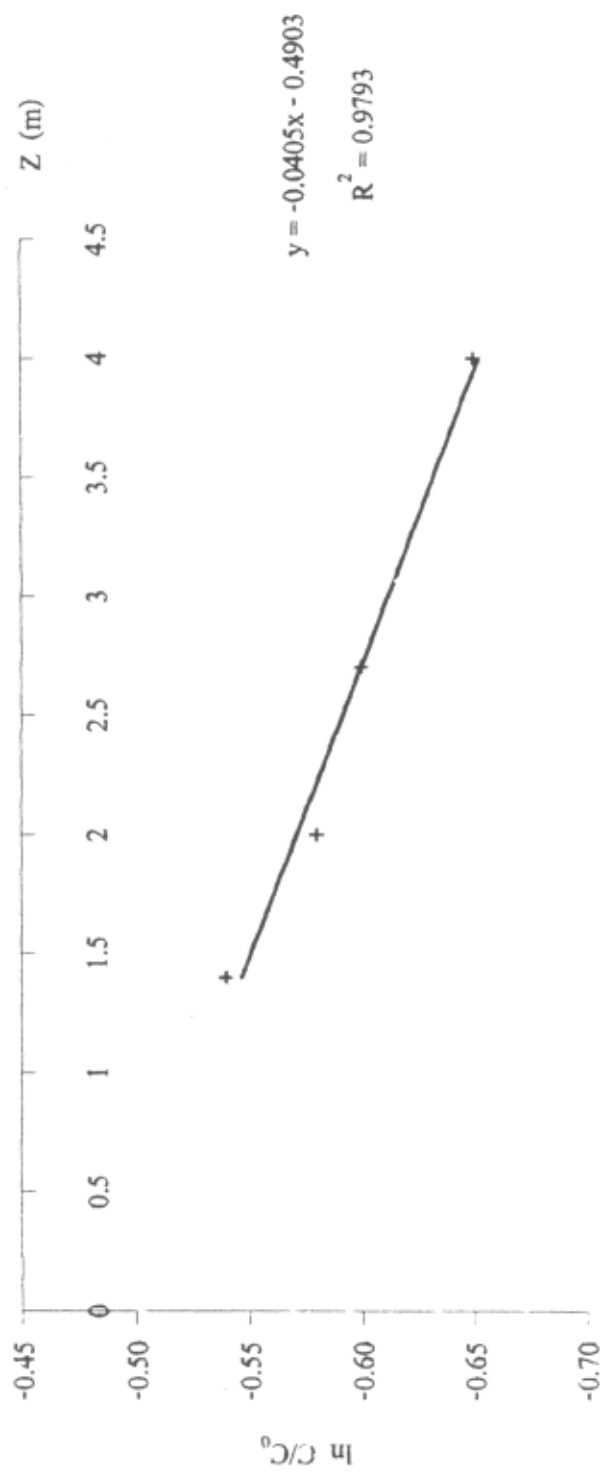
จากผลการวิจัย นำข้อมูลที่มีความชัน 2% มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln C/C_0$  กับ  $Z$  ดังในรูปที่ 4-11 เนื่องจากการศึกษาสถิติค่าความแปรปรวนความแตกต่างของความชันไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดของระบบน้ำไหลนอง ซึ่งค่า  $Z$  คำนวณจากสมการ (4-1) แสดงในภาคผนวก ค

จากกราฟความชันมีค่าเท่ากับ  $-kq^n$  และทำการแทนค่า  $q$  และ  $n$  โดยกำหนด  $n = 0.5$  เนื่องจากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านของ Witherow and Bledsoe (1986) และจาก Process Design Manual for Land Treatment of Municipal Wastewater (US. EPA., 1981) กำหนดใช้  $n = 0.5$  และเพื่อเป็นการเปรียบเทียบค่า  $k$  และ  $A$  จากการวิจัยครั้งนี้และที่ผ่านมา เมื่อใช้  $n$  เป็นค่าเดียวกัน ดังนั้น ได้ค่า  $k$  อยู่ในช่วง 0.37-0.49 cm/h

จากการเปรียบเทียบค่า  $k$  จากการศึกษาการออกแบบแบบจำลองระบบน้ำไหลนองที่ผ่านมาพบว่า ค่า  $k$  จากการวิจัยนี้มีค่าน้อยมาก ดูได้จากเปรียบเทียบในตารางที่ 4-7 เนื่องมาจากค่า  $k$  ขึ้นอยู่กับ  $q$  และชนิดของน้ำเสียด้วย ถ้าค่า  $q$  มีค่ามากกว่า  $k$  ก็จะมี ค่ามากขึ้นตามไปด้วย

การวิจัยที่ผ่านมา  $q$  มีค่าเท่ากับ 1100-3300 cm<sup>3</sup>/cm-h ส่วนการวิจัยครั้งนี้  $q$  อยู่ในช่วง 85-150 cm<sup>3</sup>/cm-h ซึ่งมีค่าน้อยกว่ามาก ทั้งนี้ เนื่องจากลักษณะของน้ำเสีย โดยการศึกษาที่ผ่านมาใช้น้ำเสียจากชุมชน ส่วนการทดลองครั้งนี้ใช้น้ำเสียจากฟาร์มสุกร ซึ่งมีค่าความเข้มข้นของ BOD มากกว่ามาก

ส่วนค่า  $A$  หาได้จากกราฟความสัมพันธ์  $\ln C/C_0$  กับ  $Z$  เช่นเดียวกัน โดยที่จุดตัดแกน  $y$  ผลที่ได้  $A$  มีค่า 0.61 เมื่อพิจารณาค่า  $A$  ที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้เปรียบเทียบกับการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าค่า  $A$  มีค่าใกล้เคียงกันไม่แตกต่างกันมากนัก



รูปที่ 4-11. ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln C/C_0$  กับ Z ที่ความชัน 2%



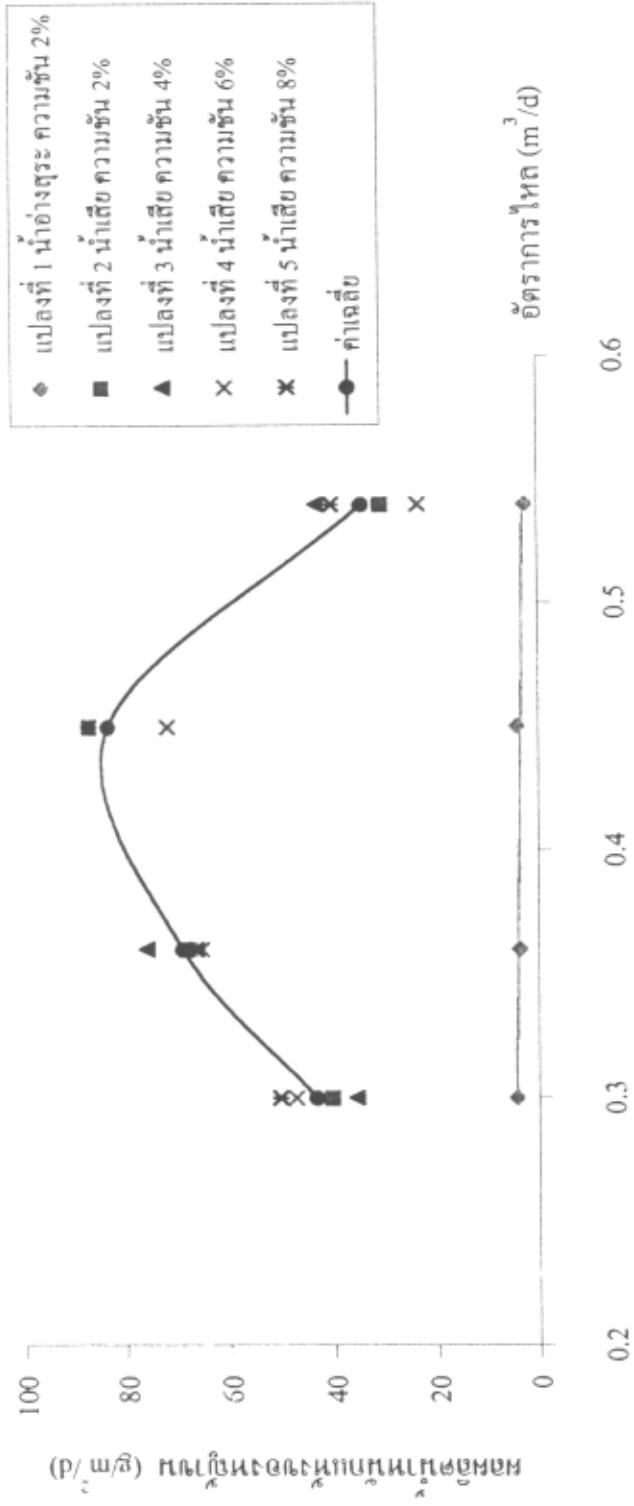
ตารางที่ 4-7. เปรียบเทียบค่า  $k$  และ  $A$ 

ตัวแปร	ผลการวิจัยที่ผ่านมา		การวิจัยครั้งนี้	
	k (cm/h)	A	k (cm/h)	A
BOD <sub>5</sub>	3.0-4.6	0.58-0.88	0.57-0.75	0.69
TSS	2.4-5.6	0.44-0.96	0.46-0.61	0.61
COD	ไม่ได้ศึกษา	ไม่ได้ศึกษา	0.37-0.49	0.61

#### 4.5 อัตราการเจริญเติบโตของหญ้าขน

ในช่วงแรกของการทดลองของแต่ละอัตราการไหลจะพบว่า ขนาดของหญ้าขนในบริเวณช่วงน้ำเข้าจะใหญ่กว่าในช่วงน้ำออก แต่เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 2-3 สัปดาห์ พบว่าขนาดหญ้าขนไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน หญ้าขนจะถูกตัดที่ระยะประมาณ 10 เซนติเมตร จากผิวดิน และจะทำการตัดทุก 45 วัน หรือเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ ชาญชัยและนวลมณี (2521) ได้ทำการศึกษาพบว่าสำหรับหญ้าขนและหญ้างินนี้ การตัดด้วยความถี่ทุก 45 วัน จะได้ผลดีที่สุด โดยมีความสัมพันธ์ที่สมมูลย์กันระหว่างผลผลิต คุณค่าทางอาหารและความสามารถในการฟื้นตัวหลังจากการตัด หลังจากตัดจะทำการชั่งน้ำหนักเปียกของหญ้าขนทั้งหมดในแต่ละแปลง และสุ่มตัวอย่างนำมาหาน้ำหนักแห้ง เพื่อคำนวณหาผลผลิตน้ำหนักรวมของหญ้าขน ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่าง ผลผลิตน้ำหนักรวมของหญ้าขนกับอัตราการไหล ดังในรูปที่ 4-12 พบว่า แปลงทดลองที่ใช้ตัวอย่างจากน้ำทิ้งฟาร์มสุกร ผลผลิตน้ำหนักรวมของหญ้าขนมีความเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น

