

การปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานแป้งมันสำปะหลังโดยการกรองด้วยหญ้า

นางสาว วิมลมาศ บุญยังยืน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-533-200-3

UPGRADING QUALITY OF TAPIOCA STARCH WASTEWATER EFFLUENT WITH
GRASS FILTRATION

Miss Wimonmas Boonyungyuen

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 2002

ISBN 974-533-200-3

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งโรงงานแป้งมันสำปะหลังโดยการกรองด้วยหญ้า
UPGRADING QUALITY OF TAPIOCA STARCH WASTEWATER EFFLUENT WITH
GRASS FILTRATION

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จงจินต์ ผลประเสริฐ)
ประธานกรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษา)

.....

(รองศาสตราจารย์ ดร. สมพงษ์ ธรรมถาวร)
กรรมการ

.....

(อาจารย์ ดร. สุจิตต์ คุรุจิต)
กรรมการ

.....

(รองศาสตราจารย์ น.อ. ดร. วรพงษ์ จำพิศ)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

.....

(รองศาสตราจารย์ ดร. ทวีช จิตรสมบุญ)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

วิมลมาศ บุญยังยืน : การปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานแป้งมันสำปะหลังโดย
การกรองด้วยหญ้า (UPGRADING QUALITY OF TAPIOCA STARCH
WASTEWATER EFFLUENT WITH GRASS FILTRATION) อ. ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.
จงจินต์ ผลประเสริฐ, 82 หน้า. ISBN 974-533-200-3

ได้ทำการทดลองบำบัดน้ำแบบกระจายบนดินด้วยระบบน้ำไหลนอง โดยใช้หญ้า 3 ชนิด
คือ หญ้าขน, หญ้าแฝก และหญ้าสตาร์ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการปรับปรุงคุณภาพน้ำ, หาแบบ
จำลองทางคณิตศาสตร์ของการกรองด้วยหญ้า, และปริมาณการเจริญเติบโตของหญ้าที่เก็บเกี่ยวได้
ใช้น้ำทิ้งจากโรงงานแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นแล้ว เติมน้ำในแปลงทดลองด้วยอัตรา
การทางชลศาสตร์ 1.5-3.5 cm/d พบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัด COD อยู่ในช่วง 13.2-75.5%, TSS
อยู่ในช่วง 26.3-47.2%, TP อยู่ในช่วง 22.1-30.0%, NO₃-N อยู่ในช่วง 4.2-27.5%, TKN อยู่ในช่วง
31.0-59.0%, และ Chlorophyll-a อยู่ในช่วง 30.6-59.1% และประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคที่
ขนาดต่างๆ อยู่ในช่วง -11.5 ถึง 90.8% แปลงที่ปลูกหญ้าขนและหญ้าแฝกมีประสิทธิภาพไม่แตก
ต่างกัน แต่อัตราการทางชลศาสตร์มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการกำจัด โดยมีประสิทธิภาพการ
กำจัดสูงขึ้นเมื่ออัตราการทางชลศาสตร์ลดลง และมีการสะสมของสารอินทรีย์ในดินมากขึ้นเมื่อ
อัตราการทางชลศาสตร์มากขึ้น ในการศึกษาครั้งนี้ หญ้าขนให้ปริมาณหญ้าที่ตัดได้สูงสุดเฉลี่ยที่ 659
กิโลกรัมต่อไร่-เดือน ในขณะที่หญ้าแฝกและหญ้าสตาร์มีค่า 145 และ 200 กิโลกรัมต่อไร่-เดือน ตาม
ลำดับ

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา 2545

ลายมือชื่อนักศึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

WIMONMAS BOONYUNGYUEN : UPGRADING QUALITY OF TAPIOCA
STARCH WASTEWATER EFFLUENT WITH GRASS FILTRATION. THESIS
ADVISOR : ASST. PROF. CHONGCHIN POLPRASERT, Ph.D. 82 PP.
ISBN 974-533-200-3

TAPIOCA STARCH/GRASS FILTRATION/BUFFALO GRASS/VETIVER GRASS
/AMERICAN STAR GRASS

The pilot-scale land treatment systems grown with sedges - Buffalo grass, Vetiver grass and American star grass - were operated to study the efficiencies of water quality improvement, modeling of grass filtration, and quantification of grass harvested. The tapioca-starch wastewater effluent was applied to the experimental units with the hydraulic loading rates ranging from 1.5 to 3.5 cm/d. The removal efficiencies were found in the following percent ranges :- COD = 13.2 – 75.5%, TSS = 26.3 – 47.2%, TP = 22.1 – 30.0%, NO₃-N = 4.2 – 27.5%, TKN = 31.0 – 59.0%, and Chlorophyll-a = 30.6 – 59.1%. However, the efficiency of particle removal varied, ranging from minus 11.5 to 90.8%, depending on the particle size. Both Buffalo-grass and Vetiver-grass units gave almost the same performance. When the hydraulic loading rate increased, the removal efficiencies decreased, as usually found, but higher organic accumulation in soil could be observed. In this study, the Buffalo grass offered the highest average amount harvested of 659 kg/Rai-month. Others were 145 and 200 kg/Rai-month for Vetiver and American star grasses, respectively.

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา 2545

ลายมือชื่อนักศึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ องค์กรบุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ช่วยเหลือ อย่างดียิ่งทั้งในด้านวิชาการ และ ด้านการดำเนินงานวิจัย อันได้แก่

- มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัย
- ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จงจินต์ ผลประเสริฐ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
- รองศาสตราจารย์ ดร. สมพงษ์ ธรรมถาวร กรรมการสอบวิทยานิพนธ์
- ดร. สุกจิต ครุจิต กรรมการสอบวิทยานิพนธ์
- บริษัท เจ้าพระยาพีซีไรท์ จำกัด ที่ให้ใช้น้ำทิ้งในการทำวิจัย

ท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ คุณลุงอุดร แพทย์จะเกร็ง ที่สนับสนุนให้ทุนการศึกษามาตั้งแต่ผู้เขียนศึกษาระดับปริญญาตรี และขอกราบขอบพระคุณพ่อชุมพล และคุณแม่ภัทรพร บุญยังยืน ที่ให้การเลี้ยงดูอบรมและส่งเสริมการศึกษาเป็นอย่างดีตลอดมาในอดีต จนทำให้ผู้เขียนประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมา

วิมลมาศ บุญยังยืน

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์ และคำย่อ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
2 ปรีทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 การบำบัดน้ำเสียแบบกระจายบนดิน.....	3
2.2 กลไกการกำจัดสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียของการบำบัดแบบกระจายบนดิน โดยระบบน้ำไหลนอง.....	6
2.3 กลไกการบำบัดน้ำเสียแบบกระจายบนดิน โดยระบบน้ำไหลนอง.....	9
2.4 ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการบำบัดแบบกระจายบนดิน โดยระบบน้ำไหลนอง.....	13
2.5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การกำจัด COD.....	18
2.6 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การกรองอนุภาค.....	18
2.7 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอัตราการเจริญเติบโตของหญ้า.....	18
3 การดำเนินการวิจัย.....	20
3.1 การศึกษาสารติดตาม.....	20

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2	การวิเคราะห์คุณภาพน้ำทิ้ง.....	21
3.3	การสร้างแบบจำลอง.....	21
3.4	การเตรียมพืช.....	22
3.5	สถานที่ทำการวิจัย.....	24
3.6	การดำเนินการวิจัย.....	24
3.7	การเก็บรวบรวมตัวอย่าง.....	24
3.8	การวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	25
3.9	ตัวแปรที่ทำการวิจัย.....	26
4	ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล.....	27
4.1	ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะน้ำทิ้ง.....	27
4.2	ผลการศึกษาศาสตร์ติดตาม.....	27
4.3	ประสิทธิภาพการกำจัด.....	28
4.4	ประสิทธิภาพการกำจัดอนุภาค.....	38
4.5	สารอินทรีย์ที่สะสมในดิน.....	40
4.6	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การกำจัด COD.....	44
4.7	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การกรองอนุภาค.....	51
4.8	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอัตราการเจริญเติบโตของหญ้า.....	51
4.9	การนำไปใช้ประโยชน์.....	53
5	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	56
5.1	สรุปผลการทดลอง.....	56
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	56
	รายการอ้างอิง.....	58
	ภาคผนวก ก ผลการศึกษาศาสตร์ติดตาม.....	61
	ภาคผนวก ข ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของน้ำที่ก่อนและ หลังผ่านการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้ง โดยการกรองด้วยหญ้า.....	63

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ค ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการกำจัดอนุภาค.....	67
ภาคผนวก ง การคำนวณหาสมการทางคณิตศาสตร์ของประสิทธิภาพการกรอง.....	71
ภาคผนวก จ ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์ที่สะสมในดิน.....	78
ภาคผนวก ฉ ผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำหนักรู้น้ำ.....	80
ประวัติผู้เขียน.....	82

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	วิธีวิเคราะห์คุณภาพน้ำทิ้ง.....21
3.2	คุณสมบัติน้ำทิ้งโรงงานแป้งมันสำปะหลังจากบ่อฝัง บริษัท เจ้าพระยาพีซีไร่ จำกัด.....22
3.3	กำหนดการและสภาพการทดลองระบบน้ำไหลนอง.....25
3.4	ตัวแปรที่ทำการวิจัย.....26
4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระจาย (d) กับลักษณะการไหล.....28
4.2	ประสิทธิภาพการกำจัดค่าต่าง ๆ ของการกรองด้วยหญ้า.....37
4.3	ประสิทธิภาพการกรองอนุภาค.....40
4.4	การคำนวณหาลำดับปฏิบัติการของการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งโดยการกรองด้วยหญ้าขน...44
4.5	การคำนวณหาลำดับปฏิบัติการของการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งโดยการกรองด้วยหญ้า แฝก..46
4.6	การคำนวณหาลำดับปฏิบัติการของการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้ง โดยการกรองด้วยหญ้าสตาร์48
4.7	ผลการทดสอบความถดถอยเชิงเส้น.....50
4.8	การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งโดยการกรองด้วยหญ้า.....52
4.9	การคำนวณสมการ Logistic Growth ของหญ้า.....54
1ก	ผลการทดลองและการคำนวณของการศึกษาสารติดตาม.....62
1ข	ค่าตัวแปรของน้ำที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งโดยการกรองด้วยหญ้าขน.....64
2ข	ค่าตัวแปรของน้ำที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งโดยการกรองด้วยหญ้าแฝก.....65
3ข	ค่าตัวแปรของน้ำที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งโดยการกรองด้วยหญ้าสตาร์.....66
1ค	จำนวนอนุภาคของน้ำที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งโดยการกรองด้วยหญ้าขน.....68
2ค	จำนวนอนุภาคของน้ำที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งโดยการกรองด้วยหญ้าแฝก.....69
3ค	จำนวนอนุภาคของน้ำที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งโดยการกรองด้วยหญ้าสตาร์.....70
1ง	การคำนวณสมการของประสิทธิภาพการกรองด้วยหญ้าขน.....72
2ง	การคำนวณสมการของประสิทธิภาพการกรองด้วยหญ้าแฝก.....74

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
3ง	การคำนวณสมการของประสิทธิภาพการกรองด้วยหญาสตาร์.....	76
1จ	ปริมาณสารอินทรีย์ที่สะสมในดินที่ระยะต่าง ๆ.....	79
1ฉ	ปริมาณน้ำหนักรากหญา.....	81

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ระบบอัตราไหลช้า (Slow-Rate Systems).....	4
2.2 ระบบอัตราไหลเร็ว (Rapid Infiltration Systems).....	4
2.3 ระบบน้ำไหลนอง (Overland Flow Systems).....	5
2.4 วัฏจักรของไนโตรเจน.....	8
2.5 กลไกการกำจัดตะกอนแบบแรงดึง.....	9
2.6 กลไกการกำจัดตะกอนแบบการตกตะกอน.....	10
2.7 กลไกการกำจัดตะกอนแบบการเบียดเข้าหาสารกรอง.....	11
2.8 กลไกการกำจัดตะกอนแบบแรงยึดติด.....	12
2.9 กลไกการกำจัดตะกอนแบบการจับตัว.....	13
3.1 แสดงแบบจำลองระบบน้ำไหลนอง.....	23
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น NaCl กับเวลา ของการศึกษาสารติดตาม.....	29
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง % การกำจัด Total COD กับอัตราทางชลศาสตร์.....	30
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง % การกำจัด Soluble COD กับอัตราทางชลศาสตร์.....	31
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง % การกำจัดของแข็งแขวนลอยกับอัตราทางชลศาสตร์.....	32
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง % การกำจัดฟอสฟอรัสกับอัตราทางชลศาสตร์.....	33
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง % การกำจัดไนเตรท-ไนโตรเจนกับอัตราทางชลศาสตร์.....	34
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง % การกำจัด TKN กับอัตราทางชลศาสตร์.....	35
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง % การกำจัดความขุ่นกับอัตราทางชลศาสตร์.....	36
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง % การกำจัด Chlorophyll-a กับอัตราทางชลศาสตร์.....	37
4.10 ประสิทธิภาพการกำจัดอนุภาคของน้ำที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้ง โดยการกรองด้วยหญ้าขนที่อัตราทางชลศาสตร์ต่าง ๆ.....	38
4.11 ประสิทธิภาพการกำจัดอนุภาคของน้ำที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้ง โดยการกรองด้วยหญ้าแฝกที่อัตราทางชลศาสตร์ต่าง ๆ.....	39

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 ประสิทธิภาพการกำจัดอนุภาคของน้ำที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้ง โดยการกรองด้วยหุ้ยาสตาร์ที่อัตราการทางชลศาสตร์ต่าง ๆ.....	39
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟอสฟอรัสในดิน กับอัตราการทางชลศาสตร์ของแปลง ทดลองหุ้ยาน.....	41
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟอสฟอรัสในดิน กับอัตราการทางชลศาสตร์ของแปลง ทดลองหุ้ย้าแฝก.....	41
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟอสฟอรัสในดิน กับอัตราการทางชลศาสตร์ของแปลง ทดลองหุ้ย้าสตาร์.....	42
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนโตรเจนในดิน กับอัตราการทางชลศาสตร์ของแปลง ทดลองหุ้ยาน.....	42
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนโตรเจนในดิน กับอัตราการทางชลศาสตร์ของแปลง ทดลองหุ้ย้าแฝก.....	43
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนโตรเจนในดิน กับอัตราการทางชลศาสตร์ของแปลง ทดลองหุ้ย้าสตาร์.....	43
4.19 ปฏิกริยาอันดับศูนย์การปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งโดยการกรองด้วยหุ้ยาน.....	44
4.20 ปฏิกริยาอันดับหนึ่งการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งโดยการกรองด้วยหุ้ยาน.....	45
4.21 ปฏิกริยาอันดับสองการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งโดยการกรองด้วยหุ้ยาน.....	45
4.22 ปฏิกริยาอันดับศูนย์การปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งโดยการกรองด้วยหุ้ย้าแฝก.....	46
4.23 ปฏิกริยาอันดับหนึ่งการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งโดยการกรองด้วยหุ้ย้าแฝก.....	47
4.24 ปฏิกริยาอันดับสองการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งโดยการกรองด้วยหุ้ย้าแฝก.....	47
4.25 ปฏิกริยาอันดับศูนย์การปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งโดยการกรองด้วยหุ้ย้าสตาร์.....	48
4.26 ปฏิกริยาอันดับหนึ่งการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งโดยการกรองด้วยหุ้ย้าสตาร์.....	49
4.27 ปฏิกริยาอันดับสองการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งโดยการกรองด้วยหุ้ย้าสตาร์.....	49
4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างผลผลิตหุ้ย้าชนิดต่าง ๆ กับอัตราการทางชลศาสตร์.....	55

อธิบายสัญลักษณ์ และคำย่อ

COD = ความต้องการออกซิเจนเชิงเคมี (Chemical Oxygen Demand)

TSS = ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (Total Suspended Solids)

TP = ฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total Phosphorus)

NO₃-N = Nitrate Nitrogen

TKN = Total kjeldahl Nitrogen

d = ตัวประกอบการกระจาย (Dispersion Number)

η_s = สัมประสิทธิ์การตกตะกอน

η_i = สัมประสิทธิ์การเบียดเข้าหาสารกรอง

η_d = สัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย

ρ_s = ความหนาแน่นของของแข็ง, กก./ลบ.ม.

ρ_f = ความหนาแน่นของของเหลว, กก./ลบ.ม.

d_p = ขนาดอนุภาค, μm

d_c = ขนาดอนุภาคที่เบียดเข้าหาสารกรอง (collector diameter), μm

μ = สัมประสิทธิ์ความหนืด

k = ค่าคงที่ของ Boltzmann

T = อุณหภูมิ, °K

v = ความเร็วของการตกตะกอน, ม./วินาที

n_0 = จำนวนอนุภาคก่อนการปรับปรุงคุณภาพน้ำต่อปริมาตร

n = จำนวนอนุภาคที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพน้ำต่อปริมาตร

f = ค่าคงที่ของการกรองที่อนุภาคขนาดต่าง ๆ (collision factor)

H = ความหนาของชั้นดิน, ม.

ϵ = ความพรุนของชั้นดิน

LW = อัตราการทางชลศาสตร์, ชม./วัน

R_a = อัตราการไหลของน้ำเสียบนพื้นที่บำบัด, ลบ.ม./ม.-ชม.

P = ระยะเวลาที่ปล่อยน้ำเสียลงบนพื้นที่, ชม./วัน

อธิบายสัญลักษณ์ และคำย่อ (ต่อ)

- A = พื้นที่สำหรับรองรับน้ำไหลนอง, ตร.ม.
- Q = อัตราการไหลเข้าของน้ำเสีย, ลบ.ม./ชม.
- V_S = ปริมาณน้ำที่เกินหรือที่สูญหายไปในช่วงเก็บกักน้ำเสีย, ลบ.ม./วัน
- T_S = ระยะเวลาของการเก็บกัก, วัน
- S = ความยาวความลาดของพื้นที่, ม.
- T_C = รอบเวลาทำงาน, ชม.
- T_a = ระยะเวลาที่น้ำเสียไหลบนพื้นที่บำบัด, ชม.
- β_0 = ส่วนตัดแกน Y หรือ ค่าของ Y เมื่อ X มีค่าเป็นศูนย์
- β_1 = ค่าความชัน (slope) ของเส้นตรง

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

ปัจจุบันการเจริญเติบโตของประชากรของไทยเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเป็นผลให้ความต้องการบริโภคน้ำเพิ่มขึ้น ประกอบกับปัญหาคุณภาพน้ำอันเนื่องมาจากการระบายน้ำเสียของชุมชน, อุตสาหกรรมและพื้นที่เกษตรกรรมลงสู่แม่น้ำ ทำให้น้ำมีคุณภาพไม่เหมาะต่อการใช้ประโยชน์และเป็นปัญหาที่รุนแรงเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องแก้ปัญหาผลกระทบที่มีต่อคุณภาพน้ำเพื่อให้มีน้ำใช้ประโยชน์อย่างมีประสิทธิภาพและสามารถนำน้ำกลับมาใช้ประโยชน์

สาเหตุของการทำให้คุณภาพน้ำเสียอีกประการหนึ่งคือ อุตสาหกรรมการผลิตแป้งมันสำปะหลังสินค้าจำหน่ายได้เข้าสู่ประเทศ ซึ่งจะมีการใช้น้ำเป็นปริมาณมากในกระบวนการผลิตและน้ำเสียมีปริมาณสารแขวนลอย (Suspended Solids), สารอาหารประเภทไนโตรเจนและฟอสฟอรัส เมื่อมีการระบายน้ำลงสู่ธรรมชาติจะก่อให้เกิดน้ำเน่าเสีย การตื่นเงินของแหล่งน้ำ และการเจริญเติบโตของวัชพืชเป็นไปได้ง่าย ดังนั้นจึงต้องทำการปรับสภาพน้ำเสียก่อนปล่อยลงสู่ธรรมชาติ การบำบัดวิธีหนึ่งที่มีความเหมาะสมกับน้ำเสียของอุตสาหกรรมประเภทนี้ คือการบำบัดน้ำเสียแบบธรรมชาติ ซึ่งจะมีน้ำ ดิน พืช จุลชีพ และสภาพภูมิอากาศที่จะช่วยปรับสภาพน้ำเสียให้มีคุณภาพดีขึ้นโดยไม่ต้องอาศัยเครื่องจักรกลต่าง ๆ ซึ่งเป็นวิธีที่ประหยัดการใช้พลังงาน และมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย สำหรับการศึกษากการบำบัดน้ำเสียแบบธรรมชาติของน้ำทิ้งจากโรงงานแป้งมันสำปะหลังนี้ จะใช้วิธีการบำบัดโดยระบบน้ำไหลนอง (Overland Flow System) อาศัยหลักการกรองด้วยหญ้า คือการนำน้ำที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นมาระบายลงบนผิวดินที่มีความลาดเอียงเล็กน้อยและ ปลูกพืชคลุมดิน น้ำทิ้งจะได้รับการบำบัดขณะที่ไหลผ่านดินที่ปลูกพืชคลุมดิน ซึ่งดินจะเป็นตัวกรองของแข็งแขวนลอยทำให้น้ำมีความขุ่นลดลง ส่วนพืชนั้นเป็นเสมือนตัวกลางให้จุลินทรีย์ยึดเกาะที่บริเวณราก จุลินทรีย์จะย่อยสลายสารอินทรีย์ ทำให้การกำจัดสารอาหารไปด้วยได้ ทำให้น้ำมีคุณภาพที่ดีขึ้น และสามารถเก็บเกี่ยวพืชคลุมดินไปใช้ประโยชน์กลับคืนมาในเวลาเดียวกัน

1.2 วัตถุประสงค์

การทดลองปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานแป้งมันสำปะหลังโดยการกรองด้วยหญ้า มีวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

1.2.1 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพ และหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของการปรับปรุงคุณภาพน้ำโดยการกรองด้วยหญ้า 3 ชนิด คือ หญ้าขน (*Brachiaria mutica* (Forsk.) Stapf), หญ้าแฝก (*Vetiveria zizanioides* Nash) และหญ้าสตาร์ (*Cynodon plectostachyus*)

1.2.2 เพื่อศึกษาปริมาณการเจริญเติบโตของหญ้าที่เก็บเกี่ยวได้

1.3 ขอบเขตการวิจัย

การศึกษาวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพของการบำบัดแบบการกระจายบนดิน โดยระบบน้ำไหลนอง อาศัยหลักการกรองด้วยหญ้า ของน้ำทิ้งจากโรงงานแปรงมันสำปะหลัง ซึ่งศึกษาความเหมาะสมของอัตราการทางชลศาสตร์ (Hydraulic loading rate) และพืชที่มีลักษณะทางพฤกษศาสตร์แตกต่างกัน ดังขอบเขตวิจัยดังต่อไปนี้

1.3.1 ศึกษาวิจัยโดยใช้น้ำทิ้งจากโรงงานแปรงมันสำปะหลังที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นจากบ่อฝั่

1.3.2 ศึกษาวิจัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการปรับปรุงคุณภาพ โดยการกรองด้วยหญ้า แบบกระจายน้ำบนดิน โดยระบบน้ำไหลนอง ได้พิจารณาตัวแปรที่สำคัญคือ อัตราการทางชลศาสตร์, พืชคลุมดิน, ความเข้มข้นและปริมาณอนุภาคเริ่มต้นและสุดท้าย

1.3.3 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดอนุภาคที่ปะปนในน้ำทิ้งโรงงานแปรงมันสำปะหลัง โดยอาศัยระบบหญ้ากรอง

1.3.4 ทำการวิเคราะห์ Chemical Oxygen Demand (COD), Total Suspended Solids (TSS), Total Phosphorus (TP), Nitrate Nitrogen ($\text{NO}_3\text{-N}$), Total Kjeldahl Nitrogen (TKN), Turbidity, Chlorophyll-a และจำนวนและขนาดของอนุภาคที่มีอยู่ในน้ำ ของน้ำทิ้งโรงงานแปรงมันสำปะหลังก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้ง

1.3.5 ทำการวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่สะสมอยู่ในดินทั้งก่อน และหลังการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้ง

1.3.6 การศึกษาวิจัยปริมาณการผลิตของหญ้าที่เก็บเกี่ยวได้ต่ออัตราการทางชลศาสตร์ที่ใช้

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การบำบัดน้ำเสียกระจายบนดิน

การบำบัดน้ำเสียแบบกระจายบนดิน เป็นการระบายน้ำเสียในปริมาณที่เหมาะสมลงสู่ดิน เพื่อให้เกิดกระบวนการทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ ของชั้นดินและพืชในบริเวณนั้น ซึ่งสามารถกำจัดสิ่งปนเปื้อนออกจากน้ำเสียได้ในระดับหนึ่ง การบำบัดวิธีนี้ควบคุมการทำงานและบำรุงรักษา ง่าย ใช้พลังงานต่ำ ซึ่งเป็นวิธีที่ประหยัดค่าบำบัดน้ำเสียมาก การบำบัดแบบนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลาย อย่าง เช่น ลักษณะของดิน สภาพอากาศ ลักษณะของน้ำเสีย โดยน้ำเสียควรมีแร่ธาตุอาหารและมีสาร อินทรีย์ต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อพืช เสมือนการใส่ปุ๋ยให้แก่ดิน และชนิดของพืชที่ปลูก การบำบัด น้ำเสียแบบกระจายบนดินมี 3 วิธี คือ ระบบอัตราไหลช้า (Slow - Rate Systems หรือ Irrigation), ระบบไหลซึมเร็ว (Rapid Infiltration Systems) และระบบน้ำไหลนอง (Overland Flow Systems) (Metcalf & Eddy, 1991)

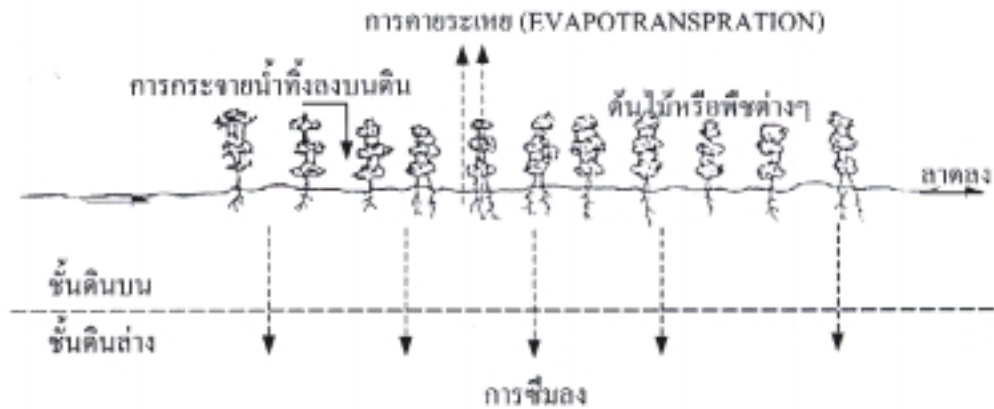
2.1.1 ระบบอัตราไหลช้า (Slow rate Systems)

ระบบอัตราไหลช้า คือการกระจายน้ำเสียลงบนพื้นดินที่ปลูกพืชคลุมดินอย่างช้า ๆ โดยวิธีการกระจายน้ำเสียตามร่องน้ำทั่วบริเวณ และวิธีการฉีดพ่นกระจายน้ำเป็นฝอย (Sprinkler System) น้ำเสียจะถูกบำบัดโดยดินและพืช ดินมีบทบาทในการบำบัดน้ำเสียโดยการกรอง, oxidation หรือ reduction, การแลกเปลี่ยนประจุ และการดูดติดผิว ส่วนพืชจะดึงสารอาหารในน้ำเสียไปใช้และ มีกระบวนการคายน้ำของพืชด้วย วิธีนี้ลักษณะดินต้องเป็นดินที่น้ำซึมผ่านได้ดี วิธีนี้สามารถรับน้ำ ได้ในอัตรา 0.6-6.0 เมตรต่อปี พื้นที่ที่ต้องการประมาณ 140-1750 ไร่ โดยปกติจะรดน้ำในอัตรา 1.3- 10.0 เซนติเมตรต่อสัปดาห์ และควรมีความลาดของพื้นที่ต่ำกว่า 20-40% (U.S. EPA, 1981) ลักษณะ ของระบบนี้ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 2.1

Polprasert (1996) พบว่าระบบอัตราไหลช้ามีความสามารถในการบำบัดน้ำเสียที่มีค่า BOD สูง ของแข็งแขวนลอย ฟอสฟอรัส และแบคทีเรีย รวมทั้งสามารถกำจัดไนโตรเจนได้โดยการที่พืช นำไนโตรเจนไปใช้ในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชัน

2.1.2 ระบบอัตราไหลเร็ว (Rapid Infiltration Systems)

ระบบอัตราไหลเร็วเป็นการปล่อยน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นแล้วมาลงบ่อ หรือ ร่องรองรับน้ำเสีย วิธีนี้จะปล่อยน้ำเสียไหลเข้าในอัตราที่สูงกว่าระบบไหลช้า และมีการสูบน้ำใต้ดิน เพื่อปล่อยลงบนพื้นที่อีกครั้ง โดยน้ำเสียจะถูกบำบัดโดยวิธีการกรอง และ Straining action วิธีนี้

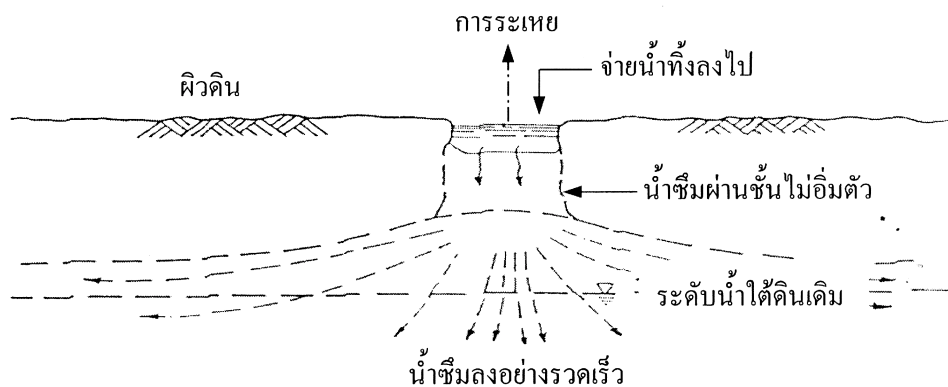


รูปที่ 2.1 ระบบอัตราการไหลช้า (Slow – Rate System) (เกรียงศักดิ์ อุดมสิน โรจน์, 2539)

ลักษณะดินต้องเป็นดินที่น้ำซึมผ่านได้ดี วิธีนี้สามารถรับน้ำเสียได้ในอัตรา 6-125 เมตรต่อปี พื้นที่ที่ต้องการประมาณ 18-140 ไร่ โดยปกติจะปล่อยน้ำเสียในอัตรา 10-240 เซนติเมตรต่อสัปดาห์ (U.S.

