



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสีของรีแอกทีฟ (RBBR) ด้วยถ่านกัมมันต์จาก
ไม้สน และ ไม้สัก และถ่านกัมมันต์นอร์ิท

The Efficiency Comparison of Reactive Dye (RBBR) Adsorption of Pine and Teak Activated
Carbons and Activated Charcoal Norit

นางผู้วิจัย นางสาวพิชชาภัทร์ กุลมา

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์คณิดา ตั้งคนานุรักษ์, วท.ม.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์พิลาณี ไวกนอมสัตย์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์นิพนธ์ ตั้งคนานุรักษ์, Ph.D.)

ประธานสาขาวิชา

(ศาสตราจารย์เกษม จันทร์แก้ว, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ (RBBR) ด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้สน
และไม้สัก และถ่านกัมมันต์นอร์ิท

The Efficiency Comparison of Reactive Dye (RBBR) Adsorption of Pine and Teak Activated
Carbons and Activated Charcoal Norit

โดย

นางสาวพิชชาภัทร์ กุลมา

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตรุ่งสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2554

Pitchapat Kullama 2011: The Efficiency Comparison of Reactive Dye (RBBR) Adsorption of Pine and Teak Activated Carbons and Activated Charcoal Norit. Master of Science (Environmental Science), Major Field: Environmental Science, College of Environment. Thesis Advisor: Associate Professor Kanita Tungkananuruk, M.Sc. 109 pages.

The objective of this research was to study the optimum conditions for Remazol Brilliant Blue R (RBBR) adsorption using activated carbons from wasted pine, teak woods and activated charcoal norit. Three activated carbons had average particle size about 30 mesh (502.5 μm) and surface areas at 118.3, 0.58 and 831.3 m^2g^{-1} , respectively. The response surface methodology (RSM) was used for the optimization of adsorption condition. The factors at 5 levels included dye concentration, pH, shaking time, adsorbent amount and agitation speed. From the results, it was found that the relation between dye concentration and agitation speed significantly affected RBBR adsorption of pine activated carbon. The optimum condition of pine activated carbon was 140 mgL^{-1} RBBR concentration, pH 11, shaking time 270 minutes, adsorbent amount 5 g and agitation speed 200 rpm. The optimum condition of teak activated carbon adsorption was 50 mgL^{-1} RBBR concentration, pH 11, shaking time 270 minutes, adsorbent amount 5 g and agitation speed 50 rpm. The optimum condition of activated charcoal norit was 150 mgL^{-1} RBBR concentration, pH 12, shaking time 270 minutes, adsorbent amount 0.5 g and agitation speed 110 rpm. All factors did not significantly affect RBBR adsorption. It could be summarized that the activated charcoal norit was the most efficient (14.60 mgg^{-1}) due to its highest surface area. The second was pine activated carbon (1.35 mgg^{-1}) and the worst activated carbon was teak (0.46 mgg^{-1}). Further experiments showed that the RBBR adsorption of all three adsorbents was according to the Freundlich equilibrium.

The gravity continuous flow adsorption experiment showed that the commercial activated carbon could be used for the longest period 360 minutes; whereas pine and teak activated carbon lasted only for 230 minutes. The best recovery efficiency was obtained from the commercial activated carbon. The adsorption of RBBR in the factory effluent was also studied in the batch experiment without any adjustment of its quality. The commercial activated carbon showed the best adsorption efficiency at $103.38 \times 10^{-3} \text{ mgg}^{-1}$, the second was at $9.76 \times 10^{-3} \text{ mgg}^{-1}$ from pine activated carbon and teak activated carbon was the worst adsorbent at $9.30 \times 10^{-3} \text{ mgg}^{-1}$.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

กราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์คณิดา ตั้งคณานุรักษ์ ประธานกรรมการที่ปรึกษา
อาจารย์พิลาณี ไวถนอมสัจย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม รองศาสตราจารย์ ดร. นิพนธ์
ตั้งคณานุรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้สละเวลาในการให้คำปรึกษา คำแนะนำ และ
ตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ คุณทินกร พิริยะโยธา จากกรมป่าไม้ ที่อนุเคราะห์ตัวอย่างถ่านกัมมันต์ จาก
ไม้สนและไม้สักในการวิจัย ขอขอบพระคุณห้องปฏิบัติการหน่วยปฏิบัติการเทคโนโลยีเอนไซม์และ
การจัดการของเสีย สถาบันคั่นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน และห้องปฏิบัติการวิเคราะห์คุณภาพน้ำและดิน
วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่อนุเคราะห์สถานที่และเครื่องมือทำงานวิจัย ขอ
ขอบพระคุณสถาบันคั่นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน ที่ได้สนับสนุนทุนในการวิจัย ขอขอบพระคุณบริษัท
ชาบีน่า ฟาร์อีส จำกัด (พุทธมณฑลสาย 5) ที่ได้อนุเคราะห์ตัวอย่างน้ำทิ้งเพื่อใช้ในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ คุณชาตรี นิมปี และนิสิตปริญญาโทวิทยาลัยสิ่งแวดล้อม รุ่น 32 รวมถึงบุคลากร
สถาบันคั่นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
วิทยาเขตบางเขน สำหรับกำลังใจ ความช่วยเหลือ และให้คำปรึกษา แก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด

กราบขอบพระคุณครอบครัวกุลมา ที่ได้ให้กำลังใจและกำลังใจทรัพย์ ในการศึกษาวิจัย
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้ประสบผลสำเร็จ

พิชชาภัทร์ กุลมา

มกราคม 2554

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(8)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	34
อุปกรณ์	34
วิธีการ	36
ผลและวิจารณ์	50
สรุปและข้อเสนอแนะ	86
สรุป	86
ข้อเสนอแนะ	90
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	91
ภาคผนวก	96
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	109

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ค่า LD ₅₀ ของสีย้อมสิ่งทอเมื่อเปรียบเทียบกับโซเดียมไฮยาไนด์	8
2	พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์แต่ละชนิด	12
3	วิธีการคำนวณเพื่อทดสอบ Lack-of-fit Test; LOF	31
4	ระดับของปัจจัย 5 ปัจจัยในการศึกษาการดูดซับสีย้อม RBBR ด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้สน	38
5	แผนการทดลองแสดงปัจจัยและระดับที่ใช้ในการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อมด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้สน	38
6	ระดับของปัจจัย 5 ปัจจัยในการศึกษาการดูดซับสีย้อม RBBR ด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้สัก	40
7	แผนการทดลองแสดงปัจจัยและระดับที่ใช้ในการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อมด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้สัก	41
8	ระดับของปัจจัย 5 ปัจจัยในการศึกษาการดูดซับสีย้อม RBBR ด้วยถ่านกัมมันต์นอริท	42
9	แผนการทดลองแสดงปัจจัยและระดับที่ใช้ในการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อมด้วยถ่านกัมมันต์นอริท	43
10	ลักษณะทางกายภาพของตัวดูดซับทั้ง 3 ชนิด	51
11	ร้อยละการดูดซับสีย้อม RBBR ด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้สนจากการทดลองด้วยวิธีแบบเบตซ์และจากการทำนายด้วยสมการถดถอย	54
12	ค่าประมาณ (<i>p</i> -value) และการทดสอบสัมประสิทธิ์สมการถดถอยของร้อยละการดูดซับสีย้อม RBBR ด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้สน	55
13	การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน และ Lack of fit ของสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อม RBBR ด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้สน	56
14	ร้อยละการดูดซับสีย้อม RBBR ด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้สักจากการทดลองด้วยวิธีแบบเบตซ์และจากการทำนายด้วยสมการถดถอย	59
15	ค่าประมาณ (<i>p</i> -value) และการทดสอบสัมประสิทธิ์สมการถดถอยของร้อยละการดูดซับสีย้อม RBBR ด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้สัก	60

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
16	การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน และ Lack of fit ของสถานะที่เหมาะสมในการ ดูดซับสีย้อม RBBR ด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้สัก	61
17	ร้อยละการดูดซับสีย้อม RBBR ด้วยถ่านกัมมันต์นอร์ิทจากการทดลองด้วยวิธีแบบ แบตช์และจากการทำนายด้วยสมการถดถอย	63
18	ค่าประมาณ (p -value) และการทดสอบสัมประสิทธิ์สมการถดถอยของร้อยละการ ดูดซับสีย้อม RBBR ด้วยถ่านกัมมันต์นอร์ิท	65
19	การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน และ Lack of fit ของสถานะที่เหมาะสมต่อการ ดูดซับสีย้อม RBBR ด้วยถ่านกัมมันต์นอร์ิท	66
20	ประสิทธิภาพ และสถานะที่ดีที่สุดในการดูดซับสีย้อม RBBR ของตัวดูดซับทั้ง 3 ชนิด	68
21	สมการและค่าของเทอมของไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดิชของถ่าน กัมมันต์ทั้ง 3 ชนิด	72
22	ร้อยละความเข้มข้นสีย้อมที่เหลือ หลังผ่านการดูดซับแบบต่อเนื่องด้วยถ่าน กัมมันต์ทั้ง 3 ชนิด	74
23	ร้อยละความเข้มข้นสีย้อมที่เหลือในการฟื้นฟูถ่านกัมมันต์จากไม้สน	76
24	ร้อยละความเข้มข้นสีย้อมที่เหลือในการฟื้นฟูถ่านกัมมันต์จากไม้สัก	78
25	ร้อยละความเข้มข้นสีย้อมที่เหลือในการฟื้นฟูถ่านกัมมันต์นอร์ิท	79
26	ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพตัวอย่างน้ำเสีย และค่า มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม	81
27	เปรียบเทียบร้อยละการดูดซับของน้ำเสียที่ผ่านการปรับ และไม่ปรับสภาพน้ำ ตัวอย่าง	82
28	ร้อยละความเข้มข้นสีย้อมที่เหลือในน้ำเสีย หลังผ่านการดูดซับแบบต่อเนื่องด้วย ถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ชนิด	84
29	ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ในน้ำเสียภายหลังการดูดซับแบบต่อเนื่อง	85

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) กับความเข้มข้นสีของ RBBR ที่ ความยาวคลื่น 592 nm	98
2 การคำนวณค่า F จากสมการเพื่อยืนยันสมการ (Lack of fit) การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้สน	99
3 การคำนวณค่า F จากสมการเพื่อยืนยันสมการ (Lack of fit) การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้สัก	99
4 การคำนวณค่า F จากสมการเพื่อยืนยันสมการ (Lack of fit) การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์นอริท	99
5 สภาวะที่เลือกเพื่อการยืนยันผลการทดลองการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้สน	100
6 สภาวะที่เลือกเพื่อการยืนยันผลการทดลองการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้สัก	100
7 สภาวะที่เลือกเพื่อการยืนยันผลการทดลองการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์นอริท	101
8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวดูดซับ (กรัม) และร้อยละการดูดซับสีของ RBBR ด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้สน	101
9 ปริมาณตัวดูดซับ (กรัม) และร้อยละการดูดซับสีของ RBBR ด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้สัก	102
10 ปริมาณถ่านกัมมันต์ (กรัม) และร้อยละการดูดซับสีของ RBBR ด้วยถ่านกัมมันต์นอริท	102
11 ไอโซเทอร์มการดูดซับของถ่านกัมมันต์จากไม้สน	103
12 ไอโซเทอร์มการดูดซับของถ่านกัมมันต์จากไม้สัก	103
13 ไอโซเทอร์มการดูดซับของถ่านกัมมันต์นอริท	104
14 มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม	104
15 ค่า T (two-tailed)	107
16 ค่า F ($\alpha = 0.05$)	108

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ลักษณะโครงสร้างโมเลกุลของสียรีแอคทีฟ	5
2	โครงสร้างสี Remozal Brilliant Blue R (RBBR)	6
3	โครงสร้างของถ่านกัมมันต์	11
4	ลักษณะรูพรุนในถ่านกัมมันต์	13
5	ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ	15
6	การเคลื่อนย้ายโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ	17
7	ลักษณะการดูดติดผิวแบบต่อเนื่องในชั้นตรง	21
8	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบพื้นฐาน	22
9	แบบจำลองพื้นผิวตัวดูดซับของสมการแลงเมียร์	23
10	การดูดซับของแลงเมียร์เมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว	24
11	กราฟแสดงความชันระหว่าง $1/q$ และ $1/C$	25
12	กราฟความชันระหว่าง $\log q$ และ $\log C$	26
13	(ก) ลักษณะของแผนภาพคอนทัวร์ชนิดต่างๆ และ (ข) แผนภาพพื้นผิว	28
14	(ก) การดูดซับสีย้อมแบบแบดจ์บนเครื่องเขย่า (Shaker) และ (ข) การกรองด้วยกระดาษกรองเมมเบรน Whatman เบอร์ 1 และ 5	45
15	(ก) ส่วนประกอบส่วนบน และ (ข) ส่วนล่างภายในคอลัมน์	46
16	(ก) ถ่านกัมมันต์จากไม้สน และ (ข) ถ่านกัมมันต์จากไม้สัก	50
17	ถ่านกัมมันต์นอร์ท No. 22875 จากบริษัท Sigma-Aldrich Chemie GmbH, CH-9741 Netherland	50
18	ถ่านกัมมันต์ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 30 เมช (502.5 ไมโครเมตร)	51
19	(ก) ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์จากไม้สนก่อน และ (ข) หลังการดูดซับ ด้วยเครื่อง SEM	52
20	(ก) ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวถ่านกัมมันต์จากไม้สักก่อน และหลังการดูดซับ (ข) ด้วยเครื่อง SEM	52
21	(ก) ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวถ่านกัมมันต์นอร์ทก่อน และ (ข) หลังการดูดซับด้วยเครื่อง SEM	53

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
22	(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยความเข้มข้นสีย้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร) และระยะเวลาในการเขย่า (นาทีก) และ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยความเข้มข้นสีย้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร) และปริมาณถ่านกัมมันต์ (ร้อยละโดยน้ำหนักต่อปริมาตร) ที่มีอิทธิพลต่อร้อยละการดูดซับสีย้อม RBBR ด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้สน	57
23	ความเข้มข้นสารละลายสีย้อม RBBR ก่อนและหลังการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้สน	58
24	(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสีย้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร) และพีเอช และ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยความเข้มข้นสีย้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร) และความเร็วรอบในการเขย่า (รอบต่อนาที) ที่มีต่อร้อยละการดูดซับสีย้อม RBBR ด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้สัก	62
25	ความเข้มข้นสารละลายสีย้อม RBBR ก่อนและหลังการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้สัก	63
26	(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสีย้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร) และระยะเวลาในการเขย่า (นาทีก) และ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการเขย่า (นาทีก) และปริมาณถ่านกัมมันต์ (ร้อยละโดยน้ำหนักต่อปริมาตร) ที่มีต่อร้อยละการดูดซับสีย้อม RBBR ด้วยถ่านกัมมันต์นอร์ท	67
27	สารละลายสีย้อม RBBR ก่อนและหลังการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์นอร์ท	68
28	ไอโซเทอร์มการดูดซับสีย้อม RBBR แบบแลงเมียร์ ด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้สน	69
29	ไอโซเทอร์มการดูดซับสีย้อม RBBR แบบฟรุนดิช ด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้สน	70
30	ไอโซเทอร์มการดูดซับสีย้อม RBBR แบบแลงเมียร์ ด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้สัก	70
31	ไอโซเทอร์มการดูดซับสีย้อม RBBR แบบฟรุนดิช ด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้สัก	71
32	ไอโซเทอร์มการดูดซับสีย้อม RBBR แบบแลงเมียร์ ด้วยถ่านกัมมันต์นอร์ท	71
33	ไอโซเทอร์มการดูดซับสีย้อม RBBR แบบฟรุนดิช ด้วยถ่านกัมมันต์นอร์ท	72
34	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ (มล.) แบบต่อเนื่องกับร้อยละความเข้มข้นสีย้อมที่เหลือของการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ชนิด	73

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
35	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ (มล.) แบบต่อเนื่องกับ ร้อยละความเข้มข้นสีย้อมที่เหลือในการฟื้นฟูถ่านกัมมันต์จากไม้สน 3 ครั้ง	75
36	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ (มล.) แบบต่อเนื่องกับ ร้อยละความเข้มข้นสีย้อมที่เหลือในการฟื้นฟูถ่านกัมมันต์จากไม้สัก 3 ครั้ง	77
37	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ (มล.) แบบต่อเนื่องกับ ร้อยละความเข้มข้นสีย้อมที่เหลือในการฟื้นฟูถ่านกัมมันต์อนริท 3 ครั้ง	79
38	ลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อม	81
39	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ (มล.) แบบต่อเนื่องกับ ร้อยละความเข้มข้นสีย้อมที่เหลือของการดูดซับสีย้อมในน้ำเสียด้วยถ่านกัมมันต์ ทั้ง 3 ชนิด	83
ภาพผนวกที่		
1	กราฟมาตรฐานสีย้อม RBBR ที่ความยาวคลื่น 592 nm	98

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

RSM	=	การหาพื้นผิวการตอบสนอง (Response Surface Methodology)
RBBR	=	Remazol Brilliant Blue R (สีย้อมประเภทรีแอคทีฟชนิดหนึ่ง)
CCD	=	การออกแบบการทดลองโดยออกแบบการหมุนโดยทำการเลือก α โดยค่าซึ่งเป็นตัวแปรตามบนจำนวนของจุดในส่วน of แฟลททอเรียล (Montgomery, 1991) (Central Composite Design)
TDS	=	ของแข็งทั้งหมดที่ละลายในน้ำ (Total dissolved solids)
TSS	=	ของแข็งแขวนลอยรวม (Total suspended solids)
TS	=	ของแข็งทั้งหมด (Total solids)
BOD	=	ปริมาณออกซิเจนที่จุลินทรีย์ใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร) (Biochemical oxygen demand)
COD	=	ปริมาณออกซิเจนที่สารเคมีใช้ในการออกซิไดซ์สารเคมีในน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร) (Chemical oxygen demand)

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ (RBBR) ด้วยถ่านกัมมันต์ จากไม้สน และไม้สัก และถ่านกัมมันต์นอร์ิท

The Efficiency Comparison of Reactive Dye (RBBR) Adsorption of Pine and Teak Activated Carbons and Activated Charcoal Norit

คำนำ

ปัจจุบันโรงงานอุตสาหกรรมได้ขยายตัวเพิ่มขึ้นจึงเกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะมลพิษจากโรงงานสิ่งทอ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการเลือกกระบวนการบำบัดสีย้อม เพราะความเป็นพิษของสีย้อมในน้ำเสียขึ้นอยู่กับปริมาณของสารเคมีจากกระบวนการผลิต กระบวนการดูดซับทางกายภาพและทางเคมีเป็นการบำบัดสีย้อมที่มีประสิทธิภาพโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้ถ่านในการดูดซับ หรือที่เรียกว่ากระบวนการดูดติดผิว (Adsorption process) ซึ่งเป็นการบำบัดทางกายภาพเคมี โดยสารตัวกลางที่นิยมใช้ในการดูดติดผิว ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) เนื่องจากถ่านกัมมันต์เป็นตัวกลางที่มีประสิทธิภาพในการดูดติดผิวสูงและการผลิตถ่านกัมมันต์เป็นขั้นตอนที่ใช้เทคโนโลยีที่ไม่ยุ่งยากและมีต้นทุนต่ำ

ถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์มีอยู่หลายชนิด ส่วนใหญ่แล้วจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง เช่น ถ่าน Dacro G 60 มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 700-800 ตารางเมตรต่อกรัม ผลิตจากถ่านโค้กจากบริษัท Norit company และถ่าน SGL มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 1,000-1,200 ตารางเมตรต่อกรัม ผลิตจากถ่านหินปิทุมินัสจากบริษัท Calgon carbon Corporation เพราะร้อยละการดูดซับส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับปริมาณพื้นที่ผิว แต่เนื่องจากถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์เหล่านี้ต้องนำเข้าจากต่างประเทศจึงทำให้มีค่าใช้จ่ายสูง

ไม้สักและไม้สนในประเทศไทยปลูกมากทางภาคเหนือ โดยไม้สน (*Pinus caribaea* Morelet) สามารถเก็บเกี่ยวผลผลิตได้หลังจาก 10-18 ปี หลังการปลูก (Wang *et al*, 1999) ในขณะที่ไม้สัก (*Tectona grandis* L.f.) สามารถเก็บเกี่ยวผลผลิตได้หลังจาก 15-20 ปี หลังการปลูก (Wood, 1992) โดยส่วนใหญ่แล้วไม้เหล่านี้จะใช้ในการทำเฟอร์นิเจอร์และของตกแต่งภายใน ส่วนเศษไม้ที่เหลือจะนำมาทำเป็นไม้ฟืน อย่างไรก็ตาม เนื่องจากคุณสมบัติบางประการของไม้สนและไม้สัก เช่น ไม้สน (*Pinus caribaea* Morelet) มีความหนาแน่นประมาณ 345-637 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg.m^{-3}) (Khiari *et al*, 1989) และไม้สัก (*Tectona grandis* L.f.) มีความหนาแน่นประมาณ 480-850

กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg.m^{-3}) (Richter *et al*, 2009) ซึ่งคุณสมบัติที่ว่ามันสามารถนำไม่เหล่านี้นี้มาผ่านขั้นตอนการผลิตจนเป็นถ่านกัมมันต์ได้ จึงเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับของเหลือใช้และสามารถลดการนำเข้าถ่านกัมมันต์จากต่างประเทศได้

การศึกษาวิจัยครั้งนี้จึงนำสีย้อมสังเคราะห์ Remozal Brilliant Blue R (RBBR) มาใช้ในการศึกษาหาสภาวะเหมาะสมในการดูดซับสีย้อม โดยใช้วิธีการหาพื้นผิวการตอบสนอง Response Surface Methodology, RSM) RSM เป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับการหาสภาวะที่เหมาะสมต่างๆ โดยการกำหนดระดับของสภาวะที่เหมาะสมในแต่ละพารามิเตอร์ที่ได้จากการศึกษาข้อมูลเบื้องต้น ซึ่งวิธีนี้สามารถลดชุดการทดลองให้น้อยลง และยังสามารถทราบความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ต้องการทราบได้จากแผนภาพคอนทัวร์ (Contour plot) และแผนภาพพื้นผิว (Surface plot)

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟ RBBR ของถ่านกัมมันต์จากไม้สน ไม้สัก และถ่านกัมมันต์นอร์ท
2. เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมของถ่านกัมมันต์จากไม้สน ไม้สัก และถ่านกัมมันต์นอร์ท โดยใช้วิธีการหาพื้นผิวการตอบสนอง



การตรวจเอกสาร

1. สีย้อม

สีย้อม คือ สารอินทรีย์ที่ผลิตขึ้นมาเพื่อดูดกลืนแสง โดยการทำให้อยู่บนหรือในผิวหน้าของวัตถุ เพื่อให้วัตถุนั้นมีสีขึ้นมา โดยจะมีความทนทานแตกต่างกันแล้วแต่ชนิดของสีย้อมและพันธะในการยึดติดกับวัตถุนั้น องค์ประกอบของสีย้อม มีดังนี้ (Zollinger, 2003)

1.1 โครงสร้างของโมเลกุลสีย้อม ประกอบด้วยองค์ประกอบ 2 ส่วน คือ

1.1.1 หมู่โครโมฟอร์ของสีย้อม (Dye chromophore group) มีโครงสร้างเป็นพันธะคู่ และเป็นส่วนที่ทำให้เกิดสีของสีย้อม โดยเมื่อโมเลกุลของสีย้อมถูกแสงกระทบ โครงสร้างโครโมฟอร์จะเกิดการสั่น (Oscillates) เนื่องจากการดูดกลืนแสงบางความยาวคลื่นไป จึงเห็นสีในช่วงความยาวคลื่นที่ไม่ถูกดูดกลืน

1.1.2 หมู่ฟังก์ชันนัลของสีย้อม (Dye functional group) องค์ประกอบของโมเลกุลเป็นส่วนที่ก่อพันธะระหว่างโมเลกุลสีกับเส้นใย โครงสร้างส่วนนี้มักจะเป็นวงเบนซีน (Benzene ring) ที่มีอะตอมที่ไวต่อปฏิกิริยา (Reactive group) ติดอยู่ เช่น หมู่ Na^+ , COO^- , OH^- และ NH_3^+ เป็นต้น โมเลกุลสีจะยึดติดกับเส้นใย โดยที่หมู่ฟังก์ชันนัลทำปฏิกิริยากับเส้นใย

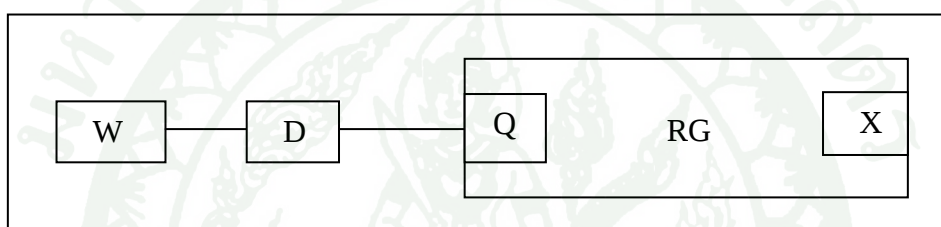
1.2 การจำแนกประเภทของสีย้อม แบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ คือ

1.2.1 สีย้อมธรรมชาติ (Natural dyestuff) เป็นสีย้อมที่ได้จากธรรมชาติ ได้แก่ สีย้อมจากพืช เช่น สีน้ำเงินจากต้นคราม สีแดงจากรากต้นเข็ม เป็นต้น และสีย้อมจากสัตว์ เช่น สีม่วงแดงจากครั่ง เป็นต้น

1.2.2 สีย้อมสังเคราะห์ (Synthetic dyestuff) สามารถจำแนกได้ตามกรรมวิธีการย้อมสี ที่นิยมใช้ในการย้อมเส้นใยไหม ได้แก่ สีแอซิด สีเมทัลคอมเพลกซ์ สีเบสิก สีมอร์แดนท์ สีรีแอคทีฟ สีไคเร็กซ์ และสีธรรมชาติ (Zollinger, 2003)

สีย้อมแอคทีฟ (Reactive dyes) เป็นสีสังเคราะห์ที่สามารถละลายน้ำได้ดี โมเลกุลของสีประกอบด้วยกลุ่มเคมีที่ไวต่อปฏิกิริยา (Reactive group) โครโมฟอร์ หมู่เชื่อมต่อและหมู่ทำปฏิกิริยา สามารถสร้างพันธะโควาเลนต์ระหว่างอะตอมโมเลกุลคาร์บอนกับอะตอมออกซิเจน ในโตรเจนของกลุ่มไฮดรอกซิล และอะมิโนของเส้นใยตามลำดับ พันธะโควาเลนต์ที่เกิดขึ้นกับหมู่อะมิโนจะพบในกลุ่มโพลีเอไมด์ และพันธะโควาเลนต์ที่เกิดขึ้นกับทุกกลุ่ม จะพบในเส้นใยโปรตีน เป็นสีที่ข้อม่ง่ายให้ความสว่างสดใสมาก เมื่อเทียบกับสีไดเรกต์ หรือสีแวต และมีความคงทนต่อการซักสูง

ลักษณะโครงสร้างของสีย้อมแอคทีฟ จะประกอบด้วยกลุ่มพื้นฐาน 5 กลุ่ม ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ลักษณะโครงสร้างโมเลกุลของสีย้อมแอคทีฟ

ที่มา: Zollinger (2003)

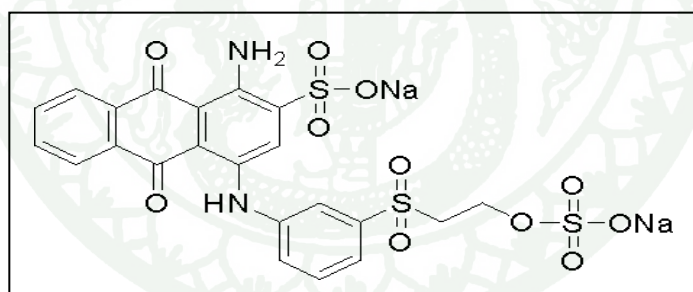
W (Water Solubilizing Group) คือ กลุ่มที่มีความสามารถในการละลายน้ำโดยทั่วไปจะเป็นพวกซัลโฟนิค สีที่ใช้สำหรับเส้นใยเซลลูโลสหรือเส้นใยโปรตีน จะต้องมีกลุ่มซัลโฟนิคเป็นองค์ประกอบอยู่ 1-4 กลุ่ม

D (Chromophore) คือ กลุ่มของเคมีที่ทำให้เกิดสี ซึ่งโดยทั่วไปแล้วสำหรับสีเหลือง สีส้ม และสีแดง กลุ่มโครโมฟอร์ คือ Metal-free-monoazodyes สำหรับสีม่วง สีทับทิม และสีน้ำทะเล กลุ่มโครโมฟอร์ คือ Anthraquinone derivative based on Bromide Acid รวมทั้ง อนุพันธ์ ฟาธาโลไซยามีน (Phthalocyanine derivatives), สารเชิงซ้อนคอปเปอร์ฟอร์มาซาน (Formazan Cu-Complexes) และ ไตร-ฟีนอลไดออกซาซีน (Tri-Phenodioxazines) (Zollinger, 2003)

Q (Bridge Link) คือ กลุ่มอะตอมที่ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมระหว่างกลุ่มรีแอคทีฟ (RG) กับกลุ่มโครโมฟอร์ (D) เช่น $-NH-$, $-NHCO-$, $-SO_2-$, $-NH SO_2-$ และ $-N(CH_3)-$ เป็นต้น

X (Nucleofugic Leaving Group) เป็นกลุ่มที่สามารถเกิดเป็นไอออน หรือโมเลกุลที่เสถียรภายหลังจากเกิดการแยกตัว (Dissociation) (Zollinger, 2003) RG (Reactive group) คือกลุ่มที่ทำให้สีทำปฏิกิริยากับเส้นใย

ในบางกรณีกลุ่มรีแอคทีฟก็จะติดกับกลุ่มโครโมฟอร์โดยตรง ไม่มีตัวเชื่อมก็ได้และกลุ่มรีแอคทีฟส่วนใหญ่จะเป็นวงแหวนเฮเทอโรไซคลิก (Heterocyclic ring) ลักษณะของกลุ่มตัวเชื่อมและส่วนประกอบของกลุ่มวงแหวนเฮเทอโรไซคลิก มีอิทธิพลอย่างมากต่อการทำปฏิกิริยาและสมบัติอื่นๆ ของสี จากส่วนประกอบดังที่กล่าวมานี้จะพบว่ามีสองส่วนที่สำคัญ คือ สารที่ทำให้เกิดสี และกลุ่มรีแอคทีฟ โดยสีรีแอคทีฟที่เป็นสีเหลือง สีส้ม สีแดง สีม่วง สีนํ้าตาล และสีดำ โดยส่วนใหญ่จะเป็นโครงสร้างเอโซ แต่ถ้าเป็นสีรีแอคทีฟสีฟ้า หรือสีนํ้าเงินจะมีทั้งที่เป็นโครงสร้างเอโซ แอนทราควิโนน ตัวอย่างสีที่มีโครงสร้างเป็นแอนทราควิโนน เช่น สี Remozal Brilliant Blue R (RBBR) ดังแสดงในภาพที่ 2 ให้สีนํ้าเงิน สีข้อมเอโซบางตัวมีคอปเปอร์เป็นองค์ประกอบ นอกจากนี้สีดำสีนํ้าตาลบางตัว และสีรีแอคทีฟสำหรับย้อมผ้าขนสัตว์ มักจะมีโครงสร้างเป็นโครเมียมหรือโคบอลต์คอมเพล็กซ์ สีรีแอคทีฟส่วนใหญ่จะประกอบด้วยกลุ่มโครโมฟอร์ชนิดเอโซซึ่ง ได้แก่ Unmetallised azo และ Metal-complex azo เป็นส่วนมากถึง 81 %



ภาพที่ 2 โครงสร้างสี Remozal Brilliant Blue R (RBBR)

ที่มา: Ada *et al.* (2009)

5) สีมอร์แดนต์หรือโครม (Mordant or Chrome dyes) ประกอบด้วยสีที่ได้จากธรรมชาติและสังเคราะห์ขึ้นเอง ตัวสีไม่มีพลังในการเกาะเส้นใยแต่ติดได้เมื่อเส้นใยทำมอร์แดนต์ด้วยออกไซด์ของโลหะก่อน ความคงทนต่อการซักดีมาก และคงทนต่อแสงดี

