



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

.....
สาขา ภาควิชา

เรื่อง การใช้ประโยชน์จากของเสียในอุตสาหกรรมอาหารเพื่อปรับปรุงความเข้มสีน้ำเสียจาก
อุตสาหกรรมฟอกย้อม

Utilization of Food Industry Waste for Decolorization Textile Wastewater

นามผู้วิจัย นายเจตนิพิฐ สุตทองคง

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
(..... ผู้ช่วยศาสตราจารย์มณฑล ฐานุตตมวงศ์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา
(..... รองศาสตราจารย์ชาติ เจริญไชยศรี, D.Eng.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

.....
(..... รองศาสตราจารย์กัญจนา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน..... พ.ศ.....

สิงสีทัง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การใช้ประโยชน์จากของเสียในอุตสาหกรรมอาหารเพื่อปรับปรุงความเข้มสีน้ำเสียจาก
อุตสาหกรรมฟอกย้อม

Utilization of Food Industry Waste for Decolorization Textile Wastewater

โดย

นายเจตนิพิฐ สุดทองคง

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2556

เจดนิพิฐุ สูดทองคง 2556: การใช้ประโยชน์จากของเสียในอุตสาหกรรมอาหารเพื่อปรับปรุงความเข้มข้นน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์มณฑล ฐานุตตมวงส์, Ph.D. 64 หน้า

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการนำของเสียจากอุตสาหกรรมอาหารมาใช้ประโยชน์เพื่อบำบัดสีย้อมรีแอคทีฟ บลู 4 ในงานวิจัยนี้สามารถแบ่งออกมาได้เป็นสองส่วน ในส่วนแรกเป็นการนำเศษสับประรดมาใช้ผลิตกรดอะซิติกโดยใช้เชื้อจุลินทรีย์ *Acetobacter aceti* ทำการทดลองหมักเศษสับประรดร่วมกับจุลินทรีย์ โดยใช้เศษสับประรดที่ไม่ผ่านการเจือจางความเข้มข้น และ มีการเจือจางความเข้มข้นด้วยน้ำกลั่นในอัตราส่วนเศษสับประรด (กรัม)ต่อน้ำกลั่น (มิลลิลิตร) 10:10 10:20 และ 10:30 พบว่าที่ระยะเวลาการหมัก 3 วัน เศษสับประรดที่ไม่ผ่านการเจือจางความเข้มข้น จุลินทรีย์ไม่สามารถผลิตกรดได้ ในขณะที่เศษสับประรดที่ผ่านการเจือจางความเข้มข้นที่อัตราส่วน 10:10 จุลินทรีย์สามารถผลิตกรดอะซิติกได้เข้มข้นมากที่สุดถึง 3.29% และเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการหมักเป็น 5 วัน ความเข้มข้นของกรดอะซิติกจะเพิ่มขึ้นได้เพียงเล็กน้อย จากนั้นนำกรดอะซิติกที่ผลิตได้จากสถานะดังกล่าวมาทำการแช่เปลือกกุ้งเพื่อกำจัดแร่ธาตุออก เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในการดูดซับ และเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำเสียสีย้อมรีแอคทีฟ บลู 4 กับ ถ่านกัมมันต์ ซึ่งมีจลนพลศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมเป็นไปตามปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง พบว่าตัวดูดซับทั้งสองชนิดมีค่าคงที่อัตราเร็วใกล้เคียงกัน และไอโซเทอมการดูดซับเป็นแบบแลงเมียร์เช่นเดียวกัน แต่เมื่อพิจารณาความสามารถในการดูดสีย้อมรีแอคทีฟ บลู 4 มากที่สุดบนถ่าน 1 กรัม พบว่าเปลือกกุ้งที่ผ่านการปรับปรุงประสิทธิภาพมีความสามารถในการดูดซับสีย้อมมากกว่าถ่านกัมมันต์ 4.325 มิลลิกรัมต่อกรัม จากนั้นทำการศึกษาการดูดซับสีย้อมในถังปฏิกิริยาแบบคอลัมน์ขนาด 450 ลิตร ที่อัตราการไหล 0.7 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่าระยะเวลาเบรกทรูอยู่ที่ 3 วัน และเมื่อลดอัตราการไหลระยะเวลาเบรกทรูจะเพิ่มเพียงเล็กน้อย

Jetnipit Suttongkong 2013: Utilization of Food Industry Waste for Decolorization Textile Wastewater. Master of Engineering (Environmental Engineering), Major Field: Environmental Engineering, Department of Environmental Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Monthon Thanuttamavong, Ph.D. 64 pages.