เมื่อเปลี่ยนอัตราการไหล คือลักษณะกราฟเป็นรูปประฆังคว่ำ อาจเนื่องมาจากในตอนช่วงเริ่มต้นการระบายน้ำเข้าสู่แปลงทดลองด้วยอัตราการไหลต่ำ ทำให้ต้นหญ้าเริ่มปรับสภาพในการรับอาหารและแร่ธาตุที่มีอยู่ในน้ำเสีย จึงทำให้หญ้าขนเริ่มเจริญเติบโต แต่ยังไม่สามารถเจริญเติบโตได้เต็มที่ เนื่องจากปริมาณอาหารและแร่ธาตุยังไม่เพียงพอต่อการเจริญเติบโตของหญ้าขน เมื่อเพิ่มอัตราการไหลสูงขึ้น หญ้าขนได้รับอาหารและแร่ธาตุจากน้ำเสียเต็มที่ จึงทำให้เกิดการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ทำให้เส้นกราฟมีลักษณะชันขึ้น จนกระทั่งถึงจุดอิ่มตัว เมื่อเพิ่มอัตราการไหลเพิ่มขึ้นอีก หญ้าขนก็จะเริ่มรับสารอาหารและแร่ธาตุในน้ำเสียได้น้อยลง ทำให้เส้นกราฟมีลักษณะชันลง ซึ่งอาจมาจากอีกสาเหตุหนึ่งคือ ความถี่-ห่างของการตัด ซึ่งผลผลิตของแปลงหญ้ามักจะเพิ่มขึ้นเมื่อเกษตรกรยึดอายุการตัดแปลงหญ้าออกไป (สาขันธ์, 2540) แต่จากการวิจัยที่อัตราการไหลสุดท้ายนี้ช่วงระยะเวลาการตัดเพียง 27 วัน ทำให้ผลผลิตที่ได้มีค่าน้อยลง ชาญชัยและนวลมณี (2521)



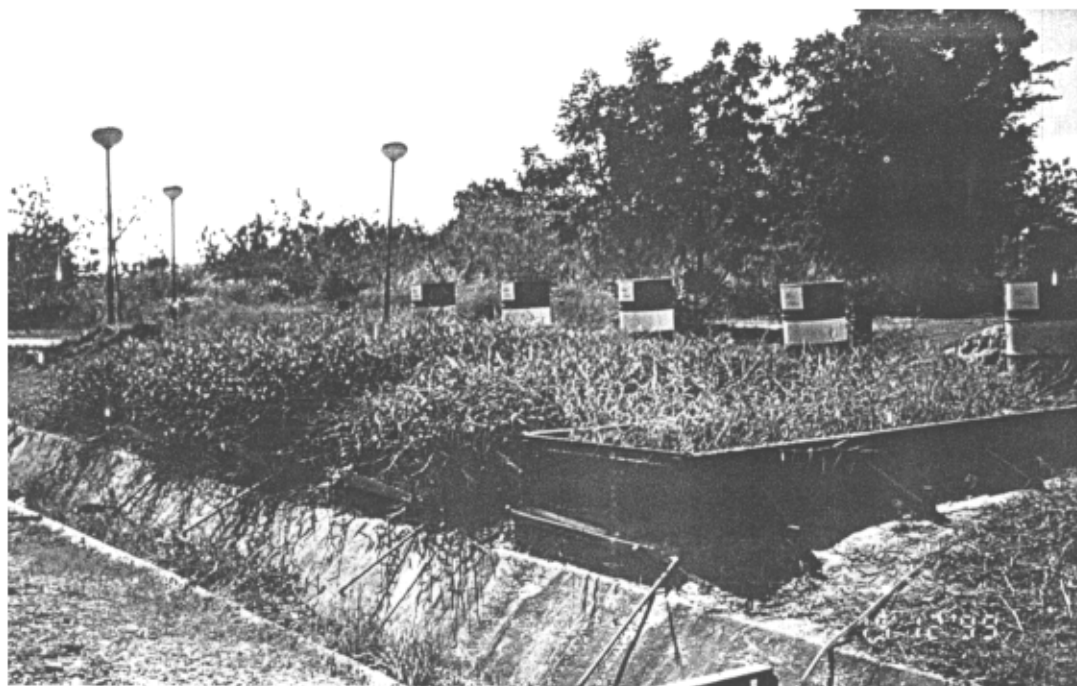
รูปที่ 4-12. ผลผลิตค่าน้ำหนักแห้งของหญ้าขน

รายงานว่าการตัดหญ้าขนบ่อยเกินไป (15-25 วันต่อครั้ง) จะทำให้ได้ผลผลิตหญ้าสดเพียง 7.8-10.6 ตันต่อไร่ และถ้าตัด 45 วันต่อครั้งจะได้ผลผลิตหญ้าสด 16.3 ตันต่อไร่ ส่วนสายัณห์และนิพนธ์ (2539) รายงานว่าการยืดอายุการตัดจาก 30 วันไปเป็น 60 วัน ผลผลิตจะเพิ่มขึ้นจาก 2,649 กิโลกรัมต่อไร่ ไปเป็น 3,541 กิโลกรัมต่อไร่ ส่วนแปลงทดลองที่ใช้หญ้าตัวอย่างจากน้ำฟิวคินจากอ่างเก็บน้ำ ผลผลิตน้ำหนักแห้งของหญ้าขนมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเปลี่ยนอัตราการไถล อาจเนื่องมาจากน้ำในอ่างเก็บน้ำ มีอาหารและแร่ธาตุน้อย ทำให้หญ้าขนมีการเจริญเติบโตน้อยและเมื่ออัตราการไถลเพิ่มขึ้นการเจริญเติบโตก็ไม่มีเปลี่ยนแปลงมากนัก

เมื่อศึกษาการเปรียบเทียบอัตราการเจริญเติบโตของหญ้าขนที่ใช้น้ำตัวอย่างจากน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร และน้ำฟิวคินจากอ่างเก็บน้ำ ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีพบว่า การเจริญเติบโตของหญ้าขนมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน คือ แปลงทดลองที่ใช้น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ลักษณะหญ้าขนขึ้นหนาแน่นเต็มแปลงทดลอง เมื่อพิจารณาถึงน้ำหนักเปียกของหญ้าขนจะอยู่ในช่วง 1.6-5.2 กิโลกรัมต่อตารางเมตร และผลผลิตน้ำหนักแห้งอยู่ในช่วง 20.3-87.3 กรัม/ตารางเมตร/วัน ส่วนแปลงทดลองที่ใช้น้ำฟิวคินจากอ่างเก็บน้ำ ลักษณะหญ้าขนขึ้นเบาบาง มีน้ำหนักเปียกของหญ้าขนอยู่ในช่วง 0.1-0.3 กิโลกรัมต่อตารางเมตร และผลผลิตน้ำหนักแห้งอยู่ในช่วง 2.5-5.3 กรัม/ตารางเมตร/วัน จะเห็นได้ว่าปริมาณหญ้าขนในแปลงทดลองอ่างเก็บน้ำ มีค่าน้อยมาก และเมื่อพิจารณาถึงลักษณะลำต้นจะพบว่า หญ้าขนจากแปลงทดลองที่ใช้น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร มีลักษณะลำต้นอวบน้ำมีสีเขียวเข้ม ส่วนแปลงทดลองที่ใช้น้ำฟิวคินจากอ่างเก็บน้ำ หญ้าขนมี ลักษณะลำต้นพอมลำต้นมีสีเขียวปนเหลือง ดังในรูปที่ 4-13 ดังนั้นสรุปได้ว่าน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มีสารอาหารและแร่ธาตุที่เป็นประโยชน์ต่อการเจริญเติบโตของหญ้าขน และหญ้าขนก็สามารถนำมาใช้ในการบำบัดโดยระบบน้ำไหลนองได้ เป็นอย่างดี

#### 4.6 ปริมาณหญ้าขนที่เก็บเกี่ยวได้

จากการศึกษาการบำบัดน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรโดยระบบน้ำไหลนอง พบว่าหญ้าขนมีการเจริญเติบโตได้ดี ปริมาณหญ้าขนที่เก็บเกี่ยวได้ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ได้แก่ การนำไปเป็นอาหารสัตว์ ซึ่งการที่นำหญ้าขนที่เก็บเกี่ยวได้ไปใช้ประโยชน์ ก็ถือว่าการบำบัดน้ำทิ้ง โดยระบบน้ำไหลนองนี้ นอกจากจะช่วยทำให้ได้น้ำมีคุณภาพดีขึ้น แล้วยังได้พืชคลุมดินมาใช้ประโยชน์กลับคืนมาในเวลาเดียวกัน ดังนั้น การศึกษาปริมาณหญ้าขนที่เก็บเกี่ยวได้ในแต่ละช่วง



รูปที่ 4-13. เปรียบเทียบการเจริญเติบโตของหญ้าขน

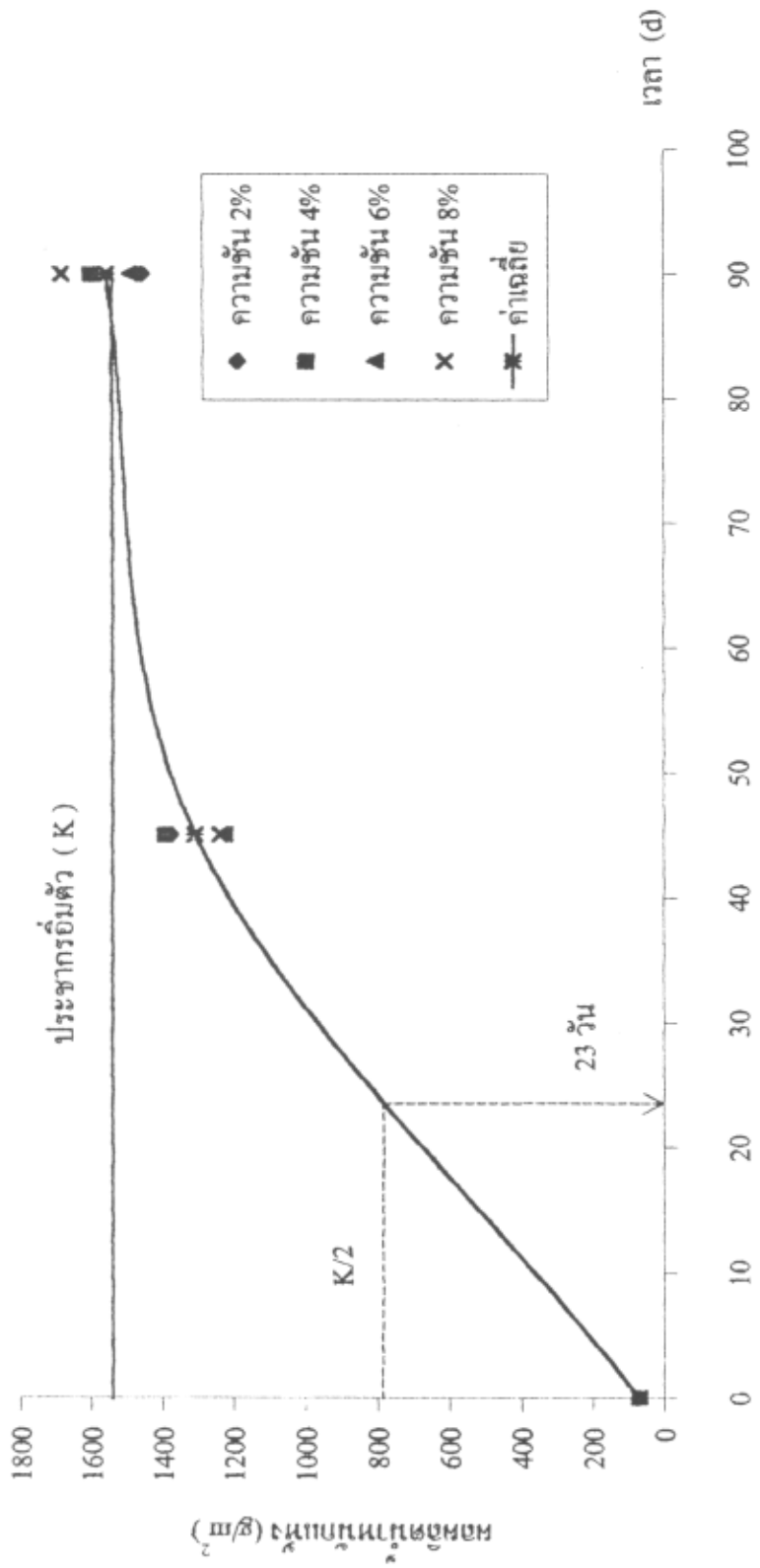
เวลา สามารถนำมาทำนายการเจริญเติบโตหรือการเพิ่มขึ้นของประชากรหญ้าขนได้ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบระบบ

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างผลผลิตน้ำหนักรากแห้งของหญ้าขนที่เก็บเกี่ยวได้กับเวลา โดยทำการศึกษาที่อัตราการไหล  $0.10 \text{ m}^3/\text{d}$  ซึ่งก่อนทำการทดลองจะทำการชั่งน้ำหนักเปียกของหญ้าขนก่อนทำการปลูก หลังจากเริ่มทำการทดลอง จะทำการเก็บเกี่ยวหญ้าขนที่เวลา 45 วัน และที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ที่ 90 วัน ผลผลิตน้ำหนักรากแห้งที่ได้แสดงดังตารางที่ 4-8

ตารางที่ 4-8. ผลผลิตน้ำหนักรากแห้ง ( $\text{g}/\text{m}^2$ )

เวลา (วัน)	ผลผลิตน้ำหนักรากแห้ง ( $\text{g}/\text{m}^2$ )				ค่าเฉลี่ย
	ความชัน 2%	ความชัน 4%	ความชัน 6%	ความชัน 8%	
0	70.95	68.78	68.87	72.05	70.41
45	1376.67	1390.00	1225.00	1238.33	1307.50
90	1458.33	1598.33	1490.00	1681.67	1557.08

จากผลการทดลองนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างผลผลิตน้ำหนักรากแห้งกับเวลาได้ กราฟแสดงดังรูปที่ 4-14 ลักษณะเส้นกราฟที่ได้เป็นรูปเอส (S-Shapes) ซึ่งแนวโน้มการเจริญเติบโตเป็นแบบ Logistic growth อธิบายได้ด้วยสมการที่ (2-9)



รูปที่ 4-14. ปริมาณน้ำขานที่เก็บเกี่ยวได้

$$\frac{dN}{dt} = rN \left( 1 - \frac{N}{K} \right) \quad (2-9)$$

โดยที่  $\frac{dN}{dt}$  คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงประชากร,  $r$  คืออัตราการเจริญเติบโต,  $N$  คือจำนวนประชากร และ  $K$  คือ Carrying capacity (ความสามารถในการเก็บเกี่ยวได้) ซึ่งสามารถแก้สมการได้ดังสมการ (2-10)

$$N = \frac{K}{1 + e^{-r(t-t^*)}} \quad (2-10)$$

โดยที่  $t^*$  คือเวลาที่  $N=K/2$  เมื่อแทน  $t=0$  สามารถแก้  $t^*$  ได้ดังสมการ (2-11)

$$t^* = \frac{1}{r} \ln \left( \frac{K}{N_0} - 1 \right) \quad (2-11)$$

จากกราฟค่า  $K = 1559.82 \text{ g/m}^2$  สามารถหาค่า  $t^*$  ได้ โดยที่  $t^*$  คือเวลาที่  $N=K/2$  จากกราฟ  $t^*$  มีค่า 23 วัน และเมื่อแทนค่า  $t^*, K$  และ  $N_0$  ในสมการ (2-11) จะทำให้รู้ค่า  $r$  ซึ่งเป็นค่าอัตราการเจริญเติบโต มีค่า 0.133 ดังนั้น ค่าคงที่ต่างๆ ที่หาได้ดังกล่าว สามารถนำไปใช้ในการคำนวณหาปริมาณหญ้าขนที่เก็บเกี่ยวได้

#### 4.7 การใช้ประโยชน์จากหญ้าขน

จากการศึกษาการบำบัดน้ำทิ้งฟาร์มสุกรแบบกระจายบนดิน โดยระบบน้ำไหลนอง หญ้าขนเป็นผลพลอยได้จากการบำบัดน้ำ ซึ่งสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลายทางได้แก่ การปล่อยสัตว์เข้าแทะเล็ม, การตัดสดและนำไปให้สัตว์กิน, การจัดทำหญ้าแห้งและการจัดทำหญ้าหมัก

การปล่อยสัตว์เข้าแทะเล็ม วิธีนี้ไม่แนะนำให้ใช้ เนื่องจากแปลงหญ้านี้จะมีการปล่อยน้ำเสียเข้าสู่แปลงหญ้าเพื่อการบำบัดทุกวัน ทำให้พื้นผิวดินเปียกแฉะ จึงไม่เหมาะที่จะปล่อยสัตว์เข้าแทะเล็ม

การตัดสดและนำไปให้สัตว์กิน เป็นวิธีที่ใช้กันมานานในประเทศไทย ซึ่งจะได้หญ้าที่มีคุณค่าทางอาหารสูง สัตว์ที่นิยมนำหญ้าขนไปให้กินได้แก่ โคนมและโคขุน โคนมกินหญ้าได้ในแต่ละวันเท่าที่กระเพาะจะสามารถรับได้เท่านั้น กิตติ (2540) รายงานว่า เลี้ยงโคที่มีน้ำหนักตัวประมาณ 400 กิโลกรัม ด้วยหญ้าขนให้กินเต็มที่ประมาณ 40 กิโลกรัมต่อวัน โคนมได้รับสารอาหารเพียงพอสำหรับการดำรงชีพ

การจัดทำหญ้าแห้ง หญ้าแห้ง หมายถึง ต้นพืชเอามาทำให้แห้งโดยระเหยน้ำออกจนสามารถเก็บไว้ได้นานโดยไม่บูดเน่าสำหรับใช้เป็นอาหารสัตว์ หญ้าที่ดีควรเป็นชนิดที่ทำให้แห้งได้ง่าย มีลำต้นเล็กและอ่อน มีใบมาก (ชวนิศนดากร, 2534) หญ้าขนไม่เหมาะที่จะนำมาทำหญ้าแห้งเนื่องจากใช้เวลาแห้งนานถึง 53 วัน ในฤดูฝนและ 25 วันในฤดูแล้ง และทำให้เสียคุณค่าทางอาหาร ส่วนการจัดทำหญ้าหมัก พืชหมัก หมายถึง ส่วนของต้นพืชที่เก็บไว้ในสภาพอวบน้ำในที่ไม่มีอากาศ เพื่อใช้เป็นอาหารสัตว์ พืชหมักเป็นอาหารในฤดูที่ขาดแคลนหญ้าสด (ชวนิศนดากร, 2534) หญ้าขนแนะนำให้ตัดเมื่อสูงประมาณ 0.75-1.0 เมตร (บุญฤา, 2535) แต่มีข้อเสียคือเสียค่าใช้จ่ายสูง

ดังนั้น สรุปได้ว่าวิธีที่เหมาะสมสำหรับการใช้ประโยชน์ของหญ้าขนที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกร แบบกระจายบนดินคือ การตัดสดและนำไปให้สัตว์กิน

#### 4.8 ตัวอย่างการคำนวณออกแบบระบบน้ำไหลนอง

ฟาร์มสุกรมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งเลี้ยงหมู ทั้งหมดประมาณ 800 ตัว มีปริมาณน้ำเสียประมาณ 28,000 ลิตรต่อวัน การคำนวณแบ่งเป็น 2 ส่วน คือการออกแบบระบบน้ำไหลนอง และการคำนวณปริมาณหญ้าขน

##### 4.8.1 การออกแบบระบบน้ำไหลนอง

กำหนดข้อมูลการออกแบบ

- BOD น้ำเข้าประมาณ 317 mg/L
- BOD น้ำออกประมาณ 20 mg/L
- $A = 0.69$ ,  $k = 0.007$  m/h,  $n = 0.5$  และ  $q = 0.03$  m<sup>3</sup>/m-h

- หาความยาวความลาด (Z) m

$$\frac{C}{C_0} = Ae^{\frac{-kZ}{q^n}}$$

$$\frac{20}{317} = (0.69) e^{\frac{-0.007 Z}{0.03^{0.5}}}$$

$$Z = 59.80 \text{ m} \sim 60 \text{ m}$$

- หาความกว้างของแปลง

$$q \left( \frac{\text{m}^3}{\text{m} - h} \right) = Q \left( \frac{\text{m}^3}{d} \right) \times \frac{1}{w (\text{m})} \times \frac{1}{24} \frac{d}{h}$$

$$0.03 = 28 \times \frac{1}{w} \times \frac{1}{24}$$

$$w = 40 \text{ m}$$

- หาขนาดของพื้นที่ (A)

$$A = \frac{\left[ Q + \frac{V_s}{24} \right] \left[ \frac{T_s + 365}{365} \right]}{R_a T_a} ST_c$$

$$= \frac{\left[ \left( \frac{28 \text{ m}^3}{24 \text{ h}} \right) + 0 \right] \left[ \frac{7 + 365}{365} \right]}{(0.03)(8)} (60)(24)$$

$$= 7134 \text{ m}^2 \sim 7200 \text{ m}^2$$

ดังนั้น แปลงทดลองที่ได้มีขนาด 40x60 m<sup>2</sup> ได้จำนวน 3 แปลง มีพื้นที่เท่ากับ 7200 m<sup>2</sup>



#### 4.8.2 การคำนวณปริมาณหญ้าขน

กำหนดข้อมูลการคำนวณ

- $K = 1559.82 \text{ g/m}^2$
- $r = 0.133$
- $t^* = 23$  วัน
- พื้นที่แปลงทดลอง  $7200 \text{ m}^2$
- ช่วงระยะเวลาเก็บเกี่ยว 45 d

- หาปริมาณหญ้าขนที่เก็บเกี่ยวได้

$$\begin{aligned}
 N &= \frac{K}{1 + e^{-r(t-t^*)}} \\
 &= \frac{1559.82}{1 + e^{-0.133(45-23)}} \\
 &= 1480 \text{ g/m}^2
 \end{aligned}$$

จากพื้นที่แปลงทดลอง  $7200 \text{ m}^2$  ได้ผลผลิตน้ำหนักแห้งของหญ้าขน  $10,656 \text{ kg}$  ซึ่งคิดเป็นปริมาณหญ้าขนสดประมาณ  $16,300 \text{ kg}$  เมื่อเลี้ยงโคจำนวน 20 ตัว ใช้หญ้าขนสดวันละ  $800 \text{ kg}$  ได้ประมาณ 20 วัน