6) สีเมทัลคอมเพลกซ์ (Metal Complex Dyes) เป็นสีประกอบเชิงซ้อน โมเลกุลมีอะตอมของโลหะหนัก อาจจัดอยู่ในสีแอซิด เพราะมีกรรมวิธีในการย้อมคล้ายกัน โดยย้อมในน้ำย้อมที่เป็นกรดและใช้สำหรับเส้นใยโปรตีนและไนลอนเช่นเดียวกัน ความคงทนต่อการซักดีกว่าสีแอซิดทั่วไป แต่ความสดใสของสีไม่ดีเท่าสีแอซิด

1.3 ความเป็นพิษของสีรีแอคทีฟ

โดยทั่วไปสีย้อมถือได้ว่าเป็นสารที่มีความเป็นพิษต่ำ สำหรับสีรีแอคทีฟที่มีจำหน่ายอยู่ในรูปของเหลว ผง และเม็ดละเอียด ดังนั้น สีย้อมสามารถเข้าสู่ร่างกายได้ 3 ทาง คือ ทางจมูกด้วยการสูดดมสีที่ฟุ้งกระจายในอากาศ ก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจ ทางผิวหนังโดยการสัมผัสทำให้ระคายเคืองต่อเยื่อเมือก และทางปากโดยปะปนไปกับอาหารที่รับประทานเข้าไป เนื่องจากสีชนิดนี้จะรวมตัวกับโปรตีนในร่างกายมนุษย์ที่อุณหภูมิปกติของร่างกาย ซึ่งไปกระตุ้นความสามารถในการรับรู้ของระบบทางเดินหายใจ (Respiratory sensitization) จนทำให้เกิดการระคายเคือง

ในปี 1991 องค์กร ETAD (Ecological and Toxicology Association of Dyes and Organic Pigment Manufacturers) ได้ออกประกาศเกี่ยวกับความเป็นพิษของสีรีแอคทีฟเมื่อสัมผัสโดยผิวหนังหรือสูดดมเข้าไป ตลอดจนแนวทางปฏิบัติในการใช้สีรีแอคทีฟอย่างถูกวิธีเพื่อสุขภาพที่ดีของผู้ปฏิบัติงาน (อังคณา, 2544) ความเป็นพิษของสีย้อมจากการรับประทานเข้าไปเห็นได้จากค่า LD_{50} ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่า LD₅₀ ของสีย้อมสิ่งทอเมื่อเปรียบเทียบกับโซเดียมไฮยาไนด์

LD ₅₀ (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)	ร้อยละของสีย้อม
> 5,000	82
2,000 – 5,000	10
> 250	> 1
15	โซเดียมไฮยาไนด์

หมายเหตุ ค่า LD₅₀ (Lethal dose 50) คือ ค่าความเป็นพิษจากการทดลองหาปริมาณสารเคมีที่ทำให้สัตว์ที่นำมาทดลองตายไปครึ่งหนึ่งของจำนวนทั้งหมด เพราะฉะนั้น ถ้าค่า LD₅₀ ยิ่งต่ำมากความเป็นพิษยิ่งมีมาก)

2. ถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์เป็นถ่านที่มีความพรุน (Porosity) สามารถผลิตได้จากถ่านหิน ถ่านไม้ ถ่านไค้ก ถ่านไม้กะลามะพร้าว หรือถ่านแกรไฟต์ ความพรุนที่เพิ่มขึ้นเป็นผลเนื่องมาจากการกระตุ้นด้วยสารเคมีหรือการกระตุ้นทางกายภาพ ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างผลึกของถ่านเพิ่มขึ้น การกระตุ้นที่เหมาะสมจะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนเป็นจำนวนมาก ทำให้ถ่านมีพื้นที่ผิวภายใน (Internal surface area) เพิ่มขึ้น และสามารถดูดซับสิ่งสกปรกและกลิ่นได้มากกว่าถ่านธรรมดา (มันลิน, 2538)

2.1 วัสดุที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์

วัสดุที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ได้จากวัสดุหลายประเภท เช่น ชานอ้อย เมล็ดกาแฟสำหรับ วัชพืช แถ่นไม้ ฟืน ถ่านปิโตรเลียม ไม้ รำข้าว จี๊เลื้อย กะลามะพร้าว แป้ง และกากน้ำตาล เป็นต้น วัสดุเหล่านี้มีบางชนิดเท่านั้นที่เหมาะสมสำหรับผลิตถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งวัสดุแต่ละประเภทจะมีลักษณะเฉพาะทางธรรมชาติของตัวเอง เช่น กะลามะพร้าว ซึ่งมีความหนาแน่นสูงจะสามารถผลิตถ่านกัมมันต์ที่มีการกระจายตัวของรูพรุนได้อย่างมากมายและจะมีความหนาแน่นสูงกว่าถ่านกัมมันต์ที่มาจากถ่านหิน นอกจากนี้นี้ยังมีปัจจัยอื่นที่มีผลต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์ เช่น การเผาไหม้ ซึ่งการเผาไหม้ที่แตกต่างกันจะเป็นตัวกำหนดลักษณะของพื้นที่ผิวและความสามารถในการดูดซับ นอกเหนือจากส่วนประกอบของธาตุและโมเลกุลของวัสดุ

2.2 การผลิตถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) เป็นถ่านซึ่งมีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสามารถดูดซับสารที่อยู่ในสภาพของก๊าซและของเหลวได้จึงมีประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น ผลิตภัณฑ์อาหาร ได้แก่ กระบวนการทำให้น้ำบริสุทธิ์ เคมี ยา และน้ำดื่ม โดยใช้ถ่านกัมมันต์ดูดซับ และฟอกสี นอกจากนี้ ถ่านกัมมันต์ยังใช้ในการกำจัดน้ำเสียและมลภาวะต่างๆ ถ่านกัมมันต์ผลิตขึ้นจากการเผาวัตถุดิบที่มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ โดยเฉพาะวัตถุดิบที่มีแหล่งกำเนิดจากพืช เช่น ถ่านหิน พีท ลิกไนต์ ขี้เลื่อย กะลามะพร้าว และอื่นๆ ซึ่งจะได้ถ่าน และถ่านที่ได้จะนำมากระตุ้นจนได้ถ่านกัมมันต์ซึ่งมีคุณภาพในการดูดซับสูง (กรรณิการ์ และคณะ, 2541) ขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์ มี 2 ขั้นตอน ดังนี้

2.2.1 กระบวนการคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization process) เป็นกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ในรูปของชาร์ (Char) ที่เป็นของแข็งมากกว่าน้ำมันทาร์ (Tar) และก๊าซ เพื่อเป็นการเพิ่มปริมาณคาร์บอน เพื่อให้เกิดโครงสร้างรูพรุน โดยการทำให้เกิดการแตกตัวของสารที่ไม่ใช่คาร์บอน (เช่น ออกซิเจน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน) ออกมาในรูปของก๊าซคาร์บอนอิสระ โดยทั่วไปทำในสภาพอัดอากาศ ที่อุณหภูมิ 200 ถึง 500 องศาเซลเซียส ถ่านที่ได้ควรมีสีดำตลอด เมื่อหักดูส่วนที่หักดูจะมีผิวที่เป็นมันเงา ปลายที่หักจะแหลมคม และปราศจากผงฝุ่นและขี้เถ้า แต่ยังสามารถในการดูดซับดี เนื่องจากโพรงภายในคาร์บอนยังมีทาร์ (Tar) อุดตันอยู่ ดังนั้นจึงต้องผ่านกระบวนการออกซิไดส์ เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวและไล่ทาร์ออกจากโพรงของคาร์บอนต่อไป

2.2.2 กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation process) โดยใช้ก๊าซซึ่งมีสมบัติในการออกซิไดส์ที่อุณหภูมิสูง โดยก๊าซส่วนใหญ่ที่ใช้ ได้แก่ ไอน้ำ อากาศ และคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งสามารถใช้ผสมกันก็ได้ สำหรับความสามารถในการดูดซับหรือความจุของการดูดซับของคาร์บอนที่ได้ขึ้นอยู่กับปัจจัยของกระบวนการกระตุ้น ดังนี้

ก. คุณสมบัติทางเคมีและความเข้มข้นของสารออกซิไดส์

ข. อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการกระตุ้น

ค. ระยะเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น

ง. ปริมาณและชนิดของธาตุที่เป็นส่วนประกอบของถ่าน

ทั้งนี้ความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ธรรมชาติทางเคมี ความเข้มข้นของก๊าซที่ออกซิไดส์ อุณหภูมิในปฏิกิริยา ปริมาณของสิ่งเจือปนที่ถูกกำจัดออกระหว่างการเผา เป็นต้น

2.3 กระบวนการกระตุ้น (Activation process)

การกระตุ้นมี 2 วิธี คือ วิธีทางกายภาพ (Physical activation) โดยใช้ไอน้ำหรือก๊าซและวิธีทางเคมี (Chemical activation) โดยใช้สารเคมีทั้งนี้อาจใช้วิธีทางกายภาพและทางเคมีร่วมกันได้

2.3.1 การกระตุ้นทางกายภาพ เป็นการกระตุ้นด้วยการใช้แก๊สหรือไอน้ำ ซึ่งใช้อุณหภูมิในการเผากระตุ้นค่อนข้างสูงประมาณ 800-1,000 องศาเซลเซียส เพราะไอน้ำที่ใช้จะต้องเป็นไอน้ำที่ร้อนยิ่งยวด (Superheated steam) เพื่อให้ทำปฏิกิริยาอินทรีย์ต่างๆ สลายไป ทำให้โครงสร้างภายในมีลักษณะรูพรุนอยู่ทั่วไป ขนาดของรูพรุนที่ได้จะมีขนาดเล็กกว่าการกระตุ้นทางเคมี ซึ่งถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยวิธีทางกายภาพนี้จะมีข้อดี คือ สามารถนำไปใช้งานได้เลยทันที โดยไม่ต้องล้างสารที่เหลือตกค้าง

2.3.2 การกระตุ้นทางเคมี เป็นการกระตุ้นด้วยการใช้สารเคมี ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถแทรกซึมได้ทั่วถึง ทำให้ส่วนที่ไม่บริสุทธิ์ละลายหมดไปได้เร็วขึ้นจากนั้นนำไปเผาในถังที่มีออกซิเจนเป็นเวลาหลายชั่วโมง โดยใช้อุณหภูมิเผาประมาณ 600-700 องศาเซลเซียส การกระตุ้นทางเคมีนิยมใช้กับวัตถุดิบที่เป็นไม้ แต่มีข้อเสียตรงที่ต้องล้างสารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้น ซึ่งติดมากับถ่านกัมมันต์ออกให้หมดไม่ให้เหลือตกค้างอยู่เลย เพื่อความปลอดภัยในการนำไปใช้งาน ตัวอย่างสารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้น ได้แก่ กรดบอริก (H_3BO_3) โพตัสเซียมไธโอไซยาเนต ($K_2S_2O_3$) แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($CaOH$) แมงกานีสซัลเฟต ($MnSO_4$) โซเดียมไซยาไนด์ (CN) และโซเดียมคลอไรด์ ($NaCl$) เป็นต้น

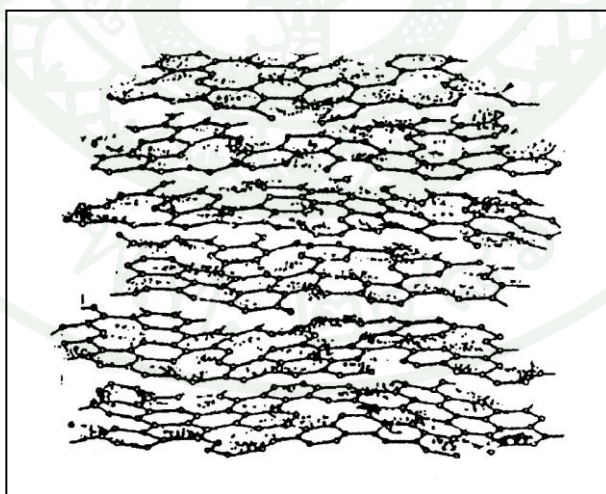
2.4 รูปแบบของถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในกระบวนการดูดซับ

2.4.1 ถ่านกัมมันต์แบบผง (Powder Activated Carbon: PAC) มีขนาดประมาณ 10-50 ไมโครเมตรหรือน้อยกว่า เหมาะสำหรับฟอกสีในของเหลว ดูดกลิ่นและแต่งรสของสารละลาย การดูดติดเกิดได้เร็ว เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสูง แต่การนำกลับมาใช้ใหม่ (Regenerate) มีราคาสูงและไม่คุ้มค่า จึงมักใช้แล้วทิ้ง

2.4.2 ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด (Granular Activated Carbon: GAC) มีขนาดใกล้เคียงกับเม็ดทรายกรองน้ำ แต่เปราะและเบากว่าทราย เหมาะใช้สำหรับทำให้ก๊าซบริสุทธิ์ หรือทำให้ตัวทำละลายที่ใช้แล้วบริสุทธิ์ สามารถนำไปรีเจนเนอเรตเพื่อนำกลับมาใช้ได้อีก (มันสิน, 2538)

2.5 โครงสร้างถ่านกัมมันต์

โครงสร้างของถ่านกัมมันต์จะมีโครงสร้างเป็นผลึกที่เล็กมาก (Microcrystallites) ประกอบด้วยวงแหวนเหลี่ยมด้านเท่าของอะตอมคาร์บอนผสมกัน เส้นผ่านศูนย์กลางของชั้นคาร์บอนที่สร้างผลึกเล็กๆ มีขนาดประมาณ 150 °Å และระยะทางระหว่างผลึกเล็กๆ นี้มีค่าอยู่ระหว่าง 20-50 แองสตรอม ดังแสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์

ที่มา: Faust and Aly (1987)

ดังที่กล่าวมาถ่านกัมมันต์ที่ทำจากวัสดุและการกระตุ้นที่ต่างกันย่อมมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน ที่เห็นได้ชัดคือ พื้นที่ผิวและความพรุน

2.5.1 พื้นที่ผิว (Surface area) ปกติพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ทั่วไปจะอยู่ระหว่าง 500-2,000 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งโดยทั่วไปที่พบจะมีค่าประมาณ 1,000 ตารางเมตรต่อกรัม ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์แต่ละชนิด

Carbon	Source	Surface Area (ตร.ม./ก.)
PCC SGL	Bituminous coal	1,000 – 1,200
PCC RB	Bituminous coal	1,200 – 1,400
PCC GW	Bituminous coal	800 – 1,000
Columbia CXA/SXA	Coconut shell	1,100 – 1,300
Columbia AC	Coconut shell	1,200 – 1,400
Columbia G	Coconut shell	1,100 – 1,150
Dacro S 51	Lignite	500 – 550
Dacro G 60	Lignite	750 – 800
Darco KB	Wood	950 – 1,000
Hydro Dacro	Lignite	500 – 600
Nuchar Aqua	Pulp mill residue	550 – 650
Nucha C	Pulp mill residue	1,050 – 1,100
Norit (various)	Wood	700 – 1,400

ที่มา: Faust and Aly (1987)

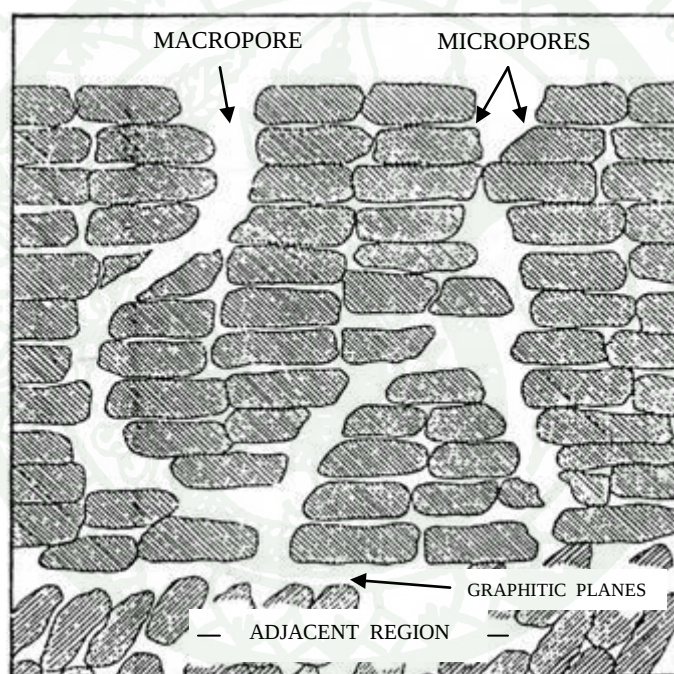
2.5.2 ความพรุน (Porosity) ปกติถ่านกัมมันต์ทั่วไปมีปริมาณความพรุนระหว่าง 0.5-1.5 มิลลิเมตรต่อกรัม โดยแบ่งได้เป็น 3 ขนาด คือ

1) แมโครพอร์ (Macropores) ขนาดของรูที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 50 nm อันมีผลโดยตรงต่อความสามารถในการดูดซับโมเลกุลใหญ่

2) ทรานซิชันนัลพอร์ (Transitionalpores) ขนาดของรูพรุนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 2-50 nm มีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งในการส่งผ่านสารที่ถูกดูดซับไปยังรูพรุนเล็ก

3) ไมโครพอร์ (Micropores) ขนาดของรูพรุนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 2 nm มีความสำคัญต่อการเพิ่มปริมาณพื้นที่ของการดูดซับ และมีผลต่อการดูดซับโมเลกุลเล็ก

รูพรุนในถ่านกัมมันต์ที่ได้กล่าวมาข้างต้นแมโครพอร์จะเป็นรอยแตกที่ผิวของคาร์บอน ทรานซิชันนัลพอร์จะแตกสาขาออกมาจากแมโครพอร์ และไมโครพอร์ก็จะแตกสาขาออกมาจากทรานซิชันนัลพอร์ ดังแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ลักษณะรูพรุนในถ่านกัมมันต์

ที่มา: Faust and Aly (1987)

คาร์บอนที่ทำจากถ่านหินจะมีพื้นที่ผิวสำหรับการดูดซับส่วนใหญ่ คือ ไมโครพอร์ ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 60-100 แองสตรอม ในขณะที่คาร์บอนที่ทำจากถ่านหินลิกไนต์และไม้มีพื้นที่ผิวสำหรับการดูดซับส่วนใหญ่ คือ ทรานซิชันนัลพอร์ ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 100-2,000 แองสตรอม (Huang and Gerrett, 1977) ในการดูดซับจาก

ของเหลวของถ่านกัมมันต์ ทรานซิสชันนัลพอร์เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการขนส่งโมเลกุลสารถูกดูดซับไปยังไมโครพอร์ (Bell and Molof, 1975)

2.6 คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์

โดยทั่วไปคุณสมบัติที่ใช้พิจารณาเลือกใช้งานถ่านกัมมันต์ ได้แก่ คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี โดยคุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญบางประการของถ่านกัมมันต์ดังแสดงในตารางที่ 5 และคุณสมบัติทางเคมี ที่ทำให้ถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับสารแต่ละชนิดแตกต่างกันออกไป ได้แก่ กลุ่มฟังก์ชันบนพื้นผิวถ่าน ซึ่งประกอบด้วยกลุ่ม Carboxyl, Phenolic Hydroxyl, Quinone Type Carbonyl, Normal Lactones, Fluorescein Type Lactones, Carboxylic Acid Anhydrides และ Cyclic Peroxide

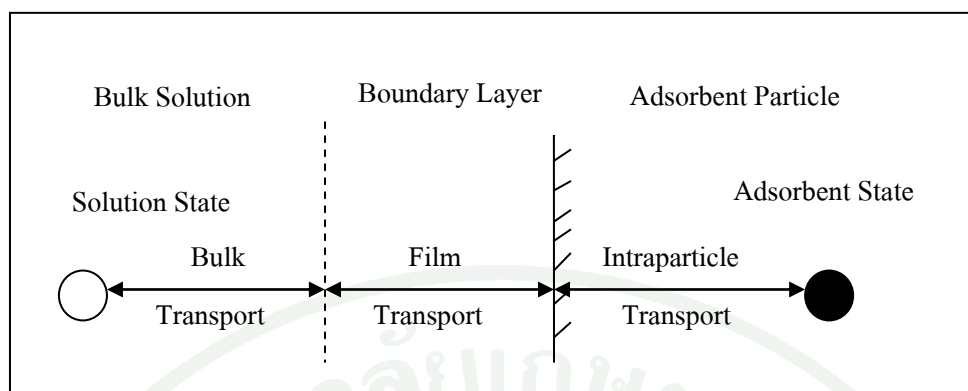
3. ทฤษฎีการดูดซับด้วยผงถ่าน (Carbon adsorption)

การดูดซับเป็นวิธีฟิสิกส์เคมี เพื่อเคลื่อนย้ายสาร จากก๊าซหรือของเหลวมายังของแข็งหรือของเหลว การดูดซับเกิดขึ้นเป็น 3 ระยะ ดังนี้ (Metcalf and Eddy, 1972)

ระยะที่ 1 โมเลกุลของตัวถูกละลายในของเหลวจะเคลื่อนที่ไปที่ผิวหน้าของชั้นฟิล์มของเหลวบางๆ ที่ห่อหุ้มสารดูดซับ ขั้นตอนนี้เกิดขึ้นเร็วที่สุด

ระยะที่ 2 โมเลกุลของตัวถูกละลายแทรกเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดซับ โดยการแพร่ผ่านแผ่นฟิล์ม (Film diffusion) โดยขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่ส่งผลต่ออัตราการดูดซับด้วย

ระยะที่ 3 เป็นการแพร่ของโมเลกุลตัวถูกละลาย เข้าสู่รูพรุนหรือโพรงของสารดูดซับ (Pore diffusion) และเกิดการดูดซับภายใน โดยขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนจำกัดต่ออัตราการเกิดการดูดซับเช่นกัน โดยขั้นตอนการดูดซับ ดังแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ

ที่มา: นิพนธ์ และคณิดา (2550)

3.1 รูปแบบของการดูดซับ

3.1.1 การดูดซับทางกายภาพ

การดูดซับทางกายภาพ เป็นผลมาจากปฏิกิริยาของแรงแวนเดอร์วาลส์ ซึ่งเกิดจากการรวมกันของแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิตย (Electrostatic force) โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะถูกยึดติดแบบกายภาพกับโมเลกุลของตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเกาะอยู่บนผิวตัวดูดซับในลักษณะที่ซ้อนกันเป็นหลายชั้น (Multilayered) โดยแต่ละชั้นของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะถูกดูดซับบนชั้นโมเลกุลที่ถูกจับก่อนหน้านี้ และจำนวนชั้นของโมเลกุลตัวถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับเพิ่มขึ้น แรงยึดเหนี่ยวระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับ และระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวถูกดูดซับด้วยในระหว่างชั้น อาจเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์อย่างใดอย่างหนึ่ง การดูดซับทางกายภาพโดยทั่วไปจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำทำให้พลังงานของระบบลดลงเป็นการทำให้ระบบมีความเสถียรมากขึ้น

3.1.2 การดูดซับทางเคมี

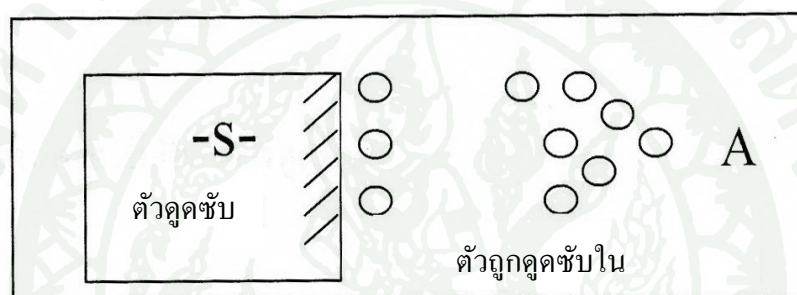
เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ เกิดเป็นสารประกอบเคมีซึ่งแตกต่างจากการดูดซับทางกายภาพ กระบวนการนี้มีความหนาของโมเลกุลเพียงชั้นเดียว

(Monolayered) และไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับเองได้ (Irreversible) ส่วนการดูดซับทางกายภาพที่สามารถผันกลับเองได้ (Reversible) เนื่องจากมีการจับตัวทางเคมีสร้างสารประกอบใหม่ที่ผิวของตัวดูดซับ การดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมีจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูงมากกว่าอุณหภูมิต่ำ ความแข็งแรงของแรงดึงดูดสามารถวัดได้จากผลต่างจากความร้อนที่เกิดขึ้น จากการดูดซับทางกายภาพจะให้พลังงานต่ำโดยทั่วไปประมาณ 2-10 กิโลแคลอรีต่อโมล ส่วนการดูดซับทางเคมีจะให้พลังงานสูงโดยประมาณ 15-50 กิโลแคลอรีต่อโมล และยังพบว่าค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของกระบวนการดูดซับทางเคมีมีค่ามากกว่าทางกายภาพ ด้วยเหตุผลนี้กระบวนการดูดซับทางกายภาพจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าทางเคมีสารที่มีความสามารถในการดูดซับมีหลายชนิด อาจแบ่งได้เป็น 5 ประเภท

- 1) ประเภทสารอนินทรีย์ เช่น ดินเหนียวชนิดต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์ และแอคติเวตเตดซิลิกา (Zeolite) สารธรรมชาติมักมีพื้นที่ผิวประมาณ 50-200 ตารางเมตรต่อกรัม แต่สารสังเคราะห์อาจจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก อย่างไรก็ตามมีข้อเสีย คือจับโมเลกุลหรือคอลลอยด์ได้เพียงไม่กี่ชนิด ทำให้การใช้ประโยชน์จากสารดูดซับประเภทสารอนินทรีย์มีขีดจำกัดมาก
- 2) ถ่านกัมมันต์เป็นสารดูดซับที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 600-1,000 ตารางเมตรต่อกรัม
- 3) สารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ สารแลกเปลี่ยนไอออน (เรซิน, Resin) ชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ สารเรซินเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300-500 ตารางเมตรต่อกรัม
- 4) วัสดุชีวภาพ (Biomaterials) ส่วนใหญ่เป็นวัสดุเหลือใช้ทางด้านการเกษตร เช่น จีเลอเย โคลโตซาน กาแฟที่ใช้แล้ว ชา ชาเขียวที่ใช้แล้ว และถั่วเหลืองดำ เป็นต้น
- 5) สารดูดซับชีวภาพ (Biosorbent) ได้แก่ เซลล์จุลินทรีย์ เช่น เซลล์ของแบคทีเรีย ยีสต์ หรือราสายพันธุ์ต่างๆ และสาหร่าย

3.2 สมดุลการดูดซับ

เมื่อเติมตัวดูดซับปริมาณหนึ่งลงไปในสารละลายที่มีโมเลกุลตัวถูกดูดซับเข้มข้น C_0 ก่อนเริ่มต้นโมเลกุลตัวถูกดูดซับบางส่วนไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับ เมื่อเวลาผ่านไปจะมีจำนวนโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มมากขึ้น ในขณะเดียวกันโมเลกุลตัวถูกดูดซับบางส่วนที่เกาะติดกับพื้นผิวจะคายซับออกมา พบว่าอัตราการคายซับจะเกิดน้อยกว่าอัตราการดูดซับ เมื่อปล่อยให้กระบวนการดูดซับดำเนินไปจนกระทั่งอัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคาย ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุล ณ สภาวะสมดุลการดูดซับ จำนวนโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและจำนวนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่คายออกมามีปริมาณคงที่

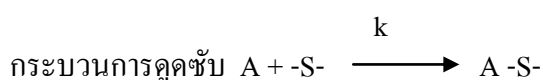


ภาพที่ 6 การเคลื่อนย้ายโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

จากภาพที่ 6 ให้ A เป็นโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ มีความเข้มข้นเริ่มต้นเป็น C_0 (โมลต่อลิตร) ในสารละลาย -S- เป็นโมเลกุลของตัวดูดซับ

q เป็นสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ $(1-q)$ เป็นสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ไม่ถูกดูดซับ



r_1 แทนอัตราการดูดซับ ซึ่งจะแปรตามความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลายหรือความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายให้เท่ากับ C และยังแปรตามสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ไม่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

k_1 แทนค่าคงที่อัตราการดูดซับ

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



r_2 แทนอัตราการคาย ซึ่งจะแปรตามสัดส่วน โมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเท่านั้น

k_2 แทนค่าคงที่อัตราการคาย

$$r_2 = k_2(q)$$

ณ สภาวะสมดุล $r_1 = r_2$

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

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

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

เมื่อ K เป็นค่าคงที่สมดุลการดูดซับ



ณ สภาวะสมดุล

$$K = \frac{q}{c} \quad \text{----- (2)}$$

q = เป็นปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับต่อมวลตัวดูดซับ หน่วยเป็นปริมาณตัวถูกดูดซับต่อมวลตัวดูดซับ เช่น โมลต่อกิโลกรัม หรือโมลต่อกรัม

W = เป็นมวลของตัวดูดซับที่ใช้ หน่วยเป็นน้ำหนัก เช่น กิโลกรัม

V = เป็นปริมาตรของสารละลายที่มีตัวดูดซับละลายอยู่ หน่วยเป็นลูกบาศก์เซนติเมตร

C = เป็นความเข้มข้นของตัวดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลาย หน่วยเป็นความเข้มข้น เช่น โมลต่อลิตร

ณ สภาวะสมดุลของการดูดซับ จะได้ว่า

(ปริมาณตัวดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับ) = (ปริมาณตัวดูดซับที่หลุดออกมาจากตัวดูดซับ)

$$qW = V(C_0 - C) \quad \text{----- (3)}$$

3.3 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

3.3.1 ธรรมชาติของตัวดูดซับ

พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุนของตัวดูดซับ พบว่า เป็นสัดส่วนโดยตรงกับรูพรุนเมื่อพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเพิ่มขึ้น ดังนั้นความสามารถในการดูดซับก็จะมากขึ้น การดูดซับจะเกิดได้ดีเมื่อโมเลกุลของตัวดูดซับมีขนาดเล็กกว่ารูพรุนเล็กน้อย หากรูพรุนมีมากแต่มีขนาดเล็กหรือรูพรุนมีขนาดใหญ่แต่ปากรูพรุนมีขนาดเล็กไม่มีผลทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่ม

3.3.2 ธรรมชาติของตัวถูกดูดซับ

ความสามารถในการละลายน้ำของโมเลกุลตัวถูกดูดซับมีผลต่อการดูดซับ พบว่า แนวโน้มของการดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับจะลดลงเมื่อ โมเลกุลตัวถูกดูดซับละลายน้ำได้ดี เพราะก่อนที่จะเกิดกระบวนการดูดซับจะต้องมีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับโมเลกุลของน้ำ เพื่อให้โมเลกุลตัวถูกดูดซับหลุดออกจากน้ำไปเกาะบนพื้นผิวของตัวดูดซับ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับขนาดใหญ่มีความสามารถในการละลายน้ำลดลง จึงมีแนวโน้มจะถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับมากขึ้น

3.3.3 อัตราเร่งการเขย่า

อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับกระบวนการขนส่งโมเลกุลของระบบ ประกอบด้วย การแพร่ผ่านฟิล์ม (Film diffusion) และการแพร่เข้าสู่โพรง (Pore diffusion) ซึ่งขึ้นกับการเขย่าของระบบ ถ้าการเขย่าต่ำฟิล์มน้ำซึ่งล้อมสารดูดซับจะมีความหนามาก และเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลตัวดูดซับเข้าไปหาตัวดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้าการเขย่าสูง ทำให้ความหนาของชั้นฟิล์มจะลดลง ทำให้โมเลกุลเคลื่อนที่เข้าหาสารดูดซับได้เร็ว

3.3.4 อุณหภูมิ

การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้การแพร่ผ่านของสารที่ถูกดูดซับลงไปยังรูพรุนของตัวดูดซับเร็วขึ้น แต่จะส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับลดลง

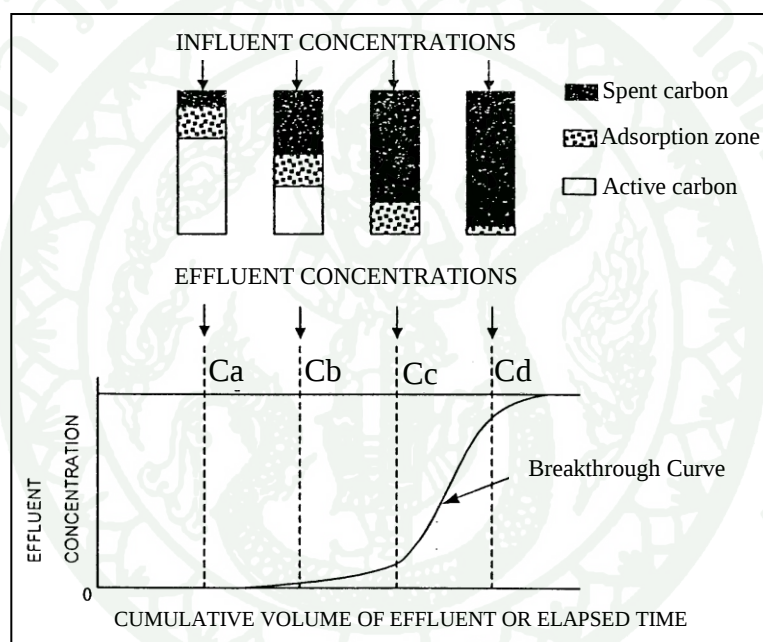
3.3.5 พีเอช

การดูดซับขึ้นกับสภาพความเป็นขั้วของพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ เมื่อสารละลายมีสภาพความเป็นกรด ส่งผลให้เกิดไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) บนพื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มขึ้น ทำให้กระบวนการดูดซับไอออนลบเกิดได้มากขึ้น และเมื่อสารละลายมีพีเอชเพิ่มขึ้นมีผลทำให้มี OH^- บนพื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มขึ้น และสามารถดูดซับไอออนบวกได้มากขึ้น แต่ถ้าสารละลายมีพีเอชสูงกว่า 9 จะทำให้โลหะไอออนตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์ และโลหะไอออนจะถูกดูดซับได้น้อยลง

3.4 การดูดติดผิวแบบคอลัมน์

การดูดติดผิวแบบคอลัมน์ที่มีการให้อัตราการไหลของของเหลวคงที่จะมีข้อดีอย่างเห็นได้ชัดกว่าใช้วิธีแบบแบตช์ (Batch method) เนื่องจากอัตราการดูดติดผิวขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลาย ซึ่งความเข้มข้นของตัวถูกละลายจะสัมพันธ์กับคาร์บอนในคอลัมน์อย่างต่อเนื่อง

การดูดซับแบบชั้นตรึง (Fixed bed) ระบบการดูดซับแบบนี้น้ำเสียไหลลงผ่านชั้นคาร์บอนที่อยู่กับที่ ไม่มีการเคลื่อนที่ขึ้นลง โดยลักษณะการดูดซับเริ่มเกิดขึ้นบริเวณส่วนบนของระบบ จากนั้นบริเวณการดูดซับจะค่อยๆ เคลื่อนลงเกิดขึ้นในส่วนล่างของชั้นจนกระทั่งหมดสภาพการดูดซับที่ส่วนล่างของชั้น ดังแสดงในภาพที่ 7 บริเวณที่การดูดซับเริ่มทำงานไม่ได้ประสิทธิภาพ (จุด C_c) เรียกว่า จุดเริ่มหมดสภาพ (Breakpoint) และหลังจากบริเวณนี้ต่อไปเป็นเส้นโค้งที่สูงขึ้นคือ การดูดซับจะค่อยๆ หมดสภาพจนไม่สามารถบำบัดน้ำเสียได้ เรียกเส้นโค้งนี้ว่า Breakthrough curve และเมื่อถึงจุด C_d จะเป็นจุดที่เรียกว่า จุดหมดสภาพ (Exhaustion point) (เกรียงศักดิ์, 2542)

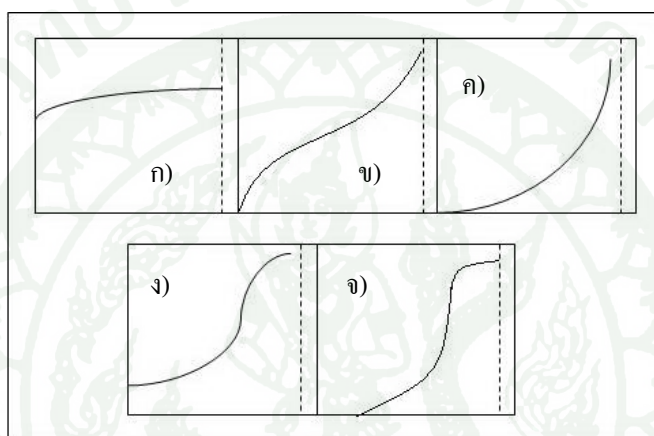


ภาพที่ 7 ลักษณะการดูดซับแบบต่อเนื่องในชั้นตรึง

ที่มา: Clark and Lykins (1989)

4. ไอโซเทอร์มของการดูดซับ

ไอโซเทอร์มของการดูดซับ เป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ (q) กับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลือน้อยอยู่ในสารละลาย (C) ที่สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิคงที่ รูปแผนภูมิเส้นที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า q ในแกนตั้ง และค่า C ในแกนนอนจะให้รูปแบบพื้นฐานของไอโซเทอร์มของการดูดซับ 5 แบบ ดังแสดงในภาพที่ 8



ภาพที่ 8 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบพื้นฐาน

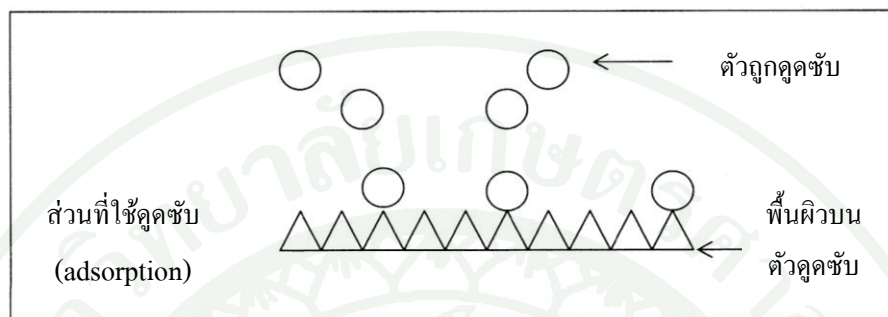
ที่มา: Maron and Prutton (1961)

จากภาพที่ 8 รูป (ก) จัดเป็นไอโซเทอร์มของการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นแบบชั้นเดียว ส่วนรูป (ข) ถึง (จ) เป็นไอโซเทอร์มของการดูดซับเป็นแบบหลายชั้น สมการไอโซเทอร์มของการดูดซับจะอาศัยแบบจำลองการดูดซับทางคณิตศาสตร์ในที่นี่จะกล่าวถึง 2 สมการที่นิยมใช้กัน ดังนี้

4.1 สมการการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm)

ได้มีข้อกำหนดว่าพื้นผิวบนตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมด (Monogeneous adsorption surface) มีกลไกของการดูดซับเหมือนกัน การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption) ตัวถูกดูดซับจะจัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวตัวดูดซับ ดังแสดงในภาพที่ 10 โดยที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับไม่เกิดการซ้อนทับกัน พื้นผิวบนตัวดูดซับจะมีจำนวน

จำกัด และเมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับไว้แล้วจะไม่มีการเคลื่อนที่ (เคลื่อนย้าย) หรือเปลี่ยนตำแหน่งกันกับตัวถูกดูดซับอื่นบนพื้นผิวตัวดูดซับ พื้นผิวตัวดูดซับจะถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้นจนมีตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว (ถูกดูดซับได้มากที่สุด) ดังแสดงในภาพที่ 9



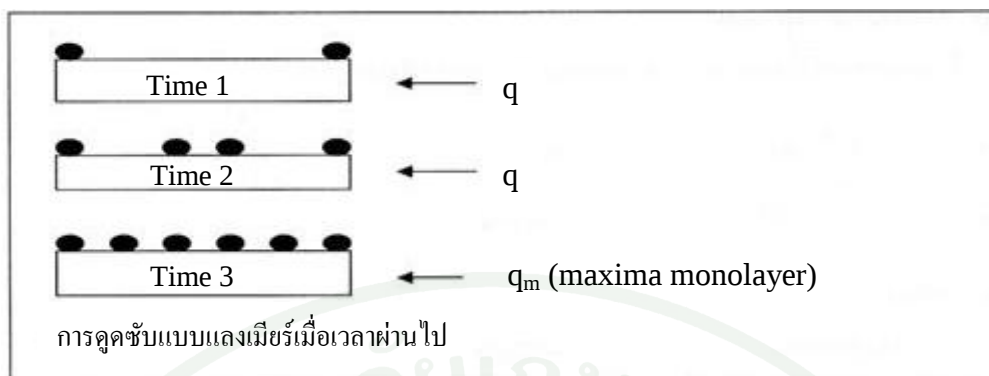
ภาพที่ 9 แบบจำลองพื้นผิวตัวดูดซับของสมการแลงเมียร์

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

จากความรู้เรื่องสมดุลการดูดซับ ถือว่าการดูดซับได้มากที่สุดเท่ากับหนึ่งรูปแบบของสมการแลงเมียร์

รูปแบบสมการของแลงเมียร์จะใช้

$$q = \frac{q_m KC}{1 + KC} \quad \text{----- (6)}$$



ภาพที่ 10 การดูดซับของแลงเมียร์เมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว

ที่มา: นิพนธ์ และคณิดา (2550)

เมื่อจัดรูปสมการที่ (6) ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง จะได้

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m} + \frac{1}{Kq_m C} \quad \text{----- (7)}$$

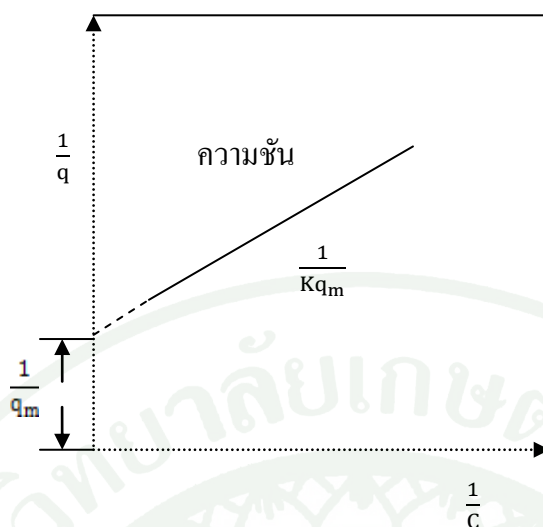
q = ปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ (ความสามารถการดูดซับ) (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_m = ความสามารถสูงสุดในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

K = ค่าคงที่การดูดซับ

C = ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{1}{q}$ และ $\frac{1}{C}$ จะได้สมการเส้นตรงมีค่าความชันเท่ากับ $\frac{1}{Kq_m}$ และจุดตัดเท่ากับ $\frac{1}{q_m}$ ดังแสดงในภาพที่ 11



ภาพที่ 11 กราฟแสดงความชื้นระหว่าง $1/q$ และ $1/C$

ที่มา: นิพนธ์ และคณิดา (2550)

4.2 สมการการดูดซับของฟรอนด์ลิช (Freundlich adsorption isotherm)

คือ ไอโซเทอร์มของการดูดซับภายใต้สมมติฐานที่ว่าพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous adsorption surface พื้นผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด) มีรูปแบบของสมการเป็นดังนี้

$$q = KC^{1/n} \quad \text{----- (8)}$$

K และ n เป็นค่าคงที่ของฟรอนด์ลิช (Freundlich constant) ของแต่ละระบบที่กำลังศึกษาหรือทดลอง และ n ใช้อธิบายลักษณะไอโซเทอร์มของการดูดซับ โดยทั่วไป n จะมีค่ามากกว่าหนึ่ง

เมื่อจัดรูปสมการที่ (4) ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง โดยใส่ลอการิทึมทั้งสองข้างของสมการจะได้

$$\log q = \log K + \frac{1}{n} \log C \quad \text{----- (9)}$$

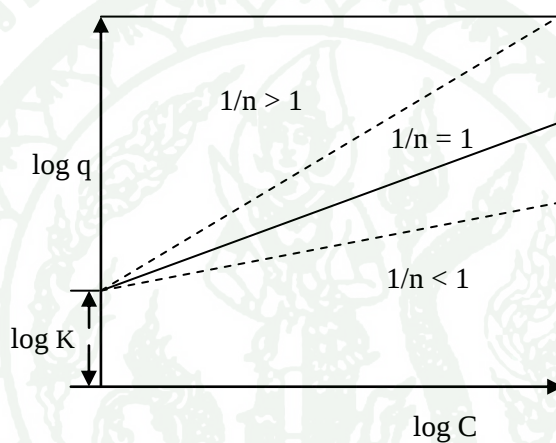
q = ปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ (ความสามารถการดูดซับ) (โมลต่อลิตร)

K = ค่าคงที่การดูดซับ

$\frac{1}{n}$ = ความชันของกราฟ

C = ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (โมลต่อลิตร)

เมื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q$ กับ $\log C$ จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชัน เท่ากับ $\frac{1}{n}$ และมีจุดตัดเท่ากับ $\log K$ ดังแสดงในภาพที่ 12



ภาพที่ 12 กราฟความชันระหว่าง $\log q$ และ $\log C$

ที่มา: นิพนธ์ และคณิดา (2550)

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

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

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

เมื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า q และ C จากสมการที่ (2) จะไม่สามารถบอกถึงปริมาณของตัวถูกดูดซับถูกดูดซับได้มากที่สุด (Adsorption maxima) เนื่องจากตัวถูกดูดซับสามารถจะเกิดการช้อนทับกันได้

6. วิธีการหาพื้นผิวการตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM)

6.1 นิยาม RSM เป็นการแสดงหรือตัวแทนทางเรขาคณิตที่ได้รับเมื่อผลตอบสนองของตัวแปร (Response) ถูกพล็อตเป็นฟังก์ชันของตัวแปรเหล่านั้น

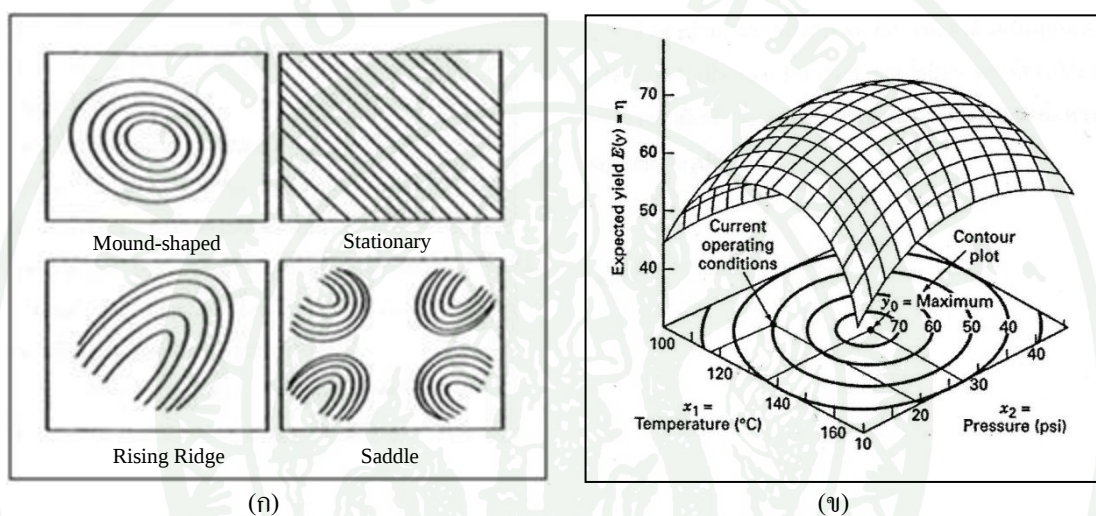
เนื่องจากปัจจัยที่มีผลต่อการลดความเข้มข้นของถ่านกัมมันต์ เกี่ยวข้องกับสภาวะที่เหมาะสมต่างๆ เช่น ความเข้มข้นของสีย้อม พีเอชในสารละลายสีย้อม ระยะเวลาในการปั่นกววน ปริมาณถ่าน และความเร็วรอบในการเขย่า ดังนั้นเพื่อเป็นการบ่งบอกถึงความสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัยที่มีผลต่อการลดความเข้มข้นของสีย้อม จึงนำเอาวิธีทางสถิติมาใช้ในการวางแผนการทดลอง และวิเคราะห์ข้อมูล

การหาพื้นผิวการตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) เป็นเทคนิคทางสถิติอย่างหนึ่งที่ใช้แผนภาพคอนทัวร์ (Contour plot) ในการตรวจสอบความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ที่เป็นที่น่าสนใจของนักวิจัย ผลที่ตามมาคือนักวิจัยสามารถที่จะหาสูตรหรือสภาวะที่เหมาะสม (Optimization) จากความสัมพันธ์เหล่านั้นได้เมื่อพิจารณาปัจจัยที่น่าสนใจเหล่านั้นพร้อมๆ กัน โดยความรู้พื้นฐานที่ต้องใช้ คือ การวางแผนการทดลอง (Experimental design) การวิเคราะห์สมการถดถอย (Regression analysis) และความรู้ในการใช้โปรแกรมที่สร้างแผนภาพคอนทัวร์

ความสัมพันธ์หรือฟังก์ชันของตัวแปรมักใช้สมการลำดับที่หนึ่ง (First order) หรือสมการลำดับที่สอง (Second order) หรือแบบจำลองพหุนาม (Polynomial model) เป็นตัวอธิบายวิธีการทางสถิติที่ใช้จะใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (The least square method) เพื่อประมาณค่าของพารามิเตอร์ต่างๆ ฟังก์ชันที่ใช้เรียกว่า ฟังก์ชันของการตอบสนองที่เหมาะสม (Fitted response function) (อนุวัตร, 2549)

6.2 แผนภาพคอนทัวร์ (Contour plot)

แผนภาพคอนทัวร์เป็นอนุกรม (Series) ของเส้น หรือกราฟซึ่งมีค่าที่แน่นอนและคงที่ สอดคล้องกับระดับของปัจจัยที่เปลี่ยนไป แผนภาพคอนทัวร์มีหลายแบบสอดคล้องกับสมการ ถอดอยที่ตรวจสอบได้ เช่น Mound-shaped, Stationary ridge, Rising ridge และ Saddle ดังแสดงใน ภาพที่ 13 (ก) โดยแผนภาพคอนทัวร์ที่สร้างเป็นแผนภาพ 3 มิติ เรียกว่า แผนภาพพื้นผิว (Surface plot) ดังแสดงในภาพที่ 13 (ข) (อนุวัตร, 2549)



ภาพที่ 13 (ก) ลักษณะของแผนภาพคอนทัวร์ชนิดต่างๆ และ (ข) แผนภาพพื้นผิว

ที่มา: อนุวัตร (2549) และ Montgomery (2005)

6.3 การออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design, CCD)

ชนิดของการออกแบบที่นิยมนำมาใช้สำหรับการประมาณสัมประสิทธิ์ในสมการลำดับที่สอง โดยมีรูปแบบดังสมการที่ 10 จัดอยู่ในประเภทของ Composite design ซึ่ง Central composite ก็เป็น Composite design แบบหนึ่ง (Cornell, 1990)

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad \text{----- (10)}$$

Y = ตัวแปรตอบสนอง (Dependent variable)

X = ตัวแปรอิสระ

β = สัมประสิทธิ์

Box and Wilson (1951) ได้เสนอการออกแบบนี้ไว้เป็นครั้งแรกและประกอบด้วยจุดของการทดลอง 3 จุด

จุดที่ 1 คือ ที่ตั้งอยู่บนเส้นที่มารวมกันของ Square, Cube หรือ Hypercube รหัสของระดับ (Coded variable) สำหรับจุดเหล่านี้จะเป็น ± 1

จุดที่ 2 คือ จุด Star point มีจำนวนเท่ากับ $2k$ โดยแต่ละจุดจะอยู่ห่างจาก Center points ด้วยระยะที่เท่ากันคือ α โดย $\alpha = \sqrt[4]{2^k}$ จึงเป็นการทดลองที่อยู่ในกลุ่มการทดลองแบบ Rotation design การทดลองสำหรับ Star points เขียนเป็นสัญลักษณ์ได้ดังนี้ $(\pm\alpha, 0, \dots, 0), (0, \pm\alpha, \dots, 0), \dots, (0, 0, \dots, 0, \pm\alpha)$

จุดที่ 3 คือ จุดซ้ำที่กึ่งกลางของการออกแบบกับจุดที่คู่กัน (Coordinate) $(0, 0, \dots, 0)$ จะต้องมีการซ้ำมากกว่า 1 ครั้ง เพื่อทำการคำนวณหาค่า Pure error ในการวิเคราะห์การทดสอบการขาดความพอดี

จุดมุ่งหมายของ RSM คือความเหมาะสมและจุดที่เหมาะสมซึ่งยังไม่เป็นที่ทราบกันมาก่อนทำการทดลอง จึงเป็นเหตุผลที่จะนำมาใช้ในการออกแบบเพื่อให้เกิดความถูกต้องในการประมาณโดยทางตรงทั้งหมด (Montgomery, 1991)

6.4 การเลือกแบบจำลอง (Model selection)

ในการสร้างแบบจำลองสำหรับ RSM นั้นมีหลายเทคนิคในการสร้างและคัดเลือกแบบจำลอง (Model) ที่ดีที่สุด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ การวางแผนตั้งแต่เริ่มต้น ในกรณีที่มีแผนการทดลอง การวิเคราะห์ความแปรปรวนจะเป็นวิธีที่ดีที่สุดใน การทดสอบความเหมาะสมของแบบจำลอง อย่างไรก็ตาม บางการทดลองที่ไม่มีการวางแผนล่วงหน้าว่าจะเลือกแบบจำลองใด อาจดำเนินการดังนี้

1) วิธีการแบบจำลองเต็มรูป (Full model technique) วิธีการนี้จะระบุแบบจำลองที่ต้องการใช้ เช่น แบบจำลองอันดับหนึ่ง (First order model) หรืออันดับสอง หลังจากนั้นจึงใช้การวิเคราะห์สมการถดถอยเพื่อประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรทุกตัวในแบบจำลอง และประเมินว่าแบบข้อมูลเหมาะสมกับแบบจำลองที่เลือกไว้หรือไม่

2) วิธีการแบบจำลองลดรูป (Reduced model technique) วิธีการนี้จะแสดงแบบจำลองแบบลดรูป (Reduced model) โดยจะเลือกตัวแปรที่มีนัยสำคัญในแบบจำลองมาใช้สร้างแผนภาพคอนทัวร์ หรือแผนภาพพื้นผิว เทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์สมการถดถอยในโปรแกรม SPSS ในที่นี้จะเลือกใช้วิธี Remove elimination หรือ Backward elimination

- Remove elimination ทำได้โดยการเลือกตัวแปรอิสระทั้งหมดเข้าไปในสมการในขั้นตอนเดียว และนำตัวแปรที่มีค่านัยสำคัญ (Significant) น้อยที่สุดออกทีละตัว พร้อมกับวิเคราะห์สมการทั้งหมดอีกครั้ง (อนุวัตร, 2549)

6.5 การทดสอบการขาดความเหมาะสมของสมการ (Lack-of-fit Test; LOF)

การทดสอบความเหมาะสมของสมการจะขึ้นเฉพาะกรณีที่มีการเก็บข้อมูลค่า X ซ้ำ แต่ผลลัพธ์ของค่า y ที่ได้ต่างกัน มักจะเป็นข้อมูลที่ได้จากการออกแบบการทดลอง เนื่องจากต้องทำการเก็บค่าซ้ำ (ทำการทดลองซ้ำ) โดยการทดสอบ LOF นี้ จะทำการทดลองโดยใช้ตัวสถิติ F ซึ่งได้จากการแบ่งค่า SSE (ค่าผลบวกกำลังสองผิดพลาด) ออกเป็นส่วนย่อยสองส่วน ได้แก่ SS_{LOF} และ SS_{PE} ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 วิธีการคำนวณเพื่อทดสอบ Lack-of-fit Test; LOF

แหล่งที่มา	df	SS	MS = SS/d.f.	F
Regression	P	SS_{Regr}	MS_{Regr}	$F_1 = MS_{\text{Regr}} / MSE$
Error	n - p	SSE	$MSE = S^2$	
LOF	(Subtraction)	SS_{LOF}	MS_{LOF}	$F_2 = MS_{\text{LOF}} / MS_{\text{PE}}$
Pure error	$\sum(n_i - 1)$	SS_{PE}	MS_{PE}	
Total	n - 1	$SST = S_{yy}$		

จากตารางที่ 5 สามารถทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับการตามลำดับได้ดังนี้ คือ

(1) H_0 : สมการถดถอยไม่สามารถสร้างได้ (Model does not exist)

H_1 : สมการถดถอยสร้างได้ (Model exists)

ตัวสถิติคือ $F_1 = MS_{\text{Regr}} / MSE$; $v = (p, n - p)$

จะทำการปฏิเสธ H_0 เมื่อ $F_1 > F_{\alpha, (p, n - p)}$

(2) จะทดสอบ LOF ซึ่งจะทำการทดสอบเมื่อสมมติฐานข้างต้น ได้รับการปฏิเสธนั้น คือสมการถดถอยสามารถสร้างได้ หรือมีสมการโดยจะทำการทดสอบ

H_0 : สมการเหมาะสมแล้ว (There's no LOF)

H_1 : สมการขาดความเหมาะสม (There's LOF)

ตัวสถิติคือ $F_2 = MS_{\text{LOF}} / MS_{\text{PE}}$; $v = (v_{\text{LOF}}, v_{\text{PE}})$

จะทำการปฏิเสธ H_0 เมื่อ $F_2 > F_{\alpha, (v_{\text{LOF}}, v_{\text{PE}})}$ หรือกล่าวได้ว่า สมการมีความเหมาะสม (ประไพศรี และพงษ์ชนัน, 2551)

6.6 การทดสอบนัยสำคัญของโมเดลที่เหมาะสม

ผลการวิเคราะห์ของกลุ่มข้อมูลที่ได้จากการทดลองสามารถที่จะทำเป็นตารางและอ้างไปถึงตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) ซึ่งแสดงถึงสาเหตุของความแปรปรวนทั้งหมดในค่าของข้อมูล

ค่า R^2 จะวัดสัดส่วนความแปรปรวนทั้งหมดของค่าเฉลี่ย Y ที่อธิบายโดยสมการ Regression ที่เหมาะสม บ่อยครั้งที่แสดงออกมาเป็นร้อยละ โดยการคูณอัตราส่วนของ SSR/SST ด้วย 100 ไม่เหมาะสมที่จะใช้ R^2 เป็นเกณฑ์ในการประมาณจำนวนพารามิเตอร์ในโมเดลที่มีจำนวนของค่าสังเกตในกลุ่มของข้อมูลที่มีลักษณะใกล้เคียง (เมื่อค่าสังเกตไม่ซ้ำกัน) ค่าของ R^2 มีลักษณะใกล้เคียงอย่างหนึ่งเสมอ ถ้าหากว่าโมเดลไม่เหมาะสม ค่า R^2 ที่ใกล้เคียงกันมีความกลมกลืนกันทำให้โมเดลที่สร้างขึ้นเหมาะกับข้อมูลจริงมากขึ้น ค่า R^2 ที่น้อยลงทำให้ Independent variable ในโมเดลที่อธิบายพฤติกรรมของความแปรปรวนมีอิทธิพลน้อยลง (Cornell, 1990) โดยทั่วไปค่า R^2 ที่ใช้ในการทดสอบความแปรปรวนสมการที่ใช้ในการทำนายร้อยละการดูดซับไม่ควรต่ำกว่า 0.75 (Silva *et al*, 2004)

7. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี ค.ศ. 2004 Gan และคณะ ได้ศึกษากระบวนการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟจาก น้ำเสีย MDF ด้วยถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อย พบว่าความเข้มข้นของน้ำเสียที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 60 กรัมต่อลูกบาศก์ เดซิเมตร และพีเอชเท่ากับ 6.5

ในปี ค.ศ. 2005 Mohanty และคณะ ได้ศึกษากระบวนการดูดซับสารละลายฟีนอลจาก ถ่านกัมมันต์จากไม้สักขนาด 500 ไมครอน โดยการกระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ พบว่า สารละลายฟีนอลถูกดูดซับได้ดีที่สุดที่เวลา 350 นาที โดยดูดซับได้มากที่สุด 80 % และพีเอช ที่เหมาะสมที่สุดในการดูดซับสารละลายฟีนอลเท่ากับ 4 และปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสมที่สุดเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

ในปี ค.ศ. 2005 Ismadji ได้ทำการศึกษาการผลิตถ่านหินจากกระบวนการสลายตัวด้วยความร้อนแบบสูญญากาศ โดยใช้ขี้เลื่อยจากต้นสักเป็นตัวแปรในการศึกษาพบว่า กระบวนการที่เหมาะสมที่สุดที่สามารถทำให้ถ่านมีพื้นที่ผิวหรือรูพรุนมากคือ การเผาไหม้ด้วยอุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ใช้เวลาประมาณ 5 ชั่วโมง ซึ่งจะทำให้ถ่านมีพื้นที่ผิว 1,100 ตารางเมตรต่อกรัม

ในปี ค.ศ. 2005 Ravikumar และคณะ ได้ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ สีย้อมรีแอคทีฟด้วยตัวดูดซับที่มีส่วนผสมระหว่างคาร์บอนและเถ้าลอย (Novel adsorbent) ในสัดส่วน 1:1 โดยวิธี RSM พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดสีสูงถึง 100 % สภาวะที่เหมาะสมคือพีเอช 10.8 ระยะเวลาในการเขย่า 395 นาที อุณหภูมิ 59.25 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาคตัวดูดซับ 0.025 มิลลิเมตร

ในปี ค.ศ. 2005 Santhy ได้ศึกษาการกำจัดสีย้อมออกจากน้ำเสียโดยใช้ถ่านจากาบมะพร้าว พบว่า ระยะเวลาในการสัมผัสที่สามารถกำจัดสีย้อมออกจากน้ำเสียได้ดีที่สุดคือ 4 ชั่วโมง และจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาแต่จะไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก โดยการทดลองทำการวัดการกำจัดสีย้อมโดยใช้ค่าที่ดีที่สุดคือ 90 % และพีเอชที่ดีที่สุดคือ 1 โดยปริมาณคาร์บอนที่เหมาะสมที่สุดในการทำการทดลองคือ 4 กรัมต่อลิตร

ในปี ค.ศ. 2006 Amin ได้ศึกษา การกำจัดสีย้อมจากสารละลายโดยการดูดซับของถ่านที่ทำจากชานอ้อย พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมจะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงชัดเจนที่สุดโดยใช้ปริมาณตัวดูดซับที่ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และสามารถดูดซับได้มากขึ้นที่ปริมาณตัวดูดซับมากขึ้น แต่ไม่แตกต่างจากค่าเริ่มต้นมากนัก โดยทำการทดลองที่ระยะเวลาสัมผัส 2 ชั่วโมง

ในปี ค.ศ. 2006 Yahya ได้ทำการศึกษาผลกระทบของสารละลาย พีเอช ความเข้มข้นของไอออน และอุณหภูมิบนพฤติกรรมในการดูดซับของปฏิกิริยาสีย้อมบนถ่านกัมมันต์ พบว่า พีเอชที่เหมาะสมที่สุดในการทำการทดลองคือ 9 ซึ่งจะมีผลกระทบน้อยที่สุด หมายถึงการส่งผลต่อค่าการผิดพลาดในการทดลอง และการดูดซับที่อุณหภูมิ 328 องศาเคลวิน มีประสิทธิภาพมากที่สุด

ในปี ค.ศ. 2007 Leechart และคณะ ได้ทำการศึกษาการประยุกต์ใช้ถ่านจากจีเลื้อยในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟที่มีโครงสร้างแบบเอโซ พบว่า ระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมที่สุดคือ 24 ชั่วโมง ความเร็วรอบที่ใช้คือ 150 รอบต่อนาที และความเข้มข้นสารละลายสีย้อมที่ใช้ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร

ในปี ค.ศ. 2009 Ip และคณะ ได้ศึกษาการดูดซับและการไม่ดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟโดยอาศัยความแตกต่างของความยาวคลื่น ปัจจัยที่ศึกษาคือ เกลือ เคมีพื้นผิว ขนาดรูพรุน และพื้นที่ผิว พบว่าความเข้มข้นสีย้อมที่เหมาะสมในการดูดซับเท่ากับ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

ในปี ค.ศ. 2009 Ponnusami และคณะ ได้ศึกษาการนำไบโอมัสแบบผงมาดูดซับสีย้อมออกจากสารสังเคราะห์และน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยใช้ผงไบโอมัสขนาด 125 ไมครอน ขนาดความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที และพีเอชเท่ากับ 7

ในปี ค.ศ. 2009 Vijayaraghavan และคณะ ได้ทำการศึกษาการบำบัดสีย้อมรีแอคทีฟโดยใช้ถ่านกัมมันต์จีเลื้อย และถ่านกัมมันต์จากถ่านหินเป็นตัวดูดซับ โดยใช้ความเข้มข้นสีย้อม 500 ± 2 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 10.7 ความเร็วรอบในการเขย่า 160 รอบต่อนาที ใช้เวลา 20 นาที

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. อุปกรณ์

1.1 เครื่อง Scanning electron microscope รุ่น JSM-5410 LV ณ ศูนย์เครื่องมือวิจัย
วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.2 เครื่อง Autosorb 1 ณ ฝ่ายนวัตกรรมวัสดุ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่ง
ประเทศไทย (วว.)

