



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การบำบัดน้ำเสียโรงงานขนมจีนด้วยวิธีการสร้างรวมตะกอนร่วมกับระบบหญ้ากรองน้ำเสีย
และพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมของโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ย
อันเนื่องมาจากพระราชดำริ

Wastewater Treatment of Thai Fermented Rice Noodle Factory by Utilizing Coagulation –
Flocculation in Combination with the Grass Filtration System and the Constructed
Wetland of The King’s Royally Initiated Laem Phak Bia Environmental Research and
Development Project

นามผู้วิจัย นางสาวพัชรภรณ์ กันยาประสิทธิ์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์คณิดา ตั้งคณานุรักษ์, วท.ม.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรัตน์ บัวเลิศ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

สืบสิงห์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การบำบัดน้ำเสียโรงงานขนมจีนด้วยวิธีการสร้างรวมตะกอนร่วมกับระบบหญ้ากรองน้ำเสีย
และพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมของโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ย

อันเนื่องมาจากพระราชดำริ

Wastewater Treatment of Thai Fermented Rice Noodle Factory by Utilizing Coagulation -
Flocculation in Combination with the Grass Filtration System and the Constructed
Wetland of The King's Royally Initiated Laem Phak Bia Environmental Research
and Development Project

โดย

นางสาวพัชรภรณ์ กันยาประสิทธิ์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตรสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2557

พัชราภรณ์ กันยาประสิทธิ์ 2557: การบำบัดน้ำเสียโรงงานขนมจีนด้วยวิธีการสร้างรวมตะกอนร่วมกับระบบหมุนเวียนน้ำเสียและพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมของโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตรสิ่งแวดล้อม) สาขาวิทยาศาสตรสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิทยาศาสตรสิ่งแวดล้อม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์ศศิตา ตั้งคณานุรักษ์, วท.ม.

105 หน้า

กระบวนการผลิตขนมจีนส่งผลให้เกิดน้ำเสียในปริมาณมาก ซึ่งน้ำเสียมีปริมาณสารประกอบอินทรีย์และกรดสูง ดังนั้นน้ำเสียจากโรงงานผลิตขนมจีนจึงเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดปัญหามลพิษในแหล่งน้ำ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดค่าสี ความขุ่น และซีโอดี โดยวิธีการสร้างรวมตะกอนร่วมกับการบำบัดแบบธรรมชาติ จากการทดลองด้วยวิธีจาร์เทสต์ ผลการทดลองพบว่าที่พีเอช 8 ของน้ำเสีย 1 ลิตร และใช้สารละลายสารส้ม 18 มิลลิลิตร ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่าการใช้สารละลายปูนขาว นอกจากนั้นได้ทำการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพระบบบำบัดแบบธรรมชาติด้วยการดูดซับด้วยถ่านกะลามะพร้าว ผลของการทดลองแบบเบตซ์พบว่าถ่านกะลามะพร้าวสามารถช่วยบำบัดสี ความขุ่น และซีโอดี และรูปแบบการดูดซับสอดคล้องกับไอโซเทอร์มของแลงเมียร์และฟรุนดลิช ทำการทดลองแบบการไหลต่อเนื่องเพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดของชั้นกรองที่มีชั้นบนสุดเป็นถ่านกะลามะพร้าวผสมกับดินในอัตราส่วนโดยน้ำหนัก 1:60 และบำบัดน้ำเสียเลียนแบบระบบหมุนเวียนน้ำเสียและพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม จากระบบหมุนเวียนน้ำเสียให้ประสิทธิภาพการบำบัดสี ความขุ่น และซีโอดี เท่ากับร้อยละ 93.65, 97.56 และ 91.26 ตามลำดับ ซึ่งบำบัดได้ดีกว่าระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม นอกจากนั้นได้ทำการทดลองด้วยเทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็ก เช่นเดียวกับการไหลแบบต่อเนื่องและปลูกจุลินทรีย์และกกกลม ผลการทดลองพบว่าจุลินทรีย์มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่ากกกลม ที่ร้อยละ 95.95, 95.81 และ 97.60 ตามลำดับ

Pascharaporn Kanyapasit 2014: Wastewater Treatment of Thai Fermented Rice Noodle Factory by Utilizing Coagulation - Flocculation in Combination with the Grass Filtration System and the Constructed Wetland of The King's Royally Initiated Laem Phak Bia Environmental Research and Development Project. Master of Science (Environmental Science), Major Field: Environmental Science, Department of Environmental Science. Thesis Advisor: Associate Professor Kanita Tungkananuruk, M.Sc. 105 pages.

The Thai fermented rice noodle production processes produced large amount of wastewater that containing high organic substances and acidity. Therefore, the effluent from Thai fermented rice noodle factory is one of the aquatic environmental problem. The aim of this research was to reduce color, turbidity and COD by coagulation – flocculation combine with natural treatment. From jar test experiment, the results revealed that at pH 8 of 1L wastewater and using the alum solution 18 ml gave the better removal efficiency than, using lime solution. Moreover, the adsorption efficiency by coconut shell charcoal for improveing the natural treatment was done. The batch experimental results showed that this charcoal could remove color, turbidity and COD and the adsorption behavior comformed with Langmuir and Freundlich isotherm. The continuous flow experiment was also investigated to determine the removal efficiency of the filtration layers with the top layer was mixture of coconut shell charcoal and soil in ratio by weight of 1:60 and treated wastewater similar to the grass filtration system and the constructed wetland. From the grass filtration system, the removal efficiency percentage of color, turbidity and COD were 93.65, 97.56 and 91.26 respectively that results were higher than the constructed wetland system. In addition, the filtrated lysimeter technique was conducted in the same manner as continuous flow experiments and growing *Typha angustifolia* and *Cyperus Corymbosus*. The results were found that *Typha angustifolia* had higher efficiency than *Cyperus Corymbosus*. and the removal efficiency at 95.95, 95.81 and 97.60 respectively were achieved.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์
คณิตา ตังคณานุรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และรองศาสตราจารย์ ดร.นิพนธ์ ตังคณานุรักษ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้ความรู้ คำปรึกษา แนะนำ และสละเวลาในการตรวจแก้ไข
วิทยานิพนธ์จนกระทั่งสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์คณะสิ่งแวดล้อมทุกท่าน ที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำและ
คำสั่งสอน ตลอดจนประสานผลการดำเนินงานต่างๆ แก่ผู้วิจัย เพื่อนำความรู้ไปใช้ประโยชน์ต่อไป
ในอนาคต

ขอขอบพระคุณ โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ย อันเนื่องมาจาก
พระราชดำริ รวมถึงขอขอบพระคุณภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัย
เกษตรศาสตร์ ที่อนุเคราะห์สถานที่ วัสดุและอุปกรณ์ในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ นิสิตปริญญาโท ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม รุ่น 35 ที่ให้ความ
ช่วยเหลือทั้งกำลังใจ และกำลังใจตลอดมา

ท้ายสุดนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และญาติพี่น้อง ที่คอยเป็นแรงผลักดัน ให้กำลังใจ
ในการศึกษาเล่าเรียน คอยอบรม สั่งสอน และสนับสนุนทุนการศึกษา ตลอดจนทุกท่านที่มีส่วน
เกี่ยวข้องในการทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

พัชรภรณ์ กันยาประสิทธิ์

เมษายน 2557

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(6)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	46
อุปกรณ์	46
วิธีการ	48
ผลและวิจารณ์	56
สรุปและข้อเสนอแนะ	79
สรุป	79
ข้อเสนอแนะ	80
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	81
ภาคผนวก	85
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	105

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	องค์ประกอบโดยเฉลี่ยของเส้นขนมนจีน	5
2	ลักษณะทางกายภาพและปริมาณโปรตีนของขนมนจีนแปรรูปที่ระยะเวลาต่างกัน	7
3	ลักษณะทางกายภาพของถ่านกะลามะพร้าว	37
4	การเปรียบเทียบคุณภาพน้ำโรงงานขนมนจีน กับค่ามาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม	57
5	ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำหลังการบำบัดด้วยชุดควบคุม	77
6	ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียหลังการบำบัดด้วยระบบหล้ากรองน้ำเสียโดยใช้รูปถ่านและกกกลมเป็นพืชบำบัด	78
ตารางผนวกที่		
1	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีกับปริมาณสารสีที่เหมาะสม	86
2	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดความขุ่นกับปริมาณสารสีที่เหมาะสม	86
3	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีกับพีเอชของสารสีที่เหมาะสม	87
4	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดความขุ่นกับพีเอชของสารสีที่เหมาะสม	87
5	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีกับปริมาณปูนขาวที่เหมาะสม	87
6	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดความขุ่นกับปริมาณปูนขาวที่เหมาะสม	88
7	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีกับพีเอชของปูนขาวที่เหมาะสม	88
8	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดความขุ่นกับพีเอชของปูนขาวที่เหมาะสม	88
9	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี กับปริมาณถ่านกะลามะพร้าวที่เหมาะสม	89

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
10 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดความชุ่ม กับปริมาณถ่าน กะลามะพร้าวที่เหมาะสม	89
11 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดี กับปริมาณถ่านกะลามะพร้าว ที่เหมาะสม	90
12 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี กับระยะเวลาที่เหมาะสม (ชั่วโมง)	90
13 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดความชุ่ม กับระยะเวลาที่เหมาะสม (ชั่วโมง)	91
14 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดี กับระยะเวลาที่เหมาะสม (ชั่วโมง)	91
15 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี กับระยะเวลาที่เหมาะสม (วัน)	91
16 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดความชุ่ม กับระยะเวลาที่ เหมาะสม (วัน)	92
17 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดี กับระยะเวลาที่เหมาะสม (วัน)	92
18 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี ของปริมาณดินที่เหมาะสม	92
19 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดความชุ่ม ของปริมาณดินที่เหมาะสม	93
20 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดี ของปริมาณดินที่เหมาะสม	93
21 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี ของถ่านกะลามะพร้าวผสมดิน ในอัตราส่วนต่างๆ	94
22 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดความชุ่ม ของถ่านกะลามะพร้าวผสม ดินในอัตราส่วนต่างๆ	94
23 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดี ของถ่านกะลามะพร้าวผสมดิน ในอัตราส่วนต่างๆ	95
24 ไอโซเทอร์มการดูดซับของถ่านกะลามะพร้าว	95
25 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี กับระยะเวลาการเก็บน้ำที่ไหลผ่าน คอลัมน์ทุก 4 ชั่วโมง	96
26 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดความชุ่ม กับระยะเวลาการเก็บน้ำที่ ไหลผ่านคอลัมน์ทุก 4 ชั่วโมง	96

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
27 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดี กับระยะเวลาการเก็บน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ทุก 4 ชั่วโมง	97
28 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดี กับระยะเวลาการเก็บน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ทุกสัปดาห์	97
29 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดความขุ่น กับระยะเวลาการเก็บน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ทุกสัปดาห์	98
30 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดี กับระยะเวลาการเก็บน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ทุกสัปดาห์	98
31 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดี กับการใช้ถ่านกะลามะพร้าวผสมกับดินร่วมกับการปลูกพืช (รูปถ่าย) ทุกสัปดาห์	99
32 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดความขุ่น กับการใช้ถ่านกะลามะพร้าวผสมกับดินร่วมกับการปลูกพืช (รูปถ่าย) ทุกสัปดาห์	99
33 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดี กับการใช้ถ่านกะลามะพร้าวผสมกับดินร่วมกับการปลูกพืช (รูปถ่าย) ทุกสัปดาห์	100
34 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดี กับการใช้ดินอย่างเดียวร่วมกับการปลูกพืช (รูปถ่าย) ทุกสัปดาห์	100
35 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดความขุ่น กับการใช้ดินอย่างเดียวร่วมกับการปลูกพืช (รูปถ่าย) ทุกสัปดาห์	101
36 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดี กับการใช้ดินเพียงอย่างเดียวร่วมกับการปลูกพืช (รูปถ่าย) ทุกสัปดาห์	101
37 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดี กับดินผสมถ่านกะลามะพร้าวร่วมกับการปลูกพืช (ถกกลม) ทุกสัปดาห์	102
38 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดความขุ่น กับดินผสมถ่านกะลามะพร้าวร่วมกับการปลูกพืช (ถกกลม) ทุกสัปดาห์	102
39 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดี กับดินผสมถ่านกะลามะพร้าวร่วมกับการปลูกพืช (ถกกลม) ทุกสัปดาห์	103

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
40	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีกับการใช้ดินอย่างเดียรร่วมกับการปลูกพืช (กกกลม) ทุกสัปดาห์	103
41	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดความชุ่มกับการใช้ดินอย่างเดียรร่วมกับการปลูกพืช (กกกลม) ทุกสัปดาห์	104
42	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดีกับการใช้ดินอย่างเดียรร่วมกับการปลูกพืช (กกกลม) ทุกสัปดาห์	104

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	การหมักข้าว	6
2	การโม่หรือการบดปลายข้าวหัก	8
3	การนึ่งน้ำแป้ง	8
4	การทับน้ำแป้ง	9
5	การนึ่งแป้ง	9
6	การนวดแป้ง	10
7	การกรองหรือการครูดแป้ง	10
8	การโรยเส้นขนมจีน	11
9	การจับเส้นขนมจีน	11
10	กระบวนการผลิตขนมจีน	12
11	โมเดลที่ใช้อธิบาย Electric Double Layer Theory	11
12	แรงระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ที่ระยะห่างต่างๆ	16
13	ผลของการเติมไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามให้กับคอลลอยด์	17
14	กลไกของการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ แบบต่อเชื่อมด้วยโพลิเมอร์	19
15	เครื่องมือที่ใช้ในการทำ Coagulation หรือทดลองจาร์ทดสอบ	24
16	การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว สองชั้น สามชั้น และสี่ชั้น	26
17	การเคลื่อนย้ายโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ	28
18	แบบจำลองพื้นผิวตัวดูดซับของสมการแลงเมียร์	31
19	การดูดซับของแลงเมียร์เมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว	31
20	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์	33
21	กราฟความชันระหว่าง $\log q$ และ $\log C$	34
22	ไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของฟรุนดลิช	35
23	ถ่านกะลามะพร้าว	36
24	ระบบบำบัดน้ำเสียด้วยพืชกรองและหญ้ากรอง	40
25	ระบบบำบัดน้ำเสียด้วยพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม	41
26	เครื่องจาร์ทดสอบ	51

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
27	คอลัมน์บรรจุชั้นวัสดุปลูกสำหรับการทดลองแบบการไหลแบบต่อเนื่อง	54
28	กระบอกบรรจุชั้นวัสดุปลูกของการทดลองโดยใช้เทคนิคการกรองในหน่วย ย่อยขนาดเล็ก	65
29	กราฟมาตรฐานสีแฟลทินัม-โคบอลต์	56
30	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารละลายสารส้มกับร้อยละการบำบัดสีและ ความขุ่น	58
31	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารละลายปูนขาวกับร้อยละการบำบัดสีและ ความขุ่น	59
32	ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับร้อยละการบำบัดสีและความขุ่นเมื่อใช้สารส้ม เป็นสารสร้างตะกอน	60
33	ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับร้อยละการบำบัดสีและความขุ่นเมื่อใช้ปูนขาว เป็นสารสร้างตะกอน	60
34	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี ความขุ่น และซีไอดี กับปริมาณถ่าน กะลามะพร้าว	62
35	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี ความขุ่น และซีไอดีกับระยะเวลา การสัมผัสเป็นชั่วโมง	63
36	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี ความขุ่น และซีไอดีกับระยะเวลา การสัมผัสเป็นวัน	63
37	ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ของการดูดซับด้วยถ่านกะลามะพร้าว	64
38	ไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิชของการดูดซับด้วยถ่านกะลามะพร้าว	65
39	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี ความขุ่น และซีไอดี กับปริมาณดิน	66
40	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี ความขุ่น และซีไอดี ของถ่าน กะลามะพร้าวผสมดินในอัตราส่วนต่างๆ	67
41	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี ความขุ่นและซีไอดี กับระยะเวลา การบำบัดน้ำเสียจากแบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม	68
42	ความสัมพันธ์ระหว่างซีไอดี กับครั้งที่ของการบำบัดตามแบบจำลองพื้นที่ ชุ่มน้ำเทียม	68

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
43	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี ความชุ่ม และซีโอดี กับระยะเวลาการบำบัดน้ำเสียตามแบบจำลองห้ญ้ากรองน้ำเสีย	69
44	ความสัมพันธ์ระหว่างซีโอดีกับครั้งที่ของการบำบัดตามแบบจำลองห้ญ้ากรองน้ำเสีย	70
45	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสี (ก) ความชุ่ม (ข) และซีโอดี (ค) ระหว่างการใช้ดินและถ่านกะลามะพร้าวผสมดินร่วมกับการปลูก	
	ธูปฤาษีกับครั้งที่ของการบำบัด	71
46	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสี (ก) ความชุ่ม (ข) และซีโอดี (ค) ระหว่างการใช้ดินและถ่านกะลามะพร้าวผสมดินร่วมกับการปลูกกกกกลม	
	กับครั้งที่ของการบำบัด	73
47	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสี (ก) ความชุ่ม (ข) และซีโอดี (ค) ระหว่างการปลูกกกกกลมและธูปฤาษีกับครั้งที่ของการบำบัด	75

**การบำบัดน้ำเสียโรงงานขนมจีนด้วยวิธีการสร้างรวมตะกอนร่วมกับระบบหญ้ากรอง
น้ำเสียและพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมของโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ย
อันเนื่องมาจากพระราชดำริ**

**Wastewater Treatment of Thai Fermented Rice Noodle Factory by Utilizing
Coagulation - Flocculation in Combination with the Grass Filtration System and
the Constructed Wetland of The King's Royally Initiated Laem Phak Bia
Environmental Research and Development Project**

คำนำ

โรงงานผลิตขนมจีนเป็นกิจการที่มีอยู่ทั่วประเทศทั้งในระดับอุตสาหกรรมครัวเรือน ขนาดย่อม และขนาดใหญ่ กระบวนการผลิตขนมจีนจำเป็นต้องใช้น้ำปริมาณมาก ผลที่ตามมาคือน้ำเสียจาก กระบวนการผลิตย่อมมีมากตามไปด้วย น้ำทิ้งเหล่านี้มีปริมาณสารอินทรีย์สูง และมีความเป็นกรด สูงด้วย ซึ่งเมื่อระบายออกสู่สิ่งแวดล้อมจึงเป็นสาเหตุสำคัญยิ่งในการก่อให้เกิดปัญหาน้ำเสีย และ ส่งผลต่อระบบนิเวศทางน้ำ รวมทั้งยังเกิดกลิ่นเหม็นรบกวน สร้างความเดือดร้อนให้ชาวบ้านบริเวณ ใกล้เคียง ดังนั้นจึงควรมีกรรมวิธีการบำบัดน้ำทิ้งดังกล่าวก่อนที่จะปล่อยลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติ ปัจจุบันโรงงานผลิตขนมจีนขนาดใหญ่ส่วนมากมีการติดตั้งระบบบำบัดน้ำเสีย และสามารถควบคุม คุณภาพน้ำเสียได้ตามมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งของกรมควบคุมมลพิษ แต่การผลิตขนมจีนในระดับ อุตสาหกรรมครัวเรือนและขนาดย่อมยังทำให้เกิดปัญหาต่อคุณภาพสิ่งแวดล้อมดังกล่าว เนื่องจาก ผู้ผลิตขนมจีนในระดับดังกล่าวขาดแคลนความรู้ เทคโนโลยี และเงินทุนสำหรับการบำบัดน้ำเสีย จึงไม่มีระบบบำบัดน้ำเสีย หรือมีระบบบำบัดน้ำเสียแต่ระบบนั้นไม่มีประสิทธิภาพดีพอ

เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียแบบระบบหญ้ากรองน้ำเสียและระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมของโครงการ ศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ โดยการปลูกพืชน้ำ 2 ชนิด คือ กกกลมและรูปฤาษี ซึ่งเป็นพืชที่เจริญเติบโตง่าย ทนต่อสารพิษสามารถปรับตัวเข้ากับลักษณะ คุณสมบัติของน้ำเสียได้ดี เป็นวิธีบำบัดน้ำเสียที่อาศัยกระบวนการในธรรมชาติ ช่วยเหลือธรรมชาติ ด้วยกันเอง โดยอาศัยพืชและชั้นวัสดุเพาะปลูกช่วยในการกรองหรือฟอกน้ำให้สะอาดขึ้น โดยพืชจะ ดูดซับธาตุอาหารที่มีอยู่ในน้ำเสียนำไปใช้ในการเจริญเติบโตและการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ ที่อยู่ในดินประกอบกัน ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะใช้เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียนี้ในการบำบัดน้ำ

ทั้งจากโรงงานผลิตขนมจีนขนาดครัวเรือน และขนาดเล็กได้ แต่เนื่องจากคุณลักษณะของน้ำเสียจากโรงงานขนมจีนมีความเป็นกรดสูง ค่าพีเอชประมาณ 4 และมีปริมาณสารอินทรีย์ในปริมาณสูง ดังนั้นผู้จัดทำจึงคิดว่าควรหาวิธีที่ลดความเป็นกรดและสารแขวนลงในระดับที่ระบบหมักกรองน้ำเสียและพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมจะรับได้ ประกอบกับช่วยเพิ่มตัวดูดซับมลสารในชั้นวัสดุปลูก แต่ในปัจจุบันยังไม่มีการศึกษาวิจัยเพื่อพัฒนาระบบดังกล่าว ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาการใช้เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียด้วยระบบหมักกรองน้ำเสียและระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมเพื่อบำบัดสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำทิ้งจากโรงงานขนมจีน โดยมีเป้าหมายหลักเพื่อมุ่งการพัฒนาระบบให้เหมาะสมต่อกิจกรรมในระบบโรงงานขนมจีนระดับครัวเรือน และความเป็นไปได้ในการดัดแปลงใช้ในโรงงานขนาดใหญ่

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการลดสีและความขุ่นในน้ำเสียของโรงงานขนมจินด้วยกระบวนการสร้างตะกอนโดยวิธีจาร์เทสต์ (Jar test)
2. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของตัวดูดซับถ่านกะลามะพร้าวในชั้นวัสดุเพาะปลูกของระบบหญ้ากรองน้ำเสียและพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม
3. เพื่อใช้เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียแบบระบบหญ้ากรองน้ำเสียหรือระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมมาบำบัดน้ำเสียจากโรงงานขนมจินได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การตรวจเอกสาร

1. ขนมหิน

อุตสาหกรรมขนมหินในประเทศไทยมีหลายระดับนับตั้งแต่อุตสาหกรรมระดับครัวเรือน มีการผลิตแบบพื้นบ้านซึ่งมีการผลิตไม่มากนัก จนถึงระดับที่มีการนำเอาเครื่องจักรหรือเทคโนโลยีเข้ามาช่วยทำให้ได้ผลผลิตจำนวนมาก ขนมหินเป็นอาหารเส้นกลมสีขาวแกมเหลืองทำจากข้าวเจ้า มีเนื้อสัมผัสเหนียวนุ่ม นิยมบริโภคกันอย่างแพร่หลายในทุกภูมิภาคของประเทศไทย ตั้งแต่ชนบทจนถึงในเมือง มีขายทั่วไปตั้งแต่ตามตลาดสด หาบเร่ แผงลอย จนกระทั่งร้านอาหาร ภัตตาคาร โรงแรม งานบุญ และงานพิธีต่างๆ ประวัติความเป็นมาของขนมหินไม่มีหลักฐานที่ปรากฏแน่ชัดแต่สันนิษฐานว่ามีมาตั้งแต่สมัยกรุงศรีอยุธยา คนไทยในแต่ละภาคจะเรียกชื่อขนมหินต่างกัน ทางภาคเหนือเรียกว่าขนมเส้น ทางภาคใต้แถบจังหวัดสตูลเรียกขนมหินว่าละสา ภาคตะวันออกเฉียงเหนือเรียกขนมหินว่าข้าวปุ้น (งามชื่น, 2541)

1.1 ชนิดของขนมหิน

ขนมหินแบ่งได้เป็นสองชนิดคือขนมหินแป้งสดและขนมหินแป้งหมัก ซึ่งแตกต่างกันตรงขั้นตอนการผลิตว่ามีการหมักข้าวก่อนนำไปบดหรือไม่ ถ้าเป็นขนมหินแป้งสดจะไม่มีหมัก แต่ถ้าเป็นขนมหินแป้งหมักจะมีการหมักข้าวและแป้งประมาณ 3-4 วัน ผลที่ได้จากการหมักคือได้เส้นขนมจีนที่เหนียว มีกลิ่นแป้งหมักขนมจีน สามารถเก็บได้นาน จึงเป็นที่นิยมของผู้บริโภคมากกว่า ขนมหินแป้งสด (ลาวัญย์ และคณะ, 2547) องค์ประกอบโดยเฉลี่ยของเส้นขนมจีนที่ทำจากข้าวเจ้า ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบโดยเฉลี่ยของเส้นขนมเงิน

องค์ประกอบ	ปริมาณ (เปอร์เซ็นต์)
ความชื้น	63.2-81.6
โปรตีน	3.6-7.3
ไขมัน	0.2-1.5
แป้ง	87.8-91.5
เส้นใย	0.5-1.4
เถ้า	0.2-1.5

ที่มา: ลาวัณย์ และคณะ (2547)

1.2 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตขนมเงิน

วัตถุดิบเป็นสิ่งสำคัญในการผลิตเพราะมีผลต่อคุณภาพทางด้านลักษณะทางกายภาพของเส้นขนมเงิน วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตขนมเงินมีดังนี้

1.2.1 ข้าว ข้าวที่นิยมใช้ คือ ข้าวเจ้า ซึ่งเป็นส่วนปลายหรือท่อน หรือข้าวหัก โดยใช้ข้าวที่มีอายุการเก็บมากกว่า 6 เดือน แต่ไม่เกิน 1 ปี เนื่องจากข้าวจะมีความสามารถในการดูดน้ำและพองตัวได้มาก และให้ความคงตัวของแป้งสุกดี การใช้ข้าวใหม่ที่มีอายุการเก็บรักษาน้อยกว่า 6 เดือนทำให้เส้นขนมเงินที่ได้นุ่มและติดกันและได้ปริมาณการผลิตน้อย แต่ถ้าข้าวอายุมากกว่า 1 ปี ขนมเงินที่ได้จะมีสีคล้ำ เส้นแข็งกระด้าง ไม่มีความมันเงา (งามชื่น, 2541) การเลือกปลายข้าวหรือข้าวที่จะมาทำขนมเงินต้องพิจารณาปัจจัยหลายประการ ได้แก่ พันธุ์ข้าว แหล่งที่ปลูก วิธีการปลูก วิธีการสีข้าว และอายุการเก็บ ซึ่งจะมีผลต่อการผลิต สี และลักษณะเนื้อสัมผัสของเส้นขนมเงิน พันธุ์ข้าวที่นิยมใช้ในการทำขนมเงินโดยทั่วไป เช่น พันธุ์เหลืองประทิว เหลืองใหญ่ เหลืองอ่อน บัวใหญ่ และข้าวพิจิตร เป็นต้น และจากการตรวจสอบคุณสมบัติต่างๆ ของพันธุ์ข้าวเหล่านี้พบว่าปริมาณอะไมโลสสูงร้อยละ 27 พันธุ์และข้าวควรปลูกบนที่ดอนที่เป็นทรายจะได้ผลิตภัณฑ์ที่ดีกว่าข้าวที่ปลูกในที่ลุ่ม ผู้ผลิตขนมเงินในปัจจุบันต้องใช้ข้าวหักแทนข้าวเต็มเมล็ด เนื่องจากราคาของข้าวเต็มเมล็ดจะสูงกว่า จึงไม่คุ้มค่ากับการลงทุน

1.2.2 น้ำ น้ำที่ใช้ในการผลิตขนมเงินควรปราศจากสิ่งแขวนลอยมีความกระด้างต่ำถ้าเป็นน้ำบาดาลควรสูบมาพักไว้เพื่อให้ไอออนของเหล็กตกตะกอนก่อนจึงนำไปกรองผ่านทรายแล้วผ่านเครื่องกำจัดน้ำกระด้าง ถ้าเป็นน้ำประปาไม่ควรมิกคลอรีนมากเกินไปจะทำให้ผลิตภัณฑ์มีกลิ่นผิดปกติ

ถ้าใช้น้ำจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสีคล้ำ นอกจากนี้พบว่าน้ำที่ใช้ในการผลิตจะมีผลต่อสีของขนมจีน คือ น้ำที่มีฤทธิ์เป็นกรดเล็กน้อยมีค่าพีเอช 6.4 จะทำให้สีขนมจีนที่ได้มีสีปกติขาวออกเหลือง แต่ถ้าใช้น้ำที่มีฤทธิ์ค่อนข้างเป็นด่าง คือ ค่าพีเอช 7.4 ขนมจีนที่ได้จะมีสีออกเขียวปนและถ้าใช้น้ำค่อนข้างเป็นกรด คือ ค่าพีเอช 5.5 จะได้สีขนมจีนเป็นสีแดงปน

1.2.3 เกลือ ใช้เกลือป่นหรือเกลือเม็ดใส่ขณะโม่แป้ง ปริมาณที่ใช้คือ 7 กิโลกรัม ต่อข้าว 100 กิโลกรัม เกลือจะช่วยป้องกันการบูดของแป้ง นอกจากนี้พบว่า การล้างข้าวด้วยน้ำเกลือร้อยละ 7-8 กำจัดกลิ่นหมักที่ค่อนข้างรุนแรง ซึ่งสามารถกำจัดได้โดยการล้างสัก 2 ครั้ง โดยใช้น้ำเกลือ 2 เท่า ของปริมาณข้าวหรือแป้งแล้วล้างเกลือออกด้วยน้ำเปล่า

1.3 ขั้นตอนการผลิตขนมจีนแป้งหมัก

การผลิตขนมจีนแป้งหมักมีขั้นตอนการผลิต ดังนี้

1.3.1 การหมักข้าว นำปลายข้าวมาล้างด้วยน้ำสะอาด ปราศจากฝุ่นและสิ่งเจือปนใส่ข้าวในภาชนะสำหรับหมัก โดยการตั้งทิ้งไว้กลางแดดหรือในร่ม ถ้าหมักกลางแจ้งข้าวจะเป็นสีขาว ถ้าเอาไว้ในร่มจะได้ข้าวสีเหลืองอมส้ม นิยมหมักปลายข้าวเป็นเวลา 2 วัน ดังภาพที่ 1 ในระหว่างการหมัก ต้องล้างปลายข้าวทุกวัน ส่วนการผลิตระดับพื้นบ้านจะหมักปลายข้าวจนเปื่อยยุ่ยและสามารถนวดได้โดยใช้มือโดยไม่ต้องโม่ การใช้ปลายข้าวหมักจะทำให้เปื่อยยุ่ยเนื่องจากแป้งถูกไฮโดรไลซ์ ได้สารประกอบ Dextrin และ Maltose โดยเอนไซม์อะไมเลสซึ่งอยู่ในแป้งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



ภาพที่ 1 การหมักข้าว

อัตราการใช้ของจุลินทรีย์มีความสำคัญอย่างยิ่ง ต่อการหมักทุกชนิด โดยมีหลักการว่า การเจริญของจุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุของการหมักจะต้องเจริญได้ดีมีอัตราสูงกว่าการเจริญของจุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุของการเน่าเสีย รวมทั้งจุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุของการเกิดกลิ่น รสที่ไม่ต้องการ ดังนั้นการควบคุมสภาพการหมักต้องต่างๆ จึงนับเป็นสิ่งที่สำคัญอย่างยิ่ง การเจริญของจุลินทรีย์โดยทั่วไปต้องการสารอาหารหลักจำพวกโปรตีน คาร์โบไฮเดรต วิตามินและเกลือแร่ การเจริญของแบคทีเรียจะสูงหรือต่ำนั้น ขึ้นอยู่กับปริมาณพลังงานที่แบคทีเรียจะได้รับจากสารอาหาร พลังงานสูงก็จะทำให้การเจริญของเซลล์สูง ในการเจริญเติบโตและการขยายพันธุ์ของแบคทีเรียต้องการสิ่งต่อไปนี้คือ น้ำ พลังงาน ไนโตรเจน คาร์บอน และเกลืออนินทรีย์ จุลินทรีย์แต่ละชนิดมีความต้องการอาหารที่แตกต่างกัน

ข้าวที่ผ่านการหมัก 2-3 วัน จะมีลักษณะทางกายภาพและปริมาณโปรตีนของขนมจีนที่แตกต่างกัน ดังตารางที่ 2 โดยข้าวหมักจะเปื่อยมีสีคล้ำและมีกลิ่นแรง เนื่องจากมีเชื้อ *Lactobacillus sp.* และ *Streptococcus sp.* เจริญเติบโตขึ้นมา เชื่อว่าการหมักจะทำให้เม็ดแป้งดูนุ่มน้ำจะแตกตัวได้ดี เมื่อสัมผัสกับความร้อนเนื่องจากโปรตีนที่มีอยู่รอบเม็ดแป้งสลายตัวไปร้อยละ 2-3 แต่อย่างไรก็ตาม ถ้าหมักนานเกินไปขนมจีนอาจไม่เหนียว เนื่องจากการทำงานที่อยู่ในเอนไซม์ที่มีอยู่ในข้าว การแตกตัวจะทำให้เม็ดแป้งอะไมโลสหลุดออกมาด้วย นอกจากนั้นการที่โปรตีนในแป้งลงทำให้เจลหรือเส้นขนมจีนที่ได้มีความนุ่ม ไม่กระด้างเหมือนเส้นหมี่

ตารางที่ 2 ลักษณะทางกายภาพและปริมาณโปรตีนของขนมจีนแป้งหมักที่ระยะเวลาต่างกัน

เวลาที่ใช้ในการหมัก (วัน)	สี	กลิ่น	เนื้อสัมผัส
1	ขาว	กลิ่นข้าว	ทึบแสง, ชุ่ม ไม่ยืด หยุ่น, เหนียว
2	ขาวปนเหลือง	กลิ่นหมัก	เป็นมันวาว, ยืดหยุ่น , นุ่มมากกว่า
เวลาที่ใช้ในการหมัก		โปรตีน (%)	
(วัน)	ขณะหมัก	ขณะทับ	ขนมจีน
1	5.88	3.68	1.54
2	5.79	3.05	1.46
3	4.98	2.48	1.14

ที่มา: ศุภวรรณและคณะ (2542)

1.4.2 การโม่หรือการบดปลายข้าวห้ก เมื่อหมักปลายข้าวครบสองวัน แล้วล้างปลายข้าวให้สะอาด นำไปบดด้วยโม่หินที่หมุนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า ดังภาพที่ 2 หรือนำไปยี้ผ่านผ้าขาวที่ผูกไว้ที่ปากโอ่งขณะโม่ได้เกลือประมาณร้อยละ 7 ของน้ำหนักข้าว ถ้าข้าวเก่าจะใช้ประมาณร้อยละ 4