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

การบำบัดน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรแบบกระจายบนดิน โดยระบบน้ำไหลนอง เพื่อศึกษาหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์, ปริมาณและการเจริญเติบโตของหญ้าขนที่เก็บเกี่ยวได้ การวิจัยใช้น้ำตัวอย่างจากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นจากบ่อฝัง และน้ำผิวดินจากอ่างเก็บน้ำสระ 1 ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และปลูกหญ้าขนเป็นพืชคลุมดิน โดยน้ำตัวอย่างที่เป็นน้ำเสียจะระบายลงสู่แปลงที่มีความชัน 2%, 4%, 6% และ 8% และส่วนที่เป็นน้ำผิวดินจะระบายเข้าสู่แปลงที่มีความชัน 2% ซึ่งแต่ละแปลงทดลองทำการศึกษาระบบด้วยอัตราการไหลที่แตกต่างกัน 4 ค่า ได้แก่ 0.30, 0.36, 0.45 และ 0.54 ลบ.ม.ต่อวัน แต่ละอัตราการไหลจะต้องทำการทดลองจนระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ แล้วทำการวิเคราะห์ค่า COD, BOD, TSS, TP,  $\text{NO}_3^-$ -N, TKN และ โคลิฟอร์มแบคทีเรีย ผลการวิจัยสรุปได้ดังนี้

- ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร อัตราการลดค่า COD 42-49% , BOD 37-49% , TSS 36-42% , TP 28-30% ,  $\text{NO}_3^-$ -N 14-18% , TKN 37-45% และ โคลิฟอร์มแบคทีเรีย 52-54% จากการศึกษาการบำบัดน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร โดยระบบน้ำไหลนอง ประสิทธิภาพที่ได้มีค่าต่ำ อาจเนื่องมาจากน้ำเสียที่เข้าระบบมีค่าความเข้มข้นของ BOD สูง ดังนั้น จึงต้องทำการบำบัดน้ำเสียให้มีความเข้มข้นของ BOD ต่ำก่อนเข้าสู่ระบบน้ำไหลนอง หรือทำการเพิ่มความยาวของพื้นที่ลาด เพื่อเพิ่มการบำบัดในกระบวนการต่าง ๆ ได้แก่ การตกตะกอน, การกรอง, การเกิดปฏิกิริยาชีวเคมี และการดูดซับ

- การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการบำบัดน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรแบบกระจายบนดิน โดยระบบน้ำไหลนอง แนวโน้มอัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง โดยใช้สมการ  $C/C_0 = A \exp(-kZ/q^n)$  อธิบาย ได้ค่าคงที่  $k$  มีค่าอยู่ในช่วง 0.37-0.49 cm/h ค่าคงที่  $A$  มีค่า 0.61

- เมื่อศึกษาการเปรียบเทียบอัตราการเจริญเติบโตของหญ้าขน การเจริญเติบโตของหญ้าขนมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน คือ แปลงทดลองที่ใช้น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร ลักษณะหญ้าขนขึ้น

หนาแน่นเต็มแปลงทดลอง ลักษณะลำต้นอวบน้ำสีเขียวเข้ม น้ำหนักเปียกอยู่ในช่วง 1.6-5.2 กิโลกรัมต่อตารางเมตร และผลผลิตน้ำหนักร้างอยู่ในช่วง 20.3-87.3 กรัม/ตารางเมตร/วัน ส่วนแปลงทดลองที่ใช้น้ำผิวดินจากอ่างเก็บน้ำ ลักษณะหญ้าขึ้นเบาบาง ลักษณะลำต้นพอมมีสีเขียวปนเหลือง มีน้ำหนักเปียกอยู่ในช่วง 0.1-0.3 กิโลกรัมต่อตารางเมตร และผลผลิตน้ำหนักร้างอยู่ในช่วง 2.5-5.3 กรัม/ตารางเมตร/วัน

- หญ้าขนสามารถใช้เป็นพืชคลุมดินในระบบการบำบัดน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรแบบกระจายบนดิน โดยระบบน้ำไหลนองได้ดี

- หญ้าขนที่ได้สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้คือ การตัดสดและนำไปให้สัตว์กิน

- จากผลการวิจัยสามารถนำค่าคงที่ที่ได้มาออกแบบระบบน้ำไหลนอง ของฟาร์มสุกรมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ได้แปลงทดลองขนาด 40x60 m<sup>2</sup> จำนวน 3 แปลง ได้ปริมาณหญ้าขนสดประมาณ 16,300 kg เลี้ยงโคจำนวน 20 ตัว ได้ประมาณ 20 วัน

## 5.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัยต่อไป

จากการวิจัยอัตราการลดลงของฟอสฟอรัสรวม, ไนเตรท-ไนโตรเจน และ ทีเคเอ็น โดยรวมแล้ว พบว่ามันลดลงไม่มาก และน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยระบบน้ำไหลนองแล้วก็ยังมีค่าฟอสฟอรัสรวม, ไนเตรท-ไนโตรเจน และ ทีเคเอ็น สูงอยู่ จึงไม่น่าจะนำน้ำนี้ปล่อยลงสู่แม่น้ำลำคลอง เพราะจะทำให้เกิดการเจริญเติบโตของสาหร่ายมาก ซึ่งจะทำให้สิ่งแวดล้อมและระบบนิเวศน์ในแม่น้ำลำคลองนั้นเสื่อมเสียไปได้ จึงควรจะทำการบำบัดต่ออีก เพื่อลดค่าฟอสฟอรัสรวม, ไนเตรท-ไนโตรเจน และ ทีเคเอ็น เช่นวิธีระบบบ่อกักตัว (Stabilization Ponds)

## ภาคผนวก ก

## การศึกษาสารติดตาม

ตารางที่ ก-1. ผลการทดลองและการคำนวณของการทำ Tracer,  $Q = 0.10 \text{ m}^3/\text{d}$

Time (mins)	$\Delta t_i$	C (g/l)	$C/C_0 = C_i$	$C_i \Delta t_i$	$t_i C_i \Delta t_i$	$t_i^2 C_i \Delta t_i$
0	—	0.000	0.0000	0.000	0.00	0.00
20	20	0.019	0.0008	0.016	0.32	6.40
40	20	0.065	0.0026	0.052	2.08	83.20
60	20	0.115	0.0046	0.092	5.52	331.20
80	20	0.149	0.0060	0.119	9.54	762.90
100	20	0.165	0.0066	0.132	13.20	1320.00
120	20	0.185	0.0074	0.148	17.76	2131.20
140	20	0.189	0.0076	0.152	21.28	2979.20
170	30	0.165	0.0066	0.198	33.66	5722.20
200	30	0.099	0.0040	0.120	24.00	4800.00
230	30	0.089	0.0036	0.108	24.84	5713.20
260	30	0.089	0.0036	0.108	28.08	7300.80
290	30	0.075	0.0030	0.090	26.10	7569.00
320	30	0.065	0.0026	0.078	24.96	7987.20
350	30	0.035	0.0014	0.042	14.70	5145.00
380	30	0.025	0.0010	0.030	11.40	4332.00
Sum =				1.485	257.44	56183.50

หมายเหตุ:  $C_0 = 25 \text{ g/l}$

## การคำนวณ Tracer Study

$$\begin{aligned}\theta \text{ ทางทฤษฎี} &= \frac{0.078Z}{qG^{1/3}} \\ &= 135.45 \text{ min.}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}T \text{ mean} &= \frac{\sum t_i c_i \Delta t_i}{\sum c_i \Delta t_i} \\ &= \frac{257.44}{1.485} = 173.36 \text{ min.}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sigma^2 &= \frac{\sum t_i^2 c_i \Delta t_i}{\sum c_i \Delta t_i} - T \text{ mean}^2 \\ &= \frac{56183.50}{1.485} - 173.36^2 = 7780.32\end{aligned}$$

$$2d+8d^2 = \frac{\sigma^2}{T \text{ mean}^2}$$

$$d = 0.094$$

## ภาคผนวก ข

## ประสิทธิภาพของระบบน้ำไหลนอง

ตารางที่ ข-1. ผลการวิเคราะห์ค่า COD (mg/L) ที่อัตราการไหล 0.10 m<sup>3</sup>/d

วันที่	น้ำอ่างเก็บน้ำ ที่จุดเข้า	แปลงที่ 1 น้ำอ่างเก็บน้ำ ความชัน 2%	น้ำเสียด ที่จุดเข้า	แปลงที่ 2 น้ำเสียด ความชัน 2%	แปลงที่ 3 น้ำเสียด ความชัน 4%	แปลงที่ 4 น้ำเสียด ความชัน 6%	แปลงที่ 5 น้ำเสียด ความชัน 8%
9/11/42	-	34	806	641	605	605	481
12/11/42	-	35	499	422	422	384	384
17/11/42	-	19.4	485	388	369	426.8	388
18/11/42	-	7.76	504	368.6	310.4	380	349.2
19/11/42	-	9.8	548.8	325.8	313.6	392	333.2
20/11/42	3.88	36.9	407	388	388	349.2	329.8
21/11/42	38.8	31	582	368.6	349.2	388	368.6
22/11/42	38.8	36.9	660	426.8	388	349.2	407.4
23/11/42	38.8	21.3	457	426.8	388	426.8	310.4
24/11/42	34.9	46.7	582	388	329.8	407.4	349.2
25/11/42	42.7	38.9	660	456.6	388	426.8	349.2
26/11/42	40	39.6	600	396	356.4	435.6	376.2
27/11/42	36	44	520	475	435	455	435
28/11/42	32	40	440	360	360	320	380
29/11/42	40	20	440	360	340	380	380
30/11/42	18	40	440	280	320	380	360
1/12/42	35.42	27.55	511.68	393.6	354.24	334.56	314.88
2/12/42	36	16	640	380	340	400	360
4/12/42	12	8	480	400	360	440	440
5/12/42	12	8	440	360	320	340	320
6/12/42	12	30	520	400	380	360	330
7/12/42	12	32	480	360	320	330	320

ตารางที่ ข-1. (ต่อ)

วันที่	น้ำอ่างเก็บน้ำ ที่จุดเข้า	แปลงที่ 1 น้ำอ่างเก็บน้ำ ความชื้น 2%	น้ำเสีย ที่จุดเข้า	แปลงที่ 2 น้ำเสีย ความชื้น 2%	แปลงที่ 3 น้ำเสีย ความชื้น 4%	แปลงที่ 4 น้ำเสีย ความชื้น 6%	แปลงที่ 5 น้ำเสีย ความชื้น 8%
9/12/42	53.2	19.2	532	372	352	372	332
10/12/42	31.2	9.2	480	332	312	372	352
11/12/42	31.2	19.2	432	352	312	372	332
13/12/42	33.07	17.13	509.95	370.51	350.59	410.35	390.43
14/12/42	15.87	7.97	478.08	358.56	318.72	358.56	338.64
15/12/42	14	10	460	340	300	340	320
16/12/42	10	14	420	300	280	300	280
17/12/42	38	18	380	340	300	320	280
18/12/42	16	10	500	460	440	460	420
19/12/42	-	26	540	480	500	460	500
20/12/42	20	12	480	460	400	420	440
21/12/42	14	12	500	400	440	420	480
22/12/42	48	4	440	340	300	320	300
23/12/42	8	2	560	340	300	360	320
24/12/42	20	11.2	512	420	372	420	412
25/12/42	21	14	560	360	340	380	360
26/12/42	26	24	560	300	280	400	440
27/12/42	24	20	440	320	360	380	360
28/12/42	16	12	480	420	400	400	360
29/12/42	14	4	400	360	320	340	300
30/12/42	22	18	460	340	380	360	340
31/12/42	22	20	500	360	340	360	340
1/1/43	30	18	420	340	320	300	300
2/1/42	22	10	440	340	380	300	300
3/1/43	22	12	560	400	360	380	340
4/1/43	28	16	440	380	360	360	340
5/1/43	22	10	540	340	340	360	320

ตารางที่ ข-1. (ต่อ)