1.3 เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ รุ่น Jasco corporation V-530 UV/VIS

1.4 ตู้อบ

1.5 เครื่องเขย่าตะแกรงร่อนแยกขนาด รุ่น Retsch AS 200 control พร้อมตะแกรงร่อนแยก
ขนาดรุ่น Retsch ขนาด 20, 30 และ 40 เมช

1.6 เครื่องเขย่า (Shaker) รุ่น Platform Shaker innova 2100

1.7 เครื่องชั่งน้ำหนักชนิดละเอียด 4 ตำแหน่ง รุ่น METTLER AE 200

1.8 pH meter รุ่น Cyberscan 500

1.9 Hot plate stirrer รุ่น SCHOTT GERATE GMBH

1.10 กระดาษกรองเมมเบรน Whatman เบอร์ 1 และ 5

1.11 ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร

1.12 บิวเรตขนาด 50 มิลลิลิตร

1.13 เครื่องแก้วที่ล้างสะอาด

1.14 ชุดปรับอัตราการไหลพร้อมสายยาง

2. สารเคมี

2.1 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) (Sigma-Aldrich)

2.2 กรดไฮโดรคลอริก (HCl) (Fisher Scientific)

2.3 สีย้อมรีแอคทีฟ Remazol Brilliant Blue R (RBBR) (CI No. 61200) ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท DyStar Thai Ltd.

3. วัสดุดูดซับ

3.1 ถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่เร็ว 2 ชนิด คือ ไม้สน และไม้สัก

3.2 ถ่านกัมมันต์ชนิด No. 22875 จากบริษัท Sigma-Aldrich Chemie GmbH, CH-9741
Netherland

4. น้ำเสียจากบริษัท ชานีนา ฟาร์อีส จำกัด (พุทธมณฑลสาย 5)

ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียปริมาณ 40 ลิตร ที่ผ่านกระบวนการฟอกย้อมของบริษัท ชานีนา ฟาร์อีส จำกัด (พุทธมณฑลสาย 5) ก่อนที่จะปล่อยลงสู่ระบบน้ำเสีย

วิธีการ

1. การเตรียมถ่านกัมมันต์

นำถ่านกัมมันต์ที่ได้รับความอนุเคราะห์จากกรมป่าไม้ 2 ชนิดคือ ถ่านกัมมันต์จากไม้สน และไม้สัก ถ่านกัมมันต์ชนิด No. 22875 จากบริษัท Sigma-Aldrich Chemie GmbH, CH-9741 Netherland ดังแสดงในภาพที่ 15 ซึ่งทำมาจากฟิทมาอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้น หลังจากนั้นนำมาบดและร่อนแยกขนาดด้วยเครื่องเซย่าตะแกรงร่อนแยกขนาด ขนาด 20 เมช (841 ไมโครเมตร), 30 เมช (502.5 ไมโครเมตร) และ 40 (373 ไมโครเมตร) เพื่อให้ได้ขนาดอนุภาคถ่านกัมมันต์ 30 เมช และล้างถ่านกัมมันต์ที่ได้ด้วยน้ำกลั่นจนสะอาด หลังจากนั้นนำมาอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้น และเก็บใส่ภาชนะปิด

2. การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ชนิด

ตรวจวัดลักษณะทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ชนิด คือ ขนาดพื้นที่ผิว ปริมาตร และขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์ด้วยเครื่อง Autosorb 1 วิเคราะห์ด้วย Surface area analysis (BET) (Faust and Aly, 1987) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยทางกายภาพที่มีผลต่อร้อยละการดูดซับสีย้อม Remazol Brilliant Blue R (RBBR) และเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ชนิด

3. เตรียมกราฟมาตรฐานสีย้อม RBBR

เตรียมสารละลายสีย้อม RBBR เข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยชั่งสี RBBR 0.1 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่นและปรับปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร ในขวดวัดปริมาตร

เตรียมสารละลายสีย้อมเข้มข้น 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 และ 90 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปิเปตสารละลายสีย้อม RBBR เข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร มา 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 และ 45 มิลลิลิตร ตามลำดับ เจือจางเป็น 50.0 มิลลิลิตร ในขวดวัดปริมาตรด้วยน้ำกลั่น เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงในแกนตั้ง และความเข้มข้นสีย้อมในแกนนอน

นำสารละลายที่เตรียมได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 592 nm

3. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม RBBR ด้วยถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ชนิด ด้วยวิธีแบบแบตช์ (Batch method) โดยออกแบบการทดลองด้วยวิธีการหาพื้นผิวดตอบสนอง (RSM)

3.1 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อมด้วยวิธี RSM โดยนำเสนอแบบแผนภาพคอนทัวร์ (Contour plot) และแผนภาพพื้นผิว (Surface plot) ตรวจสอบความสัมพันธ์ของปัจจัยซึ่งเป็นตัวแปรต่างๆ ที่สนใจ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม (Optimization) โดยมีแบบจำลองทั่วไปคือ $Y = f(X_1 + X_2 + \dots + X_k) + E$ โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับของถ่านกัมมันต์จากไม้สนและไม้สักทั้งหมด 5 ปัจจัย ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร, X_1) พีเอช (X_2) ระยะเวลาในการเขย่า (นาที, X_3) ปริมาณตัวดูดซับ (ร้อยละโดยน้ำหนักต่อปริมาตร, X_4) และความเร็วรอบในการเขย่า (รอบต่อนาที, X_5) ออกแบบการทดลองด้วยวิธีการออกแบบส่วนประสมกลาง (Central composite design) แต่ละตัวแปรจะมี 5 ระดับ ได้แก่ X_1 (0-200), X_2 (3-11), X_3 (30-270), X_4 (2-10) และ X_5 (0-200) รหัสของตัวแปรคือ $-\alpha, -1, 0, +1, +\alpha$ ซึ่ง α คือระยะห่างจาก Center points สูตรคือ $\alpha = \sqrt[4]{2^k}$ และในที่นี้ $\alpha = \sqrt[4]{2^5} = 2.378$ การวางระดับของปัจจัย ดังแสดงในตารางที่ 4, 6 และ 8 สามารถออกแบบจำนวนชุดการทดลองได้ 32 ชุดการทดลอง โดยแสดงค่าของตัวแปรอิสระของแต่ละการทดลองในรูปของรหัสสมมติ (Coded variable, X_i) และแทนค่ารหัสสมมติได้ ดังแสดงในตารางที่ 5, 7 และ 9 จากนั้นนำค่าผลการทดลองทั้งหมดไปวิเคราะห์ด้วยวิธีทางสถิติโดยใช้ Multiple regression analysis (SPSS 11.5) แล้วทำการกำจัดพารามิเตอร์แบบ Remove elimination เพื่อความสมบูรณ์ในการสร้างสมการ

ตารางที่ 4 ระดับของปัจจัย 5 ปัจจัยในการศึกษาการดูดซับสีของ RBBR ด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้สน

ตัวแปร	สัญลักษณ์	ระดับ				
		$-\alpha$	-1	0	1	α
ความเข้มข้นของสีของ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	X_1	0	50	100	150	200
พีเอช	X_2	3	5	7	9	11
ระยะเวลาในการเขย่า (นาที)	X_3	30	90	150	210	270
ปริมาณตัวดูดซับ (ร้อยละ โดยน้ำหนักต่อปริมาตร)	X_4	2	4	6	8	10
ความเร็วรอบในการเขย่า (รอบต่อนาที)	X_5	0	50	100	150	200

หมายเหตุ $\alpha = 2.378$

ตารางที่ 5 แผนการทดลองแสดงปัจจัยและระดับที่ใช้ในการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีของ RBBR ด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้สน

ชุดการทดลอง	รหัสของปัจจัย					ปัจจัย				
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	ความเข้มข้นของสีของ (มก./ล.)	พีเอช	ระยะเวลาเขย่า (นาที)	ปริมาณตัวดูดซับ (% , w/v)	ความเร็วรอบการเขย่า (รอบ/นาที)
1	-1	-1	-1	-1	1	50	5	90	4	150
2	1	-1	-1	-1	-1	150	5	90	4	50
3	-1	1	-1	-1	1	50	9	90	4	50
4	1	1	-1	-1	-1	150	9	90	4	150
5	-1	-1	1	-1	1	50	5	210	4	50
6	1	-1	1	-1	-1	150	5	210	4	150
7	-1	1	1	-1	1	50	9	210	4	150
8	1	1	1	-1	-1	150	9	210	4	50
9	-1	-1	-1	1	1	50	5	90	8	50

ตารางที่ 5 (ต่อ)

ชุดการทดลอง	รหัสของปัจจัย					ปัจจัย				
						ความเข้มข้นของสีย้อม	พีเอช	ระยะเวลา	ปริมาณตัวดูดซับ	ความเร็วรอบ
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	(มก./ล.)		เขย่า (นาที)	(%, w/v)	การเขย่า (รอบ/นาที)
10	1	-1	-1	1	-1	150	5	90	8	150
11	-1	1	-1	1	1	50	9	90	8	150
12	1	1	-1	1	-1	150	9	90	8	50
13	-1	-1	1	1	1	50	5	210	8	150
14	1	-1	1	1	-1	150	5	210	8	50
15	-1	1	1	1	1	50	9	210	8	50
16	1	1	1	1	-1	150	9	210	8	150
17	$-\alpha$	0	0	0	0	0	7	150	6	100
18	α	0	0	0	0	200	7	150	6	100
19	0	$-\alpha$	0	0	0	100	3	150	6	100
20	0	α	0	0	0	100	11	150	6	100
21	0	0	$-\alpha$	0	0	100	7	30	6	100
22	0	0	α	0	0	100	7	270	6	100
23	0	0	0	$-\alpha$	0	100	7	150	2	100
24	0	0	0	α	0	100	7	150	10	100
25	0	0	0	0	$-\alpha$	100	7	150	6	0
26	0	0	0	0	α	100	7	150	6	200
27	0	0	0	0	0	100	7	150	6	100
28	0	0	0	0	0	100	7	150	6	100
29	0	0	0	0	0	100	7	150	6	100
30	0	0	0	0	0	100	7	150	6	100
31	0	0	0	0	0	100	7	150	6	100

ตารางที่ 5 (ต่อ)

ชุดการทดลอง	รหัสของปัจจัย					ปัจจัย				
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	ความเข้มข้นของสีย้อม (มก./ล.)	พีเอช	ระยะเวลา (นาท.)	ปริมาณตัวดูดซับ (% , w/v)	ความเร็วรอบการเขย่า (รอบ/นาท.)
32	0	0	0	0	0	100	7	150	6	100

ตารางที่ 6 ระดับของปัจจัย 5 ปัจจัยในการศึกษาการดูดซับสีย้อม RBBR ด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้สัก

ตัวแปร	สัญลักษณ์	ระดับ				
		- α	-1	0	1	α
ความเข้มข้นของสีย้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	X_1	0	50	100	150	200
พีเอช	X_2	8	9	10	11	12
ระยะเวลาในการเขย่า (นาท.)	X_3	30	90	150	210	270
ปริมาณตัวดูดซับ (ร้อยละโดยน้ำหนักต่อปริมาตร)	X_4	2	4	6	8	10
ความเร็วรอบในการเขย่า (รอบต่อนาที)	X_5	0	50	100	150	200

หมายเหตุ $\alpha = 2.378$

ตารางที่ 7 แผนการทดลองแสดงปัจจัยและระดับที่ใช้ในการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการ
ดูดซับสีข้อมด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้สัก

ชุดการ ทดลอง	รหัสของปัจจัย					ปัจจัย				
	ความเข้มข้นสี					ระยะเวลา		ปริมาณ		ความเร็วรอบ การเขย่า (รอบ/ นาที)
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	ข้อม (มก./ล.)	พีเอช	เขย่า (นาที)	ตัวดูดซับ (%, w/v)	
1	-1	-1	-1	-1	1	50	9	90	4	150
2	1	-1	-1	-1	-1	150	9	90	4	50
3	-1	1	-1	-1	1	50	11	90	4	50
4	1	1	-1	-1	-1	150	11	90	4	150
5	-1	-1	1	-1	1	50	9	210	4	50
6	1	-1	1	-1	-1	150	9	210	4	150
7	-1	1	1	-1	1	50	11	210	4	150
8	1	1	1	-1	-1	150	11	210	4	50
9	-1	-1	-1	1	1	50	9	90	8	50
10	1	-1	-1	1	-1	150	9	90	8	150
11	-1	1	-1	1	1	50	11	90	8	150
12	1	1	-1	1	-1	150	11	90	8	50
13	-1	-1	1	1	1	50	9	210	8	150
14	1	-1	1	1	-1	150	9	210	8	50
15	-1	1	1	1	1	50	11	210	8	50
16	1	1	1	1	-1	150	11	210	8	150
17	$-\alpha$	0	0	0	0	0	10	150	6	100
18	α	0	0	0	0	200	10	150	6	100
19	0	$-\alpha$	0	0	0	100	8	150	6	100
20	0	α	0	0	0	100	12	150	6	100
21	0	0	$-\alpha$	0	0	100	10	30	6	100
22	0	0	α	0	0	100	10	270	6	100
23	0	0	0	$-\alpha$	0	100	10	150	2	100

ตารางที่ 7 (ต่อ)

ชุดการทดลอง	รหัสของปัจจัย					ปัจจัย				
	ความเข้มข้น					ระยะเวลา		ปริมาณตัวดูดซับ (% w/v)	ความเร็วรอบ	
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	สีข้อม (มก./ล.)	พีเอช		การเขย่า (รอบ/นาท)	
24	0	0	0	α	0	100	10	150	10	100
25	0	0	0	0	$-\alpha$	100	10	150	6	0
26	0	0	0	0	α	100	10	150	6	200
27	0	0	0	0	0	100	10	150	6	100
28	0	0	0	0	0	100	10	150	6	100
29	0	0	0	0	0	100	10	150	6	100
30	0	0	0	0	0	100	10	150	6	100
31	0	0	0	0	0	100	10	150	6	100
32	0	0	0	0	0	100	10	150	6	100

ตารางที่ 8 ระดับของปัจจัย 5 ปัจจัยในการศึกษาการดูดซับสีข้อม RBBR ด้วยถ่านกัมมันต์นอร์ิท

ตัวแปร	สัญลักษณ์	ระดับ				
		$-\alpha$	-1	0	1	α
ความเข้มข้นของสีข้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	X_1	0	50	100	150	200
พีเอช	X_2	3	5	7	9	11
ระยะเวลาในการเขย่า (นาท)	X_3	0	15	30	45	60
ปริมาณตัวดูดซับ (ร้อยละโดยน้ำหนักต่อปริมาตร)	X_4	2	4	6	8	10
ความเร็วรอบในการเขย่า (รอบต่อนาที)	X_5	30	90	150	210	270

หมายเหตุ $\alpha = 2.378$

ตารางที่ 9 แผนการทดลองแสดงปัจจัยและระดับที่ใช้ในการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการ
ดูดซับสีข้อมด้วยถ่านกัมมันต์นอร์ิท

ชุดการ ทดลอง	รหัสของปัจจัย					ปัจจัย				
						ความเข้มข้น	ระยะเวลา	ปริมาณ	ความเร็วรอบ	
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	สีข้อม (มก./ล.)	พีเอช	เขย่า (นาที)	ตัวดูดซับ (%, w/v)	การเขย่า (รอบ/ นาที)
1	-1	-1	-1	-1	1	50	5	90	0.2	150
2	1	-1	-1	-1	-1	150	5	90	0.2	50
3	-1	1	-1	-1	1	50	9	90	0.2	50
4	1	1	-1	-1	-1	150	9	90	0.2	150
5	-1	-1	1	-1	1	50	5	210	0.2	50
6	1	-1	1	-1	-1	150	5	210	0.2	150
7	-1	1	1	-1	1	50	9	210	0.2	150
8	1	1	1	-1	-1	150	9	210	0.2	50
9	-1	-1	-1	1	1	50	5	90	0.4	50
10	1	-1	-1	1	-1	150	5	90	0.4	150
11	-1	1	-1	1	1	50	9	90	0.4	150
12	1	1	-1	1	-1	150	9	90	0.4	50
13	-1	-1	1	1	1	50	5	210	0.4	150
14	1	-1	1	1	-1	150	5	210	0.4	50
15	-1	1	1	1	1	50	9	210	0.4	50
16	1	1	1	1	-1	150	9	210	0.4	150
17	$-\alpha$	0	0	0	0	0	7	150	0.3	100
18	α	0	0	0	0	200	7	150	0.3	100
19	0	$-\alpha$	0	0	0	100	3	150	0.3	100
20	0	α	0	0	0	100	11	150	0.3	100
21	0	0	$-\alpha$	0	0	100	7	30	0.3	100
22	0	0	α	0	0	100	7	270	0.3	100
23	0	0	0	$-\alpha$	0	100	7	150	0.1	100
24	0	0	0	α	0	100	7	150	0.5	100

ตารางที่ 9 (ต่อ)

ชุดการทดลอง	รหัสของปัจจัย					ปัจจัย				
						ความเข้มข้น	พีเอช	ระยะเวลา	ปริมาณ	ความเร็วรอบ
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	ลีสיום (มก./ล.)		เขย่า (นาที)	ตัวดูดซับ (%, w/v)	การเขย่า (รอบ/นาที)
25	0	0	0	0	$-\alpha$	100	7	150	0.3	0
26	0	0	0	0	α	100	7	150	0.3	200
27	0	0	0	0	0	100	7	150	0.3	100
28	0	0	0	0	0	100	7	150	0.3	100
29	0	0	0	0	0	100	7	150	0.3	100
30	0	0	0	0	0	100	7	150	0.3	100
31	0	0	0	0	0	100	7	150	0.3	100
32	0	0	0	0	0	100	7	150	0.3	100

3.2 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับด้วยวิธีแบบเบตซ์

ทำการทดลองโดยใช้ปริมาณตัวดูดซับ ความเข้มข้นของสารละลายลีสיום RBBR ปริมาตร 50.0 มิลลิลิตร พีเอช ความเร็วรอบในการเขย่าและระยะเวลาเขย่าแปรผันตามชุดการทดลองในตารางที่ 7, 9 และ 11 สำหรับถ่านกัมมันต์จากไม้สน ไม้สัก และถ่านกัมมันต์นอร์ท ตามลำดับ



(ก)



(ข)

ภาพที่ 14 (ก) การดูดซับสีของแบบเบดซ์บนเครื่องเขย่า (Shaker) และ (ข) การกรองด้วยกระดาษกรองเมมเบรน Whatman เบอร์ 1 และ 5

3.3 ยืนยันสถานะที่ดีที่สุดในการดูดซับ โดยศึกษาจากผลการทดลองที่ได้ทั้งหมด ประกอบกับการนำแผนภาพคอนทัวร์ของทุกปัจจัยมาซ้อนทับกันเพื่อหาบริเวณที่ให้ค่าร้อยละการดูดซับสูงที่สุด และทำนายร้อยละการดูดซับ จะทำให้ทราบสถานะหรือบริเวณที่มีร้อยละการดูดซับสีของที่เหมาะสม เลือกสถานะที่คาดว่าจะมีความเหมาะสมมาทดลองจริงอีกครั้งและทำการทดลองตามวิธีการข้อที่ 3.2

4. ศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับโดยใช้ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm) และไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดิช (Freundlich adsorption isotherm)

ทำการทดลองโดยแปรผันตัวดูดซับตั้งแต่ 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6 และ 7 กรัม สำหรับไม้สนและไม้สัก แปรผันตัวดูดซับตั้งแต่ 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.5 กรัม สำหรับถ่านกัมมันต์นอร์ท โดยใช้สถานะที่ดีที่สุดจากผลการทดลองในวิธีการข้อที่ 3.3 สร้างกราฟตามทฤษฎีของ ฟรุนดิชและแลงเมียร์เพื่อทราบลักษณะพื้นผิว

5. ศึกษาอัตราการดูดซับแบบต่อเนื่อง

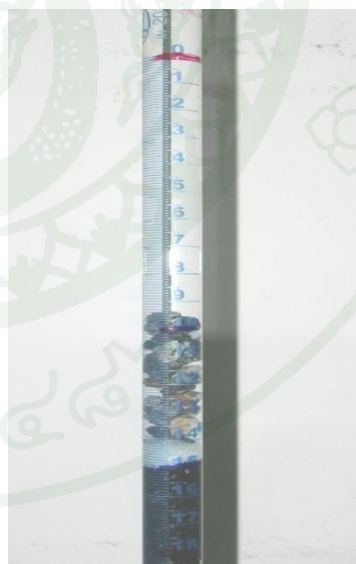
ศึกษาอัตราการดูดซับแบบต่อเนื่อง โดยในที่นี้ใช้ปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร เป็นคอลัมน์บรรจุตัวดูดซับ โดยปล่อยอัตราการไหลให้เป็นไปตามแรงโน้มถ่วงโลกโดยไม่มีการปรับอัตราการไหล และปรับสถานะของความเข้มข้นสารละลายสีส้ม และพีเอช ให้เท่ากับผลการทดลองจากวิธีแบบแบตช์ ซึ่งตัวดูดซับแต่ละชนิดจะมีสถานะที่แตกต่างกัน

5.1 การบรรจุตัวดูดซับลงในคอลัมน์ ทำได้โดยนำสำลีมาเล็กน้อยใส่ลงไปจนถึงก้นคอลัมน์ เพื่อป้องกันไม่ให้ถ่านกัมมันต์หลุดออกจากคอลัมน์ และอุดตันที่ก๊อกปิด-เปิดได้

นำถ่านกัมมันต์ที่แช่น้ำกลั่น เทผ่านกรวยกรองลงในคอลัมน์ จนได้ความสูงประมาณ 40 เซนติเมตร ขณะแพกถ่านกัมมันต์ลงในคอลัมน์ เคาะข้างๆ คอลัมน์เบาๆ แล้วเปิดก๊อกเพื่อให้น้ำกลั่นไหลออกมา ตลอดการแพกต้องระวังไม่ให้คอลัมน์แห้ง เมื่อบรรจุจนได้ความสูงที่ต้องการแล้วใส่สำลีเล็กน้อยบนถ่าน ตามด้วยก้อนกรวดสูงประมาณ 5 เซนติเมตร ดังแสดงในภาพที่ 18 (ข)



(ก)



(ข)

ภาพที่ 15 (ก) ส่วนประกอบส่วนบน และ (ข) ส่วนล่างภายในคอลัมน์

5.2 ทำการทดลองโดยบรรจุตัวดูดซับลงในคอลัมน์สูง 40 เซนติเมตร จากนั้นเตรียมความเข้มข้นสารละลายสีย้อม RBBR 14.17, 3.61 และ 204.39 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับการดูดซับสีย้อมด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้สน ไม้สัก และถ่านกัมมันต์อริท ตามลำดับ (คำนวณจากความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม) จากการทดลองด้วยวิธีแบบเบตซ์) ปริมาตร 4 ลิตร โดยปล่อยให้สารละลายสีย้อมไหลตามแรงโน้มถ่วงโลก

5.3 เก็บตัวอย่างสารละลายสีย้อมปริมาตร 20 มิลลิลิตร ทุกๆ 5 นาที หลังจากที่ได้ให้น้ำกลั่นออกจากคอลัมน์ทั้งหมด และนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 592 nm จากนั้นสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความเข้มข้นสีย้อมหลังการดูดซับ และปริมาตรน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ (มิลลิลิตร) เพื่อทราบจุดเริ่มหมดสภาพ (Break through point) และจุดหมดสภาพ (Exhaustion point) ของถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ชนิด

6. การฟื้นฟูถ่านกัมมันต์

นำถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการใช้งานจากการทดสอบด้วยคอลัมน์มาล้างน้ำกลั่นให้สะอาด จากนั้นนำไปแช่ในกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ปริมาณ 250 มิลลิลิตร เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำมาล้างด้วยน้ำกลั่นให้สะอาดอีกครั้ง และนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้น และทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 4. ทำการทดลอง 3 ครั้ง เพื่อศึกษาความสามารถในการฟื้นฟูตัวดูดซับหลังจากถูกใช้งานมาแล้ว และเปรียบเทียบร้อยละการดูดซับหลังการฟื้นฟูของถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ชนิด

7. วิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับหลังการดูดซับ

นำถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ชนิด ทั้งก่อนและหลังการดูดซับสีย้อม RBBR มาวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยเครื่องสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป (SEM) และเปรียบเทียบกับลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ชนิด ที่วิเคราะห์ไว้ในวิธีการข้อที่ 2.

8. ศึกษาอัตราการดูดซับสีย้อมในน้ำเสียจากระบวนการฟอกย้อม

เพื่อเป็นการยืนยันสถานะทั้งหมดที่ได้จากการวิจัยว่าสามารถนำมาบำบัดน้ำเสียจากโรงงานได้จริงจึงนำตัวอย่างน้ำเสียก่อนการบำบัดที่ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท ซาบีน่า ฟาร์อีสท์ จำกัด (พุทธมลฑลสาย 5) มาทำการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับด้วยวิธีแบบแบดซ์และแบบต่อเนื่อง

8.1 นำตัวอย่างน้ำเสียมาตรวจวัดดัชนีคุณภาพน้ำ ได้แก่ ความเข้มข้นสีย้อม, พีเอช, ของแข็งทั้งหมดที่ละลายในน้ำ (Total dissolved solids), ของแข็งแขวนลอยรวม (Total suspended solids), ของแข็งทั้งหมด (Total solids), บีโอดี (Biochemical oxygen demand) และซีโอดี (Chemical oxygen demand) เป็นต้น

8.2 ทำการศึกษาร้อยละการดูดซับสีย้อมด้วยวิธีแบบแบดซ์ของถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ชนิด โดยใช้ตัวอย่างน้ำเสียจากบริษัท ซาบีน่า ฟาร์อีสท์ จำกัด (พุทธมลฑลสาย 5) 50.0 มิลลิลิตร โดยปรับสภาพน้ำเสียตามสถานะที่เหมาะสมจากผลการทดลองในข้อ 3.2 เปรียบเทียบกับน้ำเสียที่ไม่มีการปรับสภาพ

8.3 ทำการศึกษาร้อยละการดูดซับแบบต่อเนื่อง โดยปรับพีเอชตามผลการทดลองข้อ 3.2 และทำการทดลองตามวิธีการข้อ 5.

8.4 ตรวจวัดดัชนีคุณภาพน้ำที่ผ่านการดูดซับแบบต่อเนื่อง เช่นเดียวกับข้อ 8.1

8. สถานที่ทำการวิจัย

ห้องปฏิบัติการหน่วยปฏิบัติการเทคโนโลยีเอนไซม์และการจัดการของเสีย สถาบันก้นคว่ำและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน และห้องปฏิบัติการวิเคราะห์คุณภาพน้ำและดิน วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

9. ระยะเวลาในการวิจัย

ระยะเวลาที่ทำการศึกษาทั้งหมด 16 เดือน ตั้งแต่เดือนมิถุนายน พ.ศ. 2552 สิ้นสุดเดือน ตุลาคม พ.ศ. 2553



ผลและวิจารณ์

การศึกษาวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการกำจัดสีย้อม RBBR โดยการใช้ตัวดูดซับทั้งหมด 3 ชนิดคือ ถ่านกัมมันต์จากไม้สน ไม้สัก และถ่านกัมมันต์นอร์ท ซึ่งผลิตมาจากฟีดดังแสดงในภาพที่ 16 และ 17 ตามลำดับ ที่ผ่านการบดและร่อนแยกขนาดจนได้ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 30 เมช ดังแสดงในภาพที่ 18 การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการทดลองด้วยวิธีแบบแบดซ์ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับบนเครื่องเขย่า ซึ่งถูกออกแบบการทดลองด้วยวิธี RSM ซึ่งมีปัจจัยที่ศึกษาทั้งหมด 5 ปัจจัย แต่ละปัจจัยทำการศึกษา 5 ระดับ ได้ชุดการทดลองทั้งหมด 32 ชุด จากนั้นนำสภาวะที่ได้จากการทดลองด้วยวิธีแบบแบดซ์มาประยุกต์ใช้กับการหาอัตราการดูดซับแบบต่อเนื่องโดยใช้คอลัมน์ และนำสภาวะที่ศึกษาได้ทั้งหมดมาทดสอบกับน้ำเสียจากกระบวนการย้อมผ้าจาก บริษัท ซาบีน่า ฟาร์อีสท์ จำกัด (พุทธมณฑลสาย 5) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้



(ก)



(ข)

ภาพที่ 16 (ก) ถ่านกัมมันต์จากไม้สน และ (ข) ถ่านกัมมันต์จากไม้สัก



ภาพที่ 17 ถ่านกัมมันต์นอร์ท No. 22875 จากบริษัท Sigma-Aldrich Chemie GmbH, CH-9741
Netherland



ภาพที่ 18 ถ่านกัมมันต์ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 30 เมช (502.5 ไมโครเมตร)

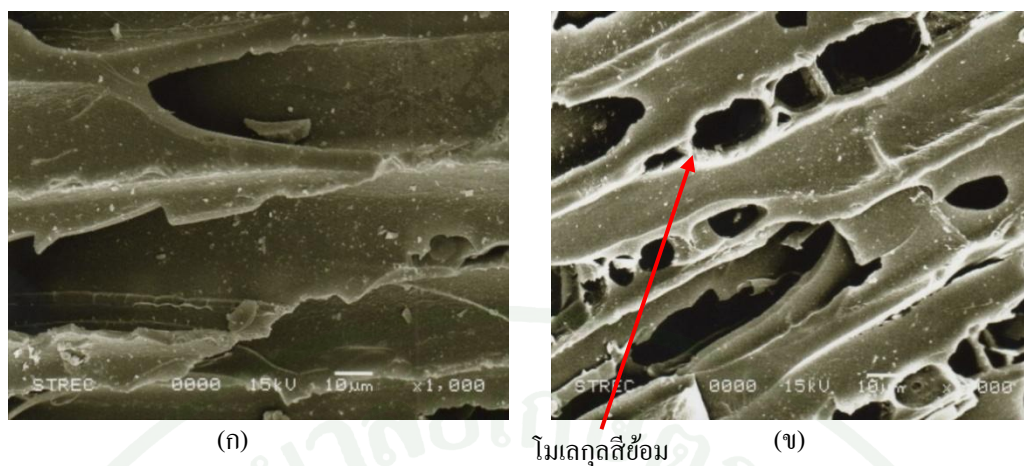
1. ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์จากไม้สน ไม้สัก และถ่านกัมมันต์นอริท

1.1 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุน ของถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ชนิด ก่อนการดูดซับด้วยเครื่อง Autosorb 1 ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 10

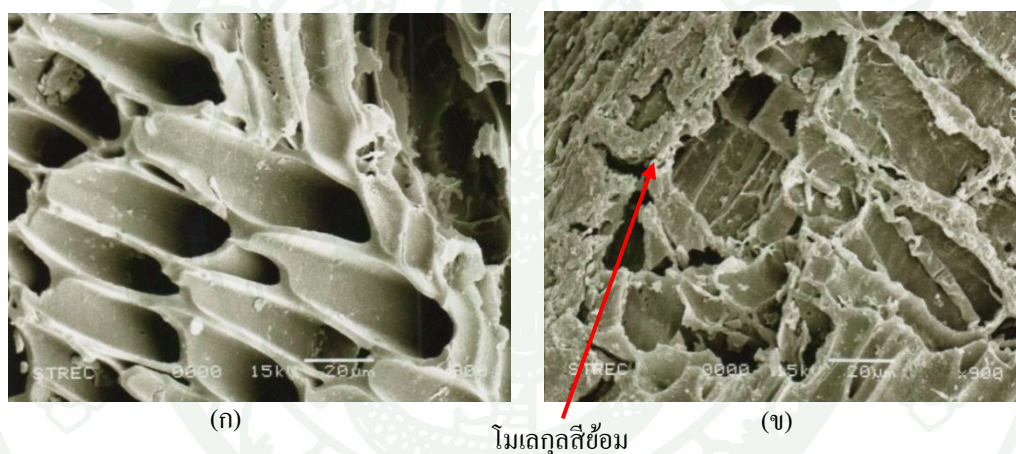
ตารางที่ 10 ลักษณะทางกายภาพของตัวดูดซับทั้ง 3 ชนิด

ตัวดูดซับ	พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตร.ม./ก.)	ปริมาตรรูพรุน (มล./ก.)	ขนาดรูพรุน (nm)
ถ่านกัมมันต์จากไม้สน	118.3	7.9075×10^{-2}	2.6685
ถ่านกัมมันต์จากไม้สัก	0.58	7.817×10^{-3}	79.43
ถ่านกัมมันต์นอริท	831.3	6.644×10^{-1}	3.197