EPA, 1981) ลักษณะของระบบนี้ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 2.2

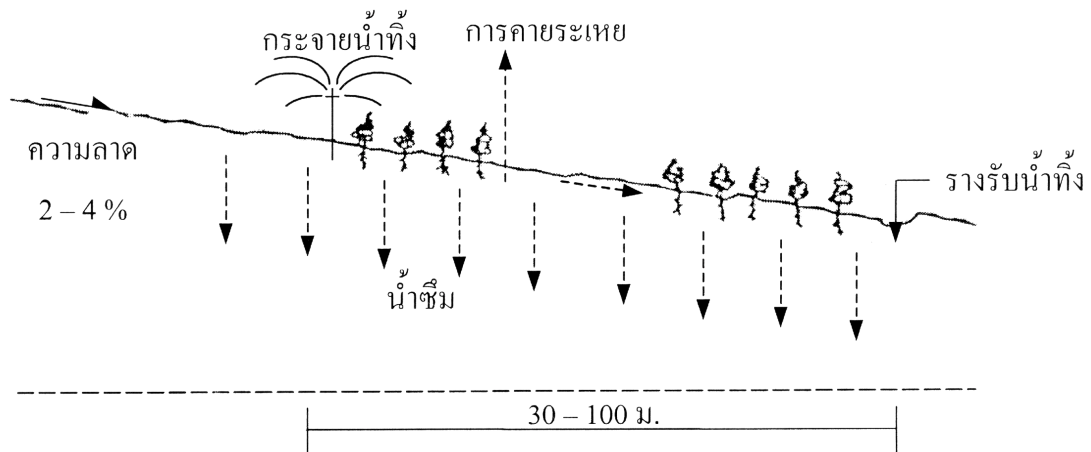
ระบบนี้จะมีประสิทธิภาพการบำบัดในช่วงกว้างขึ้นอยู่กับลักษณะของพื้นที่ และลักษณะของน้ำเสีย Polprasert (1996) พบว่าพื้นที่ที่เหมาะสมสำหรับระบบนี้ต้องมีความลึกพอสมควร ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำที่มีค่า BOD สูง ของแข็งแขวนลอยประมาณ 90% หรือมากกว่า 90% สำหรับการกำจัดฟอสฟอรัส ส่วนไนโตรเจนกำจัดได้น้อย พื้นที่ที่เม็ดดินมีความหยาบจะรับน้ำได้น้อยทำให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดต่ำลง



รูปที่ 2.2 ระบบน้ำไหลซึมเร็ว (Rapid Infiltration System) (เกรียงศักดิ์ อุดมสิน โรจน์, 2539)

2.1.3 ระบบน้ำไหลนอง (Overland Flow Systems)

ระบบน้ำไหลนองเป็นการปล่อยน้ำเสียที่ออกจากท่อเจาะรู ซึ่งอยู่ที่สูงไหลจากระบบจ่ายผ่านพืชต่าง ๆ ที่ปลูกอยู่บริเวณที่น้ำไหลผ่านลงมาถึงรางรองรับน้ำเสีย เพื่อระบายน้ำทิ้งต่อไป ด้วยความลาดชันประมาณ 2-8% ขณะที่น้ำไหลผ่านพืชต่าง ๆ ลงมา ทำให้เกิดสภาพต่าง ๆ คือ การตกตะกอน, การกรอง, เกิดปฏิกิริยาชีวเคมีและการดูดซับ, พอกไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำเสียจะถูกนำไปใช้โดยพืชที่ปลูกคลุมดิน ระบบนี้สามารถกำจัด BOD และ SS ได้ 95-99% กำจัดไนโตรเจน 70-90% และกำจัดฟอสฟอรัส 50-60% (Polprasert, 1996) ระบบนี้สามารถรับน้ำได้ประมาณ 3-20 เมตรต่อปี พื้นที่ที่ต้องการประมาณ 40-280 ไร่ โดยปกติจะปล่อยน้ำเสียในอัตรา 6-40 เซนติเมตรต่อสัปดาห์ (U.S. EPA, 1981) ลักษณะของระบบนี้ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ระบบน้ำไหลนอง (Overland Flow System) (เกรียงศักดิ์ อุดมสิน โรจน์, 2539)

Rajagopol (1980) ได้ศึกษาการบำบัดแบบกระจายบนดินของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษโดยระบบน้ำไหลนองและมีความลาดชัน 2% สามารถกำจัด COD ได้ 84-86% กำจัด SS ได้ 93-95% กำจัดไนโตรเจน 60% กำจัดฟอสฟอรัส 22-30% และกำจัดโพแทสเซียม 60-64%

Rao (1979) ได้ศึกษาการบำบัดแบบกระจายบนดินของน้ำเสียฟาร์มสุกรโดยระบบน้ำไหลนอง สามารถกำจัด COD ได้ 83% กำจัด TSS ได้ 93-95% และกำจัดไนโตรเจน 60%

การบำบัดแบบกระจายบนดินของทั้ง 3 ระบบ จะต้องมีการผ่านการบำบัดขั้นต้นก่อน เนื่องจากน้ำเสียนั้นอาจมีความเข้มข้นของสารต่าง ๆ สูง ทำให้เกิดความเสียหายต่อระบบได้ การบำบัดขั้นต้นเป็นการนำน้ำเสียผ่านตะแกรงเพื่อกำจัดวัสดุขนาดใหญ่, บ่อดกตะกอนเพื่อลด

ปริมาณสารแขวนลอย หรือบ่อเติมอากาศ เป็นต้น ในการวิจัยครั้งนี้ น้ำเสียจะผ่านการบำบัดขั้นต้น โดยการผ่านบ่อฝักก่อนมาทำการบำบัดแบบกระจายบนดิน โดยระบบน้ำไหลนอง เนื่องจากเมื่อน้ำเสียไหลผ่านพื้นที่ที่จะเกิดกระบวนการทางธรรมชาติที่ช่วยในการบำบัดน้ำเสีย โดยพืชจะชะลอความเร็วและความแรงของน้ำ ขณะเดียวกันพืชน้ำสารที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียไปใช้ ลำต้นของต้นหญ้าหรือพืชจะทำงานร่วมกับดิน และจุลินทรีย์เกิดกลไกการกรองสิ่งปนเปื้อนที่อยู่ในน้ำเสียลดลงตามระยะทางที่น้ำเสียไหลผ่าน น้ำเสียจึงได้รับการบำบัดให้มีคุณภาพดีขึ้นตามกระบวนการทางธรรมชาติ (สิทธิชัย ตันชนะสฤณี, 2538)

2.2 กลไกการกำจัดสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียแบบกระจายบนดินโดยระบบน้ำไหลนอง

การบำบัดแบบกระจายบนดินโดยระบบน้ำไหลนอง เกี่ยวข้องกับกระบวนการทางกายภาพ, ทางเคมี และชีวภาพ ที่เกิดขึ้นในสภาพแวดล้อมของดินและน้ำ ระบบนี้สามารถกำจัดหรือแยกสิ่งปนเปื้อนออกจากน้ำเสีย ซึ่งสิ่งปนเปื้อนในที่นี้ได้แก่ ของแข็งแขวนลอย, สารอินทรีย์, ไนโตรเจน, ฟอสฟอรัส, ธาตุอื่น ๆ และจุลินทรีย์ (Metcalf & Eddy, 1991)

2.2.1 ของแข็งแขวนลอย

ของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียที่ไหลผ่านบนดินสามารถถูกกำจัด หรือแยกออกจากน้ำเสียได้ โดยอาศัยการตกตะกอน, กรองผ่านชั้นดินและกรองผ่านรากพืช พบว่าน้ำเสียมักจะอุดตันบริเวณผิวชั้นบนของพื้นที่ ดังนั้นจึงต้องออกแบบให้ระบบสามารถลดปัญหาดังกล่าวให้มากที่สุด

Parsons and Abrahams (1992) จากการศึกษาในระบบน้ำไหลนอง ในห้องทดลอง แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับการตกตะกอน พบว่าความเร็วของน้ำลดลงอัตราการตกตะกอนเพิ่มขึ้น และการเพิ่มขึ้นของการกระจายทำให้เกิดการชนกันและการตกตะกอนเพิ่มขึ้น

2.2.2 สารอินทรีย์

สารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำเสียจำเป็นต้องถูกกำจัดออก ซึ่งสามารถกำจัดได้โดยอาศัยกระบวนการทางชีวภาพแบบให้อากาศ คือพวกจุลินทรีย์ที่เกาะอยู่ตามรากพืช และตามผิวเม็ดดินต่าง ๆ จะอาศัยออกซิเจนจากบรรยากาศดำรงชีวิตอยู่และจะทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย และการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบไม่ให้อากาศก็มีบางส่วนเกิดในชั้นดินบ้าง แต่มีไม่มาก ดังนั้นควรคำนึงถึงปริมาณออกซิเจนที่ใช้ในระบบคือ ปริมาณออกซิเจนถ่ายเทเข้าสู่ระบบต้องมีมากกว่าประมาณออกซิเจนที่ต้องการใช้ในระบบ

2.2.3 ฟอสฟอรัส

ฟอสฟอรัสในน้ำเสียจะถูกกำจัดในรูปของสารอินทรีย์ฟอสเฟต สารโพลีฟอสเฟต และสารออร์โธฟอสเฟต สารฟอสฟอรัสจะก่อให้เกิดปัญหาน้ำเน่าเสียได้ เพราะเป็นสารที่ทำให้เกิดความ ต้องการใช้ออกซิเจนค่อนข้างมาก โดยทั่วไปสามารถกำจัดได้โดยวิธีทางชีวภาพที่มีระบบขาดอากาศชั่วคราว และระบบเติมอากาศสลับกันไปมา และอาจสามารถกำจัดได้โดยทางเคมีซึ่งทำให้เกิดปัญหาสาส์ดจ้่มาก การกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียด้วยวิธีนี้สามารถกำจัดได้โดยหลักการดูดซับ แต่อาจมีปัญหาเกิดการอิมตัวของปริมาณฟอสฟอรัสบริเวณชั้นดินบางบริเวณได้ (ประวรรดา โภชน จันทร, 2543)

Hegg and Turner (1983) ได้ศึกษาอัตราการไหลของน้ำเสีกลงบนพื้นที่บำบัดที่มีค่า สูง 130 มิลลิเมตร/สัปดาห์ การกำจัด COD ต่ำกว่าอัตราการไหลของน้ำเสีกลงบนพื้นที่บำบัดที่มีค่าต่ำ 40 มิลลิเมตร/สัปดาห์ การกำจัดไนโตรเจนรวมสามารถกำจัดได้มากกว่า 50% ยกเว้นที่อัตราการไหล ของน้ำเสีกลงบนพื้นที่บำบัดที่มีค่าสูง และการกำจัดฟอสฟอรัสรวมสามารถกำจัดได้สูงถึง 80% เนื่อง จากการกำจัดฟอสฟอรัสจะถูกดูดซึมโดยดินและพืช

2.2.4 ไนโตรเจน

ไนโตรเจนในน้ำเสียมักจะอยู่ในรูปของสารอินทรีย์ไนโตรเจนและสารแอมโมเนีย ไนโตรเจน ซึ่งสารไนโตรเจนจะก่อให้เกิดปัญหาน้ำเน่าเสียเพราะเป็นสารที่ทำให้เกิดความ ต้องการใช้ออกซิเจนมาก ถ้าน้ำเกิดการขาดออกซิเจนทำให้เกิดปัญหากลิ่นเหม็น วิธีนี้สามารถกำจัดสาร ไนโตรเจนในน้ำเสียได้ จะถูกกำจัดด้วยกระบวนการตกตะกอน การกรอง และการระเหย โดยจะ ออกมาในรูปของแก๊สไนโตรเจน (N_2) และแก๊สแอมโมเนีย (NH_3) ในรูปที่พืชสามารถนำสาร ไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียและไนเตรทมาใช้ และในรูปของสารไนเตรทที่ซึมลงไปในดิน แสดงได้ดังรูปที่ 2.4

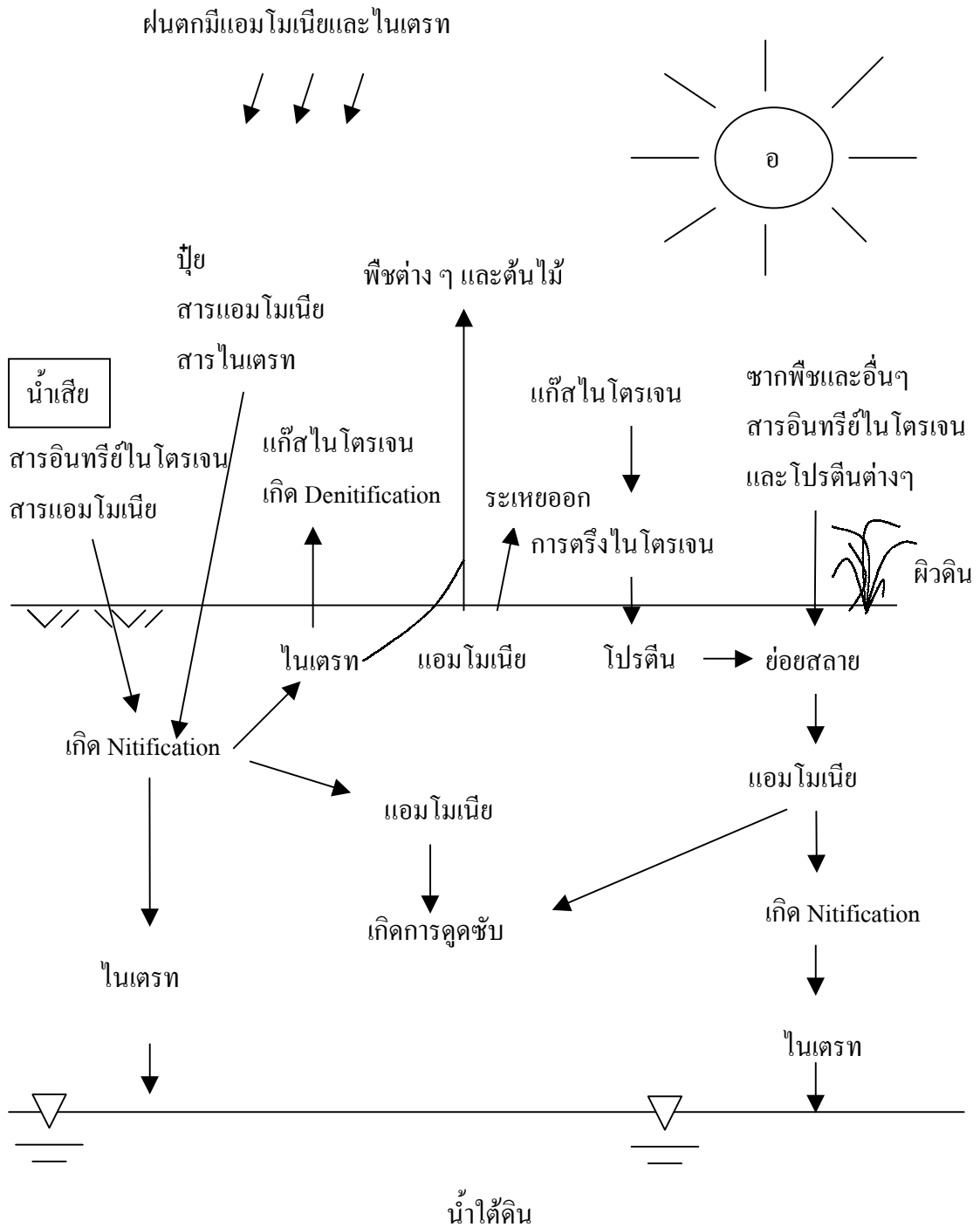
2.2.5 ธาตุอื่น ๆ

ธาตุอื่น ๆ บางตัวเป็นธาตุที่จำเป็นสำหรับพืช แต่ธาตุบางตัวเป็นธาตุที่มีพิษเมื่อมี ปริมาณมากจะมีผลต่อจุลชีพต่าง ๆ เช่น โครเมียม แคดเมียม ปรอท เป็นต้น เมื่อน้ำเสีผ่าน การ บำบัด ธาตุต่าง ๆ จะถูกจับไว้ สามารถกำจัดโดยอาศัยการดูดซับ, การตกผลึก และการแลกเปลี่ยน ประจุ โดยทั่วไปถ้าน้ำเสีมี $pH > 7$ จึงจะได้ประสิทธิภาพการบำบัดอยู่ในระดับสูง แต่ถ้าค่าความ เป็น $pH < 7$ จะเกิดปัญหากับธาตุ ๆ โดยเฉพาะตัวที่มีพิษจะละลายปนกับน้ำออกจากระบบ

2.2.6 จุลชีพ

การบำบัดน้ำเสียแบบกระจายบนดิน โดยระบบน้ำไหลนองสามารถกำจัดจุลชีพ ต่าง ๆ ได้ผลค่อนข้างดี โดยอาศัยการดัก, การดูดซับ และการตกตะกอน เป็นต้น ถ้าบริเวณพื้นที่ที่มี

พืชขึ้นมากจะช่วยกำจัดจุลชีพได้มากขึ้น แต่พบว่ายังไม่เพียงพอเมื่อต้องการกำจัดจุลชีพต่าง ๆ ให้หมดสิ้น ซึ่งในบางแหล่งต้องอาศัยสารเคมีช่วยในการกำจัด เช่นการใช้คลอรีนในการบำบัด



รูปที่ 2.4 วัฏจักรของไนโตรเจน

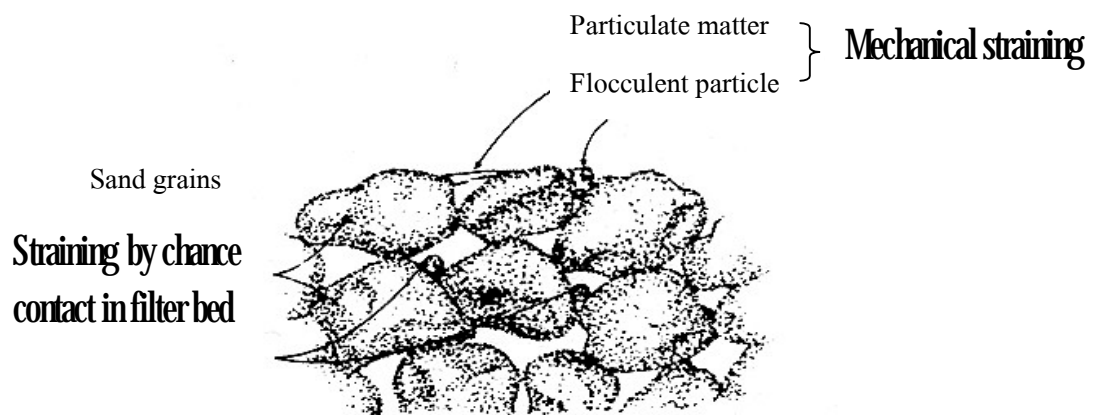
2.3 กลไกการบำบัดน้ำเสียแบบกระจายบนดิน โดยระบบน้ำไหลนอง

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบกระจายบนดิน จะมีความสัมพันธ์กับคุณลักษณะของดิน และผลของกลไกการกำจัดมลสาร เมื่อน้ำเสียระบายลงสู่ดินสารประกอบบางอย่างอาจผ่านดินสู่ น้ำใต้ดิน ถูกใช้โดยพืช ถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ และส่วนอื่นจะค้างที่เม็ดดิน กลไกการบำบัดน้ำเสียแบบกระจายบนดินสามารถแบ่งได้ 3 กลไก คือกลไกทางกายภาพ, กลไกทางเคมี และกลไกทางชีวภาพ

2.3.1 กลไกทางกายภาพ

เมื่อน้ำเสียไหลผ่านช่องว่างของดิน อนุภาคสารแขวนลอย และสาหร่ายจะถูกกำจัดด้วยการกรอง ความสามารถกำจัดสารแขวนลอยนั้นขึ้นกับขนาดของอนุภาค, ขนาดของดิน และอัตราการเคลื่อนที่ของน้ำ ยิ่งถ้าอัตราการทางชลศาสตร์สูง และดินหยาบ อนุภาคต่าง ๆ จะเคลื่อนที่ไปได้ไกลและเร็ว กลไกทางกายภาพจะอาศัยหลักกลศาสตร์มาอธิบายซึ่งมีกลไกอยู่ 4 แบบ (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2539) ดังนี้

1. แรงค้ำ (Straining) คือการที่อนุภาคติดค้างอยู่บนชั้นดิน โดยจะติดค้างอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดินคือเม็ดดินมี 2 แบบ ได้แก่ แบบที่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าช่องว่างระหว่างเม็ดดินและแบบที่มีขนาดของอนุภาคเล็กกว่าช่องว่างระหว่างเม็ดดิน แสดงดังรูปที่ 2.5



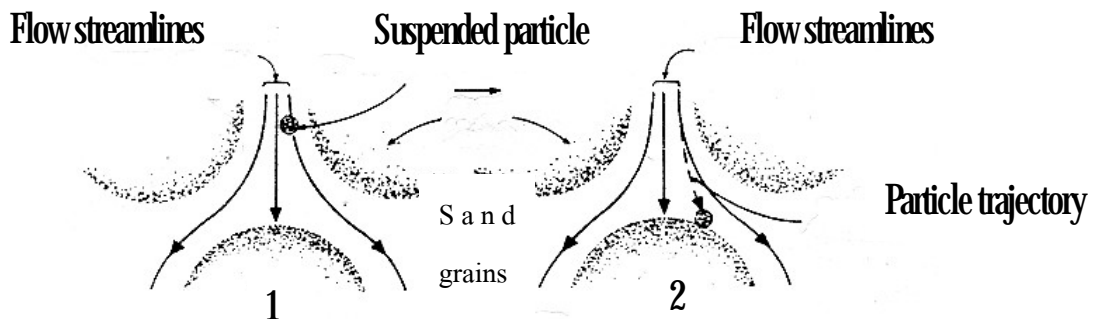
รูป 2.5 กลไกการกำจัดตะกอนแบบแรงค้ำ (Michael & Clyde, 1987)

2. การตกตะกอน (Sedimentation) คืออนุภาคได้ตกลงบนเม็ดดินภายในชั้นดิน ซึ่งมีความสัมพันธ์กับขนาดของอนุภาคเป็นสำคัญ เนื่องจากถ้าอนุภาคมีขนาดใหญ่จะทำให้เกิดการตกตะกอนเร็วกว่าอนุภาคที่มีขนาดเล็ก ซึ่งมีความสัมพันธ์การกำจัดอนุภาคด้วยกลไกการตกตะกอน ดังสมการที่ 2.1 (Yao et al., 1971) และแสดงดังรูปที่ 2.6

ตาม Stoke's law

$$\eta_s = \frac{(\rho_s - \rho_f)d_p^2g}{18\mu v} \quad (2.1)$$

- โดยที่
- η_s = สัมประสิทธิ์การตกตะกอน
 - ρ_s = ความหนาแน่นของของแข็ง, กก./ลบ.ม.
 - ρ_f = ความหนาแน่นของของเหลว, กก./ลบ.ม.
 - d_p = ขนาดอนุภาค, μm
 - μ = สัมประสิทธิ์ความหนืด



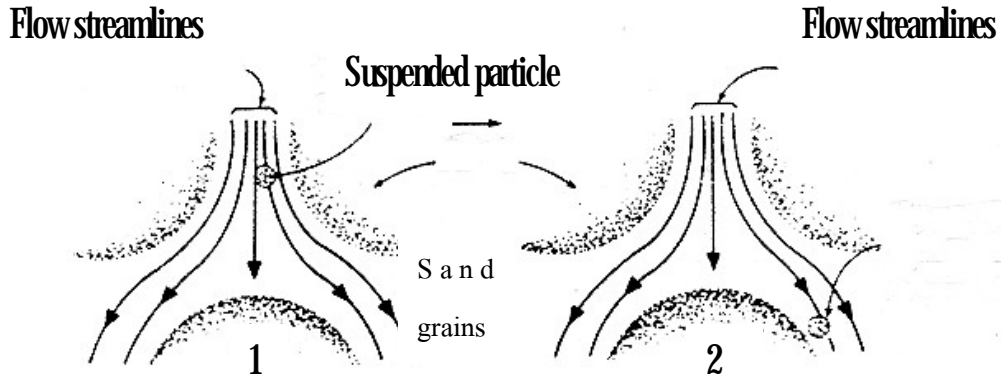
รูปที่ 2.6 กลไกการกำจัดตะกอนแบบการตกตะกอน (Michael & Clyde, 1987)

3. การเบียดเข้าหาสารกรอง (Interception) คืออนุภาคได้เคลื่อนที่ไปในทิศทางแนวเดียวกับกระแสน้ำ และอนุภาคเหล่านี้จะเคลื่อนที่ไปพบกับผิวของเม็ดดิน ซึ่งมีความสัมพันธ์การกำจัดตะกอนด้วยกลไกการเบียดเข้าหาสารกรองดังสมการที่ 2.2 (Yao et al., 1971) แสดงดังรูปที่ 2.7

$$\eta_i = \frac{3}{2} \left(\frac{d_p}{d_c} \right)^2 \quad (2.2)$$

- โดยที่
- η_i = สัมประสิทธิ์การเบียดเข้าหาสารกรอง
 - d_c = ขนาดอนุภาคที่เบียดเข้าหาสารกรอง (collector diameter), μm

4. การแพร่กระจาย (Diffusion) คืออนุภาคที่มีขนาดเล็กจะเกิดการเคลื่อนที่อย่างอิสระด้วยแรงของการชนกันของอนุภาค ซึ่งมีความสัมพันธ์การกำจัดอนุภาคด้วยกลไกนี้ดังสมการ 2.3 (Yao et al., 1971)



รูปที่ 2.7 กลไกการกำจัดตะกอนแบบการเบียดเข้าหาสารกรอง (Michael & Clyde, 1987)

$$\eta_D = 0.9 \left(\frac{kT}{\mu d_p d_c v} \right)^{2/3} \quad (2.3)$$

- โดยที่
- η_D = สัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย
 - k = ค่าคงที่ของ Boltzmann
 - T = อุณหภูมิ, °K
 - v = ความเร็วของการตกตะกอน, ม./วินาที

Yao et al. (1971) ได้ทำการศึกษากลไกการกำจัดอนุภาคมีค่าการกำจัดอนุภาครวมดังสมการที่ 2.4

$$\eta_T = \eta_s + \eta_i + \eta_D \quad (2.4)$$

Weber (1972) ได้กล่าวว่ากลไกทางกายภาพมีประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาครวมดังสมการที่ 2.5

$$\frac{n}{n_0} = \exp \left[\frac{-3f\eta_T(1-\varepsilon)H}{4R} \right] \quad (2.5)$$

- โดยที่
- n_0 = จำนวนอนุภาคก่อนการปรับปรุงคุณภาพน้ำต่อปริมาตร
 - n = จำนวนอนุภาคที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพน้ำต่อปริมาตร
 - f = ค่าคงที่ของการกรองที่อนุภาคขนาดต่าง ๆ (collision factor)
 - H = ความหนาของชั้นดิน, ม.
 - ε = ความพรุนของชั้นดิน
 - R = ขนาดอนุภาค, μm

2.3.2 กลไกทางกายภาพและเคมี

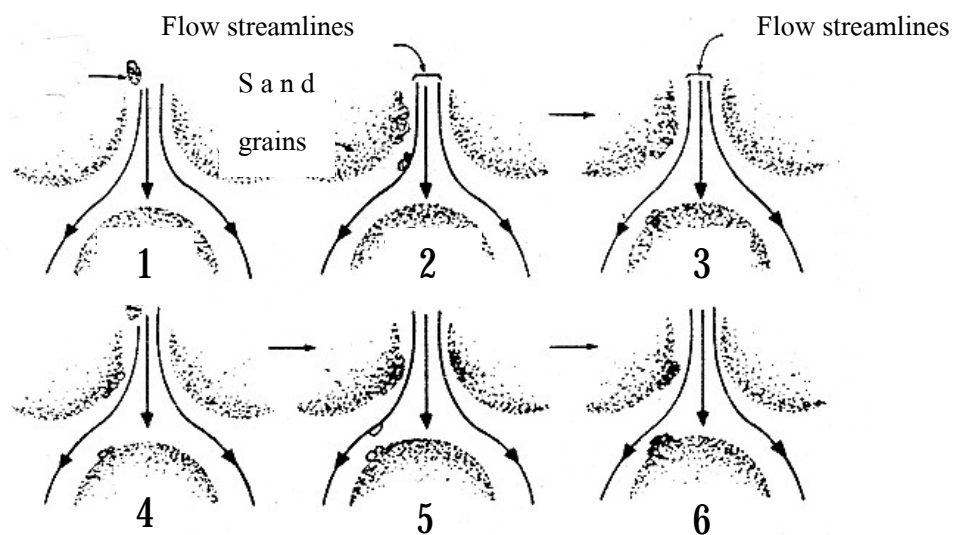
กลไกของการกรองน้ำที่เกิดจากทั้งทางกายภาพและเคมี จะมีการทำงานได้ดีกว่า กลไกของการกรองน้ำที่เกิดจากทางกายภาพเพียงอย่างเดียว เพราะการกรองนี้เกิดขึ้นได้เกือบทั่วทั้ง

ชั้นกรองทำให้ประสิทธิภาพในการใช้สารกรองมีมาก กลไกของการกรองแบบนี้ต้องอาศัยหลักฟิสิกส์มาอธิบาย โดยสมการแบ่งออกได้ 4 แบบ ดังนี้

1. การดูดติดผิวทางเคมี (Chemical adsorption) คือการดูดติดผิวที่อาศัยการยึดเหนี่ยวทางเคมี โดยจะมีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นในการดูดติดผิวระหว่างอนุภาคกับสารกรอง การดูดติดผิวแบบนี้จะมีประสิทธิภาพสูงเมื่อมีอุณหภูมิสูง เพราะว่าปฏิกิริยาทางเคมีจะเกิดได้เร็วขึ้น เมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น

2. แรงยึดติด (Adhesion forces) คือแรงที่ทำให้อนุภาครวมกลุ่ม (Flocculent particles) ติดแน่นกับผิวของสารกรองที่อนุภาคนั้นไหลผ่านมาพบ แต่เนื่องจากแรงเฉือนน้ำที่เกิดจากการไหลของน้ำผ่านชั้นกรอง ได้ชะพวกอนุภาคบางส่วนก่อนที่อนุภาคส่วนนี้จะเกาะติดแน่นบนผิวสารกรอง และทำให้น้ำไหลพาอนุภาคนั้นเคลื่อนผ่านชั้นกรองลงไปอีกชั้น จนอาจหลุดออกจากชั้นกรอง และไหลไปปนกับน้ำที่ผ่านระบบแล้ว (Effluent) ซึ่งมีผลให้ Effluent มีปริมาณอนุภาคมากขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.8 โดยชั้นตอนที่ 1-2 น้ำได้พาอนุภาคมาติดบนผิวสารกรอง ชั้นตอนที่ 3-6 อนุภาคติดบนผิวสารกรองและเพิ่มขนาดของอนุภาค