วันที่	น้ำอ่างเก็บน้ำ ที่จุดเข้า	แปลงที่ 1 น้ำอ่างเก็บน้ำ ความชื้น 2%	น้ำเสีย ที่จุดเข้า	แปลงที่ 2 น้ำเสีย ความชื้น 2%	แปลงที่ 3 น้ำเสีย ความชื้น 4%	แปลงที่ 4 น้ำเสีย ความชื้น 6%	แปลงที่ 5 น้ำเสีย ความชื้น 8%
6/1/43	25.2	11.2	672	372	392	352	332
7/1/43	22	20	620	380	360	380	340
8/1/43	36	24	680	380	380	360	360
9/1/43	24	20	520	360	320	340	340
10/1/43	29.9	25.9	617.5	358.6	318.7	358.6	338.6
11/1/43	24.4	20.3	528.3	325.1	325.1	345.4	304.8
12/1/43	24	22	580	320	300	320	300
13/1/43	24.3	22.3	526.2	384.6	303.6	384.6	303.6
14/1/43	29.5	17.3	579.1	396.2	375.9	375.9	396.2
15/1/43	24.6	20.4	530.4	387.6	367.2	346.8	387.6
17/1/43	23.9	13.94	677.28	358.56	318.72	378.48	338.64
18/1/43	24.5	14.38	693.6	346.8	326.4	367.2	346.8
19/1/43	24.5	14.38	695.8	350	318.08	377.72	337.96
20/1/43	23.86	13.91	675.92	357.84	318.08	378.48	338.64
21/1/43	24.34	14.2	689.52	365	324.5	365	344.8
22/1/43	23.95	13.97	678.64	359.28	319.36	379.24	339.32
23/1/43	23.95	13.97	678.64	359.28	319.36	379.24	339.32



ตารางที่ ข-2. ผลการวิเคราะห์ค่า COD (mg/L) ที่อัตราการไหล 0.12 m<sup>3</sup>/d

วันที่	น้ำอ่างเก็บน้ำ ที่จุดเข้า	แปลงที่ 1 น้ำอ่างเก็บน้ำ ความชัน 2%	น้ำเสียด ที่จุดเข้า	แปลงที่ 2 น้ำเสียด ความชัน 2%	แปลงที่ 3 น้ำเสียด ความชัน 4%	แปลงที่ 4 น้ำเสียด ความชัน 6%	แปลงที่ 5 น้ำเสียด ความชัน 8%
9/2/43	28.04	20.04	641.28	440.88	460.92	420.84	420.84
10/2/43	39.68	35.71	634.88	436.48	476.16	436.48	476.16
11/2/43	31.80	27.83	437.36	397.60	377.72	396.60	397.60
12/2/43	36.23	24.60	440.25	401.29	401.29	381.81	362.30
13/2/43	32.34	24.54	479.21	401.29	381.81	362.33	401.29
14/2/43	24.54	5.06	498.69	362.33	401.29	401.29	381.81
15/2/43	36.14	28.11	481.92	441.76	441.76	441.76	361.44
16/2/43	44.18	20.08	481.92	361.44	441.76	441.76	361.44
17/2/43	20.08	4.02	441.76	401.60	361.44	401.60	361.44
21/2/43	47.90	35.71	515.84	396.80	416.64	416.64	396.80
22/2/43	47.90	35.71	479.00	379.96	379.96	396.80	396.80
23/2/43	35.71	31.74	436.48	416.64	376.96	416.64	376.96
24/2/43	31.94	23.95	518.96	379.24	399.20	379.24	419.16
25/2/43	29.70	25.74	574.20	376.20	376.20	396.00	415.80
26/2/43	13.86	9.90	574.20	396.00	376.20	396.00	396.00
27/2/43	29.70	25.74	653.40	376.20	455.40	415.80	376.20
28/2/43	44.53	42.50	647.68	384.56	425.04	404.80	364.32
29/2/43	64.77	40.48	566.72	384.56	384.56	404.80	404.80
1/3/43	42.50	40.48	526.24	384.56	364.08	384.56	425.04
2/3/43	24.28	22.26	809.60	404.80	425.04	425.04	425.04
3/3/43	16.19	12.10	789.36	425.04	404.08	404.08	404.80
4/4/43	44.35	42.34	806.40	403.20	403.20	403.20	423.40
5/3/43	22.18	18.14	846.72	403.20	383.04	403.20	403.20
6/3/43	20.16	18.14	725.76	403.20	383.04	403.20	383.04
7/3/43	20.16	4.32	564.48	403.20	362.88	383.04	383.04
8/3/43	16.13	14.11	524.16	383.04	362.88	383.04	403.20
9/3/43	24.00	12.00	680.00	400.00	360.00	380.00	380.00
10/3/43	46.46	28.28	464.60	404.00	363.60	383.800	383.80

ตารางที่ ข-2. (ต่อ)

วันที่	น้ำอ่างเก็บน้ำ ที่จุดเข้า	แปลงที่ 1 น้ำอ่างเก็บน้ำ ความชัน 2%	น้ำเสีย ที่จุดเข้า	แปลงที่ 2 น้ำเสีย ความชัน 2%	แปลงที่ 3 น้ำเสีย ความชัน 4%	แปลงที่ 4 น้ำเสีย ความชัน 6%	แปลงที่ 5 น้ำเสีย ความชัน 8%
11/3/43	34.34	24.24	525.20	404.00	363.60	383.80	383.80
12/3/43	32.32	28.28	565.60	383.80	363.60	404.00	404.00
13/3/43	40.96	18.43	573.44	368.64	348.16	389.12	368.64
14/3/43	25.09	17.13	689.23	370.51	358.59	390.43	358.59
15/3/43	23.11	17.13	649.39	370.51	330.67	390.43	358.59
16/3/43	23.86	17.89	695.80	377.72	337.96	397.60	357.84
17/3/43	21.91	17.93	697.20	378.56	338.64	398.40	358.56
18/3/43	23.90	15.94	697.20	378.48	338.64	398.40	358.56
19/3/43	23.90	17.93	697.20	378.48	338.64	398.40	358.56

ตารางที่ ข-3. ผลการวิเคราะห์ค่า COD (mg/L) ที่อัตราการไหล 0.15 m<sup>3</sup>/d

วันที่	น้ำอ่างเก็บน้ำ ที่จุดเข้า	แปลงที่ 1 น้ำอ่างเก็บน้ำ ความชัน 2%	น้ำเสียด ที่จุดเข้า	แปลงที่ 2 น้ำเสียด ความชัน 2%	แปลงที่ 3 น้ำเสียด ความชัน 4%	แปลงที่ 4 น้ำเสียด ความชัน 6%	แปลงที่ 5 น้ำเสียด ความชัน 8%
2/4/43	43.38	35.49	670.48	453.56	433.84	473.28	414.12
3/4/43	45.54	25.74	851.40	514.80	475.20	514.80	495.00
4/4/43	31.74	21.82	833.28	476.16	476.16	496.00	436.48
5/4/43	-	-	-	-	-	-	-
6/4/43	25.89	17.93	816.72	498.00	438.24	498.00	458.16
7/4/43	19.48	11.69	818.16	487.00	467.52	506.48	428.56
8/4/73	27.27	19.48	798.68	467.52	448.04	487.00	467.52
9/4/43	42.86	35.06	857.12	487.00	487.00	506.48	506.48
10/4/43	-	-	-	-	-	-	-
11/4/43	-	-	-	-	-	-	-
12/4/43	29.40	21.56	803.60	509.60	470.40	490.00	490.00
13/4/43	-	-	-	-	-	-	-
14/4/43	33.32	25.48	803.60	490.00	470.40	509.60	470.40
15/4/43	25.48	21.56	803.60	490.00	431.20	490.00	450.80
17/4/43	27.55	23.62	747.84	432.96	393.60	432.96	413.28
18/4/43	19.68	15.74	708.48	393.60	373.92	413.28	393.60
19/4/43	31.36	23.52	744.80	411.60	372.40	411.60	392.00
20/4/43	33.18	25.38	722.24	390.40	370.88	409.92	351.36
21/4/43	-	-	-	-	-	-	-
22/4/43	-	-	-	-	-	-	-
23/4/43	27.20	19.40	660.96	388.80	349.92	408.24	369.36
24/4/43	31.10	23.33	699.84	388.80	330.46	388.80	349.92
25/4/43	31.36	19.60	686.00	392.00	372.40	411.60	392.00
26/4/43	23.52	11.76	744.80	392.00	352.80	392.00	372.40
27/4/43	25.48	11.76	705.60	392.00	352.80	392.00	372.40
28/4/43	23.42	11.70	702.72	390.40	351.36	390.40	370.88
29/4/43	25.38	11.70	722.24	390.40	351.36	390.40	370.88
30/4/43	25.38	11.70	663.68	390.40	351.36	429.44	390.40

ตารางที่ ข-4. ผลการวิเคราะห์ค่า COD (mg/L) ที่อัตราการไหล 0.18 m<sup>3</sup>/d

วันที่	น้ำอ่างเก็บน้ำ ที่จุดเข้า	แปลงที่ 1 น้ำอ่างเก็บน้ำ ความชัน 2%	น้ำเสีย ที่จุดเข้า	แปลงที่ 2 น้ำเสีย ความชัน 2%	แปลงที่ 3 น้ำเสีย ความชัน 4%	แปลงที่ 4 น้ำเสีย ความชัน 6%	แปลงที่ 5 น้ำเสีย ความชัน 8%
8/5/43	20.00	14.00	580.00	420.00	400.00	400.00	420.00
9/5/43	28.45	16.26	690.88	447.04	447.04	447.04	426.04
10/5/43	20.08	16.06	602.40	441.76	441.76	441.76	421.68
11/9/43	22.22	10.10	686.80	424.20	444.40	404.00	424.20
12/5/43	40.64	32.51	690.88	386.08	386.08	406.40	406.40
13/5/43	36.58	28.45	650.24	386.04	406.40	406.40	365.76
14/5/43	36.58	28.45	609.60	406.40	365.76	406.40	345.44
15/5/43	28.17	16.10	663.96	402.40	382.28	402.40	382.28
16/5/43	32.26	20.16	604.80	403.20	383.04	423.36	383.04
17/5/43	32.51	12.19	650.24	426.72	406.40	406.40	406.40
18/5/43	28.45	12.19	609.60	383.04	365.76	406.40	383.04
19/5/43	-	-	-	-	-	-	-
20/5/43	26.31	18.22	609.60	364.32	364.32	384.56	384.56
21/5/43	-	-	-	-	-	-	-
22/5/43	22.44	18.36	632.40	346.80	367.20	367.20	387.60
23/5/43	34.48	18.25	709.80	387.60	365.04	405.60	387.60
24/5/43	32.19	18.11	684.08	382.28	362.16	402.40	382.28
25/5/43	36.22	16.09	645.84	382.28	362.16	402.40	362.16
26/5/43	36.14	20.08	682.72	381.52	361.44	401.60	381.52
27/5/43	36.14	18.07	642.56	381.52	361.44	361.44	361.44
28/5/43	34.14	18.07	642.56	381.52	361.44	401.60	381.52
29/5/43	34.00	18.00	660.00	380.00	360.00	400.00	380.00

ตารางที่ ข-5. ผลการทดสอบทางสถิติเมื่อระบบคกที่ ของอัตราการไหล 0.10 m<sup>3</sup>/d