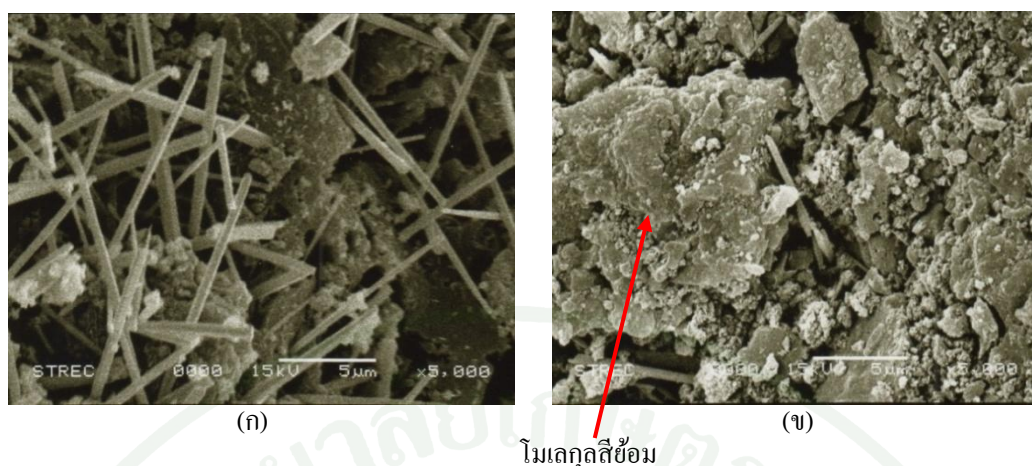
1.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ชนิด ด้วยเครื่อง SEM โดยภาพถ่ายที่ได้จากถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ชนิด ก่อนการดูดซับ และหลังการดูดซับ ดังแสดงในภาพที่ 19, 20 และ 21 ตามลำดับ



ภาพที่ 19 (ก) ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์จากไม้สนก่อน และ (ข) หลังการดูดซับ ด้วย เครื่อง SEM



ภาพที่ 20 (ก) ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวถ่านกัมมันต์จากไม้สักก่อน และ (ข) หลังการดูดซับด้วย เครื่อง SEM



ภาพที่ 21 (ก) ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวถ่านกัมมันต์ก่อนการดูดซับสี่เหลี่ยม RBBR และ (ข) หลังการดูดซับด้วยเครื่อง SEM

จากภาพที่ 19-21 พบว่า ลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ก่อนการดูดซับสี่เหลี่ยม RBBR จะมีลักษณะเป็นรูพรุนหรือเป็นโพรงอยู่มาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งพื้นผิวของถ่านกัมมันต์นอร์ธดังแสดงในภาพที่ 21 เนื่องจากมีค่าพื้นผิวจำเพาะมากที่สุดคือ 831.3 ตารางเมตรต่อกรัม รองลงมาคือถ่านกัมมันต์จากไม้สน และไม้สัก มีค่าเท่ากับ 118.3 และ 0.58 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ ภายหลังการดูดซับสี่เหลี่ยม RBBR ลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ชนิด ถูกครอบครองไปด้วยโมเลกุลสี่เหลี่ยมบริเวณรูพรุน

2. ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับสี่เหลี่ยม RBBR ด้วยถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ชนิดด้วยวิธีแบบเบคซ์ โดยออกแบบการทดลองด้วยวิธี RSM

2.1 จากการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสี่เหลี่ยม RBBR ด้วยวิธี RSM ด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้สน ไม้สัก และถ่านกัมมันต์นอร์ธ ตามแผนการทดลองดังแสดงในตารางที่ 7, 9 และ 11 ตามลำดับ (วิธีการข้อที่ 3.1) โดยใช้สารละลายสี่เหลี่ยมปริมาตร 50 มิลลิลิตร ได้ผลดังต่อไปนี้

2.1.1 ผลของประสิทธิภาพการดูดซับที่ได้จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสี่เหลี่ยม RBBR ด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้สน โดยวิธีแบบเบคซ์และค่าที่ทำนายจากวิธี RSM ดังแสดงในตารางที่ 11

ตารางที่ 11 ร้อยละการดูดซับสีของ RBBR ด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้สนจากการทดลองด้วยวิธีแบบ
แบบซ์และจากการทำนายด้วยสมการถดถอย

ชุดการ ทดลอง	ปัจจัย					ร้อยละการดูดซับ	
	ความเข้มข้น	พีเอช	ระยะเวลา	ปริมาณ	ความเร็วรอบ	การทดลอง	การทำนาย
	สีของ (มก./ล.)		เขย่า (นาที)	ตัวดูดซับ (%, w/v)	การเขย่า (รอบ/นาที)		
1	50	5	90	4	150	48.06	61.07
2	150	5	90	4	50	26.86	27.70
3	50	9	90	4	50	49.25	62.92
4	150	9	90	4	150	30.45	31.86
5	50	5	210	4	50	58.86	75.34
6	150	5	210	4	150	37.66	35.63
7	50	9	210	4	150	64.37	78.40
8	150	9	210	4	50	45.57	40.15
9	50	5	90	8	50	73.24	89.04
10	150	5	90	8	150	52.04	45.24
11	50	9	90	8	150	74.43	90.35
12	150	9	90	8	50	55.63	47.36
13	50	5	210	8	150	84.04	96.67
14	150	5	210	8	50	62.84	59.04
15	50	9	210	8	50	89.55	96.77
16	150	9	210	8	150	70.75	63.39
17	0	7	150	6	100	0	15.98
18	200	7	150	6	100	14.98	39.31
19	100	3	150	6	100	63.46	64.80
20	100	11	150	6	100	72.56	81.91
21	100	7	30	6	100	44.68	40.76
22	100	7	270	6	100	70.60	79.91
23	100	7	150	2	100	24.58	23.24
24	100	7	150	10	100	74.95	86.97
25	100	7	150	6	0	25.98	44.40
26	100	7	150	6	200	64.98	62.42
27	100	7	150	6	100	55.48	59.89
28	100	7	150	6	100	55.48	61.62

ตารางที่ 11 (ต่อ)

ชุดการทดลอง	ปัจจัย				ร้อยละการดูดซับ		
	ความเข้มข้น		ระยะเวลา	ปริมาณ	ความเร็วรอบ	การทดลอง	การทำนาย
	สีย้อม	ฟิเอช	เขย่า	ตัวดูดซับ	การเขย่า		
	(มก./ล.)		(นาที)	(%, w/v)	(รอบ/นาที)		
29	100	7	150	6	100	55.48	65.42
30	100	7	150	6	100	55.48	62.27
31	100	7	150	6	100	55.48	58.81
32	100	7	150	6	100	55.48	62.46

จากตารางที่ 11 นำร้อยละการดูดซับสีย้อมด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้สนที่ได้จากการทดลองทั้ง 32 ชุด ไปวิเคราะห์ด้วยวิธีทางสถิติโดยใช้ Multiple regression analysis (SPSS) ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 12

ตารางที่ 12 ค่าประมาณ (p -value) และการทดสอบสัมประสิทธิ์สมการถดถอยของร้อยละการดูดซับสีย้อม RBBR ด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้สน

ตัวแปรอิสระ	สัมประสิทธิ์	p -value
(Constant)	- 82.916	0.173
X_1	1.253	0.003
X_2	- 11.775	0.169
X_4	10.580	0.129
X_5	0.895	0.011
X_1X_2	0.006	0.842
X_1X_5	- 0.005	0.030
X_2X_3	0.009	0.594
X_1X_1	- 0.004	0.000
X_2X_2	0.783	0.169
X_3X_3	0.000	0.702
X_4X_4	- 0.357	0.522
X_5X_5	- 0.001	0.408

$$R^2 = 0.858$$

จากตารางที่ 12 พบว่า ความเข้มข้นสีย้อม RBBR (X_1) และความเร็วยรอบในการเขย่า (X_3) มีอิทธิพลต่อร้อยละการดูดซับอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากค่า p น้อยกว่า 0.01 ($p < 0.01$) และน้อยกว่า 0.05 ($p < 0.05$) ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยของแต่ละปัจจัยพบว่า ความเข้มข้นสีย้อม RBBR กับความเร็วยรอบในการเขย่า (X_1X_3) เมื่อทำงานร่วมกันจะมีอิทธิพลต่อร้อยละการดูดซับอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับกับปัจจัยที่นำมาศึกษา สามารถสร้างตัวแบบของสมการถดถอย แผนภาพคอนทัวร์ และแผนภาพพื้นผิว เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย ดังแสดงในภาพที่ 22 และจากค่า R^2 เท่ากับ 0.858 สามารถบ่งชี้ได้ว่าสมการถดถอยที่ใช้ในการทำนายร้อยละการดูดซับสีย้อมมีความน่าเชื่อถือเนื่องจากมีค่ามากกว่า 0.75 โดยมีรูปแบบสมการถดถอยลดรูป ดังนี้

$$Y = 1.253X_1 - 11.775X_2 + 10.58X_4 + 0.895X_5 + 0.006X_1X_2 - 0.005X_1X_5 + 0.009X_2X_3 - 0.004X_1X_4 + 0.783X_2X_3 + 0.00015X_3X_4 - 0.357X_4X_5 - 0.001X_5X_6 - 82.916 \quad (11)$$

จากสมการที่ 11 สามารถทำนายร้อยละการดูดซับได้โดยการนำค่าสถานะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองมาแทนค่าในสมการถดถอยที่ได้ สามารถทำนายค่าร้อยละการดูดซับในทุกๆ สถานะการทดลองได้ล่วงหน้า ซึ่งผลการทำนายค่าร้อยละการดูดซับสีย้อมด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้สน ดังแสดงในตารางที่ 11 จากนั้นทำการทดสอบความเหมาะสมของสมการที่ 11 ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 13 ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างค่าจากการทดลองและค่าจากการทำนาย ด้วยการวิเคราะห์ t-test พบว่า $t_{cal} = 4.0360 > t_{0.05,31} = 2.0395$ แสดงให้เห็นว่าค่าที่ได้จากการทดลองและค่าจากการทำนายแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

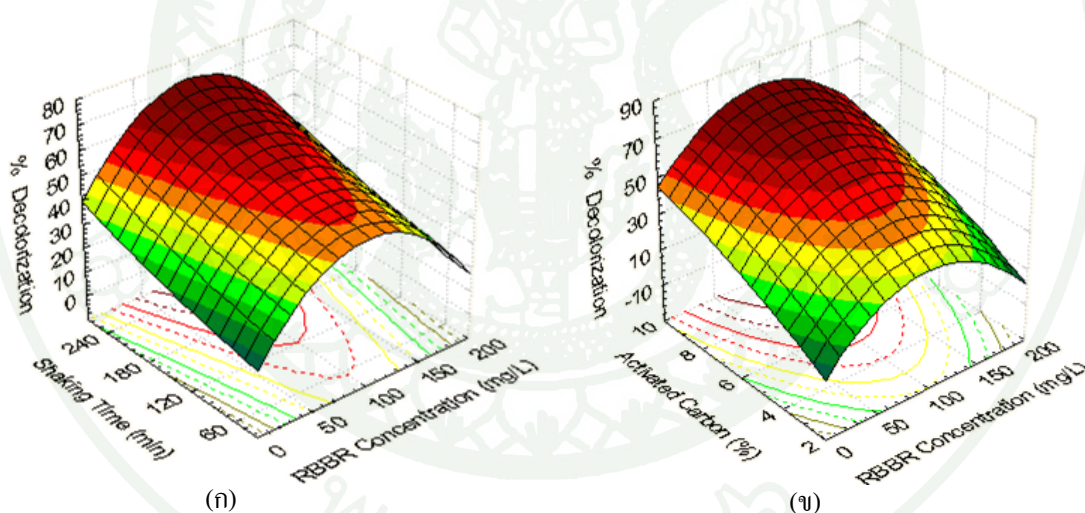
ตารางที่ 13 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน และ Lack of fit ของสถานะที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อม RBBR ด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้สน

Source	Sum of Squares	df	Mean square	F value	p-value
Model	13643.4	12	1136.9	9.540	0.000
linear	8645.71	4	2161.4	8.036	0.000
Quadratic	10137.8	5	2027.6	9.137	0.000
Interaction	4505.08	3	1501.7	3.688	0.024
Residual error	2264.29	19	119.173	-	-
Lack of fit	907.705	4	226.9263	2.509	-

ตารางที่ 13 (ต่อ)

Source	Sum of Squares	df	Mean square	F value	p-value
Pure error	1356.58	15	90.4387	-	-
Total	15907.6	31	-	-	-

จากตารางที่ 13 พบว่า $F \text{ value} = 9.540 > F_{0.05, (12, 19)} = 2.31$ และ $p\text{-value} = 0.000$ หมายความว่าสมการที่ใช้มีอย่างน้อยหนึ่งเทอมที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และผลการวิเคราะห์ Lack of fit จากตารางที่ 5 พบว่า $F_{\text{LOF}} = 2.509 < F_{0.05, (4, 15)} = 3.06$ หมายความว่าสมการที่ (11) ไม่มี Lack of fit หรือสมการไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) แสดงให้เห็นว่าไม่มีสมการหรือโมเดลอื่นนอกจากสมการที่ (11) ที่มีความเหมาะสมในการทำ ความสัมพันธ์และทำนายค่าร้อยละการดูดซับสีข้อมด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้สน



ภาพที่ 22 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยความเข้มข้นสีข้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร) และระยะเวลาในการเขย่า (นาที) และ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยความเข้มข้นสีข้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร) และปริมาณถ่านกัมมันต์ (ร้อยละโดยน้ำหนักต่อปริมาตร) (ข) ที่มีอิทธิพลต่อร้อยละการดูดซับสีข้อมRBBER ด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้สน

จากภาพที่ 22 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีอิทธิพลร่วมต่อสถานะที่เหมาะสมของการดูดซับสีย้อม RBBR ด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้สน โดยภาพที่ 22 (ก) แสดงถึงอิทธิพลร่วมกันระหว่างความเข้มข้นสีย้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร) และระยะเวลาในการเขย่า (นาที) และภาพที่ 22 (ข) ระหว่างปัจจัยความเข้มข้นสีย้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร) และปริมาณถ่านกัมมันต์ (ร้อยละโดยน้ำหนักต่อปริมาตร)

จากการพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยทั้งหมดของถ่านกัมมันต์จากไม้สน สามารถเลือกสถานะที่เหมาะสมที่สุดในการนำมาทำการทดลองจริงอีกครั้งเพื่อยืนยันผลการทดลอง และเพื่อหาร้อยละการดูดซับสีย้อม RBBR ต่อถ่านกัมมันต์จากไม้สนที่ดีที่สุด โดยสถานะที่เหมาะสมที่สุดในการดูดซับครั้งนี้คือ ความเข้มข้นสีย้อม 140 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 11 ระยะเวลาในการเขย่า 270 นาที ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร หรือ 5 กรัม และความเร็วรอบในการเขย่า 200 รอบต่อนาที ร้อยละการดูดซับเท่ากับ 96.42 % และผลจากการทำนายที่ได้คือ 95.33 % ซึ่งลักษณะสารละลายสีย้อม RBBR ก่อนและหลังการดูดซับสามารถเปรียบเทียบให้เห็นดังภาพที่ 23



ภาพที่ 23 ความเข้มข้นสารละลายสีย้อม RBBR ก่อนและหลังการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้สน

2.1.2 สถานะที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อม RBBR ด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้สัก
ดังแสดงในตารางที่ 14

ตารางที่ 14 ร้อยละการดูดซับสีของ RBBR ด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้สักจากการทดลองด้วยวิธีแบบ
แบบซ์และจากการทำนายด้วยสมการถดถอย

ชุดการ ทดลอง	ปัจจัย					ร้อยละการดูดซับ	
	ความเข้มข้น		ระยะเวลา	ปริมาณ	ความเร็วรอบ	การทดลอง	การทำนาย
	สี้อม (มก./ล.)	ฟิเชช	เขย่า (นาที)	ตัวดูดซับ (%, w/v)	การเขย่า (รอบ/นาที)		
1	50	9	90	4	150	30.08	17.26
2	150	9	90	4	50	15.25	16.96
3	50	11	90	4	50	55.07	41.35
4	150	11	90	4	150	30.26	22.45
5	50	9	210	4	50	45.89	40.96
6	150	9	210	4	150	21.49	22.06
7	50	11	210	4	150	64.33	46.45
8	150	11	210	4	50	45.47	46.15
9	50	9	90	8	50	49.07	39.13
10	150	9	90	8	150	29.49	25.43
11	50	11	90	8	150	78.84	58.85
12	150	11	90	8	50	54.51	53.35
13	50	9	210	8	150	59.89	49.43
14	150	9	210	8	50	36.50	43.93
15	50	11	210	8	50	91.83	77.35
16	150	11	210	8	150	68.33	63.65
17	0	10	150	6	100	0	30.82
18	200	10	150	6	100	38.42	11.62
19	100	8	150	6	100	30.55	21.72
20	100	12	150	6	100	45.98	60.33
21	100	10	30	6	100	42.42	52.58
22	100	10	270	6	100	84.27	81.38
23	100	10	150	2	100	25.80	27.27
24	100	10	150	10	100	62.59	66.66
25	100	10	150	6	0	53.67	57.92
26	100	10	150	6	200	48.44	44.52
27	100	10	150	6	100	64.52	61.22
28	100	10	150	6	100	60.76	61.224

ตารางที่ 14 (ต่อ)

ชุดการทดลอง	ปัจจัย				ร้อยละการดูดซับ		
	ความเข้มข้น		ระยะเวลา	ปริมาณ	ความเร็วรอบ		
	สีข้อม	ฟิเชช	เขย่า	ตัวดูดซับ	การเขย่า	การทดลอง	การทำนาย
	(มก./ล.)		(นาที)	(%, w/v)	(รอบ/นาที)		
29	100	10	150	6	100	67.95	61.22
30	100	10	150	6	100	70.93	61.22
31	100	10	150	6	100	69.12	61.22
32	100	10	150	6	100	66.65	61.22

จากตารางที่ 14 นำร้อยละการดูดซับสีข้อมด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้สักที่ได้จากการทดลองทั้ง 32 ชุด ไปวิเคราะห์ด้วยวิธีทางสถิติโดยใช้ Multiple regression analysis (SPSS) ซึ่งได้ผลดังแสดงในตารางที่ 15

ตารางที่ 15 ค่าประมาณ (p -value) และการทดสอบสัมประสิทธิ์สมการถดถอยของร้อยละการดูดซับสีข้อม RBBR ด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้สัก

ตัวแปรอิสระ	สัมประสิทธิ์	p -value
(Constant)	- 568.876	0.043
X_1	0.704	0.002
X_2	103.839	0.047
X_4	3.025	0.869
X_5	0.055	0.847
X_2X_4	1.129	0.496
X_4X_5	0.013	0.703
X_1X_1	- 0.004	0.001
X_2X_2	- 5.048	0.048
X_3X_3	0.000	0.012
X_4X_4	- 0.891	0.153
X_5X_5	- 0.001	0.450

$$R^2 = 0.784$$

จากตารางที่ 15 พบว่า ความเข้มข้นสีย้อม RBBR (X_1) มีอิทธิพลต่อร้อยละการดูดซับ อย่างมีนัยสำคัญยิ่ง เนื่องจากค่า p น้อยกว่า 0.01 ($p < 0.01$) และพีเอช (X_2) มีอิทธิพลต่อร้อยละการดูดซับอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากค่า p น้อยกว่า 0.05 ($p < 0.05$) และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับกับปัจจัยที่นำมาศึกษา สามารถสร้างตัวแบบของสมการถดถอย และแผนภาพคอนทัวร์ และแผนภาพพื้นผิว เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย ดังแสดงในภาพที่ 24 และจากค่า R^2 เท่ากับ 0.784 สามารถบ่งชี้ได้ว่าสมการถดถอยที่ใช้ในการทำนายร้อยละการดูดซับสีย้อมมีความน่าเชื่อถือ เนื่องจากมีค่ามากกว่า 0.75 โดยมีรูปแบบสมการถดถอยลดรูป ดังนี้

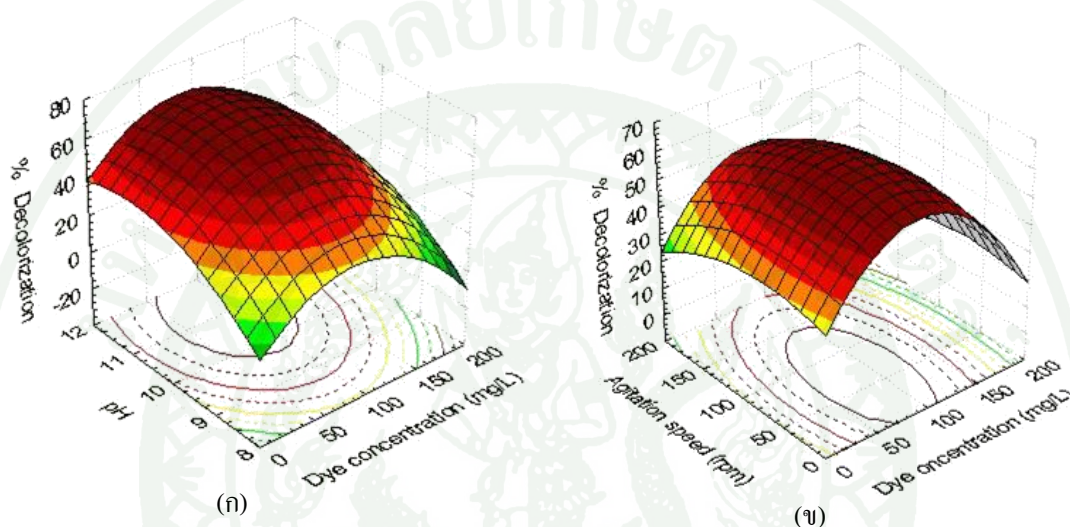
$$Y = 0.704X_1 + 103.839X_2 + 3.025X_4 + 0.055X_5 + 1.129X_2X_4 + 0.013X_4X_5 - 0.004X_1X_1 - 5.048X_2X_2 + 0.0004X_3X_3 - 0.891X_4X_4 - 0.001X_5X_5 - 568.876 \quad (12)$$

จากสมการที่ 12 สามารถทำนายร้อยละการดูดซับได้โดยการนำค่าสถานะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองมาแทนค่าในสมการที่ได้ สามารถทำนายค่าร้อยละการดูดซับในทุกๆ สถานะการทดลองได้ล่วงหน้า ซึ่งผลการทำนายค่าร้อยละการดูดซับสีย้อมด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้สัก ดังแสดงในตารางที่ 14 จากนั้นทำการทดสอบความเหมาะสมของสมการที่ 12 ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 16 ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างค่าจากการทดลองและค่าจากการทำนาย ด้วยการวิเคราะห์ t-test พบว่า $t_{cal} = 1.9980 < t_{0.05,31} = 2.0395$ แสดงให้เห็นว่าค่าที่ได้จากการทดลองและค่าจากการทำนายไม่แตกต่างกัน

ตารางที่ 16 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน และ Lack of fit ของสถานะที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อม RBBR ด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้สัก

Source	Sum of Squares	df	Mean square	F value	p-value
Model	10065.0	11	914.996	5.385	0.001
linear	4935.23	4	1233.8	3.906	0.013
Quadratic	6608.44	5	1321.7	5.013	0.002
Interaction	3592.13	2	1796.1	5.277	0.011
Residual error	3398.04	20	169.902	-	-
Lack of fit	2440.655	13	187.7427	1.372	-
Pure error	957.385	7	136.7693	-	-
Total	13463.0	31	-	-	-

จากตารางที่ 16 พบว่า $F \text{ value} = 5.385 > F_{0.05, (11, 20)} = 2.31$ และ $p\text{-value} = 0.001$ หมายความว่าสมการที่ใช้มีอย่างน้อยหนึ่งเทอมที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และผลการวิเคราะห์ Lack of fit จากตารางที่ 18 พบว่า $F_{\text{LOF}} = 1.372 < F_{0.05, (13, 7)} = 3.55$ หมายความว่าสมการที่ (12) ไม่มี Lack of fit หรือสมการไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) แสดงให้เห็นว่าไม่มีสมการหรือโมเดลอื่นนอกจากสมการที่ (12) ที่มีความเหมาะสมในการหาความสัมพันธ์และทำนายค่าร้อยละการดูดซับสีของ RBBR ด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้สัก



ภาพที่ 24 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสีของ (มิลลิกรัมต่อลิตร) และพีเอช และ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยความเข้มข้นสีของ (มิลลิกรัมต่อลิตร) และความเร็วรอบในการเขย่า (รอบต่อนาที) ที่มีต่อร้อยละการดูดซับสีของ RBBR ด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้สัก

จากภาพที่ 24 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีอิทธิพลร่วมต่อสภาวะที่เหมาะสมของการดูดซับสีของ RBBR ด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้สัก โดยภาพที่ 24 (ก) แสดงถึงอิทธิพลร่วมกันระหว่างความเข้มข้นสีของ (มิลลิกรัมต่อลิตร) และพีเอช และภาพที่ 24 (ข) ระหว่างความเข้มข้นสีของ (มิลลิกรัมต่อลิตร) และความเร็วรอบในการเขย่า (รอบต่อนาที)

จากการพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยทั้งหมด ประกอบกับการพิจารณาการซ้อนทับแผนภาพคอนทัวร์ และทำนายค่าร้อยละการดูดซับของถ่านกัมมันต์จากไม้สัก สามารถเลือกสภาวะที่เหมาะสมที่สุดเพื่อนำมาทำการทดลองจริงอีกครั้งเพื่อยืนยันผลการทดลองและเพื่อหาอัตราการดูดซับที่ดีที่สุด โดยถ่านกัมมันต์จากไม้สักมีสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการดูดซับครั้งนี้คือ ความเข้มข้นสีของ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 11 ระยะเวลาในการเขย่า 270 นาที

ปริมาณถ่านกัมมันต์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร หรือ 5 กรัม และความเร็วยรอบในการเขย่า 50 รอบต่อนาที ร้อยละการดูดซับเท่ากับ 92.52 % และผลจากการทำนายที่ได้คือ 88.991 % ซึ่งลักษณะสารละลายสีข้อม RBBR ก่อนและหลังการดูดซับสามารถเปรียบเทียบให้เห็นดังภาพที่ 25



ภาพที่ 25 ความเข้มข้นสารละลายสีข้อม RBBR ก่อนและหลังการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้สัก

2.1.3 สภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีข้อม RBBR ด้วยถ่านกัมมันต์นอร์ิท ดังแสดงในตารางที่ 17

ตารางที่ 17 ร้อยละการดูดซับสีข้อม RBBR ด้วยถ่านกัมมันต์นอร์ิทจากการทดลองด้วยวิธีแบบแบตช์และจากการทำนายด้วยสมการถดถอย

ชุดการทดลอง	ปัจจัย					ร้อยละการดูดซับ	
	ความเข้มข้น		ระยะเวลา	ปริมาณ	ความเร็วยรอบ	การทดลอง	การทำนาย
	สีข้อม (มก./ล.)	พีเอช	เขย่า (นาที)	ตัวดูดซับ (% , w/v)	การเขย่า (รอบ/นาที)		
1	50	5	90	4	150	84.03	58.43
2	150	5	90	4	50	35.90	32.93
3	50	9	90	4	50	42.43	26.63
4	150	9	90	4	150	75.47	62.93
5	50	5	210	4	50	57.34	35.89
6	150	5	210	4	150	79.90	60.19
7	50	9	210	4	150	91.05	53.97
8	150	9	210	4	50	44.52	40.47

ตารางที่ 17 (ต่อ)

ชุดการ ทดลอง	ปัจจัย				ร้อยละการดูดซับ		
	ความเข้มข้น		ระยะเวลา		ความเร็วรอบ		การทำนาย
	สีข้อม (มก./ล.)	ฟิเอช	เขย่า (นาที)	ตัวดูดซับ (%, w/v)	การเขย่า (รอบ/นาที)	การทดลอง	
9	50	5	90	8	50	57.46	45.91
10	150	5	90	8	150	87.69	74.21
11	50	9	90	8	150	88.33	62.96
12	150	9	90	8	50	45.74	45.46
13	50	5	210	8	150	88.36	55.17
14	150	5	210	8	50	57.31	49.67
15	50	9	210	8	50	79.42	58.50
16	150	9	210	8	150	93.85	74.80
17	0	7	150	6	100	0	26.56
18	200	7	150	6	100	90.97	37.36
19	100	3	150	6	100	93.99	80.29
20	100	11	150	6	100	97.52	83.62
21	100	7	30	6	100	67.16	65.16
22	100	7	270	6	100	95.45	69.96
23	100	7	150	2	100	65.49	56.16
24	100	7	150	10	100	93.21	79.97
25	100	7	150	6	0	26.14	21.06
26	100	7	150	6	200	90.17	62.86
27	100	7	150	6	100	95.49	81.86
28	100	7	150	6	100	94.99	81.86
29	100	7	150	6	100	93.94	81.86
30	100	7	150	6	100	95.36	81.86
31	100	7	150	6	100	95.91	81.86
32	100	7	150	6	100	95.95	81.86

จากตารางที่ 17 นำร้อยละการดูดซับสีข้อมด้วยถ่านกัมมันต์นอร์ที่ได้ออกจากการทดลองทั้ง 32 ชุด ไปวิเคราะห์ด้วยวิธีทางสถิติโดยใช้ Multiple regression analysis (SPSS) ซึ่งได้ผลดังแสดงในตารางที่ 18

ตารางที่ 18 ค่าประมาณ (p -value) และการทดสอบสัมประสิทธิ์สมการถดถอยของร้อยละการ
ดูดซับสีย้อม RBBR ด้วยถ่านกัมมันต์นอร์อิท

พารามิเตอร์	สัมประสิทธิ์	p -value
(Constant)	- 33.371	0.791
X_1	0.954	0.003
X_2	- 9.257	0.457
X_4	90.719	0.668
X_5	1.179	0.008
X_1X_5	0.001	0.530
X_2X_3	0.042	0.103
X_2X_4	6.319	0.739
X_3X_5	- 0.001	0.514
X_3X_5	- 0.001	0.514
X_4X_5	- 0.200	0.600
X_1X_1	- 0.005	0.000
X_3X_3	- 0.001	0.267
X_4X_4	-86.790	0.223
X_5X_5	- 0.004	0.005
$R^2 = 0.791$		

จากตารางที่ 18 พบว่า ความเข้มข้นสีย้อม RBBR (X_1) และความเร็วรอบในการ
เขย่า (X_5) มีอิทธิพลต่อร้อยละการดูดซับอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง เนื่องจากค่า p น้อยกว่า 0.01 ($p < 0.01$)
เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับกับปัจจัยที่นำมาศึกษา สามารถสร้างตัวแทนของ
สมการถดถอย แผนภาพพื้นผิว และแผนภาพคอนทัวร์เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย ดัง
แสดงในภาพที่ 35 และจากค่า R^2 เท่ากับ 0.791 สามารถบ่งชี้ได้ว่าสมการถดถอยที่ใช้ในการทำนาย
ร้อยละการดูดซับสีย้อมมีความน่าเชื่อถือ เนื่องจากมีค่ามากกว่า 0.75 (Silva *et al*, 2004) โดยมี
รูปแบบสมการถดถอยลดรูป ดังนี้

$$Y = 0.954X_1 - 9.257X_2 + 90.719X_4 + 1.179X_5 + 0.001X_1X_5 + 0.042X_2X_3 + 6.319X_2X_4 \\ - 0.001X_3X_5 - 0.2X_4X_5 - 0.005X_1X_1 - 0.001X_3X_3 - 86.79X_4X_4 - 0.004X_5X_5 - \\ 33.371 \quad \text{----- (13)}$$