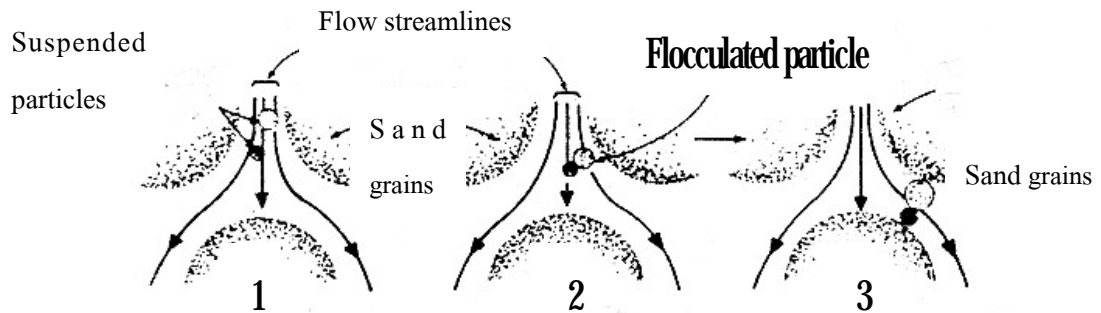
Suspended flocculent particle



รูปที่ 2.8 กลไกการกำจัดตะกอนแบบแรงยึดติด (Michael & Clyde, 1987)

3. การจับตัว (Coagulation-Flocculation) คือการเกิดปฏิกิริยาเคมี ซึ่งทำให้อนุภาคต่าง ๆ ในน้ำได้มีโอกาสเกาะตัวซึ่งกันและกัน ทำให้อนุภาคเหล่านี้มีขนาดใหญ่ขึ้น และจะมีผลให้เกิดการดักอนุภาคโดยสารกรองในชั้นกรองได้ แสดงดังรูปที่ 2.9 โดยชั้นตอนที่ 1 น้ำได้พา

อนุภาคมา ขึ้นตอนที่ 2 อนุภาคมีการเกาะตัวกัน และขั้นตอนที่ 3 อนุภาคเกาะตัวกันจนมีขนาดใหญ่ ขึ้นทำให้สารกรองสามารถกรองอนุภาคนั้นได้



รูปที่ 2.9 กลไกการกำจัดตะกอนแบบการจับตัว (Michael & Clyde, 1987)

4. การดูดติดผิวทางกายภาพ (Physical Adsorption) คือการดูดติดผิวที่อาศัยแรงต่าง ๆ ยึดเหนี่ยวไม่ให้หลุดออกจากกันระหว่างอนุภาคกับสารกรอง การดูดติดผิวแบบนี้จะมีประสิทธิภาพสูงเมื่อมีอุณหภูมิต่ำ การดูดติดผิวทางกายภาพจะประกอบด้วยแรง 3 ลักษณะ ได้แก่ Electrostatic forces, Electrokinetic forces และ Van der Waals forces

2.3.3 กลไกทางชีวภาพ

การเปลี่ยนรูปของชีวภาพที่เกิดในดิน จะรวมถึงการย่อยสลายสารอินทรีย์พวกสารอาหาร เช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และซัลเฟอร์ จะถูกเปลี่ยนจากสภาพสารอินทรีย์ไปเป็นสารอนินทรีย์ซึ่งพืชสามารถนำไปใช้ได้ โดยมีกลไกการควบคุมปริมาณไนโตรเจนในน้ำเสียที่ระบายลงสู่ดินคือ การสูญเสียน้ำในไนโตรเจน (Volatilization และ Denitrification) และการเคลื่อนที่ของไนโตรเจนโดยการดูดซึมโดยพืช และออกซิเจนที่ผิวดินจะต้องซึมลงไปในพื้นที่ดินโดยผ่านช่องว่างระหว่างเม็ดดินทำให้พวกจุลชีพต่าง ๆ ได้เติบโตอยู่ภายในชั้นดิน ซึ่งจะลดขนาดของช่องว่างที่อยู่ภายในชั้นกรองทำให้เกิดการอุดตันโดยชั้นดินได้

2.4 ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการบำบัดแบบกระจายบนดินโดยระบบน้ำไหลนอง

การบำบัดแบบกระจายบนดิน โดยระบบน้ำไหลนอง ให้มีประสิทธิภาพและประสพผลสำเร็จมีปัจจัยสำคัญที่ต้องพิจารณา ได้แก่ ลักษณะน้ำเสีย (Wastewater Characteristics), การเลือกพื้นที่ (Site evaluation), ภูมิอากาศ (Climate), อัตราภาระทางชลศาสตร์ (Hydraulic loading rate), อัตราการไหลของน้ำเสียบนพื้นที่บำบัด (Application rate), ระยะเวลาที่ปล่อยน้ำเสียลงบนพื้นที่ (Application period), ขนาดของพื้นที่ และพืชคลุมดิน

2.4.1 ลักษณะน้ำเสีย

ลักษณะน้ำเสียจากโรงงานแป่งมันสำปะหลังเป็นน้ำเสียที่ไม่เป็นพิษ และต้องผ่านการบำบัดขั้นต้นก่อน เหมาะสมกับการบำบัดแบบกระจายบนดิน โดยระบบน้ำไหลนอง ในการวิจัยครั้งนี้ได้นำทิ้งจากบริษัท เจ้าพระยาพีซีไรท์ จำกัด ซึ่งทางบริษัทมีระบบบำบัดน้ำเสียหลายขั้นตอนดังนี้ Anaerobic ponds, Aerobic ponds, Facultative ponds, Oxidation ponds และ Maturation ponds ตามลำดับ ดังนั้นการวิจัยครั้งนี้ได้นำน้ำจาก Maturation ponds บ่อสุดท้ายมาทำการวิจัย

2.4.2 การเลือกพื้นที่

ความเหมาะสมสำหรับการเลือกพื้นที่ของการบำบัดแบบกระจายบนดินโดยระบบน้ำไหลนองต้องคำนึงถึงลักษณะทางภูมิศาสตร์และลักษณะของดิน พื้นที่ที่เหมาะสมต้องการความลาดของพื้นที่ 2-8% ถ้าความลาดของพื้นที่มากเกินไปจะทำให้เกิดการกัดเซาะของหน้าดิน พื้นที่ที่มีความยาวลาดอยู่ในช่วง 30-100 เมตร ลักษณะดินที่เหมาะสม เป็นดินที่น้ำสามารถซึมผ่านได้ยาก ได้แก่ ดินร่วนปนดินเหนียว (Clay loam) และดินเหนียว (Clay) ความหนาของชั้นดินประมาณ 0.30-0.60 เมตร (U.S. EPA, 1981)

2.4.3 ภูมิอากาศ

การบำบัดแบบกระจายบนดิน โดยระบบน้ำไหลนอง ขึ้นกับกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่ผิวหน้าดิน หรือบริเวณใกล้ผิวหน้าดิน ในพื้นที่ภูมิอากาศอบอุ่นประสิทธิภาพของระบบจะดีกว่าในพื้นที่อากาศหนาว เนื่องจากภูมิอากาศอบอุ่นจะเกิดกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่บริเวณผิวหน้าดินสูง

Turner et al. (1994) รายงานถึงการศึกษาระบบน้ำไหลนองเป็นเวลา 6 เดือน ของการกำจัดฟอสฟอรัสจากน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว จำนวน 5 แปลง ในวิธีที่แตกต่างกัน การกำจัดฟอสฟอรัสสูงเกิดที่อัตราการไหลของน้ำเสียบนพื้นที่บำบัดต่ำ แต่วิธีที่แตกต่างกันไม่มีผลต่อการกำจัดฟอสฟอรัส ค่าเฉลี่ยการกำจัดฟอสฟอรัสได้ 77% สำหรับฤดูร้อน และ 52% สำหรับฤดูหนาว

2.4.4 อัตราการทางชลศาสตร์

อัตราการทางชลศาสตร์หมายถึงปริมาณน้ำเสียที่ไหลต่อเวลาในหน่วยเซนติเมตรต่อวัน หรือ มิลลิเมตรต่อสัปดาห์ อัตราการทางชลศาสตร์ในการบำบัดแบบกระจายบนดินต้องคำนึงถึงสมดุลของน้ำ โดยพิจารณาถึง การกรอง, การระเหย, สภาพดินและภูมิอากาศ (Bolneni, 1979) ถ้าในเขตพื้นที่ภูมิอากาศอบอุ่น มีการระเหยของน้ำเพิ่มขึ้น จึงต้องการอัตราการทางชลศาสตร์เพิ่มขึ้นเพื่อรักษาสมดุลของน้ำ ในทางกลับกัน ในเขตพื้นที่ภูมิอากาศหนาวมีการระเหยของน้ำลดลง จึงต้องการอัตราการทางชลศาสตร์ลดลง

2.4.5 อัตราการไหลของน้ำเสียบนพื้นที่บำบัด (Application rate)

อัตราการไหลของน้ำเสียนบนพื้นที่บำบัด หมายถึงปริมาตรของน้ำเสียต่อเวลาต่อความกว้าง ในหน่วย ลบ.ม./ม.-ชม. อัตราการไหลของน้ำเสียนบนพื้นที่บำบัดขึ้นกับภูมิอากาศเช่นเดียวกับอัตราการระเหยทางชลศาสตร์ คือในเขตพื้นที่ภูมิอากาศอบอุ่นต้องการอัตราการไหลของน้ำเสียนบนพื้นที่บำบัดสูงกว่าในเขตพื้นที่ภูมิอากาศหนาว

U.S.EPA (1981) ได้กำหนดสมการความสัมพันธ์ดังสมการ 2.6

$$L_w = \frac{(R_a)(P)}{S} (100\text{cm/m}) \quad (2.6)$$

โดยที่ L_w = อัตราการระเหยทางชลศาสตร์, ชม./วัน
 R_a = อัตราการไหลของน้ำเสียนบนพื้นที่บำบัด, ลบ.ม./ม.-ชม.
 P = ระยะเวลาที่ปล่อยน้ำเสียนบนพื้นที่, ชม./วัน
 S = ความยาวความลาดของพื้นที่, ม.

2.4.6 ระยะเวลาที่ปล่อยน้ำเสียนบนพื้นที่

ระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับระยะเวลาที่ปล่อยน้ำเสียนบนพื้นที่ คือ 6-8 ชั่วโมง และหยุดปล่อยน้ำเสีย 16-18 ชั่วโมง ระยะเดินระบบ 5-6 วันต่อสัปดาห์ (Polprasert, 1996)

2.4.7 ขนาดพื้นที่รับน้ำไหลนอง

ขนาดพื้นที่รับน้ำไหลนองที่ต้องการ สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.7) และควรเพิ่มพื้นที่เพื่อพักการใช้งานประมาณ 25% และเพิ่มขนาดพื้นที่สำหรับถนนในพื้นที่โครงการอีก 10% ดังนั้นพื้นที่ทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 1.4 เท่าของพื้นที่รับน้ำไหลนองที่คำนวณได้ (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2539)

$$A = \frac{\left(Q + \frac{V_s}{24}\right) \left(\frac{T_s + 365}{365}\right) S T_c}{R_a T_a} \quad (2.7)$$

โดยที่ A = พื้นที่สำหรับรองรับน้ำไหลนอง, ตร.ม.
 Q = อัตราการไหลเข้าของน้ำเสีย, ลบ.ม./ชม.
 V_s = ปริมาณน้ำที่เกินหรือที่สูญหายไปในช่วงเก็บกักน้ำเสีย, ลบ.ม./วัน
 T_s = ระยะเวลาของการเก็บกัก, วัน
 S = ความยาวความลาด, ม.
 T_c = รอบเวลาทำงาน, ชม.
 R_a = ปริมาณน้ำเสียไหลบนพื้นที่บำบัด, ลบ.ม./ม.-ชม.
 T_a = ระยะเวลาที่น้ำเสียไหลบนพื้นที่บำบัด, ชม.

2.4.8 พืชคลุมดิน

พืชคลุมดินที่เหมาะสมกับการบำบัดแบบกระจายบนดิน โดยระบบน้ำไหลนองจะต้องรักษาเสถียรภาพของดินเพื่อป้องกันการกัดเซาะ เป็นพืชที่ทนน้ำ และช่วยในการกระบวนการกำจัดสารต่าง ๆ ได้แก่พืชจำพวกคันท้า ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้จะใช้คันท้า 3 ชนิด คือ หญ้าขน, หญ้าแฝก และหญ้าสตาร์

1. หญ้าขน (Buffalo grass)

หญ้าขนมีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Bracharia mutica* (Forsk.) Stapf และมีชื่อสามัญว่า Buffalo grass หญ้าขนเป็นหญ้าที่มีอายุหลายปี ลำต้นหยาบ ลำต้นมีทั้งส่วนที่ตั้งตรงและส่วนที่เป็นเถาเลื้อยทอดเอนไปตามผิวดิน จัดเป็นพวกมีไหล (stoloniferous) ส่วนของลำต้นที่ทอดนอนไปตามผิวดินยาว 240-270 ซม. ข้อที่สัมผัสดินจะมีรากเติบโตยังลึกลงไปดินแต่ไม่ลึกมากนักและมีหน่อยาวเจริญเติบโตขึ้นมา ลำต้นที่ตั้งตรงขึ้นไปสูง 60-90 ซม. ใบกว้าง 8-20 ซม. ใบและกาบจะมีขนสีขาวปกคลุมจำนวนมาก หญ้าขนมีระบบรากฝอย (Fibrous roots) ไม่ลึกมากนัก (สายัณห์ ทัดศรี, 2540)

การปรับตัวเข้ากับสภาพแวดล้อมของหญ้าขน หญ้าขนชอบขึ้นในที่ชื้นและและบริเวณที่ราบลุ่มของเขตร้อนและกึ่งร้อนที่มีฝนตกไม่น้อยกว่า 1,000 มิลลิเมตรต่อปี หญ้าขนทนทานต่อสภาพน้ำท่วมขังเป็นระยะเวลานาน ๆ ได้ดีกว่าหญ้าชนิดอื่น แต่ไม่ทนทานต่อสภาพที่แล้งจัดเป็นระยะเวลายาวนาน อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตอยู่ระหว่าง 15-21 °C (สายัณห์ ทัดศรี, 2540) ดินที่เหมาะสมที่สุดในการปลูกหญ้าขนคือ ดินที่มีความอุดมสมบูรณ์สูง เนื้อดินร่วนปนดินเหนียว (Clay loam) ถึงดินเหนียว (Clay) มีความสามารถในการอุ้มน้ำสูง

หญ้าขนเป็นหญ้าที่สำคัญต่ออาชีพการเลี้ยงสัตว์ของไทยในปัจจุบัน การเก็บเกี่ยวหญ้าขนจะมีคุณภาพดีเมื่อตัดในระยะเวลาที่เหมาะสมก่อนที่ลำต้นจะแข็ง โดยทั่วไปการตัดครั้งแรกสามารถกระทำได้เมื่อหญ้าขนมีอายุ 9-11 สัปดาห์หลังการปลูก หลังจากนั้นสามารถตัดได้ทุก 3-4 สัปดาห์ การตัดหญ้าขนกระทำเมื่อมีความสูงประมาณ 60-75 เซนติเมตร เพราะหลังจากนี้หญ้าขนจะเริ่มแข็งและสูญเสียคุณค่าทางอาหาร (สุเทพ การแข็ง, 2539)

2. หญ้าแฝกหอม (Vetiver grass)

หญ้าแฝกหอมมีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Vetiveria zizanioides* Nash และมีชื่อสามัญว่า vetiver grass หญ้าแฝกเป็นหญ้าที่ขึ้นเป็นกอ แดกกอ 24 ต้นต่อกอ เส้นผ่าศูนย์กลางกอ 13 เซนติเมตร สูง 112 เซนติเมตร แดกกอหลวม หน่อกลมอวบชิดปล้องเร็ว ใบแตกจากโคนกอ มีลักษณะแคบยาวขอบขนานปลายสอบแหลมยาว 45-90 เซนติเมตร กว้าง 0.6-0.9 เซนติเมตร มีหลังใบโค้งปลายใบแบนมีสีเขียวเข้ม เนื้อใบค่อนข้างเหนียวมีไขเคลือบ (wax) มากทำให้คูม้น ท้องใบ

ออกสีขาวซีดกว่าด้านหลังใบ และแผ่นใบกว้าง มีระบบรากลึกเจริญเติบโตในแนวตั้งมากกว่าออกทางด้านข้าง แผ่นขยายกว้าง 50 เซนติเมตร หยั่งลึกได้ประมาณกว่า 1 เมตร มีจำนวนรากมากประสานกันแน่นหนา และระบบรากแข็งแรงสามารถเกาะยึดดินได้เหนียวแน่นขึ้นได้ดีในดินเกือบทุกชนิด (กรมพัฒนาที่ดิน, 2541)

หญ้าแฝกมีลักษณะดีเด่นเป็นพืชค้างปี เจริญเติบโตอยู่บนดินได้นานหลายปี ชอบอากาศร้อนและเป็นพืชที่มีความสามารถในการปรับตัวเข้ากับสภาพแวดล้อมได้ดี สามารถปลูกได้ทุกสภาพพื้นที่ (ธनिया เจดียนุกรกุล, 2539) ส่วนต่าง ๆ ของหญ้าแฝกสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ดังนี้ ต้น/ใบ นำมาทำงานหัตถกรรมเครื่องจักสาน, วัสดุเพาะเห็ด, วัสดุคลุมหลังคา, ทำปุ๋ยหมัก, ใช้เป็นอาหารสัตว์ และกรองเศษพืชและตะกอนดินที่ถูกชะล้างมากักเก็บไว้ ส่วนราก ช่วยดูดซับน้ำ และรักษาความชุ่มชื้นในดิน, ช่วยดูดซับแร่ธาตุอาหารให้สลายกลายเป็นวัตถุในดินทำให้ดินร่วนซุย, ช่วยดูดซับสารพิษจากสารเคมีกำจัดศัตรูพืช และช่วยทำให้คุณสมบัติทางกายภาพของดินดีขึ้น (คณะอนุกรรมการด้านวิชาการการวางแผน และติดตามประเมินผล การพัฒนาและรณรงค์การใช้หญ้าแฝกอันเนื่องมาจากพระราชดำริ, 2542)

ธनिया เจดียนุกรกุล (2539) ทำการศึกษาโดยใช้หญ้าแฝกในการบำบัดน้ำทิ้งจากแหล่งชุมชนและน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม พบว่าธาตุอาหารพืชและโลหะหนักในน้ำที่ออกจากแปลงมีปริมาณลดลงจากเดิม โดยธาตุอาหารส่วนที่ลดลงนั้นพบสะสมอยู่ในดินและพืช แต่โลหะหนักที่ลดลงพบสะสมอยู่ในรากพืช

3. หญ้าสตาร์ (African Star)

หญ้าสตาร์ มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Cynodon plectostachyus*. และมีชื่อสามัญว่า African Star ในการจัดหมวดหมู่พืชถือว่าหญ้าสตาร์เป็นกกชนิดหนึ่ง พบหญ้าชนิดนี้ขึ้นตามธรรมชาติอยู่ทั่วไปในประเทศยูกันดา เคนยา แทนซาเนีย และเอธิโอเปียที่ระดับความสูงจากน้ำทะเล 800-2,000 เมตร เป็นหญ้าที่มีไหลแข็งแรง (stolon) ไหลจะมีลักษณะที่โค้งงอเป็นหญ้าที่มีความน่ากินต่อสัตว์ประเภทแพะเล็มแทบทุกชนิด ลำต้นเป็นแบบเถาเลื้อยสูงประมาณ 30-90 เซนติเมตร มีใบประดับที่สั้นมาก แขนงของช่อดอกจะงอขึ้น หญ้าชนิดนี้ไม่ค่อยติดเมล็ดเพราะฉะนั้นจึงใช้ส่วนของลำต้นสำหรับการขยายพันธุ์และเป็นหญ้าที่เจริญเติบโตเร็ว ขึ้นได้ในบริเวณที่มีฝนตกเฉลี่ย 500-800 มิลลิเมตรต่อปี ขึ้นได้ดีมากในประเทศไทยและสามารถขึ้นได้ในดินหลายชนิด ทนต่อการแพะเล็มและการเหยียบย่ำของสัตว์ได้ดี (เฉลิมพล แซมเพชร, 2530)

2.5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การกำจัด COD

การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การกำจัด COD ของแบบกระจายน้ำบนดินระบบน้ำไหลนอง ได้ทำการศึกษ้อัตราอันดับปฏิกิริยา โดยทำการทดสอบอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับศูนย์, ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง และปฏิกิริยาอันดับสอง ด้วยสถิติสมการถดถอยเชิงเส้น โดยทดสอบสมการ และสมมติฐานดังต่อไปนี้

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X \quad (2.8)$$

โดยที่ Y = ตัวแปรตาม (Dependent Variable) เนื่องจากค่าของ Y ขึ้นอยู่กับค่า X
 X = ตัวแปรอิสระ (Independent Variable)
 β_0 = ส่วนตัดแกน Y หรือ ค่าของ Y เมื่อ X มีค่าเป็นศูนย์
 β_1 = ค่าความชัน (slope) ของเส้นตรง

ทำการทดสอบ 2 สมมติฐานคือ

$$H_0: \beta_1 = 0 \text{ หรือ } H_0: Y \text{ ไม่มีความสัมพันธ์กับ } X \text{ ในรูปเชิงเส้น}$$

$$H_1: \beta_1 \neq 0 \text{ หรือ } H_1: Y \text{ มีความสัมพันธ์กับ } X \text{ ในรูปเชิงเส้น}$$

$$H_0: \beta_0 = 0 \text{ หรือ } H_0: \text{ตัดแกน } Y \text{ ที่จุด } 0$$

$$H_1: \beta_0 \neq 0 \text{ หรือ } H_1: \text{ไม่ตัดแกน } Y \text{ ที่จุด } 0$$

2.6 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การกรองอนุภาค

Weber (1972) ศึกษากลไกทางกายภาพมีประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาครวมตั้งสมการที่

2.5 และเขียนกราฟระหว่างความสัมพันธ์ $\ln(n/n_0)$ กับ $1/R$ เพื่อนำไปวิเคราะห์หาค่าคงที่ต่าง ๆ

โดยที่ ค่าคงที่ f = ค่าคงที่ของการกรองที่อนุภาคขนาดต่าง ๆ (collision factor)
= ส่วนประกอบของค่าความชัน

2.7 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอัตราการเจริญเติบโตของหญ้า

วินิจ เสรีประเสริฐ (2534) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่ให้กับหญ้าชนิดต่าง ๆ พบว่าสามารถอธิบายได้ด้วย Logistic Equation ดังสมการ (2.9) คือ

$$\frac{dy(t)}{dt} = ky(t)(m - y(t)) = y'(t) \quad (2.9)$$

โดยที่ $\frac{dy(t)}{dt}$ = อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณหญ้า, น้ำหนักต่อเวลา
 k = อัตราการเจริญเติบโต, ต่อเวลา

$y(t)$ = ปริมาณหญ้าที่มีการให้น้ำในปริมาณต่าง ๆ, น้ำหนัก

$y(0)$ = ปริมาณหญ้าที่ไม่มีการให้น้ำ, น้ำหนัก

m = ปริมาณหญ้ามากที่สุด, น้ำหนัก

t = คำนวณระดับของการให้น้ำ, cm/d

สามารถแก้สมการให้อยู่ในรูปสมการ (2.8) ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \frac{dy(t)}{y(t)(m-y(t))} &= kdt \\ \int \frac{dy(t)}{y(t)(m-y(t))} &= \int kdt + C \\ \int \frac{1}{m} \left[\frac{1}{y(t)} + \frac{1}{m-y(t)} \right] dy(t) &= \int kdt + C \\ \ln y(t) - \ln(m-y(t)) &= mkt + C \quad ; C = cm \\ \frac{y(t)}{m-y(t)} &= Ce^{mkt} \\ y(t) &= (m-y(t))Ce^{mkt} = \frac{mCe^{mkt}}{1+Ce^{mkt}} \end{aligned}$$

โดย Eckart (1999) กล่าวว่า

$$\begin{aligned} C &= \frac{y(0)}{m-y(0)} \\ y(t) &= \frac{my(0)}{y(0) + (m-y(0))e^{-mkt}} \end{aligned} \quad (2.10)$$

จากสมการ (2.9) เขียนกราฟเพื่อนำไปวิเคราะห์หาค่าคงที่ต่าง ๆ ได้โดยเขียนกราฟระหว่าง

ความสัมพันธ์ $\frac{y'(t)}{y(t)}$ กับ $y(t)$

บทที่ 3 การดำเนินการวิจัย

การวิจัยเพื่อศึกษาประสิทธิภาพและหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งโดยการกรองด้วยหญ้า และแบบจำลองปริมาณการเจริญเติบโตของหญ้าที่เก็บเกี่ยวได้ การทดลองแบบกระจายบนดินโดยระบบน้ำไหลนอง อาศัยหลักการกรองด้วยหญ้าทั้งหมดกระทำที่บริเวณอาคารศูนย์เครื่องมือ 5 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยใช้น้ำตัวอย่างน้ำทิ้งจากโรงงานผลิตแอมันสำปะหลังที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นจากบ่อฝังของบริษัท เจ้าพระยาพีซีไรท์ จำกัด แบ่งการทดลองออกเป็น 6 แปลง

การทดลองแปลงที่ 1-2 เป็นการปลูกหญ้าขน, แปลงที่ 3-4 เป็นการปลูกหญ้าแฝก และแปลงที่ 5-6 เป็นการปลูกหญ้าสตาร์เป็นพืชคลุมดิน แต่ละการทดลองทำการศึกษาที่ความชัน 2% และศึกษาอัตราการไหลที่แตกต่างกัน 5 ค่า ใช้ระยะเวลาปล่อยน้ำเสียลงบนพื้นที่ 8 ชั่วโมงต่อวัน ทำการเก็บตัวอย่างน้ำที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพน้ำทุกวัน จนระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ โดยพิจารณาจากการตรวจสอบทางสถิติสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของค่า COD มีค่าไม่เกิน 5% เพื่อนำน้ำไปวิเคราะห์คุณภาพน้ำโดยนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งโดยการกรองด้วยหญ้า, ศึกษาปริมาณและการเจริญเติบโตของหญ้าที่เก็บเกี่ยวได้ โดยพิจารณาผลผลิตที่เก็บเกี่ยวได้เป็นผลผลิตน้ำหนักเปียกและน้ำหนักแห้ง

3.1 การศึกษาสารติดตาม

การศึกษาสารติดตาม (Tracer study) ของการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานแอมันสำปะหลังโดยการกรองด้วยหญ้า เพื่อหาเวลากักเก็บน้ำที่แท้จริงและตัวประกอบการกระจาย (d) ใช้วิธีการแบบ slug feed โดยใส่สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้น 25 กรัมต่อลิตร ทดลองที่อัตราการไหล 0.10 ลบ.ม.ต่อวัน ก่อนทำการทดลองมีการตรวจสอบความเข้มข้นเริ่มต้นในน้ำประปา พบว่ามีคลอไรด์ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการศึกษาสารติดตามใช้การคำนวณโดยวิธี “Method of moment”

การคำนวณหาผลการศึกษาสารติดตามได้ดังสมการต่อไปนี้ (Levenspiel, 1972)

ค่าเวลากักเก็บน้ำที่แท้จริง, $T_{\text{mean}} = \frac{\sum_{i=0}^t t_i c_i \Delta t}{\sum_{i=0}^t c_i \Delta t}$ (3.1)

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน, $\sigma^2 = \frac{\sum_{i=0}^t t_i^2 c_i \Delta t}{\sum_{i=0}^t c_i \Delta t} - T_{\text{mean}}^2$ (3.2)

$$\frac{\sigma^2}{T_{\text{mean}}^2} = 2d + 8d^2 \quad (3.3)$$

3.2 การวิเคราะห์คุณภาพน้ำทิ้ง

สำหรับการวิจัยครั้งนี้ นำน้ำทิ้งโรงงานแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นจากบ่อฝังมาวิเคราะห์คุณสมบัติน้ำโดยวิเคราะห์ตามวิธีการใน “Standard Methods” (APHA et al., 1995) ดังตารางที่ 3.1 เพื่อหาคุณสมบัติน้ำทิ้งที่เข้าแบบจำลองการกระจายน้ำบนดิน โดยระบบน้ำไหลนองดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 วิธีวิเคราะห์คุณสมบัติน้ำทิ้ง

คุณสมบัติน้ำทิ้ง	วิธีวิเคราะห์
Total COD (mg/L)	Open dichromate reflux
TSS (mg/L)	Filtration/Evaporation
TP (mg/L)	Persulphate digestion
TKN (mg/L)	Digestion/Distillation
NO ₃ -N (mg/L)	Sodium salicylate method
Turbidity (NTU)	Turbidity meter
Chlorophyll-a (mg/L)	Wintermans & DeMots Method
Dimension & Quantities of particle	Particle counter

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติน้ำทิ้งโรงงานแปรงมันสำปะหลังจากบ่อฝัง บริษัท เจ้าพระยาพีชไร่ จำกัด

คุณสมบัติ	พิสัย	ค่าเฉลี่ย \pm Std.dev.
Total COD (mg/L)	312.40-358.27	339.97 \pm 14.50
Soluble COD (mg/L)	159.32-182.72	173.39 \pm 7.39
ของแข็งแขวนลอย, TSS (mg/L)	214.00-232.00	224.33 \pm 5.02
ฟอสฟอรัส, TP (mg/L)	0.50-0.60	0.55 \pm 0.03
ไนโตรเจน, TKN (mg/L)	24.79-25.85	25.51 \pm 0.27
Nitrate (mg/L)	0.32-0.47	0.38 \pm 0.05
Turbidity (NTU)	52.41-55.16	54.19 \pm 0.74
Chlorophyll-a (mg/L)	0.24-0.26	0.25 \pm 5.03 $\times 10^{-3}$
pH	8.36-9.55	9.04 \pm 0.38

3.3 การสร้างแบบจำลอง

ทำการสร้างแบบจำลองระบบน้ำไหลนองสร้างด้วยไม้ โดยมีขนาดกว้าง 1.5 เมตร ยาว 4.0 เมตร มีความลาดชัน 2% จำนวน 6 แปลง ภายในแปลงปลูกด้วยพลาสติกเพื่อป้องกันการรั่วซึมและควบคุมให้น้ำออกตามตำแหน่งที่ศึกษาและในดินหนา 0.30 เมตร และระบบจ่ายน้ำบนแปลงทดลองใช้ท่อ PVC ขนาด 18 มิลลิเมตร เจาะรูด้านข้าง เดินท่อต่อกับถังเก็บน้ำทิ้งที่นำมาจากบ่อฝังโรงงานแปรงมันสำปะหลัง ควบคุมปริมาณน้ำเข้าแปลงด้วยประตูน้ำ น้ำที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งแล้วนั้น จะไหลลงสู่รางรับน้ำทิ้ง ดังรูปที่ 3.1

3.4 การเตรียมพืช

การปลูกพืชในแปลงทดลอง

คัดเลือกพืชตามลักษณะทางพฤกษศาสตร์ โดยมีลักษณะรากที่แตกต่างกัน คือ

- หญ้าขน (*Brachiaria mutica* (Forsk.) Stapf)
- หญ้าแฝก (*Vetiveria zizanioides* Nash)
- หญ้าสตาร์ (*Cynodon plectostachyus*)