น้ำตัวอย่าง	ค่าทางสถิติ		
	Mean	Standard Deviation	Coefficient of variance
น้ำอ่างเก็บน้ำ ความชัน 2%	14.084	0.175	1.24%
น้ำเลีย ความชัน 2%	357.800	5.444	1.52%
น้ำเลีย ความชัน 4%	320.643	3.370	1.05%
น้ำเลีย ความชัน 6%	375.051	6.170	1.65%
น้ำเลีย ความชัน 8%	340.783	3.507	1.03%
อ่างสระ 1 ที่จุดเข้า	24.143	0.291	1.21%
น้ำเลียที่จุดเข้า	684.20	8.461	1.24%

หมายเหตุ : Coefficient of variance =  $\frac{\text{Std dev}}{\text{Mean}} \times 100$

ตารางที่ ข-6. การวิเคราะห์คุณภาพน้ำเมื่อระบบคกที่ ของอัตราการไหล 0.10 m<sup>3</sup>/d

น้ำตัวอย่าง	พารามิเตอร์						
	COD (mg/L)	BOD (mg/L)	TSS (mg/L)	TKN (mg/L)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N (mg/L)	TP (mg/L)	Coliform bacteria (cell/100mL)
น้ำอ่างเก็บน้ำ ความชัน 2%	14.01	12.10	-	1.03	-	-	2.57x10 <sup>4</sup>
น้ำเลีย ความชัน 2%	360.71	176.20	175.00	36.21	0.673	77.33	5.93x10 <sup>6</sup>
น้ำเลีย ความชัน 4%	322.36	158.20	200.00	30.92	0.650	76.13	4.58x10 <sup>6</sup>
น้ำเลีย ความชัน 6%	374.24	182.20	225.00	38.76	0.750	79.04	6.49x10 <sup>6</sup>
น้ำเลีย ความชัน 8%	340.92	149.53	225.00	32.19	0.613	78.02	5.33x10 <sup>6</sup>
อ่างสระ 1 ที่จุดเข้า	23.89	12.66	-	1.28	-	-	6.83x10 <sup>4</sup>
น้ำเลียที่จุดเข้า	681.36	328.00	353.33	62.81	0.81	108.67	1.21 x10 <sup>7</sup>

ตารางที่ ข-7. ผลการทดสอบทางสถิติเมื่อระบบคกที่ ของอัตราการไหล 0.12 m<sup>3</sup>/d

น้ำตัวอย่าง	ค่าทางสถิติ		
	Mean	Standard Deviation	Coefficient of variance
น้ำอ่างเก็บน้ำ ความชัน 2%	17.325	0.780	4.50%
น้ำเลีย ความชัน 2%	375.710	4.040	1.08%
น้ำเลีย ความชัน 4%	340.520	9.388	2.76%
น้ำเลีย ความชัน 6%	395.610	4.024	1.02%
น้ำเลีย ความชัน 8%	358.450	0.299	0.08%
น้ำอ่างเก็บน้ำ ที่จุดเข้า	23.63	1.054	4.46%
น้ำเลียที่จุดเข้า	687.67	19.007	2.76%

หมายเหตุ : Coefficient of variance =  $\frac{\text{Std dev} \times 100}{\text{Mean}}$

ตารางที่ ข-8. การวิเคราะห์คุณภาพน้ำเมื่อระบบคกที่ ของอัตราการไหล 0.12 m<sup>3</sup>/d

น้ำตัวอย่าง	พารามิเตอร์						
	COD (mg/L)	BOD (mg/L)	TSS (mg/L)	TKN (mg/L)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N (mg/L)	TP (mg/L)	Coliform bacteria (cell/100mL)
น้ำอ่างเก็บน้ำ ความชัน 2%	16.87	13.40	13.33	-	-	-	3.30x10 <sup>4</sup>
น้ำเลีย ความชัน 2%	375.59	187.00	192.00	46.48	0.60	84.80	1.18 x10 <sup>7</sup>
น้ำเลีย ความชัน 4%	335.76	177.00	209.30	41.07	0.59	81.89	9.57x10 <sup>6</sup>
น้ำเลีย ความชัน 6%	395.34	193.00	241.30	50.49	0.61	86.30	1.29x10 <sup>7</sup>
น้ำเลีย ความชัน 8%	358.33	182.00	237.30	42.46	0.60	82.81	1.06x10 <sup>7</sup>
น้ำอ่างเก็บน้ำ ที่จุดเข้า	35.04	14.00	21.67	0.56	-	-	8.13x10 <sup>4</sup>
น้ำเลียที่จุดเข้า	680.79	315.00	364.00	76.95	0.71	119.33	2.35x10 <sup>7</sup>

ตารางที่ ข-9. ผลการทดสอบทางสถิติเมื่อระบบคกที่ ของอัตราการไหล 0.15 m<sup>3</sup>/d

น้ำตัวอย่าง	ค่าทางสถิติ		
	Mean	Standard Deviation	Coefficient of variance
น้ำอ่างเก็บน้ำ ความชัน 2%	11.724	0.033	0.28%
น้ำเลีย ความชัน 2%	391.040	0.876	0.22%
น้ำเลีย ความชัน 4%	351.936	0.789	0.22%
น้ำเลีย ความชัน 6%	398.848	17.120	4.29%
น้ำเลีย ความชัน 8%	375.392	8.424	2.24%
อ่างสระ 1 ที่จุดเข้า	24.636	1.066	4.33%
น้ำเลียที่จุดเข้า	711.712	18.539	2.60%

หมายเหตุ : Coefficient of variance =  $\frac{\text{Std dev}}{\text{Mean}} \times 100$

ตารางที่ ข-10. การวิเคราะห์คุณภาพน้ำเมื่อระบบคกที่ ของอัตราการไหล 0.15 m<sup>3</sup>/d

น้ำตัวอย่าง	พารามิเตอร์						
	COD (mg/L)	BOD (mg/L)	TSS (mg/L)	TKN (mg/L)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N (mg/L)	TP (mg/L)	Coliform bacteria (cell/100mL)
น้ำอ่างเก็บน้ำ ความชัน 2%	11.72	12.20	9.33	0.56	-	-	3.10x10 <sup>4</sup>
น้ำเลีย ความชัน 2%	390.93	194.00	220.00	50.56	0.68	66.69	1.48x10 <sup>7</sup>
น้ำเลีย ความชัน 4%	351.84	182.00	238.60	43.40	0.67	64.66	1.19x10 <sup>7</sup>
น้ำเลีย ความชัน 6%	403.95	200.00	280.00	55.44	0.69	66.71	1.54x10 <sup>7</sup>
น้ำเลีย ความชัน 8%	371.36	188.00	270.60	47.32	0.68	65.57	1.34x10 <sup>7</sup>
น้ำอ่างเก็บน้ำ ที่จุดเข้า	24.75	12.80	13.33	1.31	-	-	7.17x10 <sup>4</sup>
น้ำเลียที่จุดเข้า	703.68	320.00	400.00	79.61	0.80	93.59	2.89x10 <sup>7</sup>

ตารางที่ ข-11. ผลการทดสอบทางสถิติเมื่อระบบคกที่ ของอัตราการไหล 0.18 m<sup>3</sup>/d

น้ำตัวอย่าง	ค่าทางสถิติ		
	Mean	Standard Deviation	Coefficient of variance
น้ำอ่างเก็บน้ำ ความชัน 2%	17.810	0.775	4.35%
น้ำเลีย ความชัน 2%	388.114	8.930	2.30%
น้ำเลีย ความชัน 4%	361.954	1.539	0.43%
น้ำเลีย ความชัน 6%	402.171	1.710	0.43%
น้ำเลีย ความชัน 8%	376.646	10.421	2.77%
อ่างสระ 1 ที่จุดเข้า	34.759	1.505	4.39%
น้ำเลียที่จุดเข้า	666.794	26.018	3.90%

หมายเหตุ : Coefficient of variance =  $\frac{\text{Std dev} \times 100}{\text{Mean}}$

ตารางที่ ข-12 . การวิเคราะห์คุณภาพน้ำเมื่อระบบคกที่ ของอัตราการไหล 0.18 m<sup>3</sup>/d

น้ำตัวอย่าง	พารามิเตอร์						
	COD (mg/L)	BOD (mg/L)	TSS (mg/L)	TKN (mg/L)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N (mg/L)	TP (mg/L)	Coliform bacteria (cell/100mL)
น้ำอ่างเก็บน้ำ ความชัน 2%	17.35	12.10	10.67	0.56	-	-	3.37x10 <sup>4</sup>
น้ำเลีย ความชัน 2%	394.01	193.00	104.00	28.75	0.46	35.55	1.33x10 <sup>7</sup>
น้ำเลีย ความชัน 4%	360.48	187.00	114.70	24.17	0.45	34.52	1.17x10 <sup>7</sup>
น้ำเลีย ความชัน 6%	413.84	199.00	129.30	30.61	0.48	36.57	1.41x10 <sup>7</sup>
น้ำเลีย ความชัน 8%	380.48	190.00	126.70	26.41	0.47	34.18	1.26x10 <sup>7</sup>
น้ำอ่างเก็บน้ำ ที่จุดเข้า	34.72	12.70	17.33	0.93	-	-	6.97x10 <sup>4</sup>
น้ำเลียที่จุดเข้า	667.53	305.00	184.00	43.59	0.54	48.90	2.70x10 <sup>7</sup>



ตารางที่ ข-13. ประสิทธิภาพการบำบัดทิ้งจากฟาร์มสุกรแบบระบบน้ำไหลนอง ที่ความชัน 2%

พารามิเตอร์	อัตราการไหล (m <sup>3</sup> /d)			
	0.10	0.12	0.15	0.18
<b>COD</b>				
Influent concentration (mg/L)	681.36	680.79	703.68	667.53
Effluent concentration (mg/L)	360.71	375.59	390.93	394.01
%Removal	47.00	44.83	44.44	40.97
<b>BOD</b>				
Influent concentration (mg/L)	328.00	315.00	320.00	305.00
Effluent concentration (mg/L)	176.20	187.00	194.00	193.00
%Removal	46.28	40.63	39.38	36.72
<b>TSS</b>				
Influent concentration (mg/L)	353.33	364.00	400.00	184.00
Effluent concentration (mg/L)	175.00	192.00	220.00	104.00
%Removal	50.47	47.25	45.00	43.48
<b>TP</b>				
Influent concentration (mg/L)	108.67	119.33	93.59	48.90
Effluent concentration (mg/L)	77.33	84.80	65.11	35.55
%Removal	28.84	28.94	28.74	27.30
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup>N</b>				
Influent concentration (mg/L)	0.81	0.71	0.80	0.54
Effluent concentration (mg/L)	0.67	0.60	0.68	0.46
%Removal	17.28	15.49	15.00	14.81
<b>TKN</b>				
Influent concentration (mg/L)	62.81	76.95	79.61	43.59
Effluent concentration (mg/L)	36.21	46.48	50.59	28.75
%Removal	42.35	39.59	36.45	34.04
<b>Coliform bacteria</b>				
Influent concentration (cell/100 mL)	1.21x10 <sup>7</sup>	2.35x10 <sup>7</sup>	2.89x10 <sup>7</sup>	2.70x10 <sup>7</sup>
Effluent concentration (cell/100 mL)	5.93x10 <sup>6</sup>	1.18x10 <sup>7</sup>	1.48x10 <sup>7</sup>	1.33x10 <sup>7</sup>
%Removal	50.17	49.79	48.79	50.74