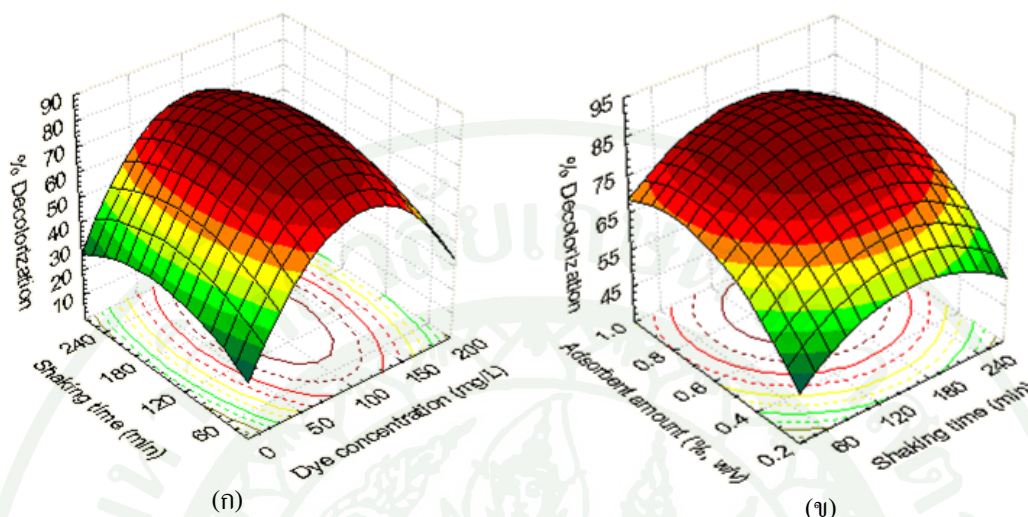
จากสมการที่ 13 สามารถทำนายร้อยละการดูดซับสีย้อมได้โดยการนำค่าสภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลอง มาแทนค่าในสมการที่ได้ สามารถทำนายค่าประสิทธิภาพในทุกๆ สภาวะการทดลองได้ล่วงหน้า ซึ่งผลการทำนายค่าร้อยละการดูดซับสีย้อมด้วยถ่านกัมมันต์นอร์ิท ดังแสดงในตารางที่ 17 จากนั้นทำการทดสอบความเหมาะสมของสมการที่ 13 ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 19 ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างค่าจากการทดลองและค่าจากการทำนาย ด้วยการวิเคราะห์ t-test พบว่า $t_{cal} = 6.4720 > t_{0.05,31} = 2.0395$ แสดงให้เห็นว่าค่าที่ได้จากการทดลองและค่าจากการทำนายแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ตารางที่ 19 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน และ Lack of fit ของสภาวะที่เหมาะสมของการดูดซับสีย้อม RBBR ด้วยถ่านกัมมันต์นอร์ิท

Source	Sum of Squares	df	Mean square	F value	p-value
Model	15273.3	13	1174.9	5.254	0.001
Linear	7963.06	4	1990.8	4.742	0.005
Quadratic	5861.3	4	1465.3	2.944	0.038
Interaction	8404.11	5	1680.8	4.011	0.008
Residual error	4025.19	18	223.622	-	-
Lack of fit	3329.581	11	187.7427	3.046	-
Pure error	695.609	7	99.373	-	-
Total	19298.5	31	-	-	-

จากตารางที่ 19 แสดงให้เห็นว่า $F \text{ value} = 5.254 > F_{0.05, (13, 18)} = 2.31$ และ $p\text{-value} = 0.001$ หมายความว่าโมเดลที่ใช้มีอย่างน้อยหนึ่งเทอมที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และผลการวิเคราะห์ Lack of fit แสดงให้เห็นว่า $F_{LOF} = 3.046 < F_{0.05, (11, 7)} = 3.60$ หมายความว่าสมการที่ (13) ไม่มี Lack of fit หรือสมการไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

($p < 0.05$) แสดงให้เห็นว่าไม่มีสมการหรือโมเดลอื่นนอกจากสมการที่ (13) ที่มีความเหมาะสมในการหาความสัมพันธ์และทำนายค่าร้อยละการดูดซับสีของ RBBR ด้วยถ่านกัมมันต์นอริท



ภาพที่ 26 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสีของ RBBR (มิลลิกรัมต่อลิตร) และระยะเวลาในการเขย่า (นาที) และ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการเขย่า (นาที) และปริมาณถ่านกัมมันต์ (ร้อยละโดยน้ำหนักต่อปริมาตร) ที่มีต่อร้อยละการดูดซับสีของ RBBR ด้วยถ่านกัมมันต์นอริท

จากภาพที่ 26 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีอิทธิพลร่วมต่อสภาวะที่เหมาะสมของการดูดซับสีของ RBBR ด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้สน โดยภาพที่ 26 (ก) แสดงถึงอิทธิพลร่วมกันระหว่างความเข้มข้นสีของ RBBR (มิลลิกรัมต่อลิตร) และระยะเวลาในการเขย่า (นาที) และภาพที่ 26 (ข) ระหว่างปัจจัยระยะเวลาในการเขย่า (นาที) และปริมาณถ่านกัมมันต์ (ร้อยละโดยน้ำหนักต่อปริมาตร)

จากการพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยทั้งหมดของถ่านกัมมันต์นอริท สามารถเลือกสภาวะที่เหมาะสมที่สุดเพื่อนำมาทำการทดลองจริงอีกครั้งเพื่อยืนยันผลการทดลอง และเพื่อหาอัตราการดูดซับที่ดีที่สุด โดยถ่านกัมมันต์นอริทมีสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการดูดซับครั้งนี้คือ ความเข้มข้นสีของ RBBR 150 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 12 ระยะเวลาในการเขย่า 270 นาที ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร หรือ 0.5 กรัม และความเร็วรอบในการเขย่า 110 รอบต่อนาที ร้อยละการดูดซับสีของ RBBR เท่ากับ 97.33 % และผลจากการทำนายที่ได้คือ 75.172 % ซึ่งลักษณะสารละลายสีของ RBBR ก่อนและหลังการดูดซับสามารถเปรียบเทียบให้เห็นดังภาพที่ 27



ภาพที่ 27 สารละลายสีข้อม RBBR ก่อนและหลังการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์นอร์ิท

จากการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีข้อม RBBR ด้วยถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ชนิด พบว่า ถ่านกัมมันต์นอร์ิทมีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงที่สุด โดยมีร้อยละการดูดซับเท่ากับ 97.33 โดยใช้ปริมาณตัวดูดซับ 0.5 กรัม ซึ่งน้อยกว่าปริมาณตัวดูดซับที่ใช้ในการดูดซับสีข้อมด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้สน และไม้สักถึง 10 เท่า รองลงมาคือถ่านกัมมันต์จากไม้สน และไม้สัก ซึ่งมีค่าร้อยละการดูดซับเท่ากับ 96.42 และ 92.52 ตามลำดับ โดยมีสภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับแตกต่างกันออกไป ดังแสดงในตารางที่ 20

ตารางที่ 20 ประสิทธิภาพ และสภาวะที่ดีที่สุดในการดูดซับสีข้อม RBBR ของตัวดูดซับทั้ง 3 ชนิด

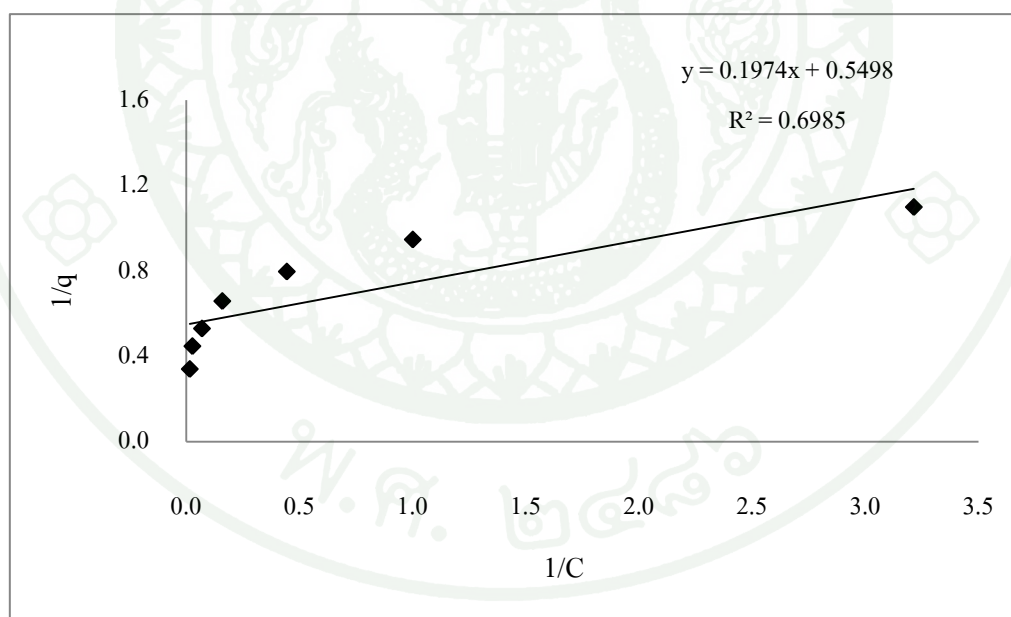
ตัวดูดซับ	สภาวะที่เหมาะสม				ร้อยละการดูดซับ	ประสิทธิภาพการดูดซับ (มก./ก.)
	ความเข้มข้นสีข้อม (มก./ล.)	ระยะเวลาพีเอช	ปริมาณตัวดูดซับ (กรัม)	ความเร็วรอบการเขย่า (รอบ/นาที)		
ถ่านกัมมันต์จากไม้สน	140	11	270	5	150	96.42
ถ่านกัมมันต์จากไม้สัก	50	11	270	5	50	92.52
ถ่านกัมมันต์นอร์ิท	150	12	270	0.5	110	97.33

จากตารางที่ 20 พบว่า ถ่านกัมมันต์นอร์ทมีประสิทธิภาพในการดูดซับสีข้อมดีที่สุดคือ 14.60 มิลลิกรัมสีข้อมต่อกรัมถ่านกัมมันต์หนึ่งกรัม (มิลลิกรัมต่อกรัม) รองลงมาคือถ่านกัมมันต์จากไม้สน และไม้สัก มีประสิทธิภาพการดูดซับเท่ากับ 1.35 และ 0.46 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ เนื่องจากประสิทธิภาพการดูดซับสีข้อมส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับปริมาณพื้นที่ผิวจำเพาะ

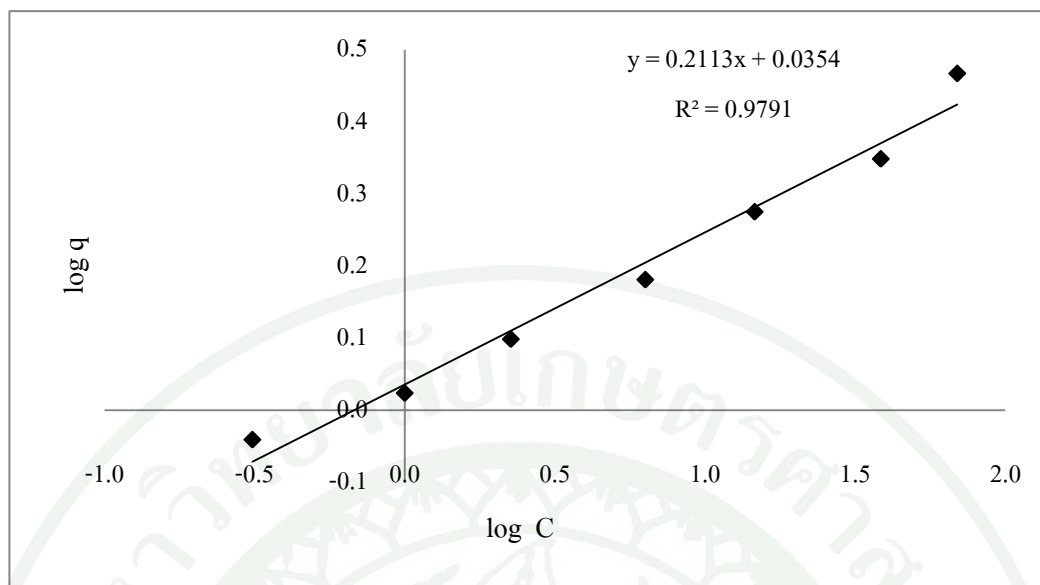
3. ผลการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับของถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ชนิด

ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ และไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช ได้จากการทดลองตามสภาวะเหมาะสมที่ศึกษาได้ และแปรผันปริมาณตัวดูดซับตามวิธีการข้อที่ 3.4

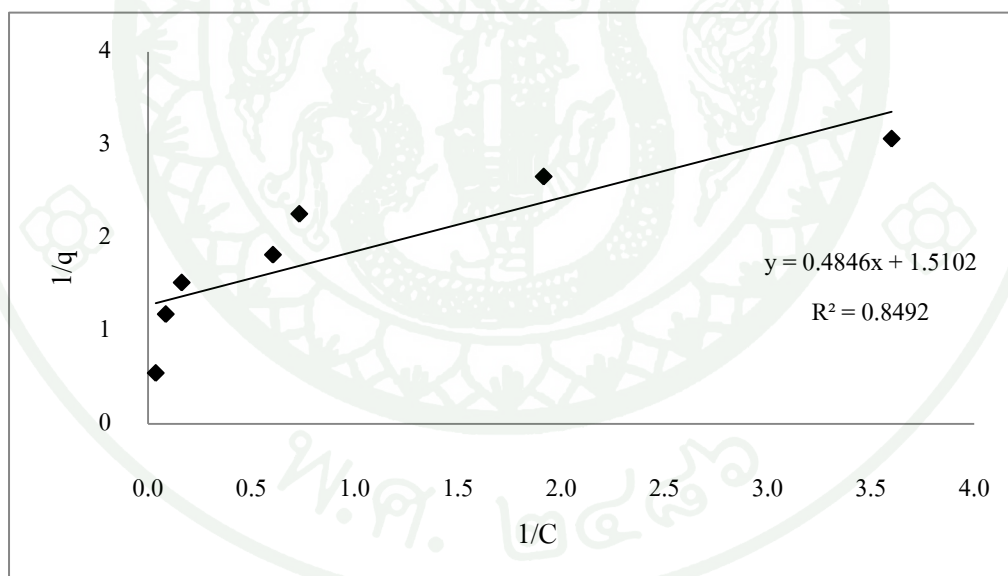
ผลการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้สน ไม้สัก และถ่านกัมมันต์ทางการค้าแบบแลงเมียร์ ดังแสดงในภาพที่ 28, 30 และ 32 ตามลำดับ แบบฟรุนดลิชดังแสดงในภาพที่ 29, 31 และ 33 ตามลำดับ



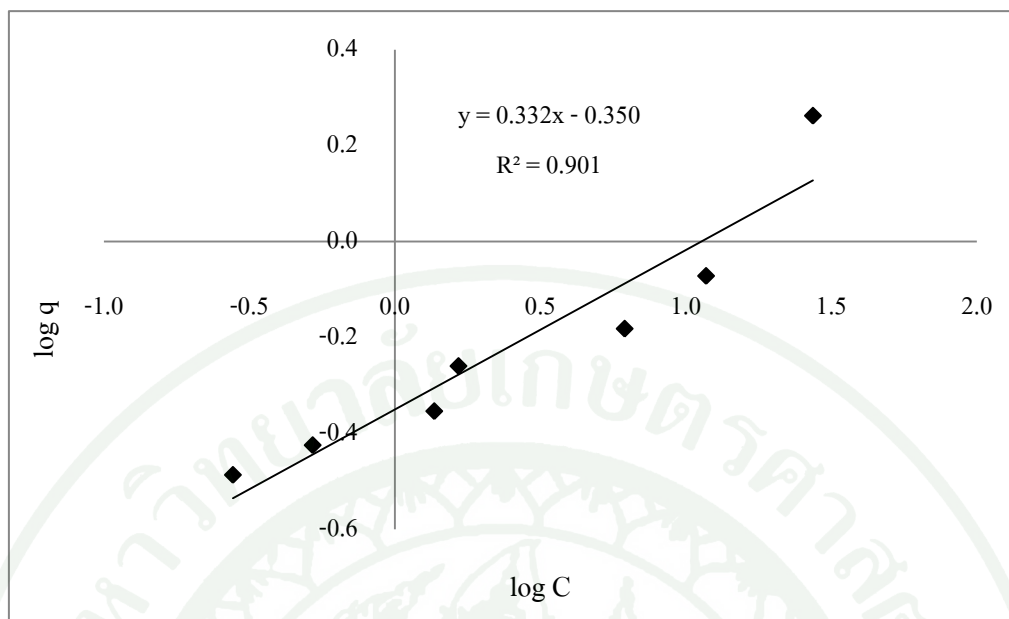
ภาพที่ 28 ไอโซเทอร์มการดูดซับสีข้อม RBBR แบบแลงเมียร์ ด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้สน



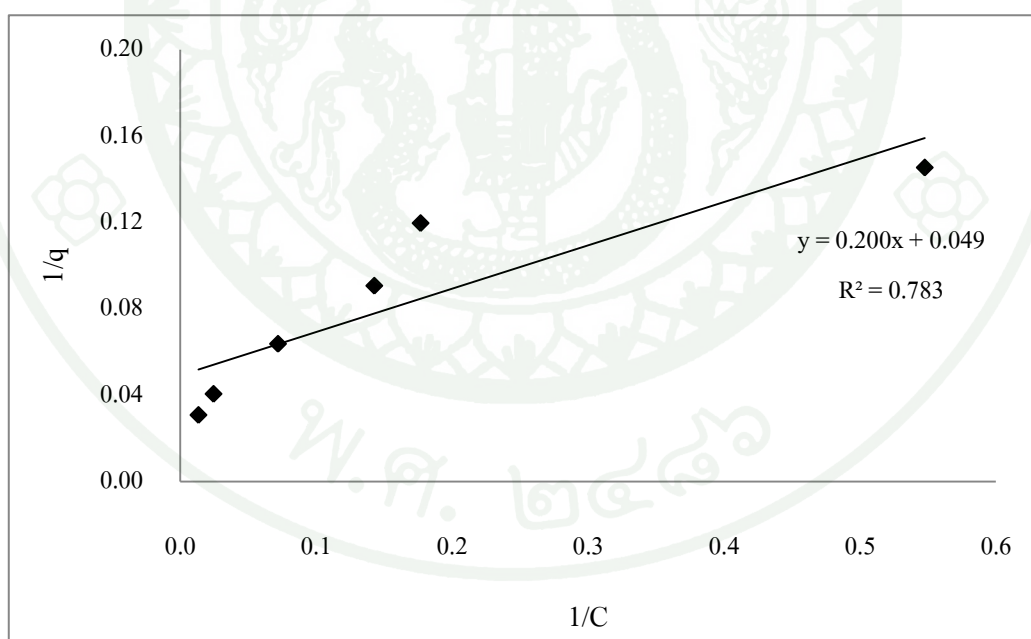
ภาพที่ 29 ไอโซเทอร์มการดูดซับสีย้อม RBBR แบบฟรุนดิช ด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้สน



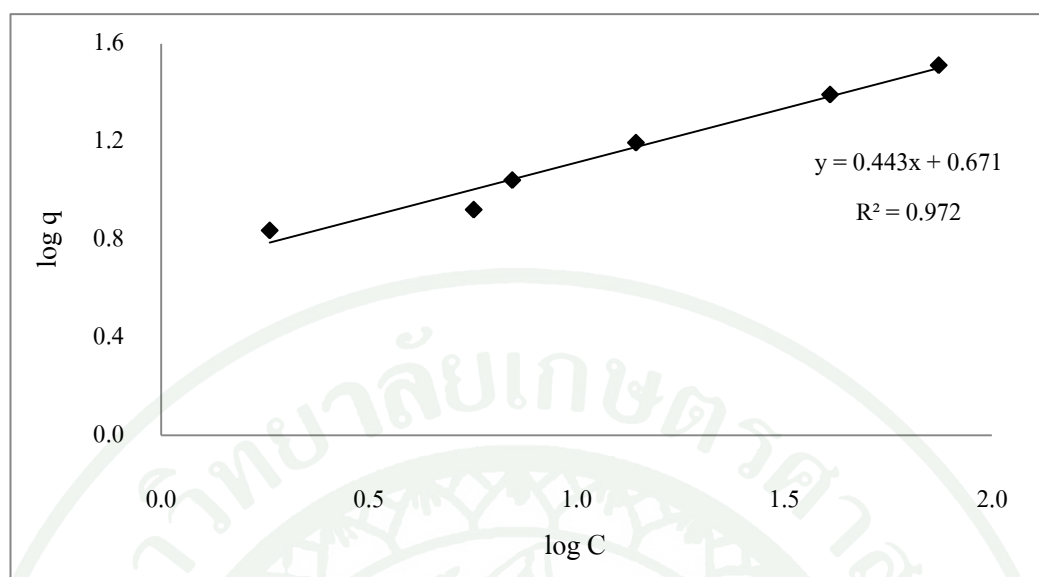
ภาพที่ 30 ไอโซเทอร์มการดูดซับสีย้อม RBBR แบบแลงเมียร์ ด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้สัก



ภาพที่ 31 ไอโซเทอร์มการดูดซับสีย้อม RBBR แบบฟรุนดิช ด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้สัก



ภาพที่ 32 ไอโซเทอร์มการดูดซับสีย้อม RBBR แบบแลงเมียร์ ด้วยถ่านกัมมันต์นอร์ท



ภาพที่ 33 ไอโซเทอร์มการดูดซับสี่ข้อม RBBR แบบฟรุณดิช ด้วยถ่านกัมมันต์นอร์ท

จากภาพที่ 28-33 พบว่าการดูดซับสี่ข้อม RBBR ด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้สน ไม้สัก และ ถ่านกัมมันต์นอร์ท เป็นไปตามทฤษฎีไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุณดิชทั้งหมด เนื่องจากค่า R^2 มีค่ามากกว่าไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ แสดงให้เห็นว่าพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ชนิดไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอดส่งผลให้มีพื้นผิวปริมาณจำกัดในการดูดซับ แต่ตัวถูกดูดซับสามารถเกิดการซ้อนทับกันได้ โดยสมการและผลการคำนวณค่าต่างๆ จากสมการแบบฟรุณดิช ดังแสดงในตารางที่ 21

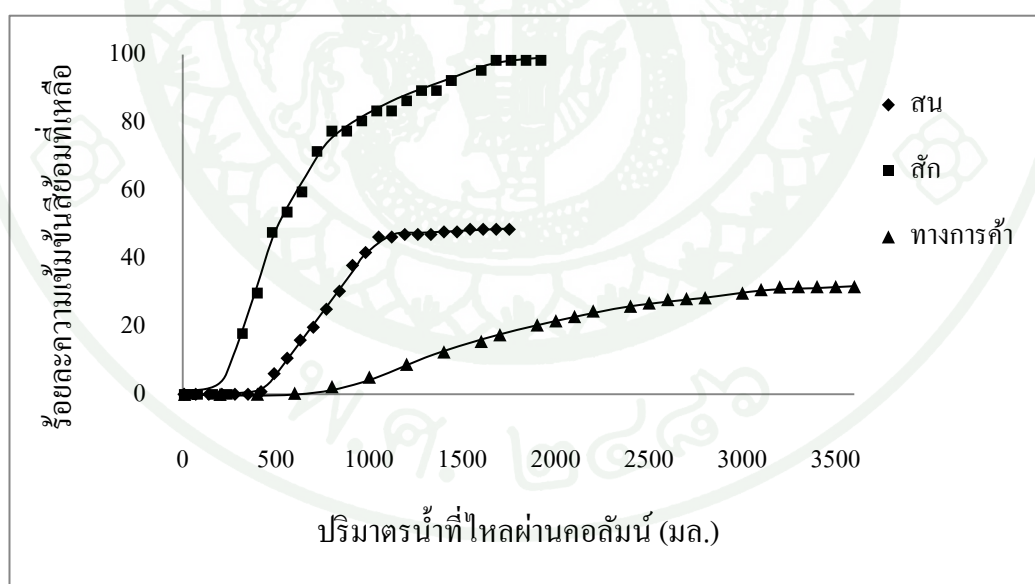
ตารางที่ 21 สมการและค่าของเทอมของไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุณดิช ของถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ชนิด

ตัวดูดซับ	สมการ	R^2	$1/n$	n	K
ถ่านกัมมันต์จากไม้สน	$y = 0.211x + 0.035$	0.9791	0.2113	4.73	1.08
ถ่านกัมมันต์จากไม้สัก	$y = 0.332x - 0.350$	0.9010	0.3329	3.00	3.12
ถ่านกัมมันต์นอร์ท	$y = 0.443x + 0.671$	0.9720	0.4432	2.26	4.69

จากตารางที่ 21 พบว่า ไอโซเทอร์มแบบฟรุนดิชของถ่านกัมมันต์จากไม้สน ไม้สัก และ ถ่านกัมมันต์นอร์ท มีค่า $1/n$ เท่ากับ 0.2113, 0.3329 และ 0.4432 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าพื้นผิว ของถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ชนิด มีปริมาณจำกัดในการดูดซับ เนื่องจาก $1/n$ มีค่าน้อยกว่า 1 แต่ยังอยู่ใน เกณฑ์ที่ยอมรับได้ เนื่องจากมีค่า n เท่ากับ 4.73, 3.00 และ 2.26 ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่า 1 (อยู่ใน ช่วง 1-10) (Trayball, 1980) และค่า K ของถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ชนิด เท่ากับ 1.08, 3.12 และ 4.69 ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่า 1 แสดงให้เห็นว่าโมเลกุลสีย้อม RBBR ถูกดูดซับปริมาณมากบนพื้นผิว ของถ่านกัมมันต์

3. ผลจากการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม RBBR แบบต่อเนื่อง

จากการทดลองตามวิธีการข้อที่ 5. สามารถหาจุดเริ่มหมดสภาพ (Break through point) และ จุดหมดสภาพ (Exhaustion point) โดยถ่านกัมมันต์จากไม้สน ไม้สัก และถ่านกัมมันต์นอร์ทได้ผล การทดลองดังแสดงในภาพที่ 34 และตารางที่ 22 ซึ่งถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ชนิด วัดอัตราการไหลได้ เท่ากับ 7, 8 และ 10 มิลลิลิตรต่อนาที ตามลำดับ



ภาพที่ 34 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ (มล.) แบบต่อเนื่อง กับร้อยละความเข้มข้นสีย้อมที่เหลือของการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ชนิด

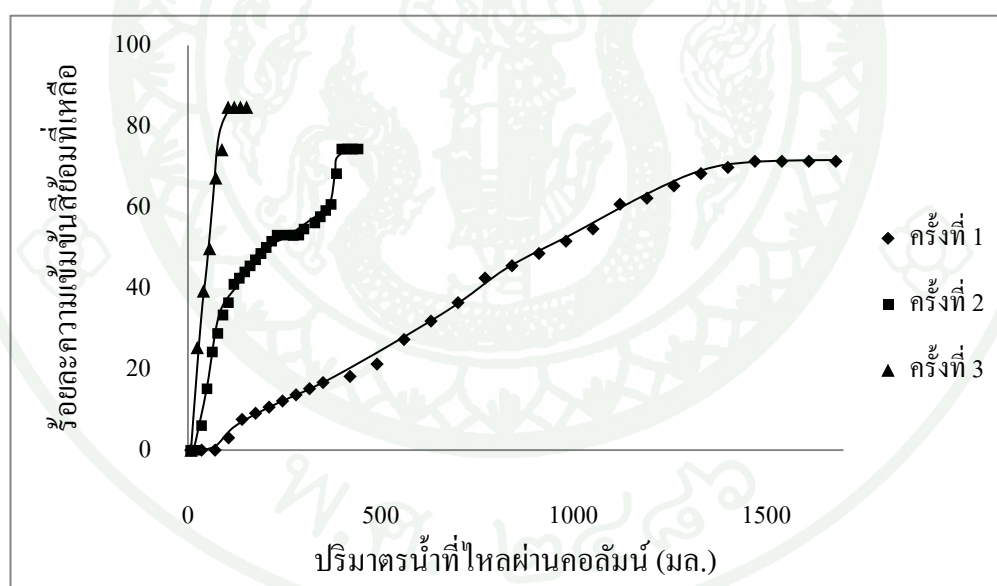
ตารางที่ 22 ร้อยละความเข้มข้นสีข้อมที่เหลือง หลังผ่านการดูดซับแบบต่อเนื่องด้วยถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ชนิด

ถ่านกัมมันต์จากไม้สน		ถ่านกัมมันต์จากไม้สัก		ถ่านกัมมันต์ถ่านอริท	
ปริมาณน้ำที่ ไหลผ่าน คอลัมน์ (มล.)	ร้อยละความ เข้มข้นที่เหลือง	ปริมาณน้ำที่ ไหลผ่าน คอลัมน์ (มล.)	ร้อยละความ เข้มข้นที่เหลือง	ปริมาณน้ำที่ ไหลผ่าน คอลัมน์ (มล.)	ร้อยละความ เข้มข้นที่เหลือง
7	0	8	0	10	0
70	0	40	0	200	0
140	0	80	0	400	0.05
210	0	160	0	600	0.32
280	0	240	0	800	2.26
350	0	320	17.87	1,000	5.05
420	0.76	400	29.79	1,200	8.84
490	6.07	480	47.66	1,400	12.47
560	10.62	560	53.61	1,600	15.57
630	15.94	640	59.57	1,700	17.52
700	19.73	720	71.49	1,900	20.41
770	25.04	800	77.44	2,000	21.62
840	30.35	880	77.44	2,100	22.88
910	37.94	960	80.42	2,200	24.52
980	41.74	1,040	83.40	2,400	25.92
1,050	46.29	1,120	83.40	2,500	26.87
1,120	46.29	1,200	86.38	2,600	27.88
1,190	47.05	1,280	89.36	2,700	28.15
1,260	47.05	1,360	89.36	2,800	28.41
1,330	47.05	1,440	92.34	3,000	29.78
1,400	47.81	1,520	95.31	3,100	30.81
1,470	47.81	1,600	95.31	3,200	31.58
1,540	48.57	1,680	98.29	3,300	31.67
1,610	48.57	1,760	98.29	3,400	31.67
1,680	48.57	1,840	98.29	3,500	31.67
1,750	48.57	1,920	98.29	3,600	31.67

จากผลการทดลอง พบว่า ประสิทธิภาพการดูดซับสีของ RBBR มีค่าลดลงเมื่อปริมาณน้ำเพิ่มมากขึ้น โดยถ่านกัมมันต์จากไม้สน ไม้สัก และถ่านกัมมันต์นอร์ทสามารถดูดซับสีได้ดีในช่วง 490, 320 และ 1,000 มิลลิลิตร ซึ่งเป็นปริมาตรที่ตัวดูดซับเริ่มหมดสภาพ และตัวดูดซับหมดประสิทธิภาพเมื่อปริมาณน้ำไหลผ่านคอลัมน์ 1,540, 1,680 และ 3,300 มิลลิลิตร โดยมีค่าร้อยละความเข้มข้นที่เหลือหลังการดูดซับ เท่ากับ 48.57, 98.29 และ 31.67 ตามลำดับ

4. ผลจากการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีของ RBBR แบบต่อเนื่อง

จากการทดลองตามวิธีการข้อที่ 6. เมื่อนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ (มล.) แบบต่อเนื่อง กับร้อยละความเข้มข้นสีของที่เหลือ ในการฟื้นฟูตัวดูดซับทั้ง 3 ชนิด จำนวน 3 ครั้ง โดยผลการทดลองด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้สน ดังแสดงในภาพที่ 35 และตารางที่ 23 ถ่านกัมมันต์จากไม้สัก ดังแสดงในภาพที่ 36 และตารางที่ 24 ถ่านกัมมันต์นอร์ท ดังแสดงในภาพที่ 37 และตารางที่ 25



ภาพที่ 35 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ (มล.) แบบต่อเนื่อง กับร้อยละความเข้มข้นสีของที่เหลือ ในการฟื้นฟูถ่านกัมมันต์จากไม้สน 3 ครั้ง

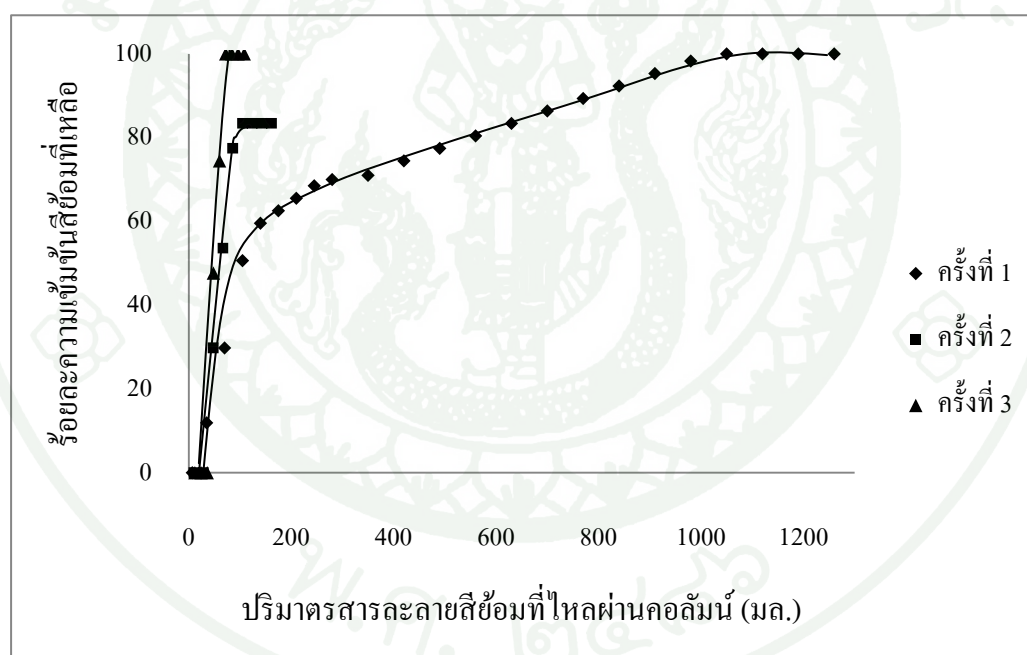
ตารางที่ 23 ร้อยละความเข้มข้นสีข้อมที่เหลืองในการฟื้นฟูถ่านกัมมันต์จากไม้สน