ทำการคัดเลือกพืชที่มีขนาดใกล้เคียงกันแล้วทำการปลูกต้นหญ้าขน, หญ้าแฝก และหญ้าสตาร์ บนแปลงทดลองชนิดละ 2 แปลง โดยปลูกหญ้าขนและหญ้าแฝกที่ระยะระหว่างต้น 50 เซนติเมตร และระยะระหว่างแถว 50 เซนติเมตร ส่วนหญ้าสตาร์ปลูกตลอดทั้งแปลง เมื่อปลูกพืชเรียบร้อยแล้ว

ปล่อยน้ำเข้าแปลงประมาณ 2 สัปดาห์ เพื่อให้พืชฟื้นตัว จากนั้นปล่อยน้ำทิ้งโรงงานเป็งมัน ลำปะหลังเข้าแปลงทดลองทีละน้อย ค่อย ๆ เพิ่มความเข้มข้น เพื่อให้พืชปรับสภาพได้จนกระทั่งพืช สามารถรับน้ำทิ้งโรงงานเป็งมันลำปะหลังได้ตามการวิจัย ซึ่งใช้เวลาในการเริ่มต้น (Start-Up) ของ การกระจายบนดิน โดยระบบน้ำไหลนองประมาณ 2-3 สัปดาห์

3.5 สถานที่ทำการวิจัย

การทดลองทั้งหมดกระทำที่บริเวณอาคารศูนย์เครื่องมือ 5 และการวิเคราะห์คุณภาพน้ำใช้ ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม อาคารศูนย์เครื่องมือ 5 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.6 การดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยตามขั้นตอนดังนี้

3.6.1 สร้างแปลงทดลองและทำการปลูกหญ้าขน, หญ้าแฝก และหญ้าสตาบ์ บนแปลง

3.6.2 กำหนดอัตราการทางชลศาสตร์ และระยะเวลาที่ปล่อยน้ำเสียนลงบนพื้นที่ ดังแสดง ในตารางที่ 3.3

3.6.3 ปล่อยน้ำทิ้งเข้าสู่ระบบการทดลองทั้ง 6 แปลง และทำการเก็บน้ำตัวอย่างที่สภาวะ คงที่ทุกวัน จุดที่เก็บน้ำตัวอย่างเลือกจุดน้ำเข้าและจุดน้ำออก นำน้ำไปวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

3.6.4 ทำการตรวจสอบระบบที่สภาวะคงที่จากค่า Total COD ที่ทำการวิเคราะห์ทุกวัน โดยจำนวนตัวอย่างน้ำที่เก็บอย่างน้อย 10 วัน ซึ่งค่าที่ได้มีค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนน้อยกว่า 5% แล้วจึงทำการวิเคราะห์คุณภาพน้ำโดยค่า Total COD, Soluble COD, TP, TKN, NO₃-N, Turbidity, Chlorophyll-a, TSS, และวัดจำนวนและขนาดของอนุภาคที่มีอยู่ในน้ำ ก่อนและหลังการ ปรับปรุงคุณภาพน้ำอย่างน้อย 4 วันหลังระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ โดยใช้ห้องปฏิบัติการสาขา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม อาคารศูนย์เครื่องมือ 5 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.6.5 ทำการวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่สะสมอยู่ในดิน เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะสมดุล

3.6.6 ทำการวิเคราะห์ปริมาณการเจริญเติบโตของหญ้า โดยทำการตัดหญ้าทุก ๆ 1 เดือน ตั้งแต่เริ่มทำการทดลองจนถึงระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ ที่ระยะ 0-1 เมตร, 1-2 เมตร, 2-3 เมตร และ 3-4 เมตร และทำการชั่งน้ำหนักเปียกและนำหญ้าไปอบที่อุณหภูมิ 103°C 24 ชั่วโมง แล้วทำการชั่งน้ำหนักแห้ง

3.7 การเก็บรวบรวมตัวอย่าง

ทำการเก็บน้ำตัวอย่างที่จุดเข้าและออกจากแปลงทดลองมาวิเคราะห์คุณภาพน้ำทุกวันจนกระทั่งระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ โดยพิจารณา ดังนี้คือ

3.7.1 ทำการเก็บน้ำตัวอย่างที่จุดน้ำเข้าและน้ำออก มาวิเคราะห์ค่า COD และ pH เพื่อประเมินการเข้าสู่สภาวะคงที่ของระบบ ทำการวิเคราะห์ทุกวัน โดยจำนวนตัวอย่างน้ำที่เก็บอย่างน้อย 10 วัน ซึ่งค่าที่ได้มีค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนน้อยกว่า 5%

ตารางที่ 3.3 กำหนดการและสภาพการทดลองระบบน้ำไหลนอง

กำหนดการ	การทดลองชุดที่				
	1	2	3	4	5
อัตราการทางชลศาสตร์, ชม./วัน	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
อัตราการไหลของน้ำเสียนบนพื้นที่บ้ำบัด ⁽¹⁾ , ลบ.ม./ม.-ชม.	0.0075	0.0100	0.0125	0.0150	0.0175
อัตราการไหล ⁽²⁾ , ลบ.ม./ชม.	0.0110	0.0147	0.0184	0.0221	0.0258
ระยะเวลาที่ปล่อยน้ำเสียนบนพื้นที่, ชม./วัน	8	8	8	8	8
การเก็บน้ำตัวอย่าง	ทุกวัน	ทุกวัน	ทุกวัน	ทุกวัน	ทุกวัน

⁽¹⁾ คำนวณจากสมการ (2.6)

⁽²⁾ คำนวณจากสมการ (2.7)

3.7.2 ทำการเก็บน้ำตัวอย่างที่จุดน้ำเข้าและน้ำออก มาวิเคราะห์ค่า Total COD, Soluble COD, TP, TKN, NO₃-N, Turbidity, Chlorophyll-a, TSS, และวัดจำนวนและขนาดของอนุภาคที่มีอยู่ในน้ำ หลังจากระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ อย่างน้อย 4 วัน

3.7.3 ทำการเก็บตัวอย่างดินที่ระยะ 0.5, 2 และ 3.5 เมตร มาวิเคราะห์ค่าปริมาณไนโตรเจน, ฟอสฟอรัส และ pH หลังจากระบบเข้าสู่สภาวะคงที่

3.7.4 ทำการตัดหญ้าที่ระยะ 1, 2, 3 และ 4 ทำการชั่งน้ำหนักเปียกและน้ำหนักแห้ง ทุก ๆ 1 เดือนเพื่อนำผลไปคำนวณหาผลผลิตของหญ้าที่ได้

3.8 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

การวิเคราะห์ผลการทดลองประกอบด้วย

- 3.8.1 การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การกำจัด COD
นำข้อมูลจากการทดลองมาวิเคราะห์ทางสถิติ ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SPSS โดย
วิธีทดสอบความถดถอยเชิงเส้น ซึ่งใช้ทดสอบอันดับการเกิดปฏิกิริยา
- 3.8.2 การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การกำจัดอนุภาค
นำข้อมูลจำนวนและขนาดของอนุภาค
- 3.8.3 การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การเจริญเติบโตของหญ้า

3.9 ตัวแปรที่ทำการวิจัย

ตัวแปรที่ทำการวิจัยจะพิจารณาแบ่งเป็น 3 ประเภท ได้แก่ ตัวแปรอิสระ, ตัวแปรควบคุม และตัวแปรตาม ซึ่งแสดงรายละเอียดดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรที่ทำการวิจัย

ตัวแปรอิสระ (Independent Variable)	ตัวแปรควบคุม (Control Variable)	ตัวแปรตาม (Dependent Variable)
อัตราการทางชลศาสตร์ อัตราการไหลของน้ำเสียบนพื้นที่ อัตราการไหล	ขนาดแปลงทดลอง ความลาดชัน ชนิดของพืช ชนิดของดิน ชนิดของน้ำทิ้งที่ทดลอง	COD TP TKN NO ₃ -N TSS Turbidity Chlorophyll-a จำนวนและขนาดอนุภาค ฟอสฟอรัสในดิน ไนโตรเจนในดิน ปริมาณผลผลิตหญ้า

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะน้ำทิ้ง

ผลการวิเคราะห์ลักษณะน้ำทิ้งที่ผ่านระบบบำบัดของโรงงานแป้งมันสำปะหลัง (บริษัท เจ้าพระยาพีซีไรท์ จำกัด) แสดงในตารางที่ 3.2 จะเห็นได้ว่าคุณภาพน้ำที่ผ่านระบบบำบัดของโรงงาน มีค่าความสกปรก ปริมาณของแข็งแขวนลอย สารอาหารประเภทไนโตรเจนและฟอสฟอรัส หากไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งก่อนปล่อยลงสู่ธรรมชาติจะก่อให้เกิดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมโดยตรง ดังนั้นน้ำทิ้งจึงควรได้รับการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งก่อน จากการศึกษาวิจัยโดยการกรองด้วยหญ้าได้ผลตามตารางที่ 1ข, 2ข และ 3ข (ภาคผนวก ข)

4.2 ผลการศึกษาสารติดตาม

การศึกษาสารติดตาม (Tracer study) ของการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานแป้งมันสำปะหลัง โดยการกรองด้วยหญ้า ใช้วิธีการแบบ slug feed โดยใส่สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้น 25 กรัมต่อลิตร ทดลองที่อัตราการไหล 0.10 ลบ.ม.ต่อวัน ก่อนทำการทดลองมีการตรวจสอบความเข้มข้นเริ่มต้นในน้ำประปา พบว่ามีคลอไรด์ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการศึกษาสารติดตาม ใช้การคำนวณโดยวิธี “Method of moment” ตามสมการที่ (3.1) ถึง สมการที่ (3.3) พบว่าค่าเวลาเฉลี่ย (T_{mean}) มีค่าเท่ากับ 173.36 นาที ส่วนค่าความแปรปรวนมีค่าเท่ากับ 7780.3 และจำนวนการกระจาย (d) มีค่าเท่ากับ 0.094 สามารถบ่งบอกถึงลักษณะต่าง ๆ ได้ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง $0 < d < 0.2$ ค่า d บ่งบอกถึงระบบบำบัดเป็นการไหลแบบท่อ (plug flow) มีการกระจายกระจายค่อนข้างมาก แสดงในรูปที่ 4.1 และตารางที่ 1ก (ภาคผนวก ก)

$$T_{theory} = \frac{0.078Z}{qG^{1/3}} = 135.45 \text{ นาที}$$

$$\begin{aligned} \text{จากสมการ (3.1)} \quad T_{mean} &= \frac{\int_0^t t_i c_i \Delta t}{\int_0^t c_i \Delta t} \\ &= 257.44 / 1.485 \\ &= 173.36 \text{ นาที} \end{aligned}$$

ตารางที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระจาย (d) กับลักษณะการไหล

ตัวประกอบการกระจาย (d)	ลักษณะการไหล
0	การไหลแบบท่อ
0.002	การไหลแบบท่อที่มีการกระจายน้อย
0.025	การไหลแบบท่อที่มีการกระจายปานกลาง
0.200	การไหลแบบท่อที่มีการกระจายมาก
∞	การไหลแบบกวนสมบูรณ์

หมายเหตุ จาก Chemical Reaction Engineering (277), โดย Levenspiel, 1972, New York: Wiley International.

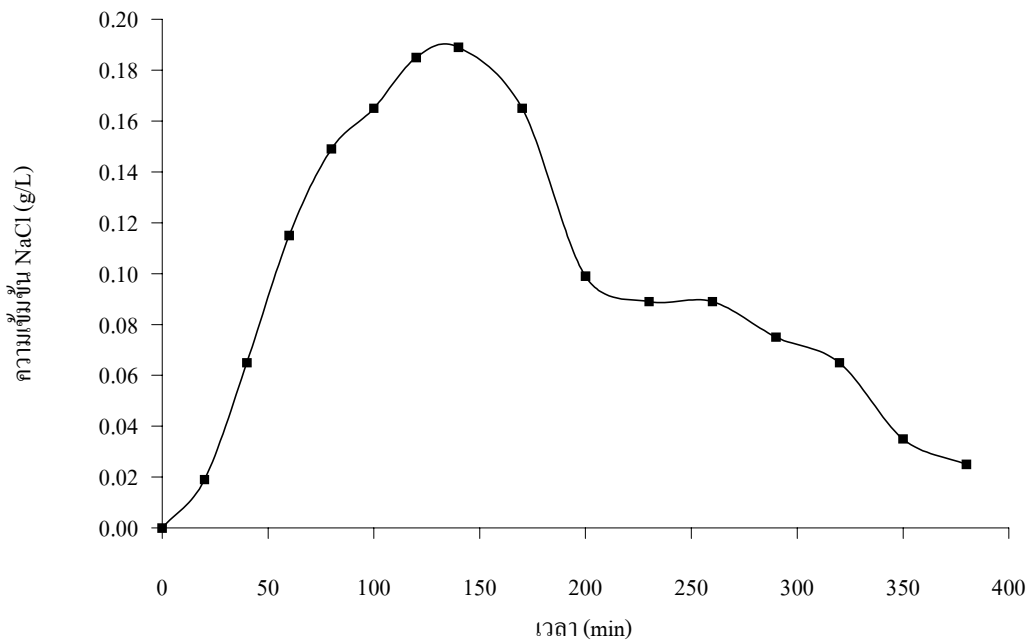
$$\begin{aligned}
 \text{จากสมการ (3.2)} \quad \sigma^2 &= \frac{\sum_{i=0}^t t_i^2 c_i \Delta t}{\sum_{i=0}^t c_i \Delta t} - T_{\text{mean}}^2 \\
 &= 56183.50 / 1.485 - 173.36^2 \\
 &= 7780.32 \\
 \text{จากสมการ (3.3)} \quad \frac{\sigma^2}{T_{\text{mean}}^2} &= 2d + 8d^2 \\
 d &= 0.094
 \end{aligned}$$

รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น NaCl กับเวลา พบว่ากราฟมีลักษณะเป็นเส้นโค้งปกติเบ้ขวา คือเมื่อเริ่มต้นทำการทดลองความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ออกมาจะมีค่าน้อย และเมื่อเวลาผ่านไปความเข้มข้นจะเพิ่มตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น แต่มีลักษณะการเพิ่มที่รวดเร็ว จนกระทั่งถึงจุดที่ความเข้มข้นคลอไรด์มีค่าสูงสุด จากนั้นความเข้มข้นจะค่อย ๆ ลดลงจนเกือบคงที่ การคำนวณหาผลการศึกษาดังกล่าว

จากผลการศึกษาดังกล่าวพบว่า เวลาที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีมีค่าน้อยกว่าที่ได้จากการศึกษาดังกล่าว เนื่องจากการศึกษาดังกล่าวเกิดการหน่วงการไหลขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายประการคือ ชนิดของดิน, ความพรุนของดิน, ความหนาของชั้นดิน และพืชคลุมดิน

4.2 ประสิทธิภาพการกำจัด

การทดลองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัด Total COD, Soluble COD, TSS,

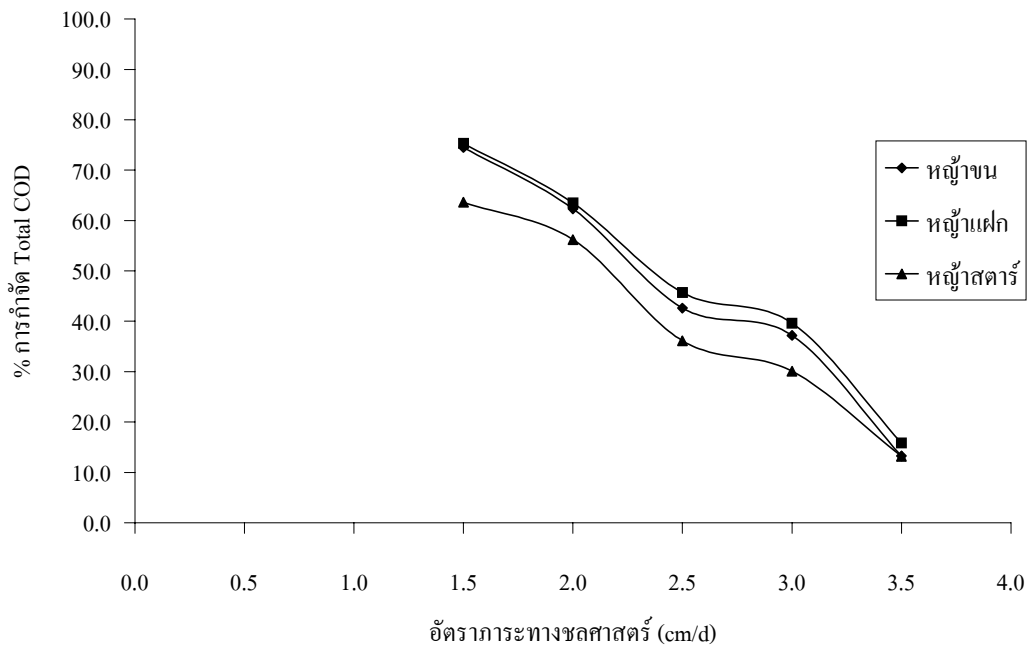


รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น NaCl กับเวลา ของการศึกษาดังกล่าว

TP, TKN, Nitrate, Turbidity, Chlorophyll-a, ขนาดและจำนวนอนุภาคต่าง ๆ ที่อัตราภาระทางชลศาสตร์ (Hydraulic Loading rate) ต่างๆ คือ 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 และ 3.5 cm/d และชนิดพืชที่ปลูกต่างกันคือ หญ้าขน, หญ้าแฝก และหญ้าสตาร์ การวิเคราะห์ผลต่างๆ ใ้ค่าที่ได้จากการทดลองในช่วงสภาวะคงที่ (Steady-state conditions) ในแต่ละช่วงการทดลองซึ่งการทดลองครั้งนี้ได้ศึกษาประสิทธิภาพในการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานแปรงมันสำปะหลัง โดยการกรองด้วยหญ้ามี่ค่าต่างๆ ดังนี้

4.3.1 ประสิทธิภาพการกำจัดค่า Total COD

จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดค่า Total COD โดยการกรองด้วยหญ้างทั้ง 3 ชนิดคือ หญ้าขน, หญ้าแฝก และหญ้าสตาร์ ที่อัตราภาระทางชลศาสตร์ 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 และ 3.5 cm/d โดยการกรองด้วยหญ้ามี่ค่าเฉลี่ยเป็นร้อยละ 75.52, 62.32, 42.63, 37.20 และ 13.23 ตามลำดับ โดยการกรองด้วยหญ้ามี่ค่าเฉลี่ยเป็นร้อยละ 75.32, 63.51, 45.73, 39.65 และ 15.81 ตามลำดับ และโดยการกรองด้วยหญ้ามี่ค่าเฉลี่ยเป็นร้อยละ 63.60, 56.24, 36.11, 30.10 และ 13.20 ตามลำดับ แสดงในรูปที่ 4.2 จากการทดลองพบว่าที่อัตราภาระทางชลศาสตร์ที่มีประสิทธิภาพการกำจัดค่า Total COD เมื่อมีอัตราภาระบรทุกเข้าในแปลงหญ้าน้อยที่สุดและประสิทธิภาพการกำจัดค่า Total COD จะน้อยลงถ้ามีอัตราภาระทางชลศาสตร์มากขึ้น ดังนั้นประสิทธิภาพการกำจัดค่า Total COD จะแปรผกผันกับอัตราภาระทางชลศาสตร์ และจากผลการทดลองที่ได้ พบว่า

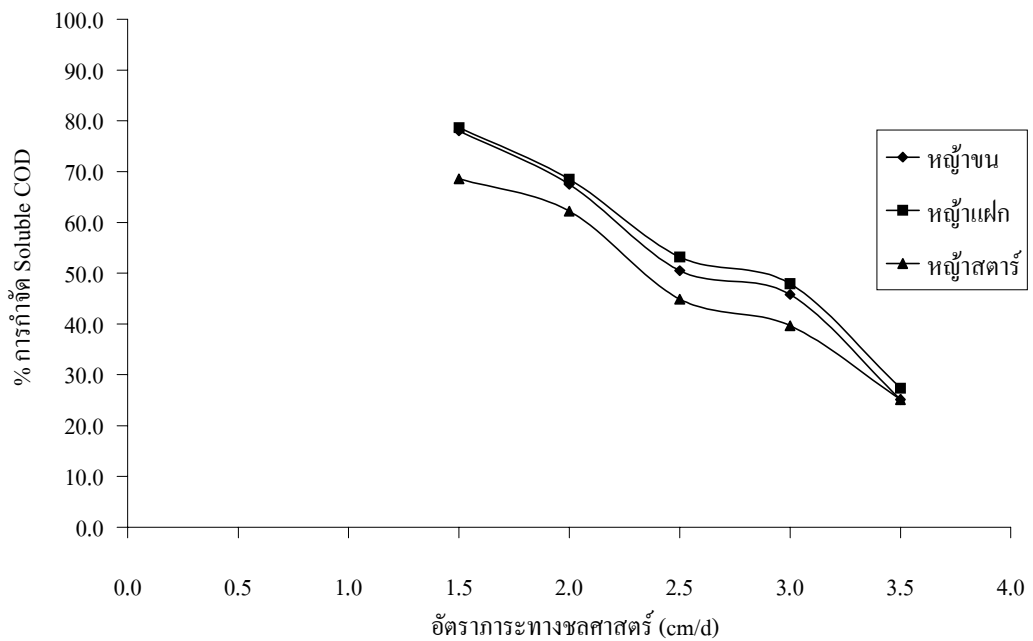


รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง % การกำจัด Total COD กับอัตราทางชลศาสตร์

หมู้อาขนและหมู้อาแฝกเมื่อมีการทดสอบค่าความแตกต่างทางสถิติระหว่างหมู้อาทั้ง 2 ชนิดที่อัตราทางชลศาสตร์ต่างๆ โดยการทดสอบค่า t-Test พบว่ามีผลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 มีค่าตามตารางที่ 1ข, 2ข และ 3ข (ภาคผนวก ข) ซึ่งการกำจัด Total COD มีกลไกหลักคือ การตกตะกอนของของแข็งและกระบวนการชีวภาพในการย่อยสลายในส่วนที่เป็นน้ำและตะกอน

4.3.2 ประสิทธิภาพการกำจัดค่า Soluble COD

จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดค่า Soluble COD โดยการกรองด้วยหมู้อาทั้ง 3 ชนิดคือ หมู้อาขน, หมู้อาแฝก และหมู้อาสตาร์ ที่อัตราทางชลศาสตร์ 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 และ 3.5 cm/d โดยการกรองด้วยหมู้อาขนมีค่าเฉลี่ยเป็นร้อยละ 78.02, 67.50, 50.51, 45.82 และ 25.14 ตามลำดับ โดยการกรองด้วยหมู้อาแฝกมีค่าเฉลี่ยเป็นร้อยละ 75.71, 68.52, 53.18, 47.93 และ 27.37 ตามลำดับ และโดยการกรองด้วยหมู้อาสตาร์มีค่าเฉลี่ยเป็นร้อยละ 68.59, 62.24, 44.88, 39.69 และ 25.11 ตามลำดับ แสดงในรูปที่ 4.3 จากการทดลองพบว่าที่อัตราทางชลศาสตร์ที่มีประสิทธิภาพการกำจัดค่า Soluble COD ที่อัตราทางชลศาสตร์น้อยที่สุด และจากผลการทดลองที่ได้ พบว่าหมู้อาขนและ หมู้อาแฝกมีประสิทธิภาพการกำจัดค่า Soluble COD มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมี

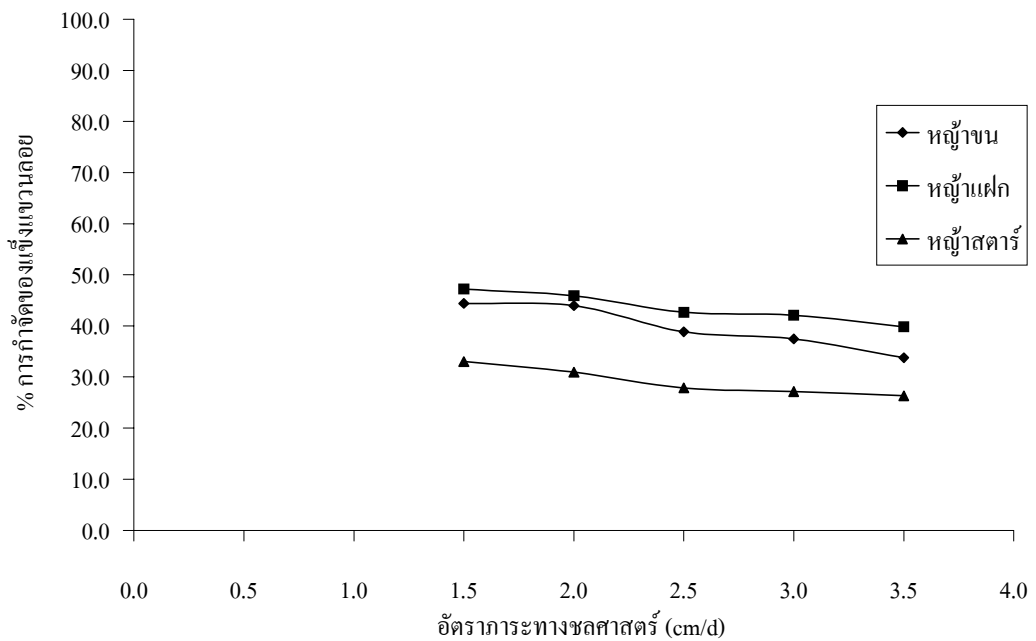


รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง % การกำจัด Soluble COD กับอัตราทางชลศาสตร์

นัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 มีค่าตามตารางที่ 1ข, 2ข และ 3ข (ภาคผนวก ข) โดยค่า Soluble COD ที่ได้ ได้จากการกรองตะกอนและของแข็งแขวนลอยที่ปะปนอยู่ในน้ำออก โดยค่าที่ได้เป็นค่าความสกปรกของน้ำที่ออกจากระบบโดยแท้จริงซึ่งการกำจัด Soluble COD มีกลไกหลักคือ การตกตะกอนของของแข็งและกระบวนการชีวภาพในการย่อยสลายในส่วนที่เป็นน้ำและตะกอน

4.3.3 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอย

จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอย โดยการกรองด้วยหมู้อาทั้ง 3 ชนิดคือ หมู้อาขน, หมู้อาแฝก และหมู้อาสตาร์ ที่อัตราทางชลศาสตร์ 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 และ 3.5 cm/d โดยการกรองด้วยหมู้อาขนมีค่าเฉลี่ยเป็นร้อยละ 44.4, 44.0, 38.8, 37.4 และ 33.8 ตามลำดับ โดยการกรองด้วยหมู้อาแฝกมีค่าเฉลี่ยเป็นร้อยละ 47.2, 45.9, 42.7, 42.1 และ 39.8 ตามลำดับ และโดยการกรองด้วยหมู้อาสตาร์มีค่าเฉลี่ยเป็นร้อยละ 33.0, 31.0, 27.9, 27.2 และ 26.3 ตามลำดับ แสดงในรูปที่ 4.4 จากการทดลองพบว่าที่อัตราทางชลศาสตร์ที่มีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยดีเมื่อรับอัตราทางชลศาสตร์น้อย เมื่อมีการทดสอบค่าความแตกต่างทางสถิติในการลดลงของค่าของแข็งแขวนลอยที่อัตราทางชลศาสตร์ต่างๆ กับค่าของแข็งแขวนลอยเฉลี่ย มีค่าตามตารางที่ 1ข, 2ข และ 3ข (ภาคผนวก ข) โดยการทดสอบค่า t-Test พบว่ามีผลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังนั้นถือได้ว่าการลดลงของค่าของแข็ง

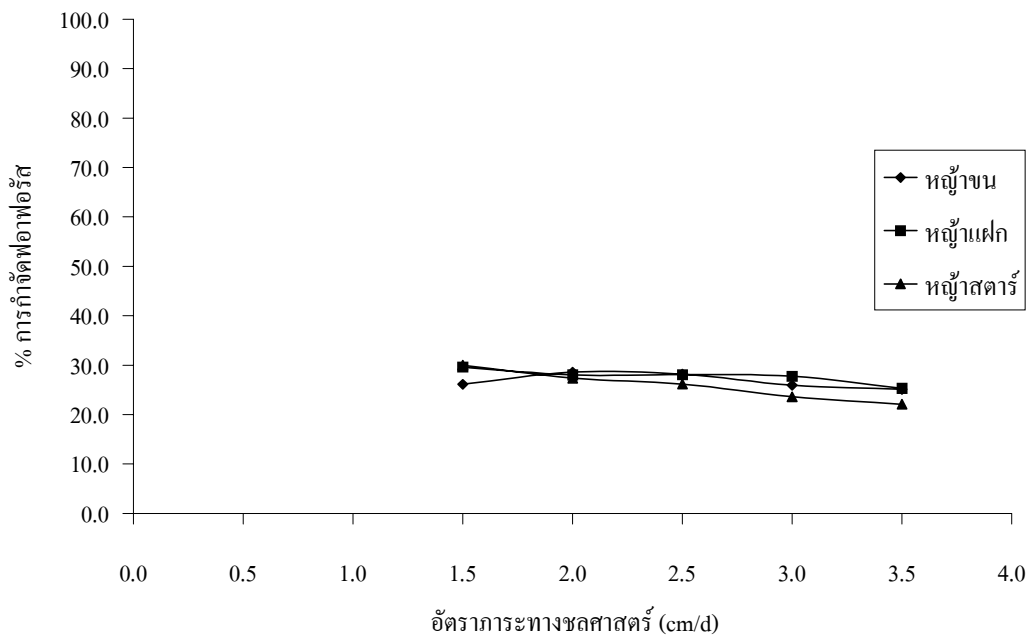


รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง % การกำจัดของแข็งแขวนลอย กับอัตราปุ๋ยทางชลศาสตร์

แขวนลอยของแปลงกล้วยาขนมีค่าเท่ากับร้อยละ 39.7 ของแปลงกล้วยาแฝกมีค่าเท่ากับร้อยละ 43.5 และของแปลงกล้วยาสตาร์มีค่าเท่ากับร้อยละ 29.1 และจากผลการทดลองที่ได้พบว่ากล้วยาขนและกล้วยาแฝก เมื่อมีการทดสอบค่าความแตกต่างทางสถิติระหว่างกล้วยาทั้ง 2 ชนิดที่อัตราปุ๋ยทางชลศาสตร์ต่างๆ โดยการทดสอบค่า t-Test พบว่ามีผลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ซึ่งการกำจัดของแข็งแขวนลอย มีกลไกหลักคือ การตกตะกอนของของแข็งและการกรองผ่านตัวกลางซึ่งคือดินและรากของกล้วยา