ตารางที่ ข-14. ประสิทธิภาพการบำบัดทิ้งจากฟาร์มสุกรแบบระบบน้ำไหลนอง ที่ความชัน 4%

พารามิเตอร์	อัตราการไหล (m <sup>3</sup> /d)			
	0.10	0.12	0.15	0.18
<b>COD</b>				
Influent concentration (mg/L)	681.36	680.79	703.68	667.53
Effluent concentration (mg/L)	322.36	335.76	351.84	360.48
%Removal	52.69	50.68	50.00	45.99
<b>BOD</b>				
Influent concentration (mg/L)	328.00	315.00	320.00	305.00
Effluent concentration (mg/L)	158.20	177.00	182.00	187.00
%Removal	52.77	43.81	43.13	38.69
<b>TSS</b>				
Influent concentration (mg/L)	353.33	364.00	400.00	184.00
Effluent concentration (mg/L)	200.00	209.30	238.60	114.70
%Removal	43.39	42.50	40.35	37.66
<b>TP</b>				
Influent concentration (mg/L)	108.67	119.33	93.59	48.90
Effluent concentration (mg/L)	76.13	81.89	64.66	34.52
%Removal	29.94	31.38	30.91	29.41
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup>N</b>				
Influent concentration (mg/L)	0.81	0.71	0.80	0.54
Effluent concentration (mg/L)	0.65	0.59	0.67	0.45
%Removal	19.75	16.90	16.25	16.67
<b>TKN</b>				
Influent concentration (mg/L)	62.81	76.95	79.61	43.59
Effluent concentration (mg/L)	30.92	41.04	43.40	24.17
%Removal	50.77	46.63	45.48	44.55
<b>Coliform bacteria</b>				
Influent concentration (cell/100 mL)	1.21x10 <sup>7</sup>	2.35x10 <sup>7</sup>	2.89x10 <sup>7</sup>	2.70x10 <sup>7</sup>
Effluent concentration (cell/100 mL)	4.58x10 <sup>6</sup>	9.57x10 <sup>6</sup>	1.19x10 <sup>7</sup>	1.17x10 <sup>7</sup>
%Removal	62.15	59.28	58.82	56.67

ตารางที่ ข-15. ประสิทธิภาพการบำบัดที่จากฟาร์มสุกรแบบระบบน้ำไหลนอง ที่ความชัน 6%

พารามิเตอร์	อัตราการไหล (m <sup>3</sup> /d)			
	0.10	0.12	0.15	0.18
<b>COD</b>				
Influent concentration (mg/L)	681.36	680.79	703.68	667.53
Effluent concentration (mg/L)	374.24	395.34	403.95	413.84
%Removal	45.07	41.93	42.59	38.00
<b>BOD</b>				
Influent concentration (mg/L)	328.00	315.00	320.00	305.00
Effluent concentration (mg/L)	182.20	193.00	200.00	199.00
%Removal	44.45	38.73	37.50	34.75
<b>TSS</b>				
Influent concentration (mg/L)	353.33	364.00	400.00	184.00
Effluent concentration (mg/L)	225.00	241.30	280.00	129.30
%Removal	36.32	33.71	30.00	29.73
<b>TP</b>				
Influent concentration (mg/L)	108.67	119.33	93.59	48.90
Effluent concentration (mg/L)	79.04	86.30	66.71	36.57
%Removal	27.27	27.68	28.72	25.21
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup>N</b>				
Influent concentration (mg/L)	0.81	0.71	0.80	0.54
Effluent concentration (mg/L)	0.68	0.61	0.69	0.48
%Removal	16.05	14.08	13.75	11.11
<b>TKN</b>				
Influent concentration (mg/L)	62.81	76.95	79.61	43.59
Effluent concentration (mg/L)	36.76	50.49	55.44	30.61
%Removal	38.29	34.39	30.36	29.78
<b>Coliform bacteria</b>				
Influent concentration (cell/100 mL)	1.21x10 <sup>7</sup>	2.35x10 <sup>7</sup>	2.89x10 <sup>7</sup>	2.70x10 <sup>7</sup>
Effluent concentration (cell/100 mL)	6.49x10 <sup>6</sup>	1.29x10 <sup>7</sup>	1.54x10 <sup>7</sup>	1.41x10 <sup>7</sup>
%Removal	46.36	45.11	46.71	47.78

ตารางที่ ข-16. ประสิทธิภาพการบำบัดที่จากฟาร์มสุกรแบบระบบน้ำไหลนอง ที่ความชัน 8%

พารามิเตอร์	อัตราการไหล (m <sup>3</sup> /d)			
	0.10	0.12	0.15	0.18
<b>COD</b>				
Influent concentration (mg/L)	681.36	680.79	703.68	667.53
Effluent concentration (mg/L)	340.92	358.33	371.36	380.48
%Removal	49.96	47.37	47.23	44.49
<b>BOD</b>				
Influent concentration (mg/L)	328.00	315.00	320.00	305.00
Effluent concentration (mg/L)	149.53	182.00	188.00	190.00
%Removal	54.41	42.22	41.25	37.70
<b>TSS</b>				
Influent concentration (mg/L)	353.33	364.00	400.00	184.00
Effluent concentration (mg/L)	225.00	237.30	270.60	126.70
%Removal	36.32	34.81	32.35	31.14
<b>TP</b>				
Influent concentration (mg/L)	108.67	119.33	93.59	48.90
Effluent concentration (mg/L)	78.20	82.81	65.57	34.18
%Removal	28.04	30.60	29.93	30.10
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup>N</b>				
Influent concentration (mg/L)	0.81	0.71	0.80	0.54
Effluent concentration (mg/L)	0.66	0.60	0.68	0.47
%Removal	18.52	15.49	15.00	12.96
<b>TKN</b>				
Influent concentration (mg/L)	62.81	76.95	79.61	43.59
Effluent concentration (mg/L)	32.19	42.47	47.32	26.41
%Removal	48.75	44.80	40.56	39.41
<b>Coliform bacteria</b>				
Influent concentration (cell/100 mL)	1.21x10 <sup>7</sup>	2.35x10 <sup>7</sup>	2.89 x10 <sup>7</sup>	2.70x10 <sup>7</sup>
Effluent concentration (cell/100 mL)	5.33x10 <sup>6</sup>	1.06x10 <sup>7</sup>	1.34x10 <sup>7</sup>	1.26x10 <sup>7</sup>
%Removal	55.95	54.89	53.63	53.33

ตารางที่ ข-17. ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำผิวดินจากอ่างเก็บน้ำ ที่ความชัน 2%

พารามิเตอร์	อัตราการไหล (m <sup>3</sup> /d)			
	0.10	0.12	0.15	0.18
<b>COD</b>				
Influent concentration (mg/L)	29.89	35.04	24.75	34.72
Effluent concentration (mg/L)	14.01	16.87	11.72	17.35
%Removal	53.13	51.86	52.65	50.03
<b>BOD</b>				
Influent concentration (mg/L)	12.66	14.00	12.80	12.70
Effluent concentration (mg/L)	12.10	13.40	12.20	12.10
%Removal	4.40	4.29	4.69	4.72
<b>TSS</b>				
Influent concentration (mg/L)	6.67	21.67	13.33	17.33
Effluent concentration (mg/L)	4.12	13.33	9.33	10.37
%Removal	38.23	38.49	30.00	38.43
<b>TKN</b>				
Influent concentration (mg/L)	1.28	0.19	1.31	0.93
Effluent concentration (mg/L)	1.03	0.09	0.56	0.56
%Removal	19.53	52.63	57.25	39.78
<b>Coliform bacteria</b>				
Influent concentration (cell/100 mL)	6.83 x10 <sup>4</sup>	8.13x10 <sup>4</sup>	7.17x10 <sup>4</sup>	6.97x10 <sup>4</sup>
Effluent concentration (cell/100 mL)	2.57x10 <sup>4</sup>	3.30 x10 <sup>4</sup>	3.10x10 <sup>4</sup>	3.37x10 <sup>4</sup>
%Removal	62.43	59.42	56.75	51.67

## ภาคผนวก ก

## แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ตาราง ก-1. ตรวจสอบปฏิกิริยาอันดับศูนย์

อัตราการไหล (m <sup>3</sup> /d)	น้ำเสีย ตัวอย่าง	ค่าทางสถิติ						
		Signif.	SSE	$\beta_1$	MSR	MSE	F	$F_{1-\alpha, v_1, v_2}$
0.10	ความชัน 2%	0.0051	154945	0.923	20392	2422	8.42	3.995
	ความชัน 4%	0.0144	163323	0.821	16151	2552	6.33	3.995
	ความชัน 6%	0.0055	126878	0.826	16352	1982	8.25	3.995
	ความชัน 8%	0.0342	131727	0.634	9641	2058	4.68	3.995
0.12	ความชัน 2%	0.0179	14446	0.777	2549	413	6.18	4.125
	ความชัน 4%	0.0000	23426	2.465	25625	669	38.29	4.125
	ความชัน 6%	0.0371	9715	0.556	1303	278	4.69	4.125
	ความชัน 8%	0.0157	21720	0.974	4005	621	6.45	4.125
0.15	ความชัน 2%	0.0000	14261	6.384	36086	713	50.61	4.350
	ความชัน 4%	0.0000	14737	7.194	45828	737	62.19	4.350
	ความชัน 6%	0.0000	12631	6.380	36062	632	57.10	4.350
	ความชัน 8%	0.0010	22528	5.569	27468	1126	24.39	4.350
0.18	ความชัน 2%	0.0000	6387	2.990	5949	355	16.76	4.410
	ความชัน 4%	0.0000	6259	4.013	10708	348	30.79	4.410
	ความชัน 6%	0.0000	5138	1.794	2141	285	7.50	4.410
	ความชัน 8%	0.0054	6162	2.260	3407	341	10.00	4.410

หมายเหตุ : Signif. = Significant

SSE = Sum Square of Error

MSR = Mean Square of Regression, MSE = Mean Square of Error

F = MSR/MSE

 $F < F_{1-\alpha, v_1, v_2}$  ยอมรับ  $H_0$  $F > F_{1-\alpha, v_1, v_2}$  ปฏิเสธ  $H_0$

ตาราง ก-2. ตรวจสอบปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

อัตราการไหล (m <sup>3</sup> /d)	น้ำเสีย ตัวอย่าง	ค่าทางสถิติ						
		Signif.	SSE	$\beta_1$	MSR	MSE	F	$F_{1-\alpha, v_1, v_2}$
0.10	ความชัน 2%	0.0000	1.485	0.005	0.548	0.023	23.59	3.995
	ความชัน 4%	0.0001	1.962	0.005	0.529	0.031	17.27	3.995
	ความชัน 6%	0.0000	1.209	0.005	0.505	0.019	26.69	3.995
	ความชัน 8%	0.0002	1.817	0.004	0.452	0.028	15.93	3.995
0.12	ความชัน 2%	0.0001	0.938	0.012	0.563	0.027	21.03	4.125
	ความชัน 4%	0.0000	0.653	0.016	1.028	0.019	55.10	4.125
	ความชัน 6%	0.0001	0.855	0.011	0.476	0.024	19.49	4.125
	ความชัน 8%	0.0000	0.814	0.012	0.581	0.023	25.01	4.125
0.15	ความชัน 2%	0.0009	0.041	0.006	0.031	0.002	15.16	4.350
	ความชัน 4%	0.0000	0.050	0.009	0.074	0.0025	29.22	4.350
	ความชัน 6%	0.0089	0.072	0.006	0.030	0.0036	8.39	4.350
	ความชัน 8%	0.0361	0.076	0.005	0.019	0.0038	5.05	4.350
0.18	ความชัน 2%	0.0038	0.077	0.008	0.047	0.004	11.03	4.410
	ความชัน 4%	0.0003	0.065	0.010	0.073	0.0036	20.06	4.410
	ความชัน 6%	0.0246	0.0714	0.006	0.024	0.0039	6.01	4.410
	ความชัน 8%	0.0078	0.059	0.007	0.029	0.0033	8.96	4.410