ภาพที่ 2 การโม่หรือการบดปลายข้าวห้ก

1.4.3 การนบน้ำแป้ง คือการนำแป้งที่ผ่านการกรองใส่ถุงผ้าด้ายดิบ ดังภาพที่ 3 เพราะมีความเหนียวทนทาน มีช่องว่างระหว่างเส้นใย ตั้งทิ้งไว้ 1 คืน เพื่อให้แป้งตกตะกอน เมื่อตกตะกอนแล้ว รินน้ำใสๆ ทิ้งไว้ ก่อนที่จะนำไปทับน้ำเพื่อให้แป้งแข็งต่อไป



ภาพที่ 3 การนบน้ำแป้ง

1.4.4 การทบน้ำแป้ง การทบน้ำแป้งเป็นการกำจัดน้ำส่วนเกินออกไป โดยการนำแป้งที่ตกตะกอนและรินน้ำใสออกแล้ว มาใส่ถุงผ้าด้ายดิบ ปิดปากถึงให้แน่น แล้วทบด้วยของหนัก(นิยมใช้หินในการทบ) ดังภาพที่ 4 ทิ้งไว้ 1 คืน เพื่อให้ น้ำที่ติดอยู่กับไหลออกมา ทำให้แป้งแห้งเร็วขึ้น ในขั้นตอนนี้ต้องหมั่นดูแลเปิดผ้าประมาณ 2-3 ครั้ง เพื่อให้เนื้อแป้งแห้งเร็วขึ้น แป้งที่ได้จากขั้นตอนนี้มีความชื้นประมาณร้อยละ 42-44



ภาพที่ 4 การทบน้ำแป้ง

1.4.5 การนึ่งแป้ง แป้งที่ผ่านการทบน้ำแล้วจะเป็นก้อนแข็งเนื้อแป้งเกาะกันแน่น นำก้อนแป้งนี้ไปต้มหรือนึ่งให้สุกเฉพาะผิวรอบนอก ดังภาพที่ 5 ต้มแป้งให้สุกเข้าไปประมาณ 1-2 เซนติเมตร ของก้อนแป้ง ถ้าใช้ข้าวสาร 1 ถัง เมื่อไม่ข้าวเป็นแป้งแล้วจะผ่านการทบแล้ว การนำมาทำให้แป้งสุกนั้นแป้งจะสุกจากผิวเข้าไปประมาณครึ่งนิ้วในขั้นตอนนี้จะมีผลต่อความเหนียวของแป้งขนมจีน ถ้าแป้งสุกมากหรือน้อยไปขนมจีนจะขาดได้ง่ายและไม่สามารถจับเป็นเส้นได้



ภาพที่ 5 การนึ่งแป้ง

1.4.6 การนวดแป้ง การนวดแป้งเป็นการผสมแป้งดิบและแป้งสุกที่ผ่านขั้นตอนการทำให้สุกเป็นบางส่วนเข้าด้วยกัน นอกจากนี้ยังทำให้เม็ดแป้งแตก ทำให้แป้งมีความเหนียวมากขึ้น อาจนวดด้วยมือหรือนวดด้วยเครื่อง ดังภาพที่ 6 นวดให้เข้ากันดี ถ้าแป้งแห้งเกินไปให้เติมน้ำลงไป ขั้นตอนนี้อาจเรียกว่า “การนวดแป้ง” แป้งที่นวดแล้วจะมีความชื้นประมาณร้อยละ 70-75



ภาพที่ 6 การนวดแป้ง

1.4.7 การกรองหรือการครูดแป้ง การกรองหรือการครูดแป้งเป็นขั้นตอนที่จะกำจัดเม็ดแป้งที่เหลืออยู่ให้หมดไป ทำให้ไม่มีปัญหาในการโรยเส้น การกรองนิยมใช้ผ้าขาวบางกรองโดยการนำแป้งที่นวดหรือตีจนละเอียดแล้วเทใส่ในผ้าขาวบาง รวบชายผ้าเข้าหากัน และหมุนผ้าเป็นเกลียว หรือใช้วิธีบีบก็ได้ เพื่อให้แป้งไหลผ่านผ้าออกมา จะได้แป้งที่เนื้อละเอียดไม่มีเม็ดแป้งปนอยู่ ดังภาพที่ 7 และพร้อมที่จะนำไปโรยเส้นต่อไป



ภาพที่ 7 การกรองหรือการครูดแป้ง

1.4.8 การโรยเส้นขนมจีน โดยการนำแป้งที่นวดและกรองแล้วใส่ลงในถัง ซึ่งถึงนั้นเป็นถังเก็บแป้งพร้อมกับมีเครื่องมือในการโรยเส้นติดอยู่ด้านข้างของถัง เป็นลักษณะคล้ายก๊อกน้ำใช้มอเตอร์ในการบีบเส้นขนมจีน ดังภาพที่ 8 เมื่อเดินเครื่องน้ำแป้งจะผ่านแวนลงในหม้อที่มีน้ำเดือดอยู่ เมื่อเส้นสุกแล้ว โดยการสังเกตจากเส้นที่ลอยขึ้น จากนั้นใช้กระชอนหรือตะกร้าพลาสติกช้อนขึ้นไปแช่ในน้ำเย็น ในขณะที่โรยเส้นควรรักษาอุณหภูมิของน้ำไว้ที่ 90-95 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 8 การโรยเส้นขนมจีน

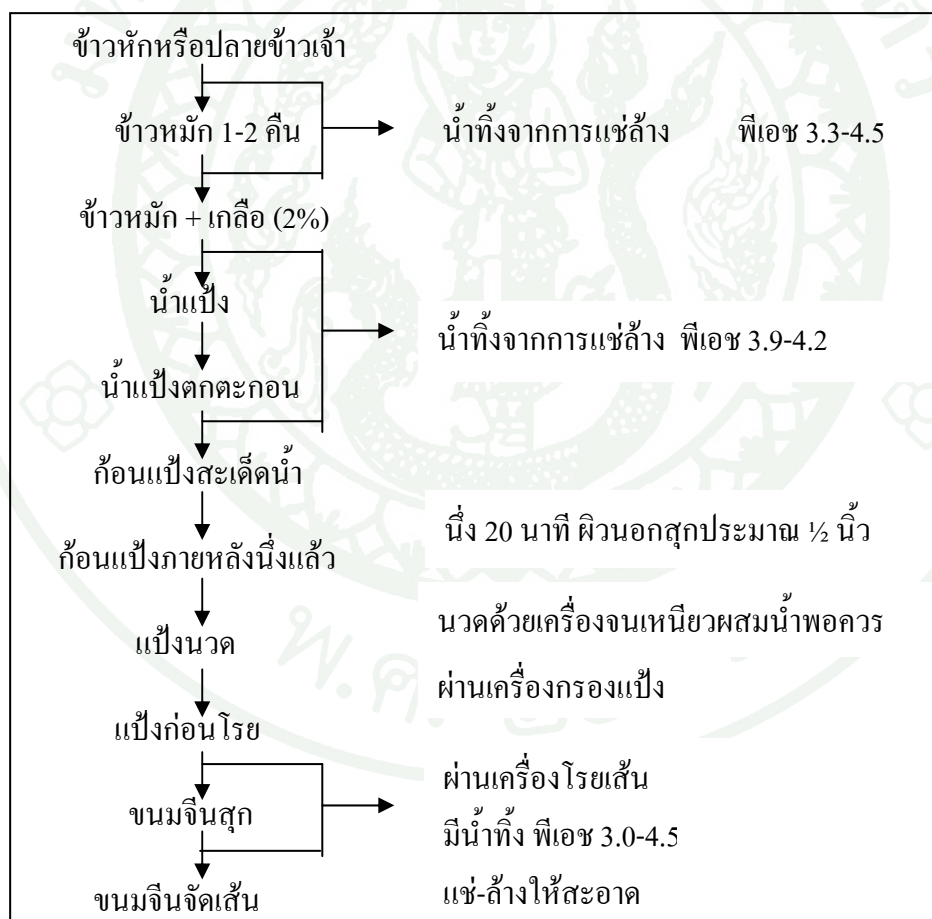
1.4.9 การจับเส้น จับเส้นขนมจีนที่แช่อยู่ในน้ำ วิธีจับเส้นขนมจีนทำโดยใช้มือจับขนมจีนขึ้นมาจากน้ำ เรียงเส้นขนมจีนให้เป็นเส้นซ้อนกัน โดยให้เรียงกันประมาณ 7-8 เส้น แล้วพันเส้นขนมจีน ที่นิ้วชี้หรือนิ้วหัวแม่มือ ให้เส้นขนมจีนห้อยลงตามขนาดของจับที่ต้องการ ดังภาพที่ 9 วางขนมจีนในลักษณะคว่ำมือลงในภาชนะ ทิ้งให้สะเด็ดน้ำแล้วนำมารับประทานได้



ภาพที่ 9 การจับเส้นขนมจีน

1.5 น้ำเสียจากกระบวนการผลิตขนมจีน

กระบวนการผลิตขนมจีนมีทั้งในระดับครัวเรือน อุตสาหกรรมขนาดกลาง และอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ จากขั้นตอนการผลิตขนมจีนนั้น ต้องใช้น้ำจำนวนมากในกระบวนการผลิต คือใช้น้ำในการล้างทำความสะอาด การแช่ข้าว การโม่เปียก การคั้นน้ำ การนึ่ง และการล้างเครื่องอุปกรณ์การผลิต ทำให้มีน้ำทิ้งปริมาณมากในทุกขั้นตอนการผลิตดังภาพที่ 10 โดยน้ำทิ้งดังกล่าวมีแป้งเป็นองค์ประกอบหลัก ส่งผลให้ค่าปริมาณสารอินทรีย์ที่วัดอยู่ในรูปความต้องการออกซิเจนทางเคมี (COD) สูงมากกว่า 20,000 mg/L นอกจากนั้นยังมีการใส่สารเคมีเพื่อเพิ่มคุณภาพในการผลิต ซึ่งสารเคมีที่ใช้ได้แก่ เกลือ น้ำเสียที่ใช้ในกระบวนการผลิตจะถูกทำให้ไหลมารวมกันแล้วไหลลงสู่ระบบบำบัดของแต่ละโรงงาน นอกจากนี้ น้ำเสียจะมีลักษณะสีขาวขุ่น มีกลิ่นเหม็นเปรี้ยวจากกระบวนการหมักของจุลินทรีย์ ค่าความเป็นกรด-ด่าง อยู่ระหว่าง 3.3-4.5 สำหรับปริมาณน้ำเสียต่อหน่วยการผลิตที่มีค่าไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิต



ภาพที่ 10 กระบวนการผลิตขนมจีน

ที่มา: สุมนา และ พุทธพร (2552)

2. การสร้างและการรวมตะกอน (Coagulation and Flocculation)

2.1 การสร้างตะกอน (Coagulation)

เป็นกระบวนการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ (Destabilization) เพื่อให้คอลลอยด์รวมตัวและจับกันเป็นฟล็อก ซึ่งสามารถทำได้โดยการลดแรงผลักระหว่างอนุภาคโดยทางใดทางหนึ่ง โดยการเติมสารเคมี เช่น สารส้ม สารประกอบเหล็กบางตัว เพื่อสะเทินประจุหรือยึดจับอนุภาคในน้ำ พร้อมกับการกวนผสมอย่างรวดเร็วเพื่อกระจายสารสร้างตะกอนให้ทั่วถึง

2.2 การรวมตะกอน (Flocculation)

เป็นกระบวนการที่ทำให้อนุภาคคอลลอยด์ที่ถูกทำลายเสถียรภาพแล้วในกระบวนการสร้างตะกอน เคลื่อนที่มากระทบหรือสัมผัสกัน เพื่อรวมตัวเป็นกลุ่มตะกอนขนาดใหญ่ที่ตกตะกอนได้ง่าย ถ้ามีการสัมผัสระหว่างอนุภาคแต่ไม่จับตัวกัน ไม่ถือว่าเป็นเกิดการรวมตะกอน

2.3 คอลลอยด์

อนุภาคคอลลอยด์ คือ ความขุ่นหรือสารแขวนลอยที่มีขนาดอยู่ในช่วง 10^{-6} จนถึง 10^{-3} มม. เนื่องจากมีขนาดเล็กมากจึงไม่สามารถตกตะกอนได้ด้วยน้ำหนักตัวเองภายในเวลาจำกัด

ระบบคอลลอยด์ หมายถึง ระบบที่ประกอบด้วยอนุภาคขนาดเล็กๆ กระจายอยู่ทั่วไปในสารตัวกลางซึ่งมีลักษณะเป็นเนื้อเดียว (Continuous Medium) อนุภาคต่างๆ เรียกว่า Dispersed Phase ส่วนสารตัวกลางเรียกว่า Dispersing Phase หรือ Dispersed Medium ระบบคอลลอยด์อาจเกิดขึ้นจากการรวมตัวของสารทั้ง 3 สถานะได้

ระบบคอลลอยด์อาจจำแนกตามแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง Dispersed Phase และ Dispersing Phase ในกรณีที่ Dispersing Phase เป็นน้ำและแรงยึดเหนี่ยวมีกำลังอ่อน เรียกว่า Hydrophobic (ไม่ชอบน้ำ) ถ้าแรงยึดเหนี่ยวมีกำลังแรง เรียกว่า Hydrophilic (ชอบน้ำ) คอลลอยด์แบบไฮโดรฟิลิก แยกออกจากน้ำได้ยากกว่าคอลลอยด์แบบไฮโดรโฟบิก เนื่องจากมีโมเลกุลของน้ำห่อหุ้มอยู่ จึงต้องใช้แรงมากในการบังคับให้อนุภาคต่างๆ เกาะจับกันเป็นกลุ่มก้อน เพราะโมเลกุลของน้ำเป็นเสมือนสิ่งกีดขวางที่ป้องกันไม่ให้อนุภาคต่างๆ เข้าใกล้และจับตัวกัน (มันสิน, 2542)

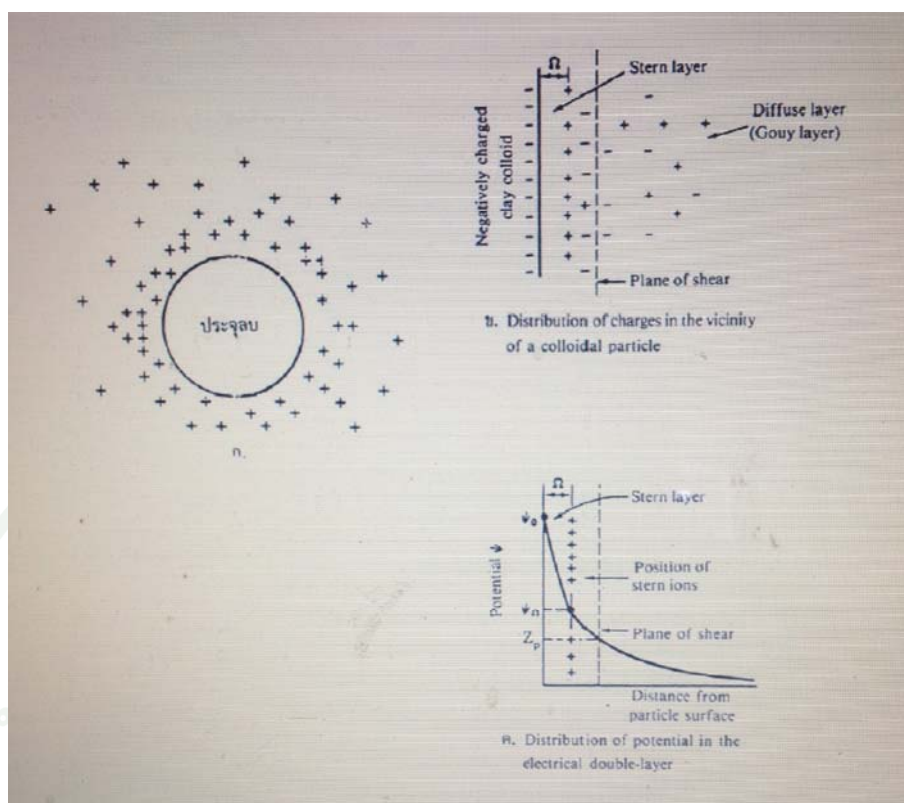
2.4 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์

อนุภาคคอลลอยด์ที่พบในงานด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมมักจะมีประจุลบและเป็นอนุภาคแบบไฮโดรโฟบิก ได้แก่ ความขุ่นในน้ำผิวดิน ส่วนอนุภาคประจุบวกมักเป็นอินทรีย์สารซึ่งเป็นอนุภาคแบบไฮโดรฟิลิก การที่อนุภาคคอลลอยด์มีประจุไฟฟ้า ทำให้มีแรงผลักระหว่างอนุภาค จึงเป็นสาเหตุทำให้อนุภาคต่างๆ กระจายอยู่ในน้ำ โดยไม่รวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนซึ่งเรียกว่า ฟล็อก (Floc) ประจุไฟฟ้าจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้คอลลอยด์มีเสถียรภาพ

ทฤษฎีที่ใช้อธิบายคุณสมบัติทางไฟฟ้าของคอลลอยด์ คือ Electric Double Layer Theory พิจารณาจากประจุลบของอนุภาคสามารถสร้างแรงดึงดูดที่ทำให้ไอออนประจุบวก ที่อยู่ในน้ำวิ่งเข้ามาหาได้ จึงทำให้ไอออนประจุบวกมาแออัดกันอยู่ใกล้ผิวอนุภาคคอลลอยด์ (ภาพที่ 11 ก) ไอออนบวกนี้เรียกว่า Counter Ion ความหนาแน่นของไอออนบวกจะสูงที่สุดในบริเวณที่ติดกับอนุภาคคอลลอยด์ และลดน้อยลงตามระยะห่างจากอนุภาค เนื่องจากศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากประจุลบของอนุภาคคอลลอยด์ ซึ่งมีค่าสูงสุดที่ผิว (Nernst Potential) และน้อยลงเมื่อห่างออกไป (ภาพที่ 11 ข) การกระจายตัวของไอออนบวกและลบจะเป็นไปตามปกติ เมื่อศักย์ไฟฟ้าเท่ากับศูนย์ ซึ่งแสดงว่าไม่อยู่ภายใต้อำนาจไฟฟ้าของคอลลอยด์

ตามทฤษฎีของ Double Layer เชื่อว่าไอออนบวกชั้นในสุดไม่สามารถเข้าถึงผิวของอนุภาคคอลลอยด์ เพราะไอออนบวกมักมีโมเลกุลของน้ำห่อหุ้มอยู่ ระยะห่างระหว่างอนุภาคคอลลอยด์และจุดศูนย์กลางของไอออนที่อยู่ใกล้ที่สุด (ขึ้นอยู่กับขนาดของไอออน) มีชั้นบางกั้นขวางอยู่เรียกว่า Stern Layer มีความหนาแน่นเท่ากับ Ω ซึ่งถือว่าเป็นชั้นในสุดของทฤษฎีนี้ ศักย์ไฟฟ้าที่ชั้นบางนี้มีค่าเท่ากับ Stern Potential ส่วนเปลือกชั้นนอกเรียกว่า ชั้นกระจาย (Diffuse Layer) คลอบคลุมจากเปลือกชั้นในไปถึงตำแหน่งที่อนุภาคคอลลอยด์หมดอำนาจไฟฟ้าพอดี (ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับศูนย์) (Kaeding, 1992)

ศักย์ไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์ที่สามารถคำนวณได้ เรียกว่า ซีตาโพเทนเชียล (Zeta Potential; Z_p) ซึ่งหมายถึงศักย์ไฟฟ้าที่ผิวนอกสุดของน้ำที่เคลื่อนที่ไปพร้อมกับอนุภาคคอลลอยด์ผิวนอกสุดเรียกว่า Plane Shear (ภาพที่ 11 ค) ซึ่งเชื่อกันว่าอยู่นอก Stern Layer แต่ยังคงอยู่ในชั้นกระจาย (Diffuse Layer) ซีตาโพเทนเชียลสามารถบอกถึงเสถียรภาพของคอลลอยด์ได้ เช่น ระบบคอลลอยด์ที่มีเสถียรภาพต่ำ จะมีซีตาโพเทนเชียลต่ำ และทำให้รวมตัวเป็นฟล็อกได้ง่าย



- หมายเหตุ ก) แสดงไอออนประจุบวกมาแออัดกันอยู่ใกล้ผิวอนุภาคคอลลอยด์
 ข) การกระจายตัวของไอออนประจุบวกและลบใกล้ๆ อนุภาคคอลลอยด์
 ค) การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้าตามทฤษฎี Double layer

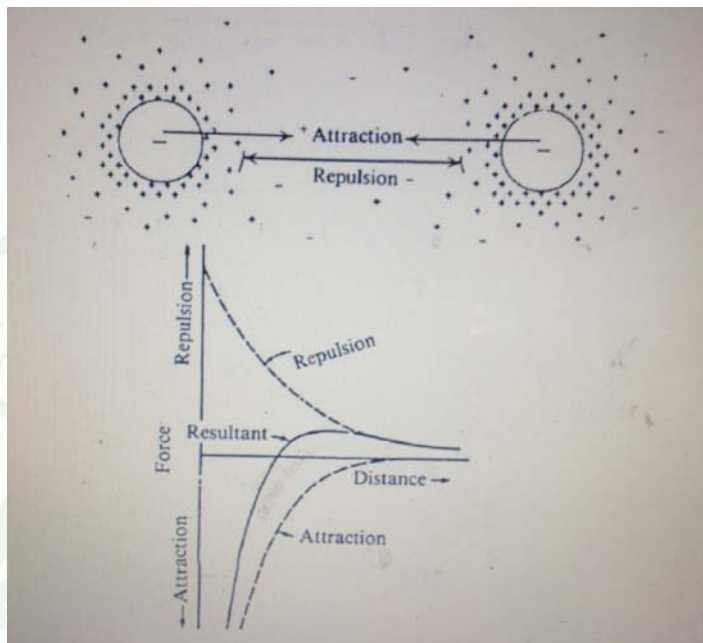
ภาพที่ 11 โมเดลที่ใช้อธิบาย Electric Double Layer Theory

ที่มา: มั่นสิน (2542)

2.5 เสถียรภาพของคอลลอยด์

เสถียรภาพของคอลลอยด์ขึ้นอยู่กับแรงดูดและแรงผลักระหว่างอนุภาค แรงดูดระหว่างอนุภาคเรียกว่า แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van Der Waals Force) ซึ่งเป็นแรงอ่อนที่มีอำนาจเมื่ออนุภาคอยู่ใกล้กัน ส่วนแรงผลักระหว่างอนุภาคเป็นผลมาจากประจุไฟฟ้าของอนุภาคหรือซีตาโพเทนเชียล ถ้าแรงผลักมากกว่าแรงดูดระบบคอลลอยด์มีเสถียรภาพ สามารถแขวนลอยในน้ำได้โดยไม่ตกตะกอน ผลลัพธ์ระหว่างอนุภาคทั้งสองชนิด ขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างอนุภาค (ภาพที่ 12) จะเห็นได้ว่าแรงดูดมีอำนาจเหนือกว่าแรงผลักก็ต่อเมื่ออนุภาคคอลลอยด์เคลื่อนที่เข้ามาใกล้กันมากๆ โดยปกติแล้ว

แรงผลักซึ่งเกิดจากซีตาโพเทนเชียล ไม่เปิดโอกาสให้อนุภาคต่างๆ เข้ามาใกล้กันจนเกิดการดูดเข้าหากัน (มันสิน, 2542)



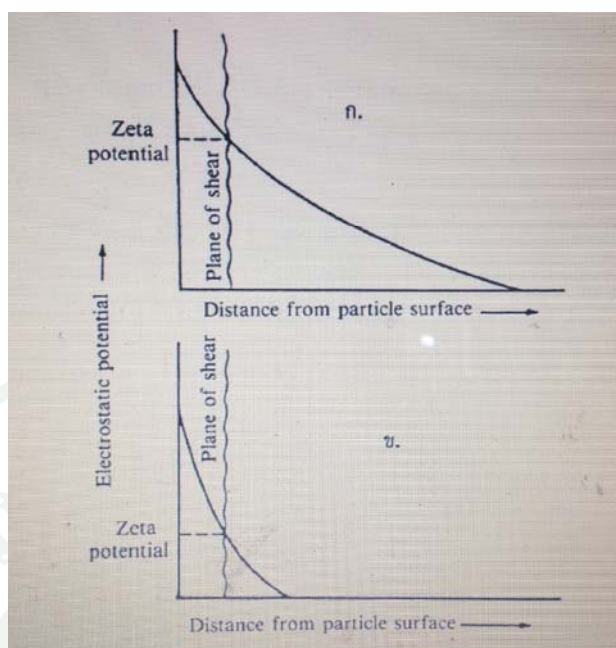
ภาพที่ 12 แรงระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ที่ระยะห่างต่างๆ

ที่มา: มันสิน (2542)

2.6 การทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์

การทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์สามารถกระทำได้โดยอาศัยกลไก 4 แบบ คือ

2.6.1 โดยการลดความหนาของชั้นกระจาย เป็นการเพิ่มจำนวนของไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามกับประจุของอนุภาค ซึ่งเป็นการเพิ่มจำนวน Counter Ion ในชั้นกระจาย ทำให้ชั้นกระจายมีความหนาลง และทำให้ซีตาโพเทนเชียลลดลงตามไปด้วย (ภาพที่ 13) ลักษณะเช่นนี้เนื่องจากมีประจุบวกเข้าไปออกกันอยู่ใกล้ผิวของอนุภาคคอลลอยด์เพิ่มขึ้น ทำให้อำนาจประจุลบของอนุภาคไม่สามารถส่งออกได้ไกลเท่าเดิม



ก. ก่อนเติมอออน

ข. หลังจากการเติมอออนแล้ว

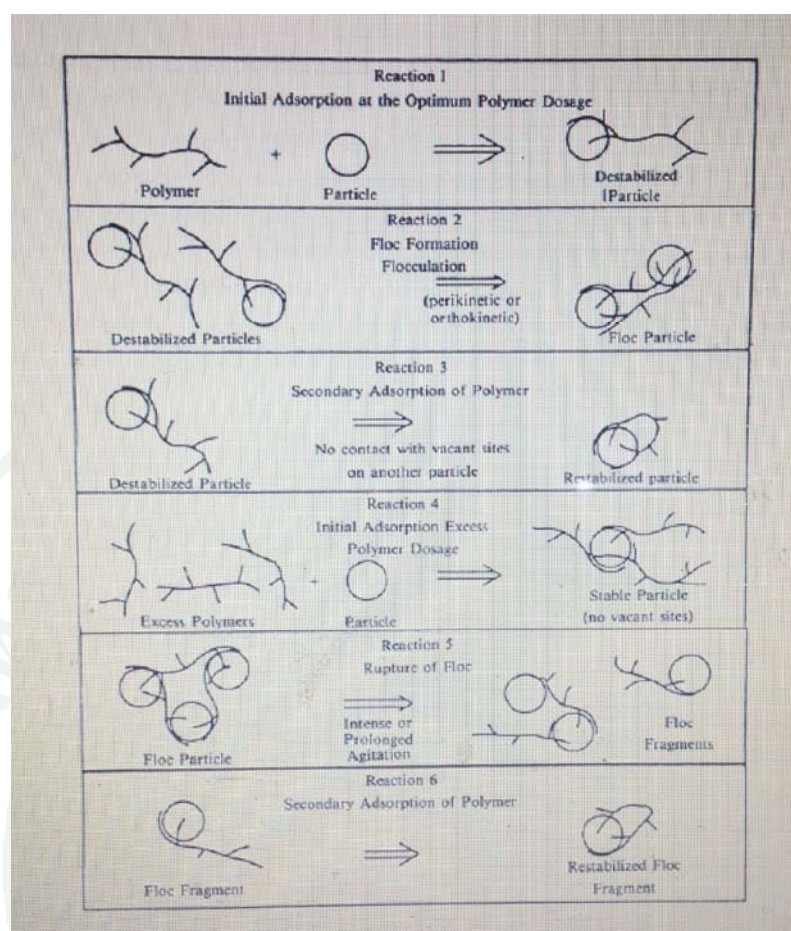
ภาพที่ 13 ผลของการเติมอออนที่มีประจุตรงกันข้ามให้กับคอลลอยด์

2.6.2 โดยการดูดติดผิวและทำลายประจุไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์ (Adsorption/ Charge Neutralization) สารเคมีบางชนิดมีประจุไฟฟ้าตรงกันข้ามกับคอลลอยด์ จึงสามารถดูดติดบนผิวของอนุภาคคอลลอยด์ได้ การดูดติดผิวจะมีผลในทางลดอำนาจศักย์ไฟฟ้าและทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์

2.6.3 โดยห่อหุ้มอนุภาคคอลลอยด์ไว้ในผลึกสารประกอบที่สร้างขึ้น (Sweep Coagulation) ถ้าเติมสารประกอบเกลือของโลหะบางชนิดลงไปในน้ำปริมาณที่พอเพียงจะมีการตกผลึกเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว อนุภาคคอลลอยด์อาจเป็นแกนในของผลึกดังกล่าวเพื่อให้ผลึกมีขนาดใหญ่หรืออาจจับตัวรวมกับผลึก ลักษณะดังกล่าวอาจถือว่าการเพิ่มขนาดหรือน้ำหนักให้กับอนุภาคคอลลอยด์ ทำให้คอลลอยด์สูญเสียเสถียรภาพและสามารถตกตะกอนได้ เช่น การเติมสารส้มจะทำให้เกิดผลึก $Al(OH)_3$ ซึ่งเป็นผลึกสารที่ไม่ละลายน้ำ

กลไกที่ใช้หลักการอินทรีย์ในการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ มีลักษณะที่แตกต่างจากกลไก 2 แบบแรก คือ ปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหมาะสม แปรผกผันกับความเข้มข้นของคอลลอยด์ กล่าวคือน้ำที่มีความขุ่นน้อยต้องใช้สารสร้างตะกอนจำนวนมากจึงจะเกิดการสร้างตะกอนได้ดี ในทางตรงกันข้ามน้ำที่มีความขุ่นสูงอาจใช้สารสร้างตะกอนน้อยกว่า เหตุผลก็คือน้ำที่มีความขุ่นต่ำจะมีโอกาสสัมผัสระหว่างอนุภาคน้อย ดังนั้นแม้ว่าการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ จะเกิดขึ้นแล้วก็ตาม การสร้างตะกอนอาจเกิดไม่ได้ดีเท่าที่ควร การใช้สารสร้างตะกอนปริมาณสูงก็เพื่อสร้างผลึกจำนวนมากๆ สำหรับเป็นเป้าสัมผัสให้กับอนุภาคคอลลอยด์ แต่ในกรณีที่น้ำมีความขุ่นสูง โอกาสสัมผัสย่อมมีมาก จึงไม่จำเป็นต้องอาศัยเป้าสัมผัสจากภายนอกมาก

2.6.4 โดยการใช้สารอินทรีย์โพลิเมอร์เป็นสะพานเชื่อมอนุภาคคอลลอยด์ (Polymer Bridging) สารอินทรีย์โพลิเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้นและที่มีตามธรรมชาติมักมีโมเลกุลขนาดใหญ่ ประจุไฟฟ้าอาจเป็นบวก ลบหรือไม่มีประจุเลยก็ได้ กลไกการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ด้วยสารอินทรีย์ต่างๆ สามารถอธิบายได้ด้วย โมเดลที่เรียกว่า Polymer Bridging (ภาพที่ 14) โดยโมเลกุลของสารโพลิเมอร์สามารถเกาะติดบนอนุภาคคอลลอยด์ได้หลายตำแหน่งดังแสดงในปฏิกิริยาที่ 1 ของภาพที่ 14 การเกาะติดอาจเป็นผลเนื่องมาจากประจุที่ต่างกันของโพลิเมอร์และคอลลอยด์ หรือเป็นแรงของปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างประจุที่เหมือนกันของโพลิเมอร์และคอลลอยด์ อนุภาคที่มีโพลิเมอร์เกาะติดอยู่โดยมีปลายอิสระสำหรับเกาะบนอนุภาคอื่น ถือได้ว่าเป็นอนุภาคที่สูญเสียเสถียรภาพแล้ว (Destabilized Particle) อนุภาคดังกล่าวนี้สามารถจับตัวกับอนุภาคอื่นๆ โดยมีโพลิเมอร์เป็นสะพานเชื่อม (ปฏิกิริยาที่ 2) การต่อเชื่อมด้วยโพลิเมอร์จะเกิดขึ้นได้ครบเท่าที่มีโพลิเมอร์และตำแหน่งว่างบนผิวอนุภาค ถ้าปลายอิสระของโพลิเมอร์ไม่มีที่จะเกาะจับบนอนุภาคอื่น ปลายอิสระก็จะเกาะจับบนอนุภาคเดิม (ปฏิกิริยาที่ 3) ทำให้เสียประโยชน์ 2 ประการคือ ทำให้ไม่มีปลายอิสระไว้จับอนุภาคอื่น และทำให้มีตำแหน่งว่างบนอนุภาคสำหรับยึดเกาะน้อยลง อนุภาคคอลลอยด์ที่ถูกสารโพลิเมอร์ยึดเกาะหลายตำแหน่งจนไม่มีปลายอิสระและไม่มีที่ว่างเรียกว่า อนุภาคที่มีเสถียรภาพกลับคืนมาใหม่ (Restabilized Particle) การใช้โพลิเมอร์มากเกินไปอาจก่อให้เกิดผลเสียได้ เพราะโพลิเมอร์หลายโมเลกุลจะไปเกาะจับอยู่บนอนุภาคคอลลอยด์จนกระทั่งไม่มีที่ว่างบนอนุภาคสำหรับเป็นที่จับของปลายอิสระของโพลิเมอร์ที่อยู่บนอนุภาคอื่นๆ (ปฏิกิริยาที่ 4) อนุภาคคอลลอยด์ที่เกิดขึ้นจึงเป็นแบบที่มีเสถียรภาพ การกวนน้ำแรงเกินไปหรือนานเกินไปอาจก่อให้เกิดผลเสียได้ เนื่องจากฟล็อกที่เกิดขึ้นแล้วแตกออกเป็นส่วนๆ (ปฏิกิริยาที่ 5) และอาจทำให้ปลายอิสระของโพลิเมอร์เกาะจับบนอนุภาคอันเดิม เสถียรภาพของคอลลอยด์จึงกลับคืนมาใหม่อีก (ปฏิกิริยาที่ 6)



ภาพที่ 14 กลไกของการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ แบบต่อเชื่อมด้วยโพลิเมอร์

ที่มา: Weber (1972)

2.7 สารเคมีที่ใช้ในการสร้างตะกอน

สารเคมีที่ใช้ในการสร้างตะกอนแต่ละชนิดมีความเหมาะสมสำหรับทำลายอนุภาคคอลลอยด์ในน้ำแต่ละชนิดที่ต่างกัน นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงปริมาณที่ใช้ ลักษณะของกลุ่มตะกอนที่เกิดขึ้น ความเร็วของการตกตะกอนและความยากง่ายในการใช้งานอีกด้วย โดยสารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอนนั้นมีด้วยกันหลายชนิด เช่น สารส้ม (Alum , $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) เพอร์ริกคลอไรด์ (FeCl_3) ปูนขาว ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) เป็นต้น (Packham, 1992) แต่ในงานวิจัยชิ้นนี้ผู้วิจัยได้เลือกใช้สารสร้างตะกอน 2 ชนิด คือ

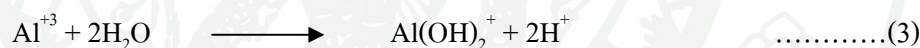
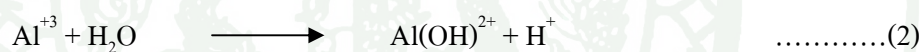
2.7.1 สารส้ม (Aluminium sulphate, Alum)

สารส้มปริมาณที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วงพีเอช 5.5-8.5 สารส้มมีสภาพกรดจึงทำให้พีเอชของน้ำมีพีเอชลดต่ำลง ในระบบบำบัดน้ำเสีย น้ำเสียมักมีค่าสภาพด่างสูงเพียงพอที่จะทำลายฤทธิ์กรดของสารส้มที่เติมลงไป ซึ่งสารส้มปริมาณที่เหมาะสมคือ 30-40 มก./ล.