The objective of this research is to recovery the waste from food industries for decolorization of the Reactive Blue 4 dye .The research can be divided into two phases. For the first phase ,Study on recovery of pineapple waste for acetic acid production by *acetobacter aceti*. The experiment of this phase was carried out by pineapple fermentation using four conditions that are concentrated pineapple waste(no dilution) and diluted pineapple waste in ratio of waste (g) and distilled water (ml) at 10:10 10:20 and 10:30. At 3 days *Acetobacter aceti* can not produce acetic acid when concentrated pineapple waste was used as a substrate whereas the ratio of 10:10 *Acetobacter aceti* can produce the highest acetic acid concentration of 3.29 %. The further fermentation time to 5 days can not significantly increase acid production. For another phase,The shrimp shell was immersed into acetic acid produced from pine apple waste in order to demineralize and improve decolorization efficiency as well. Furthermore, adsorption efficiency of modified shrimp shell was compared to activated carbon. The study of adsorption between adsorbent and reactive blue 4 was conformable the first order of kinetic reaction for both adsorbent. The reaction rate constant of both adsorbent is not significantly different and the adsorption isotherm of both adsorbent is Langmuir isotherm. Adsorption capacity of modified shrimp shell to Reactive Blue 4 is more than activated carbon about 4.325 mg/g at 30.5 °C. Study of decolorization of reactive blue 4 using continuous fixed-bed column was conducted in column size of 450 L at flow rate of 0.7 ml/min and modified shrimp shell was packed as an adsorption media. The breakthrough point of this media is 84 hr and the decrease of flow rate affects increase of breakthrough point.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ผู้วิจัยได้รับความช่วยเหลือจากบุคคลผู้มีพระคุณหลายท่าน ดังนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์.ดร.มณฑล ฐานุตมมวงส์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่คอยช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ และเสนอแนวทางแก้ไขปัญหาจนกระทั่งงานวิจัยเสร็จสมบูรณ์ ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.พัชราพร อิทธิสุขนันท์ ประธานกรรมการสอบ และผู้ช่วยศาสตราจารย์.ดร.ปฎิภาณ ปัญญาพลกุล ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำและตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณพระคุณ คุณบรรจบ กิติกาศ คุณณัฐพล สุพิชญ์ และเพื่อนๆ วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ที่คอยให้การช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจอย่างดีเสมอมาจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์รวมทั้งขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ เจ้าหน้าที่ห้องธุรการ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ให้ความร่วมมือ และอำนวยความสะดวกในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ คุณณัฐพงศ์ ไปรยสุรินทร์และคุณเกศรินทร์ เสงตระกุล ที่ให้ความช่วยเหลือด้านข้อมูลต่างๆ เป็นกำลังใจ และให้คำปรึกษาในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สุดท้ายผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คุณพ่อจำลอง และ คุณแม่ฐิตาภรณ์ สุดทองคง ที่ให้การอบรมเลี้ยงดู สนับสนุนและเป็นกำลังใจอันสำคัญยิ่งในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

เจตนิพิฐ สุดทองคง

เมษายน 2556

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	32
อุปกรณ์	32
วิธีการ	34
ผลและวิจารณ์	39
สรุปและข้อเสนอแนะ	49
สรุป	49
ข้อเสนอแนะ	49
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	51
ภาคผนวก	53
ภาคผนวก ก การเตรียมสารเคมีและวิธีการวิเคราะห์	54
ภาคผนวก ข ผลการทดลอง	60
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	64

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	การจำแนกสีข้อมในลักษณะที่ต่างกัน	6
2	ลักษณะน้ำเสียของกระบวนการฟอกข้อมแบ่งตามผลิตภัณฑ์ที่ฟอกข้อม	9
3	เปรียบเทียบคุณสมบัติในการดูดซับของเปลือกกุ้งและถ่านกัมมันต์	46
4	เปรียบเทียบคุณสมบัติของแต่ละอัตราการไหล	48
ตารางผนวกที่		
ข1	ปริมาณกรดที่ผลิตได้	61
ข2	ผลของระยะเวลาต่อการบำบัดสีของเปลือกกุ้งที่ผ่านการปรับปรุงประสิทธิภาพ	61
ข3	ผลของระยะเวลาสัมผัสต่อการบำบัดสีข้อมของถ่านกัมมันต์	62
ข4	ไอโซเทอมการดูดซับของเปลือกกุ้งที่ผ่านการปรับปรุงประสิทธิภาพ	62
ข5	ไอโซเทอมการดูดซับของถ่านกัมมันต์	63