หมายเหตุ : Signif. = Significant

SSE = Sum Square of Error

MSR = Mean Square of Regression

MSE = Mean Square of Error

F = MSR/MSE

$F < F_{1-\alpha, v_1, v_2}$  ยอมรับ  $H_0$

$F > F_{1-\alpha, v_1, v_2}$  ปฏิเสธ  $H_0$

ตาราง ค-3. ตรวจสอบปฏิกิริยาอันดับสอง

อัตราการไหล (m <sup>3</sup> /d)	น้ำเสีย ตัวอย่าง	ค่าทางสถิติ						
		Signif.	SSE	$\beta_1$	MSR	MSE	F	$F_{1-\alpha, v_1, v_2}$
0.10	ความชื้น 2%	0.0109	0	$5.14 \times 10^{-6}$	0	0	0	3.995
	ความชื้น 4%	0.0228	0	$5.11 \times 10^{-6}$	0	0	0	3.995
	ความชื้น 6%	0.0260	0	$4.10 \times 10^{-6}$	0	0	0	3.995
	ความชื้น 8%	0.0485	0	$4.15 \times 10^{-6}$	0	0	0	3.995
0.12	ความชื้น 2%	0.0451	0	$3.67 \times 10^{-6}$	0	0	0	4.125
	ความชื้น 4%	0.0000	0	$1.74 \times 10^{-5}$	0	0	0	4.125
	ความชื้น 6%	0.0380	0	$3.37 \times 10^{-6}$	0	0	0	4.125
	ความชื้น 8%	0.0230	0	$5.88 \times 10^{-6}$	0	0	0	4.125
0.15	ความชื้น 2%	0.0000	0	$3.63 \times 10^{-5}$	0	0	0	4.350
	ความชื้น 4%	0.0000	0	$4.32 \times 10^{-5}$	0	0	0	4.350
	ความชื้น 6%	0.0000	0	$3.35 \times 10^{-5}$	0	0	0	4.350
	ความชื้น 8%	0.0000	0	$3.40 \times 10^{-5}$	0	0	0	4.350
0.18	ความชื้น 2%	0.0047	0	$1.60 \times 10^{-5}$	0	0	0	4.410
	ความชื้น 4%	0.0000	0	$2.69 \times 10^{-5}$	0	0	0	4.410
	ความชื้น 6%	0.0184	0	$1.20 \times 10^{-5}$	0	0	0	4.410
	ความชื้น 8%	0.0129	0	$1.35 \times 10^{-5}$	0	0	0	4.410

หมายเหตุ : Signif. = Significant

SSE = Sum Square of Error

MSR = Mean Square of Regression

MSE = Mean Square of Error

F = MSR/MSE

$F < F_{1-\alpha, v_1, v_2}$  ยอมรับ  $H_0$

$F > F_{1-\alpha, v_1, v_2}$  ปฏิเสธ  $H_0$



ตาราง ค-4. การคำนวณหาค่า Z

Q (m <sup>3</sup> /d)	T <sub>mean</sub> (min)	h (m)	Z (m)
0.10	173.4	0.002	4.0
0.12	147.6	0.003	2.7
0.15	118.2	0.004	2.1
0.18	98.40	0.006	1.4

หมายเหตุ :  $Z = (Q/A) * T_{\text{mean}}$

## เอกสารอ้างอิง

- กิตติ จาตนิลพันธุ์. (2540). การจัดการทุ่งหญ้า การเตรียมดิน การใส่ปุ๋ย และเครื่องจักรกลฟาร์ม. สัตว์บก. ปีที่ 7(40): 44-48.
- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. (2539). การบำบัดน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มิตรนรา การพิมพ์.
- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. (2537). การบำบัดน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มิตรนรา การพิมพ์.
- จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. คณะวิศวกรรมศาสตร์. ภาควิศวกรรมสิ่งแวดล้อม. (2538). การควบคุมดูแลระบบบำบัดน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ชวนิศนดากร วรวรรณ, ม.ร.ว. (2534). การเลี้ยงโคนม. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ: ไทยวัฒนาพานิช จำกัด.
- ชาญชัย มณีคุณย์ และนวนลณี กาญจนพิบูลย์. (2521). การใช้ประโยชน์จากแปลงหญ้า. ใน สายัณห์ ทัดศรี (บรรณาธิการ). พืชอาหารสัตว์เขตร้อน การผลิตและการจัดการ (หน้า 346-348). กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ริ้วเขียว.
- ไชยยุทธ กลิ่นสุคนธ์. (2534). การนำน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมาใช้ประโยชน์. วิศวกรรมสารฉบับเทคโนโลยี. ปีที่ 47(3): 62-70.
- ทรงศิริ แต่สมบัติ. (2541). การวิเคราะห์การถดถอย. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ธงชัย พรรณสวัสดิ์. (2536). ปฏิบัติการอย่างง่ายสำหรับการวิเคราะห์น้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- บุญญา วิไลพล. (2535). การจัดการทุ่งหญ้าเพื่อการผลิตโคและกระบือในประเทศไทย. พิมพ์ครั้งที่ 1. ภาควิชาสัตวศาสตร์ คณะเกษตรศาสตร์: มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- บุญบา ธรรมประเสริฐ. (2537). การจัดการของเสียฟาร์มสุกรโดยใช้ระบบหมักแบบ upflow anaerobic sludge blanket. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ฝายน้ำทิ้งเกษตรกรรม กองการจัดการคุณภาพน้ำ กรมควบคุมมลพิษ. (2539). การจัดการน้ำเสียจากฟาร์มสุกร. สัตว์บก. ปีที่ 4(39): 61-66.
- มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. (2536). รวมเรื่องโคนม. พิมพ์ครั้งที่ 4. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน: ศูนย์ส่งเสริมและฝึกอบรมการเกษตรแห่งชาติ.

- มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. คณะวิศวกรรมศาสตร์. ภาควิศวกรรมสิ่งแวดล้อม. (2535). โครงการวิจัยร่วมเรื่องการพัฒนาเทคโนโลยีที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดของเสียจากมนุษย์ในเขตภาคเหนือตอนบน. (ม.ท.ป.).
- ศศิธร ถิ่นนคร. (2540). การปลูกและการจัดการแปลงหญ้าถาวร. สัตว์บก. ปีที่ 4(40): 44-48.
- ศศิธร ถิ่นนคร. (2540). การปลูกและการจัดการแปลงหญ้าถาวร. สัตว์บก. ปีที่ 4(41): 72-75.
- สายัณห์ ทัดศรี. (2540). พืชอาหารสัตว์เขตร้อน การผลิตและการจัดการ. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์รั้วเขียว.
- สายัณห์ ทัดศรี และนิพนธ์ ภาชนะวรรณ. (2539). การใช้ประโยชน์จากแปลงหญ้า. ใน สายัณห์ ทัดศรี (บรรณาธิการ). พืชอาหารสัตว์เขตร้อน การผลิตและการจัดการ (หน้า 348). กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์รั้วเขียว.
- สมพร คนยงค์. (2527). อิทธิพลของชนิดและอัตราปุ๋ยในโตรเจนที่มีผลผลิตของหญ้าขจรสีที่ปลูกบนดินกรปรุ่ม ดินกำแพงแสน ดินหมวกเหล็ก และดินชัยบาดาล. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- Abrahams, A.D., and Atkinson, J.E. (1993). Relation Between Grain Velocity and Sediment Concentration in Overland Flow. Journal of Water Resources Research, Planning Development and Management. No. 29, pp.1415.
- APHA, AWWA and WEF. (1992). Standard Methods for Examination of Water and Wastewater. 18<sup>th</sup> ed. Washington, DC: American Public Health Association.
- Boda, J.O. and Willrich, T.L. (1976). Overland Flow Treatment of Swine Lagoon Effluent. Transaction of the American Society of Agricultural Engineer. ASAE Paper No.76-4515.
- Bolneni, V.P. (1979). Land Treatment and Disposal of Argo-industrial wastes. M.S.thesis, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.
- Hawkins, G.L., Hill, D.T., Rochester, E.W., and Wood, C.W., (1995). Evaluation of Overland Flow Treatment for Swine Lagoon Effluent. Transaction of the American Society of Agricultural Engineer. Vol.38, No.2, pp.397-402.
- Hegg, R.O., and Turner, A.K. (1983). Overland Flow as a Method of Treatment for Animal waste. Journal of Agricultural Wastes. Vol.8, No.3, pp.167-184.
- Master, Gilbert M., (1998). Introduction to Environmental Engineering and Science. 2<sup>nd</sup> ed. New Jersey, U.S.A.: Prentice Hall.
- McGhee, Terence J., (1991). Water Supply and Sewerage. 6<sup>th</sup> ed. Singapore: McGraw-Hill.

- Metcalf & Eddy, Inc. (1991). Wastewater Engineering Treatment Disposal and Reuse. 3<sup>rd</sup> ed. Singapore: McGraw-Hill.
- Overcash, M.R., Covil, D.M., Gilliam, J.W., Westeman, P.M., and Humenik, F.J. (1978). Overland Flow Pretreatment of Poultry Manure. Journal of The Environmental Engineering Division. Vol.104, No.EE2, pp.339-350.
- Polprasert, C. (1996). Organic Waste Recycling. 2<sup>nd</sup> ed. Chichester, New York: Wiley.
- Rajagopal, K., Lohani, B.N., and Loehr, Raymond C. (1980). Land Treatment of Municipal Wastewater. In ENSIC. Environmental Sanitation reviews. (pp.1-29). Bangkok: Mitr Charoen.
- Reed, Sherwood C., and Crites, Ronald W. (1984). Handbook of Land Treatment Systems for Industrial and Municipal Wastes. New York, U.S.A.: Noyes.
- Smith, Robert G., and Schroeder, Edward D. (1985). Field Studies of The Overland Flow Process for The Treatment of Raw and Primary Treated Municipal Wastewater. Journal Of Water Pollution Control Federation. Vol.57, No.7, pp.785-794.
- Turner, G., et al. (1994). Phosphorus Removal From Secondary-Treated Wastewater Using Overland Flow. Journal of Water, Air and Soil Pollution. No.73, pp.157.
- US. EPA. (1976). Land Treatment of Municipal Wastewater Effluents: Design Factors-II. US. EPA Technology Transfer Seminar Publication, Washington, DC.
- US. EPA. (1981). Process Design Manual for Land Treatment of Municipal Wastewater. EPA-625/1-81-013. U.S. Environmental Protection Agency. Cincinnati. Ohio.
- Witherow, J.L. and Bledsoe, B.E. (1986). Design model for the overland flow process. Journal Of Water Pollution Control Federation. Vol.58, No.5, pp.381-386.

## ประวัติผู้เขียน

นางสาวอลิสรา จิตรมณี เกิดเมื่อวันที่ 1 พฤษภาคม พ.ศ. 2518 เริ่มเข้าศึกษา  
ระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ปีการศึกษา 2536 และสำเร็จการศึกษาเมื่อปี  
พ.ศ. 2539 และได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโทวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ในปี พ.ศ. 2541