สารส้ม (Aluminium sulphate, Alum) Alum มีสูตรโมเลกุล $Al_2(SO_4)_3 \cdot xH_2O$ โดยที่ x มีค่าเท่ากับ 14.3 หรือ 18 ซึ่งแตกตัวในน้ำได้อิออนบวกดังสมการที่ (1)



เมื่อ Alum ละลายน้ำ อลูมิเนียมไอออนจะถูกล้อมรอบด้วยโมเลกุลของน้ำได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง OH^- ไฮโดรไลซิสของ Al^{+3} จะเกิดขึ้นทันทีที่เกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอลูมิเนียมกับไฮดรอกไซด์ไอออน ดังสมการที่ (2) (3) และ (4)



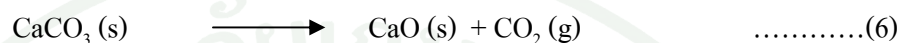
ในกรณีที่ความเข้มข้นของสารส้มสูงกว่าความเข้มข้นที่จุดอิ่มตัว (Saturation Point) ไฮโดรไลซิสจะดำเนินต่อไปจนได้ผลของปฏิกิริยาสุดท้ายเป็นผลึก $Al(OH)_3$ ดังสมการที่ (5)



2.7.1 ปูนขาว

ปูนขาวหรือไลม์ (lime) มีชื่อเรียกทางเคมีว่าแคลเซียมออกไซด์ และมีสูตรทางเคมีคือ CaO ผลิตจากแคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากการเผาวัสดุใดๆ ที่มีส่วนผสมของหินปูน (แคลเซียมคาร์บอเนต, $CaCO_3$) เป็นองค์ประกอบ ณ อุณหภูมิมากกว่า 825 องศาเซลเซียส เรียก

กระบวนการเผาไหม้ calcination และจะมีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ออกมา ปูนขาวนี้สามารถทำปฏิกิริยากับ CO_2 ที่อยู่ในอากาศ โดยอาศัยระยะเวลาที่นานพอ กลับกลายเป็น CaCO_3 ได้ ดังนั้นการเก็บรักษาต้องระวังไม่ให้อากาศสามารถผ่านเข้าไปในภาชนะที่ใช้จัดเก็บได้ ลักษณะโดยทั่วไปเป็นผงสีขาว มีฤทธิ์เป็นด่าง กัดกร่อนได้ ปฏิกิริยา Calcination ของปูนขาวดังสมการที่ (6)



ปูนขาวแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ชนิดแรกคือ หินปูนบดละเอียด จะเป็นพวกหินฝุ่น จืดละเอียดอ่อน เปลือกหอยบดละเอียด ทั้งหมดนี้มีคุณสมบัติทางเคมีอย่างเดียวกัน เป็นปูนขาวตัวหลักที่เกษตรกรสามารถนำไปใช้แก้ไขดินเป็นกรดได้ มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ปูนขาวชนิดที่สองคือ ปูนมาร์ลเป็นหินปูนที่ผุกร่อนตามธรรมชาติ เกิดการสลายเป็นก้อนเล็กๆ มีความอ่อนตัวสูงกว่าเดิม เกิดตามบริเวณภูเขาหินปูนในประเทศไทยมีพบที่จังหวัดลพบุรีและสระบุรี หลังจากหินปูนผุพังแล้วจะทับถมเป็นชั้นๆ อยู่ใต้ดิน บริเวณที่เป็นชั้นของปูนมาร์ลอยู่ใกล้ผิวดินจะถูกนำมาใช้ในการเกษตร มีแร่ธาตุพวกแคลเซียมมาก สำหรับวิธีการใช้ปูนขาวแต่ละชนิดจะมีขั้นตอนวิธีการใช้ที่แตกต่างกันออกไป

การนำปูนขาวมาใส่ลงในดินหรือน้ำก็คือ เมื่อสภาพของดินและน้ำมีความเป็นกรดสูง การใส่ปูนขาวลงไปเป็นการแก้ปัญหาเพื่อลดระดับความรุนแรงของกรดในดินและน้ำ ทำให้ธาตุอาหารพืชละลายได้ดี รวมทั้งช่วยเพิ่มธาตุอาหารแคลเซียมและแมกนีเซียมให้แก่พืชไปในตัวด้วย นอกจากนั้นแล้วการใส่ปูนขาวลงไปก็ยังเป็นการลดความรุนแรง หรือฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุของโรคพืช โรคสัตว์ ในพื้นที่นั้นๆ ได้

โดยทั่วไปราคาของปูนขาวเมื่อเทียบกับสารเคมีชนิดอื่นๆ ถือว่ามีราคาไม่แพงมากนักแต่สามารถใช้เป็นสารตั้งต้นเพื่อผลิตสารเคมีชนิดอื่นๆ ได้อีกมากมาย เช่น การผลิตแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) จากการนำปูนขาวทำปฏิกิริยากับน้ำดังสมการที่ (7)



Ca(OH)_2 มีสมบัติเป็นเบสแก่ เมื่ออยู่ในน้ำแตกตัวให้ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) สามารถทำปฏิกิริยากับ H^+ เกิดเป็นน้ำ (H_2O) ขึ้น ดังสมการที่ (8)



เนื่องด้วย CaO มีประสิทธิภาพในการบำบัดกรดในน้ำดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น และเป็นสารประกอบที่หาซื้อได้ง่าย เมื่อบำบัดน้ำเสียแล้ว ไม่ก่อให้เกิดสารพิษ แต่ยังช่วยเพิ่มแร่ธาตุแคลเซียมเมื่อใส่ในปริมาณที่พอเหมาะ ดังนั้น CaO จึงช่วยบำบัดความเป็นกรดในน้ำเสียดังสมการที่ (9)



2.8 ปัจจัยที่มีผลต่อการสร้างและรวมตัวกันตกตะกอน

ในการสร้างตะกอนและรวมตะกอนจะดำเนินไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ดังนี้ (โกมลและคณะ, 2534)

2.8.1 ชนิดของคอลลอยด์ในน้ำ เนื่องจากคอลลอยด์ในน้ำเป็นสารอินทรีย์ หรืออนินทรีย์ ที่มีสภาพเป็นประจุบวกหรือลบ หรือเป็นคอลลอยด์ประเภทไม่ชอบน้ำ หรือมีโอกาสดูกำจัดออกจากน้ำได้ง่ายกว่าประเภทที่ชอบน้ำ หากทราบชนิดของคอลลอยด์ จะช่วยในการตัดสินใจเลือกใช้สารที่ช่วยในการตัดสินใจเลือกใช้สารที่ช่วยในการตกตะกอนได้อย่างเหมาะสม

2.8.2 อุณหภูมิ จะมีอิทธิพลต่อปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง จะทำให้ความหนืดของน้ำต่ำ ซึ่งจะช่วยให้ตกตะกอนได้ดี

2.8.3 ส่วนประกอบทางเคมีของน้ำ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการสร้างตะกอนจะสมบูรณ์ ต้องอาศัยส่วนประกอบทางเคมีที่มีอยู่ในน้ำที่สำคัญได้แก่ สภาพความเป็นด่างในน้ำ (alkalinity) ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ด้านการเปลี่ยนแปลงพีเอช เพื่อให้ปฏิกิริยาในการกำจัดอนุภาคคอลลอยด์มีประสิทธิภาพมากขึ้น

2.8.4 พีเอช (pH) ที่เหมาะสม สารที่ใช้ในการตกตะกอนแต่ละชนิดให้ประสิทธิภาพดีที่สุดที่พีเอชต่างๆ กัน การเติมสารสร้างตะกอนลงในน้ำที่ไม่อยู่ในช่วงพีเอชที่เหมาะสม นอกจากจะทำให้เปลืองสารเคมีที่ใช้แล้ว ยังทำให้คุณภาพน้ำไม่ดีเท่าที่ควรและผลการตกตะกอนจะเกิดขึ้นไม่ดี

2.8.5 ชนิดและปริมาณของสารที่ใช้ในการสร้างและรวมตะกอน สารสร้างตะกอนแต่ละชนิดจะมีความเหมาะสมสำหรับทำลายอนุภาคคอลลอยด์แต่ละชนิดได้แตกต่างกัน นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงปริมาณที่ใช้ ลักษณะของกลุ่มตะกอนที่เกิดขึ้น ความเร็วของการตกตะกอน ความยากง่ายในการใช้งาน รวมทั้งราคาด้วย

2.8.6 กลือของสาร ในน้ำเสียมักจะพบเกลืออนินทรีย์ ซึ่งจะมีผลต่อช่วงพีเอชที่เหมาะสมคือจะทำให้ช่วงกว้างขึ้น ระยะเวลาที่จับตัวเป็นตะกอนมากขึ้น และปริมาณสารช่วยสร้างตะกอนจะใช้มากขึ้น เป็นต้น

2.8.7 ระดับความขุ่นในน้ำ หมายถึง ปริมาณอนุภาคคอลลอยด์ที่มีอยู่ในน้ำ โดยน้ำที่มีอนุภาคแขวนลอยจำนวนมาก จะใช้สารสร้างตะกอนในปริมาณที่น้อยกว่า อีกทั้งยังตกตะกอนได้ดีกว่า เนื่องจากมีเป่าสัมผัสมากกว่าน้ำที่มีอนุภาคคอลลอยด์น้อยกว่า

2.8.8 เวลาและความแรงของการผสมเพื่อให้สารเคมีกระจายตัว การทำให้สารเคมีละลายน้ำอย่างทั่วถึงเพื่อให้เกิดการสร้างตะกอน จำเป็นต้องกวนน้ำเพื่อให้เกิดการปั่นกวอย่างรวดเร็วด่วนเวลาอันสั้น เพื่อให้สารเคมีกระจายตัวออกไปทำปฏิกิริยากับสารแขวนลอยได้ทั่วถึงและยังเป็นการประหยัดเวลาอีกด้วย เพราะปฏิกิริยาดังกล่าวนี้อาจใช้เวลาที่น้อยกว่ากระบวนการรวมตะกอน ดังนี้ ถ้าใช้การกวนที่รุนแรงมากเท่าใดก็จะช่วยประหยัดเวลามากขึ้นเท่านั้น ในทางตรงกันข้ามเมื่อต้องการให้เกิดการรวมตัวของตะกอนที่เกิดขึ้น เพื่อให้มีโอกาสลอยมาสัมผัสซึ่งกันและกันได้มากขึ้นที่สุด โดยทั่วไปการกวนใช้เวลา 30-90 วินาที (Kawamura, 1976) ส่วนการกวนช้าๆ ใช้เวลาประมาณ 30-60 นาที (Demsey, 1985)

การตกตะกอนของน้ำแต่ละชนิดขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์หลายอย่าง เช่น พีเอช ความขุ่น ส่วนประกอบของสารต่างๆ ในน้ำ ชนิดของตัวตกตะกอนที่ใช้และแฟกเตอร์ทางกายภาพ เช่น อุณหภูมิ อัตราเร็วของการกวนผสม ความสัมพันธ์เหล่านี้ซับซ้อนมาก น้ำแต่ละชนิดจะต้องการปริมาณของตัวตกตะกอนต่างกัน ปกติมักใช้ จาร์เทสต์ (Jar test) เครื่องมือดังภาพที่ 15 ทำการหาปริมาณของโคแอกกูแลนต์ที่จะใช้สภาวะทางกายภาพของน้ำแต่ละตัวอย่าง ทั้งนี้เพราะไม่สามารถวัดได้จากผลการวิเคราะห์ทางเคมีหรือกายภาพของน้ำ (กรรณิการ์, 2544)



ภาพที่ 15 เครื่องมือที่ใช้ในการทำ Coagulation หรือทดลองจาร์เทสต์

3. กระบวนการดูดซับ

การดูดซับเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญของกระบวนการทางกายภาพ ชีวภาพ และเคมี การดูดซับได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการบำบัดน้ำเสีย การดูดซับเป็นความสามารถของสารในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่อยู่ในแก๊สหรือของเหลวให้มาเกาะจับและติดบนผิว ซึ่งเป็นปรากฏการณ์เคลื่อนย้ายจากของเหลวหรือแก๊สมายังผิวของของแข็งที่เป็นส่วนสำคัญของกระบวนการนี้ โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่เคลื่อนย้ายมาเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของตัวถูกดูดซับ เรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) คุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของตัวดูดซับคือ ความพรุน เพื่อเพิ่มพื้นที่สัมผัสภายใน นอกจากนี้คุณสมบัติอื่นๆ ของตัวดูดซับ เช่น โครงสร้าง การจัดเรียงตัว ขนาด และความสม่ำเสมอ ล้วนมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ การเลือกตัวดูดซับที่เหมาะสม ทำให้สามารถแยกโมเลกุลที่เราต้องการออกมา โดยให้ตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับนั้นถูกดูดซับจนอิ่มตัวแล้ว จากนั้นนำมาไล่เอาโมเลกุลที่ถูกดูดซับไว้ ออก โดยการเปลี่ยนสภาพสมดุล เช่น การเปลี่ยนอุณหภูมิ หรือเปลี่ยนความดัน ทำให้ตัวดูดซับกลับสู่สภาพเดิม และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก

การดูดซับจึงเป็นกระบวนการเคลื่อนย้ายของตัวถูกดูดซับจากตัวกลางหนึ่งไปสะสมที่พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อมีการสัมผัสกันของพื้นผิวระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ โดยที่ตัวถูกดูดซับจะไปเกาะที่ผิวของตัวดูดซับ เช่น พื้นผิวระหว่างของเหลวกับของแข็ง พื้นผิวระหว่างของแข็งกับแก๊ส พื้นผิวระหว่างของแข็งกับของแข็ง และพื้นผิวระหว่างของเหลวกับของเหลว กระบวนการดูด

ชั้นเหล่านี้สามารถเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น สารอินทรีย์หรือโลหะถูกดูดซับในดินหรือตะกอนดินในทะเล มหาสมุทร และแม่น้ำ กระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นโดยมนุษย์ เช่น การใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนจากอากาศและน้ำ กระบวนการดูดซับมีการนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ในด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมหลายด้านด้วยกัน เช่น การใช้ดินเหนียวดูดซับยาฆ่าแมลง ในดิน หรือดูดซับโลหะหนักจากแหล่งฝังกลบเพื่อป้องกันการปนเปื้อนของสารพิษที่จะลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน (นิพนธ์ และ คณิตา, 2550)

3.1 กลไกการดูดซับ

กลไกการดูดซับแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

3.1.1 การแพร่ภายนอก (External Diffusion) การแพร่ภายนอกเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเข้าถึงตัวดูดซับ ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีของเหลวห่อหุ้มโดยโมเลกุลแทรกผ่านชั้นของของเหลวเข้าถึงผิวหน้าของตัวดูดซับ

3.1.2 การแพร่ผ่านภายใน (Internal Diffusion) เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกดูดซับแทรกตัวเข้าถึงช่องว่างตัวดูดซับ เพื่อให้เกิดการดูดซับ

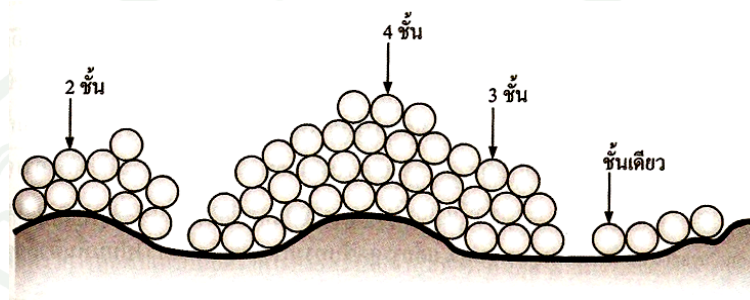
3.1.3 ปฏิกริยาพื้นผิว ปฏิกริยาพื้นผิวเป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกดูดซับติดที่ผิวของตัวดูดซับซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่ ดังนั้นควรคำนึงถึงการต้านทานจากปฏิกริยาพื้นผิวด้วย

3.2 รูปแบบของการดูดซับ

สำหรับรูปแบบการดูดซับนั้น สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

3.2.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physisorption หรือ Van Der Waals Adsorption) เป็นแรงที่ทำให้เกิดการเกาะ หรือยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับโมเลกุลที่พื้นผิวหน้าของตัวดูดซับ จัดเป็นแรงดูดค่อนข้างอ่อน เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ แรงไดโพล-ไดโพล และไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีทั้งของตัวถูกดูดซับ และตัวดูดซับ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะถูกยึดติดแบบกายภาพกับโมเลกุลของตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเกาะอยู่บนผิวตัวดูดซับในลักษณะที่ซ้อนกันหลายชั้น (Multilayered) โดยแต่ละชั้นของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะถูกดูดซับ

บนชั้นโมเลกุลที่ถูกดูดซับก่อนหน้านี้ และจำนวนชั้นของโมเลกุลตัวถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 16 เมื่อความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับเพิ่มขึ้น แรงยึดเหนี่ยวระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับ และระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวตัวถูกดูดซับด้วย ในระหว่างชั้นอาจเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์อย่างใดอย่างหนึ่ง การดูดซับทางกายภาพโดยทั่วไป จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้พลังงานของระบบลดลง เป็นการทำให้ระบบมีความเสถียรภาพมากขึ้น



ภาพที่ 16 การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว สองชั้น สามชั้นและสี่ชั้น

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

3.2.2 การดูดซับทางเคมี (Chemisorption) จะมีลักษณะเหมือนกับการเกิดปฏิกิริยาเคมี กล่าวคือ จะต้องมีการสร้างพันธะเคมีของตัวถูกดูดซับกับพื้นผิวของตัวดูดซับ การดูดซับทางเคมี มีการถ่ายโอนอิเล็กตรอน (สร้างพันธะไอออนิก) หรือการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน (สร้างพันธะโควาเลนต์) ทำให้แรงยึดเหนี่ยวค่อนข้างสูงกว่าแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นในการดูดซับทางกายภาพ มีผลทำให้การดูดซับทางเคมีโดยส่วนใหญ่จะผันกลับไม่ได้ เมื่อเปรียบเทียบกับ การดูดซับทางกายภาพที่สามารถจะเกิดการผันกลับได้ภายใต้สภาวะเดียวกัน การดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นในบริเวณที่จำเพาะเจาะจงเท่านั้น และโมเลกุลตัวถูกดูดซับเกาะอยู่บริเวณดังกล่าวจะเป็นแบบชั้นเดียว (Monolayer) และเกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูง แต่การดูดซับทางกายภาพเกิดได้ทั่วไปบนพื้นผิวตัวดูดซับ

การดูดซับทางกายภาพจะให้พลังงานต่ำ ประมาณ 10 หรือน้อยกว่า 10 กิโลแคลอรีต่อโมลของตัวถูกดูดซับ ส่วนการดูดซับทางเคมีจะให้พลังงานสูงโดยประมาณ 20 – 100 กิโลแคลอรีต่อโมลของตัวถูกดูดซับ (นิพนธ์ และคณิตา, 2550)

3.3 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

3.3.1 ความดันป้อน อัตราเร็วในการดูดซับอาจขึ้นอยู่กับ Film Diffusion หรือ Pore Diffusion ซึ่งแล้วแต่ความดันป้อนของระบบ ถ้าน้ำมีความดันป้อนต่ำ ฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบตัวดูดซับ จะมีความหนามากและเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับเข้าไปหาตัวดูดซับ ดังนั้นการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้าม ถ้าความดันป้อนสูงจะเกิดฟิล์มบาง ทำให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มน้ำเข้าหาตัวดูดซับได้รวดเร็วกว่า การเคลื่อนที่เข้าไปในรูพรุน ในการนี้การแพร่ผ่านรูพรุนจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วในการดูดซับ

3.3.2 ขนาดและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ความสามารถในการดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะ นั่นคือ ตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวมากจะดูดโมเลกุลของตัวถูกดูดซับได้มากกว่า ตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวน้อย และอัตราการดูดซับเป็นอัตราส่วนผกผันกับขนาดตัวดูดซับ เช่น คาร์บอนผง (Powder Activated Carbon, PAC) มีอัตราเร็วในการดูดซับสูงกว่าคาร์บอนแบบเกร็ด (Granular Activated Carbon, GAC)

3.3.3 ขนาดและลักษณะของตัวถูกดูดซับ ขนาดของสารหรือโมเลกุลมีความสำคัญมากต่อการดูดซับ ซึ่งส่วนใหญ่เกิดขึ้นในโพรงของตัวดูดซับ เช่น คาร์บอน การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุดเมื่อสารมีขนาดเล็กกว่าช่องว่างภายในพอดิ (พอดิเข้าไปในช่องว่างได้) ทั้งนี้เพราะว่าแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับจะมีค่ามากที่สุด โมเลกุลขนาดเล็กจะถูกดูดเข้าไปในช่องว่างภายในก่อน จากนั้นโมเลกุลขนาดใหญ่กว่าจึงถูกดูดเข้าไปบ้าง อาจกล่าวได้ว่าความสามารถในการดูดซับจะแปรผกผันกับขนาดโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ นั่นคือ เมื่อน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะลดลง

3.3.4 ความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกดูดซับ ความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกดูดซับเป็นปัจจัยสำคัญในการดูดซับ การดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกดูดซับในตัวทำละลายลดลง เนื่องจากในการดูดซับตัวถูกดูดซับจะต้องถูกแยกออกจากตัวทำละลาย ในที่นี้คือ น้ำ ดังนั้นสารที่ไม่ละลายน้ำ หรือละลายได้น้อยจะสามารถถูกดูดซับได้ดี

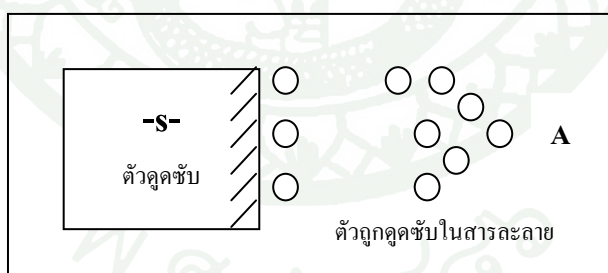
3.3.5 pH มีอิทธิพลต่อการแตกตัวเป็นไอออนและการละลายน้ำของสารต่างๆ ดังนั้นจึงมีผลกระทบต่อกระบวนการดูดซับด้วย นอกจากนี้ไฮโดรเจนไอออนเองก็เป็นไอออนที่สามารถเกาะติดผิวของตัวดูดซับได้ดี

3.3.6 อุณหภูมิ มีอิทธิพลต่ออัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดซับ กล่าวคือ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้การแพร่ผ่านของสารที่ถูกดูดซับลงไปยังรูพรุนของตัวดูดซับได้เร็วขึ้น แต่จะส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับลดลง

3.3.7 เวลาสัมผัส เป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ และอายุการใช้งานของตัวดูดซับ โดยที่เวลาสัมผัสมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการดูดซับเพียงช่วงหนึ่งเท่านั้น ซึ่งถ้าเวลาสัมผัสเลยจากช่วงนี้แล้ว ก็จะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับเลย

3.4 สมดุลการดูดซับ

เมื่อเติมตัวดูดซับปริมาณหนึ่งลงไปในสารละลายที่มีโมเลกุลตัวถูกดูดซับเข้มข้น ในช่วงเริ่มต้นโมเลกุลตัวถูกดูดซับบางส่วนไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับ เมื่อเวลาผ่านไปจะมีจำนวนโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มมากขึ้น ในขณะเดียวกันโมเลกุลตัวถูกดูดซับบางส่วนที่เกาะติดกับพื้นผิวจะคายออกมา พบว่าอัตราการคายจะเกิดน้อยกว่าอัตราการดูดซับ เมื่อปล่อยให้กระบวนการดูดซับดำเนินไปจนกระทั่งอัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคาย สถานะสมดุลของการดูดซับ จะได้ว่าจำนวนโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและจำนวนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่คายออกมามีปริมาณคงที่ ดังภาพที่ 17



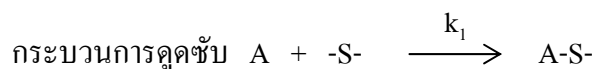
ภาพที่ 17 การเคลื่อนย้ายโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

ให้ A เป็นโมเลกุลของตัวถูกดูดซับมีความเข้มข้นเริ่มต้นเป็น C_0 โมลต่อลิตรในสารละลาย -S- เป็นโมเลกุลของตัวดูดซับ

q เป็นสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

$(1 - q)$ เป็นสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ไม่ถูกดูดซับ



r_1 แทนอัตราการดูดซับ ซึ่งจะแปรตามความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลาย หรือความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายให้เท่ากับ C และยังแปรตามสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ไม่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

k_1 แทนค่าคงที่อัตราการดูดซับ

$$r_1 = k_1[C](1-q)$$



r_2 แทนอัตราการคาย ซึ่งจะแปรตามสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเท่านั้น

k_2 แทนค่าคงที่อัตราการคาย

$$r_2 = k_2(q)$$

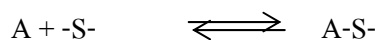
$$\text{ณ สภาวะสมดุล } r_1 = r_2$$

$$k_1[C](1 - q) = k_2(q)$$

$$\frac{q}{(1-q)} = \frac{k_1}{k_2}[C] = K[C]$$

$$q = \frac{K[C]}{1 + K[C]} \quad \dots\dots\dots(10)$$

เมื่อ K เป็นค่าคงที่สมดุลการดูดซับ



$$\text{ณ สภาวะสมดุล } K = \frac{q}{C} \quad \dots\dots\dots(11)$$

ณ สภาวะสมดุลของการดูดซับ จะได้ว่า

ปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ = ปริมาณตัวถูกดูดซับที่หลุดออกมาจากตัวดูดซับ

$$q_W = V(C_i - C_e) \quad \dots\dots\dots(12)$$

เมื่อ q เป็นปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับต่อมวลตัวดูดซับ หน่วยเป็นปริมาณตัวถูกดูดซับต่อมวลตัวดูดซับเป็นโมลต่อกิโลกรัม หรือ โมลต่อกรัม

W เป็นมวลของตัวดูดซับที่ใช้ หน่วยเป็นน้ำหนัก เช่น มิลลิกรัม กรัม หรือ กิโลกรัม

V เป็นปริมาตรของสารละลายที่มีตัวถูกดูดซับละลายอยู่ หน่วยเป็นลูกบาศก์เซนติเมตรหรือลิตร

C_i เป็นความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับก่อนการดูดซับที่อยู่ในสารละลาย หน่วยเป็นความเข้มข้นเป็นโมลาร์

C_e เป็นความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลาย หน่วยเป็นความเข้มข้นเป็นโมลาร์

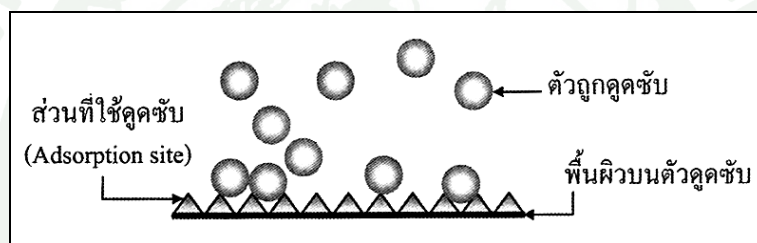
5.5 ไอโซเทอร์มการดูดซับ

ไอโซเทอร์มของการดูดซับ อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่สมดุล กับจำนวนของตัวถูกดูดซับที่มีการดูดซับ ที่อุณหภูมิคงที่ ไอโซเทอร์มของการดูดซับเป็นสมการที่มีประโยชน์สำหรับการดูดซับ ไอโซเทอร์มที่นิยมใช้กัน ได้แก่ สมการการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir) และสมการแบบฟรุนดลิช (Freundlich)

5.5.1 สมการการดูดซับแบบแลงเมียร์

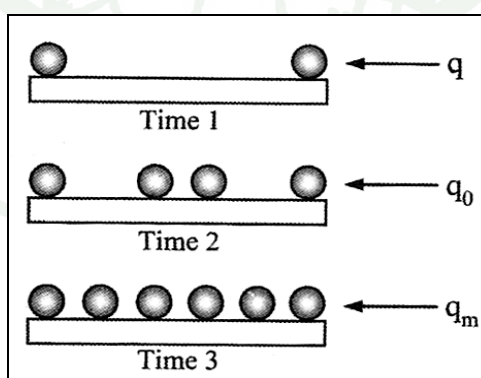
สมการการดูดซับแบบแลงเมียร์ มีสมมติฐานที่ว่าโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะเกิดการดูดซับบนผิวในตำแหน่งที่แน่นอนของตัวถูกดูดซับ แต่ละโมเลกุลของตัวดูดซับเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว แต่ละพื้นผิวของตัวถูกดูดซับมีลักษณะเป็นแบบเดียวกัน ดังภาพที่ 18 ตัวดูดซับมีพลังงานในการดูดซับเหมือนกัน และโมเลกุลของตัวดูดซับไม่สามารถเกิดข้ามพื้นผิวหรือไม่สามารถเกิดขึ้นกับโมเลกุลที่อยู่ติดกันได้ (Faust and Aly, 1987)

พื้นผิวตัวถูกดูดซับจะปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น จนมีตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว ดังภาพที่ 19 (ถูกดูดซับได้มากที่สุด)



ภาพที่ 18 แบบจำลองพื้นผิวตัวดูดซับของสมการแลงเมียร์

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)



ภาพที่ 19 การดูดซับของแลงเมียร์เมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

จากความรู้เรื่องสมดุลการดูดซับ และจากสมการที่ (10) ถือว่าการดูดซับได้มากที่สุดเท่ากับหนึ่ง รูปแบบของสมการแลงเมียร์ จะใช้สมการที่ (10) เพียงต้องคูณปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับได้มากที่สุดต่อปริมาณตัวดูดซับ แทนด้วย q_m ซึ่งจะได้สมการดังนี้

$$q = \frac{q_m KC}{1 + KC} \quad \dots\dots\dots(13)$$

เมื่อจัดรูปสมการที่ (13) ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง จะได้

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m} + \frac{1}{K q_m C} \quad \dots\dots\dots(14)$$

เมื่อ q คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ(ความสามารถการดูดซับ) (มิลลิกรัม/กรัม)

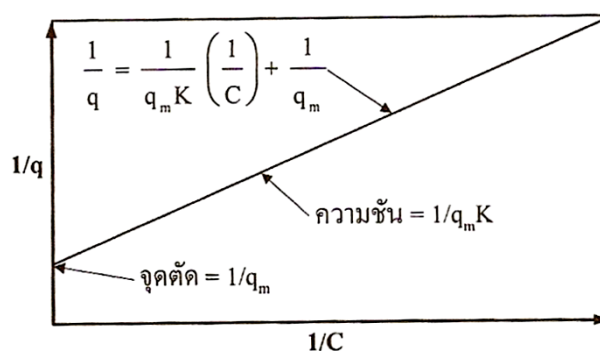
q_m คือ ความสามารถสูงสุดในการดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม)

K คือ ค่าคงที่การดูดซับ

C คือ ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

เขียนกราฟระหว่าง $\frac{1}{q}$ และ $\frac{1}{C}$ จะได้กราฟเส้นตรงมีค่าความชันเท่ากับ $\frac{1}{Kq_m}$ และ

จุดตัดบนแกนตั้งเท่ากับ $\frac{1}{q_m}$ ดังภาพที่ 20



ภาพที่ 20 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์

ที่มา: นิพนธ์ และกนิดา (2550)

3.5.2 สมการการดูดซับแบบฟรุนดิช (Freundlich Isotherm)

สมการแบบฟรุนดิช มีสมมติฐานของการดูดซับที่ว่าพื้นผิวของตัวดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด (พื้นผิวของตัวดูดซับมีลักษณะขรุขระ) พื้นที่ผิวและพลังงานมีการกระจายตัวแบบเลขชี้กำลัง มีรูปแบบดังสมการที่ (13)

$$q = KC^{1/n} \quad \dots\dots\dots(15)$$

K และ n เป็นค่าคงที่ของฟรุนดิช (Freundlich Constant) ของแต่ละระบบที่กำลังศึกษาหรือทดลอง และ n ใช้อธิบายลักษณะเส้นกราฟไอโซเทอร์มของการดูดซับ โดยทั่วไป $1/n$ จะมีค่ามากกว่าหนึ่ง

เมื่อจัดรูปสมการที่ (15) ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง โดยใส่ลอการิทึมทั้งสองข้างของสมการจะได้

$$\log q = \log K + \frac{1}{n} \log C \quad \dots\dots\dots(16)$$

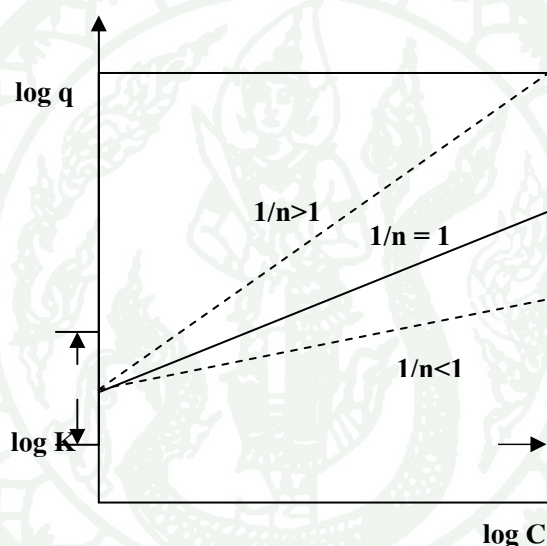
เมื่อ q คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ (ความสามารถการดูดซับ) (มิลลิกรัมต่อกรัม)

K คือ ค่าคงที่การดูดซับ

$\frac{1}{n}$ คือ ความชันของกราฟ

C คือ ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log q$ กับ $\log C$ จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $\frac{1}{n}$ และมีจุดตัดเท่ากับ $\log K$ ดังภาพที่ 21



ภาพที่ 21 กราฟความชันระหว่าง $\log q$ และ $\log C$

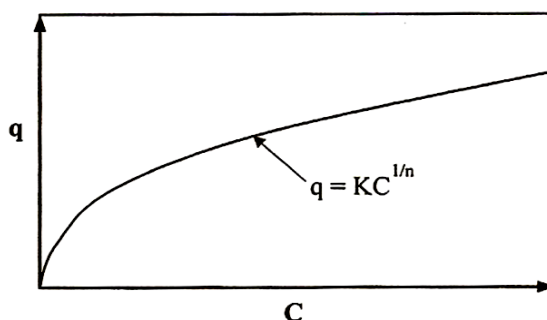
ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