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	โครงสร้างสีย้อม Reactive Blue 4	7
2	การเกิดน้ำเสียในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการฟอกย้อมผ้าทอ	8
3	ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ	12
4	แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลไม่มีขั้ว ที่ถูกเหนี่ยวนำให้มีขั้วชั่วคราว	13
5	แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมีขั้วกับโมเลกุลไม่มีขั้ว ที่ถูกเหนี่ยวนำให้มีขั้วชั่วคราว	14
6	แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมีขั้ว	15
7	โครงสร้างทางเคมีของไคติน	24
8	โครงสร้างทางเคมีของไคโตซาน	26
9	ขั้นตอนการผลิตสับปะรดกระป๋อง	30
10	การติดตั้งระบบบำบัดแบบต่อเนื่อง	37
11	เปรียบเทียบปริมาณกรดที่ผลิตได้ในแต่ละอัตราส่วนการเจือจาง	40
12	ผลของระยะเวลาสัมผัสต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม	41
13	กราฟแสดงจลนพลศาสตร์ของเปลือกกุ้งที่ผ่านการปรับปรุงประสิทธิภาพ	42
14	กราฟแสดงจลนพลศาสตร์ของถ่านกัมมันต์	43
15	แสดงไอโซเทอมการดูดซับของเปลือกกุ้งที่ผ่านการปรับปรุงประสิทธิภาพ	44
16	แสดงไอโซเทอมการดูดซับของถ่านกัมมันต์	45
17	แสดงการศึกษาการบำบัดสีย้อมแบบต่อเนื่องในถังปฏิกรณ์	47

การใช้ประโยชน์จากของเสียในอุตสาหกรรมอาหารเพื่อปรับปรุงความเข้มสีน้ำเสียจาก อุตสาหกรรมฟอกย้อม

Utilization of Food Industry Waste for Decolorization Textile Wastewater

คำนำ

อุตสาหกรรมอาหารเป็นอุตสาหกรรมหลักที่สำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศ และมีการขยายตัวเพิ่มมากขึ้นในแต่ละปี โดยในปี พ.ศ. 2552 ปริมาณการผลิต กุ้งแช่แข็ง เพิ่มขึ้นจาก ปีพ.ศ. 2551 คิดเป็นร้อยละ 12 (สถิติอุตสาหกรรม, 2555) ทั้งนี้การขยายตัวนี้ยังส่งผลโดยตรงต่อปริมาณของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตดังกล่าว ซึ่งทางสถานประกอบการนี้ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการบริหารจัดการเป็นจำนวนมาก

ซึ่งสอดคล้องเช่นเดียวกับอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอที่เป็นอีกอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีความสำคัญในประเทศ จากข้อมูลพบว่าอุตสาหกรรมสิ่งทอมีการขยายตัวเพิ่มมากขึ้น โดยจะเห็นได้จากข้อมูลปี พ.ศ. 2548 อุตสาหกรรมสิ่งทอและอุตสาหกรรมเครื่องนุ่งห่มมีการขยายตัวถึงร้อยละ 2.7 และ 2.8 ตามลำดับ (สถิติสิ่งทอไทย 2550/2551, 2552) การขยายตัวของอุตสาหกรรมสิ่งทอส่งผลให้อุตสาหกรรมฟอกย้อมมีการขยายตัวเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน ในกระบวนการฟอกย้อมมีการใช้น้ำเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิต ซึ่งน้ำเสียที่ออกจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมจะมีสีเข้มและปริมาณมาก อัตราส่วนค่าบีโอดีห้าวันต่อค่าซีโอดีสูง ซึ่งชี้ให้เห็นว่ายากต่อการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ (Sundrarajan, 2007)