4.3.4 ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัส

จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัส โดยการกรองด้วยกล้วยาทั้ง 3 ชนิดคือ กล้วยาขน, กล้วยาแฝก และกล้วยาสตาร์ ที่อัตราปุ๋ยทางชลศาสตร์ 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 และ 3.5 cm/d โดยการกรองด้วยกล้วยาขนมีค่าเฉลี่ยเป็นร้อยละ 26.1, 28.6, 28.2, 26.0 และ 25.1 ตามลำดับ โดยการกรองด้วยกล้วยาแฝกมีค่าเฉลี่ยเป็นร้อยละ 29.6, 28.0, 28.1, 27.7 และ 25.3 ตามลำดับ และโดยการกรองด้วยกล้วยาสตาร์มีค่าเฉลี่ยเป็นร้อยละ 30.0, 27.4, 26.2, 23.6 และ 22.1 ตามลำดับ แสดงในรูปที่ 4.5 เมื่อมีการทดสอบค่าความแตกต่างทางสถิติในการลดลงของค่าฟอสฟอรัสที่อัตราปุ๋ยทางชลศาสตร์ต่างๆ กับค่าฟอสฟอรัสเฉลี่ย มีค่าตามตารางที่ 1ข, 2ข และ 3ข (ภาคผนวก ข) โดยการทดสอบค่า t-Test พบว่ามีผลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังนั้นถือได้ว่าการลดลงของค่าฟอสฟอรัสของแปลงกล้วยาขนมีค่าเท่ากับร้อยละ 26.79 ของแปลง

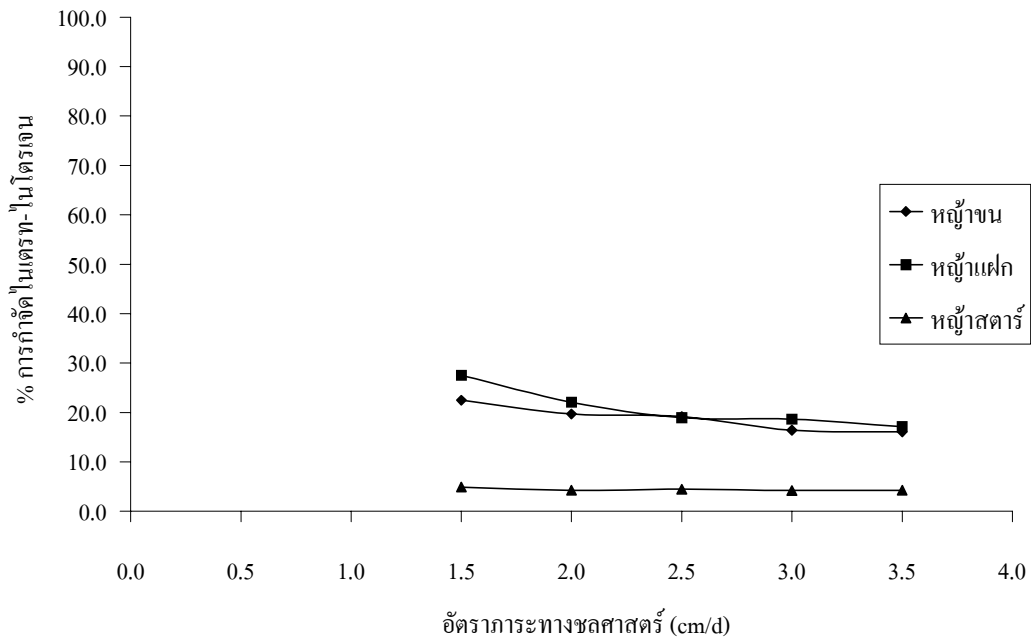


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง % การกำจัดฟอสฟอรัส กับอัตราภาระทางชลศาสตร์

หญ้าแฝกมีค่าเท่ากับร้อยละ 27.75 และของแปลงหญ้าสตาร์มีค่าเท่ากับร้อยละ 25.84 และจากผลการทดลองที่ได้พบว่าหญ้าขน, หญ้าแฝก และหญ้าสตาร์ เมื่อมีการทดสอบค่าความแตกต่างทางสถิติระหว่างหญ้าทั้ง 3 ชนิดที่อัตราภาระทางชลศาสตร์ต่างๆ โดยการทดสอบค่า t-Test พบว่ามีผลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ซึ่งการกำจัดฟอสฟอรัสสามารถกำจัดได้เล็กน้อยเพราะจุลินทรีย์ที่เจริญเติบโตในแปลงหญ้ามีการใช้ฟอสฟอรัสเพื่อการเจริญเติบโตและบางส่วนจะถูกเก็บไว้ในเซลล์

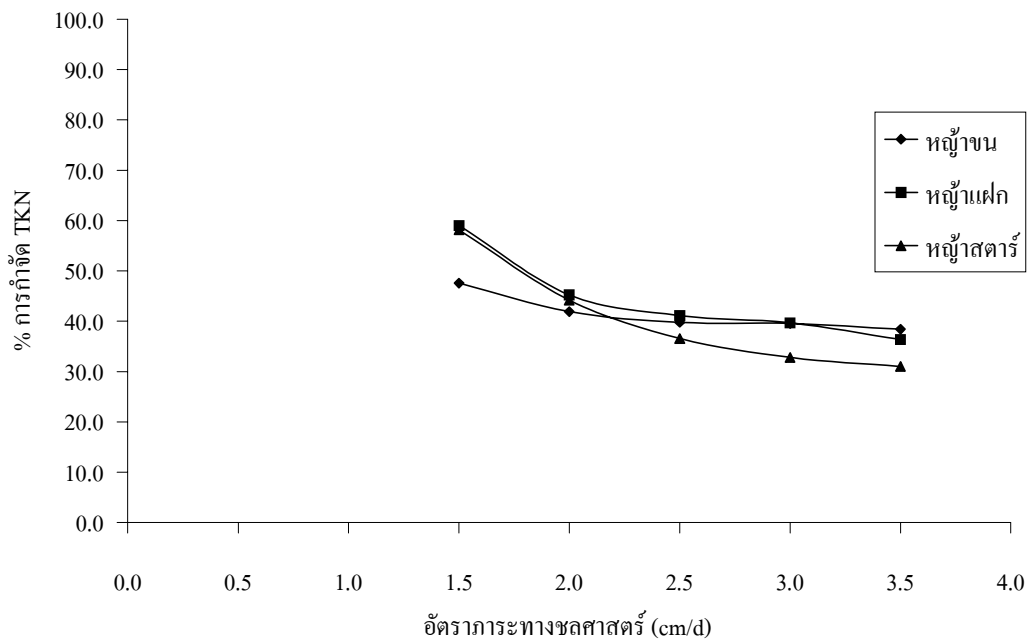
4.3.5 ประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรท-ไนโตรเจน และTKN

จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรท-ไนโตรเจน โดยการกรองด้วยหญ้าทั้ง 3 ชนิดคือ หญ้าขน, หญ้าแฝก และหญ้าสตาร์ ที่อัตราภาระทางชลศาสตร์ 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 และ 3.5 cm/d โดยการกรองด้วยหญ้าขนมีค่าเฉลี่ยเป็นร้อยละ 22.5, 19.7, 19.2, 16.4 และ 16.1 ตามลำดับ โดยการกรองด้วยหญ้าแฝกมีค่าเฉลี่ยเป็นร้อยละ 27.5, 22.1, 18.9, 18.6 และ 17.1 ตามลำดับ และโดยการกรองด้วยหญ้าสตาร์มีค่าเฉลี่ยเป็นร้อยละ 4.9, 4.2, 4.5, 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ แสดงในรูปที่ 4.6 เมื่อมีการทดสอบค่าความแตกต่างทางสถิติในการลดลงของไนเตรท-ไนโตรเจนที่อัตราภาระทางชลศาสตร์ต่างๆ กับไนเตรท-ไนโตรเจนเฉลี่ย โดยการทดสอบค่า t-Test พบว่ามีผลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังนั้นถือได้ว่าการลดลงของค่าไนเตรท-ไนโตรเจนของแปลงหญ้าขนมีค่าเท่ากับร้อยละ 18.8 ของหญ้าแปลงหญ้าแฝกมีค่าเท่า



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง % การกำจัดไนเตรท-ไนโตรเจน กับอัตราภาระทางชลศาสตร์

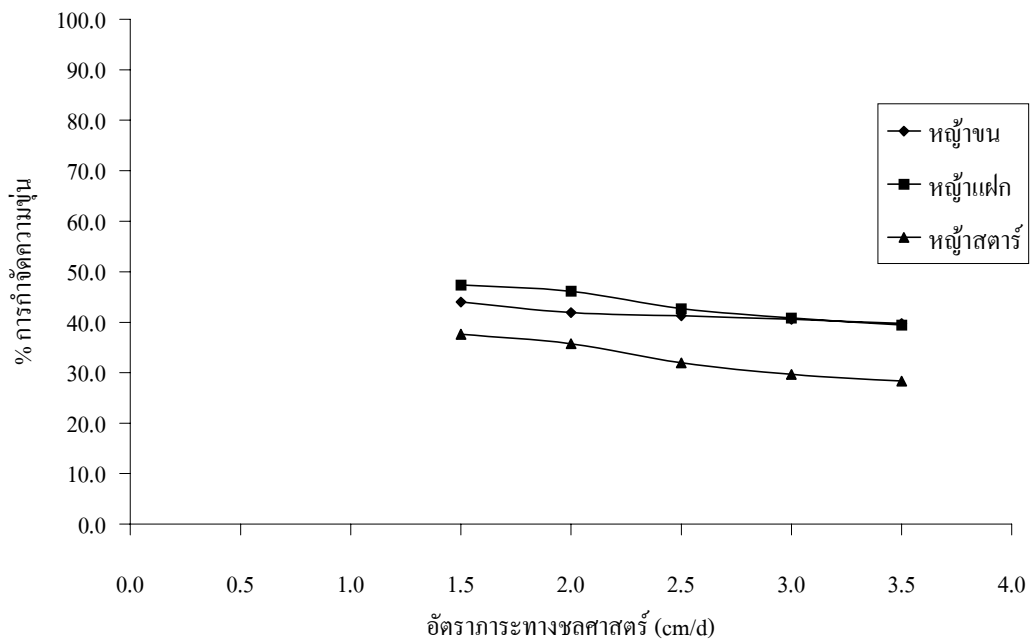
กับร้อยละ 20.9 และของแปลงหญ้าสตาโรมีค่าเท่ากับร้อยละ 4.4 และจากผลการทดลองที่ได้พบว่า หญ้าขนและหญ้าแฝกเมื่อมีการทดสอบค่าความแตกต่างทางสถิติระหว่างหญ้าทั้ง 2 ชนิดที่อัตราภาระทางชลศาสตร์ต่างๆ โดยการทดสอบค่า t-Test พบว่ามีผลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และประสิทธิภาพการกำจัด TKN โดยการกรองด้วยหญ้าขนมีค่าเฉลี่ยเป็นร้อยละ 47.6, 41.9, 39.8, 39.6 และ 38.4 ตามลำดับ โดยการกรองด้วยหญ้าแฝกมีค่าเฉลี่ยเป็นร้อยละ 59.0, 45.2, 41.1, 39.7 และ 36.4 ตามลำดับ และโดยการกรองด้วยหญ้าสตาโรมีค่าเฉลี่ยเป็นร้อยละ 58.2, 44.2, 36.6, 32.8 และ 31.0 มีค่าตามตารางที่ 1ข, 2ข และ 3ข (ภาคผนวก ข) แสดงในรูปที่ 4.7 เนื่องจากการเจริญเติบโตหรือขยายพันธุ์เซลล์ใหม่จะทำให้ลดปริมาณไนโตรเจนของน้ำทิ้งลง สารไนโตรเจนในน้ำทิ้งจะถูกย่อยสลายได้ และต้องการธาตุคาร์บอน ด้วยคือน้ำทิ้งที่มี COD สูงเพียงพอความต้องการไนโตรเจน โดยมี 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนที่ 1 เป็นกระบวนการไนตริฟิเคชัน (Nitrification) และขั้นตอนที่ 2 เป็นกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) กลไกที่ทำให้เกิดการลดไนเตรท-ไนโตรเจนคือ กระบวนการดีไนตริฟิเคชันโดยปฏิกิริยานี้จะเกิดในชั้นดินที่ไร้ออกซิเจน ซึ่งมีผลให้ไนเตรท-ไนโตรเจนถูกเปลี่ยนเป็นแก๊สไนโตรเจน และส่งผลต่ออัตราการลดลงของ TKN ในน้ำทิ้งได้ คือกลไกสำคัญในการลดค่า TKN คือการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันและปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันต่อเนื่องกันไป และถูกพืชนำไปใช้ประโยชน์ด้วย



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง % การกำจัด TKN กับอัตราภาระทางชีวศาสตร์

4.3.6 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น

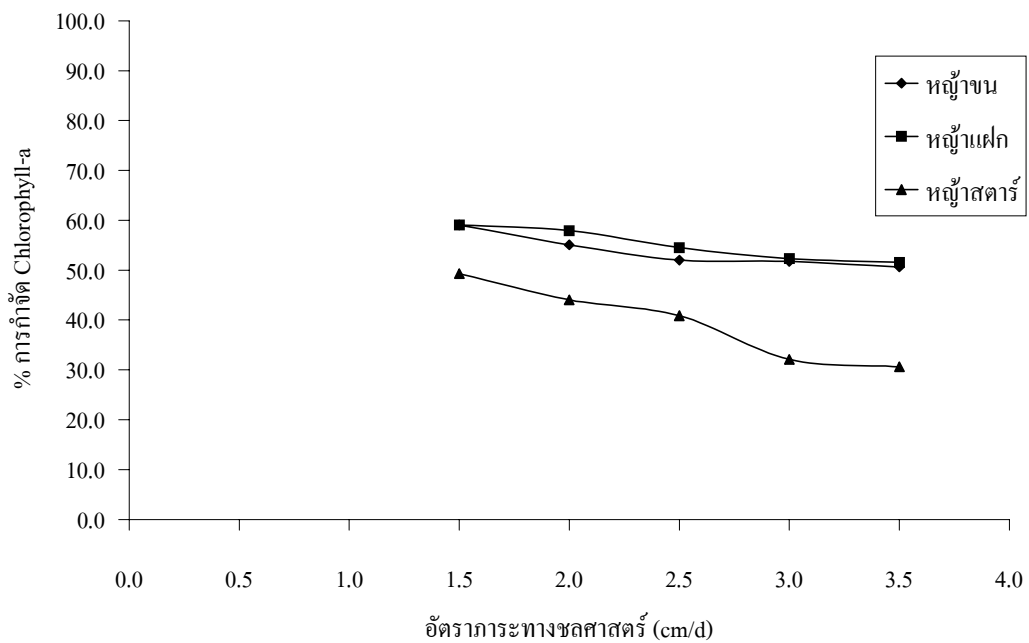
จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น โดยการกรองด้วยหญ้า ทั้ง 3 ชนิดคือ หญ้าขน, หญ้าแฝก และหญ้าสตาร์ ที่อัตราภาระทางชีวศาสตร์ 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 และ 3.5 cm/d โดยการกรองด้วยหญ้าขนมีค่าเฉลี่ยเป็นร้อยละ 44.0, 41.9, 41.3, 40.6 และ 39.8 ตามลำดับ โดยการกรองด้วยหญ้าแฝกมีค่าเฉลี่ยเป็นร้อยละ 47.4, 46.1, 42.7, 40.8 และ 39.4 ตามลำดับ และโดยการกรองด้วยหญ้าสตาร์มีค่าเฉลี่ยเป็นร้อยละ 37.6, 35.7, 32.0, 29.7 และ 28.4 ตามลำดับ แสดงในรูปที่ 4.8 จากการทดลองพบว่าที่อัตราภาระทางชีวศาสตร์ที่มีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น เมื่อมีการทดสอบค่าความแตกต่างทางสถิติในการลดลงของค่าความขุ่น ที่อัตราภาระทางชีวศาสตร์ต่างๆ กับค่าความขุ่นเฉลี่ย มีค่าตามตารางที่ 1ข, 2ข และ 3ข (ภาคผนวก ข) โดยการทดสอบค่า t-Test พบว่ามีผลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังนั้นถือได้ว่าการลดลงของค่าความขุ่นของแปลงหญ้าขนมีค่าเท่ากับร้อยละ 41.5 ของแปลงหญ้าแฝกมีค่าเท่ากับร้อยละ 43.3 และของแปลงหญ้าสตาร์มีค่าเท่ากับร้อยละ 32.7 และจากผลการทดลองที่ได้พบว่าหญ้าขนและหญ้าแฝก เมื่อมีการทดสอบค่าความแตกต่างทางสถิติระหว่างหญ้าทั้ง 2 ชนิดที่อัตราภาระทางชีวศาสตร์ต่างๆ โดยการทดสอบค่า t-Test พบว่ามีผลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ซึ่งการกำจัดความขุ่นมีกลไกหลักคือ การตกตะกอนของของแข็งและการกรองผ่านตัวกลางซึ่งคือดินและรากของหญ้า



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง % การกำจัดความชุ่มชื้น กับอัตราการทางชลศาสตร์

4.3.7 ประสิทธิภาพการกำจัด Chlorophyll-a

จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการกำจัด Chlorophyll-a โดยการกรองด้วยหญ้า ทั้ง 3 ชนิดคือ หญ้าขน, หญ้าแฝก และหญ้าสตาร์ ที่อัตราการทางชลศาสตร์ 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 และ 3.5 cm/d โดยการกรองด้วยหญ้าขนมีค่าเฉลี่ยเป็นร้อยละ 59.05, 55.09, 52.03, 51.76 และ 50.64 ตามลำดับ โดยการกรองด้วยหญ้าแฝกมีค่าเฉลี่ยเป็นร้อยละ 59.06, 57.94, 54.53, 52.33 และ 51.57 ตามลำดับ และโดยการกรองด้วยหญ้าสตาร์มีค่าเฉลี่ยเป็นร้อยละ 49.28, 44.06, 40.88, 32.10 และ 30.63 ตามลำดับ แสดงในรูปที่ 4.9 จากการทดลองพบว่าที่อัตราการทางชลศาสตร์ที่มีประสิทธิภาพการกำจัด Chlorophyll-a เมื่อมีการทดสอบค่าความแตกต่างทางสถิติในการลดลงของค่า Chlorophyll-a ที่อัตราการทางชลศาสตร์ต่างๆ กับค่า Chlorophyll-a เฉลี่ย มีค่าตามตารางที่ 1ข, 2ข และ 3ข (ภาคผนวก ข) โดยการทดสอบค่า t-Test พบว่ามีผลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังนั้นถือได้ว่าการลดลงของค่าของแข็งแขวนลอยของแปลงหญ้าขนมีค่าเท่ากับร้อยละ 53.71 ของแปลงหญ้าแฝกมีค่าเท่ากับร้อยละ 55.09 และของแปลงหญ้าสตาร์มีค่าเท่ากับร้อยละ 39.39 จากผลการทดลองที่ได้พบว่าหญ้าขนและหญ้าแฝก เมื่อมีการทดสอบค่าความแตกต่างทางสถิติระหว่างหญ้าทั้ง 2 ชนิดที่อัตราการทางชลศาสตร์ต่างๆ โดยการทดสอบค่า t-Test พบว่ามีผลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ซึ่งการกำจัด



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง % การกักจับ Chlorophyll-a กับอัตราการทางชลศาสตร์

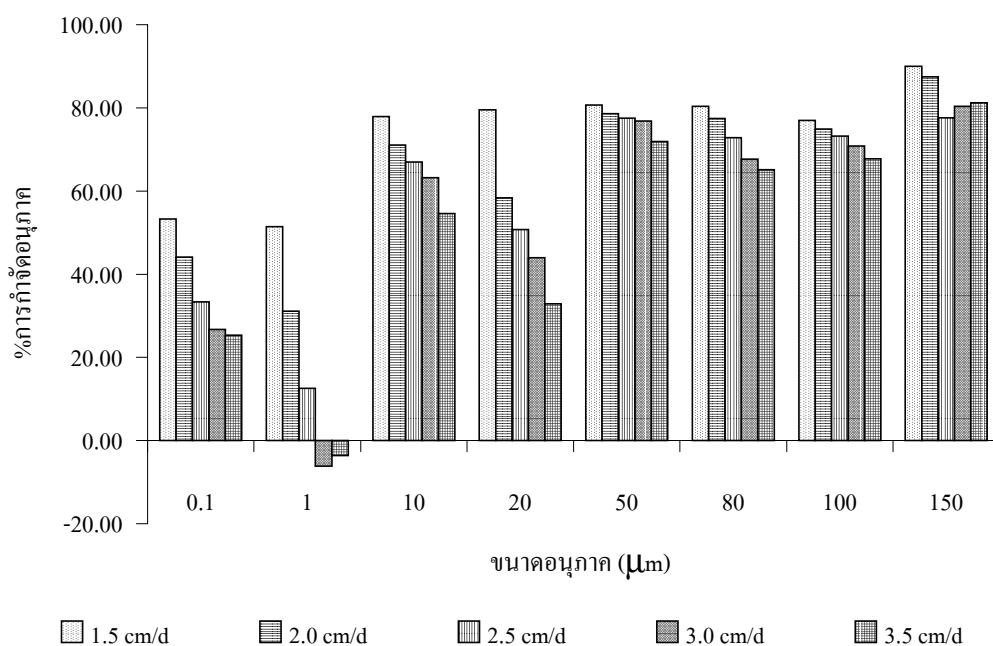
Chlorophyll-a มีกลไกหลักคือ การตกตะกอนของของแข็งและการกรองผ่านตัวกลางซึ่งคือดินและรากของหญ้า

ตารางที่ 4.2 ประสิทธิภาพการกำจัดค่าต่าง ๆ ของการกรองด้วยหญ้า

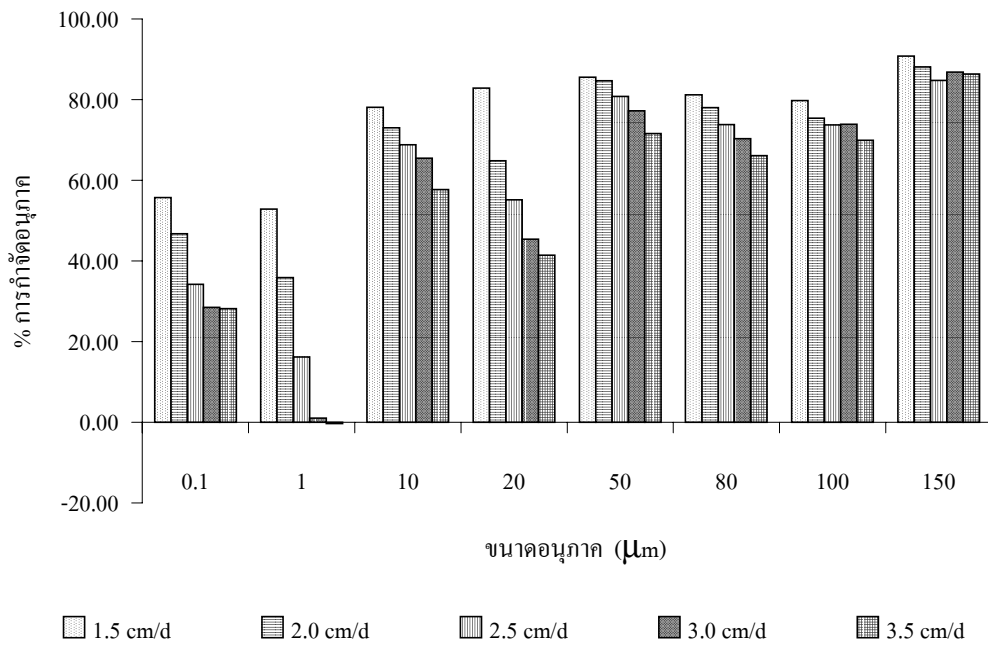
พารามิเตอร์	ประสิทธิภาพการกำจัดค่าต่าง ๆ (%)		
	หญ้าขน	หญ้าแฝก	หญ้าสตาร์
Total COD	13.23-75.52	15.81-75.32	13.20-63.60
Soluble COD	25.14-78.02	27.37-75.71	25.11-68.59
TSS	33.8-44.4	39.8-47.2	26.3-33.0
TP	25.1-28.6	25.3-29.6	22.1-30.0
NO ₃ -N	16.1-22.5	17.1-27.5	4.2-4.9
TKN	38.4-47.6	36.4-59.0	31.0-58.2
Turbidity	39.8-44.0	39.4-47.4	28.4-37.6
Chlorophyll-a	50.6-59.1	51.6-59.1	30.6-49.3

4.4 ประสิทธิภาพการกำจัดอนุภาค

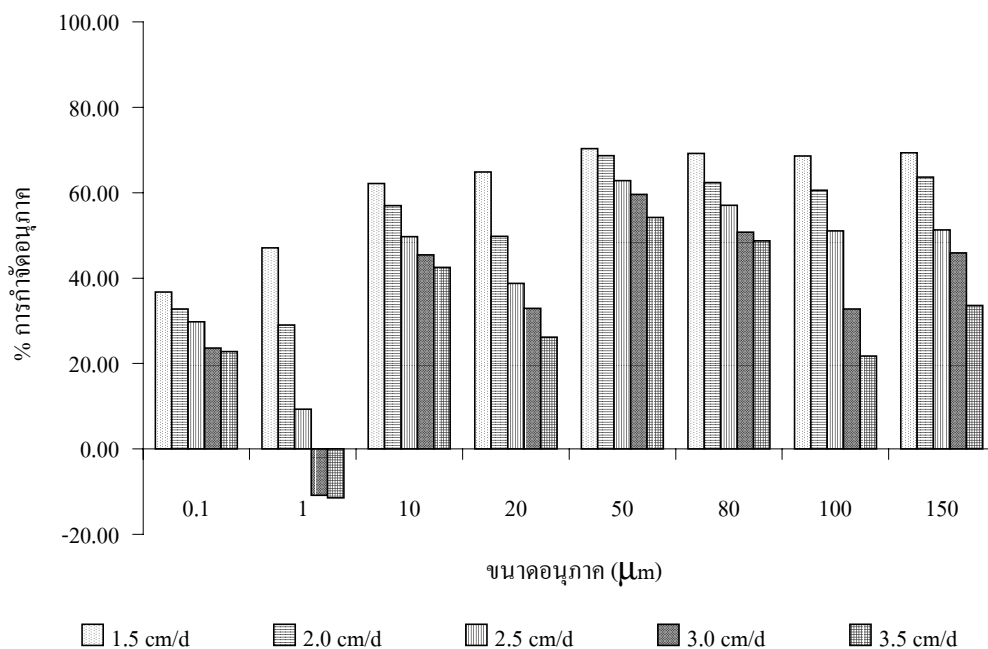
จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดอนุภาค โดยการกรองด้วยหญ้า ทั้ง 3 ชนิด คือ หญ้าขน, หญ้าแฝก และหญ้าสตาร์ ที่อัตราการทางชลศาสตร์ 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 และ 3.5 cm/d จากการทดลองพบว่าที่อัตราการทางชลศาสตร์ที่มีประสิทธิภาพการกำจัดอนุภาคที่ดีที่สุด คือเมื่อมีอัตราการบรรทุกเข้าในแปลงหญ้าน้อยที่สุด และประสิทธิภาพการกำจัดอนุภาคจะน้อยลงถ้ามีอัตราการทางชลศาสตร์มากขึ้น ดังนั้นประสิทธิภาพการกำจัดอนุภาคจะแปรผกผันกับอัตราการทางชลศาสตร์ และจากผลการทดลองที่ได้ พบว่าหญ้าขนและหญ้าแฝกเมื่อมีการทดสอบค่าความแตกต่างทางสถิติระหว่างหญ้าทั้ง 2 ชนิดที่อัตราการทางชลศาสตร์ต่างๆ โดยการทดสอบค่า t-Test พบว่ามีผลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 มีค่าตามตารางที่ 1 ง, 2ง และ 3ง (ภาคผนวก ง) แสดงในรูปที่ 4.10, 4.11 และ 4.12 ซึ่งการกำจัดอนุภาค มีกลไกหลักคือ การตกตะกอน, การกรอง, การเบียดเข้าหาเม็ดดิน และการแพร่กระจาย



รูปที่ 4.10 ประสิทธิภาพการกำจัดอนุภาคของน้ำที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งโดยการกรองด้วยหญ้าขนที่อัตราการทางชลศาสตร์ต่างๆ



รูปที่ 4.11 ประสิทธิภาพการกำจัดอนุภาคของน้ำที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งโดยการกรองด้วย ใยน้ำแผลกที่อัตราการไหลทางชลศาสตร์ต่าง ๆ



รูปที่ 4.12 ประสิทธิภาพการกำจัดอนุภาคของน้ำที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งโดยการกรองด้วย ใยน้ำสตาร์ที่อัตราการไหลทางชลศาสตร์ต่าง ๆ

ตารางที่ 4.3 ประสิทธิภาพการกรองอนุภาค

ชนิดหญ้า	ประสิทธิภาพการกรองขนาดอนุภาค (%)							
	0.1	1	10	20	50	80	100	150
หญ้ายาง	25.3-	-3.60-	54.58-	32.86-	71.95-	65.08-	67.72-	81.21-
	53.30	51.42	77.90	79.50	80.70	80.38	76.97	90.00
หญ้าแฝก	28.17-	-0.27-	57.76-	41.43-	71.61-	66.17-	69.95-	86.39-
	55.72	52.87	78.09	82.88	85.63	81.18	79.81	90.82
หญ้าสตาร์	22.82-	-11.50-	42.53-	26.15-	54.21-	48.74-	21.72-	33.58-
	36.77	47.06	62.17	64.85	70.33	69.26	68.59	69.40