ถ้า $\frac{1}{n} = 1$ ไอโซเทอร์มของการดูดซับเป็นแบบเส้นตรง

ถ้า $\frac{1}{n} < 1$ บอถึงความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับจะต่ำในทุกค่าของความเข้มข้น C หรือกล่าวว่าปริมาณพื้นผิวบนตัวดูดซับในปริมาณจำกัดในการดูดซับ

ถ้า $\frac{1}{n} > 1$ บอถึงความสามารถของการดูดซับของตัวดูดซับจะดูดซับได้มาก หรือกล่าวว่าบริเวณพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีปริมาณมากในการดูดซับ

เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่า q และ C จากสมการที่ (16) จะไม่สามารถบอกถึงปริมาณของตัวถูกดูดซับถูกดูดซับได้มากที่สุด เนื่องจากตัวถูกดูดซับสามารถจะเกิดการซ้อนทับกันได้ ดังภาพที่ 22



ภาพที่ 22 ไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของฟรุนดิช

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

3.6 สารที่มีความสามารถในการดูดซับ

3.6.1 ประเภทสารอนินทรีย์ เช่น ดินเหนียวชนิดต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์ และ แอกลิเวเตดซิลิกา สารธรรมชาติมักมีพื้นที่ผิวประมาณ 50-200 ตารางเมตร/กรัม แต่สารสังเคราะห์อาจมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก อย่างไรก็ตามมีข้อเสีย คือ จับโมเลกุลหรือคอลลอยด์ได้เพียงไม่กี่ชนิด ทำให้การใช้ประโยชน์จากตัวดูดซับประเภทสารอนินทรีย์มีขีดจำกัดมาก

3.6.2 ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 600-1,000 ตารางเมตร/กรัม

3.6.3 ประเภทสารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ สารแลกเปลี่ยนไอออน (เรซิน) ชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ สารเรซินเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300-500 ตารางเมตรต่อกรัม

3.6.4 วัสดุชีวภาพ ส่วนใหญ่เป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น ขี้เลื่อย ใคโตซาน กาแฟที่ใช้แล้ว ชา และชาเขียวที่ใช้แล้ว ฟางข้าว เปลือกไม้ ถั่วกลีบดำ เป็นต้น

3.6.5 สารดูดซับชีวภาพ (biosorbent) ได้แก่ เซลล์จุลินทรีย์ เช่น เซลล์ของแบคทีเรีย ยีสต์ หรือราสายพันธุ์ต่างๆ และสาหร่าย

4. ถ่านกะลามะพร้าว

กะลามะพร้าวเป็นวัสดุชนิดหนึ่งที่สามารถนำมาใช้เป็นแอคติเวตเตดคาร์บอน กะลามะพร้าวเป็นวัสดุพื้นบ้านที่พบได้ทั่วไป เพราะในประเทศไทยใช้มะพร้าวในการประกอบอาหารเป็นประจำ และจำนวนมาก ทั้งอาหารคาวและอาหารหวาน ประโยชน์ที่ใช้ทั่วไปในปัจจุบันที่ชาวบ้านนำมาใช้ คือ นำมาเป็นเชื้อเพลิงเป็นส่วนใหญ่โดยไม่ทราบถึงคุณค่า โดยเฉพาะนำมาทำ แอคติเวตเตดคาร์บอน ดังนั้นการนำถ่านกะลามะพร้าวมาใช้เป็นตัวดูดซับร่วมกับวัสดุปลูกจึงมีความเหมาะสมกับการบำบัดน้ำเสียแบบเทคโนโลยีอย่างง่าย เพราะมีราคาถูก และเป็นการนำวัสดุเหลือใช้มาทำประโยชน์ (อวยพร, 2531)

4.1 ลักษณะทางกายภาพของถ่านกะลามะพร้าว

ถ่านกะลามะพร้าวเป็นถ่านที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน มีลักษณะเป็นเกล็ดเกรด PHO 8x30 (ผ่านการทดสอบมาตรฐานตาม American Society for Testing and Material, ASTM) ดังภาพที่ 23 การเรียงตัวไม่เป็นระเบียบทางกายภาพ ดังตารางที่ 3



ภาพที่ 23 ถ่านกะลามะพร้าว

ตารางที่ 3 ลักษณะทางกายภาพของถ่านกะลามะพร้าว

สมบัติทางกายภาพ	ค่าที่ตรวจวัด
ค่าการกระจายตัวของอนุภาค (ASTM เมช/มิลลิเมตร)	
+8 (2.36 มิลลิเมตร)	มากกว่าร้อยละ 5
8x30 (2.36-0.60 มิลลิเมตร)	มากกว่าร้อยละ 90
-30 (0.60 มิลลิเมตร)	มากกว่าร้อยละ 5
ความหนาแน่น	น้อยกว่า 0.5 กรัม/ซีซี
ความชื้น	มากกว่าร้อยละ 8 โดยมวล
ปริมาณเถ้า	มากกว่าร้อยละ 3.5 โดยมวล
พีเอช	9-11
พื้นที่ผิว (จากการคำนวณ)	น้อยกว่า 1,100 ตารางเมตร/กรัม
ไอโอดีน นัมเบอร์ (AWWA B 604)	น้อยกว่า 1,050 มิลลิกรัม/กรัม
ระดับคาร์บอนเตตระคลอไรด์ (ASTM 3467-88)	น้อยกว่าร้อยละ 50 โดยมวล
ค่าความแข็ง (ASTM 3802-79)	น้อยกว่าร้อยละ 98

4.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ประโยชน์จากถ่านกะลามะพร้าว

จากลักษณะทางกายภาพ และคุณสมบัติต่างๆ ของถ่านกะลามะพร้าว ทำให้ถ่านกะลามะพร้าวถูกนำไปใช้ในการบำบัดน้ำเสีย เช่น การดูดกลิ่น (Deodorization) การดูดสี (Deocolorization) การลดสารคลอรีน (Dechlorination) และการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำ เป็นต้น

อวยพร (2531) ศึกษาประสิทธิภาพในการลดค่าความขุ่น สี ระดับน้ำสูญเสีย และระยะเวลาการกรองของถังกรอง ที่ใช้ทรายและถ่านกะลามะพร้าว และถ่านกะลามะพร้าวเพียงอย่างเดียว พบว่าความขุ่นของน้ำที่กรองได้เฉลี่ย 1 NTU โดยเป็นเปอร์เซ็นต์การลดความขุ่นโดยเฉลี่ยมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ประสิทธิภาพการกำจัดสี อยู่ในช่วง 30%-50% ระยะเวลาในการกรองมีค่าระดับน้ำสูญเสีย 1.50 เมตร และระยะเวลาในการกรองที่ได้มากกว่าถังกรองที่ใช้ทรายอย่างเดียวไม่น้อยกว่าสองเท่า

เพ็ญจันทร์ (2553) ศึกษาการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์ในน้ำเสียด้วยถ่านกกกลม และถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ พบว่า ถ่านกกกลมปริมาณ 5 กรัมและถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์

ปริมาณ 4 กรัมมีสถานะที่เหมาะสมในการดูดซับฟอรั่มัลดีไฮด์ที่พีเอช 5 ความเร็วรอบการเขย่า 100 รอบ/นาที ระยะเวลาเขย่า 30 นาที ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล 30 นาที และความเข้มข้นของฟอรั่มัลดีไฮด์ 20 มิลลิกรัม/ลิตร สามารถดูดซับสารละลายมาตรฐานฟอรั่มัลดีไฮด์ได้ร้อยละ 66.00 และ 42.70 ซึ่งสามารถกำจัดฟอรั่มัลดีไฮด์ในน้ำทิ้งของบริษัท ทีโอซี ไกลคอล จำกัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

บุญยา (2555) ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ผงใบผักตบชวาและถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ในการดูดซับสีข้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาออยดุง พบว่า ผงใบผักตบชวา 1 กรัม สามารถดูดซับสีข้อมได้ 6 ชนิด ร้อยละการดูดซับเฉลี่ยเท่ากับ 55.43 ในขณะที่ถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ 5 กรัม สามารถดูดซับสีข้อมได้ 9 ชนิด ร้อยละการดูดซับเฉลี่ยเท่ากับ 93.04

Amuda *et al.* (2007) ศึกษาการกำจัดโลหะหนัก จากน้ำเสียอุตสาหกรรมเครื่องเค็ม โดยใช้ถ่านกะลามะพร้าว พบว่าการดูดซับ zinc (II) มีลักษณะการดูดซับแบบแลงเมียร์มากกว่าฟรุนดลิช ดังนั้นจึงเป็นการดูดซับที่ผิวแบบชั้นเดียว

5. เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีธรรมชาติช่วยธรรมชาติด้วยระบบพืชบำบัดน้ำเสีย

เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบพืชบำบัดน้ำเสีย อาศัยกระบวนการทำงานร่วมกันระหว่าง ดิน น้ำและพืช โดยทำการปลูกพืชที่ทนน้ำท่วมขังได้ในดินที่มีอัตราส่วนผสมระหว่างดินนา 3 ส่วน ต่อทราย 1 ส่วน ให้มีเนื้อดินเป็นดินร่วน เพื่อช่วยเพิ่มการซึมซาบและการระบายน้ำ เมื่อทำการขังน้ำเสียแล้ว จุลินทรีย์ในดินจะทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียให้กลายเป็นสารอนินทรีย์ และธาตุอาหารให้พืชนำไปใช้ในการเจริญเติบโต (มูลนิธิชัยพัฒนา, 2543)

5.1 กระบวนการบำบัดด้วยระบบพืชบำบัดน้ำเสีย

น้ำเสียที่มีสารอินทรีย์เป็นมลสารหลัก จะเป็นอาหารของจุลินทรีย์ โดยจุลินทรีย์จะใช้ออกซิเจน (O_2) ที่ละลายอยู่ในน้ำเป็นตัวรับอิเล็กตรอนเพื่อการหายใจและถูกใช้ให้หมดไปอย่างรวดเร็ว ดังนั้นกระบวนการบำบัดน้ำเสียจึงจำเป็นต้องเติมออกซิเจนแก่ระบบ โดยอาศัยกระบวนการ Thermo-Osmosis โดยพืชที่สามารถเจริญเติบโตในสภาวะน้ำท่วมขังได้ ซึ่งใบอ่อนของพืชจะมีความสามารถในการลำเลียงออกซิเจนจากบรรยากาศ ผ่านกาบใบมาปลดปล่อยบริเวณ

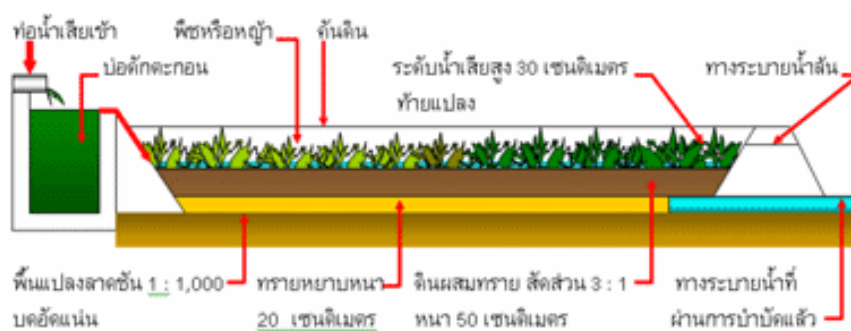
รากขนอ่อน ทำให้บริเวณรอบราก มีออกซิเจนแพร่ออกมา ส่งผลให้ในบริเวณรอบรากพืชมีทั้งการเจริญเติบโตทั้งในด้านชนิด และปริมาณของแบคทีเรียที่ใช้ออกซิเจนในกระบวนการย่อยสลายเพิ่มมากขึ้น สารประกอบอินทรีย์ที่ปนเปื้อนมากับน้ำเสียจะถูกแบคทีเรียบริเวณรอบรากพืช และแบคทีเรียในดินย่อยสลายเปลี่ยนเป็นสารอนินทรีย์ ซึ่งพืชสามารถดูดดึงไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสง เพื่อสร้างเนื้อเยื่อ ทำให้พืชเจริญเติบโต

นอกจากนี้ในส่วนของน้ำเสียที่ขังอยู่บริเวณผิวดินก็มีกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบใช้ออกซิเจนด้วยเช่นกัน โดยอาศัยแบคทีเรียที่ลอยอยู่ในน้ำอย่างอิสระย่อยสลายสารอินทรีย์ให้เป็นสารอนินทรีย์ เพื่อให้แพลงก์ตอนพืช สาหร่ายและพืชน้ำนำไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง เพื่อการเจริญเติบโตและปลดปล่อยก๊าซออกซิเจนออกมาละลายน้ำ ให้แบคทีเรียไว้ใช้ในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่อไป

5.2 เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบพืชบำบัดน้ำเสีย

5.2.1 การบำบัดน้ำเสียด้วยระบบหญ้ากรองน้ำเสีย

การบำบัดน้ำเสียด้วยระบบหญ้ากรองน้ำเสีย เป็นระบบที่ให้พืชช่วยดูดซับธาตุอาหารจากการย่อยสลายสารอินทรีย์เป็นสารอนินทรีย์ที่พืชต้องการของจุลินทรีย์ในดิน การปลดปล่อยออกซิเจนจากกระบวนการสังเคราะห์แสงจากระบบราก สาหร่าย และแพลงก์ตอน โดยการปล่อยให้น้ำเสียไหลผ่านแปลงพืชหรือหญ้า โดยน้ำเสียจะไหลผ่านผิวดินและต้นพืชหรือหญ้าเป็นระยะทางอย่างน้อย 50 เมตร ระดับความสูงของน้ำเสียที่กักขังบริเวณท้ายแปลงเท่ากับ 30 เซนติเมตร ชั่งน้ำเสียสูง 15 เซนติเมตร เป็นเวลา 5 วันสลับปล่อยแห้ง 2 วัน ดังภาพที่ 24 เพื่อให้จุลินทรีย์ในดินมีโอกาสได้พักตัว และระบายน้ำที่ผ่านการบำบัดออกจากระบบ โดยปล่อยระบายน้ำทางระบบท่อใต้ดินสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ สำหรับพืชและหญ้าที่ใช้ในการบำบัดแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ หญ้าอาหารสัตว์ ได้แก่ หญ้าคาลา หญ้าโคสโครส และหญ้าสตาร์ พืชทั่วไป ได้แก่ ฐปฤทัย กกกลม (กกจันทบูรณ) และหญ้าแฝกพันธุ์อินโดนีเซีย เมื่ออายุของหญ้าและพืชครบระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดจะตัดหญ้านั้นออกเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดให้กับระบบ หญ้าที่ตัดออกเหล่านี้สามารถนำไปใช้เลี้ยงสัตว์ได้ ส่วนพืชทั่วไปนำไปใช้ในการจักสานได้เป็นอย่างดี

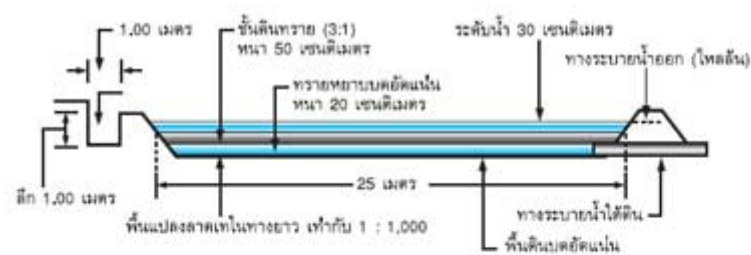


ภาพที่ 24 ระบบบำบัดน้ำเสียด้วยพืชกรองและหญ้ากรอง

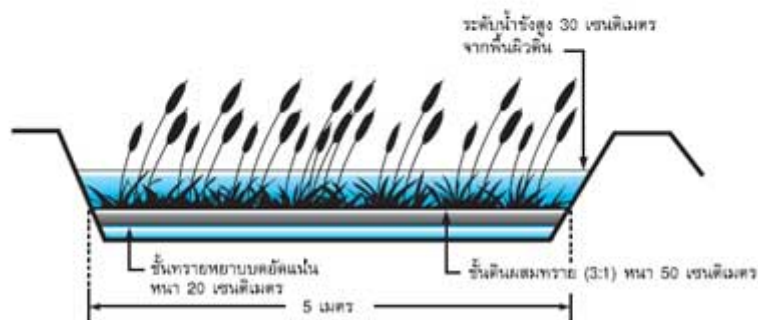
ที่มา: มูลนิธิชัยพัฒนา (2543)

5.2.2 การบำบัดน้ำเสียด้วยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม

การบำบัดน้ำเสียด้วยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม อาศัยการปล่อยน้ำเสียไหลต่อเนื่องในระบบ โดยขังน้ำเสียสูง 30 เซนติเมตร และควบคุมอัตราการไหลให้น้ำเสียมีระยะเวลาการกักพักภายในระบบ 24 ชั่วโมง โดยพืชที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำเสีย คือ กกกลม (กกจันทบูรณ) และ ฤๅษี ดังภาพที่ 25 ซึ่งช่วยในการบำบัดน้ำเสีย อาศัยการปลดปล่อยแก๊สออกซิเจนที่ได้จากการสังเคราะห์แสงให้กับน้ำเสียนั้น ร่วมกับการใช้ดินผสมทรายช่วยในการกรองน้ำเสีย อีกทั้งการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ในดิน และระยะเวลาการกักพักเพื่อให้การบำบัดน้ำเสียมีประสิทธิภาพมากขึ้น



ภาพตัดขวางตามลักษณะความยาวของแปลง



ภาพตัดขวางตามลักษณะความกว้างของแปลง

ภาพที่ 25 ระบบบำบัดน้ำเสียด้วยพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม

ที่มา: มุลนิธิชัยพัฒนา (2543)

1) ฐูปฤาษี (*Typha angustifolia* Linn.)

เป็นวัชพืชล้มลุก อายุประมาณ 2 ปี สูงประมาณ 1.5 - 2 ม. เจริญเติบโตได้ดีในพื้นที่ชุ่มน้ำ อยู่ในวงศ์ Typhaceae มีระบบรากที่ดี ช่วยป้องกันการพังทลายของดินชายน้ำ สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุคลุมผิวดินในไม้ยืนต้น สวนไม้ผลต่างๆ เพื่อลดการสูญเสียความชื้นออกจากผิวดิน หรือลดการชะล้างหน้าดินจากน้ำฝนได้ ใบเหนียวนิ่มใช้มุงหลังคา ใช้ทำเครื่องจักสาน เช่น เสื่อ ตะกร้า เชือก ขอดอ่อนกินได้ทั้งสด และทำให้สุก ในการป้องกันกำจัดฐูปฤาษี ควรทำก่อนออกดอก จะดีที่สุด เมล็ดมีการแพร่ระบาดได้ดีโดยลมและน้ำได้ง่าย การตัดต้นขนาดใหญ่ ควรตัดให้ต่ำกว่าระดับผิวน้ำ และฐูปฤาษีสามารถกำจัดในโตรเจนจากน้ำเสียในทีลุ่มต่อไร่ได้ถึง 400 กก. ต่อปี และสามารถดูดเก็บโพแทสเซียมต่อไร่ได้ถึง 690 กก. ต่อปี จึงเป็นพืชอีกชนิดหนึ่งที่จะมีบทบาทเป็นพืชเศรษฐกิจในอนาคต

2) กกกลมหรือกกจันทบูรณ (Cyperus Corymbosus Rottb.)

เป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยว ลักษณะลำต้นกลม เฉพาะลำต้นส่วนปลายใกล้ๆ กับดอกเท่านั้นที่จะเป็นสามเหลี่ยม ลำต้นสีเขียวเข้มเป็นมัน สูงประมาณ 1 ถึง 2 เมตร อยู่ในวงศ์ Cyperaceae ลักษณะของลำต้นแบ่งเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ลำต้นใต้ดิน มีลักษณะเป็นแง่งสั้นๆ หรือเหง้า เรียกว่า rhizome ลำต้นที่ทอดยาวอยู่บนพื้นดิน มีลักษณะเป็นท่อนขนาดเล็กสีน้ำตาล ซึ่งมีความยาวตามชนิดของกก เรียกว่า stolon บางครั้งลำต้นส่วนนี้จะงอขึ้นเป็นโต๊ะสมอาหารแต่ขยายพันธุ์ไม่ได้ ลำต้นที่มีก้านยาว สีเขียว ชูขึ้นไปในอากาศ เรียกว่า arial stem

5.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ประโยชน์จากรูปฤาษี และกกกลม

ปวีณา (2552) ได้ศึกษาการบำบัดน้ำเสียโรงฆ่าสัตว์เทศบาลเมืองสุพรรณบุรี ด้วยระบบดินน้ำขัง 5 วัน สลับแห้ง 2 วันร่วมกับรูปฤาษี โดยปลูกในแปลงดิน ใช้น้ำเสียโรงฆ่าสัตว์ที่ผ่านการบำบัดจากบ่อผึ่งที่ 1 และ 2 มาศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดบีโอดีและซีโอดีในแปลงที่มีรูปฤาษีและแปลงที่ไม่มีรูปฤาษี พบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดบีโอดี และซีโอดี ที่ใช้น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วจากบ่อผึ่งที่ 1 ในแปลงที่มีรูปฤาษี มีค่าสูงกว่าน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วจากบ่อผึ่งที่ 2 ในแปลงที่มีรูปฤาษี และแปลงที่มีรูปฤาษีสามารถบำบัดได้ดีว่าแปลงที่ไม่มีรูปฤาษี ดังนั้นจึงควรเลือกใช้ใช้น้ำเสียโรงฆ่าสัตว์ที่ผ่านการบำบัดแล้วจากบ่อผึ่งที่ 1 ร่วมกับแปลงการปลูกรูปฤาษีเพื่อบำบัดค่าบีโอดีและซีโอดี เนื่องจากมีประสิทธิภาพการบำบัดดีที่สุดและยังสามารถนำรูปฤาษีไปใช้ประโยชน์ได้อีกทางหนึ่ง

จุฑามาศ (2554) ได้ศึกษาผลการใช้กกกลม รูปฤาษี และพุทธรักษา ในการบำบัดคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงไฟฟ้าราชบุรี โดยทำการคัดเลือกพืชบำบัดน้ำทิ้งของโรงไฟฟ้าราชบุรี ด้วยวิธีพืชบำบัดเลือกพืช 3 ชนิดคือ กกกลม รูปฤาษี และพุทธรักษา โดยใช้แปลงควบคุมขนาด 1x10x1 เมตร พบว่ารูปฤาษีมีแนวโน้มเหมาะสมมากที่สุดในการบำบัดน้ำทิ้งโรงไฟฟ้าราชบุรี

6. ดินที่ใช้ในการศึกษา

6.1 ดินเหนียว

ดินเหนียว เนื้อดินประกอบด้วยอนุภาคขนาดดินเหนียวตั้งแต่ร้อยละ 40 ขึ้นไป มีอนุภาคขนาดทราย ร้อยละ 45 หรือน้อยกว่า และมีอนุภาคขนาดทรายแป้งน้อยกว่าร้อยละ 40 ดินเหนียวเป็น

ดินที่มีเนื้อละเอียด ในสภาพดินแห้งจะแตกออกเป็นก้อนแข็งมาก เมื่อเปียกน้ำแล้วจะมีความยืดหยุ่นสามารถปั้นเป็นก้อนหรือคลึงเป็นเส้นยาวได้ เหนียวเหนอะหนะติดมือ เป็นดินที่มีการระบายน้ำและอากาศไม่ดี แต่สามารถอุ้มน้ำ ดูดซึบ และแลกเปลี่ยนธาตุอาหารพืชได้ดี เหมาะที่จะใช้ทำนาปลูกข้าว เพราะเก็บน้ำได้นานเนื้อดินที่อยู่ในกลุ่มนี้ ได้แก่ ดินเหนียว และดินเหนียวปนทราย

6.2 ดินทราย

ดินทราย เป็นดินที่มีอนุภาคขนาดทรายเป็นองค์ประกอบอยู่มากกว่าร้อยละ 85 ลักษณะโดยทั่วไปจะเกาะตัวกันหลวมๆ และมองเห็นเป็นเม็ดเดี่ยวๆ ได้ถ้าสัมผัสดินที่อยู่ในสภาพแห้งจะรู้สึกสากมือ เมื่อลองกำดินที่แห้งนี้ไว้ในอุ้งมือแล้วคลายมือออกดินก็จะแตกออกจากกันได้ แต่ถ้ากำดินที่อยู่ในสภาพชื้นจะสามารถทำให้เป็นก้อนหลวมๆ ได้ แต่พอสัมผัสจะแตกออกจากกันทันที ดินทรายเป็นดินที่มีการระบายน้ำและอากาศดีมาก แต่มีความสามารถในการอุ้มน้ำต่ำ มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ เพราะความสามารถในการดูดซับธาตุอาหารพืชน้อย พืชที่ขึ้นบนดินทรายจึงมักขาดทั้งธาตุอาหารและน้ำ เนื้อดินที่จัดอยู่ในกลุ่มนี้ ได้แก่ ดินทราย ดินทรายปนดินร่วน และดินร่วนปนทราย

7. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานขนมจีน

กัลยาณี (2539) ศึกษาประสิทธิภาพของระบบกรองไม่ใช้ออกซิเจนในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานขนมจีนที่มีกำลังการผลิต 100 กิโลกรัมต่อวัน ระบบดังกล่าวประกอบด้วย ถังตกตะกอน 1 ถัง ต่อเป็นอนุกรม ถังกรองไม่ใช้ออกซิเจน 2 ถัง การก่อสร้างถังตกตะกอนทำเป็นถังคอนกรีตเสริมเหล็ก รูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.2 เมตร สูง 2.0 เมตร มีระยะเวลาเก็บกักน้ำเสีย 26 ชั่วโมง ถังกรอง ไม่ใช้ออกซิเจนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.2 เมตร สูง 2.0 เมตร ภายในบรรจุหินเบอร์ 2 เป็นตัวกรองสูง 1.2 เมตร ระยะเวลา เก็บกักน้ำเสีย 9.5 ชั่วโมง พบว่า ระบบมีประสิทธิภาพในการลดค่าซีโอดีและสารแขวนลอยคิดเป็นร้อยละ 80.51 และ 89.68 ตามลำดับ โดยสามารถลดซีโอดีและสารแขวนลอยได้จาก 9507.63 ± 1851.79 มก/ล. และ 2821.16 ± 1490.85 มก/ล. เป็น 1852.73 ± 517.40 และ 291.12 ± 172.16 มก/ล. ตามลำดับ

สัญญา (2542) ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานขนมจีน โดยใช้กระบวนการโคแอกกูเลชัน-ฟล็อกกูเลชัน และเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี ของแข็งแขวนลอยและความขุ่น เมื่อใช้สารส้มอัตรา 80 มิลลิกรัม/ลิตรหรือเฟอร์ริกคลอไรด์ ในอัตรา 40 มิลลิกรัม/ลิตร เป็นสารสร้างตะกอนและใช้ปูนขาวอัตรา 2,000 มิลลิกรัม/ลิตร เป็นตัวช่วยสร้างตะกอน ทดลองบำบัด

น้ำทิ้งจากโรงงานขนมจีนโดยใช้แบบจำลองกระบวนการ โคแอกกูเลชัน-ฟล็อกกูเลชัน ประกอบด้วย ขั้นตอนตกตะกอนขั้นต้น 1 ชั่วโมง การกวนเร็ว 1 นาที การกวนช้า 20 นาทีและการตกตะกอนขั้นสุดท้าย 2 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่าสารส้มและเฟอร์ริกคลอไรด์ มีประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีร้อยละ 52.78 และร้อยละ 55.15 ประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยร้อยละ 95.14 และร้อยละ 96.20 และประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นร้อยละ 95.14 และร้อยละ 96.20 ตามลำดับ

วรพจน์ (2550) ได้ศึกษาสภาวะการบำบัดน้ำเสียจากการผลิตเส้นขนมจีนโดยระบบแอนแอโรบิกคอนแทก การทดลองทำในห้องปฏิบัติการใช้ถังปฏิกรณ์ขนาด 25x25x35 ซม. มีปริมาตร 12.5 ลิตร ที่ F/M ratio 0.5 และ 1 และแปรผันระยะเวลาเก็บกักที่ 0.625, 0.83 และ 1.25 วัน รวมทั้งควบคุมสภาวะแวดล้อมให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่อุณหภูมิห้อง ในการประเมินประสิทธิภาพของระบบพบว่า ระยะเวลาเก็บกักมีผลต่อประสิทธิภาพมากกว่าค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ ที่ F/M ratio 0.5 และ มีประสิทธิภาพสูงกว่า F/M ratio 1 เล็กน้อย ที่ F/M ratio 0.5 ที่ระยะเวลาเก็บกัก 0.625, 0.83 และ 1.25 วัน สามารถกำจัด COD ได้ร้อยละ 88.84, 91.40 และ 92.21 และที่ F/M ratio 1 กำจัด COD ได้ร้อยละ 87.86, 89.30 และ 91.29 ตามลำดับ นอกจากนี้ระบบสามารถลดของแข็งแขวนลอย (SS) ได้ โดยมีแนวโน้มเดียวกับการกำจัด COD คือ ที่ F/M ratio 0.5 และ 1 เกลี่ยร้อยละ 89.05, 89.70, 91.34 และ 87.78, 88.26, 88.97 ที่ระยะเวลาเก็บกัก 0.625, 0.83 และ 1.25 ตามลำดับ

ศิรินภา (2553) ได้ศึกษาผลของการเจริญเติบโตในอาหาร Zarrouk ที่ใช้เลี้ยงสาหร่ายสไปรูลิน่า และ Beijerinck ที่ใช้เลี้ยงสาหร่ายคลอเรลลา และความสามารถในการลดค่าไนเตรท-ไนโตรเจน และฟอสฟอรัสรวม ของน้ำทิ้งจากโรงงานขนมจีน ความเข้มข้น 0,25,50,75 และ 100 เปอร์เซ็นต์ ต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายทั้งสองชนิด พบว่าอาหารเลี้ยงเชื้อที่เติมน้ำทิ้ง 25% สาหร่ายทั้งสองชนิดเจริญได้ดีที่สุด และที่ความเข้มข้นของน้ำทิ้ง 25% และ 100% สามารถลดค่าไนเตรท-ไนโตรเจน และฟอสฟอรัสรวม ได้ดีที่สุด

สุดารัตน์ (2553) ได้ศึกษาการกำจัดฟอสฟอรัสและบีโอดีในน้ำเสียโดยกระบวนการตกตะกอนทางเคมีในโรงงานอุตสาหกรรมเส้นไหม พบว่าสภาวะที่เหมาะสม คือ ความเร็วรอบการกวนเร็ว 100 รอบต่อนาที นาน 3 นาที ความเร็วรอบการกวนช้า 20 รอบต่อนาที นาน 20 นาที แล้วทิ้งให้ตกตะกอน 60 นาที โดยใช้ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสและบีโอดีในน้ำเสียสังเคราะห์ คือ 190-230 และ 9-10.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ pH ที่เหมาะสมในการกำจัดฟอสฟอรัสมีค่า pH คือ 6, 5, 7 และ 6 ตามลำดับ และ pH ที่เหมาะสมในการกำจัดบีโอดี มีค่า pH คือ 7, 6, 8 และ 6 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ นำค่า

สภาวะที่เหมาะสมมาใช้ทดลองกับน้ำเสียก่อนเข้าและออกจากระบบ UASB ของโรงงานอุตสาหกรรม เส้นไหม พบว่าสามารถกำจัดบีโอดีและฟอสฟอรัส คือ 90% และ 99.7% ตามลำดับ

Siripattanakul *et al.* (2009) ได้ศึกษาศักยภาพในการผลิตเอทานอลจากน้ำเสียของโรงงาน ขนมหิน โดยใช้ยีสต์ที่ถูกเลี้ยงด้วยแคลเซียมอัลจิเนต และยีสต์อิสระ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพ การบำบัดน้ำเสีย และความเป็นไปได้ในการผลิตเอทานอล ผลการศึกษา พบว่า ยีสต์ที่ถูกเลี้ยงด้วย แคลเซียมอัลจิเนตมีประสิทธิภาพในการลดค่าซีโอดีได้ร้อยละ 33-46 ส่วนยีสต์อิสระไม่สามารถลด ค่าซีโอดีได้ นอกจากนี้ยีสต์ทั้งสองประเภทมีศักยภาพในการผลิตเอทานอลประมาณ 643-801 มิลลิกรัมต่อลิตร

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. อุปกรณ์ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

- 1.1 เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible Spectrophotometer)
- 1.2 เครื่องย่อยสลาย (Digestion Block) พร้อมหลอดย่อยสาร (Digestion Vessels)
- 1.3 เครื่องจาร์เทสต์ (Jar Test)
- 1.4 เครื่องมือที่ใช้ตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำ ประกอบด้วย DO-Meter, pH-Meter, Turbidity-Meter, Digital TDS-Meter and EC-Meter
- 1.5 เครื่องชั่งน้ำหนักชนิดละเอียด 2 ตำแหน่ง อ่านค่าละเอียด 0.00 กรัม รุ่น WB-0250003 บริษัท Mettler Toledo รุ่น PB-1501
- 1.6 กระบะพลาสติกขนาด $51 \times 51 \times 54$ ซม.
- 1.7 ตู้ดูดความชื้น (Desiccator)
- 1.8 เครื่องแก้วที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ
- 1.9 คอลัมน์แก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร สูง 33 เซนติเมตรพร้อมแคมป์และขาตั้ง
- 1.10 กระดาษกรอง GF/C ขนาด 0.45 ไมครอน ของ Whatman

2. สารเคมี

2.1 โพแทสเซียมไดโครเมต (Potassium Dichromate; $K_2Cr_2O_7$) Grade AR

2.2 เฟอรัสแอมโมเนียมซัลเฟต (Ferrous ammonium sulfate (FAS); $(NH_4)_2Fe(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$)
Grade AR

2.3 กรดซัลฟิวริก (Sulphuric Acid; H_2SO_4) Grade AR

2.4 อินดิเคเตอร์เฟอโรอิน (Ferroin) Grade AR

2.5 เมอร์คิวริกซัลเฟต (Mercuric Sulfate; $HgSO_4$) Grade AR

2.6 ซิลเวอร์ซัลเฟต (Ag_2SO_4) Grade AR

2.7 1,10-ฟีแนนโทรีนโมโนไฮเดรต (1,10-Phenanthroline Monohydrate; $C_{12}H_8N_2 \cdot H_2O$)
Grade AR

2.8 ไอร์ออน (II) ซัลเฟตเฮปต้าไฮเดรต ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$) Grade AR

2.9 เฟอรัสแอมโมเนียมซัลเฟตเฮกซะไฮเดรต (FAS) Grade AR

2.10 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide, NaOH) Grade AR

2.11 อลูมิเนียมซัลเฟต (Aluminium, Alum)

2.12 ปูนขาว (lime)

3. ถ่านกะลามะพร้าว

มีลักษณะเป็นเกล็ด เกรด PHO 8x30 ผ่านการทดสอบมาตรฐานตาม American Society for Testing and Material, ASTM