ทั้งนี้เทคนิคที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีหลายวิธี ได้แก่ การตกตะกอน การกรองด้วยเยื่อกรองเมมเบรน การออกซิไดซ์ด้วยก๊าซโอโซน และการดูดซับด้วยไคโตซานซึ่งสามารถผลิตได้จากเปลือกกุ้ง ก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่มีงานวิจัยชี้ให้เห็นว่าสามารถใช้ในการดูดซับน้ำเสียสีย้อมได้ อย่างไรก็ตามการผลิตไคโตซานใช้เวลาในการผลิตค่อนข้างมากและค่าใช้จ่ายที่สูง ซึ่งไม่คุ้มค่าต่อการนำมาบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ประโยชน์จากของเสียในอุตสาหกรรมอาหารเพื่อปรับปรุงความเข้มสีน้ำเสียสีย้อมรีแอกทีฟ บลู 4 โดยใช้เปลือกกุ้งที่ผ่านการปรับปรุง

ประสิทธิภาพการดูดซับด้วยกรดอะซิติกที่ผลิตเศษสับประรดเป็นวัสดุดูดซับ ทำการเปรียบเทียบค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับและความสามารถในการดูดซับกับถ่านกัมมันต์ และศึกษาการบำบัดน้ำเสียสีข้อมริแอกทีฟในถังปฏิกริยาแบบต่อเนื่องด้วยเปลือกกุ้งที่ผ่านการปรับปรุงประสิทธิภาพ



วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาความสามารถในการบำบัดน้ำเสียที่มีสีข้อมริแอกทีฟด้วยเปลือกกุ้งที่ผ่านการปรับปรุงประสิทธิภาพด้วยกรดอะซิติกที่ผลิตจากเศษสับประรด และเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ โดยทำการพิจารณาค่าคงที่อัตราเร็ว และปริมาณสีข้อมที่สามารรถูดซับได้มากที่สุดบนตัวดูดซับ
2. เพื่อศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่มีสีข้อมริแอกทีฟแบบต่อเนื่องด้วยเปลือกกุ้งที่ผ่านการปรับปรุงประสิทธิภาพ

ขอบเขตการศึกษา

1. น้ำเสียที่ใช้เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากสีข้อมริแอกทีฟ บลู 4
2. วัสดุคิบสำหรับผลิตกรดอะซิติก ได้แก่ เศษสับประรด
3. เชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการผลิตกรด ได้แก่ *Acetobacter aceti* TISTR 103
4. วัสดุดูดซับที่ใช้ในงานวิจัย ได้แก่ เปลือกกุ้ง และ ถ่านกัมมันต์
5. ทำการทดลองแบบครั้ง (Batch test) โดยทำการศึกษา
 - ศึกษาผลของระยะเวลาสัมผัสต่อการบำบัดน้ำเสียที่มีสีข้อม และ ค่าคงที่อัตราเร็ว
 - ศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ โดยทำการพิจารณาสมการดูดซับ แลงเมียร์และ

ฟรุนดลิช

6. ทำการทดลองการดูดซับสีข้อมแบบต่อเนื่องในถังปฏิกริยาแบบคอลัมน์โดยใช้เปลือกกุ้งที่ผ่านการปรับปรุงประสิทธิภาพเป็นตัวดูดซับ โดยทำการแปรค่าอัตราอัตราการไหล 0.3 และ 0.7 มิลลิลิตรต่อนาที

7. พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ คือ ความเข้มข้นสีในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร

การตรวจเอกสาร

1. สีย้อม (Dyes)

สีย้อมสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ สีย้อมธรรมชาติ และสีย้อมสังเคราะห์ แต่ในที่นี่จะกล่าวถึงสีย้อมสังเคราะห์ซึ่งมีใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน

สีย้อมสังเคราะห์เป็นสารเคมีที่สกัดจากน้ำมันปิโตรเลียม หรือถ่านหิน เมื่อน้ำมันปิโตรเลียม หรือถ่านหินผ่านการสกัดจะได้สารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัว มีลักษณะเป็นผลึกหรือผงละเอียด สารไฮโดรคาร์บอนเหล่านี้จะถูกเปลี่ยนเป็นสีย้อมด้วยเทคนิคต่างๆ คุณภาพของสีย้อมในการใช้งานจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการดูดติดของสีย้อมกับเส้นใยมากกว่าความสามารถในการรวมตัวกับน้ำ แรงดูดติดของสีย้อมขึ้นอยู่กับอิทธิพลเชิงเคมี 4 ชนิด คือ พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) แรงวานเดอร์วาลส์ (Van der Waal's forces) แรงไอออนิก (Ionic forces) พันธะโควาเลนต์ (Covalent bond) (ธีระพงษ์, 2543)