ฟื้นฟูครั้งที่ 1		ฟื้นฟูครั้งที่ 2		ฟื้นฟูครั้งที่ 3	
ปริมาณน้ำที่ ไหลผ่าน คอลัมน์ (มล.)	ร้อยละความ เข้มข้นที่เหลือง	ปริมาณน้ำที่ ไหลผ่าน คอลัมน์ (มล.)	ร้อยละความ เข้มข้นที่เหลือง	ปริมาณน้ำที่ ไหลผ่าน คอลัมน์ (มล.)	ร้อยละความ เข้มข้นที่เหลือง
7	0	7	0	8	0
35	0	21	0	24	25.35
70	0	35	6.07	40	39.31
105	3.04	49	15.18	56	49.78
140	7.59	63	24.28	72	67.23
175	9.11	77	28.84	88	74.21
210	10.62	91	33.39	104	84.69
245	12.14	105	36.42	120	84.69
280	13.66	119	40.98	136	84.69
315	15.18	133	42.49	152	84.69
350	16.69	147	44.01	-	-
420	18.21	161	45.53	-	-
490	21.25	175	47.05	-	-
560	27.32	189	48.57	-	-
630	31.87	203	50.08	-	-
700	36.42	217	51.60	-	-
770	42.49	231	53.12	-	-
840	45.53	259	53.12	-	-
910	48.57	273	53.12	-	-
980	51.60	287	53.12	-	-
1,050	54.64	301	54.64	-	-
1,120	60.71	329	56.15	-	-
1,190	62.22	343	57.67	-	-
1,260	65.26	357	59.19	-	-
1,330	68.30	371	60.71	-	-
1,400	69.81	385	68.30	-	-
1,470	71.33	399	74.37	-	-
1,540	71.33	413	74.37	-	-
1,610	71.33	427	74.37	-	-

ตารางที่ 23 (ต่อ)

ฟื้นฟูครั้งที่ 1		ฟื้นฟูครั้งที่ 2		ฟื้นฟูครั้งที่ 3	
ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ (มล.)	ร้อยละความเข้มข้นที่เหลือ	ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ (มล.)	ร้อยละความเข้มข้นที่เหลือ	ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ (มล.)	ร้อยละความเข้มข้นที่เหลือ
1,680	71.33	441	74.37	-	-

จากการทดลอง พบว่า ประสิทธิภาพในการฟื้นฟูน้ำมันจากไม้สนครั้งที่ 2 และ 3 จะลดลงจากครั้งแรก โดยตัวดูดซับหมดสภาพการใช้งานที่ปริมาตร 1,470, 399 และ 104 มิลลิลิตร โดยมีร้อยละความเข้มข้นที่ยอมรับที่เหลือหลังการดูดซับเท่ากับ 71.33, 74.37 และ 84.69 ตามลำดับ อัตราการไหลในการทดลองฟื้นฟูน้ำมันทั้ง 3 ครั้ง เท่ากับ 7, 7 และ 8 มิลลิลิตรต่อนาที

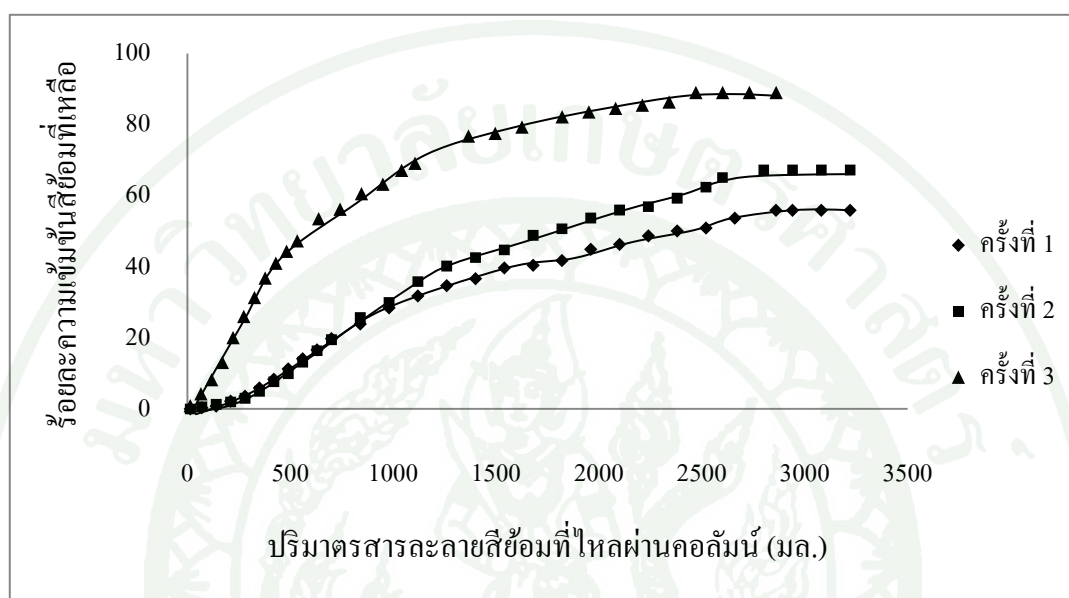


ภาพที่ 36 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ (มล.) แบบต่อเนื่อง กับร้อยละความเข้มข้นที่ยอมรับที่เหลือ ในการฟื้นฟูน้ำมันจากไม้สน 3 ครั้ง

ตารางที่ 24 ร้อยละความเข้มข้นสีข้อมที่เหลือในการฟื้นฟูถ่านกัมมันต์จากไม้สัก

ฟื้นฟูครั้งที่ 1		ฟื้นฟูครั้งที่ 2		ฟื้นฟูครั้งที่ 3	
ปริมาณน้ำที่ ไหลผ่าน คอลัมน์ (มล.)	ร้อยละ ความเข้มข้น ที่เหลือ	ปริมาณน้ำที่ ไหลผ่าน คอลัมน์ (มล.)	ร้อยละ ความเข้มข้น ที่เหลือ	ปริมาณน้ำที่ ไหลผ่าน คอลัมน์ (มล.)	ร้อยละ ความเข้มข้น ที่เหลือ
7	0	9.5	0	12	0
35	11.91	28.5	0	24	0
70	29.79	47.5	29.79	36	0
105	50.64	66.5	53.61	48	47.66
140	59.57	85.5	77.44	60	74.46
175	62.55	104.5	83.40	72	100
210	65.53	123.5	83.40	84	100
245	68.51	142.5	83.40	96	100
280	70.00	161.5	83.40	108	100
350	71.49	-	-	-	-
420	74.46	-	-	-	-
490	77.44	-	-	-	-
560	80.42	-	-	-	-
630	83.40	-	-	-	-
700	86.38	-	-	-	-
770	89.36	-	-	-	-
840	92.34	-	-	-	-
910	95.31	-	-	-	-
980	98.29	-	-	-	-
1,050	100	-	-	-	-
1,120	100	-	-	-	-
1,190	100	-	-	-	-
1,260	100	-	-	-	-

จากการทดลอง พบว่า ประสิทธิภาพในการฟื้นฟูผ่านกัมมันต์จากไม้สักครั้งที่ 2 และ 3 จะลดลงจากครั้งแรก โดยตัวดูดซับหมดสภาพการใช้งานที่ปริมาตร 1,050, 104.5 และ 72 มิลลิลิตร โดยมีร้อยละความเข้มข้นสีข้อมที่เหลือหลังการดูดซับเท่ากับ 100, 83.4 และ 100 ตามลำดับ อัตราการไหลในการทดลองฟื้นฟูผ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ครั้ง เท่ากับ 7, 9.5 และ 12 มิลลิลิตรต่อนาที



ภาพที่ 37 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ (มล.) แบบต่อเนื่อง กับร้อยละความเข้มข้นสีข้อมที่เหลือ ในการฟื้นฟูผ่านกัมมันต์นอร์ท 3 ครั้ง

ตารางที่ 25 ร้อยละความเข้มข้นสีข้อมที่เหลือในการฟื้นฟูผ่านกัมมันต์นอร์ท

ฟื้นฟูครั้งที่ 1		ฟื้นฟูครั้งที่ 2		ฟื้นฟูครั้งที่ 3	
ปริมาตรน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ (มล.)	ร้อยละความเข้มข้นสีข้อมที่เหลือ	ปริมาตรน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ (มล.)	ร้อยละความเข้มข้นสีข้อมที่เหลือ	ปริมาตรน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ (มล.)	ร้อยละความเข้มข้นสีข้อมที่เหลือ
14	0	14	0	13	0.88
70	0.34	70	0.60	65	4.23
140	0.78	140	1.29	117	8.20
210	2.17	210	1.97	169	13.05
280	3.56	280	3.00	221	20.03
350	5.89	350	4.98	273	25.98
420	8.35	420	7.65	325	31.31

ตารางที่ 25 (ต่อ)

พื้นฟูครั้งที่ 1		พื้นฟูครั้งที่ 2		พื้นฟูครั้งที่ 3	
ปริมาณน้ำที่ ไหลผ่าน คอลัมน์ (มล.)	ร้อยละ ความเข้มข้น ที่เหลือ	ปริมาณน้ำที่ ไหลผ่าน คอลัมน์ (มล.)	ร้อยละ ความเข้มข้น ที่เหลือ	ปริมาณน้ำที่ ไหลผ่าน คอลัมน์ (มล.)	ร้อยละ ความเข้มข้น ที่เหลือ
490	11.26	490	9.91	377	36.78
560	14.10	560	13.19	429	40.96
630	16.62	630	16.40	481	44.31
700	19.78	700	19.48	533	47.25
840	23.88	840	25.70	637	53.47
980	28.43	980	29.94	741	56.14
1,120	31.78	1,120	35.83	845	60.52
1,260	34.68	1,260	40.20	949	63.18
1,400	36.64	1,400	42.60	1,040	67.08
1,540	39.67	1,540	44.72	1,105	69.06
1,680	40.42	1,680	48.82	1,365	76.72
1,820	41.75	1,820	50.67	1,495	77.48
1,960	44.91	1,960	53.68	1,625	79.25
2,100	46.30	2,100	55.93	1,820	82.13
2,240	48.69	2,240	56.89	1,950	83.50
2,380	50.08	2,380	59.28	2,080	84.52
2,520	50.90	2,520	62.36	2,210	85.41
2,660	53.68	2,660	65.10	2,340	86.30
2,800	55.89	2,800	67.22	2,470	88.97
2,940	55.89	2,940	67.22	2,600	88.97
3,080	55.89	3,080	67.22	2,730	88.97
3,220	55.89	3,220	67.22	2,860	88.97

จากการทดลอง พบว่า ประสิทธิภาพในการฟื้นฟูน้ำมันดิบครั้งที่ 2 และ 3 จะลดลงจากครั้งแรก โดยตัวดูดซับหมดสภาพการใช้งานที่ปริมาตร 2,800, 2,800 และ 2,470 มิลลิลิตร โดยมีร้อยละความเข้มข้นที่ยอมรับที่เหลือหลังการดูดซับเท่ากับ 71.33, 74.37 และ 84.69 ตามลำดับ อัตราการไหลในการทดลองฟื้นฟูน้ำมันดิบทั้ง 3 ครั้ง เท่ากับ 14, 14 และ 13 มิลลิลิตรต่อนาที

4. ผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีข้อมในน้ำเสียจากระบบการฟอกข้อม

ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีข้อมในน้ำเสียจากระบบการฟอกข้อม โดยนำตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงาน ดังแสดงในภาพที่ 38 มาทำการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับจากแบบแบดซ์แบบต่อเนื่อง และการลดพารามิเตอร์ เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรม ตามวิธีการทดลองในข้อ 8.



ภาพที่ 38 ลักษณะน้ำเสียจากระบบการฟอกข้อม

4.1 ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์พื้นฐานทั้งหมด 6 พารามิเตอร์ ก่อนการดูดซับ ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 26

ตารางที่ 26 ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพตัวอย่างน้ำเสีย และค่ามาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม และนิคมอุตสาหกรรม

พารามิเตอร์	น้ำเสีย	ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม และนิคมอุตสาหกรรม
พีเอช	11.56	5.5 - 9.0
สีข้อม RBBR (มิลลิกรัมต่อลิตร)	1,358.28	ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ
TDS (มิลลิกรัมต่อลิตร)	40,956	ไม่เกิน 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร
SS (มิลลิกรัมต่อลิตร)	4,856	ไม่เกิน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางที่ 26 (ต่อ)

พารามิเตอร์	น้ำเสีย	ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งโรงงาน อุตสาหกรรม และนิคมอุตสาหกรรม
TS (มิลลิกรัมต่อลิตร)	45,812	ไม่ได้กำหนด
BOD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	467.2	ไม่เกิน 20 มิลลิกรัมต่อลิตร
COD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	1,168	ไม่เกิน 120 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากตารางที่ 26 พบว่า พารามิเตอร์ทั้งหมดของน้ำเสียมีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานกำหนด

4.2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีของแบบเบดซ์ โดยการปรับ สภาวะตามสภาวะที่เหมาะสมตามผลการทดลองในข้อที่ 2.1 และไม่ปรับสภาพน้ำตัวอย่าง ผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 27

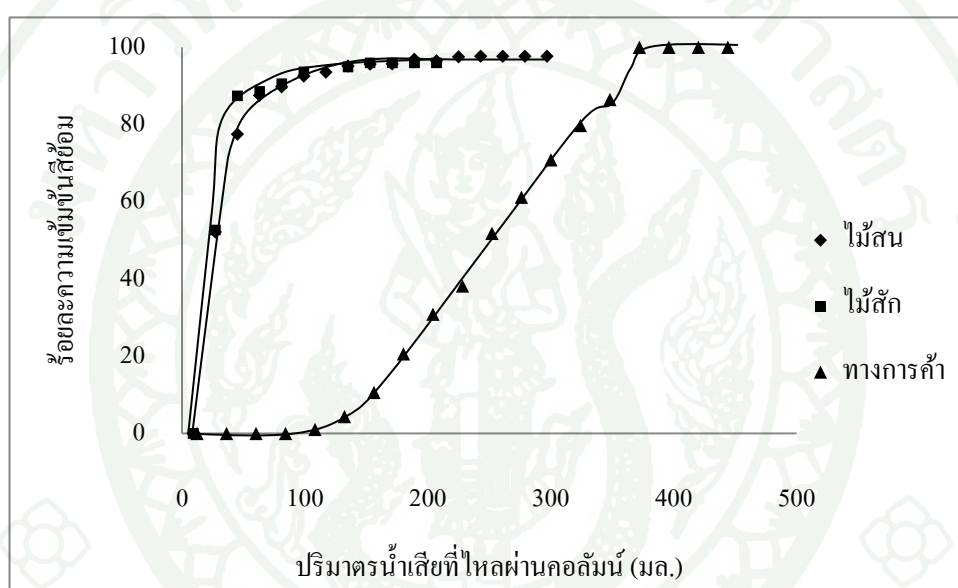
ตารางที่ 27 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับของน้ำเสียที่ผ่านการปรับ และไม่ปรับสภาพ

ตัวดูดซับ	ไม่ปรับสภาพน้ำเสีย			ปรับสภาพน้ำเสีย		
	ความเข้มข้น สี ที่เหลือ (มก./ล.)	ร้อยละ การ ดูดซับ	ประสิทธิภาพ การดูดซับ (มก./ก.)	ความเข้มข้น สี ที่เหลือ (มก./ล.)	ร้อยละ การ ดูดซับ	ประสิทธิภาพ การดูดซับ (มก./ก.)
ถ่านกัมมันต์ จากไม้สน	398.06	71.83	9.76	390.54	73.52	9.99
ถ่านกัมมันต์ จากไม้สัก	445.38	68.49	9.30	444.30	69.88	9.49
ถ่านกัมมันต์ นอริท	323.87	76.11	103.38	200.00	86.44	117.41

จากตารางที่ 27 พบว่า ประสิทธิภาพการดูดซับสีของในน้ำเสียที่ปรับสภาพพิเศษมีประสิทธิภาพดีกว่าน้ำเสียที่ไม่ผ่านการปรับสภาพเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังนั้น การทดลองศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีของในน้ำเสียแบบต่อเนื่องในขั้นตอนต่อไปจึงทดลองโดยไม่มีการปรับ

สภาพน้ำเสีย เพื่อง่ายต่อการประยุกต์ใช้ถ่านกัมมันต์ในการบำบัดน้ำเสียจริง โดยถ่านกัมมันต์ชนิดนี้มีประสิทธิภาพการดูดซับสีข้อมในน้ำเสียที่ไม่มีการปรับสภาพดีที่สุด คือ สามารถดูดซับสีข้อมได้ 103 มิลลิกรัมต่อกรัม รองลงมาคือถ่านกัมมันต์จากไม้สนและไม้สัก สามารถดูดซับสีข้อม 9.76 และ 9.30 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

4.4 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีข้อมในน้ำเสียโดยวิธีการไหลแบบต่อเนื่อง ตามวิธีการทดลองในข้อ 8. โดยไม่มีการปรับสภาพน้ำเสีย ได้ผลการศึกษาดังแสดงในภาพที่ 39 และตารางที่ 28



ภาพที่ 39 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ (มล.) แบบต่อเนื่อง กับร้อยละความเข้มข้นสีข้อมที่เหลือ ของการดูดซับสีข้อมในน้ำเสียด้วยถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ชนิด

ตารางที่ 28 ร้อยละความเข้มข้นสีข้อมที่เหลืองในน้ำเสีย หลังผ่านการดูดซับแบบต่อเนื่องด้วยถ่าน
กัมมันต์ทั้ง 3 ชนิด

ถ่านกัมมันต์จากไม้สน		ถ่านกัมมันต์จากไม้สัก		ถ่านกัมมันต์ถ่านอริท	
ปริมาณน้ำที่ ไหลผ่าน คอลัมน์ (มล.)	ร้อยละความ เข้มข้นที่เหลือง	ปริมาณน้ำที่ ไหลผ่าน คอลัมน์ (มล.)	ร้อยละความ เข้มข้นที่เหลือง	ปริมาณน้ำที่ ไหลผ่าน คอลัมน์ (มล.)	ร้อยละความ เข้มข้นที่เหลือง
9	0	9	0	12	0
27	52.18	27	52.66	36	0
45	77.52	45	87.41	60	0
63	87.57	63	88.60	84	0
81	89.79	81	90.58	108	1.05
99	92.56	99	93.59	132	4.37
117	93.59	117	93.35	156	10.63
135	95.17	135	94.93	180	20.62
153	95.65	153	95.96	204	30.88
171	95.73	171	95.96	228	38.19
189	96.91	189	95.96	252	51.82
207	96.52	207	95.96	276	61.18
225	97.55	-	-	300	70.86
243	97.70	-	-	324	79.75
261	97.70	-	-	348	86.49
279	97.70	-	-	372	100
297	97.70	-	-	396	100
-	-	-	-	420	100
-	-	-	-	444	100

จากการทดลอง พบว่า ประสิทธิภาพการดูดซับสีข้อมในน้ำเสียมีค่าลดลงเมื่อปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น โดยถ่านกัมมันต์จากไม้สน ไม้สัก และถ่านกัมมันต์ถ่านอริทสามารถดูดซับสีข้อมได้ดีในช่วง 27, 27 และ 108 มิลลิลิตร ซึ่งเป็นปริมาตรที่ตัวดูดซับเริ่มหมดสภาพ และตัวดูดซับหมดประสิทธิภาพเมื่อปริมาณน้ำเสียไหลผ่านคอลัมน์ 243, 153 และ 372 มิลลิลิตร โดยมีค่าร้อยละความเข้มข้นที่เหลืองหลังการดูดซับ เท่ากับ 97.70, 95.96 และ 100 ตามลำดับ โดยถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ชนิด มีอัตราการไหล เท่ากับ 9, 9 และ 12 มิลลิลิตรต่อนาที ตามลำดับ

4.5 ทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์พื้นฐานทั้งหมด 6 พารามิเตอร์ ในน้ำเสียภายหลังการดูดซับด้วยวิธีการไหลแบบต่อเนื่อง ดังนี้ พีเอช (pH), ของแข็งทั้งหมดที่ละลายในน้ำ (Total dissolved solids), ของแข็งแขวนลอยรวม (Total suspended solids), ของแข็งทั้งหมด (Total solids), บีโอดี (Biochemical oxygen demand) และซีโอดี (Chemical oxygen demand) ผลการศึกษาดังตาราง ที่ 29

ตารางที่ 29 ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ในน้ำเสียภายหลังการดูดซับแบบต่อเนื่อง

พารามิเตอร์	ก่อนดูดซับ	หลังดูดซับ		
		ไม้สน	ไม้สัก	ทางการค้า
พีเอช	11.56	10.57	10.78	10.67
ดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	1,358.28	1,327.10	1,303.44	224.95
TDS (มิลลิกรัมต่อลิตร)	40,956	35,943	32,567	27,249
SS (มิลลิกรัมต่อลิตร)	4,856	4,139	3,548	3,347
TS (มิลลิกรัมต่อลิตร)	45,812	40,082	36,115	30,596
BOD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	467.2	192	384	73.6
COD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	1,168	480	960	184

จากตารางที่ 29 พบว่า น้ำเสียหลังการดูดซับมีคุณภาพน้ำที่ดีขึ้น สังเกตได้จากค่าพารามิเตอร์ทุกค่าลดลงจากค่าก่อนดูดซับ เนื่องจากมลสารต่างๆ ที่อยู่ในน้ำเสียสามารถดูดติดกับตัวดูดซับได้ อย่างไรก็ตาม น้ำหลังการดูดซับยังมียุณภาพไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรม และนิคมอุตสาหกรรม

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม RBBR ของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากไม้สนและไม้สักในประเทศไทย ทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพการดูดซับ และสถานะต่างๆ ที่เหมาะสมต่อการดูดซับทั้งแบบแบดซ์และแบบต่อเนื่อง และสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม และห้องปฏิบัติการได้ และเพื่อให้ทราบถึงประสิทธิภาพการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในระดับงานวิจัยนี้เปรียบเทียบกับถ่านชนิดอื่นๆ จึงนำประสิทธิภาพถ่านกัมมันต์ที่นำมาเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์นอร์ทซึ่งมีประสิทธิภาพสูง เพราะมีกระบวนการผลิตและวัตถุดิบที่ได้มาตรฐาน และมีความแน่นอนสูง

1. ผลการวิเคราะห์ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์จากไม้สน ไม้สัก และถ่านกัมมันต์นอร์ท ด้วยเครื่อง SEM มีค่าเท่ากับ 118.3, 0.58 และ 831.3 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ พบว่า ถ่านกัมมันต์นอร์ทมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากที่สุด รองลงมาคือถ่านกัมมันต์จากไม้สน และไม้สัก ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม RBBR จากการทดลองแบบแบดซ์ ด้วย RSM ซึ่งมีค่าการดูดซับ 14.60, 1.35 และ 0.46 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

2. ผลของความเข้มข้นสารละลายสีย้อม RBBR พบว่า ความเข้มข้นที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อม RBBR ด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้สน ไม้สัก และถ่านกัมมันต์นอร์ท มีค่าเท่ากับ 140, 50 และ 150 ตามลำดับ เนื่องจาก ความเข้มข้นสีย้อมส่งผลต่อปริมาณโมเลกุลสีย้อมในสารละลายในการดูดซับผิวตัวดูดซับ

3. ผลของพีเอช พบว่า พีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อม RBBR ด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้สน ไม้สัก และถ่านกัมมันต์นอร์ท มีค่าเท่ากับ 11, 11 และ 12 ตามลำดับ เนื่องจาก พีเอชเป็นปัจจัยที่ส่งผลสภาพความเป็นขั้วของพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ

4. ผลของระยะเวลาในการเขย่า พบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการเขย่าเพิ่มขึ้น จนกระทั่งระยะเวลาในการเขย่า 270 นาที ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมด้วยถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ชนิด มีค่าสูงสุด

5. ผลของปริมาณตัวดูดซับ พบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับ จนกระทั่งปริมาณตัวดูดซับเท่ากับ 5 กรัม ประสิทธิภาพการดูดซับสีข้อมด้วยถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ชนิด มีค่าสูงสุด

6. ผลของความเร็วยวรอบในการเขย่า พบว่า ความเร็วยวรอบในการเขย่าที่เหมาะสมในการดูดซับสีข้อม RBBR ด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้สน ไม้สัก และถ่านกัมมันต์นอร์ท มีค่าเท่ากับ 150, 50 และ 110 ตามลำดับ เนื่องจาก ความเร็วยวรอบในการเขย่าส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลสีข้อม RBBR เข้าไปหาตัวดูดซับ

7. ผลของการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีข้อม RBBR โดยทำการทดลองแบบต่อเนื่อง โดยใช้ปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร บรรจุตัวดูดซับ สูง 40 เซนติเมตร ได้ปริมาณถ่านกัมมันต์จากไม้สน ไม้สัก และถ่านกัมมันต์นอร์ท เท่ากับ 10.5, 7.8 และ 14 กรัม และใช้ความเข้มข้นสีข้อม RBBR เท่ากับ 14.17, 3.61 และ 204.39 ตามลำดับ ปล่อยสารละลายสีข้อมไหลตามแรงโน้มถ่วงโลก พบว่า ถ่านกัมมันต์นอร์ทมีประสิทธิภาพและอายุการใช้งานสูงสุด รองลงมาได้ ถ่านกัมมันต์จากไม้สน และ ไม้สัก ตามลำดับ

จากการทดลองการดูดซับสีข้อมด้วยถ่านกัมมันต์นอร์ท สามารถดูดซับสารละลาย สีข้อมได้สูงสุดในช่วงปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร โดยมีร้อยละความเข้มข้นของสีที่เหลือจากการดูดซับเท่ากับ 5.05 จากนั้นถ่านกัมมันต์นอร์ทจะเริ่มหมดประสิทธิภาพ จนกระทั่งหมดประสิทธิภาพการดูดซับที่ปริมาตร 3,300 มิลลิลิตร มีร้อยละความเข้มข้นของสีที่เหลือจากการดูดซับเท่ากับ 31.67

ถ่านกัมมันต์จากไม้สน สามารถดูดซับสารละลายสีข้อมได้สูงสุดในช่วงปริมาตร 490 มิลลิลิตร โดยมีร้อยละความเข้มข้นของสีที่เหลือจากการดูดซับเท่ากับ 6.07 จากนั้นถ่านกัมมันต์จากไม้สนจะเริ่มหมดประสิทธิภาพ จนกระทั่งหมดประสิทธิภาพการดูดซับที่ปริมาตร 1,540 มิลลิลิตร มีร้อยละความเข้มข้นของสีที่เหลือจากการดูดซับเท่ากับ 48.57

ถ่านกัมมันต์จากไม้สัก สามารถดูดซับสารละลายสีข้อมได้สูงสุดในช่วงปริมาตร 320 มิลลิลิตร โดยมีร้อยละความเข้มข้นของสีที่เหลือจากการดูดซับเท่ากับ 17.87 จากนั้นถ่านกัมมันต์จากไม้สักจะเริ่มหมดประสิทธิภาพ จนกระทั่งหมดประสิทธิภาพการดูดซับที่ปริมาตร 1,680 มิลลิลิตร มีร้อยละความเข้มข้นของสีที่เหลือจากการดูดซับเท่ากับ 98.29

8. ผลของการฟื้นฟูสภาพของถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ชนิด ที่ผ่านการใช้งานแล้วโดยทำการทดลองแบบต่อเนื่อง พบว่า ประสิทธิภาพและอายุการใช้งานในการดูดซับสารละลายสีข้อม RBBR ของถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ชนิด ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพจะมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับการใช้งานในครั้งแรก

จากการทดลองการดูดซับสีข้อมด้วยถ่านกัมมันต์นอร์ท พบว่า การฟื้นฟูครั้งที่ 1, 2 และ 3 หมดประสิทธิภาพการดูดซับที่ปริมาตร 2,800, 2,800 และ 2,470 มิลลิลิตร ตามลำดับ มีร้อยละความเข้มข้นสีที่เหลือเท่ากับ 55.89, 67.22 และ 11.03 ตามลำดับ ถ่านกัมมันต์จากไม้สน พบว่า การฟื้นฟูครั้งที่ 1, 2 และ 3 หมดประสิทธิภาพการดูดซับที่ปริมาตร 1,470, 399 และ 104 มิลลิลิตร ตามลำดับ มีร้อยละความเข้มข้นสีที่เหลือเท่ากับ 71.33, 74.37 และ 84.69 ตามลำดับ ถ่านกัมมันต์จากไม้สัก พบว่า การฟื้นฟูครั้งที่ 1, 2 และ 3 หมดประสิทธิภาพการดูดซับที่ปริมาตร 1,050, 104.5 และ 72 มิลลิลิตร ตามลำดับ มีร้อยละความเข้มข้นสีที่เหลือเท่ากับ 100, 83.4 และ 100 ตามลำดับ

จากผลการทดลอง แสดงให้เห็นว่าถ่านกัมมันต์จากไม้สัก มีประสิทธิภาพและอายุการใช้งานที่ต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์อีก 2 ชนิด ไม่เหมาะที่จะนำกลับมาใช้ใหม่

9. ผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีข้อมในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม ด้วยถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ชนิด ด้วยวิธีแบบแบตช์ โดยการปรับสภาพน้ำตัวอย่าง และไม่ปรับสภาพน้ำตัวอย่าง พบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับสีข้อมในน้ำตัวอย่างที่มีการปรับสภาพดีกว่าน้ำตัวอย่างที่ไม่มีการปรับสภาพ ถ่านกัมมันต์นอร์ทสามารถดูดซับสีข้อมได้เท่ากับ 103.38 และ 117.41 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ รองลงมาคือถ่านกัมมันต์จากไม้สน เท่ากับ 9.76 และ 9.99 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และถ่านกัมมันต์จากไม้สัก เท่ากับ 9.30 และ 9.49 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

เนื่องจากประสิทธิภาพการดูดซับสีข้อมในน้ำที่มีการปรับสภาพและไม่มีการปรับสภาพ ด้วยถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ชนิด มีความแตกต่างกันไม่มาก เพราะฉะนั้นในการดำเนินการในการนำผลการทดลองไปประยุกต์อาจดำเนินการได้โดยไม่ต้องปรับสภาพน้ำ เพื่อเป็นการลดเวลาและค่าใช้จ่าย

10. ผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีข้อมในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมที่ไม่มีการปรับสภาพน้ำตัวอย่าง ด้วยถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ชนิด โดยการทดลองแบบต่อเนื่อง พบว่า ถ่านกัมมันต์นอร์ทมีประสิทธิภาพในการใช้งานนานที่สุด รองลงมาคือถ่านกัมมันต์จากไม้สน และไม้สัก ตามลำดับ

จากการทดลองการดูดซับสีด้วยถ่านกัมมันต์นอร์ท สามารถดูดซับสารละลายสีย้อมได้สูงสุดในช่วงปริมาตรน้ำตัวอย่าง 108 มิลลิลิตร โดยมีร้อยละความเข้มข้นของสีที่เหลือจากการดูดซับเท่ากับ 1.05 จากนั้นถ่านกัมมันต์นอร์ทจะเริ่มหมดประสิทธิภาพ จนกระทั่งหมดประสิทธิภาพการดูดซับที่ปริมาตร 372 มิลลิลิตร มีร้อยละความเข้มข้นของสีที่เหลือจากการดูดซับเท่ากับ 100