4. วัสดุปลูก

วัสดุปลูกที่ใช้ ได้แก่ ดินนา เป็นดินเหนียวปนทราย กรวด ทรายหยาบ และทรายละเอียด

5. พืชที่ใช้ปลูก

พืชที่ใช้บวบมี 2 ชนิด คือ กกกลม และรูปถาวย

6. น้ำเสีย

ใช้น้ำเสียจากบ่อรวมน้ำเสียของโรงงานขนมจีน

วิธีการ

1. การเตรียมสารละลาย

1.1 สารละลายโพแทสเซียมไดโครเมตเข้มข้น 0.1 N

อบโพแทสเซียมไดโครเมต ที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งอย่างละเอียด 4.913 กรัม ละลายในน้ำกลั่นประมาณ 500 มิลลิลิตร ค่อยๆ เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 167 มิลลิลิตร เติมเมอร์คิวริกซัลเฟต 33.3 กรัม คนให้ละลายตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 1 ลิตร

1.2 กรดซัลฟิวริกเอเจนต์

ชั่งซิลเวอร์ซัลเฟต 10.11 กรัม เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1 ลิตร กวนช้าๆ จนซิลเวอร์ซัลเฟตละลายหมด

1.3 สารละลายเฟอร์โรอินอินดิเคเตอร์

ละลาย 1,10-ฟีแนนโทรีนโมโนไฮเดรต 1.485 กรัม และไอร์ออน (II) ซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต 0.695 กรัม ในน้ำกลั่น ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 100 มิลลิลิตร

1.4 สารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตเข้มข้น 0.1 N

ชั่งเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตเฮกซะไฮเดรต 39.2 กรัม เติมน้ำกลั่นประมาณ 500 มิลลิลิตร เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 20 มิลลิลิตร คนให้ละลาย ทิ้งให้เย็น แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 1 ลิตร สารละลายนี้ต้องเทียบมาตรฐานกับสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมตที่ใช้ในการย่อยสลายทุกครั้งที่น่าไปใช้

1.5 สารละลายอลูมิเนียมซัลเฟต

ละลาย $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ 18.9 กรัมในน้ำกลั่นแล้วเจือจางเป็น 1 ลิตร (1 มิลลิลิตร = 10 มิลลิกรัม อลูมิเนียมซัลเฟต)

1.6 สารละลายปูนขาว

ละลาย CaO (85–90 % [บริสุทธิ์]) 13 กรัมในน้ำกลั่น 800 กรัม แล้วนำไปต้มจนเกือบเดือดโดยกวนตลอดเวลาเพื่อให้สาร CaO ละลายได้มากที่สุด ทิ้งให้เย็นแล้วเทใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 1 ลิตร แล้วเจือจางให้ครบ 1 ลิตร (1 มิลลิลิตร = 10 มิลลิกรัม CaO)

1.7 โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.10 นอร์มัล

ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 40 กรัม แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 1 ลิตร

2. การเตรียมกราฟมาตรฐานสีแพลตทินัม-โคบอลต์

2.1 ปิเปตสารละลายสีแพลตทินัม-โคบอลต์ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร มา 2.00, 4.00, 6.00, 8.00, 10.00, 12.00, 14.00, 16.00, 18.00 และ 20.00 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100.00 มิลลิลิตรแต่ละขวด แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจะได้สารละลายมาตรฐานสีแพลตทินัม-โคบอลต์ ความเข้มข้น 10.00, 20.00, 30.00, 40.00, 50.00, 60.00, 70.00, 80.00, 90.00 และ 100.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

2.2 นำสารละลายมาตรฐานสีแพลตทินัม-โคบอลต์ จากข้อ 3.1 มาวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 320 นาโนเมตร ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ เขียนกราฟมาตรฐานระหว่างค่าดูดกลืนแสง (แกนตั้ง) และความเข้มข้นของสารละลายสีมาตรฐานแพลตทินัม-โคบอลต์ (แกนนอน)

3. การเตรียมตัวดูดซับถ่านกะลามะพร้าว

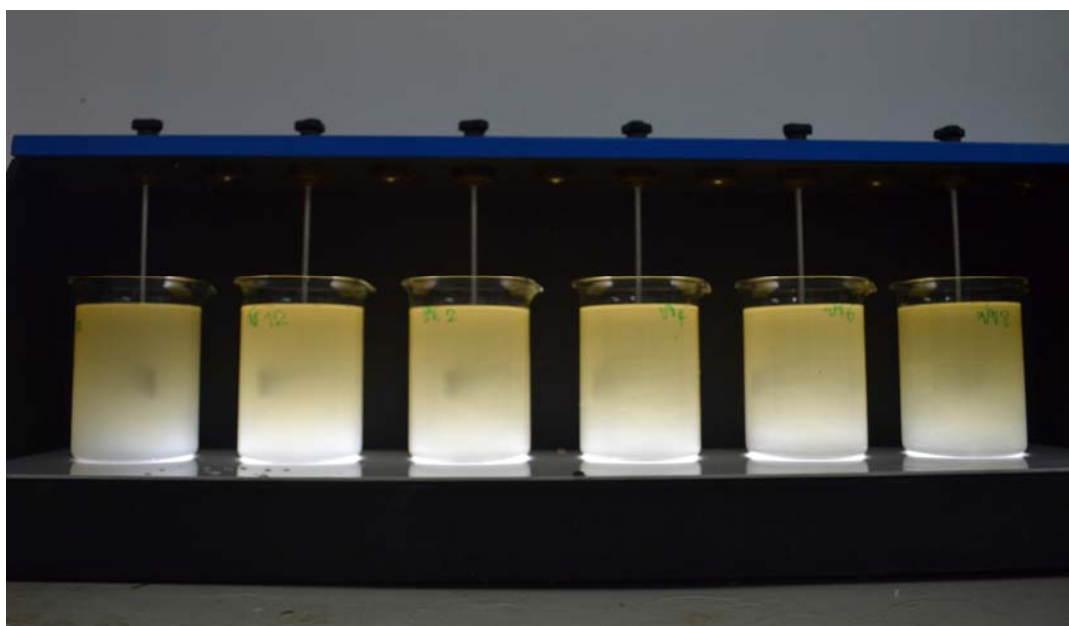
นำถ่านกะลามะพร้าวมาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เก็บในภาชนะที่ปิดมิดชิดไว้ใช้ในการศึกษาวิจัยต่อไป

4. การวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียจากโรงงานขนมจีน

พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์ ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) สี (color) ความขุ่น (turbidity) ความเค็ม (salinity) สภาพการนำไฟฟ้า (conductivity) ของแข็งทั้งหมดที่ละลายในน้ำ (Total Dissolved Solids, TDS) อุณหภูมิ (temperature) บีโอดี (Biochemical Oxygen Demand, BOD) และ ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand, COD)

5. ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการลดสีและความขุ่นในน้ำเสียของโรงงานขนมจีนด้วยวิธีการสร้างรวมตะกอน

การศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการลดสีและความขุ่นในน้ำเสียของโรงงานขนมจีนด้วยวิธีการสร้างรวมตะกอนโดยใช้เครื่องจาร์เจสต์ ดังภาพที่ 26 ในการทดลองนี้ใช้สารส้มและปูนขาวเป็นสารสร้างตะกอน โดยแบ่งการทดลองเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นการศึกษาชนิดและปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมในการลดค่าสีและความขุ่น และส่วนที่สองเป็นการศึกษาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการตกตะกอน กำหนดความเร็วรอบในการกวนเร็ว เท่ากับ 100 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 3 นาที กวนช้าเท่ากับ 40 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที



ภาพที่ 26 เครื่องจาร์ทดสอบ

5.1 ศึกษาชนิดและปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมในการตกตะกอน

5.1.1 การใช้สารส้มเป็นสารสร้างตะกอน

ปริมาณสารละลายสารส้มที่ศึกษา คือ 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22 และ 24 มิลลิลิตรต่อน้ำเสีย 1,000 มิลลิลิตร ในแต่ละบีกเกอร์ปรับพีเอชเท่ากับ 7.0 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 โมลต่อลิตร ตั้งบีกเกอร์บนเครื่องจาร์ทดสอบ กวนน้ำเสียด้วยความเร็วรอบในการกวนเร็วเท่ากับ 100 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 3 นาที และกวนช้าเท่ากับ 40 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที รอให้ตกตะกอน ดูดน้ำส่วนใสในบีกเกอร์แต่ละใบไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการบำบัดสีและความขุ่น

5.1.2 การใช้ปูนขาวเป็นสารสร้างตะกอน

ปริมาณสารละลายปูนขาวที่ศึกษา คือ 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 และ 50 มิลลิลิตรต่อน้ำเสีย 1,000 มิลลิลิตร ในแต่ละบีกเกอร์ปรับพีเอชเท่ากับ 7.0 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 โมลต่อลิตร ทำการทดลองต่อเช่นเดียวกับข้อ 5.1.1

5.2 ศึกษาพีเอชที่เหมาะสมในการตกตะกอน

5.2.1 พีเอชที่เหมาะสมในการตกตะกอนด้วยสารส้ม

พีเอชที่ศึกษา คือ 6, 7, 8, 9 และ 10 โดยปรับพีเอชน้ำเสีย 1000 มิลลิลิตร ในแต่ละบีกเกอร์ ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 โมลต่อลิตร ใช้ปริมาณสารส้มที่ได้จากการทดลองข้อ 5.1.1 ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 5.1.1

5.2.2 พีเอชที่เหมาะสมในการตกตะกอนด้วยปูนขาว

พีเอชที่ศึกษา คือ 6, 7, 8, 9 และ 10 โดยปรับพีเอชน้ำเสีย 1000 มิลลิลิตร ในแต่ละบีกเกอร์ โดยปรับพีเอชด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 โมลต่อลิตร ใช้ปริมาณปูนขาวที่ได้จากการทดลองข้อ 5.1.2 ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 5.1.1

5.3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารสร้างตะกอน

โดยพิจารณาจากผลการทดลองที่ได้จากข้อ 5.1 และ 5.2 เพื่อให้ได้ชนิดของสารสร้างตะกอน ปริมาณ และพีเอชที่เหมาะสม มาใช้ในการทดลองขั้นต่อไป

6. ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียโดยการดูดซับด้วยถ่านกะลามะพร้าว

ในการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียโดยการดูดซับด้วยถ่านกะลามะพร้าวโดยทำการทดลองแบบแบตช์ ปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่ ปริมาณตัวดูดซับถ่านกะลามะพร้าว ระยะเวลาบำบัดที่เหมาะสม และไอโซเทอร์มของการดูดซับ ดังนี้

6.1 ปริมาณตัวดูดซับถ่านกะลามะพร้าวที่ใช้ศึกษาคือ 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 และ 40 กรัม ค่อน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการสร้างรวมตะกอน 100 มิลลิลิตร เขย่าและตั้งทิ้งไว้ 60 นาที จากนั้นกรองด้วยกระดาษกรองเมมเบรน ขนาด 0.45 ไมครอน และนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการบำบัดสี ความขุ่น และซีโอดี

6.2 ระยะเวลาบำบัดที่เหมาะสม โดยแบ่งการศึกษาเป็นชั่วโมงและวัน โดยใช้ตัวดูดซับ ถ่านกัมมาะพร้าวเท่ากับที่ศึกษาได้จากข้อ 6.1 ต่อน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการสร้างรวม ตะกอน 100 มิลลิลิตรและทำการทดลองต่อเช่นเดียวกับข้อ 6.1 โดยแปรผันระยะเวลาที่ใช้บำบัดเป็น ชั่วโมง คือ ตั้งแต่ 1 ถึง 6 ชั่วโมง และแปรผันระยะเวลาที่ใช้บำบัดเป็นวัน คือ ตั้งแต่ 1 ถึง 7 วัน

6.3 การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ ของตัวดูดซับบนถ่านกัมมาะพร้าว ทำการทดลอง เช่นเดียวกับข้อ 6.1 โดยใช้ระยะเวลาสัมผัสเท่ากับที่ศึกษาได้จากข้อ 6.2 นำข้อมูลที่ได้มาเขียนไอโซ เทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์และแบบฟรุนดลิช

7. ศึกษาปริมาณดินนาผสมทรายในอัตราส่วนที่เหมาะสม

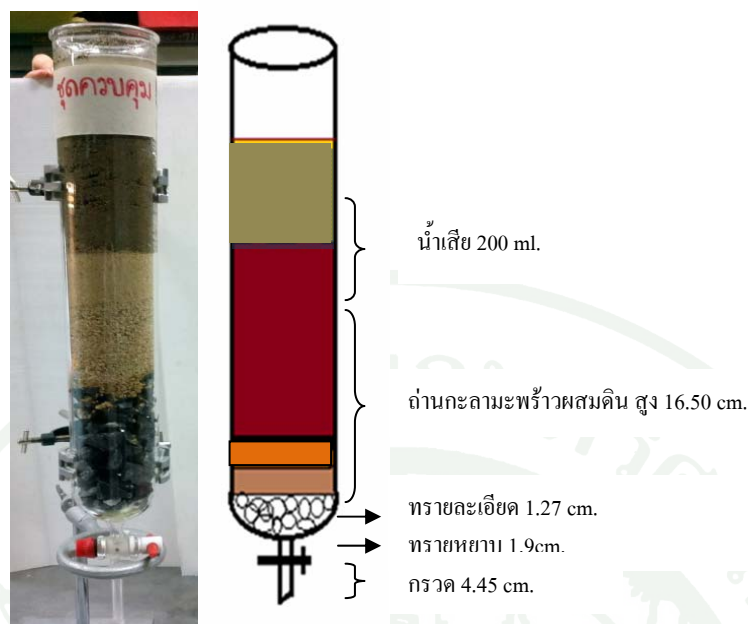
ในการศึกษาปริมาณดินที่เหมาะสมโดยทำการทดลองแบบเบดซ์ ปริมาณดินที่ใช้ใน การศึกษา คือ 10 , 20 , 30 , 40 , 50 , 60 และ 70 กรัม ต่อน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการ สร้างรวมตะกอน 100 มิลลิลิตร เขย่าและตั้งทิ้งไว้ 60 นาที และทำการทดลองต่อเช่นเดียวกับข้อ 6.1

8. ศึกษาอัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมาะพร้าวต่อดิน

การศึกษาอัตราส่วนระหว่างตัวดูดซับถ่านกัมมาะพร้าวต่อดินที่มีผลต่อประสิทธิภาพ การบำบัด โดยทำการทดลองแบบเบดซ์ อัตราส่วนระหว่างถ่านต่อดินที่ศึกษา คือ 1:10, 1:20, 1:30, 1:40, 1:50, 1:60 และ 1:70 ต่อน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการสร้างรวมตะกอน 100 มิลลิลิตร และระยะเวลาสัมผัสเท่ากับที่ศึกษาได้จากการทดลองข้อ 6.2 และทำการทดลองต่อ เช่นเดียวกับข้อ 6.1

9. การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดโดยวิธีการไหลแบบต่อเนื่อง

9.1 ทำการทดลองโดยใช้คอลัมน์แก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร สูง 33 เซนติเมตร บรรจุชั้นวัสดุปลูกเลียนแบบพื้นที่เพาะปลูกของระบบบำบัดน้ำเสียและพื้นที่ ชุ่มน้ำเทียมของโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ย โดยบรรจุชั้นกรวด 4.45 เซนติเมตร ทรายหยาบ 1.9 เซนติเมตร ทรายละเอียด 1.27 เซนติเมตร และถ่านกัมมาะพร้าวผสม ดินในอัตราส่วนที่ศึกษาได้จากข้อ 8 สูง 16.5 เซนติเมตร ดังภาพที่ 27



ภาพที่ 27 คอลัมน์บรรจุชั้นวัสดุปลูกสำหรับการทดลองแบบการไหลแบบต่อเนื่อง

9.2 การบำบัดน้ำเสียด้วยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมและระบบหมุนำกรองน้ำเสีย

9.2.1 การบำบัดน้ำเสียแบบระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม เติมน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการสร้างรวมตะกอน 200 มิลลิลิตร ลงในคอลัมน์ที่บรรจุวัสดุปลูกจากข้อ 9.1 และเก็บน้ำตัวอย่างที่ไหลผ่านคอลัมน์ตามระยะเวลาที่ศึกษาได้จากข้อ 6.2 หาประสิทธิภาพการบำบัดสี ความขุ่นและซีไอดี ทำการทดลองซ้ำจนประสิทธิภาพการบำบัดลดลงจากเดิมครึ่งหนึ่งหรือคงที่

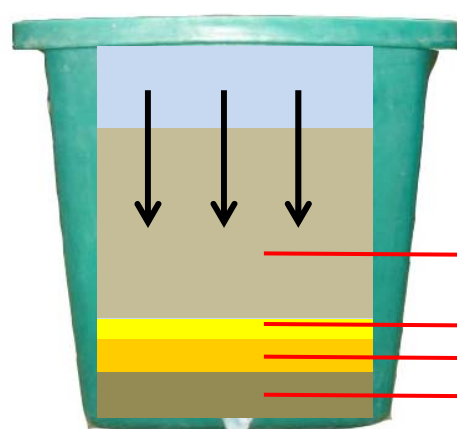
9.2.2 การบำบัดน้ำเสียแบบระบบหมุนำกรองน้ำเสีย เติมน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการสร้างรวมตะกอน 200 มิลลิลิตร ลงในคอลัมน์ที่บรรจุวัสดุปลูกจากข้อ 9.1 แช่ทิ้ง 5 วัน ปล่อยน้ำเสีย นำไปวิเคราะห์ และปล่อยให้วัสดุปลูกในคอลัมน์แห้ง 2 วัน หาประสิทธิภาพการบำบัดสี ความขุ่นและซีไอดี ทำการทดลองซ้ำจนประสิทธิภาพการบำบัดลดลงจากเดิมครึ่งหนึ่งหรือคงที่

9.3 ชุดควบคุม ทำการทดลองเช่นเดียวกับ ข้อ 9.2.1 และ 9.2.2 แต่เปลี่ยนจากการใช้น้ำเสียเป็นน้ำกลั่นแทนในการทดลอง เพื่อใช้เป็นชุดควบคุมผลการทดลองของวิธีการไหลแบบต่อเนื่อง

9.4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของทั้งสองระบบ เพื่อนำมาใช้ในการทำลองขั้นต่อไป

10. การจำลองการบำบัดน้ำเสียแบบระบบบ่งชี้การกรองน้ำเสียโดยใช้เทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็ก (Filtrated Lysimeter Technique)

10.1 ทำการทดลอง โดยใช้กระบะพลาสติกรูปสี่เหลี่ยมขนาด $51 \times 51 \times 54$ เซนติเมตร บรรจุกววดสูง 7 เซนติเมตร ทราฮายาบ 3 เซนติเมตร ทราฮละเอียด 2 เซนติเมตร และชั้นดินนาปน ทราฮผสมถ่านกะลามะพร้าวสูง 30 เซนติเมตร ดังภาพที่ 28 ทำการปลูกพืช 2 ชนิด คือ ต้นกกกลม และธูปฤาษี โดยปลูกชนิดละกระบะ อนุบาลจนพืชเจริญเติบโตแข็งแรง



ดินนาปนทราฮผสมถ่านกะลามะพร้าวสูง 30 เซนติเมตร

ทราฮละเอียด 2.00 เซนติเมตร

ทราฮหยาบ 3.00 เซนติเมตร

กรวด 7.00 เซนติเมตร

ภาพที่ 28 กระบะบรรจุชั้นวัสดุปลูกของการทดลองโดยใช้เทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็ก

10.2 เติมน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการสร้างรวมตะกอน 20 ลิตร ลงในกระบะทดลองที่บรรจุวัสดุปลูกจากข้อ 10.1 ปล่อยทิ้งไว้ 5 วัน ปล่อยน้ำออกทางด้านล่างของกระบะ เก็บตัวอย่างน้ำที่ผ่านการบำบัด เพื่อนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการบำบัดสี ความขุ่น และซีไอดี และปล่อยให้ชั้นวัสดุปลูกแห้ง 2 วัน ทำการทดลองเช่นเดิมจนประสิทธิภาพการบำบัดลดลงประมาณครึ่งหนึ่ง หรือมีประสิทธิภาพการบำบัดคงที่

10.3 วิเคราะห์คุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัดเช่นเดียวกับข้อ 4

10.4 ชุคควบคุม ใช้เป็นชุดควบคุมผลการทดลองของการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็ก ทำการทดลองเช่นเดียวกับ ข้อ 10.1 และ 10.2 แต่เปลี่ยนจากการใช้น้ำเสีย เป็นน้ำกลั่น เพื่อศึกษาว่ามีการชะล้างสิ่งเจือปนออกจากชั้นวัสดุปลูกหรือไม่

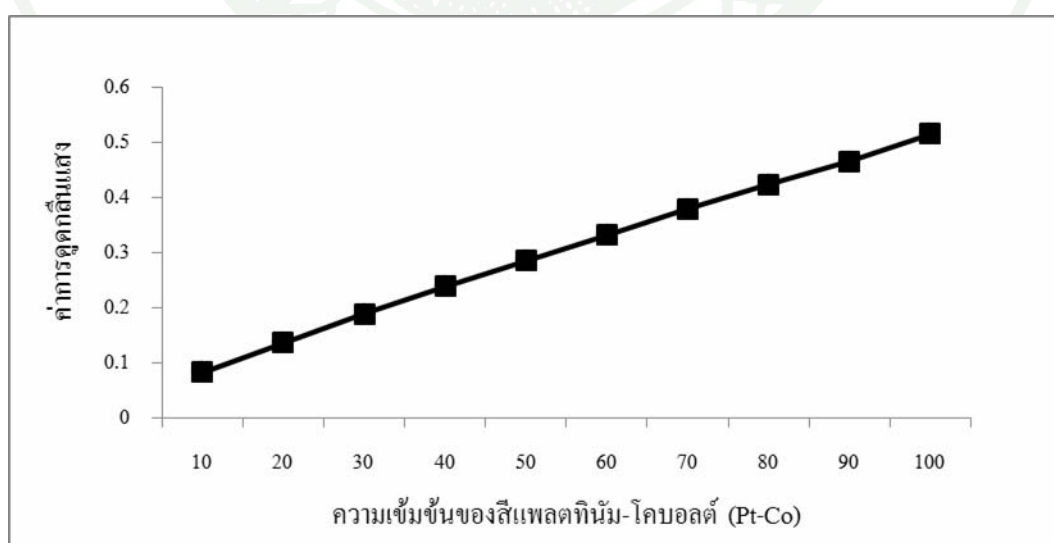
10.5 รวบรวมข้อมูล ประเมิน และวิเคราะห์ผล

ผลและวิจารณ์

การศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานขนมจินด้วยวิธีการสร้างรวมตะกอนกับระบบบำบัดแบบธรรมชาติ 2 แบบ คือระบบห้ำ้ากรองน้ำเสียและพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม ได้ผลการศึกษาแบ่งออกเป็น 6 ส่วน ดังนี้ คือ ส่วนที่ 1 เป็นผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียของโรงงานขนมจินก่อนได้รับการบำบัด ส่วนที่ 2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการลดสีและความขุ่นในน้ำเสียของโรงงานขนมจินด้วยการสร้างรวมตะกอนโดยใช้วิธีจาร์เทสต์ ส่วนที่ 3 เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียโดยการดูดซับด้วยถ่านกะลามะพร้าวด้วยวิธีแบบเบดซ์และไอโซ เทอร์มของการดูดซับ ส่วนที่ 4 เป็นผลการศึกษาปริมาณดิน และอัตราส่วนระหว่างถ่านกะลามะพร้าวต่อดินที่ให้ประสิทธิภาพการบำบัดดีที่สุด ส่วนที่ 5 เป็นการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง ส่วนที่ 6 เป็นการจำลองการบำบัดน้ำเสียแบบระบบห้ำ้ากรองน้ำเสียโดยใช้เทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็ก มีรายละเอียดผลการทดลองดังนี้

1. กราฟมาตรฐานสารละลายสีแพลตทินัม-โคบอลต์

กราฟมาตรฐานสีแพลตทินัม-โคบอลต์ที่เตรียมจากการทดลองข้อที่ 2 มีลักษณะเป็นกราฟเส้นตรง สมการเชิงถดถอยเชิงเส้นคือ $y = 0.0048x + 0.0424$ และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.9991 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ดังภาพที่ 29



ภาพที่ 29 กราฟมาตรฐานสีแพลตทินัม-โคบอลต์

2. การวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียจากโรงงานขนมจีน

ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียจากโรงงานผลิตขนมจีน ได้ผลดังตารางที่ 4 พบว่า น้ำเสียมีลักษณะเป็นกรด ค่าการนำไฟฟ้าและของแข็งละลายได้ทั้งหมดสูง และค่าซีโอดีและบีโอดีมีค่าเกินเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม (ฝ่ายตรวจและบังคับการ กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม) แสดงว่าน้ำเสียมีปริมาณสารอินทรีย์ปนเปื้อนอยู่สูงมาก ดังนั้นมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่น้ำเสียจากโรงงานขนมจีนควรได้รับการบำบัดก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบคุณภาพน้ำโรงงานขนมจีน กับค่ามาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม และนิคมอุตสาหกรรม

พารามิเตอร์	คุณภาพน้ำโรงงานขนมจีน	ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม และนิคมอุตสาหกรรม
พีเอช	4.25	5.5 – 9.0
ที (Pt-Co Unit)	844.29	5-15*
EC ($\mu\text{S}/\text{cm.}$)	15,245	-
TDS (mg/L)	10,055	ไม่เกิน 3,000
ความเค็ม (mg/L)	7.4	2,000
ความขุ่น (NTU)	323.5	-
ซีโอดี (mg/L)	2,288	ไม่เกิน 120
บีโอดี (mg/L)	1,475	ไม่เกิน 20
อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	28.5	ไม่เกิน 40

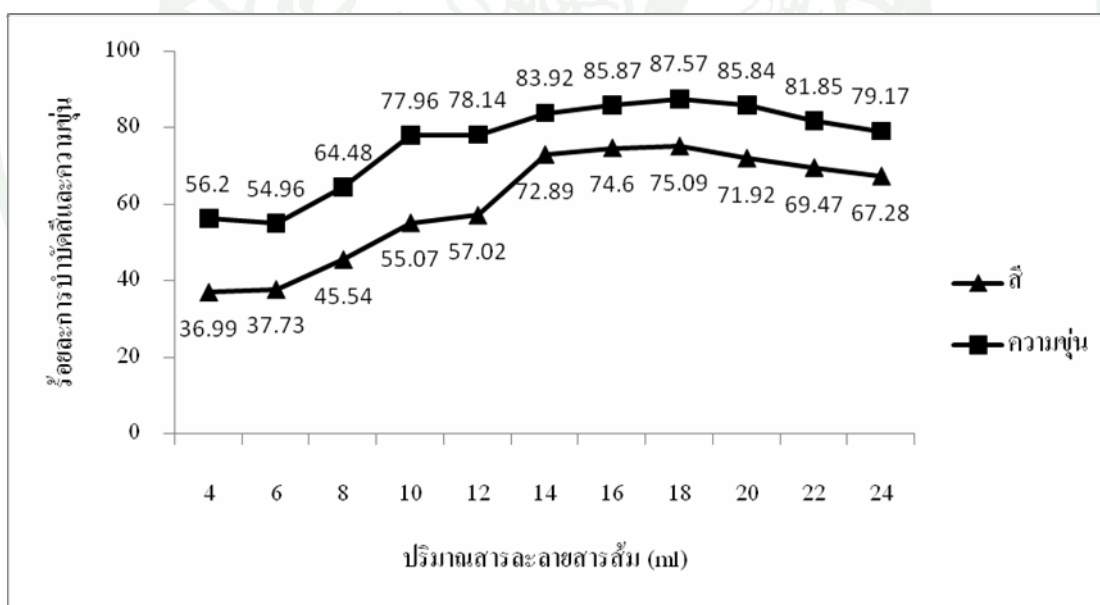
* มาตรฐานคุณภาพน้ำเพื่อการบริโภค

3. การศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการลดสีและความขุ่นจากน้ำเสียของโรงงานขนมจีนโดยวิธีการสร้างรวมตะกอน

3.1 ศึกษาชนิดและปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมในการสร้างรวมตะกอน

3.1.1 การใช้สารส้มเป็นสารสร้างตะกอน

จากการศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการลดสีและความขุ่นในน้ำเสียของโรงงานขนมจีนด้วยการสร้างรวมตะกอนโดยใช้วิธีจาร์เทสต์ ปริมาณสารส้มที่ศึกษา คือ 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22 และ 24 มิลลิลิตรต่อน้ำเสีย 1,000 มิลลิลิตร โดยปรับค่าพีเอชเท่ากับ 7.0 พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดสี และความขุ่นเพิ่มขึ้น และในตอนแรกมีแนวโน้มคงที่จนลดต่ำลง ซึ่งปริมาณสารละลายสารส้ม 18 มิลลิลิตร สามารถบำบัดสีและความขุ่น ได้ดีที่สุดที่ร้อยละ 75.09 และ 87.57 ตามลำดับ ดังภาพที่ 30

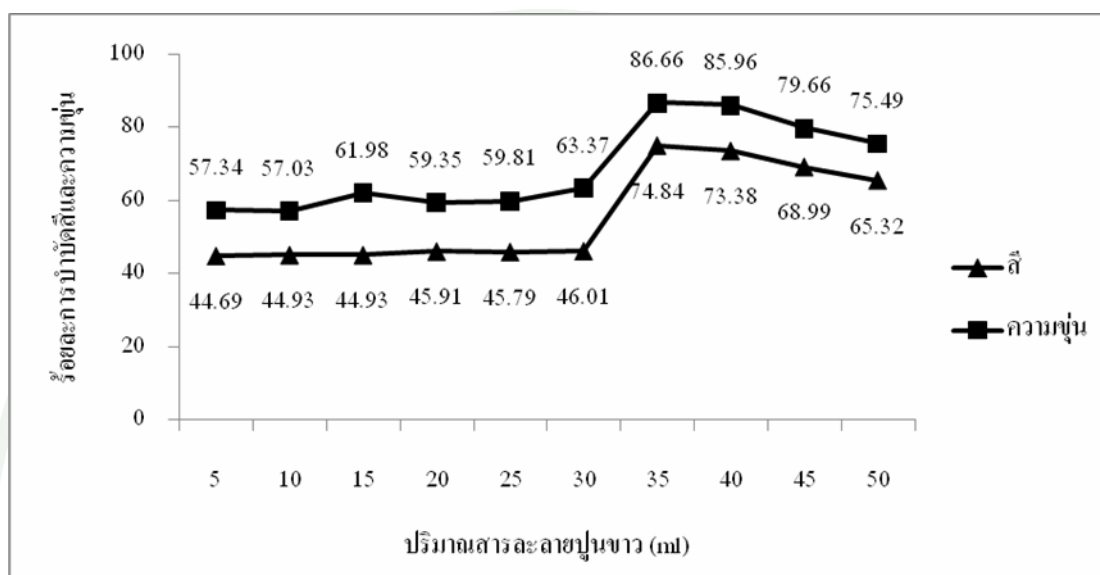


ภาพที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารละลายสารส้มกับร้อยละการบำบัดสีและความขุ่น

3.1.2 การใช้ปูนขาวเป็นสารสร้างตะกอน

จากการศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการลดสีและความขุ่นในน้ำเสียของโรงงานขนมจีนด้วยการสร้างรวมตะกอนโดยใช้วิธีจาร์เทสต์ ปริมาณสารละลายปูนขาวที่ศึกษา คือ 5, 10,

15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 และ 50 มิลลิลิตรต่อน้ำเสีย 1,000 มิลลิลิตร โดยปรับค่าพีเอชเท่ากับ 7.0 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารละลายปูนขาว ประสิทธิภาพการบำบัดสี และความขุ่นเพิ่มขึ้น และเริ่มมีแนวโน้มคงที่จนลดต่ำลง ซึ่งสารละลายปูนขาว 25 มิลลิลิตร สามารถบำบัดสีและความขุ่น ได้ดีที่สุดที่ร้อยละ 74.84 และ 86.66 ตามลำดับ ดังภาพที่ 31

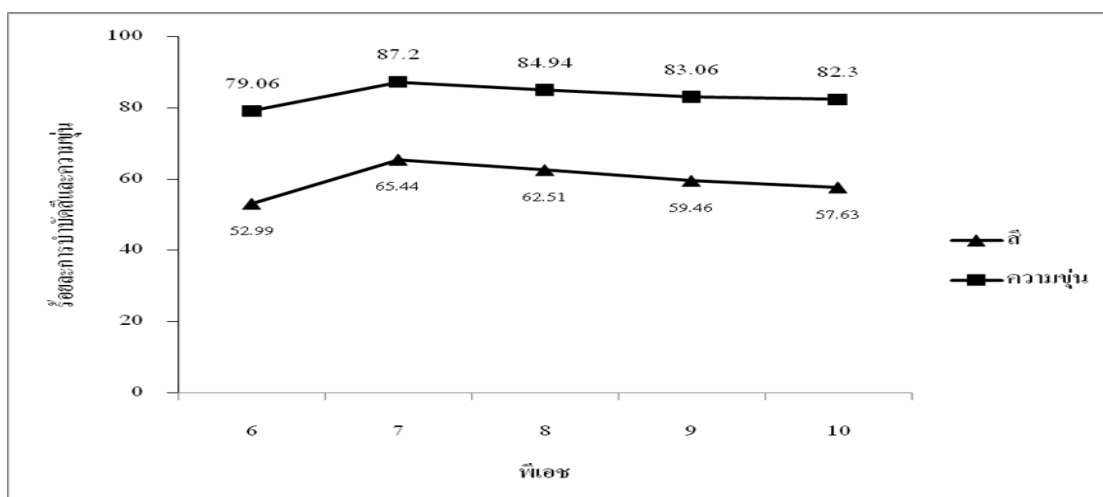


ภาพที่ 31 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารละลายปูนขาวกับร้อยละการบำบัดสีและความขุ่น

3.2 ศึกษาพีเอชที่เหมาะสมในการสร้างรวมตะกอน

3.2.1 พีเอชที่เหมาะสมเมื่อใช้สารส้มเป็นสารสร้างตะกอน

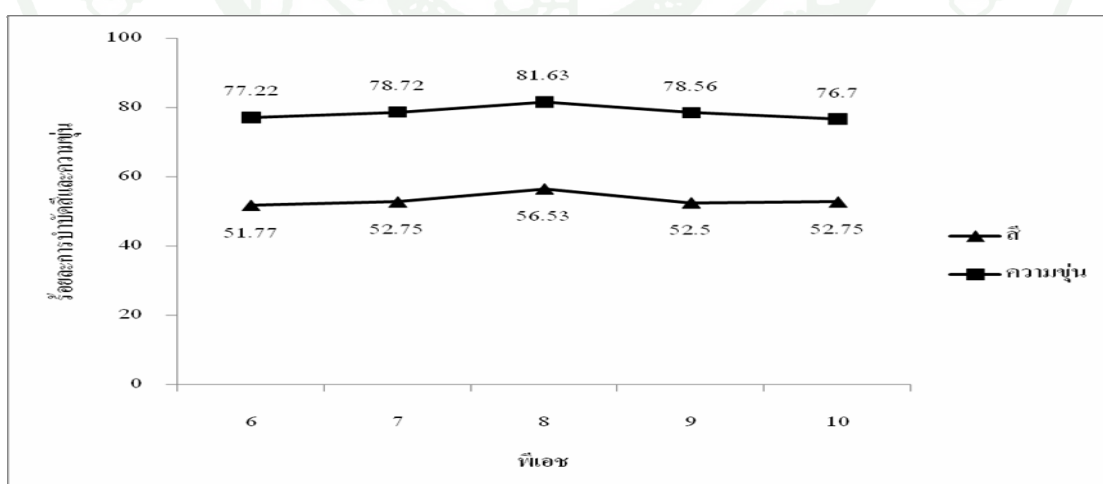
เมื่อนำน้ำเสียจากโรงงานขนมจินมาผ่านกระบวนการสร้างรวมตะกอนโดยวิธีจาร์เทสต์เพื่อหาพีเอชที่เหมาะสมในการบำบัดสีและความขุ่น พีเอชที่ศึกษา คือ 6, 7, 8, 9 และ 10 ควบคุมปริมาณสารละลายสารส้ม เท่ากับ 18 มิลลิลิตร พบว่า ที่พีเอช 7.0 มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีและความขุ่นได้ดีที่สุดร้อยละ 65.44 และ 87.20 ดังภาพที่ 32