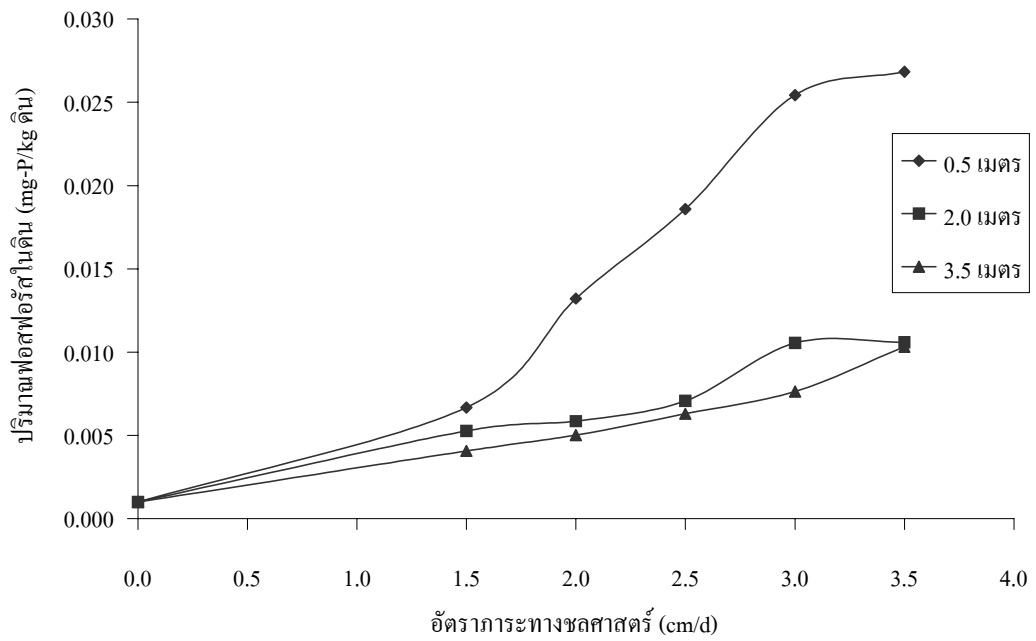
4.5 สารอินทรีย์ที่สะสมในดิน

4.5.1 ปริมาณฟอสฟอรัส

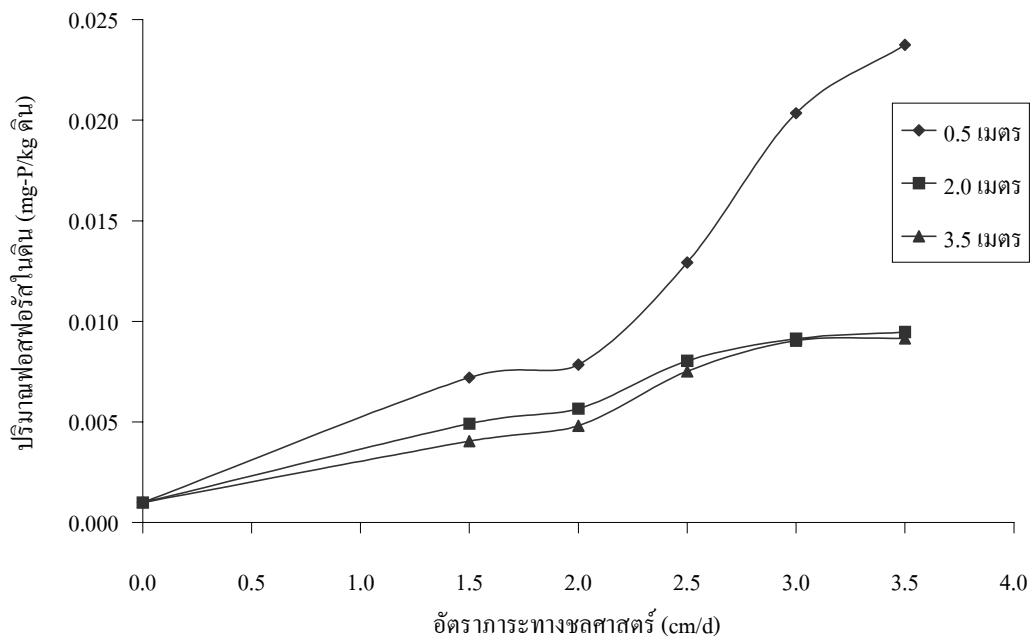
ปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในดินของแปลงทดลองหญ้ายาง, หญ้าแฝก และหญ้าสตาร์ ที่ระยะ 0.5 เมตร มีค่าเท่ากับ 6.7×10^{-3} - 26.8×10^{-3} mg-P/kg ดิน, 7.2×10^{-3} - 23.8×10^{-3} mg-P/kg และ 6.5×10^{-3} - 23.0×10^{-3} mg-P/kg ตามลำดับ ที่ระยะ 2.0 เมตร มีค่าเท่ากับ 5.3×10^{-3} - 10.6×10^{-3} mg-P/kg, 5.03×10^{-3} - 9.5×10^{-3} mg-P/kg และ 3.9×10^{-3} - 9.4×10^{-3} mg-P/kg ตามลำดับ และที่ระยะ 3.5 เมตร มีค่าเท่ากับ 4.1×10^{-3} - 10.3×10^{-3} mg-P/kg, 4.0×10^{-3} - 9.2×10^{-3} mg-P/kg และ 3.1×10^{-3} - 9.4×10^{-3} mg-P/kg ดังตารางที่ 1จ (ภาคผนวก จ) และรูปที่ 4.13-4.15 ซึ่งที่ระยะ 0.5 เมตร มีปริมาณฟอสฟอรัสสะสมอยู่ในดินมากกว่าที่ระยะ 3.5 เมตร และเมื่อที่อัตราภาระทางชลศาสตร์มากขึ้นปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมอยู่ในดินมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งจะทำให้ดินมีช่องว่างน้อยลงและเกิดการอุดตันได้ การสะสมฟอสฟอรัสในดินเกิดจากการตกตะกอน, การกรอง, การสะสมซากพืชและแบคทีเรีย

4.5.2 ปริมาณไนโตรเจน

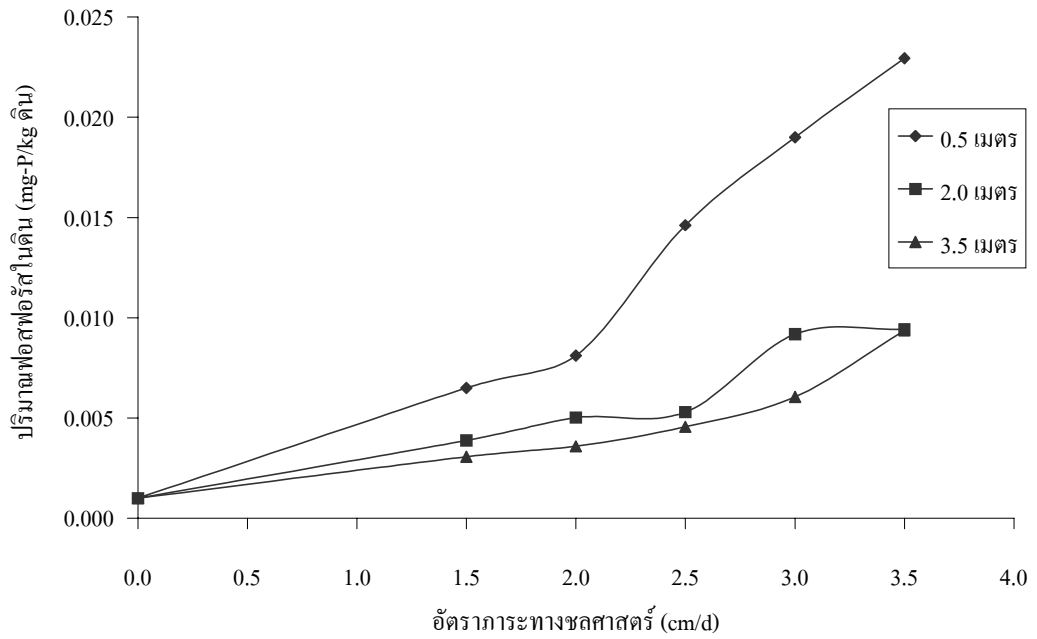
ปริมาณไนโตรเจนที่สะสมในดินของแปลงทดลองหญ้ายาง, หญ้าแฝก และหญ้าสตาร์ ที่ระยะ 0.5 เมตร มีค่าเท่ากับ 1.02-1.10 mg-N/kg ดิน, 0.56-1.03 mg-N/kg และ 0.81-1.30 mg-N/kg ตามลำดับ ที่ระยะ 2.0 เมตร มีค่าเท่ากับ 1.02-1.07 mg-N/kg, 0.47-0.92 mg-N/kg และ 0.60-1.26 mg-N/kg ตามลำดับ และที่ระยะ 3.5 เมตร มีค่าเท่ากับ 0.98-1.05 mg-N/kg, 0.39-0.86 mg-N/kg และ 0.60-1.10 mg-N/kg ตามลำดับ ดังตารางที่ 1จ (ภาคผนวก จ) และรูปที่ 4.16-4.18 ซึ่งที่ระยะ 0.5 เมตร มีปริมาณไนโตรเจนสะสมอยู่ในดินมากกว่าที่ระยะ 3.5 เมตร เพียงเล็กน้อย และเมื่อที่อัตราภาระทางชลศาสตร์มากขึ้นปริมาณไนโตรเจนที่สะสมอยู่ในดินมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งการสะสมไนโตรเจนในดินเกิดจากการตกตะกอน, การกรองและพืชไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ทั้งหมด



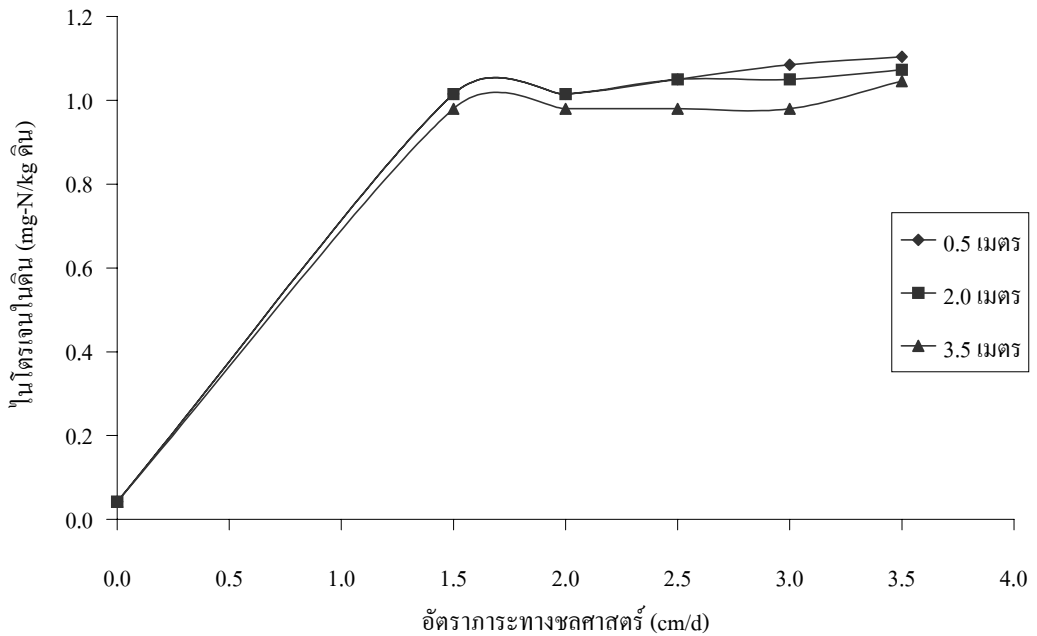
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟอสฟอรัสในดิน กับอัตราภาระทางชลศาสตร์ ของแปลงทดลองหญ้าขน



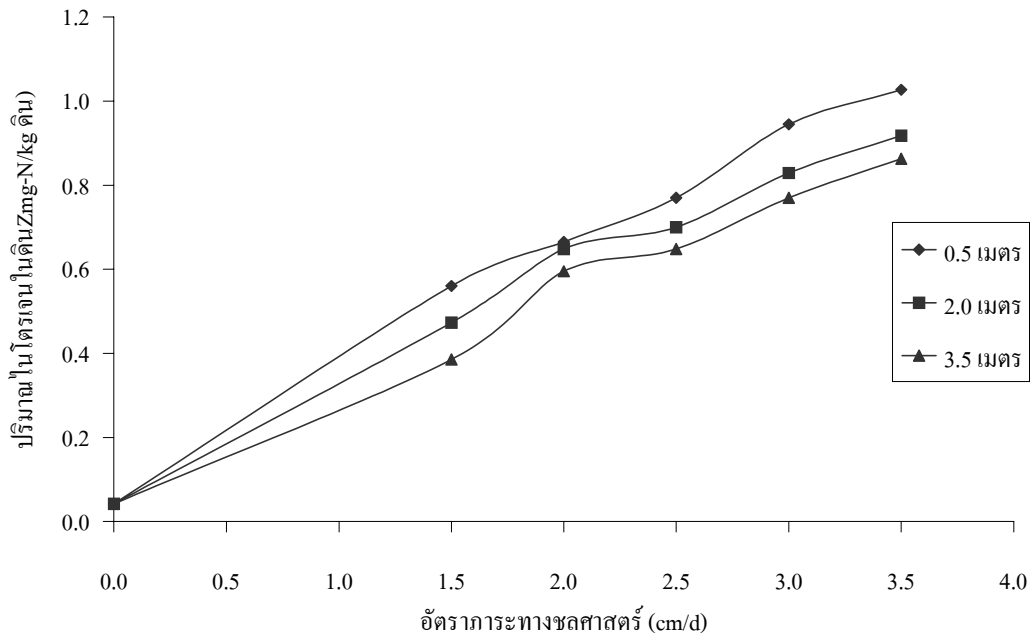
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟอสฟอรัสในดิน กับอัตราภาระทางชลศาสตร์ ของแปลงทดลองหญ้าแฝก



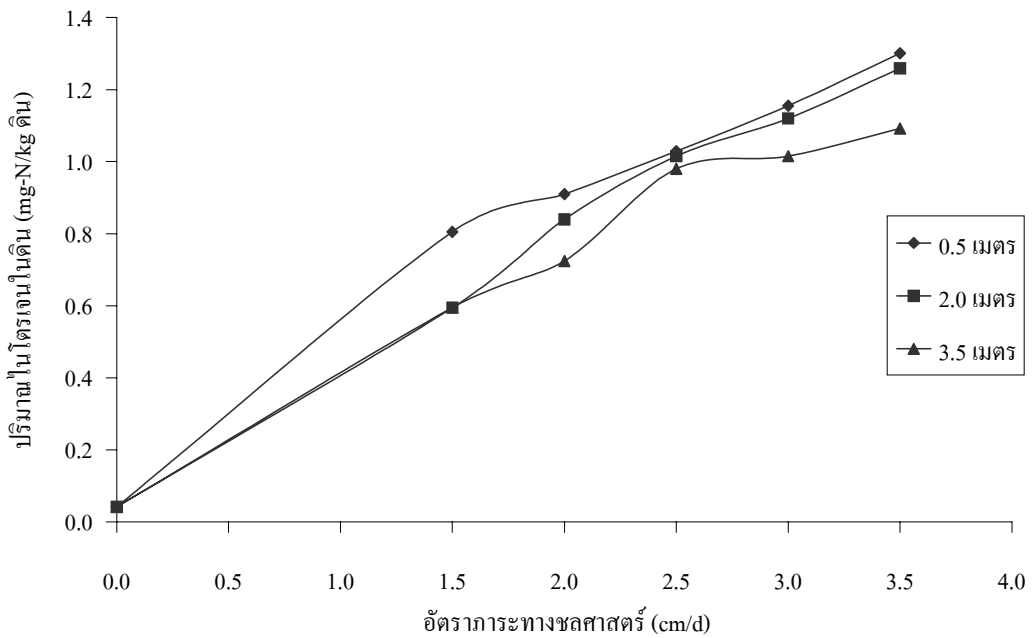
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟอสฟอรัสในดิน กับอัตราการชะล้างของแปลงทดลองหญ้าสตาร์



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนโตรเจนในดิน กับอัตราการชะล้างของแปลงทดลองหญ้าขน



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนโตรเจนในดิน กับอัตราการชะล้างของแปลงทดลองหญ้าแฝก



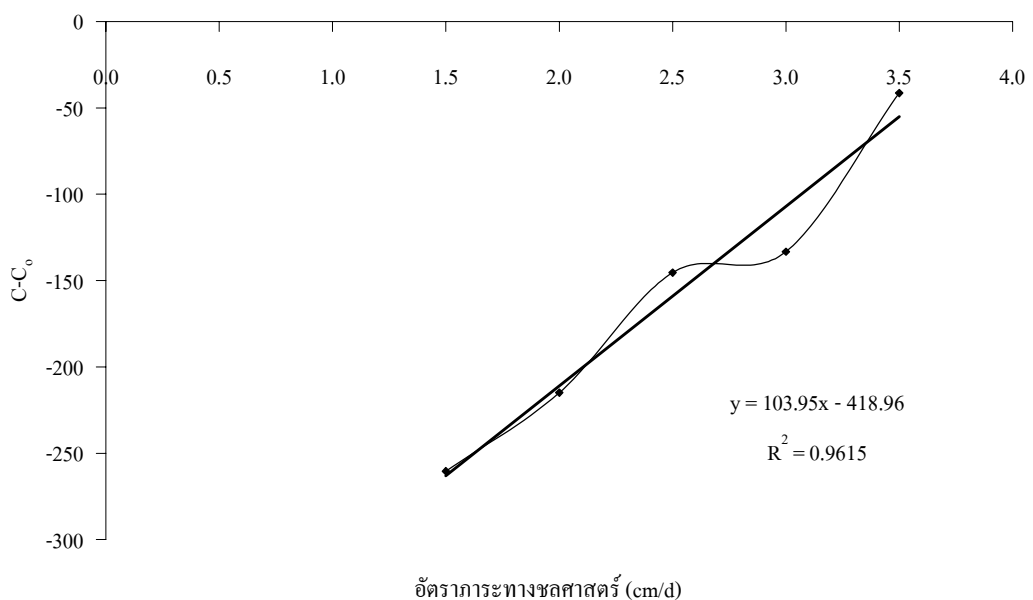
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนโตรเจนในดิน กับอัตราการชะล้างของแปลงทดลองหญ้าสตาร์

4.6 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การกำจัด COD

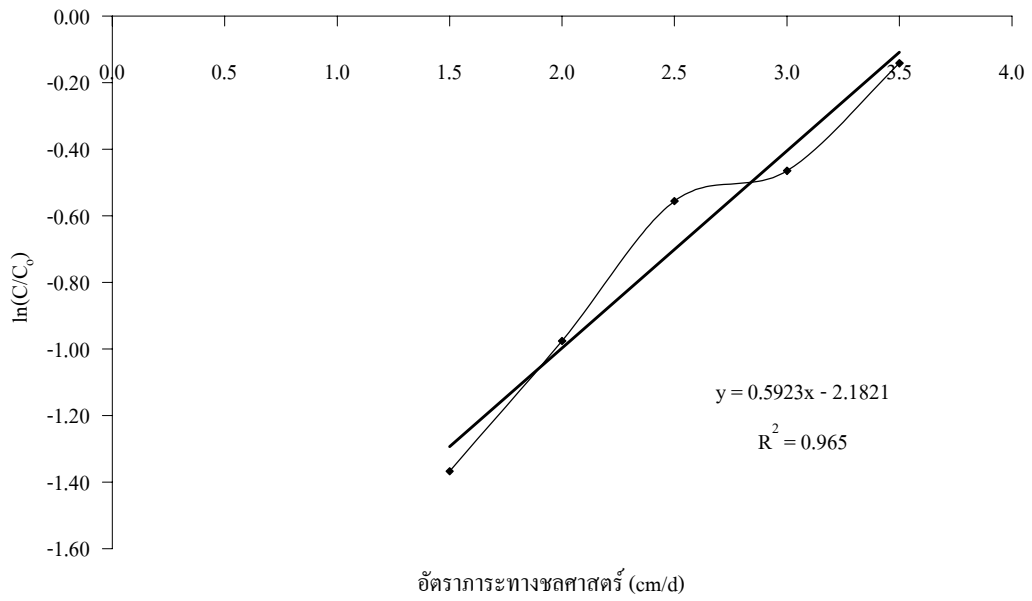
การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การกำจัด COD ของระบบน้ำไหลนอง ได้ทำการศึกษาอัตราอันดับการเกิดปฏิกิริยา โดยทำการทดสอบอัตราการเกิดปฏิกิริยาศูนย์, ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง และปฏิกิริยาอันดับสอง ของแปลงทดลองหญ้าขน, หญ้าแฝก และหญ้าสตาร์ ด้วยสถิติสมการถดถอยเชิงเส้นโดยโปรแกรมสำเร็จรูป SPSS แสดงตามตารางที่ 4.4-4.7 และรูปที่ 4.19-4.27

ตารางที่ 4.4 การคำนวณหาลำดับของปฏิกิริยาของการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งโดยการกรองด้วยหญ้าขน

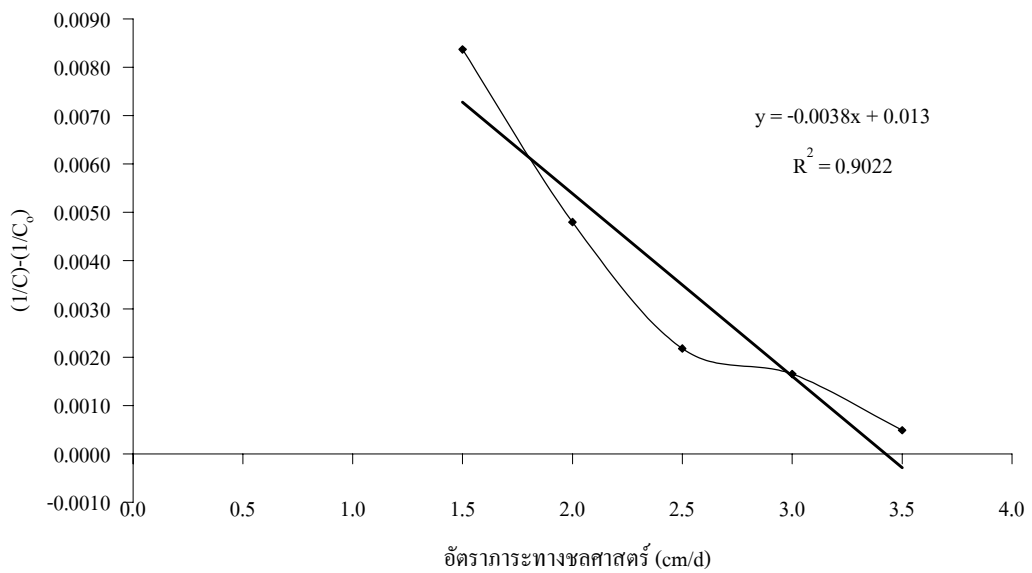
อัตราการทางชลศาสตร์ (cm/d)	CODน้ำเข้า, C_0 (mg/L)	CODน้ำออก, C (mg/L)	ปฏิกิริยาอันดับศูนย์ $C-C_0$	ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง $\ln(C/C_0)$	ปฏิกิริยาอันดับสอง $(1/C)-(1/C_0)$
1.5	349.45	89.04	-260.41	-1.3673	0.0084
2.0	344.89	129.94	-214.95	-0.9762	0.0048
2.5	341.09	195.68	-145.41	-0.5557	0.0022
3.0	358.27	225.00	-133.27	-0.4652	0.0017
3.5	312.64	271.27	-41.37	-0.1419	0.0005



รูปที่ 4.19 ปฏิกิริยาอันดับศูนย์การปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งโดยการกรองด้วยหญ้าขน



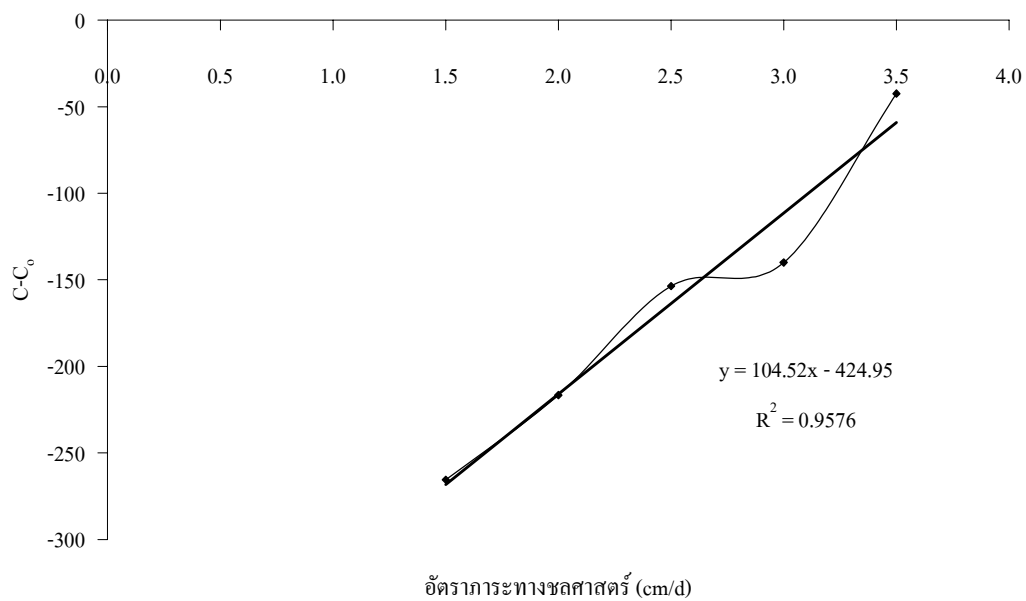
รูปที่ 4.20 ปฏิกริยาอันดับหนึ่งการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งโดยการกรองด้วยหญ้าขน



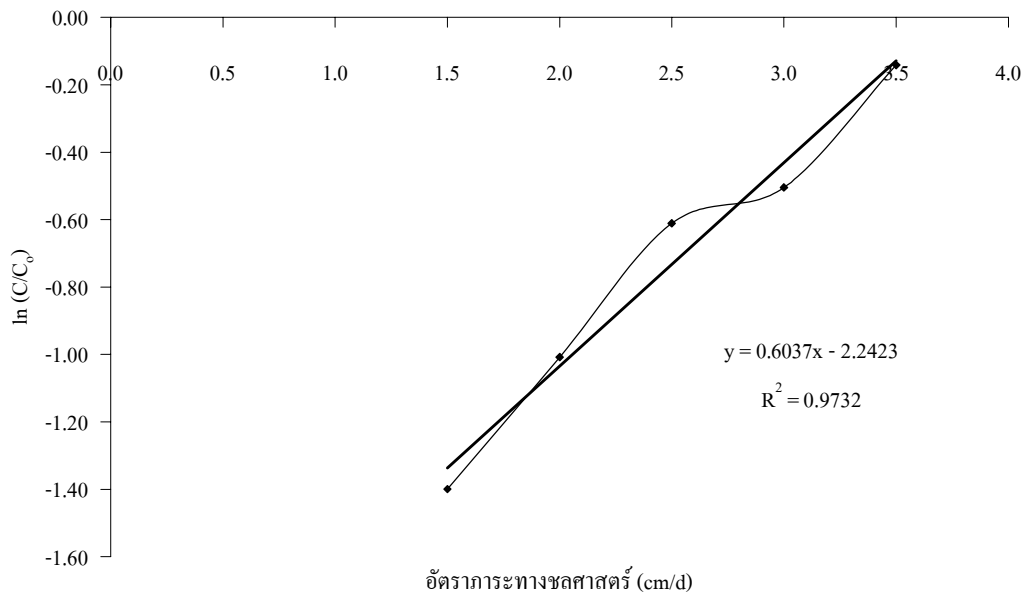
รูปที่ 4.21 ปฏิกริยาอันดับสองการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งโดยการกรองด้วยหญ้าขน

ตารางที่ 4.5 การคำนวณหาลำดับของปฏิกิริยาของการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งโดยการกรองด้วยหญ้าแฝก

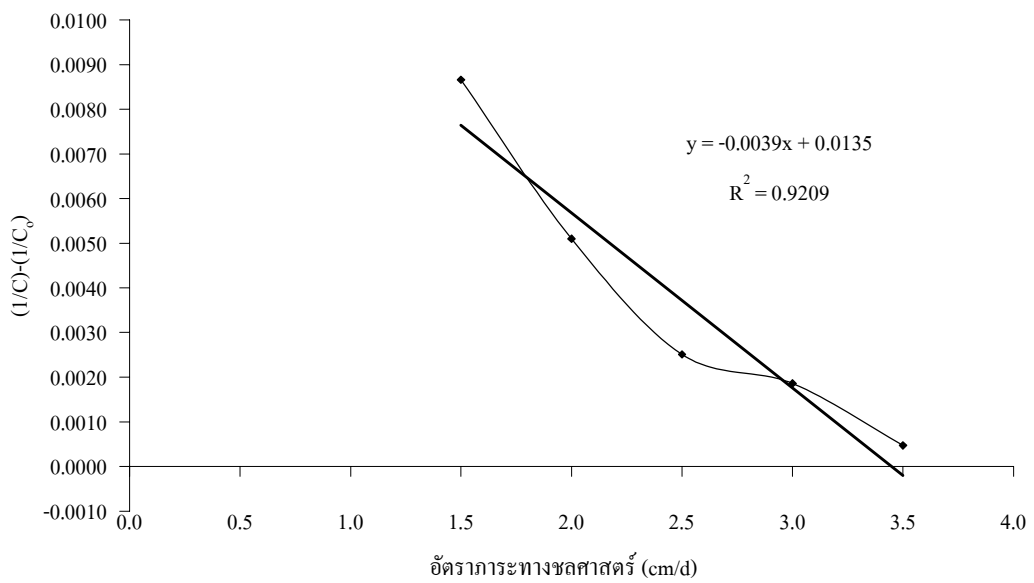
อัตราการทางชลศาสตร์ (cm/d)	CODน้ำเข้า, C_0 (mg/L)	CODน้ำออก, C (mg/L)	ปฏิกิริยาอันดับศูนย์ $C-C_0$	ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง $\ln(C/C_0)$	ปฏิกิริยาอันดับสอง $(1/C)-(1/C_0)$
1.5	352.45	86.98	-265.47	-1.3992	0.0087
2.0	341.09	124.47	-216.62	-1.0081	0.0051
2.5	335.95	182.32	-153.63	-0.6112	0.0025
3.0	353.27	213.21	-140.06	-0.5050	0.0019
3.5	321.58	279.14	-42.44	-0.1415	0.0005



รูปที่ 4.22 ปฏิกิริยาอันดับศูนย์การปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งโดยการกรองด้วยหญ้าแฝก



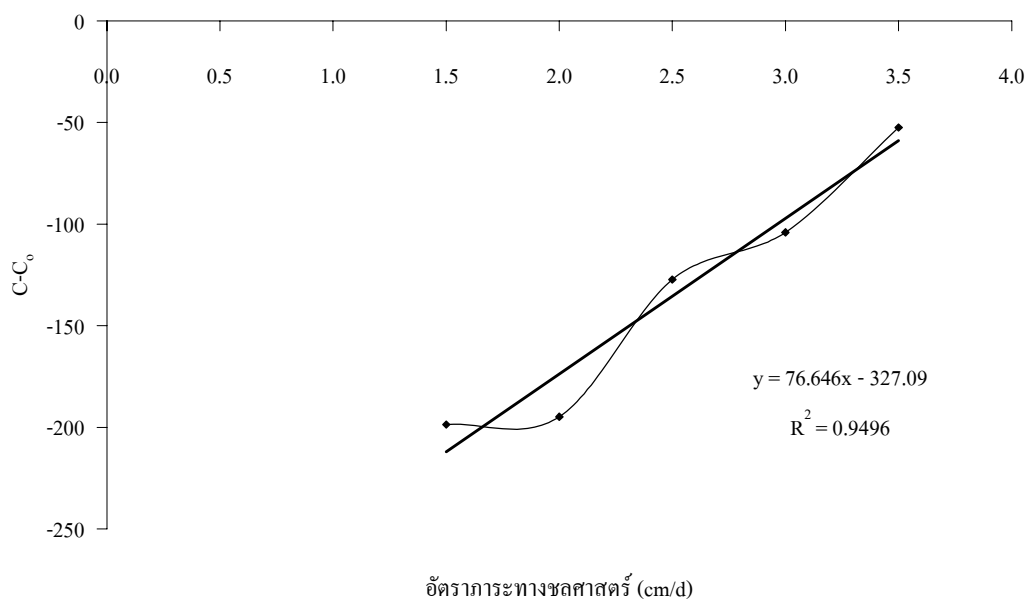
รูปที่ 4.23 ปฏิกริยาอันดับหนึ่งการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งโดยการกรองด้วยหุ้ําแฝก