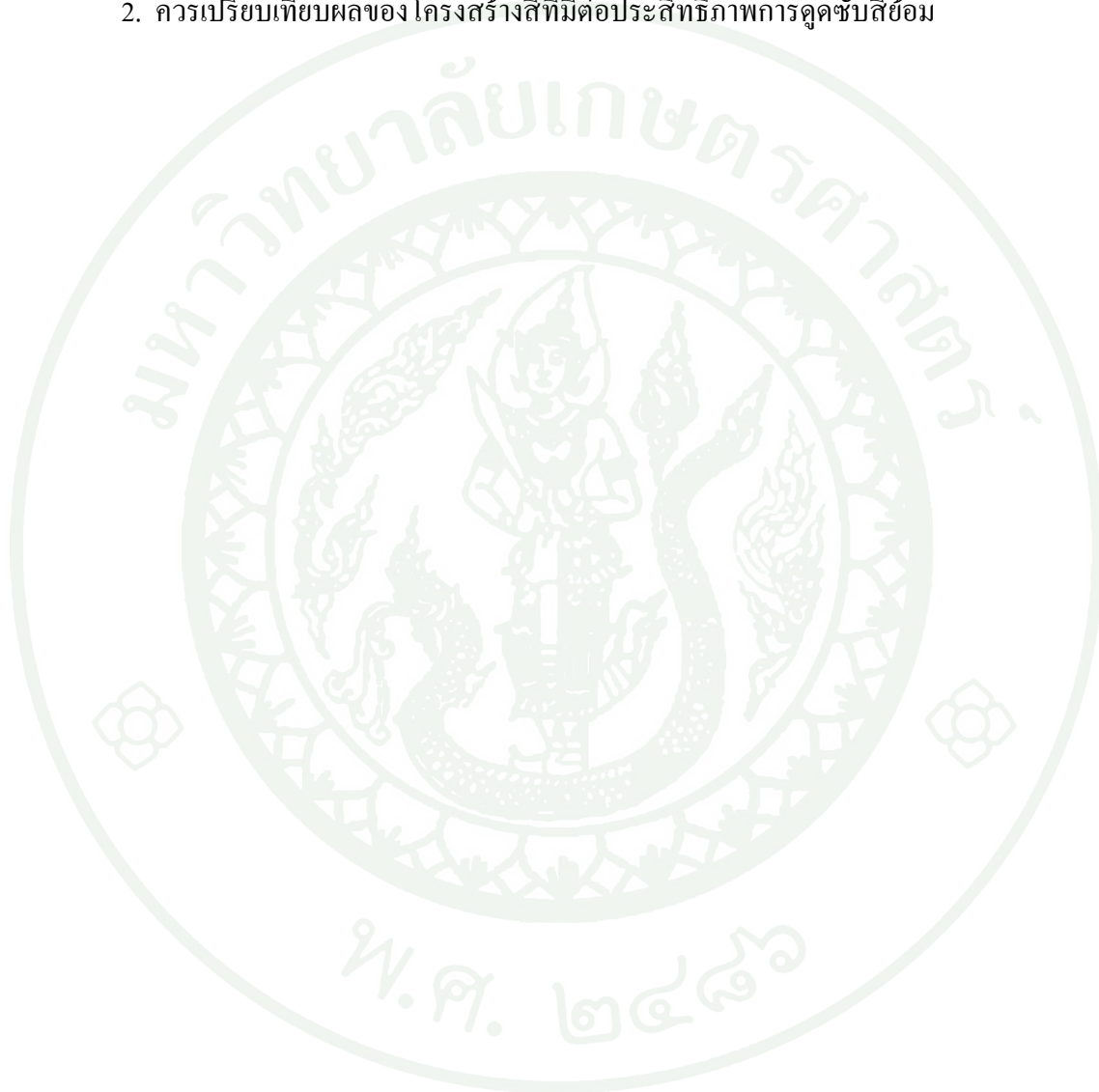
ถ่านกัมมันต์จากไม้สน สามารถดูดซับสารละลายสีย้อมได้สูงสุดในช่วงปริมาตรน้ำตัวอย่าง 27 มิลลิลิตร โดยมีร้อยละความเข้มข้นของสีที่เหลือจากการดูดซับเท่ากับ 52.18 จากนั้นถ่านกัมมันต์นอร์ทจะเริ่มหมดประสิทธิภาพ จนกระทั่งหมดประสิทธิภาพการดูดซับที่ปริมาตร 243 มิลลิลิตร มีร้อยละความเข้มข้นของสีที่เหลือจากการดูดซับเท่ากับ 97.70

ถ่านกัมมันต์จากไม้สัก สามารถดูดซับสารละลายสีย้อมได้สูงสุดในช่วงปริมาตรน้ำตัวอย่าง 27 มิลลิลิตร โดยมีร้อยละความเข้มข้นของสีที่เหลือจากการดูดซับเท่ากับ 52.66 จากนั้นถ่านกัมมันต์นอร์ทจะเริ่มหมดประสิทธิภาพ จนกระทั่งหมดประสิทธิภาพการดูดซับที่ปริมาตร 153 มิลลิลิตร มีร้อยละความเข้มข้นของสีที่เหลือจากการดูดซับเท่ากับ 95.96

11. ผลของประสิทธิภาพการบำบัดมลสารต่างๆ ในน้ำเสียจากการฟอกย้อม ได้แก่ พีเอช ที ของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำ (TDS) ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS) ของแข็งทั้งหมด (TS) น้ำมัน บีโอดี และซีโอดี ด้วยถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ชนิด โดยการทดลองแบบต่อเนื่อง พบว่า ตัวดูดซับทั้ง 3 ชนิด สามารถลดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ทั้งหมด โดยถ่านกัมมันต์นอร์ทมีประสิทธิภาพในการบำบัดมลสารได้ดีที่สุด ถ่านกัมมันต์จากไม้สนและไม้สักมีความสามารถในการบำบัดมลสารที่ใกล้เคียงกัน แต่อย่างไรก็ตาม คุณภาพน้ำยังไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม และนิคมอุตสาหกรรม

ข้อเสนอแนะ

1. ประเทศไทยมีไม้เศรษฐกิจที่เป็นไม้โตเร็วอีกหลายชนิดนอกจากไม้สนและสัก ควรมีการศึกษาไม้ชนิดอื่นๆ ที่เป็นไม้เหลือใช้และมีคุณสมบัติที่สามารถนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ได้
2. ควรเปรียบเทียบผลของโครงสร้างสีที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับสีข้อม



เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรรมการ์ สถาปิตานนท์, พิศมัย เจนวนิชปัญญกุล, สุมาลัย ศรีคำไลทอง, วาธุณี ฟางทวานิช, ผาสุก กองชาตรี, รุ่งทิพย์ ชัยวัฒนานนท์, มนัส อาคมะพันธ์, นัยนา นิยมวัน และมยุรา แพงคำ.

2541. การผลิตถ่านกัมมันต์คุณภาพสูงจากวัตถุดิบในประเทศไทย. โครงการวิจัยที่ ภ. 37-14. สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย.

กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม. 2539. ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539) เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบาย น้ำเสียจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและ นิคมอุตสาหกรรม ลงวันที่ 3 มกราคม 2539 ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 113 ตอนที่ 13ง. ลงวันที่ 13 กุมภาพันธ์ 2539.

กาวิ ศรีกุลกิจ. 2545. หลักการย้อมสีสิ่งทอ. ภาควิชาวัสดุศาสตร์, คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์ และคณิดา ตั้งคณานุรักษ์. 2550. หลักการการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำทาง เคมี. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และพงษ์ชนัน เหลืองไพบูลย์. 2551. การออกแบบและวิเคราะห์การ ทดลอง. สำนักพิมพ์ท็อป, กรุงเทพฯ.

มันสิน ต้นทุลเวศน์. 2538. วิศวกรรมการประปา เล่ม 2. โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

รัตนวลี เลิศชนกิจ. 2549. การบำบัดน้ำชะมูลฝอยด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมีและกระบวนการดูด ซับด้วยถ่านกัมมันต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อนุวัตร แจ่มชัด. 2549. สถิติสำหรับการพัฒนาผลิตภัณฑ์และการประยุกต์. ภาควิชาพัฒนา ผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อรจิรา เพ็ชรช้อย. 2552. การลดความเข้มข้นสารละลายสี้อมรีแอคทีฟโดยเชื้อราเส้นใยสีขาว

***Datronia* sp. KAPI0039.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อังคณา โพธิ์เจริญโยธิน. 2548. การผลิตถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรด้วยภูมิปัญญาท้องถิ่นเพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำบ่อต้นในพื้นที่ชนบทของประเทศไทย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Ada, K., A. Ergene, S. Tan and E. Yalçın. 2009. Adsorption of Remazol Brilliant Blue R using ZnO fine powder: Equilibrium, kinetic and thermodynamic modeling studies. **J. Hazard. Mater.** 165: 637–644.

Al-Degs, Y. S., M. I. El-Barghouthi, A. H. El-Sheikh and G. M. Walker. 2008. Effect of solution pH, ionic strength, and temperature on adsorption behavior of reactive dyes on activated carbon. **Dyes Pigments.** 77: 16-23.

Allen, R.L.M., 1971. The chemistry of azo dyes. Color Chemistry. Appleton-Century-Crofts, New York.

Amin, N.K. 2008. Removal of reactive dye from aqueous solutions by adsorption onto activated carbons prepared from sugarcane bagasse pith. **Desalination.** 223: 152–161.

Bell, B.A. and A.H. Molof. 1975. A new model of granular activated carbon adsorption kinetics. **Water Res.** 9: 857-860.

Box, G.E.P. and K.B. Wilson. 1951. On the experimental attainment of optimum conditions. **J. Royal Statist. Soc.** 13: 1-145.

Clark, R.M. and B.W. Lykins, Jr. 1989. **Granular Activated Carbon Design Operation and Cost.** Michigan Lewins Publ., Michigan.

- Cornell, J.A. 1990. **Experiments with Mixtures: Design, Models and the Analysis of Mixture Data**. 2nd ed., John Wiley & Sons. New York.
- Faust, S.D. and O.M. Aly. 1987. **Adsorption process for water treatment**. Butterworth Publ., Boston. 509 p.
- Gan, Q., S.J. Allen and R. Matthews. 2004. Activation of waste MDF sawdust charcoal and its reactive dye adsorption characteristics. **Waste Management**. 24: 841–848.
- Huang, J.C. and Gerrett. 1977. Effect of polyelectrolytes and clay colloids on carbon adsorption. **Water & Sewage Works**. 124: 64-67.
- Ip, A.W.M., J.P. Barford and G. McKay. 2009. Reactive Black dye adsorption/desorption onto different adsorbents: Effect of salt, surface chemistry, pore size and surface area. **Colloid Interface. Sci.** 337: 32–38.
- Ismadji, S., Y. Sudaryanto, S.B. Hartono, L.E.K. Setiawan and A. Ayucitra. 2004. Modelling adsorption of acid orange 7 dye in aqueous solutions to spent brewery grains. **Sep. Purif. Technol.** 40: 163–170.
- Kalavathy, H.M., Iyyaswami, R., Magesh, G.P. and Lima, R.M. 2005. Activated carbon from char obtained from vacuum pyrolysis of teak sawdust: pore structure development and characterization. **Bioresour. Technol.** 96: 1364–1369.
- Khiari, S.K. and S. Iddi. 1989. Basic Density of Wood of *Pinus caribaea* a Grown in Zanaibar, United Republic of Tanzania. **Trop. For. Sci.** 4 (2): 113-118.
- Leechart, P., W. Nakbanpote and P. Thiravetyan. 2009. Application of ‘waste’ wood-shaving bottom ash for adsorption of azo reactive dye. **Environ. Management**. 90: 912–920.

- Maron, S.H. and C.F. Prutton. 1961. **Principle of Physical Chemistry**. 3rd ed. Macmillan Co. New York.
- Metcalf and Eddy. 1991. **Wastewater Engineering Treatment Disposal and Reuse**. 3rd ed. McGraw-Hill. Inc. Singapore.
- Mohanty, K., D. Da and M.N. Biswas. 2005. Adsorption of phenol from aqueous solutions using activated carbons prepared from *Tectona grandis* sawdust by ZnCl₂ activation. **Chem. Eng. J.** 115: 121–131.
- Montgomery, D.C. 1991. **Design and Analysis of Experiments**. 3rd ed., John Wiley & Sons. New York.
- Myers, R.H. and D.C. Montgomery. 1995. **Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments**, New York.
- Ponnusami, V. and S.N. Srivastava. 2009. Studies on application of teak leaf powders for the removal of color from synthetic and industrial effluents. **J. Hazard. Mater.** 169: 1159–1162.
- Ravikumar, K., S. Krishnan, S. Ramalingam and K. Balu. 2007. Optimization of batch process parameters using response surface methodology for dye removal by a novel adsorbent. **Dyes Pigments**. 72: 66-74.
- Richter, H.G. and M.J. Dallwitz. 2000. **Tectona grandis L.** Commercial Timbers. Available Source: <http://delta-intkey.com/wood/en/www/vertegra.htm>, August 2, 2010.
- Santhy, K., and P. Selvapathy. 2006. Removal of reactive dyes from wastewater by adsorption on coir pith activated carbon. **Bioresour. Technol.** 97: 1329–1336.

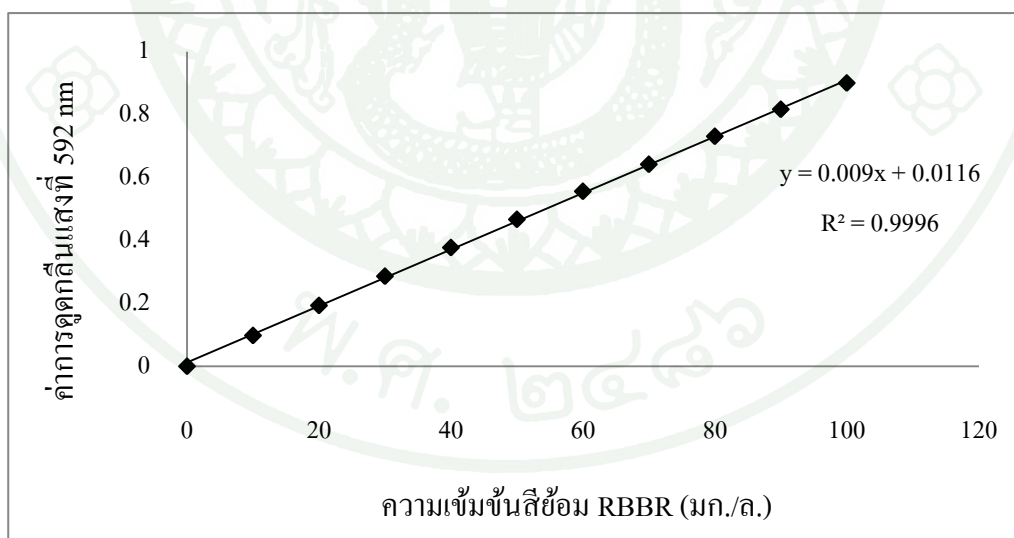
- Shieh, C.J. and Y.H., Lou. 2000. Five-Factor Response Surface Optimization of the Enzymatic Synthesis of Citronellyl Butyrate by Lipase IM77 from *Mucor miehei*. **JAOCS.** 7: 521–525.
- Trayball, R.E. 1980. **Mass Transfer Operation.** 3rd ed. McGraw-hill, New York.
- Vijayaraghavan, K., W.W. Sung and Y.S. Yun. 2009. Treatment of complex Remazol dye effluent using sawdust and coal-based activated carbons. **J. Hazard. Mater.** 167 (1-3): 790-796.
- Wanga, H., D.C. Malcolmb and A.M. Fletcher. 1999. Pinus caribaea in China: introduction, genetic resources and future prospects. **For. Ecol. Manage.** 117: 1-15.
- Wood, H. 1992. Teak in Asia. **Research and Development of Teak 19-27 March 1991.** Regional Office for Asia and the Pacific, Guangzhou.
- Yehaskel, A. 1978. **Activated carbon: Manufacture and regeneration.** Noyes Data Corporation., New Jersey.
- Zollinger, H. 2003. **Color Chemistry, Synthesis, Properties and Application of Organic Dyes and Pigments.** 3rd ed. Wiley VCH, New York.





ตารางผนวกที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นสีข้อม RBBR ที่ความยาวคลื่น 592 nm

ความเข้มข้นสีข้อม (มก./ล.)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 592 nm
0	0
10	0.0979
20	0.1933
30	0.2863
40	0.3774
50	0.4670
60	0.5562
70	0.6421
80	0.7311
90	0.8169
100	0.9004



ภาพผนวกที่ 1 กราฟมาตรฐานสีข้อม RBBR ที่ความยาวคลื่น 592 nm

ตารางผนวกที่ 2 การคำนวณค่า F จากสมการเพื่อยืนยันสมการ (Lack of fit) การดูดซับด้วยถ่าน
กัมมันต์จากไม้สน

	df	SS	ms	F
LOF	4	907.705	226.9263	2.5092
Pure error	15	1356.58	90.4387	
Residual	19	2,264.285		

ตารางผนวกที่ 3 การคำนวณค่า F จากสมการเพื่อยืนยันสมการ (Lack of fit) การดูดซับด้วยถ่าน
กัมมันต์จากไม้สัก

	df	SS	ms	F
LOF	13	2,440.655	187.7427	1.3727
Pure error	7	957.385	136.7693	
Residual	20	3,398.04		

ตารางผนวกที่ 4 การคำนวณค่า F จากสมการเพื่อยืนยันสมการ (Lack of fit) การดูดซับด้วยถ่าน
กัมมันต์นอร์ิท

	df	SS	ms	F
LOF	11	3329.581	302.6892	3.0460
Pure error	7	695.609	99.3730	
Residual	18	4025.19		

ตารางผนวกที่ 5 สภาวะที่เลือกเพื่อการยืนยันผลการทดลองการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้สน

ชุดการทดลอง	ความเข้มข้น		ระยะเวลา เขย่า (นาทีก)	ปริมาณตัว ดูดซับ (กรัม)	ความเร็วรอบ (รอบ/นาที)	ร้อยละการดูดซับ	
	สีข้อม (มก./ล.)	พีเอช				ทำนาย	ทดลอง
1	90	11	270	5	200	125.38	95.28
2	120	11	270	5	200	109.75	96.34
3	110	10	240	4.5	170	111.96	95.00
4	70	10	210	4.5	150	101.01	97.72
5	140	11	270	5	200	95.33	96.42
6	100	10	240	4.5	175	103.98	95.09

ตารางผนวกที่ 6 สภาวะที่เลือกเพื่อการยืนยันผลการทดลองการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้สัก

ชุดการทดลอง	ความเข้มข้น		ระยะเวลา เขย่า (นาทีก)	ปริมาณตัว ดูดซับ (กรัม)	ความเร็วรอบ (รอบ/นาที)	ร้อยละการดูดซับ	
	สีข้อม (มก./ล.)	พีเอช				ทำนาย	ทดลอง
1	50	11	210	4	150	73.259	84.91
2	100	11	270	4.5	100	96.126	82.10
3	100	11	270	5	50	94.191	88.94
4	100	11	270	5	100	95.941	82.75
5	50	11	270	5	50	88.991	92.52
6	50	11	270	5	100	90.741	83.93

ตารางผนวกที่ 7 สภาวะที่เลือกเพื่อการยืนยันผลการทดลองการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์นอร์ิท

ชุดการทดลอง	ความเข้มข้น		ระยะเวลา	ปริมาณตัวดูดซับ	ความเร็วรอบ (รอบ/นาที)	ร้อยละการดูดซับ	
	สีข้อม (มก./ล.)	พีเอช	เขย่า (นาที)	ดูดซับ (กรัม)		ทำนาย	ทดลอง
1	150	12	210	0.5	110	96.23	80.33
2	90	12	200	0.5	110	98.50	88.65
3	90	11	180	0.4	125	93.40	87.18
4	90	11	200	0.5	110	93.02	83.19
5	140	12	90	0.5	110	95.26	72.91

ตารางผนวกที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวดูดซับ (กรัม) และร้อยละการดูดซับสีข้อม RBBR ด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้สน

ปริมาณตัวดูดซับ (กรัม)	ร้อยละการดูดซับ				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	S.D.
0.5	28.55	28.81	28.92	28.76	0.19
1	45.84	46.00	45.96	45.93	0.08
2	70.20	69.90	69.62	69.91	0.29
3	89.00	88.40	88.26	88.55	0.39
4	94.85	95.12	95.17	95.05	0.17
5	98.18	98.46	98.06	98.23	0.21
6	98.98	99.33	99.36	99.22	0.21
7	99.48	99.80	99.99	99.76	0.26

ตารางผนวกที่ 9 ปริมาณตัวดูดซับ (กรัม) และร้อยละการดูดซับสีย้อม RBBR ด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้สัก

ปริมาณตัวดูดซับ (กรัม)	ร้อยละการดูดซับ				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	S.D.
0.5	39.98	40.00	40.26	40.08	0.16
1	56.77	56.97	56.75	56.83	0.12
2	74.36	74.33	74.16	74.28	0.11
3	86.37	86.56	86.55	86.49	0.11
4	96.55	96.25	96.31	96.37	0.16
5	96.88	97.11	97.04	97.01	0.12
6	98.76	98.99	98.82	98.86	0.12
7	99.24	99.55	99.38	99.39	0.16

ตารางผนวกที่ 10 ปริมาณถ่านกัมมันต์ (กรัม) และร้อยละการดูดซับสีย้อม RBBR ด้วยถ่านกัมมันต์นอริท

ปริมาณตัวดูดซับ (กรัม)	ร้อยละการดูดซับ				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	S.D.
0.05	45.92	46.32	46.23	46.16	0.21
0.1	70.34	69.87	70.10	70.10	0.24
0.2	89.17	89.44	88.99	89.20	0.23
0.3	94.23	93.98	94.10	94.10	0.13
0.4	95.22	94.79	95.18	95.06	0.24
0.5	97.91	97.50	97.96	97.79	0.25

ตารางผนวกที่ 11 ไอโซเทอร์มการดูดซับของถ่านกัมมันต์จากไม้สน

ปริมาณตัว ดูดซับ (กรัม)	Co (มก./ล.)	C (มก./ล.)	V (ลิตร)	q (มก./ก.)	1/q	1/C	log q	log C
1	140	69.0778	0.05	2.9333	0.3409	2.9333	0.4674	1.8393
2	140	38.4444	0.05	2.2325	0.4479	2.2325	0.3488	1.5848
3	140	14.6222	0.05	1.8854	0.5304	1.8854	0.2754	1.1650
4	140	6.3222	0.05	1.5178	0.6588	1.5178	0.1812	0.8009
5	140	2.2556	0.05	1.2549	0.7969	1.2549	0.0986	0.3533
6	140	1.0000	0.05	1.0562	0.9468	1.0562	0.0237	0.0000
7	140	0.3111	0.05	0.9102	1.0987	0.9102	-0.0409	-0.5071

ตารางผนวกที่ 12 ไอโซเทอร์มการดูดซับของถ่านกัมมันต์จากไม้สัก

ปริมาณตัว ดูดซับ (กรัม)	Co (มก./ล.)	C (มก./ล.)	V (ลิตร)	q (มก./ก.)	1/q	1/C	log q	log C
1	50	19.7111	0.05	1.2972	0.7709	0.0507	0.1130	1.2947
2	50	11.7444	0.05	0.8478	1.1796	0.0851	-0.0717	1.0698
3	50	6.1667	0.05	0.6581	1.5194	0.1622	-0.1817	0.7901
4	50	1.6556	0.05	0.5500	1.8182	0.6040	-0.2596	0.2189
5	50	1.3667	0.05	0.4429	2.2579	0.7317	-0.3537	0.1357
6	50	0.5222	0.05	0.3761	2.6588	1.9149	-0.4247	-0.2821
7	50	0.2778	0.05	0.3261	3.0664	3.5997	-0.4866	-0.5563

ตารางผนวกที่ 13 ไอโซเทอร์มการดูดซับของถ่านกัมมันต์นอร์ิท

ปริมาณ ตัวดูดซับ (กรัม)	Co (มก./ล.)	C (มก./ล.)	V (ลิตร)	q (มก./ก.)	1/q	1/C	log q	log C
0.05	150	74.4185	0.05	32.4648	0.0308	0.0134	1.5114	1.8717
0.1	150	40.7630	0.05	24.6463	0.0406	0.0245	1.3918	1.6103
0.2	150	13.9000	0.05	15.6810	0.0638	0.0719	1.1954	1.1430
0.3	150	7.0037	0.05	11.0287	0.0907	0.1428	1.0425	0.8453
0.4	150	5.6556	0.05	8.3558	0.1197	0.1768	0.9220	0.7525
0.5	150	1.8259	0.05	6.8761	0.1454	0.5477	0.8373	0.2615

ตารางผนวกที่ 14 มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
1. ค่าความเป็นกรดและด่าง (pH value)	5.5-9.0	pH Meter
2. ค่าทีดีเอส (TDS หรือ Total Dissolved Solids)	ไม่เกิน 3,000 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกัน แล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับ น้ำทิ้งหรือประเภทของโรงงาน อุตสาหกรรม ที่คณะกรรมการควบคุม มลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 5,000 มก./ ล. น้ำทิ้งที่จะระบายลงแหล่งน้ำกร่อยที่มี ค่าความเค็ม (Salinity) เกิน 2,000 มก./ล. หรือลงสู่ทะเลค่าทีดีเอสในน้ำเสียจะมีค่า มากกว่าค่าทีดีเอสที่มีอยู่ในแหล่งน้ำ กร่อยหรือน้ำทะเลได้ไม่เกิน 5,000 มก./ ล.	ระเหยแห้งที่อุณหภูมิ 103-105°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ตารางผนวกที่ 14 (ต่อ)

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
3. สารแขวนลอย (Suspended Solids)	ไม่เกิน 50 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม หรือประเภทของระบบบำบัดน้ำเสีย ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษ เห็นสมควรแต่ไม่เกิน 150 มก./ล.	กรองผ่านกระดาษกรอง
4. อุณหภูมิ (Temperature)	ไม่เกิน 40°C	เครื่องวัดอุณหภูมิ วัดขณะทำการเก็บตัวอย่างน้ำ
5. สีหรือกลิ่น	ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ	ไม่ได้กำหนด
6. น้ำมันและไขมัน (Fat, Oil and Grease)	ไม่เกิน 5.0 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 15 มก./ล.	สกัดด้วยตัวทำละลาย แล้วแยกหาน้ำหนักของน้ำมันและไขมัน
7. ค่าบีโอดี (5 วันที่ อุณหภูมิ 20 °C) (Biochemical Oxygen Demand: BOD)	ไม่เกิน 20 มก./ล. หรือแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 60 มก./ล.	Azide Modification ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นเวลา 5 วัน

ตารางผนวกที่ 14 (ต่อ)

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
8. ค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand : COD)	ไม่เกิน 120 มก./ล.หรืออาจแตกต่างกัน แล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำ ทิ้ง หรือ ประเภทของโรงงาน อุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการ ควบคุมมลพิษ เห็นสมควร แต่ไม่เกิน 400 มก./ล.	Potassium Dichromate Digestion

ที่มา: ดัดแปลงจากประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539)
เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรม
และนิคมอุตสาหกรรม ลงวันที่ 3 มกราคม 2539 ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 113 ตอนที่
133 ลงวันที่ 13 กุมภาพันธ์ 2539

ตารางที่ผนวก 15 ค่า t (two tailed)

df	α			
	0.10	0.05	0.025	0.01
3	2.3534	3.1824	4.1765	5.8408
5	2.0150	2.5706	3.1634	4.0321
7	1.8946	2.3646	2.8412	3.4995
9	1.8331	2.2622	2.6850	3.2498
11	1.7959	2.2010	2.5931	3.1058
13	1.7709	2.1604	2.5326	3.0123
15	1.7531	2.1315	2.4899	2.9467
17	1.7396	2.1098	2.4581	2.8982
19	1.7291	2.0930	2.4334	2.8609
21	1.7207	2.0796	2.4138	2.8314
23	1.7139	2.0687	2.3979	2.8073
25	1.7081	2.0595	2.3846	2.7874
27	1.7033	2.0518	2.3734	2.7707
29	1.6991	2.0452	2.3638	2.7564
31	1.6955	2.0395	2.3556	2.7440
33	1.6924	2.0345	2.3483	2.7333
35	1.6896	2.0301	2.3420	2.7238
37	1.6871	2.0262	2.3363	2.7154
39	1.6849	2.0227	2.3313	2.7079
41	1.6829	2.0195	2.3267	2.7012
43	1.6811	2.0167	2.3226	2.6951
45	1.6794	2.0141	2.3189	2.6896
47	1.6779	2.0117	2.3155	2.6846
49	1.6766	2.0096	2.3124	2.6800
51	1.6753	2.0076	2.3095	2.6757
53	1.6741	2.0057	2.3069	2.6718
55	1.6730	2.0040	2.3044	2.6682
70	1.6669	1.9944	2.2906	2.6479
80	1.6641	1.9901	2.2844	2.6387
90	1.6620	1.9867	2.2795	2.6316
100	1.6602	1.9840	2.2757	2.6259

ตารางผนวกที่ 16 ค่า F ($\alpha=0.05$)

		$F_{0.05, \nu_1, \nu_2}$																		
ν_1	ν_2	Degrees of Freedom for the Numerator (ν_1)																		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	∞
2	161.4	199.5	215.7	224.6	230.2	234.0	236.8	238.9	240.5	241.9	243.9	245.9	248.0	249.1	250.1	251.1	252.2	253.3	254.3	254.3
3	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38	19.40	19.41	19.43	19.45	19.45	19.46	19.47	19.48	19.49	19.50	19.50
4	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.74	8.70	8.66	8.64	8.62	8.59	8.57	8.55	8.53	8.53
5	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.91	5.86	5.80	5.77	5.75	5.72	5.69	5.66	5.63	5.63
6	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.68	4.62	4.56	4.53	4.50	4.46	4.43	4.40	4.36	4.36
7	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.00	3.94	3.87	3.84	3.81	3.77	3.74	3.70	3.67	3.67
8	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.57	3.51	3.44	3.41	3.38	3.34	3.30	3.27	3.23	3.23
9	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.28	3.22	3.15	3.12	3.08	3.04	3.01	2.97	2.93	2.93
10	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.07	3.01	2.94	2.90	2.86	2.83	2.79	2.75	2.71	2.71
11	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.91	2.85	2.77	2.74	2.70	2.66	2.62	2.58	2.54	2.54
12	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.79	2.72	2.65	2.61	2.57	2.53	2.49	2.45	2.40	2.40
13	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.69	2.62	2.54	2.51	2.47	2.43	2.38	2.34	2.30	2.30
14	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.60	2.53	2.46	2.42	2.38	2.34	2.30	2.25	2.21	2.21
15	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.53	2.46	2.39	2.35	2.31	2.27	2.22	2.18	2.13	2.13
16	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.48	2.40	2.33	2.29	2.25	2.20	2.16	2.11	2.07	2.07
17	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.42	2.35	2.28	2.24	2.19	2.15	2.11	2.06	2.01	2.01
18	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45	2.38	2.31	2.23	2.19	2.15	2.10	2.06	2.01	1.96	1.96
19	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.34	2.27	2.19	2.15	2.11	2.06	2.02	1.97	1.92	1.92
20	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38	2.31	2.23	2.16	2.11	2.07	2.03	1.98	1.93	1.88	1.88
21	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35	2.28	2.20	2.12	2.08	2.04	1.99	1.95	1.90	1.84	1.84
22	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37	2.32	2.25	2.18	2.10	2.05	2.01	1.96	1.92	1.87	1.81	1.81
23	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34	2.30	2.23	2.15	2.07	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.78	1.78
24	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32	2.27	2.20	2.13	2.05	2.01	1.96	1.91	1.86	1.81	1.76	1.76
25	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30	2.25	2.18	2.11	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.79	1.73	1.73
26	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28	2.24	2.16	2.09	2.01	1.96	1.92	1.87	1.82	1.77	1.71	1.71
27	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.32	2.27	2.22	2.15	2.07	1.99	1.95	1.90	1.85	1.80	1.75	1.69	1.69
28	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.37	2.31	2.25	2.20	2.13	2.06	1.97	1.93	1.88	1.84	1.79	1.73	1.67	1.67
29	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36	2.29	2.24	2.19	2.12	2.04	1.96	1.91	1.87	1.82	1.77	1.71	1.65	1.65
30	4.18	3.33	2.93	2.70	2.55	2.43	2.35	2.28	2.22	2.18	2.10	2.03	1.94	1.90	1.85	1.81	1.75	1.70	1.64	1.64
40	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	2.16	2.09	2.01	1.93	1.89	1.84	1.79	1.74	1.68	1.62	1.62
60	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	2.08	2.00	1.92	1.84	1.79	1.74	1.69	1.64	1.58	1.51	1.51
120	4.00	3.15	2.76	2.53	2.37	2.25	2.17	2.10	2.04	1.99	1.92	1.84	1.75	1.70	1.65	1.59	1.53	1.47	1.39	1.39
∞	3.92	3.07	2.68	2.45	2.29	2.17	2.09	2.02	1.96	1.91	1.83	1.75	1.67	1.61	1.55	1.49	1.43	1.35	1.25	1.25
	3.84	3.00	2.60	2.37	2.21	2.10	2.01	1.94	1.88	1.83	1.75	1.67	1.57	1.52	1.46	1.39	1.32	1.22	1.10	1.10

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ -นามสกุล	นางสาวพิชชาภัทร์ กุลมา
วัน เดือน ปี ที่เกิด	24 พฤษภาคม 2529
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลศิริราช กทม.
ประวัติการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (วิทยาศาสตร์ทั่วไป) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-