1.1 การตั้งชื่อสีย้อม

สมาคมผู้ประกอบการย้อมสี American Association of Textile Chemists and Colorists ในประเทศสหรัฐอเมริกา และ Society of Dye and Colorists ในประเทศอังกฤษ ได้ร่วมกันจัดทำทะเบียนรายชื่อสีที่มีจำหน่ายในท้องตลาดขึ้นเรียกว่า Color Index โดยตั้งชื่อให้กับสีแต่ละตัวเรียกว่า C.I. Generic Name โดยมีองค์ประกอบดังนี้

C.I. + ชื่อประเภทของสี + เฉดสี + หมายเลขลำดับ

โดยที่ประเภทของสีแบ่งออกเป็น 15 ประเภท คือ Acid, Azoic, Direct, Disperse, Fluorescent brighteners, Food, Ingrain, Leather, Mordant, Oxidation, Pigment, Reactive, Vat, Solvent และ Sulphur ส่วนเฉดสีแบ่งออกเป็น 8 เฉดสี คือ สีเหลือง สีส้ม สีแดง สีม่วง สีฟ้า สีเขียว สีน้ำตาล และ สีดำ (ราตรี, 2543)

1.2 องค์ประกอบสีย้อม

สีย้อมเป็นสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างทางเคมีแบ่งออกเป็น 2 หมู่ (กมลรัตน์, 2539) คือ

1) หมู่โครโมฟอร์ (Chromophores group) เป็นกลุ่มที่มีพันธะคู่ สามารถให้สีโดยการดูดกลืนรังสีในช่วงอัลตราไวโอเล็ต และช่วงที่มองเห็นได้ ตั้งแต่ 200 – 800 นาโนเมตร ตัวอย่างของหมู่โครโมฟอร์ ได้แก่ Ethylenic Chromophores (C=C) Carbonyl Chromophores (C=O) Nitroso Chromophores (-N=O) Nitro Chromophores (-NO₂) และ Azo Chromophores (-N=N-)

2) หมู่ออกโซโครม (Auxochrome group) เป็นกลุ่มที่ทำให้สีย้อมเกาะติดกับเส้นใยโดยทั่วไป หมายถึง Saturated group ซึ่งมีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยว และไม่สามารถดูดกลืนรังสีที่มีความยาวคลื่นเกิน 200 นาโนเมตร แต่เมื่อนำไปเกาะในตำแหน่งที่ติดกับหมู่โครโมฟอร์ จะทำให้เกิด Resonance interaction ทำให้โครโมฟอร์ดูดกลืนรังสีที่มีความยาวคลื่นมากขึ้น ตัวอย่างของออกโซโครม ได้แก่ หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) หมู่อะมิโน (-NH₂) และ หมู่คาร์บอกซิลิก (-COOH) เป็นต้น

1.3 การจำแนกประเภทสีย้อม

สีย้อมสามารถจำแนกโดยพิจารณาได้จาก ลักษณะการใช้งาน ลักษณะทางกายภาพ และชนิดเส้นใยที่นำไปย้อมสี ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การจำแนกสี้อมในลักษณะที่ต่างกัน