ภาพที่ 32 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับร้อยละการบำบัดสีและความชุ่มเมื่อใช้สารส้มเป็นสารสร้างตะกอน

3.2.2 พีเอชที่เหมาะสมเมื่อใช้สารละลายปูนขาวเป็นสารสร้างตะกอน

ทำการทดลองเช่นเดียวกับสารส้ม แต่ควบคุมปริมาณสารละลายปูนขาว เท่ากับ 35 มิลลิลิตร พบว่า ที่พีเอช 8.0 มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีและความชุ่ม ได้ดีที่สุดร้อยละ 56.53 และ 81.63 ดังภาพที่ 33



ภาพที่ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับร้อยละการบำบัดสีและความชุ่มเมื่อใช้ปูนขาวเป็นสารสร้างตะกอน

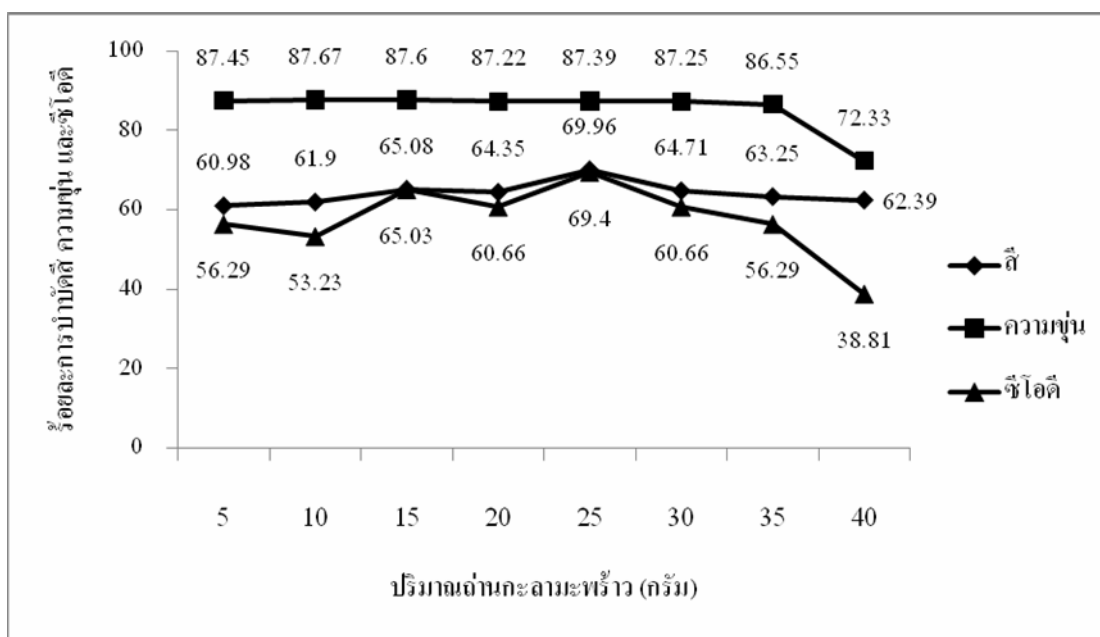
3.3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารสร้างตะกอน

จากผลการทดลองศึกษาชนิดและปริมาณสารสร้างตะกอนและพีเอชที่เหมาะสมในข้อ 5.2-5.3 พบว่า ปริมาณสารละลายสารส้ม 18 ml ที่พีเอชเท่ากับ 7.0 มีประสิทธิภาพในการสร้างตะกอนได้ดีกว่าปูนขาว เป็นผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสีและความขุ่นในน้ำเสียได้ดีกว่าปูนขาว โดยสารส้มสามารถบำบัดสีและความขุ่นได้ดีที่สุดที่ร้อยละ 65.44 และ 87.20 ตามลำดับปูนขาวมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีและความขุ่นได้ดีที่สุดร้อยละ 56.53 และ 81.63 ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกสารส้มเป็นสารสร้างตะกอนในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานขนมจันทบุรีต่อไป

4. การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียโดยการดูดซับด้วยถ่านกะลามะพร้าวด้วยวิธีแบบแบตช์ และไอโซเทอร์มของการดูดซับ

4.1 ปริมาณถ่านกะลามะพร้าว

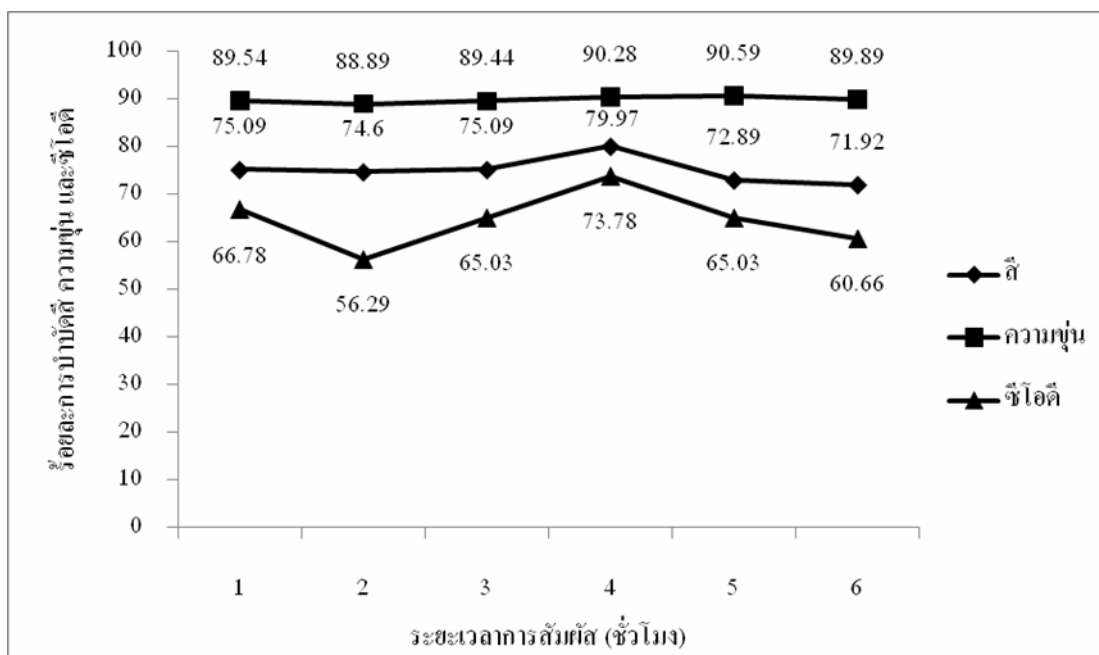
จากการทดลองเมื่อเพิ่มปริมาณถ่านกะลามะพร้าวเป็น 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 และ 40 กรัม ค่อน้ำเสียที่ผ่านการสร้างรวมตะกอนด้วยสารส้ม 100 มิลลิตร ที่ระยะเวลาสัมผัส 60 นาที พบว่าปริมาณถ่านกะลามะพร้าวตั้งแต่ 5 จนถึง 25 กรัม ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสี ความขุ่น และซีไอดีใกล้เคียงกัน จากนั้นเริ่มมีแนวโน้มคงที่จนลดต่ำลง ที่ปริมาณถ่าน 25 กรัม ให้ประสิทธิภาพการบำบัดสี ความขุ่น และซีไอดีดีที่สุดที่ร้อยละ 69.96, 87.39 และ 69.40 ตามลำดับ ดังภาพที่ 34 ซึ่งการเพิ่มปริมาณถ่านกะลามะพร้าว เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการดูดซับมลสารต่างๆ แต่ปริมาณมลสารที่ถ่านกะลามะพร้าวดูดซับได้ในแต่ละการทดลองมีปริมาณคงที่ ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับมากขึ้นเรื่อยๆ จึงไม่ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้น และอาจเกิดการคายซับร่วมด้วย จึงทำให้ร้อยละการดูดซับมีแนวโน้มลดลง (นิพนธ์และคณิตา, 2550)



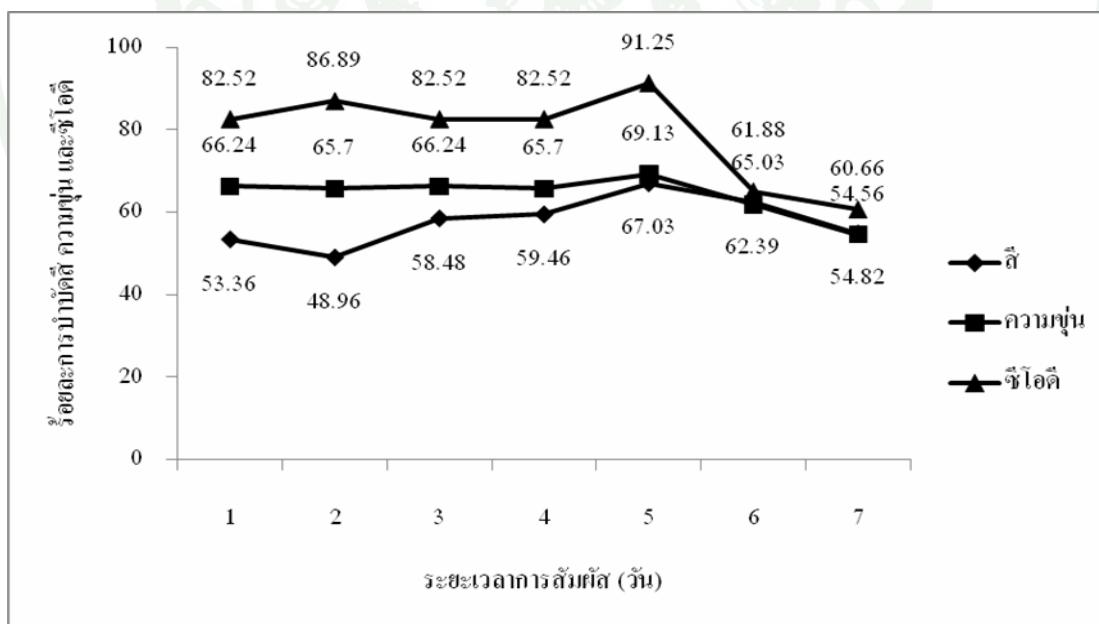
ภาพที่ 34 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี ความชื้น และซีโอดี กับปริมาณน้ำ (กรัม)

4.2 ระยะเวลาสัมผัส

จากการทดลองที่ 6.2 ใช้ถ่านกัมมันต์ 25 กรัมต่อน้ำเสียที่ผ่านการสร้างรวมตะกอนด้วยสารส้ม 100 มิลลิกรัม และทำการแปรผันระยะเวลาสัมผัสทั้งที่เป็นชั่วโมงและวัน พบว่าที่ระยะเวลาสัมผัสในชั่วโมงที่ 4 ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสี ความชื้น และซีโอดีดีที่สุดร้อยละ 79.97, 90.28 และ 73.78 ตามลำดับ ดังภาพที่ 35 ส่วนที่ระยะเวลาสัมผัสที่ 1-7 วัน พบว่าที่ระยะเวลาสัมผัส 5 วันให้ร้อยละการบำบัดสี ความชื้น และซีโอดีดีที่สุดร้อยละ 67.03, 69.13 และ 91.25 ตามลำดับ ดังภาพที่ 36 ซึ่งให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงกว่าที่ระยะเวลาสัมผัสที่ 4 ชั่วโมง โดยการเพิ่มระยะเวลาสัมผัสเป็นชั่วโมงและเป็นวัน ถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพในการบำบัดทั้งสี ความชื้น และซีโอดีเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้น เป็นการเพิ่มระยะเวลาให้มลสารมีโอกาสสัมผัสกับถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้น แต่พื้นที่ของตัวถักดูดซับมีจำกัด เมื่อถึงระยะเวลาหนึ่งจะดำเนินเข้าสู่ภาวะสมดุล ทำให้อัตราการดูดซับคงที่และอาจมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากเกิดการคายซับ



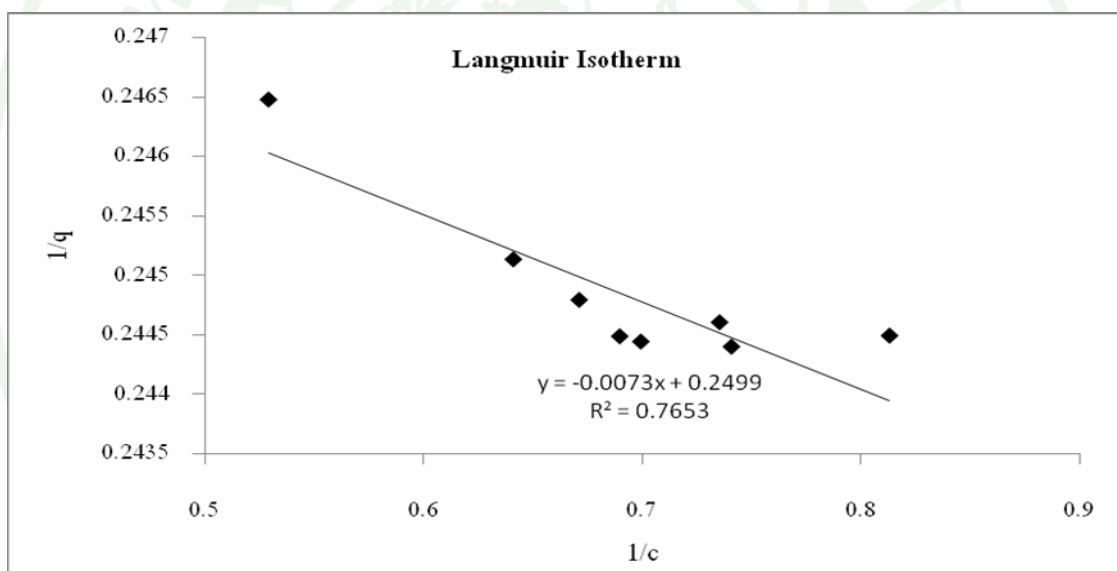
ภาพที่ 35 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดน้ำ คความชุ่ม และชีโอดีกับระยะเวลาการสัมผัส เป็นชั่วโมง



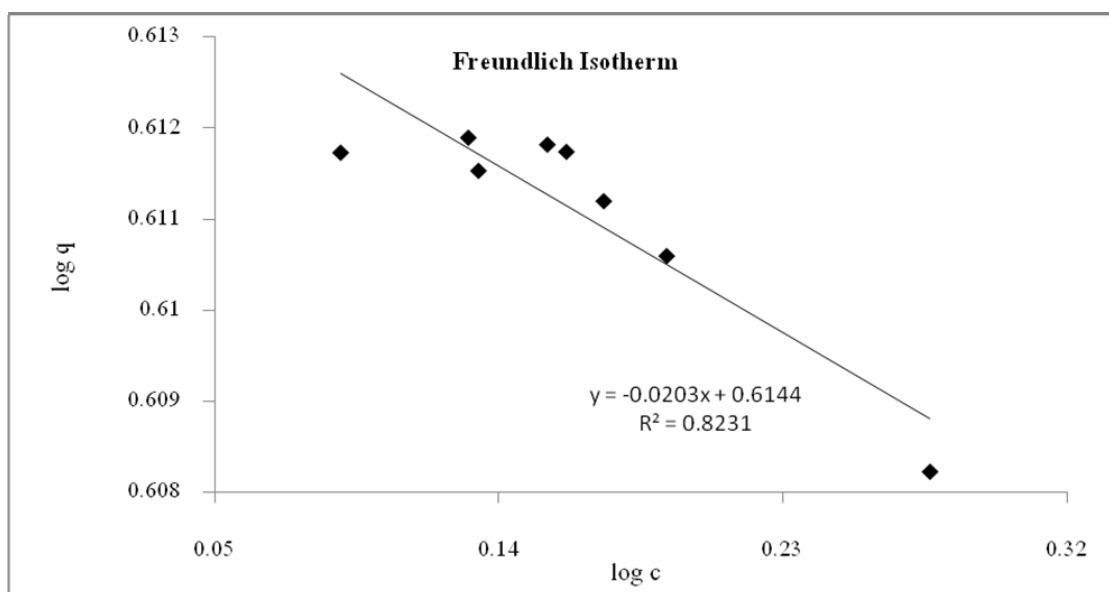
ภาพที่ 36 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดน้ำ คความชุ่ม และชีโอดีกับระยะเวลาการสัมผัส เป็นวัน

4.3 ไอโซเทอร์มการดูดซับ

เมื่อเขียนกราฟแสดงไอโซเทอร์มของแสงเมียร์และฟรุณดิชได้กราฟดังภาพที่ 37 และภาพที่ 38 ตามลำดับ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าเท่ากับ 0.7653 และ 0.8231 ตามลำดับซึ่งมีความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ ดังนั้น กลไกการดูดซับจึงสอดคล้องกับไอโซเทอร์มของทั้งแสงเมียร์และฟรุณดิช โดยการดูดซับแบบแสงเมียร์ เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption) โมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวนที่แน่นอนและมีตำแหน่งของการดูดซับที่แน่นอน และแบบฟรุณดิชเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (multilayer adsorption) โดยโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะถูกดูดซับบนชั้นโมเลกุลที่ถูกดูดซับก่อนหน้านี้ และจำนวนชั้นของโมเลกุลตัวถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับเพิ่มขึ้น (นิพนธ์ และ คณิตา, 2550)



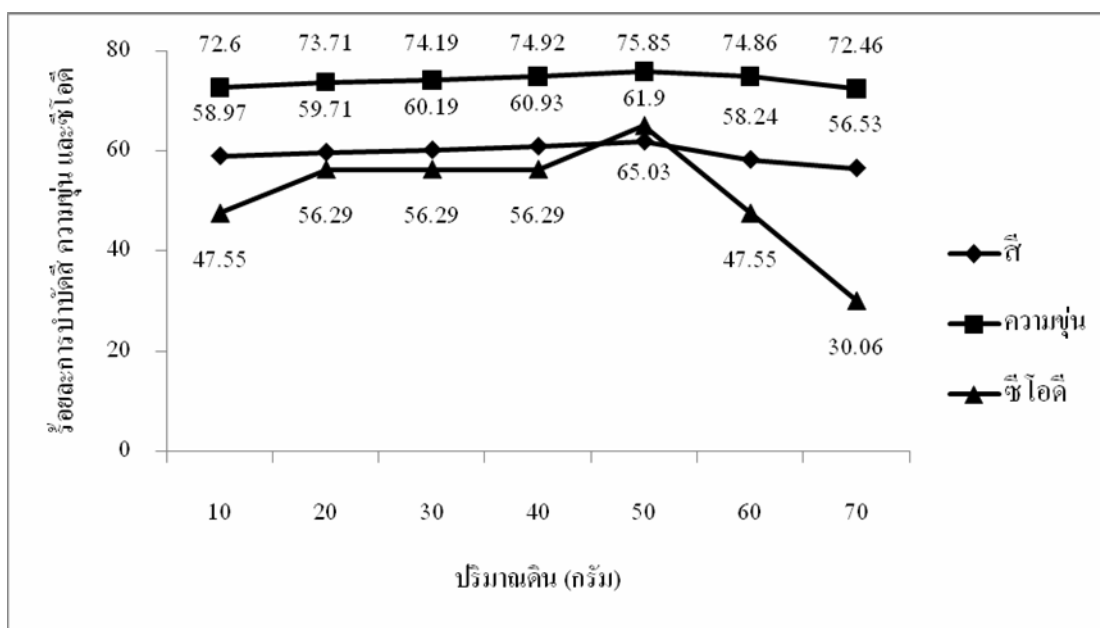
ภาพที่ 37 ไอโซเทอร์มแบบแสงเมียร์ของการดูดซับด้วยถ่านกะลามะพร้าว



ภาพที่ 38 ไอโซเทอร์มแบบฟรอนด์ลิจของการดูดซับด้วยถ่านกะลามะพร้าว

5. การศึกษาปริมาณดินนาที่ให้ประสิทธิภาพการบำบัดดีที่สุด

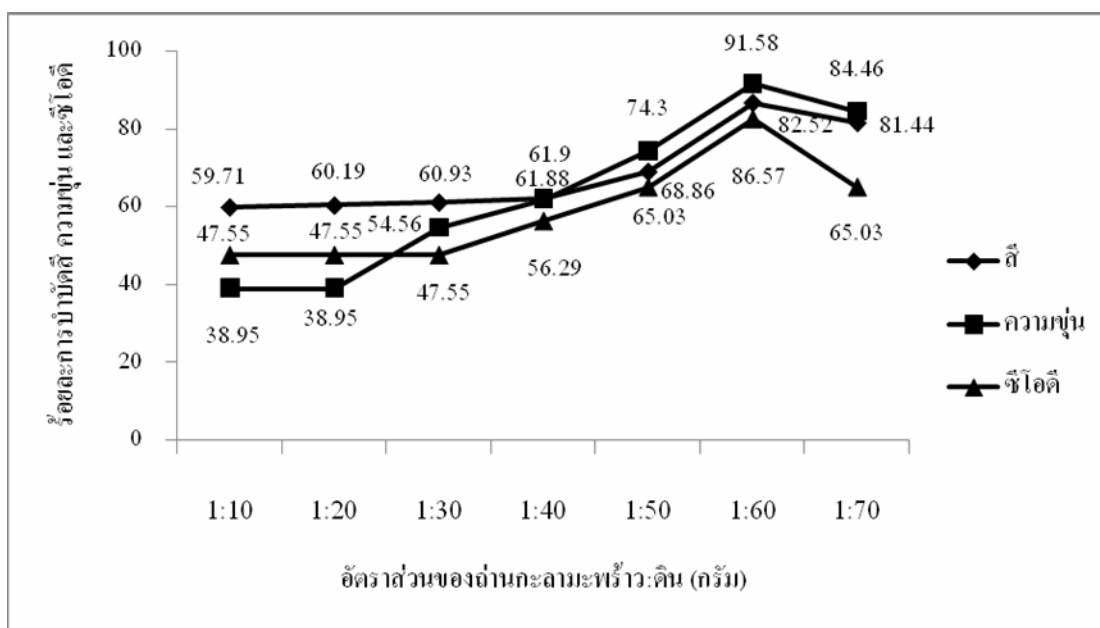
จากการทดลองแปรผันปริมาณดินนา 10-70 กรัมต่อน้ำเสีย 100 มิลลิลิตร ที่ระยะเวลาสัมผัส 60 นาที เพื่อหาประสิทธิภาพการบำบัดสี ความขุ่น และซีโอดี พบว่าปริมาณดินที่ 50 กรัม ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสี ความขุ่น และซีโอดีดีที่สุดที่สุทธร้อยละ 65.03, 75.85 และ 61.90 ตามลำดับ ดังภาพที่ 39 ซึ่งการเพิ่มปริมาณดินทำให้พื้นที่ผิวของตัวดูดซับเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มขึ้นด้วย และประสิทธิภาพการบำบัดจะลดลง เมื่อพื้นที่ผิวของตัวดูดซับถูกครอบครองด้วยตัวถูกดูดซับจนอิ่มตัว ทำให้ไม่มีพื้นที่ผิวที่สามารถดูดซับตัวถูกดูดซับได้



ภาพที่ 39 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี ความชุ่ม และซีโอดี กับปริมาณดิน

6. การศึกษาอัตราส่วนระหว่างถ่านกะลามะพร้าวต่อดินที่ให้ประสิทธิภาพการบำบัดสีที่สุด

จากผลการทดลองแบบแบตช์ โดยแปรผันอัตราส่วนของถ่านกะลามะพร้าว ต่อดินนาที่อัตราส่วน 1:10, 1:20, 1:30, 1:40, 1:50, 1:60 และ 1:70 ผสมกับน้ำเสียที่ผ่านการสร้างรวมตะกอนด้วยสารส้ม 100 มิลลิกรัม เหย้าและตั้งทิ้งไว้ 60 นาที พบว่าร้อยละการบำบัดสี ความชุ่ม และซีโอดีของแต่ละอัตราส่วนมีค่าใกล้เคียงกัน อัตราส่วน 1:60 ให้ประสิทธิภาพการบำบัดสี ความชุ่ม และซีโอดีดีที่สุดที่ร้อยละ 86.57, 91.58 และ 82.52 ตามลำดับ ดังภาพที่ 40

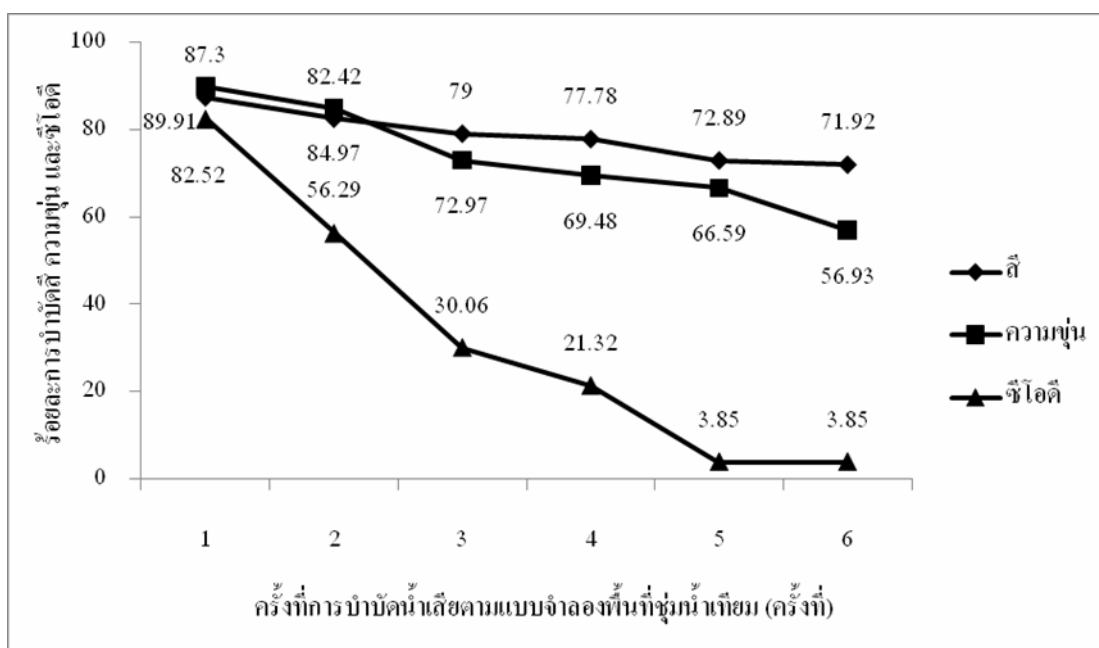


ภาพที่ 40 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดน้ำ ความชื้น และชีโอดี ของถ่านกะลามะพร้าว ผสมดินในอัตราส่วนต่างๆ

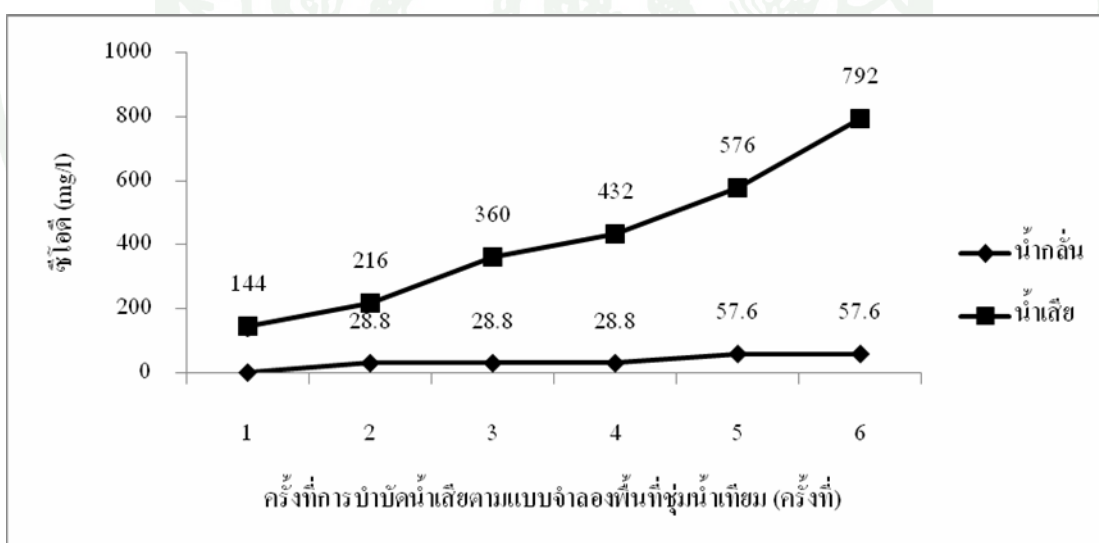
7. การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานขนมจันโดยวิธีการไหลแบบต่อเนื่อง

7.1 การจำลองระบบบำบัดแบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม

การจำลองการบำบัดน้ำเสียแบบระบบบำบัดพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม โดยแข่งขันน้ำเสียที่ผ่านการสร้างรวมตะกอนด้วยสารส้มปริมาตร 200 มิลลิลิตร ในคอลัมน์ที่บรรจุวัสดุปลูก เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จัดเป็นการบำบัดครั้งที่ 1 พบว่ามีประสิทธิภาพการบำบัดน้ำ ความชื้นและชีโอดีได้ดีที่สุด คือ ร้อยละ 89.91, 87.30 และ 82.52 ตามลำดับ หลังจากนั้นการบำบัดครั้งต่อไป ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำ ความชื้น และชีโอดีลดลงอย่างต่อเนื่อง ดังภาพที่ 41 ดังนั้นระบบบำบัดแบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมนี้สามารถบำบัดชีโอดีได้เฉพาะการบำบัดครั้งที่ 1 เท่านั้น เนื่องจากชีโอดีที่ผ่านการบำบัดครั้งที่ 2 มีค่าเกินเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม ดังภาพที่ 42 เนื่องจากพื้นที่ผิวสัมผัสในการดูดซับมลสารต่างๆ ยังมีพื้นที่มากและชั้นกรองยังมีสารติดค้างอยู่น้อย เมื่อระยะเวลาหนึ่งถ่านกะลามะพร้าว และดินถูกครอบครองด้วยตัวถูกดูดซับหรือมลสารต่างๆ จนเข้าสู่ภาวะสมดุล และชั้นกรองเต็มไปด้วยมลสาร ดังนั้นจึงดูดซับชีโอดีได้ในปริมาณที่น้อย



ภาพที่ 41 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดคลอโรฟิลล์ ความชื้นและซีไอดี กับระยะเวลาการบำบัดน้ำเสียจากแบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม

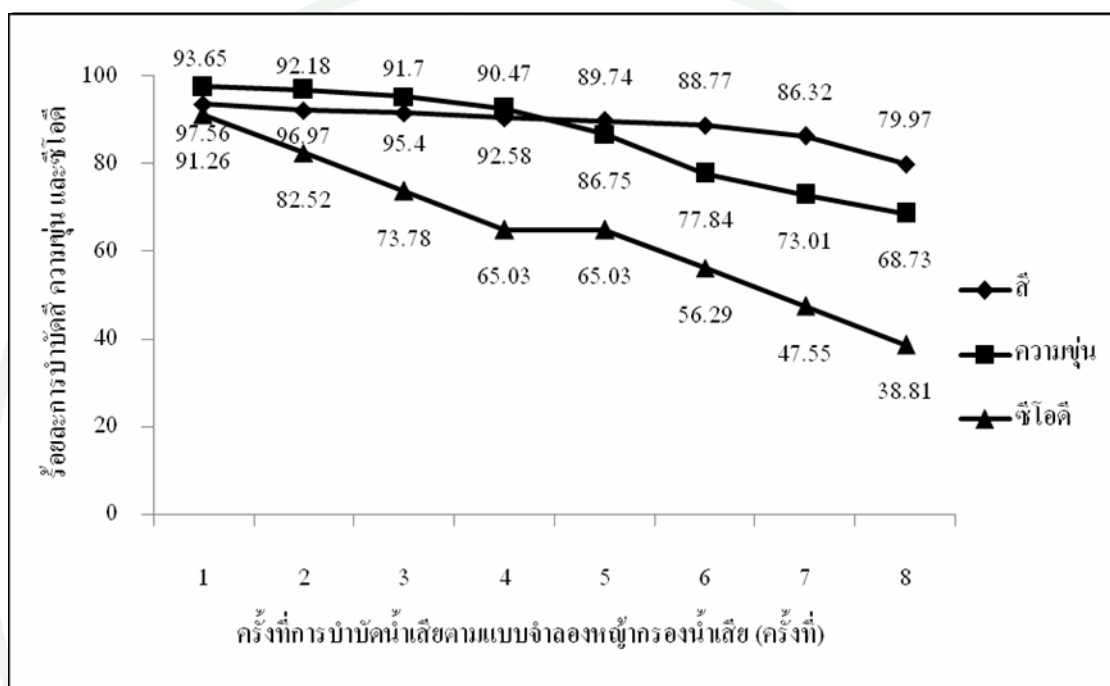


ภาพที่ 42 ความสัมพันธ์ระหว่างซีไอดี กับครั้งที่ของการบำบัดตามแบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม