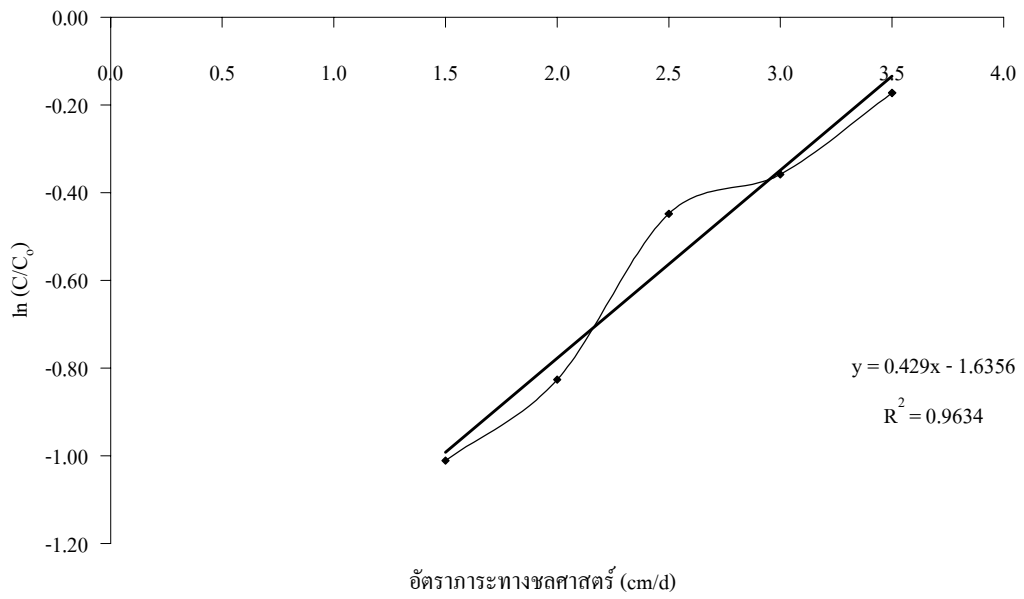
รูปที่ 4.24 ปฏิกริยาอันดับสองการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งโดยการกรองด้วยหุ้ําแฝก

ตารางที่ 4.6 การคำนวณหาลำดับของปฏิกิริยาของการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งโดยการกรองด้วยหญ้า
สตาร์

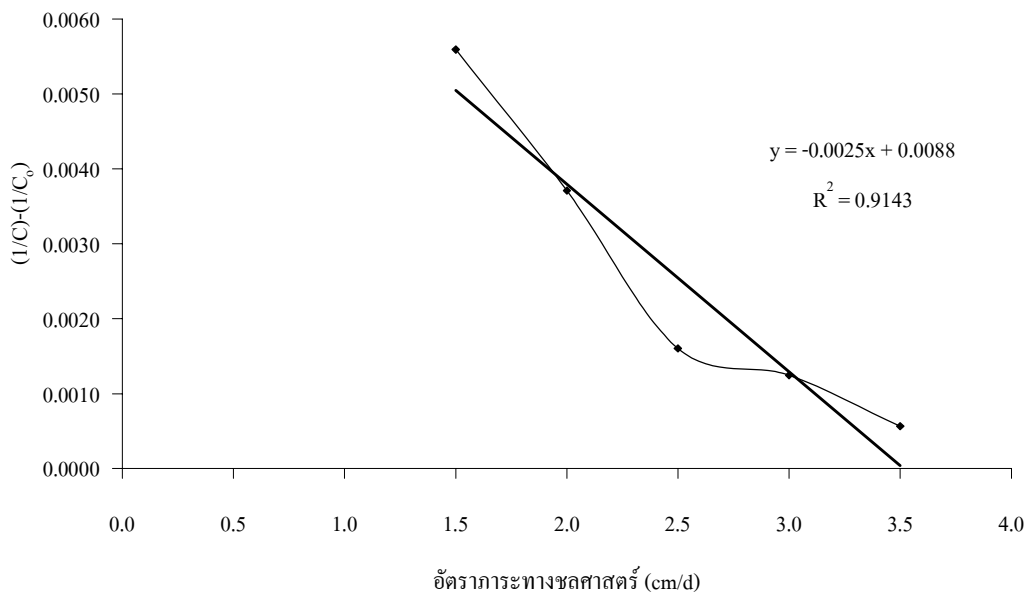
อัตราการ ทางชลศาสตร์ (cm/d)	CODน้ำเข้า, C_0 (mg/L)	CODน้ำออก, C (mg/L)	ปฏิกิริยาอันดับ ศูนย์ $C-C_0$	ปฏิกิริยาอันดับ หนึ่ง $\ln(C/C_0)$	ปฏิกิริยาอันดับ สอง $(1/C)-(1/C_0)$
1.5	312.40	113.72	-198.68	-1.0105	0.0056
2.0	346.51	151.65	-194.86	-0.8263	0.0037
2.5	352.49	225.19	-127.30	-0.4481	0.0016
3.0	345.72	241.67	-104.05	-0.3581	0.0012
3.5	331.78	279.31	-52.47	-0.1721	0.0006



รูปที่ 4.25 ปฏิกิริยาอันดับศูนย์การปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งโดยการกรองด้วยหญ้าสตาร์



รูปที่ 4.26 ปฏิกริยาอันดับหนึ่งการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งโดยการกรองด้วยหญาสาร



รูปที่ 4.27 ปฏิกริยาอันดับสองการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งโดยการกรองด้วยหญาสาร

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบความถดถอยเชิงเส้น

ชนิดหญ้า	อันดับปฏิกิริยา	การทดสอบ β_0		การทดสอบ β_1	
		p-value	ค่าคงที่ β_0	p-value	ค่าคงที่ β_1
หญ้าขน	ปฏิกิริยาอันดับศูนย์	0.0310	-418.9600	0.0680	103.9500
	ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง	0.0030	-2.1821	0.0270	0.5923
	ปฏิกิริยาอันดับสอง	0.0560	0.0130	0.8140	-0.0038
หญ้าแฝก	ปฏิกิริยาอันดับศูนย์	0.0350	-424.95	0.0720	104.5200
	ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง	0.0020	-2.2423	0.0190	0.6037
	ปฏิกิริยาอันดับสอง	0.0520	0.0135	0.7620	-0.0039
หญ้าสตาร์	ปฏิกิริยาอันดับศูนย์	0.0470	-327.0900	0.0830	76.6460
	ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง	0.0030	-1.6356	0.0290	0.4290
	ปฏิกิริยาอันดับสอง	0.0510	0.0088	0.7510	-0.0025

จากผลการศึกษาอันดับปฏิกิริยาสามารถสรุปได้ว่าสมการการกำจัด COD ของการกระจายน้ำบนดิน ระบบน้ำไหลนอง เป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง เนื่องจากมีค่า p-value ไม่เกิน 0.05 ซึ่งปฏิเสธสมมติฐาน H_0 ปฏิกิริยาอันดับศูนย์และปฏิกิริยาอันดับสองมีค่า p-value มากกว่า 0.05 ซึ่งยอมรับสมมติฐาน H_0 คือ Y และ X ไม่มีความสัมพันธ์กันในรูปเชิงเส้น และเมื่อพิจารณา p-value ของการทดสอบ β_0 (ส่วนการตัดแกน Y) พบว่า p-value ไม่เกิน 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 แสดงว่าสมการเชิงเส้นมีส่วนตัดแกน Y (ไม่ใช่ที่จุด $Y = 0$) ซึ่งได้ค่า k ของแปลงทดลองหญ้าขน, หญ้าแฝก และหญ้าสตาร์ เท่ากับ 0.5923, 0.6037 และ 0.4290 ต่อวัน ตามลำดับ และสามารถสรุปสมการดังต่อไปนี้

สมการการกำจัด COD ของการปรับปรุงคุณภาพน้ำแบบกระจายน้ำบนดินโดยระบบน้ำไหลนองของแปลงทดลองหญ้าขน คือ

$$\ln \left(\frac{C}{C_0} \right) = -2.1821 + 0.5923t \quad : r^2 = 0.9650 \quad (4.1)$$

โดยที่ C = ค่า Total COD น้ำทิ้งที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ (mg/L)
 C_0 = ค่า Total COD น้ำทิ้งโรงงานเป้งมันสำปะหลัง (mg/L)
 t = อัตราการทางชลศาสตร์ (cm/d)

สมการการกำจัด COD ของการปรับปรุงคุณภาพน้ำแบบกระจายน้ำบนดินโดยระบบน้ำไหลนองของแปลงทดลองหญ้าแฝก คือ

$$\ln\left(\frac{C}{C_0}\right) = -2.2423 + 0.6037t \quad : r^2 = 0.9732 \quad (4.2)$$

สมการการกำจัด COD ของการปรับปรุงคุณภาพน้ำแบบกระจายน้ำบนดินโดยระบบน้ำไหลนองของแปลงทดลองหญ้าสตาร์ คือ

$$\ln\left(\frac{C}{C_0}\right) = -1.6356 + 0.4290t \quad : r^2 = 0.9634 \quad (4.3)$$

4.7 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การกรองอนุภาค

Weber (1972) ได้กล่าวว่าการไหลทางกายภาพมีประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาครวมตั้งสมการที่ 2.5

$$\frac{n}{n_0} = \exp\left[\frac{-3f\eta_T(1-\varepsilon)H}{4R}\right] \quad (2.5)$$

โดยที่ n_0 = จำนวนอนุภาคก่อนการปรับปรุงคุณภาพน้ำต่อปริมาตร
 n = จำนวนอนุภาคที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพน้ำต่อปริมาตร
 f = ค่าคงที่ของการกรองที่อนุภาคขนาดต่าง ๆ (collision factor)
 H = ความหนาของชั้นดิน (เมตร)
 ε = ความพรุนของชั้นดิน
 R = ขนาดอนุภาค (μm)

ซึ่ง f ของหญ้าทั้ง 3 ชนิด คือค่าความชัน แสดงดังตารางที่ 4.8

4.8 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอัตราการเจริญเติบโตของหญ้า

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่ให้กับหญ้าชนิดต่าง ๆ พบว่าสามารถอธิบายได้ด้วย Logistic Equation คือ

$$\frac{dy(t)}{dt} = ky(t)(m - y(t)) \quad (2.9)$$

โดยที่ $\frac{dy(t)}{dt}$ = อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณหญ้า (น้ำหนักต่อเวลา)
 k = อัตราการเจริญเติบโต (ต่อเวลา)
 $y(t)$ = ปริมาณหญ้าที่มีการให้น้ำในปริมาณต่าง ๆ (น้ำหนัก)

ตารางที่ 4.8 การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งโดยการกรองด้วยหญ้า

ชนิดหญ้า	ค่าสัมประสิทธิ์	ขนาดอนุภาค (μm)							
		0.1	1	10	20	50	80	100	150
หญ้าขน	slope (f)	1.4791	11.8657	265.3842	445.8985	1550.5714	2655.2143	2032.0000	5916.8333
	จุดตัดแกน y	0.1380	0.0000	-0.8612	-0.5083	1.1838	-1.3877	-0.3600	-1.9601
	Square R	0.9964	0.9884	0.9870	0.9611	0.8946	0.8540	0.4767	0.9037
หญ้าแฝก	slope (f)	1.5420	12.3656	285.5770	519.7100	2152.2353	2642.2143	2764.2500	2484.1667
	จุดตัดแกน y	-0.1649	-0.0179	-1.0204	-0.7432	-2.1892	-1.3290	-0.8894	0.4468
	Square R	0.9966	0.9902	0.9903	0.9778	0.9900	0.8907	0.7398	0.4765
หญ้าสตาร์	slope (f)	1.2621	11.0453	189.2512	355.3481	1123.3000	1597.0000	1525.4741	2935.5000
	จุดตัดแกน y	-0.0664	0.0163	-0.3614	-0.2675	-0.5622	-0.4337	-0.1346	-0.3853
	Square R	0.9993	0.9898	0.9975	0.9863	0.9818	0.9897	0.9624	0.8919

$y(0)$ = ปริมาณหญ้าที่ไม่มีการให้น้ำ (น้ำหนัก)

m = ปริมาณหญ้ามากที่สุด (น้ำหนัก)

t = คำนีบอกระยะของการให้น้ำ (cm/d)

จากสมการที่ (2.9) สามารถแก้สมการได้ตามสมการที่ (2.10)

$$y(t) = \frac{my(0)}{y(0) + (m - y(0))e^{-mkt}} \quad (2.10)$$

โดยที่ $m, k, y(0)$ = ค่าพารามิเตอร์ที่จะต้องประมาณหาค่า

จากตารางที่ 4.9 ได้สมการการเจริญเติบโตของหญ้าชนิดนี้

$$y = \frac{34832 \times 10^3}{519.79 + 150.32e^{-1.21t}} \quad (4.4)$$

ได้สมการการเจริญเติบโตของหญ้าแฝกดังนี้

$$y = \frac{15.10 \times 10^3}{101.09 + 48.24e^{-1.22t}} \quad (4.5)$$

ได้สมการการเจริญเติบโตของหญ้าสตาร์ดังนี้

$$y = \frac{21.51 \times 10^3}{103.83 + 103.32e^{-1.37t}} \quad (4.6)$$

ซึ่ง k คืออัตราการเจริญเติบโตของหญ้าทั้ง 3 ชนิด มีค่าดังนี้ หญ้าชนิดนี้ หญ้าชนิดนี้เท่ากับ 1.8×10^{-3} ต่อวัน, หญ้าแฝกเท่ากับ 8.2×10^{-3} ต่อวันและหญ้าสตาร์เท่ากับ 6.6×10^{-3} ต่อวัน ซึ่งจากผลที่ได้หญ้าแฝกมีอัตราการเจริญเติบโตมากที่สุด รองลงมาคือหญ้าสตาร์ และหญ้าชนิดนี้ m คือปริมาณหญ้าที่มากที่สุด มีค่าดังนี้ หญ้าชนิดนี้เท่ากับ 670.11 กก., หญ้าแฝกเท่ากับ 149.33 กก. และหญ้าสตาร์เท่ากับ 207.15 กก.

4.9 การนำไปใช้ประโยชน์

เมื่อนำน้ำทิ้งจากโรงงานแป้งมันสำปะหลังมาผ่านการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้ง แบบกระจายน้ำบนดินโดยระบบน้ำไหลนอง ที่ทำการปลูกหญ้าชนิดนี้ในแปลงที่ดินมีความพรุนเท่ากับ 0.5 และดินมีความหนา 4 เมตร โดยมีคุณสมบัติน้ำเบื้องต้น ค่า COD เท่ากับ 250 mg/L ทำการปรับปรุงโดยให้อัตราการระเหยของน้ำเท่ากับ 2.0 cm/d

4.9.1 ค่า COD ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพน้ำ

สมการการกำจัด COD ของการปรับปรุงคุณภาพน้ำแบบกระจายน้ำบนดินโดยระบบน้ำไหลนองของแปลงทดลองหญ้าชนิดนี้ คือ

ตารางที่ 4.9 การคำนวณสมการ Logistic Growth ของหญ้า

ชนิดหญ้า	T	y(t)	y'(t)	y'(t)/y(t)	m ⁽¹⁾	mk ⁽²⁾	y(0) ⁽³⁾	Y	%error
หญ้าขน	1.5	639.97	29.86	0.0467	670.11	1.21	519.79	639.97	-0.00
	2.0	654.90	24.40	0.0373				653.28	-0.25
	2.5	667.10	0.02	0.0000				660.79	-0.95
	3.0	667.11	-0.24	-0.0004				664.98	-0.32
	3.5	666.99						667.29	0.05
หญ้าแฝก	1.5	138.71	10.62	0.0766	149.33	1.22	101.09	138.71	-0.00
	2.0	144.02	7.68	0.0533				143.38	-0.45
	2.5	147.86	0.70	0.0047				146.04	-1.24
	3.0	148.21	-0.12	-0.0008				147.53	-0.46
	3.5	148.15						148.35	0.13
หญ้าสตา	1.5	183.73	27.64	0.1504	207.15	1.37	103.83	183.73	2.77
	2.0	197.55	18.52	0.0937				197.55	0.00
	2.5	206.81	0.52	0.0025				202.19	-2.28
	3.0	207.07	-0.28	-0.0014				204.62	-1.20
	3.5	206.93						205.86	-0.52

หมายเหตุ : จากสมการจัดรูปเป็นสมการเส้นตรงดังสมการที่ 2.9

$$^{(1)}k = \text{ค่าความชัน}$$

$$^{(2)}m = \text{ค่าจุดตัดแกน } y / \text{ค่าความชัน}$$

$$^{(3)}y(0) = \text{จำนวนจากสมการที่ 2.10}$$

$$\ln\left(\frac{C}{C_0}\right) = -2.1821 + 0.5923t \quad : r^2 = 0.9650 \quad (4.1)$$

$$\ln\left(\frac{C}{250}\right) = -2.1821 + 0.5923(2.0)$$

$$C = 92.2 \text{ mg/L}$$

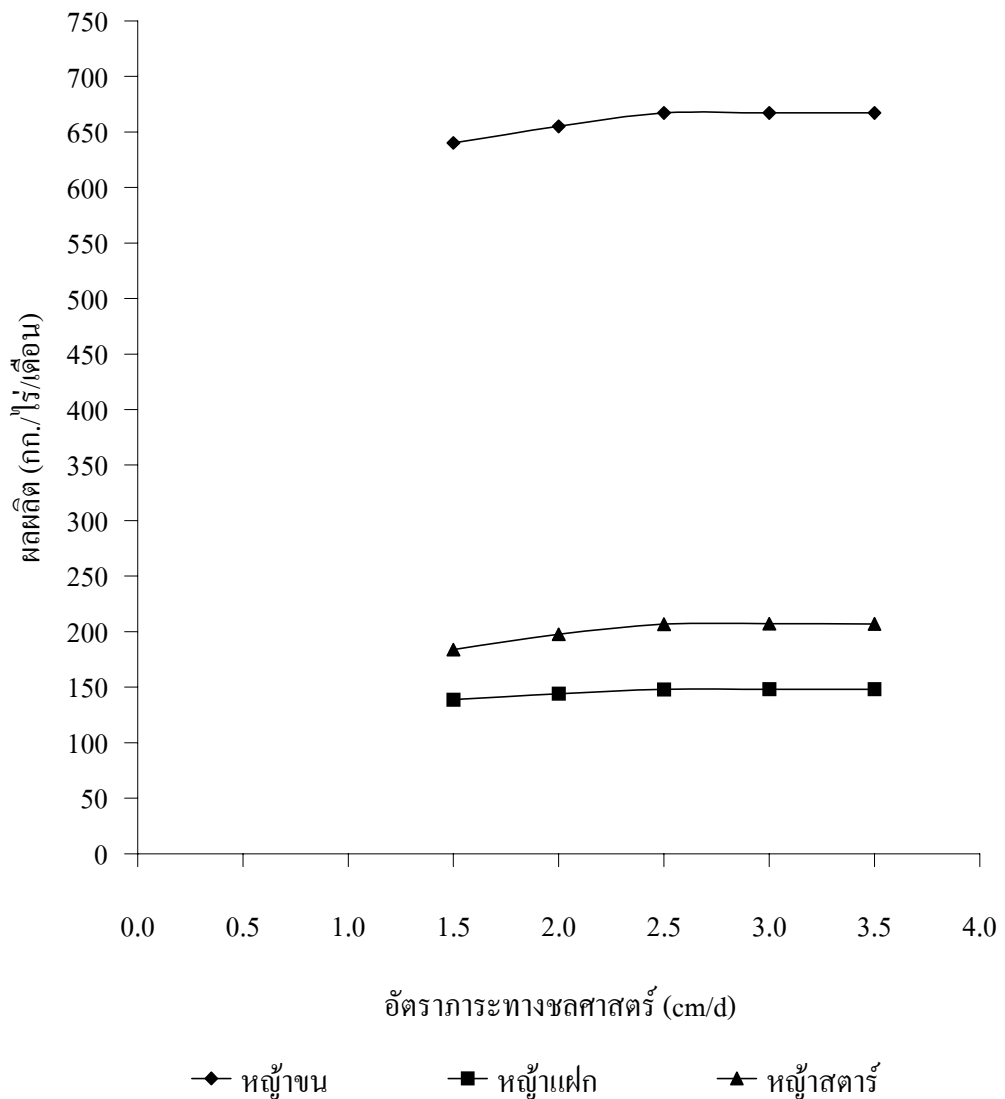
ดังนั้นค่า COD ของการปรับปรุงคุณภาพน้ำแบบกระจายน้ำบนดินโดยระบบน้ำไหลนองของแปลงทดลองหญ้าขนมีค่าเท่ากับ 92.2 mg/L

4.9.2 ปริมาณหญ้าที่ได้

จากการศึกษาความสัมพันธ์กับปริมาณน้ำที่ให้กับหญ้าขน สามารถอธิบายได้ด้วย Logistic Equation คือ

$$y = \frac{348.32 \times 10^3}{519.79 + 150.32e^{-1.21t}} \quad (4.4)$$
$$y = 653.28 \text{ กก.}$$

ดังนั้นปริมาณหญ้าขนที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพน้ำแบบกระจายน้ำบนดินโดยระบบน้ำไหลนองที่มีการให้น้ำที่อัตราการทางชลศาสตร์เท่ากับ 2.0 cm/d ได้เท่ากับ 653.28 กก.



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างผลผลิตหญ้านิคต่าง ๆ กับอัตราการทางชลศาสตร์

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1.1 ระบบกระจายน้ำไหลนองแบบน้ำไหลนองที่ปลูกพืชคลุมดินด้วยหญ้าขนและหญ้าแฝก มีประสิทธิภาพการกำจัดไม่แตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 แต่ที่อัตราการทางชลศาสตร์มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการกำจัด เมื่ออัตราการทางชลศาสตร์ต่ำจะมีประสิทธิภาพการกำจัดสูง

5.1.2 การสะสมสารอินทรีย์ในดินจะแปรตามอัตราการทางชลศาสตร์ เมื่ออัตราการทางชลศาสตร์ต่ำปริมาณฟอสฟอรัสและไนโตรเจนจะน้อยกว่าที่อัตราการทางชลศาสตร์สูง และเมื่อเปรียบเทียบกันที่ระยะต่าง ๆ ของแปลงทดลอง ที่ระยะต้นแปลงจะมีปริมาณฟอสฟอรัสและไนโตรเจนมากกว่าที่ระยะปลายแปลงทดลอง

5.1.3 จากการศึกษาอันดับปฏิกิริยาด้วยวิธีทางสถิติ โดยสมการถดถอยเชิงเส้น ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การกรองอนุภาคด้วยหญ้า จะมีค่าคงที่ของการกรองที่อนุภาคขนาดต่าง ๆ (collision factor) ของหญ้าขนอยู่ในช่วง 1.48-5916.83, ของหญ้าแฝกอยู่ในช่วง 1.54-2764.25 และหญ้าสตาร์อยู่ในช่วง 1.26-2935.50

5.1.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอัตราการเจริญเติบโตของหญ้า มีความสัมพันธ์กับปริมาณหญ้า, ดัชนีบอกระดับของการให้น้ำ และค่าพารามิเตอร์ที่จะต้องประมาณหาค่า m, mk และ $y(0)$ ซึ่งเป็นไปตามสมการ

$$y(t) = \frac{ny(0)}{y(0) + (m - y(0))e^{-mkt}}$$

โดยค่าคงที่ m ของหญ้าขน, หญ้าแฝก และหญ้าสตาร์ มีค่าเท่ากับ 670.11, 149.33 และ 207.15 ตามลำดับ ค่าคงที่ mk มีค่าเท่ากับ 1.21, 1.22 และ 1.37 และค่าคงที่ $y(0)$ มีค่าเท่ากับ 519.79, 101.09 และ 103.83 สามารถนำค่าที่ได้ใช้ในการประเมินปริมาณผลผลิตของหญ้าทั้ง 3 ชนิดที่อัตราการทางชลศาสตร์ที่ต้องการได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรทำการทดลองกับระบบกระจายน้ำบนดินแบบน้ำไหลนองที่มีขนาดใหญ่ เช่น Pilot-scale และ Full-scale ทำให้ระบบเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ สมบูรณ์ดีขึ้น

5.2.2 ควรทำการทดลองระบบกระจายน้ำบนดินแบบน้ำไหลนอง ที่ทำการปลูกพืชคลุมดินชนิดอื่น ๆ เพื่อหาพืชที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียโรงงานแป้งมันสำปะหลังและน้ำเสียชนิดอื่นที่ดีที่สุด เนื่องจากผลการทดลองที่ได้ ในด้านประสิทธิภาพการกำจัดของหญ้าขนและหญ้าแฝกมีค่าใกล้เคียงกัน ในด้านผลผลิตที่ได้ หญ้าแฝกได้ผลผลิตมากที่สุด รองลงมาคือหญ้าสตาร์และหญ้าขน ส่วนในด้านการนำไปใช้ประโยชน์มีวัตถุประสงค์ และความนิยมแตกต่างกัน ดังเช่นหญ้าขนมีประสิทธิภาพในการกำจัดสูง มีผลผลิตต่ำกว่าหญ้าชนิดอื่นที่ทำการทดลอง ส่วนหญ้าสตาร์มีประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำ แต่เป็นที่นิยมในการนำไปให้อาหารสัตว์ ส่วนหญ้าแฝกมีประสิทธิภาพในการกำจัดสูง มีผลผลิตสูง ไม่เป็นที่นิยมในการนำไปให้อาหารสัตว์ แต่นิยมนำไปทำหัตถกรรม ดังนั้นจึงควรเลือกให้เหมาะสมกับวัตถุประสงค์ในด้านต่าง ๆ

5.2.3 ควรทำการทดลอง หาความสัมพันธ์ระหว่างทิศทางการไหลของน้ำที่ผ่านเข้าระบบ เช่น แนวนอนและแนวตั้งที่ระยะทางต่าง ๆ และอัตราส่วนช่องว่างของดิน ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย

เอกสารอ้างอิง

- กรมพัฒนาที่ดิน, กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. (2541). ความรู้เรื่องหญ้าแฝก. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์
- เกรียงศักดิ์ อุคมสิน โรจน์. (2539). การบำบัดน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพมหานคร. : สำนักพิมพ์มิตรนราการพิมพ์.
- คณะอนุกรรมการด้านวิชาการการวางแผน และติดตามประเมินผล การพัฒนาและรณรงค์การใช้หญ้าแฝกอันเนื่องมาจากพระราชดำริ. (2542). สารานุกรมเรื่องหญ้าแฝก. สำนักงานคณะกรรมการพิเศษเพื่อประสานงานโครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ
- เฉลิมพล แซมเพชร. (2530). หญ้าและถั่วอาหารสัตว์เมืองร้อน. กรุงเทพมหานคร. : โอ.เอส.พรีนติ้งเฮ้าส์.
- ธนิยา เจตียนุกรกุล. (2539). ความเป็นไปได้ของหญ้าแฝกจากแหล่งพันธุ์ต่าง ๆ ในการบำบัดน้ำทิ้ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพมหานคร.
- ประวราดา โภชนจันทร์. (2543). การเปลี่ยนแปลงของฟอสฟอรัสในดินจากการบำบัดน้ำเสียในระบบ กรองน้ำเสียด้วยหญ้าของระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนเทศบาลเมืองเพชรบุรี. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพมหานคร.
- วิเชียร ฝอยพิกุล. (2536). ความอุดมสมบูรณ์ของดิน. ภาควิชาเกษตรศาสตร์, คณะวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, สถาบันราชภัฏสุรินทร์, สุรินทร์.
- วินิจ เสรีประเสริฐ. (2534). ระบบการปลูกพืช. ภาควิชาพืชศาสตร์, คณะทรัพยากรธรรมชาติและมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, หาดใหญ่, สงขลา.
- สายัณห์ ทัดศรี. (2540). พืชอาหารสัตว์เขต การผลิตและการจัดการ. กรุงเทพมหานคร. : สำนักพิมพ์รั้วเขียว.
- สิทธิชัย ต้นธนะศุภย์. (2538). การใช้ดินตะกอนภาคพื้นสมุทรในสภาพน้ำขังสลับแห้งร่วมกับพืชเป็นต้นแบบในการบำบัดน้ำเสียชุมชน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพมหานคร.

- สุเทพ การแข็ง. (2539). อิทธิพลของช่วงการตัดที่มีต่อผลผลิต ส่วนประกอบทางพฤกษศาสตร์และทางเคมีของหญ้าขนและถั่วเลี้ยงสัตว์ที่ปลูกร่วมกันในปีที่สอง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพมหานคร.
- APHA, AWWA, and WEF. (1995). Standard Methods for Examination of Water and Wastewater. (19th ed.). Washington D.C.: American Public Health Association.
- Bastian, Robert K., Reed, Sherwood C., and Crites, Ronald W. (2000). Land Treatment Systems for Municipal and Industrial Wastes. New York. : McGraw-Hill.
- Bolneni, V.P. (1979). Land Treatment and Disposal of Agro-industrial Wastes. M.S. thesis, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.
- Eckart, Schulz. (1999). Differential Equations. School of Mathematics. Suranaree University of Technology. Thailand.
- Hegg, R.O. and Turner, A.K. (1983). Overland Flow as a Method of Treatment for Animal Waste. Journal of Agricultural Wastes. 3 (8). : 167-184.
- Levenspiel, O. (1972). Chemical Reaction Engineering. (2nd ed.). New York.: Wiley International.
- Metcalf & Eddy, Inc. (1991). Wastewater Engineering-Treatment, Disposal, and Reuse. 3rd ed. McGraw-Hill. Singapore.
- Parsons, Anthony J. and Abrahams, Athol D. (1992). Overland Flow. London. : University College London Press.
- Polprasert, C. (1996). Organic Waste Recycling. 2nd ed. England. : Wiley International.
- Rajagopol, K. (1980). Land Treatment of Pulp and Paper Wastewater. M.S. thesis, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.
- Rao, B.V.P.C. (1979). Land Treatment and Disposal of Agro-wastes. M.S. thesis, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.
- 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.
- U.S. EPA. (1981). Process Design Manual for Land Treatment of Municipal Wastewater. EPA-625/1-81-013. U.S. Environmental Protection Agency. Cincinnati. Ohio.

Weber, Walter J., JR. (1972). *Physicochemical Processes for Water Quality Control*. New York.: Wiley.

Witherow, J.L. and Bledsoe, B.E. (1986). Design Model for the Overland Flow Process. *Journal of Water Pollution Control Federation*. 5 (58) : 381-386.

Yao, K.M., Habibian, M.T., and O'Melia, C.R. (1971). Water and Wastewater Filtration. *Environmental Science and Technology*. Vol. 5 : 1105-1112.

ภาคผนวก ก
ผลการศึกษาริตตาม

ตารางที่ 1ก ผลการทดลองและการคำนวณของการศึกษาสารติดตาม, $Q = 0.10 \text{ m}^3/\text{d}$

Time (min)	Δt_i (min)	C (g/L)	$C_i = \frac{C}{C_0}$	$C_i t_i$	$t_i C_i \Delta t_i$	$T_i^2 C_i \Delta t_i$
0	-	0	0	0	0	0
20	20	0.0190	0.0008	0.0160	0.32	6.4
40	20	0.0650	0.0026	0.0520	2.08	83.2
60	20	0.1150	0.0046	0.0920	5.52	331.2
80	20	0.1490	0.0060	0.1190	9.54	762.9
100	20	0.1650	0.0066	0.1320	13.20	1320.0
120	20	0.1850	0.0074	0.1480	17.76	2131.2
140	20	0.1890	0.0076	0.1520	21.28	2979.2
170	30	0.1650	0.0066	0.1980	33.66	5722.2
200	30	0.0990	0.0040	0.1200	24.00	4800.0
230	30	0.0890	0.0036	0.1080	24.84	5713.2
260	30	0.0890	0.0036	0.1080	28.08	7300.8
290	30	0.0750	0.0030	0.0900	26.10	7569.0
320	30	0.0650	0.0026	0.0780	24.96	7987.2
350	30	0.0350	0.0014	0.0420	14.70	5145.0
380	30	0.0250	0.0010	0.0300	11.40	4332.0
Sum =				1.4850	2557.44	56183.5

หมายเหตุ : $C_0 = 25 \text{ g/L}$

ภาคผนวก ข
ผลการวิเคราะห์ลักษณะของน้ำที่ก่อนและหลังผ่านการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้ง
โดยการกรองด้วยหญ้า

ตารางที่ 1x ค่าตัวแปรของน้ำที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งโดยการกรองด้วยหญ้าขน

ตัวแปร		อัตราการชะล้างทางชลศาสตร์ (cm/d)				
		1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
Total COD	Influent concentration (mg/L)	349.45	344.89	341.09	358.27	312.64
	Effluent concentration (mg/L)	89.04	129.94	195.68	225.00	271.27
	%Removal	74.5200	62.3242	42.6310	37.1982	13.2325
Soluble COD	Influent concentration (mg/L)	178.22	175.89	173.96	182.72	159.45
	Effluent concentration (mg/L)	39.18	57.17	86.10	99.00	119.36
	%Removal	78.0172	67.4954	50.5052	45.8181	25.1417
TSS	Influent concentration (mg/L)	214.00	232.00	224.00	227.00	225.00
	Effluent concentration (mg/L)	119.00	130.00	137.00	142.00	149.00
	%Removal	44.3925	43.9655	38.8393	37.4449	33.7778
TP	Influent concentration (mg/L)	0.5274	0.5786	0.4989	0.5967	0.5781
	Effluent concentration (mg/L)	0.3896	0.4132	0.3584	0.4418	0.4329
	%Removal	26.1282	28.5862	28.1620	25.9594	25.1168
TKN	Influent concentration (mg/L)	25.81	25.76	25.48	25.62	25.54
	Effluent concentration (mg/L)	13.53	14.97	15.34	15.48	15.73
	%Removal	47.5785	41.8866	39.7959	39.5785	38.4103
Nitrate	Influent concentration (mg/L)	0.4276	0.4548	0.3639	0.4730	0.4665
	Effluent concentration (mg/L)	0.3315	0.3652	0.2942	0.3955	0.3916
	%Removal	22.4743	19.7010	19.1536	16.3848	16.0557
Turbidity	Influent concentration (NTU)	53.48	53.52	54.37	55.08	54.79
	Effluent concentration (NTU)	29.94	31.09	31.92	32.73	33.01
	%Removal	44.0165	41.9096	41.2912	40.5773	39.7518
Chlorophyll-a	Influent concentration (mg/L)	0.2503	0.2436	0.2435	0.2527	0.2500
	Effluent concentration (mg/L)	0.1025	0.1094	0.1168	0.1219	0.1234
	%Removal	59.0491	55.0903	52.0329	51.7610	50.6400

ตารางที่ 2x ค่าตัวแปรของน้ำที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งโดยการกรองด้วยหญ้าแฝก

ตัวแปร		อัตราการทางชลศาสตร์ (cm/d)				
		1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
Total COD	Influent concentration (mg/L)	352.45	341.09	335.95	353.27	331.78
	Effluent concentration (mg/L)	86.98	124.47	182.32	213.21	279.31
	%Removal	75.3213	63.5082	45.7300	39.6467	15.8147
Soluble COD	Influent concentration (mg/L)	179.75	173.96	171.33	180.17	169.21
	Effluent concentration (mg/L)	38.27	54.77	80.22	93.81	122.90
	%Removal	78.7086	68.5168	53.1788	47.9305	27.3695
TSS	Influent concentration (mg/L)	216.00	231.00	225.00	228.00	226.00
	Effluent concentration (mg/L)	114.00	125.00	129.00	132.00	136.00
	%Removal	47.2222	45.8874	42.6667	42.1053	39.8230
TP	Influent concentration (mg/L)	0.5288	0.5148	0.5390	0.5825	0.5723
	Effluent concentration (mg/L)	0.3722	0.3705	0.3878	0.4209	0.4275
	%Removal	29.6142	28.0303	28.0519	27.7425	25.3014
TKN	Influent concentration (mg/L)	25.26	25.42	25.68	25.57	25.19
	Effluent concentration (mg/L)	10.35	13.92	15.12	15.43	16.03
	%Removal	59.0261	45.2400	41.1215	39.6558	36.3636
Nitrate	Influent concentration (mg/L)	0.4126	0.3449	0.3518	0.3632	0.3613
	Effluent concentration (mg/L)	0.2991	0.2688	0.2852	0.2956	0.2994
	%Removal	27.5085	22.0644	18.9312	18.6123	17.1326
Turbidity	Influent concentration (NTU)	54.27	53.74	52.41	54.97	54.38
	Effluent concentration (NTU)	28.56	28.95	30.04	32.53	32.93
	%Removal	47.3742	46.1295	42.6827	40.8223	39.4446
Chlorophyll-a	Influent concentration (mg/L)	0.2428	0.2392	0.2437	0.2513	0.2509
	Effluent concentration (mg/L)	0.0994	0.1006	0.1108	0.1198	0.1215
	%Removal	59.0610	57.9431	54.5343	52.3279	51.5743

ตารางที่ 3x ค่าตัวแปรของน้ำที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งโดยการกรองด้วยหญ้าสตาร์

ตัวแปร		อัตราการทางชลศาสตร์ (cm/d)				
		1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
Total COD	Influent concentration (mg/L)	312.40	346.51	352.49	345.72	321.58
	Effluent concentration (mg/L)	113.72	151.65	225.19	241.67	279.14
	%Removal	63.5980	56.2350	36.1145	30.0966	13.1973
Soluble COD	Influent concentration (mg/L)	159.32	176.72	179.77	176.32	164.01
	Effluent concentration (mg/L)	50.04	66.73	99.08	106.33	122.82
	%Removal	68.5943	62.2420	44.8831	39.6912	25.1114
TSS	Influent concentration (mg/L)	227.00	226.00	219.00	221.00	224.00
	Effluent concentration (mg/L)	152.00	156.00	158.00	161.00	165.00
	%Removal	33.0396	30.9735	27.8539	27.1493	26.3393
TP	Influent concentration (mg/L)	0.5274	0.5475	0.5788	0.5634	0.5581
	Effluent concentration (mg/L)	0.3692	0.3976	0.4274	0.4305	0.4349
	%Removal	29.9962	27.3790	26.1576	23.5889	22.0749
TKN	Influent concentration (mg/L)	24.79	25.46	25.85	25.62	25.54
	Effluent concentration (mg/L)	10.37	14.21	16.40	17.21	17.62
	%Removal	58.1686	44.1870	36.5571	32.8259	31.0102
Nitrate	Influent concentration (mg/L)	0.3721	0.3510	0.3397	0.3155	0.3201
	Effluent concentration (mg/L)	0.3539	0.3362	0.3245	0.3023	0.3065
	%Removal	4.8912	4.2165	4.4745	4.1838	4.2487
Turbidity	Influent concentration (mg/L)	53.62	54.63	54.21	54.29	55.16
	Effluent concentration (mg/L)	33.45	35.11	36.89	38.17	39.52
	%Removal	37.6166	35.7313	31.9498	29.6924	28.3539
Chlorophyll-a	Influent concentration (mg/L)	0.2498	0.2465	0.2539	0.2523	0.2573
	Effluent concentration (mg/L)	0.1267	0.1379	0.1501	0.1713	0.1785
	%Removal	49.2794	44.0568	40.8822	32.1046	30.6257

ภาคผนวก ค

ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการกำจัดอนุภาค

ตารางที่ 1 ค จำนวนอนุภาคของน้ำที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งโดยการกรองด้วยหุ้ยขน

ขนาดอนุภาค (μm)		อัตราการทางชลศาสตร์ (cm/d)				
		1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
0.1	Influent (# /100 mL)	104160	118520	120470	117350	125130
	Effluent (# /100 mL)	48647	66267	80333	85934	93453
	%Removal	53.2959	44.0879	33.3170	26.7712	25.3153
1	Influent (# /100 mL)	1945268	1876410	2085205	1938384	2027871
	Effluent (# /100 mL)	945041	1292457	1822560	2057450	2100915
	%Removal	51.4185	31.1208	12.5956	-6.1425	-3.6020
10	Influent (# /100 mL)	656430	608216	632580	627450	648145
	Effluent (# /100 mL)	145053	176140	208953	230870	294381
	%Removal	77.9027	71.0399	66.9681	63.2050	54.5810
20	Influent (# /100 mL)	360910	357530	328373	362780	351026
	Effluent (# /100 mL)	73973	148940	161654	203210	235694
	%Removal	79.5038	58.3420	50.7712	43.9853	32.8557
50	Influent (# /100 mL)	6460	5930	6373	6542	6063
	Effluent (# /100 mL)	1247	1267	1433	1513	1701
	%Removal	80.6966	78.6341	77.5145	76.8725	71.9446
80	Influent (# /100 mL)	1053	1123	1087	1073	1201
	Effluent (# /100 mL)	207	253	295	347	419
	%Removal	80.3419	77.4711	72.8611	67.6608	65.1124
100	Influent (# /100 mL)	2020	2047	2043	1804	2186
	Effluent (# /100 mL)	465	513	547	527	706
	%Removal	76.9802	74.9389	73.2256	70.7871	67.7036
150	Influent (# /100 mL)	200	212	209	191	211
	Effluent (# /100 mL)	20	27	47	38	40
	%Removal	90.0000	87.2642	77.5120	80.1047	81.0427

ตารางที่ 2ค จำนวนอนุภาคของน้ำที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งโดยการกรองด้วยหญาแฝก

ขนาดอนุภาค (μm)		อัตราการทางชลศาสตร์ (cm/d)				
		1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
0.1	Influent (# /100 mL)	112350	120040	119520	114809	120451
	Effluent (# /100 mL)	49753	63907	78571	82154	86523
	%Removal	55.7161	46.7619	34.2612	28.4429	28.1675
1	Influent (# /100 mL)	1923809	1905570	1918630	1925925	2004683
	Effluent (# /100 mL)	906726	1221681	1608210	1906540	2010105
	%Removal	52.8682	35.8889	16.1793	1.0065	-0.2705
10	Influent (# /100 mL)	647560	612970	624910	633750	637294
	Effluent (# /100 mL)	141873	165381	194623	218546	269223
	%Removal	78.0911	73.0197	68.8558	65.5154	57.7553
20	Influent (# /100 mL)	359750	345901	357680	352920	344672
	Effluent (# /100 mL)	61573	121465	160154	192750	201873
	%Removal	82.8845	64.8845	55.2242	45.3842	41.4304
50	Influent (# /100 mL)	5967	6235	6349	6186	6050
	Effluent (# /100 mL)	852	953	1217	1409	1718
	%Removal	85.7215	84.7153	80.8316	77.2228	71.6033
80	Influent (# /100 mL)	1160	1127	1094	1106	1197
	Effluent (# /100 mL)	218	247	286	328	405
	%Removal	81.2069	78.0834	73.8574	70.3436	66.1654
100	Influent (# /100 mL)	1978	2063	2036	1892	1955
	Effluent (# /100 mL)	400	507	535	493	587
	%Removal	79.7776	75.4241	73.7230	73.9429	69.9744
150	Influent (# /100 mL)	199	200	216	214	206
	Effluent (# /100 mL)	18	24	33	28	28
	%Removal	90.9548	88.0000	84.7222	86.9159	86.4078

ตารางที่ 3ค จำนวนอนุภาคของน้ำที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งโดยการกรองด้วยหญาสตาร์

ขนาดอนุภาค (μm)		อัตราการทางชลศาสตร์ (cm/d)				
		1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
0.1	Influent (# /100 mL)	118342	113960	115722	109545	115938
	Effluent (# /100 mL)	74827	76641	81258	83623	89479
	%Removal	36.7705	32.7475	29.7817	23.6633	22.8217
1	Influent (# /100 mL)	1953460	1965258	2068456	1947141	2017683
	Effluent (# /100 mL)	1034150	1395280	1875445	2158621	2249719
	%Removal	47.0606	29.0027	9.3312	-10.8611	-11.5001
10	Influent (# /100 mL)	648665	625437	627854	638915	640582
	Effluent (# /100 mL)	245371	269250	315684	348560	368159
	%Removal	62.1729	56.9501	49.7202	45.4450	42.5274
20	Influent (# /100 mL)	356848	345294	351552	359439	338627
	Effluent (# /100 mL)	125426	173491	215356	241086	250063
	%Removal	64.8517	49.7556	38.7414	32.9271	26.1539
50	Influent (# /100 mL)	6287	6355	6116	6439	6217
	Effluent (# /100 mL)	1865	1991	2273	2603	2847
	%Removal	70.3356	68.6703	62.8352	59.5745	54.2062
80	Influent (# /100 mL)	1188	1166	1155	1125	1201
	Effluent (# /100 mL)	365	401	496	554	616
	%Removal	69.2761	65.6089	57.0563	50.7556	48.7094
100	Influent (# /100 mL)	2014	1891	2356	2155	1938
	Effluent (# /100 mL)	633	745	1153	1448	1517
	%Removal	68.5700	60.6029	51.0611	32.8074	21.7234
150	Influent (# /100 mL)	186	224	195	217	200
	Effluent (# /100 mL+B18)	57	81	95	117	133
	%Removal	69.3548	63.8393	51.2821	46.0829	33.5000

ภาคผนวก ง

การคำนวณหาสมการทางคณิตศาสตร์ของประสิทธิภาพการกรอง

ตารางที่ 1ง การคำนวณสมการของประสิทธิภาพการกรองด้วยหญ้าขน

ขนาดอนุภาค (μm)	อัตราการไหลทางชลศาสตร์ (cm/d)	น้ำเข้า, n_0 (# /100 mL)	น้ำออก, n (# /100 mL)	$\ln\left(\frac{n}{n_0}\right)$	η_T	$\frac{3\eta_T(1-\epsilon)H}{4R}$
0.1	1.5	104160.00	48647.00	-0.7613	0.5330	0.5996
	2.0	118520.00	66267.00	-0.5814	0.4409	0.4960
	2.5	120470.00	80333.00	-0.4052	0.3332	0.3748
	3.0	117350.00	85934.00	-0.3116	0.2677	0.3012
	3.5	125130.00	93453.00	-0.2919	0.2532	0.2848
1	1.5	1945268.00	945041.00	-0.7219	0.5142	0.0578
	2.0	1876410.00	1292457.00	-0.3728	0.3112	0.0350
	2.5	2085205.00	1822560.00	-0.1346	0.1260	0.0142
	3.0	1938384.00	2057450.00	0.0596	-0.0614	-0.0069
	3.5	2027871.00	2100915.00	0.0354	-0.0360	-0.0041
10	1.5	656430.00	145053.00	-1.5097	0.7790	0.0088
	2.0	608216.00	176140.00	-1.2393	0.7104	0.0080
	2.5	632580.00	208953.00	-1.1077	0.6697	0.0075
	3.0	627450.00	230870.00	-0.9998	0.6321	0.0071
	3.5	648145.00	294381.00	-0.7892	0.5458	0.0061
20	1.5	360910.00	73973.00	-1.5849	0.7950	0.0045
	2.0	357530.00	148940.00	-0.8757	0.5834	0.0033
	2.5	328373.00	161654.00	-0.7087	0.5077	0.0029
	3.0	362780.00	203210.00	-0.5796	0.4399	0.0025
	3.5	351026.00	235694.00	-0.3983	0.3286	0.0018
50	1.5	6460.000	1247.000	-1.6449	0.8070	0.0018
	2.0	5930.000	1267.000	-1.5434	0.7863	0.0018
	2.5	6373.000	1433.000	-1.4923	0.7751	0.0017
	3.0	6542.000	1513.000	-1.4641	0.7687	0.0017
	3.5	6063.000	1701.000	-1.2710	0.7194	0.0016

หมายเหตุ : $\epsilon = 0.5$ และ $H = 4$ เมตร

ตารางที่ 1ง การคำนวณสมการของประสิทธิภาพการกรองด้วยหุ้ย้าน (ต่อ)

ขนาดอนุภาค (μm)	อัตราการทางชลศาสตร์ (cm/d)	น้ำเข้า, n_0 (# /100 mL)	น้ำออก, n (# /100 mL)	$\ln\left(\frac{n}{n_0}\right)$	η_T	$\frac{3\eta_T(1-\epsilon)H}{4R}$
80	1.5	1053.000	207.000	-1.6267	0.8034	0.0011
	2.0	1123.000	253.000	-1.4904	0.7747	0.0011
	2.5	1087.000	295.000	-1.3042	0.7286	0.0010
	3.0	1073.000	347.000	-1.1289	0.6766	0.0010
	3.5	1201.000	419.000	-1.0530	0.6511	0.0009
100	1.5	2020.000	465.000	-1.4688	0.7698	0.0009
	2.0	2047.000	513.000	-1.3839	0.7494	0.0008
	2.5	2043.000	547.000	-1.3177	0.7323	0.0008
	3.0	1804.000	527.000	-1.2306	0.7079	0.0008
	3.5	2186.000	706.000	-1.1302	0.6770	0.0008
150	1.5	200.000	20.000	-2.3026	0.9000	0.0007
	2.0	212.000	27.000	-2.0607	0.8726	0.0007
	2.5	209.000	47.000	-1.4922	0.7751	0.0006
	3.0	191.000	38.000	-1.6147	0.8010	0.0006
	3.5	211.000	40.000	-1.6630	0.8104	0.0006

หมายเหตุ : $\epsilon = 0.5$ และ $H = 4$ เมตร

ตารางที่ 2ง การคำนวณสมการของประสิทธิภาพการกรองด้วยหญ้าแฝก

ขนาดอนุภาค (μm)	อัตราการไหลทางชลศาสตร์ (cm/d)	น้ำเข้า, n_0 (# /100 mL)	น้ำออก, n (# /100 mL)	$\ln\left(\frac{n}{n_0}\right)$	η_T	$\frac{3\eta_T(1-\varepsilon)H}{4R}$
0.1	1.5	112350.00	49753.00	-0.8145	0.5572	0.6268
	2.0	120040.00	63907.00	-0.6304	0.4676	0.5261
	2.5	119520.00	78571.00	-0.4195	0.3426	0.3854
	3.0	114890.00	82154.00	-0.3354	0.2849	0.3206
	3.5	120451.00	86523.00	-0.3308	0.2817	0.3169
1	1.5	1923809.00	906726.00	-0.7522	0.5287	0.0595
	2.0	1905570.00	1221681.00	-0.4446	0.3589	0.0404
	2.5	1918630.00	1608210.00	-0.1765	0.1618	0.0182
	3.0	1925925.00	1906540.00	-0.0101	0.0101	0.0011
	3.5	2004683.00	2010105.00	0.0027	-0.0027	-0.0003
10	1.5	647560.00	141873.00	-1.5183	0.7809	0.0088
	2.0	612970.00	165381.00	-1.3101	0.7302	0.0082
	2.5	624910.00	194623.00	-1.1665	0.6886	0.0077
	3.0	633750.00	218546.00	-1.0647	0.6552	0.0074
	3.5	637294.00	269223.00	-0.8617	0.5776	0.0065
20	1.5	359750.00	61573.00	-1.7652	0.8288	0.0047
	2.0	345910.00	121465.00	-1.0466	0.6489	0.0036
	2.5	357680.00	160154.00	-0.8035	0.5522	0.0031
	3.0	352920.00	192750.00	-0.6048	0.4538	0.0026
	3.5	344672.00	201873.00	-0.5350	0.4143	0.0023
50	1.5	5967.000	857.000	-1.9406	0.8564	0.0019
	2.0	6235.000	953.000	-1.8783	0.8472	0.0019
	2.5	6349.000	1217.000	-1.6519	0.8083	0.0018
	3.0	6186.000	1409.000	-1.4794	0.7722	0.0017
	3.5	6050.000	1718.000	-1.2589	0.7160	0.0016

หมายเหตุ : $\varepsilon = 0.5$ และ $H = 4$ เมตร

ตารางที่ 2ง การคำนวณสมการของประสิทธิภาพการกรองด้วยหญ้าแฝก (ต่อ)

ขนาดอนุภาค (μm)	อัตราการทางชลศาสตร์ (cm/d)	น้ำเข้า, n_0 (# /100 mL)	น้ำออก, n (# /100 mL)	$\ln\left(\frac{n}{n_0}\right)$	η_T	$\frac{3\eta_T(1-\varepsilon)H}{4R}$
80	1.5	1160.000	218.000	-1.6717	0.8121	0.0011
	2.0	1127.000	247.000	-1.5179	0.7808	0.0011
	2.5	1094.000	286.000	-1.3416	0.7386	0.0010
	3.0	1106.000	328.000	-1.2155	0.7034	0.0010
	3.5	1197.000	405.000	-1.0837	0.6617	0.0009
100	1.5	1978.000	400.000	-1.5984	0.7978	0.0009
	2.0	2063.000	507.000	-1.4034	0.7542	0.0008
	2.5	2036.000	535.000	-1.3365	0.7372	0.0008
	3.0	1892.000	493.000	-1.3449	0.7394	0.0008
	3.5	1955.000	587.000	-1.2031	0.6997	0.0008
150	1.5	199.000	18.000	-2.4029	0.9095	0.0007
	2.0	200.000	24.000	-2.1203	0.8800	0.0007
	2.5	216.000	33.000	-1.8788	0.8472	0.0006
	3.0	214.000	28.000	-2.0338	0.8692	0.0007
	3.5	206.000	28.000	-1.9957	0.8641	0.0006

หมายเหตุ : $\varepsilon = 0.5$ และ $H = 4$ เมตร

ตารางที่ 3 การคำนวณสมการของประสิทธิภาพการกรองด้วยหญ้าสัตว์

ขนาดอนุภาค (μm)	อัตราการไหลทางชลศาสตร์ (cm/d)	น้ำเข้า, n_0 (# /100 mL)	น้ำออก, n (# /100 mL)	$\ln\left(\frac{n}{n_0}\right)$	η_T	$\frac{3\eta_T(1-\epsilon)H}{4R}$
0.1	1.5	118342.00	74827.00	-0.4584	0.3677	0.4137
	2.0	113960.00	76641.00	-0.3967	0.3275	0.3684
	2.5	115722.00	81258.00	-0.3536	0.2978	0.3350
	3.0	109545.00	83623.00	-0.2700	0.2366	0.2662
	3.5	115938.00	89479.00	-0.2591	0.2282	0.2567
1	1.5	1953460.00	1034150.00	-0.6360	0.4706	0.0529
	2.0	1965258.00	1395280.00	-0.3425	0.2900	0.0326
	2.5	2068456.00	1875445.00	-0.0980	0.0933	0.0105
	3.0	1947141.00	2158621.00	0.1031	-0.1086	-0.0122
	3.5	2017683.00	2249719.00	0.1089	-0.1150	-0.0129
10	1.5	648665.00	245371.00	-0.9721	0.6217	0.0070
	2.0	625437.00	269250.00	-0.8428	0.5695	0.0064
	2.5	627854.00	315684.00	-0.6876	0.4972	0.0056
	3.0	638915.00	348560.00	-0.6060	0.4545	0.0051
	3.5	640582.00	368159.00	-0.5539	0.4253	0.0048
20	1.5	356848.00	125426.00	-1.0456	0.6485	0.0036
	2.0	345294.00	173491.00	-0.6883	0.4976	0.0028
	2.5	351552.00	215356.00	-0.4901	0.3874	0.0022
	3.0	359439.00	241086.00	-0.3994	0.3293	0.0019
	3.5	338627.00	250063.00	-0.3032	0.2615	0.0015
50	1.5	6287.000	1865.000	-1.2152	0.7034	0.0016
	2.0	6355.000	1991.000	-1.1606	0.6867	0.0015
	2.5	6116.000	2273.000	-0.9898	0.6284	0.0014
	3.0	6439.000	2603.000	-0.9057	0.5957	0.0013
	3.5	6217.000	2847.000	-0.7810	0.5421	0.0012

หมายเหตุ : $\epsilon = 0.5$ และ $H = 4$ เมตร

ตารางที่ 3ง การคำนวณสมการของประสิทธิภาพการกรองด้วยหญ้าสตาร์ (ต่อ)

ขนาดอนุภาค (μm)	อัตราการไหลทางชลศาสตร์ (cm/d)	น้ำเข้า, n_0 (# /100 mL)	น้ำออก, n (# /100 mL)	$\ln\left(\frac{n}{n_0}\right)$	η_T	$\frac{3\eta_T(1-\epsilon)H}{4R}$
80	1.5	1188.000	365.000	-1.1801	0.6928	0.0010
	2.0	1066.000	401.000	-0.9777	0.6238	0.0009
	2.5	1155.000	496.000	-0.8453	0.5706	0.0008
	3.0	1125.000	554.000	-0.7084	0.5076	0.0007
	3.5	1201.000	616.000	-0.6677	0.4871	0.0007
100	1.5	2014.000	633.000	-1.1574	0.6857	0.0008
	2.0	1891.000	745.000	-0.9315	0.6060	0.0007
	2.5	2356.000	1153.000	-0.7146	0.5106	0.0006
	3.0	2155.000	1448.000	-0.3976	0.3281	0.0004
	3.5	1938.000	1517.000	-0.2449	0.2172	0.0002
150	1.5	186.000	57.000	-1.1827	0.6935	0.0005
	2.0	224.000	81.000	-1.0172	0.6384	0.0005
	2.5	195.000	95.000	-0.7191	0.5128	0.0004
	3.0	217.000	117.000	-0.6177	0.4608	0.0003
	3.5	200.000	133.000	-0.4080	0.3350	0.0003

หมายเหตุ : $\epsilon = 0.5$ และ $H = 4$ เมตร

ภาคผนวก จ
ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์ที่สะสมในดิน

ตารางที่ 1จ ปริมาณสารอินทรีย์ที่สะสมในดินที่ระยะต่าง ๆ

อัตราการทางชลศาสตร์ (cm/d)	ชนิดหญ้า	pH			ปริมาณฟอสฟอรัส (10^{-3} kg-P/kg ดิน)			ปริมาณไนโตรเจน (mg-N/kg ดิน)		
		0.5 เมตร	2.0 เมตร	3.5 เมตร	0.5 เมตร	2.0 เมตร	3.5 เมตร	0.5 เมตร	2.0 เมตร	3.5 เมตร
1.5	หญ้านวน	7.23	6.88	6.86	6.6817	5.2750	4.0675	1.015	1.015	0.980
	หญ้าแฝก	7.81	7.73	7.68	7.2083	4.9183	4.0450	0.560	0.473	0.385
	หญ้าสตาร์	7.85	7.47	7.46	6.5000	3.8867	3.0717	0.805	0.595	0.595
2.0	หญ้านวน	7.72	6.97	6.96	13.2167	5.8617	5.0217	1.015	1.015	0.980
	หญ้าแฝก	7.83	7.82	7.70	7.8500	5.6600	4.8133	0.665	0.648	0.595
	หญ้าสตาร์	7.84	7.70	7.64	8.1117	5.0233	3.5917	0.910	0.840	0.724
2.5	หญ้านวน	7.91	6.97	6.97	18.5983	7.0800	6.3033	1.050	1.050	0.980
	หญ้าแฝก	7.86	7.84	7.73	12.9283	8.0367	7.5200	0.770	0.700	0.648
	หญ้าสตาร์	8.03	7.80	7.69	14.6200	5.2933	4.5583	1.029	1.015	0.980
3.0	หญ้านวน	8.04	8.02	7.00	25.4383	10.6000	7.6400	1.085	1.050	0.980
	หญ้าแฝก	8.08	8.05	8.04	20.3550	9.1330	9.0460	0.945	0.829	0.770
	หญ้าสตาร์	8.11	7.84	7.78	19.0012	9.1817	6.0517	1.155	1.120	1.015
3.5	หญ้านวน	8.10	7.79	7.08	26.8451	10.5534	10.3284	1.104	1.073	1.046
	หญ้าแฝก	8.15	8.13	8.11	23.7529	9.4741	9.1536	1.027	0.918	0.863
	หญ้าสตาร์	8.17	8.14	8.09	22.9542	9.4261	9.3685	1.301	1.259	1.092

หมายเหตุ สภาพดินเริ่มต้นมี ปริมาณฟอสฟอรัส 1.00 ppm และมีปริมาณไนโตรเจน 0.042 mg-N/kg ดิน

ภาคผนวก ฉ
ผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำน้หนักหฐฐ

ตารางที่ 1จ ปริมาณน้ำน้หนักหญา

อัตราภาระทางชลศาสตร์ (ชม./วัน)	ชนิดหญา	น้ำน้หนักหญาสดที่ระยะทางต่าง ๆ (กก.)				น้ำน้หนักหญาสดรวม (กก./ไร่ เดือน)	ค่าความชื้น (%)	น้ำน้หนักหญาแห้งรวม (กก./ไร่ เดือน)
		1 เมตร	2 เมตร	3 เมตร	4 เมตร			
1.5	หญาขน	1.87	1.59	1.24	1.04	1530.67	41.81	639.97
	หญาแฝก	0.58	0.50	0.48	0.46	538.67	25.75	138.71
	หญาสตาร์	1.20	0.85	0.51	0.33	770.67	23.84	183.73
2.0	หญาขน	1.90	1.60	1.25	1.06	1549.33	42.27	654.90
	หญาแฝก	0.60	0.51	0.49	0.47	552.00	26.09	144.02
	หญาสตาร์	1.26	0.90	0.53	0.33	805.33	24.53	197.55
2.5	หญาขน	1.93	1.61	1.26	1.06	1562.67	42.69	667.10
	หญาแฝก	0.61	0.51	0.50	0.47	557.33	26.53	147.86
	หญาสตาร์	1.28	0.93	0.54	0.33	821.33	25.18	206.81
3.0	หญาขน	1.91	1.60	1.26	1.06	1554.67	42.91	667.11
	หญาแฝก	0.60	0.50	0.50	0.47	552.00	26.85	148.21
	หญาสตาร์	1.26	0.92	0.54	0.33	813.33	25.46	207.07
3.5	หญาขน	1.90	1.59	1.26	1.06	1549.33	43.05	666.99
	หญาแฝก	0.59	0.49	0.50	0.47	546.67	27.10	148.15
	หญาสตาร์	1.25	0.91	0.54	0.33	808.00	25.61	206.93

ประวัติผู้เขียน

นางสาววิมลมาศ บุญยังยืน เกิดเมื่อวันที่ 10 สิงหาคม พ.ศ. 2521 เริ่มเข้าศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ปีการศึกษา 2538 และสำเร็จการศึกษาเมื่อปีการศึกษา 2541 และได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโทวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ในปีการศึกษา 2542