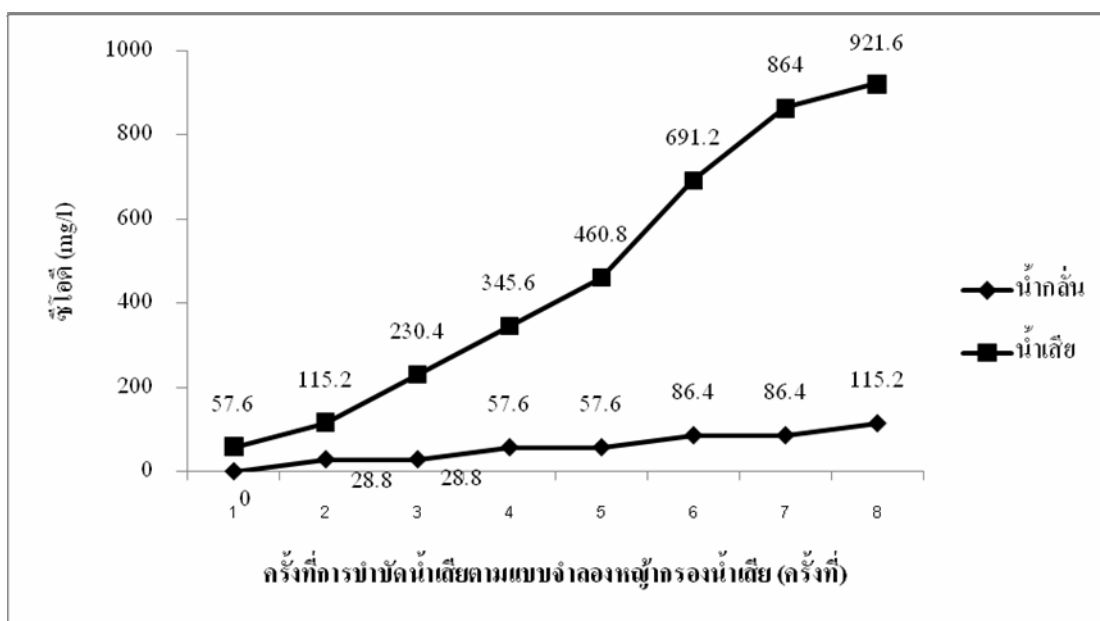
7.2 การจำลองระบบบำบัดแบบห้วยกรองน้ำเสีย

การจำลองการบำบัดน้ำเสียโดยวิธีห้วยกรองน้ำเสีย โดยการปล่อยน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยสารส้มปริมาตร 200 มิลลิลิตร ลงในคอลัมน์ที่บรรจุวัสดุปลูก แซ่ซัง 5 วัน ปล่อยน้ำเสีย

ออกจากคอลัมน์เป็นการบำบัดครั้งที่ 1 พบว่า สามารถบำบัดสี ความขุ่น และซีโอดีได้ดีที่สุดที่ร้อยละ 93.65, 97.56 และ 91.26 ตามลำดับ และเมื่อปล่อยทิ้ง 2 วัน ทำการบำบัดซ้ำ พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดจะลดลงอย่างต่อเนื่อง จนเข้าสู่ภาวะที่ประสิทธิภาพการบำบัดค่อนข้างคงที่ และมีแนวโน้มลดลงในการบำบัดครั้งที่ต่อๆ มา ดังภาพที่ 43 ซึ่งอธิบายได้เช่นเดียวกับข้อ 7.1 และเมื่อบำบัดครั้งที่ 3 ซีโอดีมีค่าเกินเกณฑ์มาตรฐาน ดังภาพที่ 44



ภาพที่ 43 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี ความขุ่น และซีโอดี กับระยะเวลาการบำบัดน้ำเสียตามแบบจำลองห้ำกรองน้ำเสีย



ภาพที่ 44 ความสัมพันธ์ระหว่างซีโอไซด์กับครั้งที่ของการบำบัดตามแบบจำลองหฐากรองน้ำเสีย

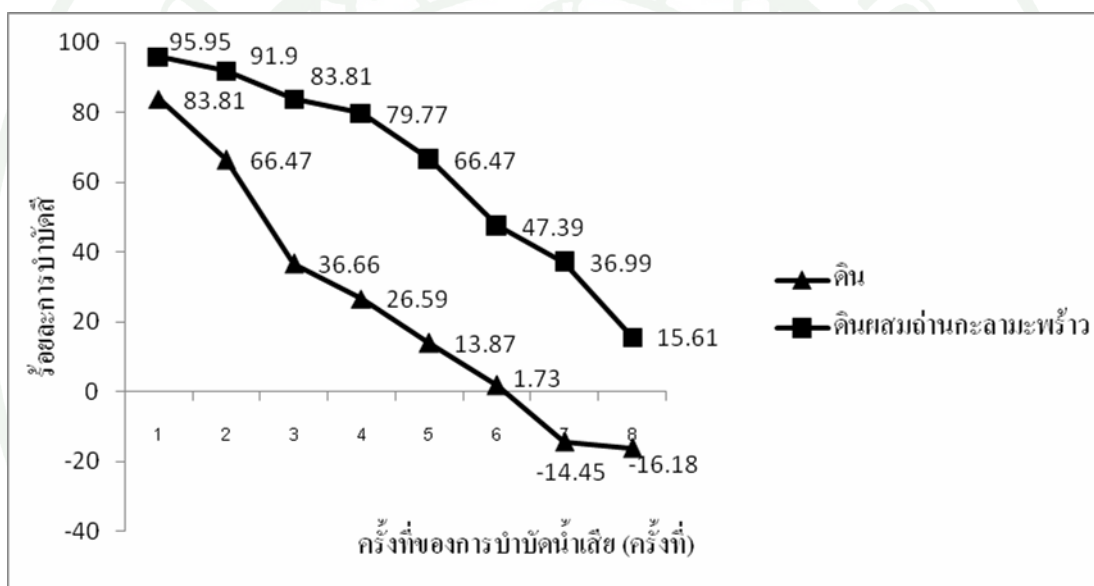
จากการจำลองระบบบำบัดทั้งสองระบบดังกล่าว พบว่าการจำลองระบบบำบัดแบบหฐากรองน้ำเสียให้ประสิทธิภาพร้อยละการบำบัดดี ความขุ่น ซีโอไซด์ที่ต่ำกว่า และครั้งที่ของการบำบัดซีโอไซด์ได้จำนวนครั้งที่มากกว่าการจำลองระบบบำบัดแบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมซึ่งสามารถบำบัดซีโอไซด์ได้เฉพาะการบำบัดครั้งที่ 1 เท่านั้นที่มีค่าอยู่ในค่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม จึงไม่เหมาะกับการนำมาบำบัดน้ำเสียจากโรงงานขนมจีนที่มีสารอินทรีย์สูง ส่วนการบำบัดตามแบบจำลองหฐากรองน้ำเสียนั้นมีระยะเวลาการสัมผัสเพิ่มขึ้น จึงเป็นการเพิ่มระยะเวลาให้มลสารมีโอกาสสัมผัสกับถ่านกะลามะพร้าวและดินนาเพิ่มขึ้น จึงให้ประสิทธิภาพการบำบัดที่ดีกว่า ดังนั้นการจำลองระบบบำบัดแบบหฐากรองน้ำเสียจึงเหมาะที่จะนำมาใช้บำบัดน้ำเสียจากโรงงานขนมจีนมากกว่าการจำลองระบบบำบัดแบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม

8. การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดดี ความขุ่น และซีโอไซด์ในน้ำเสียโรงงานขนมจีน โดยใช้เทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็กจำลองระบบบำบัดแบบหฐากรองน้ำเสีย

8.1 ใช้รูปถ่ายเป็นพืชบำบัด

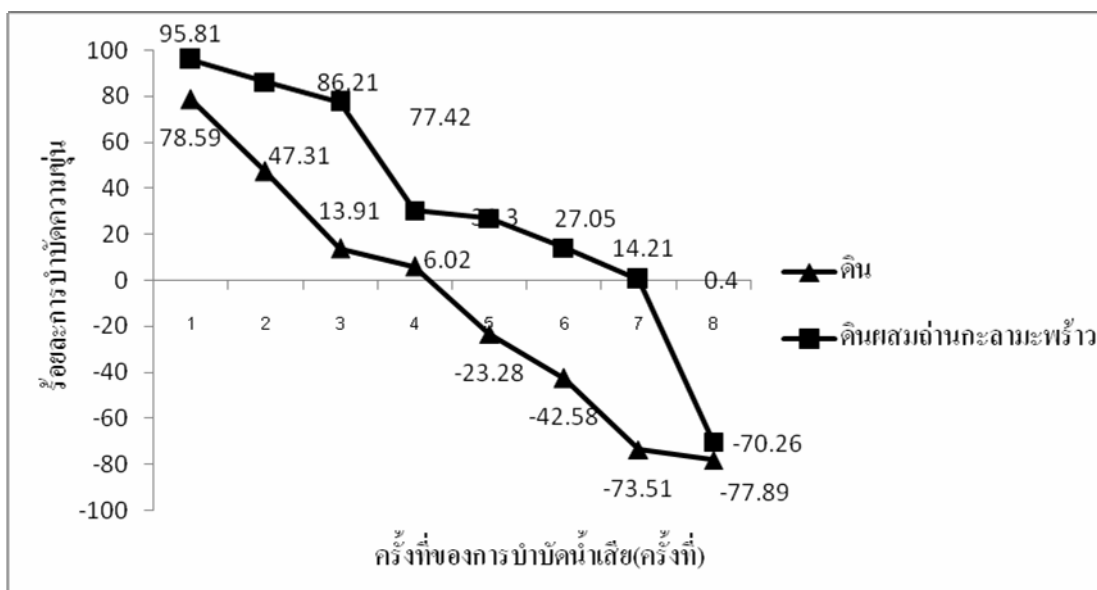
การทดลองในขั้นตอนนี้มีการเปรียบเทียบระหว่างวัสดุปลูกที่ใช้ดินเพียงอย่างเดียวกับดินนาผสมถ่านกะลามะพร้าวในอัตราส่วน 1:60 และเปรียบเทียบขนาดของพืชที่ใช้ในการบำบัดคือต้นกกกลมกับรูปถ่าย

จากการทดลองด้วยกระเบที่บรรจุวัสดุปลูกที่มีถ่านกะลามะพร้าวผสมกับดินในอัตราส่วน 1:60 โดยน้ำหนักและปลูกรูปถาวยี่ พบว่าการบำบัดในสัปดาห์ที่ 1 มีประสิทธิภาพในการบำบัดสี ความขุ่นและซีโอดีได้ดีที่สุดที่ร้อยละ 95.95, 95.81 และ 97.60 ตามลำดับ และมีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงการบำบัดในสัปดาห์ที่ 4 น้ำเสียเริ่มมีค่าเกินเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม และมีประสิทธิภาพการบำบัดสี ความขุ่นและซีโอดีสูงกว่ากระเบที่ไม่ได้ใช้ถ่านกะลามะพร้าวเป็นวัสดุปลูกคือใช้ดินเพียงอย่างเดียวให้ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 83.81, 78.59 และ 95.20 ตามลำดับ ดังภาพที่ 45 (ก), (ข) และ (ค) เนื่องจากถ่านกะลามะพร้าวมีคุณสมบัติในการดูดซับมลสารต่างๆ ได้ดี และเมื่อนำมาผสมกับดินปลูกร่วมกับรูปถาวยี่ จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดสี ความขุ่น และซีโอดีได้ดียิ่งขึ้น

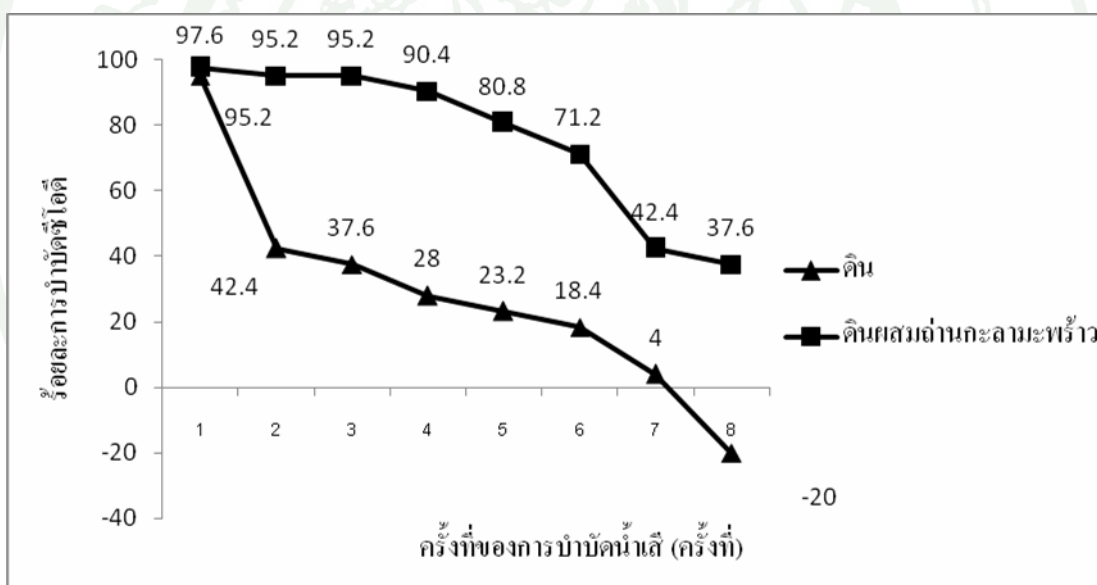


(ก)

ภาพที่ 45 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสี (ก) ความขุ่น (ข) และซีโอดี (ค) ระหว่างการใช้ดิน และถ่านกะลามะพร้าวผสมดินร่วมกับการปลูกรูปถาวยี่กับครั้งที่ของการบำบัด



(ข)

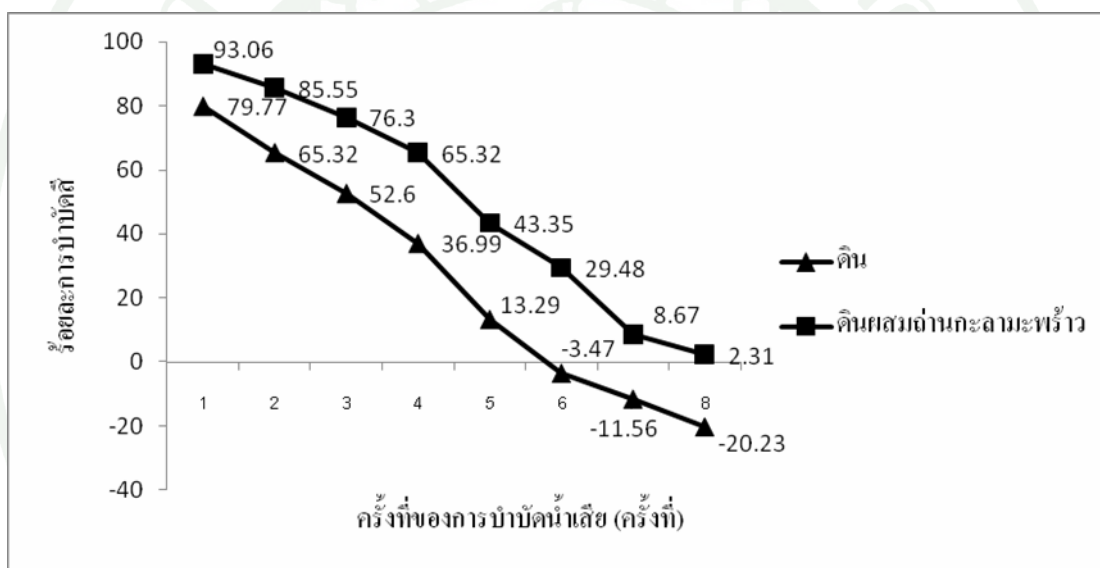


(ค)

ภาพที่ 45 (ต่อ)

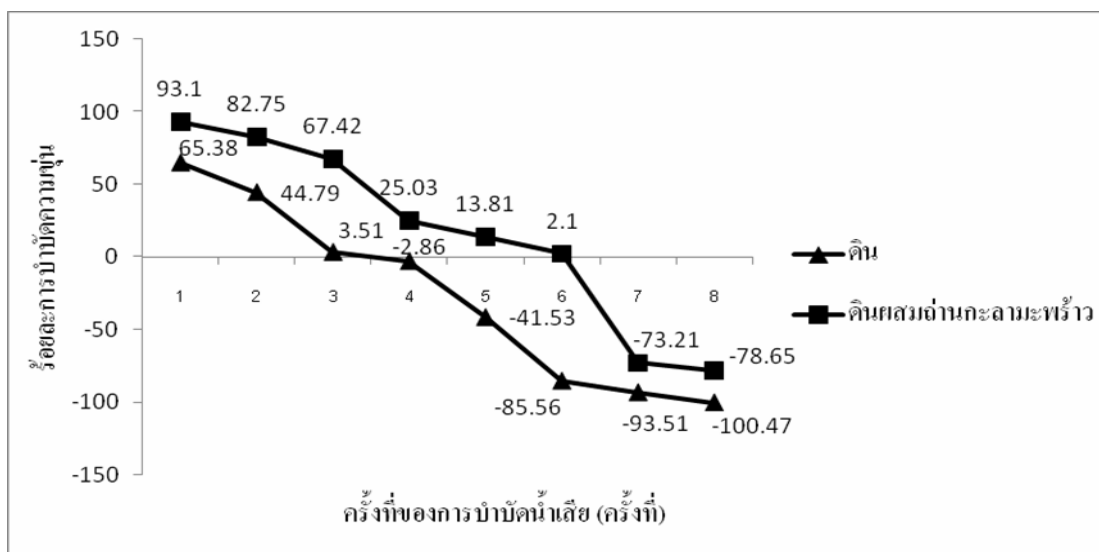
8.2 ใช้กกกลมเป็นพืชบำบัด

จากการทดลองด้วยกระบะที่บรรจุวัสดุปลูกที่มีถ่านกะลามะพร้าวผสมกับดินในอัตราส่วน 1:60 โดยน้ำหนักและปลูกกกกลม พบว่ามีแนวโน้มการบำบัดเช่นเดียวกับรูปถ่าย คือการบำบัดในสัปดาห์ที่ 1 มีประสิทธิภาพในการบำบัดสี ความขุ่นและซีโอดีได้ดีที่สุดที่ร้อยละ 93.06, 93.10 และ 95.2 ตามลำดับ และมีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงการบำบัดในสัปดาห์ที่ 3 น้ำเสียเริ่มมีค่าเกินเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม และมีประสิทธิภาพการบำบัดสี ความขุ่น และซีโอดีสูงกว่ากระบะที่ไม่ได้ใช้ถ่านกะลามะพร้าวเป็นวัสดุปลูก ซึ่งให้ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 79.77, 65.38 และ 90.40 ตามลำดับ ดังภาพที่ 46 (ก), (ข) และ (ค)

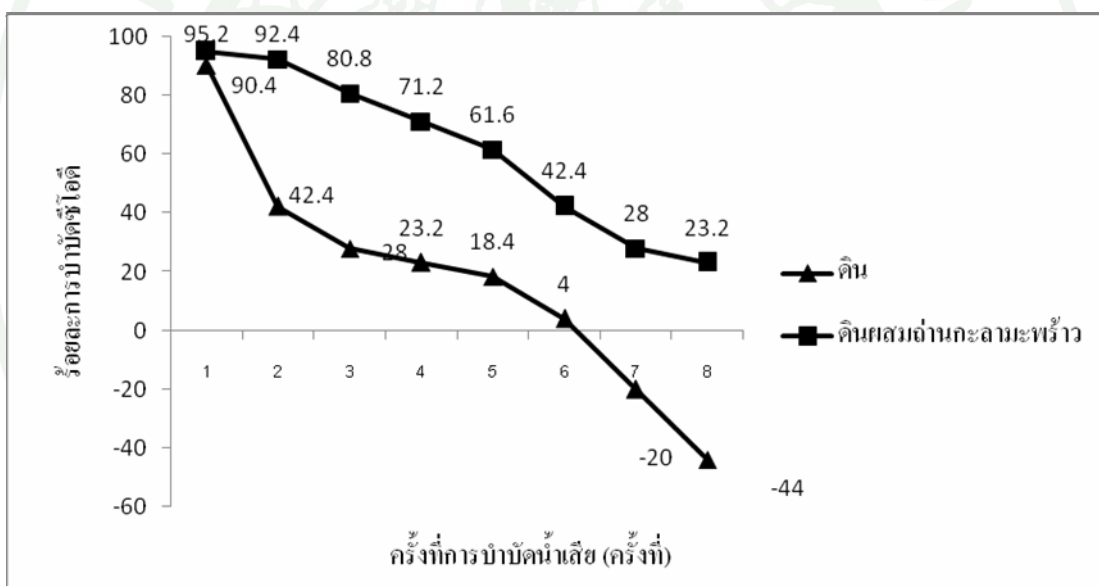


(ก)

ภาพที่ 46 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสี (ก) ความขุ่น (ข) และซีโอดี (ค) ระหว่างการใช้ดินและถ่านกะลามะพร้าวผสมดินร่วมกับการปลูกกกกลมกับครั้งที่ของการบำบัด



(ป)

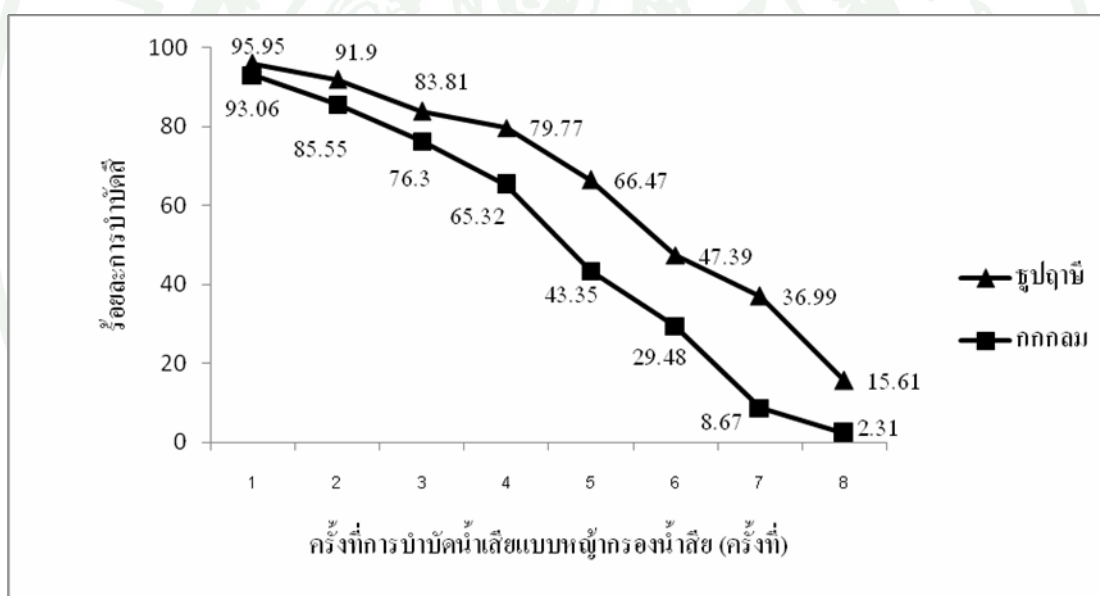


(ค)

ภาพที่ 46 (ต่อ)

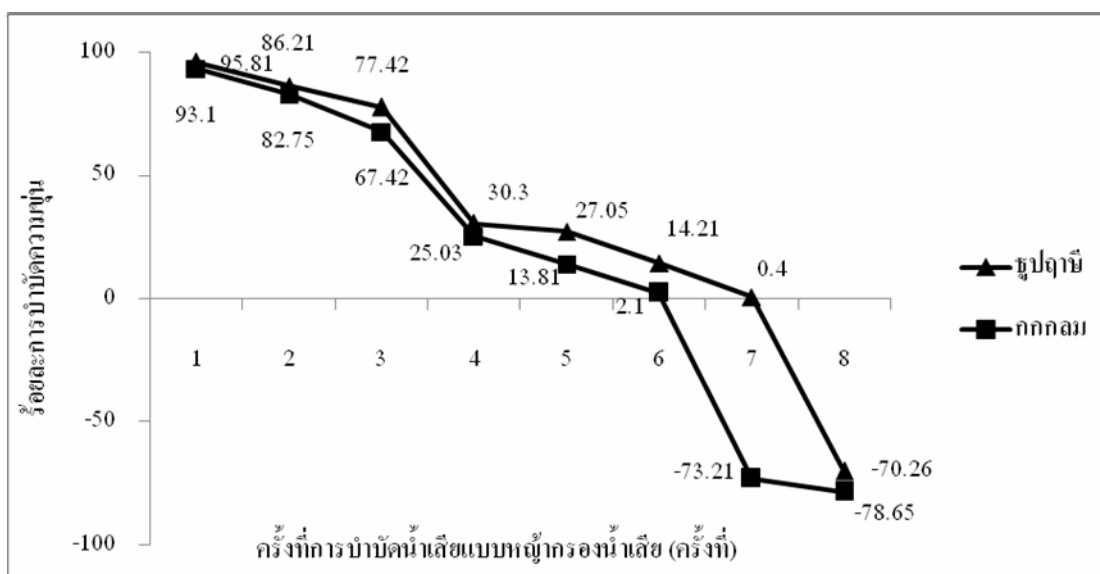
8.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดระหว่างรูปถ่ายกับกกกลม

การทดลองคุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยใช้เทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็ก ด้วยระบบหุ้กรองน้ำเสียร่วมกับการปลูกพืช 2 ชนิด คือ กกกลมและรูปถ่าย พบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับค่าเริ่มต้นของน้ำเสียโรงงานขนมจัน ระบบบำบัดน้ำเสียร่วมกับการปลูกรูปถ่ายให้ประสิทธิภาพและระยะเวลาการในการบำบัดดี ความขุ่น และซีโอดีได้ดีกว่าการปลูกกกกลม ดังภาพที่ 47 (ก), (ข) และ (ค) เนื่องจากรูปถ่ายเจริญเติบโตได้ดีในพื้นที่ชุ่มน้ำ เป็นพืชอวบน้ำมีลำต้นใต้ดินเรียกว่าเหง้า ซึ่งสามารถแตกเป็นกอใหม่ได้ มีรากที่ใหญ่ และกระจายตัวทั่วพื้นที่ ดังนั้นเมื่อถ่านกะลามะพร้าว ดูดซับมลสารต่างๆ ไว้ในรูปของอินทรีย์วัตถุและจุลินทรีย์เปลี่ยนรูปอินทรีย์วัตถุเป็น อนินทรีย์วัตถุ แล้ว รากของรูปถ่ายจะสามารถนำไปใช้ในการเจริญเติบโตได้อย่างเต็มที่และทำให้สามารถบำบัด ค่าดี ความขุ่น และซีโอดีได้ดีกว่ากกกลมที่มีระบบรากที่กระจายน้อยกว่า

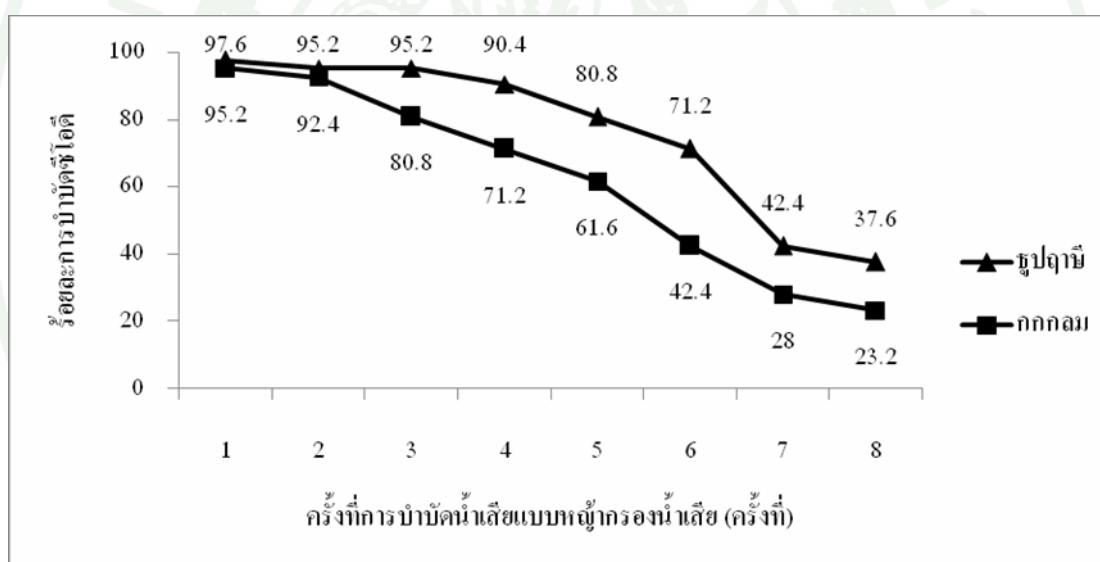


(ก)

ภาพที่ 47 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดดี (ก) ความขุ่น (ข) และซีโอดี (ค) ระหว่างการปลูก กกกลมและรูปถ่ายกับครั้งที่ของการบำบัด



(จ)



(ค)

ภาพที่ 47 (ต่อ)

9. ชุดควบคุม

จากการทดลองข้อ 7.4 เป็นการใช้น้ำกลั่นแทนน้ำเสียจากโรงงานขมจันในระบบบำบัดน้ำเสีย เพื่อศึกษาว่ามีการชะสี ความขุ่น และซีโอดีออกมาจากวัสดุปลูกหรือไม่ พบว่าน้ำกลั่นที่ผ่านชั้นวัสดุเพาะปลูกจากการทดลองไม่ได้มีการชะสี ความขุ่น และซีโอดีออกมาหรืออาจมีเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยค่าสี ความขุ่น และซีโอดีของน้ำกลั่นก่อนเข้าระบบบำบัดเท่ากับ 0.001 Pt-Co Unit, 0.20 NTU

และ 0.00 mg/L หลังออกจากระบบบำบัดที่ปลูกหญ้าและกกกลม มีค่าสีเท่ากับ 0.02 และ 0.03 Pt-Co Unit ความขุ่นเท่ากับ 1.59 และ 1.71 NTU และซีโอดีเท่ากับ 28.8 mg/L แต่ด้วยข้อดีของระบบบำบัดนี้ ชั่ววัสดุเพาะปลูกของการทดลองเป็นดินนา ทราบ และกรวด ทำให้เกิดการชะล้างสิ่งเจือปนทั้งที่เป็นสารอินทรีย์และสารอินทรีย์ออกมา จึงส่งผลให้น้ำที่ผ่านการบำบัดมีความขุ่นพีเอช ค่าการนำไฟฟ้า ของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้และความเค็มสูงกว่าผลวิเคราะห์น้ำกลั่นเริ่มต้นดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำหลังการบำบัดด้วยชุดควบคุม

พารามิเตอร์	ผลวิเคราะห์น้ำกลั่น	ผลวิเคราะห์น้ำกลั่นหลังการบำบัด	
		การบำบัดร่วมกับหญ้า	การบำบัดร่วมกับกกกลม
พีเอช	7.1	7.6	7.6
สี (Pt-Co Unit)	0.001	0.02	0.03
EC ($\mu\text{S}/\text{cm.}$)	404.00	714	756
TDS (mg/L)	274.00	865	953
ความเค็ม (mg/L)	0.00	0.90	1.30
ความขุ่น (NTU)	0.20	1.59	1.71
ซีโอดี (mg/L)	0	28.80	28.80

10. คุณภาพน้ำหลังการบำบัดด้วยเทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็กจำลองระบบบำบัดแบบห้วยการกรองน้ำเสีย

คุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยการสร้างรวมตะกอนด้วยสารส้มและเทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็กจำลองระบบห้วยการกรองน้ำเสียโดยใช้หญ้าและกกกลมเป็นพืชบำบัด เมื่อเปรียบเทียบกับคุณภาพของน้ำเสียโรงงานขนมจีนก่อนบำบัดดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียหลังผ่านการบำบัดด้วยระบบหมุนเวียนน้ำเสียโดยใช้
รูปถ่ายและกกกลมเป็นพืชบำบัด

พารามิเตอร์	คุณภาพน้ำ โรงงานนมจีน ก่อนบำบัด	ผลวิเคราะห์น้ำโรงงานนมจีนหลังผ่านการบำบัด		ค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง โรงงานอุตสาหกรรม และนิคมอุตสาหกรรม
		การบำบัดด้วยรูปถ่าย	การบำบัดด้วยกกกลม	
พีเอช	4.25	7.10	7.40	5.5 – 9.0
ซี (Pt-Co Unit)	844.29	5.75	6.17	5-15*
EC ($\mu\text{S}/\text{cm.}$)	15,245	4,510	5,760	-
TDS (mg/L)	10,055	2,470	3,270	ไม่เกิน 3,000
ความเค็ม (mg/L)	7.40	1.40	1.60	2,000
ความขุ่น (NTU)	323.50	2.39	3.93	-
ซีโอดี (mg/L)	2,288	28.80	57.60	ไม่เกิน 120
อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	28.50	27.50	27.60	ไม่เกิน 40

* มาตรฐานคุณภาพน้ำเพื่อการบริโภค

จากตารางที่ 6 คุณภาพน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดโดยใช้รูปถ่ายเป็นพืชบำบัดทุกพารามิเตอร์ผ่านเกณฑ์ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม และมีประสิทธิภาพสูงกว่าใช้กกกลมเป็นพืชบำบัด แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับคุณภาพน้ำก่อนการบำบัด จะเห็นได้ว่าวิธีการบำบัดที่ศึกษาในงานวิจัยนี้มีประสิทธิภาพค่อนข้างสูงไม่ว่าจะใช้กกกลมหรือรูปถ่ายเป็นพืชบำบัด

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

คุณภาพน้ำเสียของโรงงานขนมจินก่อนได้รับการบำบัดมีค่าพีเอช ของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำ ความขุ่น และค่าซีโอดี เกินเกณฑ์มาตรฐานอุตสาหกรรมอยู่มาก ซึ่งจากการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดและค่าซีโอดี ความขุ่นจากน้ำเสียโรงงานขนมจินด้วยวิธีการสร้างรวมตะกอน โดยศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมด้วยวิธีจาร์เทสต์ พบว่าประสิทธิภาพในการลดค่าซีโอดีและความขุ่นในน้ำเสียของโรงงานขนมจินได้ดีที่สุดที่ร้อยละ 75.09 และ 87.57 ตามลำดับโดยการใช้สารละลายสารส้ม 18 มิลลิกรัม ต่อน้ำเสีย 1 ลิตร ที่พีเอช 7.0

จากการทดลองแบบแบตช์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของถ่านกะลามะพร้าว พบว่าถ่านกะลามะพร้าว 25 กรัมต่อน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยวิธีการสร้างรวมตะกอน 100 มิลลิกรัม ที่ระยะเวลาสัมผัส 5 วัน ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดี ความขุ่น และซีโอดีได้ร้อยละ 67.03, 69.13 และ 91.25 ตามลำดับ โดยลักษณะการดูดซับสอดคล้องกับไอโซเทอร์มของการดูดซับของทั้งแบบแลงเมียร์ และฟรุนดลิช และอัตราส่วนโดยน้ำหนักของถ่านกะลามะพร้าวต่อดินที่เหมาะสมคือ 1:60 ซึ่งสามารถบำบัดค่าซีโอดี ความขุ่น และซีโอดีได้ร้อยละ 82.52, 91.58 และ 86.57 ตามลำดับ จากการทดลองแบบการไหลต่อเนื่อง ซึ่งเป็นการจำลองการบำบัดน้ำเสียแบบระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมและระบบหมุนเวียนน้ำเสียของโครงการวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ พบว่าระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมให้ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดี ความขุ่น และซีโอดีได้ร้อยละ 89.91, 87.30 และ 82.52 ตามลำดับ และระบบหมุนเวียนน้ำเสียให้ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดี ความขุ่น และซีโอดีได้ร้อยละ 97.56, 93.65 และ 91.26 ตามลำดับ

ส่วนการทดลองการบำบัดแบบประยุกต์สำหรับใช้งานจริงโดยใช้เทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็กจำลองระบบบำบัดแบบหมุนเวียนน้ำเสียร่วมกับการปลูกพืช 2 ชนิดคือ กล้วยาณิกับกกกลม พบว่ากล้วยาณิให้ประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดี ความขุ่น และซีโอดีได้ดีที่สุดที่ร้อยละ 95.95, 95.81 และ 97.60 ตามลำดับ ส่วนของกกกลมให้ประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดี ความขุ่น และซีโอดีได้ดีที่สุด คือร้อยละ 93.06 , 93.10 และ 95.20 ตามลำดับ ดังนั้นการบำบัดน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการสร้างรวมตะกอนร่วมกับการปลูกกล้วยาณิ ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียได้ดีกว่าการปลูกกกกลม

และจากการเปรียบเทียบวัสดุปลูกที่ใช้ดินเพียงอย่างเดียวกับวัสดุปลูกที่ใช้ดินนาผสมถ่านกะลามะพร้าว ซึ่งในการใช้ดินนาผสมถ่านกะลามะพร้าวนั้นให้ประสิทธิภาพการบำบัดได้ดีกว่าการใช้ดินเพียงอย่างเดียว แสดงให้เห็นว่าถ่านกะลามะพร้าวสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียแบบหมักกรองน้ำเสียได้ดียิ่งขึ้น และจากการจำลองระบบบำบัดนี้ส่งผลให้การวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียจากโรงงานขนมจีนหลังผ่านการบำบัดอยู่ในเกณฑ์ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ดังนั้นเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียแบบระบบหมักกรองน้ำเสียนี้จึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในโรงงานขนมจีนขนาดเล็กไปจนถึงขนาดใหญ่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาสารสร้างตะกอนชนิดอื่นๆ ที่ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดดีและความชุ่มของน้ำเสียจากโรงงานขนมจีนได้ดีกว่า และมีค่าใช้จ่ายที่น้อยกว่า
2. ศึกษาตัวดูดซับประเภทอื่นๆ เช่น ตัวดูดซับชีวมวล ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียของโรงงานขนมจีนต่อไป

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- กรมโรงงานอุตสาหกรรมและสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย. 2545. **ตำราระบบบำบัดมลพิษน้ำ**. กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม และสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.
- กรรณิการ์ สิริสังข์. 2544. **เคมีของน้ำ น้ำโสโครกและการวิเคราะห์**. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันราชภัฏจันทรเกษม, กรุงเทพฯ.
- กัลยาณี รัตโน. 2539. **การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานขนมจีนโดยใช้ระบบกรองไม้อ้อออกซิเจน**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- โกมล ศิวบรร, เขาวุธ พรมพิณเทพ และ สุวิทย์ ชุมนุมศิริพันธ์. 2534. **การประปาเบื้องต้น**. หจก. ธนาคารพิมพ์, กรุงเทพฯ.
- งามชื่น คงเสรี. 2541. **ผลิตภัณฑ์ข้าว**, น. 45-90. ใน เอกสารการสอนวิชาผลิตภัณฑ์อาหารหน่วยที่ 1-7. สาขาวิชาคหกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช, นนทบุรี.
- จุฑามาศ พุ่มศิริ. 2554. **ผลการใช้กกกลม ฐูปถาณี และพุทธรักษาในการบำบัดคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงไฟฟ้าราชบุรี**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์ และ คณิดา ตั้งคณานุรักษ์. 2550. **หลักการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางเคมี**. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- บุษยา มากกลาด. 2555. **การดูดซับสีย้อมผ้าในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาโดยดูด้วยผงใบฝักตบขาวและถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ปวีณา สังข์ศรีอินทร์. 2552. **การบำบัดน้ำเสียจากโรงฆ่าสัตว์เทศบาลเมืองสุพรรณบุรี จังหวัดสุพรรณบุรีด้วยรูปถาณีในระบบดินสภาพน้ำขังสลับแห้งร่วมกับพืช**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ฝ่ายตรวจและบังคับการ กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.

พระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพ สิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 กฎ ประกาศ และระเบียบที่เกี่ยวข้องด้านการควบคุมมลพิษ. พิมพ์ครั้งที่ 5. โรงพิมพ์องค์การสงเคราะห์ทหารผ่านศึก, กรุงเทพฯ.

เพ็ญจันทร์ คำบาง. 2553. การกำจัดฟอร์มัลดีไฮด์ในสารละลายด้วยถ่านกกกลมและถ่านกะลามะพร้าว เจริญพาณิชย์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

มูลนิธิชัยพัฒนา. 2543. คู่มือเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียตามแนวพระราชดำริ. วิทยาลัย สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

มันสิน ตันทุเลวสน์. 2542. วิศวกรรมการประปา เล่ม 1. โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

ลาวัญย์ ไกรเดช, ฉกามาศ วงศ์ข้าหลวง, มวลัย บุญรัตนกรกิจ, ปทุมพร นิมอเนก, วรรณา ประไพหลง, พัทรี ตั้งตระกูล, สิริพร สธนเสาวภาคย์ และ ปราโมทย์ ศิริโรจน์. 2547. มาตรฐาน คุณภาพและเอกลักษณ์ความเป็นไทยของขนมจีนหมักที่ผลิตในระดับอุตสาหกรรม. สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, กรุงเทพฯ.

วรพจน์ รัตนพันธุ์. 2550. สภาวะการบำบัดน้ำเสียจากการผลิตเส้นขนมจีนโดยระบบแอนแอโรบิกคอนแทค. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ศิรินภา พงษ์พีระ. 2553. การบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานผลิตเส้นขนมจีนโดยใช้สาหร่ายสีน้ำเงิน (Spirulina sp.) และ คลอเรลลา (Chlorella sp.). วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

ศุภวรรณ ถาวรชินสมบัติ, วรณัฐ ศรีเจษฎารักษ์ และ เทพฤทธิ์ ปิติฤทธิ์. 2542. การศึกษาความสัมพันธ์คุณสมบัติทางฟิสิกส์-เคมีของข้าวเจ้า กรรมวิธีการทำขนมจีนและคุณภาพขนมจีน. ภาควิชาเทคโนโลยีการอาหาร คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น

สุดารัตน์ แสงสวัสดิ์. 2553. การกำจัดฟอสฟอรัสและบีโอดีในน้ำเสียโดยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี : กรณีศึกษาโรงงานอุตสาหกรรมเส้นไหม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

สุมนา ลีพัฒนากุล และ พุทธพร แสงเทียน. 2552. การบำบัดน้ำทิ้งโรงงานขนมจีนและความเป็นไปได้ในการผลิตเอทานอลด้วยระบบยีสต์เซลล์ตรึง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.

สัญญา ว่องไวอมรเวช. 2542. ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานขนมจีนโดยกระบวนการโคแอกกูเลชัน-ฟลอคกูเลชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยมหิดล.

อวยพร บัวใบ. 2531. การศึกษาประสิทธิภาพของถังกรองที่ใช้ทรายและถ่านกะลามะพร้าว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Amuda, O.S., A.A. Giwa, I.A. Bello. 2007. Removal of heavy metal from industrial wastewater using modified activated coconut shell carbon. **Biochemical Engineering Journal**. 36: 174-181.

Demsey, B.A. *et al.* 1985. Polyaluminium Chloride and Alum coagulation of clay fulvic acid suspensions. **J.Amer. Wat. Works Assoc.** 77(3): 74-80.

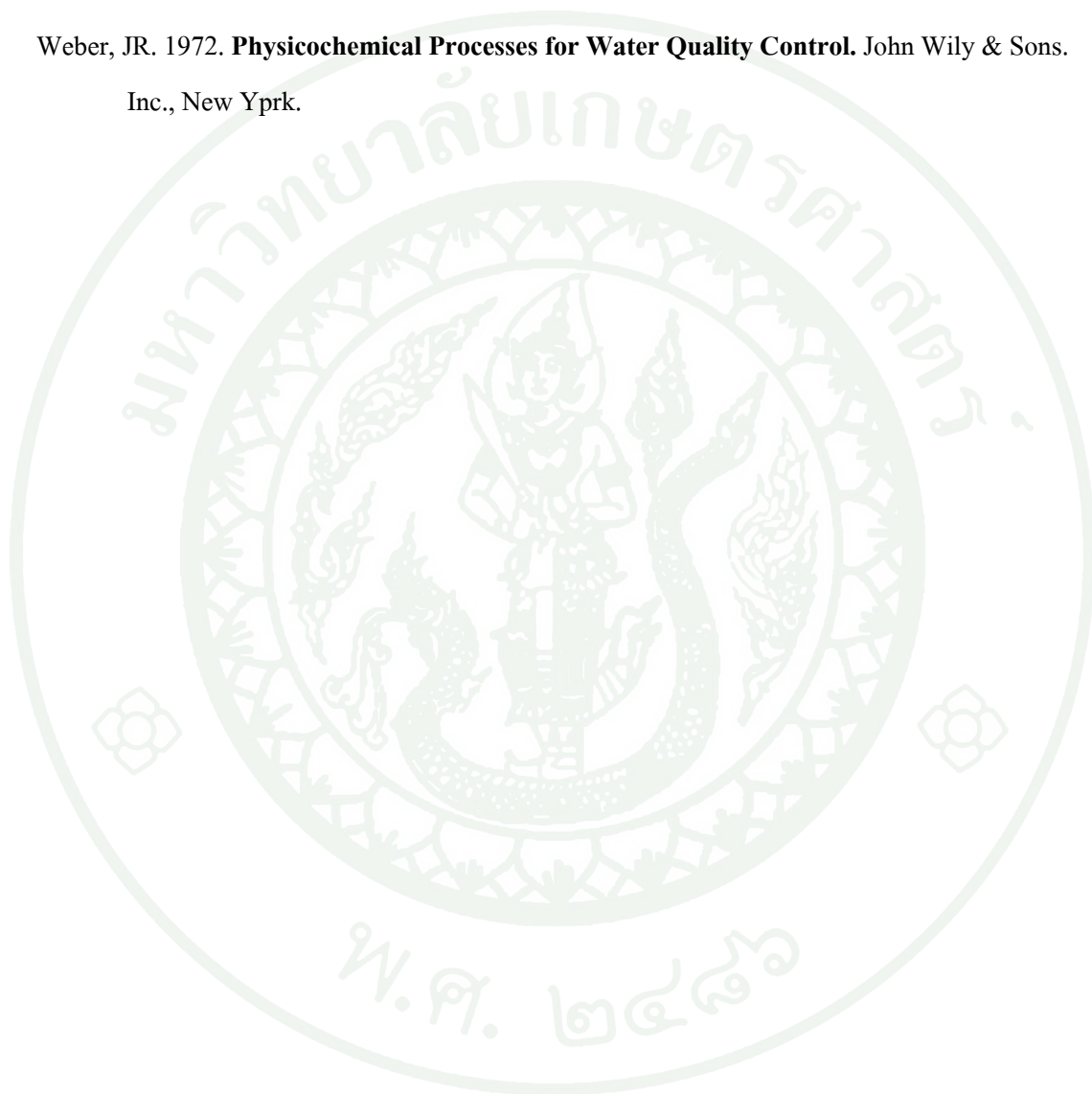
Faust, S.D. and O.M. Aly. 1987. **Adsorption Processes for Water Treatment**. Butterworths Boston, USA.

Kawamura, S. 1976. Consideration on Improveing Flocculation. **J. Amer. Water Works Associ.** 65 (6): 417-423.

Kaeding, U.W. *et al.* 1992. A direct comparison between aluminium sulphate and polyaluminium chloride as coagulants in water treatment plant. **J. Wat. Supply** 10(4): 119-132.

Siripattanakul S., K. Ratanapongleka, P. Sangthean, K. Yoottachana and K. Pimwongnok. 2009. Fermented Rice Noodle Wastewater Treatment and Ethanol Production Potential Using Entrapped Yeast Cells, pp. In N. Perng., eds. **The 3rd IWA-ASPIRE Conference & Exhibition**. Taipei, Taiwan.

Weber, JR. 1972. **Physicochemical Processes for Water Quality Control**. John Wiley & Sons. Inc., New Yprk.





ตารางผนวกที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีกับปริมาณสารส้มที่เหมาะสม

ปริมาณสารส้ม (กรัม)	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ การกำจัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
4	2.58	2.59	2.58	2.58	36.99
6	2.55	2.56	2.55	2.55	37.73
8	2.23	2.23	2.23	2.23	45.54
10	1.86	1.84	1.84	1.84	55.07
12	1.75	1.76	1.77	1.76	57.02
14	1.11	1.12	1.11	1.11	72.89
16	1.03	1.04	1.04	1.04	74.60
18	1.01	1.02	1.02	1.02	75.09
20	1.14	1.15	1.16	1.15	71.92
22	1.25	1.25	1.26	1.25	69.47
24	1.34	1.33	1.34	1.34	67.28

ตารางผนวกที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดความขุ่นกับปริมาณสารส้มที่เหมาะสม

ปริมาณสารส้ม (กรัม)	ความขุ่น			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ การกำจัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
4	141.70	141.70	141.80	141.70	56.20
6	145.70	145.70	145.70	145.70	54.96
8	114.80	114.90	115.00	114.90	64.48
10	71.30	71.40	71.20	71.30	77.96
12	70.60	70.70	70.80	70.70	78.14
14	52.00	52.00	52.00	52.00	83.92
16	45.60	45.80	45.70	45.70	85.87
18	40.00	40.20	40.40	40.20	87.57
20	45.80	45.90	45.70	45.80	85.84
22	58.80	58.90	58.40	58.70	81.85
24	79.20	78.80	79.50	79.17	79.17

ตารางผนวกที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีกับพีเอชของสารส้มที่เหมาะสม

พีเอช	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละการกำจัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
6	1.92	1.91	1.92	1.92	52.99
7	1.41	1.40	1.41	1.41	65.44
8	1.54	1.53	1.53	1.53	62.51
9	1.65	1.66	1.66	1.66	59.46
10	1.73	1.71	1.71	1.73	57.63

ตารางผนวกที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดความขุ่นกับพีเอชของสารส้มที่เหมาะสม

พีเอช	ความขุ่น			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละการกำจัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
6	67.73	67.73	67.73	67.73	79.06
7	41.40	41.30	41.50	41.40	87.20
8	48.70	48.70	48.80	48.70	84.94
9	54.80	54.70	54.90	54.80	83.06
10	57.00	57.00	57.00	57.00	82.38

ตารางผนวกที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีกับปริมาณปูนขาวที่เหมาะสม

ปริมาณปูนขาว (กรัม)	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละการกำจัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
5	2.25	2.26	2.26	2.26	44.69
10	2.26	2.25	2.25	2.25	44.93
15	2.25	2.25	2.25	2.25	44.93
20	2.21	2.22	2.21	2.21	45.91
25	2.22	2.22	2.22	2.22	45.79
30	2.21	2.21	2.22	2.21	59.63
35	1.02	1.03	1.04	1.03	74.84
40	1.09	1.09	1.08	1.09	73.38
45	1.26	1.27	1.28	1.27	68.99
50	1.45	1.45	1.46	1.45	65.32

ตารางผนวกที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดความชุ่มกับปริมาณปูนขาวที่เหมาะสม

ปริมาณปูนขาว (กรัม)	ความชุ่ม			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ การจัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
5	136.00	138.00	140.00	138.00	57.34
10	139.00	139.00	138.00	139.00	57.03
15	121.00	123.00	123.00	123.00	61.98
20	131.00	131.50	123.00	131.50	59.35
25	125.00	130.00	135.00	130.00	59.81
30	118.50	118.00	119.00	118.50	63.37
35	43.10	43.15	43.20	43.15	86.66
40	45.40	45.60	45.20	45.40	85.96
45	65.80	65.80	65.80	65.80	79.66
50	79.15	79.20	79.50	79.28	75.49

ตารางผนวกที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีกับพีเอชของปูนขาวที่เหมาะสม

พีเอช	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ การจัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
6	1.96	1.97	1.97	1.97	51.77
7	1.93	1.93	1.93	1.93	52.75
8	1.78	1.79	1.78	1.78	56.53
9	1.94	1.95	1.94	1.94	52.50
10	1.92	1.93	1.93	1.93	52.75

ตารางผนวกที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดความชุ่มกับพีเอชของปูนขาวที่เหมาะสม

พีเอช	ความชุ่ม			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ การจัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
6	73.70	73.80	73.60	73.70	77.22
7	67.83	68.83	69.83	68.83	78.72
8	59.53	59.33	59.43	59.43	81.63
9	69.17	69.37	69.57	69.37	78.56
10	75.37	75.27	75.47	75.37	76.70

ตารางผนวกที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี กับปริมาณถ่านกะลามะพร้าวที่เหมาะสม

ปริมาณถ่านกะลามะพร้าว (กรัม)	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ การบำบัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
5	1.60	1.60	1.61	1.60	60.98
10	1.56	1.55	1.56	1.56	61.90
15	1.40	1.43	1.46	1.43	65.08
20	1.46	1.46	1.46	1.46	64.35
25	1.23	1.20	1.25	1.23	69.96
30	1.44	1.48	14.40	1.44	64.71
35	1.54	1.55	1.54	1.54	63.25
40	1.50	1.50	1.49	1.50	62.39

ตารางผนวกที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดความขุ่น กับปริมาณถ่านกะลามะพร้าวที่เหมาะสม

ปริมาณถ่านกะลามะพร้าว (กรัม)	ความขุ่น			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ การบำบัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
5	38.60	42.40	40.80	40.60	87.45
10	39.70	39.90	40.10	39.90	87.67
15	40.50	39.60	40.10	40.10	87.60
20	41.35	40.65	42.05	41.35	87.22
25	39.80	40.90	41.60	40.80	87.39
30	41.00	41.25	41.50	41.25	87.25
35	42.90	44.70	42.90	43.50	86.55
40	46.80	52.70	49.10	49.50	72.33

ตารางผนวกที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดซีไอดี กับปริมาณถ่านกะลามะพร้าวที่เหมาะสม

ปริมาณถ่านกะลามะพร้าว (กรัม)	ร้อยละของการบำบัด
5	56.29
10	53.23
15	65.03
20	60.66
25	69.40
30	60.66
35	56.29
40	38.81

ตารางผนวกที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดซีไอดี กับระยะเวลาที่เหมาะสม (ชั่วโมง)

ระยะเวลาสัมผัส (ชั่วโมง)	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ การบำบัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
1	1.01	1.02	1.03	1.02	75.09
2	1.03	1.04	1.04	1.04	74.60
3	1.01	1.02	1.02	1.02	75.90
4	0.82	0.83	0.82	0.82	79.97
5	1.12	1.11	1.11	1.11	72.89
6	1.15	1.16	1.14	1.15	71.92

ตารางผนวกที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดความชุ่ม กับระยะเวลาที่เหมาะสม (ชั่วโมง)

ระยะเวลาสัมผัส (ชั่วโมง)	ความชุ่ม			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ การบำบัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
1	33.25	34.45	33.85	33.85	89.54
2	35.95	36.25	35.65	35.95	88.89
3	34.15	34.15	34.15	34.15	89.44
4	31.30	31.45	31.60	31.45	90.28
5	30.45	30.40	30.50	30.45	90.59
6	32.6	32.90	32.30	32.70	89.89

ตารางผนวกที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดี กับระยะเวลาที่เหมาะสม (ชั่วโมง)

ระยะเวลาสัมผัส (ชั่วโมง)	ร้อยละของการบำบัด
1	66.78
2	56.29
3	65.03
4	82.52
5	66.66
6	73.78

ตารางผนวกที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี กับระยะเวลาที่เหมาะสม (วัน)

ระยะเวลาสัมผัส (วัน)	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ การบำบัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
1	1.90	1.90	1.92	1.91	53.36
2	2.09	2.09	2.10	2.09	48.96
3	1.45	1.95	1.70	1.70	58.48
4	1.52	1.72	1.73	1.66	59.46
5	1.34	1.34	1.36	1.35	67.03
6	1.44	1.45	1.44	1.44	62.39
7	1.81	1.89	1.85	1.85	54.82

ตารางผนวกที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดความชุ่ม กับระยะเวลาที่เหมาะสม (วัน)

ระยะเวลาสัมผัส (วัน)	ค่าความชุ่ม			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ การบำบัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
1	108.80	108.90	109.80	109.20	66.24
2	110.80	112.15	109.90	110.95	65.70
3	109.10	109.20	109.30	109.20	66.24
4	110.85	110.86	111.15	110.95	65.70
5	99.90	99.85	99.80	99.85	69.13
6	123.36	123.30	123.40	123.30	61.88
7	149.53	148.15	148.60	148.60	54.56

ตารางผนวกที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดี กับระยะเวลาที่เหมาะสม (วัน)

ระยะเวลาสัมผัส (วัน)	ร้อยละของการบำบัด
1	82.52
2	86.89
3	82.52
4	82.52
5	91.25
6	65.03
7	60.66

ตารางผนวกที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี ของปริมาณดินที่เหมาะสม

ปริมาณดิน (กรัม)	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ การบำบัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
10	1.69	1.68	1.68	1.68	58.97
20	1.65	1.64	1.65	1.65	59.71
30	1.64	1.63	1.62	1.63	60.19
40	1.60	1.61	1.60	1.60	60.93
50	1.56	1.55	1.57	1.56	61.90
60	1.71	1.71	1.70	1.71	58.24
70	1.79	1.77	1.78	1.78	56.53

ตารางผนวกที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดความชุ่ม ของปริมาณดินที่เหมาะสม

ปริมาณดิน (กรัม)	ค่าความชุ่ม			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละการบำบัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
10	89.87	87.50	88.50	88.62	72.60
20	85.13	84.15	85.90	85.06	73.71
30	83.87	83.50	83.10	83.49	74.19
40	80.10	81.80	81.50	81.13	74.92
50	77.80	78.90	77.70	78.13	75.85
60	81.20	81.30	81.50	81.33	74.86
70	88.90	89.30	89.10	89.10	72.46

ตารางผนวกที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดี ของปริมาณดินที่เหมาะสม

ปริมาณดิน (กรัม)	ร้อยละการบำบัด
10	47.55
20	56.29
30	56.29
40	56.29
50	65.03
60	47.55
70	30.06

ตารางผนวกที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี ของถ่านกะลามะพร้าวผสมดิน
ในอัตราส่วนต่างๆ

อัตราส่วน ถ่านกะลามะพร้าว : ดิน	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ การบำบัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
1:10	1.65	1.64	1.65	1.65	59.71
1:20	1.64	1.63	1.62	1.63	60.19
1:30	1.60	1.61	1.60	1.60	60.93
1:40	1.56	1.56	1.57	1.56	61.90
1:50	1.27	1.28	1.27	1.27	68.86
1:60	0.57	0.54	0.53	0.55	86.57
1:70	0.81	0.74	0.72	0.76	81.44

ตารางผนวกที่ 22 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดความขุ่น ของถ่านกะลามะพร้าวผสมดิน
ในอัตราส่วนต่างๆ

อัตราส่วน ถ่านกะลามะพร้าว : ดิน	ค่าความขุ่น			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ การบำบัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
1:10	195.80	199.90	96.70	197.50	38.95
1:20	195.80	199.90	96.70	197.50	38.95
1:30	140.90	165.90	138.84	148.56	54.56
1:40	123.30	123.20	123.40	123.30	61.88
1:50	86.10	80.10	83.15	83.12	74.30
1:60	29.10	26.40	26.15	27.25	91.58
1:70	50.20	50.25	50.30	50.25	84.46

ตารางผนวกที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดี ของถ่านกะลามะพร้าวผสมดินในอัตราส่วนต่างๆ

อัตราส่วน ถ่านกะลามะพร้าว : ดิน	ร้อยละของการบำบัด
1:10	47.55
1:20	47.55
1:30	47.55
1:40	56.29
1:50	65.03
1:60	82.52
1:70	65.03

ตารางผนวกที่ 24 ไอโซเทอร์มการดูดซับของถ่านกะลามะพร้าว

ปริมาณถ่าน กะลามะพร้าว (กรัม)	Co	C	V	q	1/q	1/C	log q	log C
5	4.09	1.89	0.1	4.06	0.25	0.53	0.61	0.23
10	4.09	1.56	0.1	4.08	0.24	0.64	0.61	0.19
15	4.09	1.49	0.1	4.08	0.24	0.67	0.61	0.17
20	4.09	1.36	0.1	4.09	0.24	0.73	0.61	0.13
25	4.09	1.23	0.1	4.09	0.24	0.81	0.61	0.09
30	4.09	1.45	0.1	4.09	0.24	0.69	0.61	0.16
35	4.09	1.43	0.1	4.09	0.24	0.70	0.61	0.15
40	4.09	1.35	0.1	4.09	0.24	0.74	0.61	0.13

ตารางผนวกที่ 25 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี กับระยะเวลาการเก็บน้ำที่ไหลผ่าน
คอลัมน์ทุก 4 ชั่วโมง

ระยะเวลาสัมผัส (ชั่วโมง)	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ การบำบัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
4	0.52	0.53	0.52	0.52	87.30
8	0.72	0.72	0.72	0.72	82.42
12	0.86	0.87	0.85	0.86	79.00
16	0.91	0.92	0.91	0.91	77.78
20	1.10	1.12	1.12	1.11	72.89
24	1.16	1.14	1.16	1.15	71.92

ตารางผนวกที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดความขุ่น กับระยะเวลาการเก็บน้ำที่ไหล
ผ่านคอลัมน์ทุก 4 ชั่วโมง

ระยะเวลาสัมผัส (ชั่วโมง)	ค่าความขุ่น			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ การบำบัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
4	32.60	32.70	32.60	32.63	89.91
8	48.80	48.90	48.20	48.63	84.97
12	87.20	87.55	87.60	87.45	72.97
16	98.70	98.75	98.70	98.72	69.48
20	105.00	110.10	109.10	108.07	66.59
24	132.50	153.50	132.00	139.33	56.93

ตารางผนวกที่ 27 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดี กับระยะเวลาการเก็บน้ำที่ไหลผ่าน
คอลัมน์ทุก 4 ชั่วโมง

ระยะเวลาสัมผัส (ชั่วโมง)	ร้อยละของการบำบัด
4	82.52
8	56.29
12	30.06
16	21.32
20	3.85
24	3.85

ตารางผนวกที่ 28 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี กับระยะเวลาการเก็บน้ำที่ไหลผ่าน
คอลัมน์ทุกสัปดาห์

ระยะเวลาสัมผัส (สัปดาห์)	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ การบำบัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
1	0.26	0.26	0.26	0.26	93.65
2	0.32	0.31	0.32	0.32	92.18
3	0.34	0.34	0.35	0.34	91.70
4	0.38	0.39	0.39	0.39	90.47
5	0.42	0.42	0.42	0.42	89.74
6	0.46	0.47	0.46	0.46	88.77
7	0.56	0.56	0.57	0.56	86.32
8	0.82	0.82	0.82	0.85	79.97

ตารางผนวกที่ 29 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดความชุ่ม กับระยะเวลาการเก็บน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ทุกสัปดาห์

ระยะเวลาสัมผัส (สัปดาห์)	ค่าความชุ่ม			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ การบำบัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
1	7.80	7.90	7.90	7.90	97.56
2	9.00	11.40	9.00	9.80	96.97
3	16.00	13.00	15.60	14.87	95.40
4	23.40	25.20	23.40	24.00	92.58
5	41.60	43.50	43.50	42.87	86.75
6	71.10	72.00	72.00	71.70	77.84
7	85.20	86.87	89.90	87.32	73.01
8	101.10	101.20	101.20	101.17	68.73

ตารางผนวกที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดี กับระยะเวลาการเก็บน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ทุกสัปดาห์

ระยะเวลาสัมผัส (สัปดาห์)	ร้อยละของการบำบัด
1	91.26
2	82.52
3	73.78
4	65.03
5	65.03
6	56.29
7	56.29
8	47.55

ตารางผนวกที่ 31 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี กับการใช้ถ่านกะลามะพร้าวผสมกับ
ดินร่วมกับการปลูกพืช (รูปถ่าย) ทุกสัปดาห์

ระยะเวลาสัมผัส (สัปดาห์)	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ การบำบัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
1	0.07	0.07	0.06	0.07	95.95
2	0.14	0.13	0.14	0.14	91.90
3	0.28	0.28	0.28	0.28	83.81
4	0.35	0.35	0.35	0.35	79.77
5	0.58	0.58	0.59	0.58	66.47
6	0.91	0.91	0.91	0.91	47.39
7	1.08	1.10	1.10	0.09	36.99
8	1.46	1.46	1.47	1.46	15.61

ตารางผนวกที่ 32 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดความขุ่น กับการใช้ถ่านกะลามะพร้าว
ผสมกับดินร่วมกับการปลูกพืช (รูปถ่าย) ทุกสัปดาห์

ระยะเวลาสัมผัส (สัปดาห์)	ค่าความขุ่น			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ การบำบัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
1	2.39	2.38	2.39	2.39	95.81
2	7.81	7.89	7.87	7.86	86.21
3	12.39	13.12	13.10	12.87	77.42
4	39.50	39.80	39.90	39.73	30.30
5	41.25	42.00	41.50	41.58	27.05
6	48.90	49.00	48.80	48.90	14.21
7	57.00	56.80	56.50	56.77	0.40
8	96.90	97.20	97.05	97.05	-70.26

ตารางผนวกที่ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดี กับการใช้ถ่านกะลามะพร้าวผสม
กับดินร่วมกับการปลูกพืช (ธูปฤาษี) ทุกสัปดาห์

ระยะเวลาสัมผัส (สัปดาห์)	ร้อยละของการบำบัด
1	97.60
2	95.20
3	95.20
4	90.40
5	80.80
6	71.20
7	42.40
8	37.60

ตารางผนวกที่ 34 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดี กับการใช้ดินอย่างเดียวร่วมกับการ
ปลูกพืช (ธูปฤาษี) ทุกสัปดาห์

ระยะเวลาสัมผัส (สัปดาห์)	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ การบำบัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
1	0.28	0.27	0.28	0.28	83.81
2	0.58	0.58	0.59	0.58	66.47
3	1.10	1.09	1.09	1.09	36.99
4	1.26	1.28	1.28	1.27	26.59
5	1.48	1.49	1.49	1.49	13.87
6	1.71	1.70	1.70	1.70	1.73
7	1.98	1.98	1.98	1.98	-14.45
8	2.01	2.02	2.01	2.01	-16.18

ตารางผนวกที่ 35 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดความชุ่มชื้นกับการใช้ดินอย่างเดียรร่วมกับการปลูกพืช (ธูปฤาษี) ทุกสัปดาห์

ระยะเวลาสัมผัส (สัปดาห์)	ค่าความชุ่มชื้น			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ การบำบัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
1	12.00	12.50	12.10	12.2	78.59
2	29.90	30.00	30.20	30.03	47.31
3	48.90	49.10	49.20	49.07	13.91
4	53.00	54.00	53.70	53.57	6.02
5	70.10	70.30	70.40	70.27	-23.28
6	81.30	81.20	81.30	81.27	-42.58
7	90.90	99.00	98.80	98.90	-73.51
8	101.10	101.50	101.60	101.40	-77.89

ตารางผนวกที่ 36 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดีกับการใช้ดินเพียงอย่างเดียว
ร่วมกับการปลูกพืช (ธูปฤาษี) ทุกสัปดาห์

ระยะเวลาสัมผัส (สัปดาห์)	ร้อยละของการบำบัด
1	95.20
2	42.40
3	37.60
4	28.00
5	23.20
6	18.40
7	4.00
8	-20.00

ตารางผนวกที่ 37 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี กับดินผสมถ่านกะลามะพร้าวร่วมกับการปลูกพืช (กกกลม) ทุกสัปดาห์

ระยะเวลาสัมผัส (สัปดาห์)	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ การบำบัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
1	0.12	0.12	0.12	0.12	93.06
2	0.25	0.26	0.25	0.25	85.55
3	0.40	0.41	0.41	0.41	76.30
4	0.61	0.60	0.60	0.60	65.32
5	0.98	0.97	0.98	0.98	43.35
6	1.21	1.22	1.22	1.22	29.48
7	1.58	1.59	1.58	1.58	8.67
8	1.69	1.68	1.69	1.69	2.31

ตารางผนวกที่ 38 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดความขุ่น กับดินผสมถ่านกะลามะพร้าวร่วมกับการปลูกพืช (กกกลม) ทุกสัปดาห์

ระยะเวลาสัมผัส (สัปดาห์)	ค่าความขุ่น			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ การบำบัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
1	3.90	4.00	3.90	3.93	93.10
2	9.80	9.90	9.80	9.83	82.75
3	18.90	18.50	18.30	18.57	67.42
4	42.50	43.00	42.70	42.73	25.03
5	49.10	49.20	49.10	49.13	13.81
6	55.50	55.90	56.00	55.80	2.10
7	99.10	98.90	98.20	98.73	-73.21
8	102.50	101.10	101.90	101.83	-78.65

ตารางผนวกที่ 39 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดี กับดินผสมถ่านกะลามะพร้าว
ร่วมกับการปลูกพืช (กกกลม) ทุกสัปดาห์

ระยะเวลาสัมผัส (สัปดาห์)	ร้อยละของการบำบัด
1	95.20
2	92.40
3	80.80
4	71.20
5	61.60
6	42.40
7	28.00
8	23.20

ตารางผนวกที่ 40 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดี กับการใช้ดินอย่างเดียวร่วมกับการ
ปลูกพืช (กกกลม) ทุกสัปดาห์

ระยะเวลาสัมผัส (สัปดาห์)	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ การบำบัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
1	0.35	0.35	0.36	0.35	79.77
2	0.60	0.61	0.60	0.60	65.32
3	0.81	0.82	0.82	0.82	52.60
4	1.09	1.08	1.09	1.09	36.99
5	1.51	1.50	1.50	1.50	13.29
6	1.79	1.79	1.79	1.79	-3.47
7	1.92	1.93	1.93	1.93	-11.56
8	2.08	2.07	2.08	2.08	-20.23

ตารางผนวกที่ 41 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดความชุ่มชื้นกับการใช้ดินอย่างเดียรร่วมกับการปลูกพืช (กกกลม) ทุกสัปดาห์

ระยะเวลาสัมผัส (สัปดาห์)	ค่าความชุ่มชื้น			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ การบำบัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
1	19.10	19.90	20.20	19.73	65.38
2	31.20	31.90	31.30	31.47	44.79
3	54.70	55.10	55.20	55.00	3.51
4	59.10	58.90	57.90	58.63	-2.86
5	80.00	80.90	81.10	80.67	-41.53
6	105.10	106.30	105.90	105.77	-85.56
7	110.00	110.50	110.40	110.30	-93.51
8	114.30	114.50	114.00	114.27	-11.47

ตารางผนวกที่ 42 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดีกับการใช้ดินอย่างเดียรร่วมกับการปลูกพืช (กกกลม) ทุกสัปดาห์

ระยะเวลาสัมผัส (สัปดาห์)	ร้อยละของการบำบัด
1	90.40
2	42.40
3	28.00
4	23.20
5	18.40
6	4.00
7	-20.00
8	-44.00

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ – นามสกุล	นางสาวพัชรภรณ์ กันยาประสิทธิ์
วัน เดือน ปี ที่เกิด	16 เมษายน 2530
สถานที่เกิด	จังหวัดเลย
ประวัติการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (เทคโนโลยีชีวภาพอุตสาหกรรม) มหาวิทยาลัยรังสิต
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-