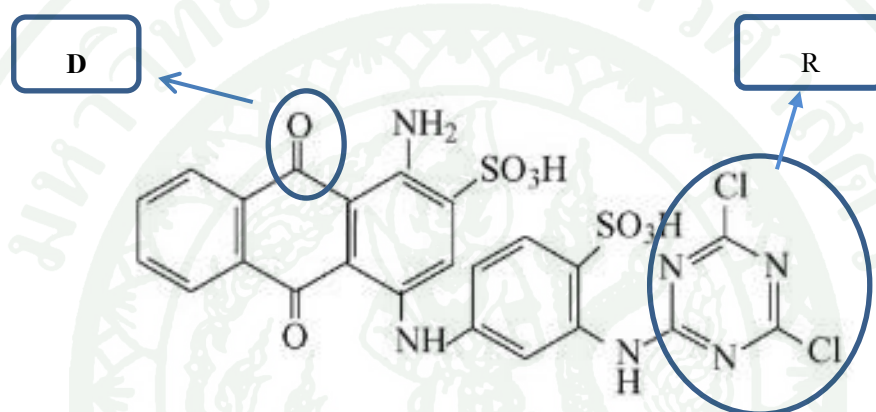
ลักษณะการใช้งาน	ลักษณะทางกายภาพ		ชนิดเส้นใยที่นำไปย้อมสี
	ชนิดที่ละลายน้ำ	ชนิดที่ไม่ละลายน้ำ	
สี้อมแอซิด	สี้อมแอซิด	สี้อมเอโซ	<u>สี้อมฝ้าย</u>
สี้อมเบสิก	สี้อมเบสิก	สี้อมดิสเพอร์ส	- สี้อมไคเร็กซ์
สี้อมไคเร็กซ์	สี้อมไคเร็กซ์	สี้อมเว็ต	- สี้อมรีแอคทีฟ
สี้อมเอโซ	สี้อมรีแอคทีฟ	สี้อมมอร์แคนท์	- สี้อมเว็ต
สี้อมดิสเพอร์ส		สี้อมซัลเฟอร์	- สี้อมซัลเฟอร์
สี้อมรีแอคทีฟ			<u>สี้อมโพลีเอสเทอร์</u>
สี้อมเว็ต			- สี้อมดิสเพอร์ส
สี้อมมอร์แคนท์			<u>สี้อมไนลอน</u>
สี้อมซัลเฟอร์			- สี้อมแอซิด
สี้อมโซลเวนท์			- สี้อมเมทัลคอมเพล็กซ์
			<u>สี้อมอะคริลิก</u>
			- สี้อมเบสิก

ในงานวิจัยนี้ศึกษาการบำบัดน้ำเสียสี้อมรีแอคทีฟ ด้วยกระบวนการดูดซับด้วยเปลือกกุ้งที่ผ่านการปรับปรุงประสิทธิภาพ

สี้อมรีแอคทีฟ (Reactive Dyes) เป็นสี้อมที่ละลายน้ำได้ มีประจุลบ เมื่ออยู่ในน้ำจะมีสมบัติเป็นด่าง สี้อมชนิดนี้เหมาะกับการย้อมเส้นใยเซลลูโลสและเส้นใยโปรตีน เช่น เส้นใยฝ้าย เส้นใยไหม เป็นต้น โมเลกุลของสี้อมจะยึดจับกับหมู่ไฮดรอกไซด์ (OH^-) ของเซลลูโลสและเชื่อมโยงติดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ในสภาวะที่เป็นด่าง กลายเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่กับเซลลูโลสและเส้นใยโปรตีน สี้อมรีแอคทีฟมี 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิสูง $70-75\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ กลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิต่ำ สี้อมรีแอคทีฟให้สีที่สดใสและทุกสีติดทนในทุกสภาวะ

โครงสร้างทางเคมีของสี้อมรีแอคทีฟ ประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ 2 ส่วนคือ ส่วนที่มีสีและดูดกลืนแสง (Chromophore) ใช้แทนด้วยตัวอักษร "D" และกลุ่มที่ทำปฏิกิริยา (Reactive group) ใช้แทนด้วยตัวอักษร "R"

ส่วนที่มีสีนั้น มีลักษณะ โครงสร้างคล้ายคลึงกับ โมเลกุลของสีย้อมทั่วไป ส่วนใหญ่จะเป็นพวกหมู่เอโซ (Azo) และแอนทราควิโนน (Anthraquinone) สำหรับส่วนที่เป็นกลุ่มทำปฏิกิริยานั้นสามารถแบ่งออกไปได้อีกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนที่ทำหน้าที่เชื่อมกับส่วนที่มีสี ส่วนที่เป็นโครงสร้างหลักของกลุ่มทำปฏิกิริยา และส่วนที่เป็นกลุ่มที่จะหลุดออกไป (Leaving group) เมื่อสีย้อมทำปฏิกิริยากับเส้นใย สูตรโครงสร้างทางเคมีของสีย้อมรีแอคทีฟที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แสดงส่วนประกอบต่างๆ แสดงดังภาพที่ 1



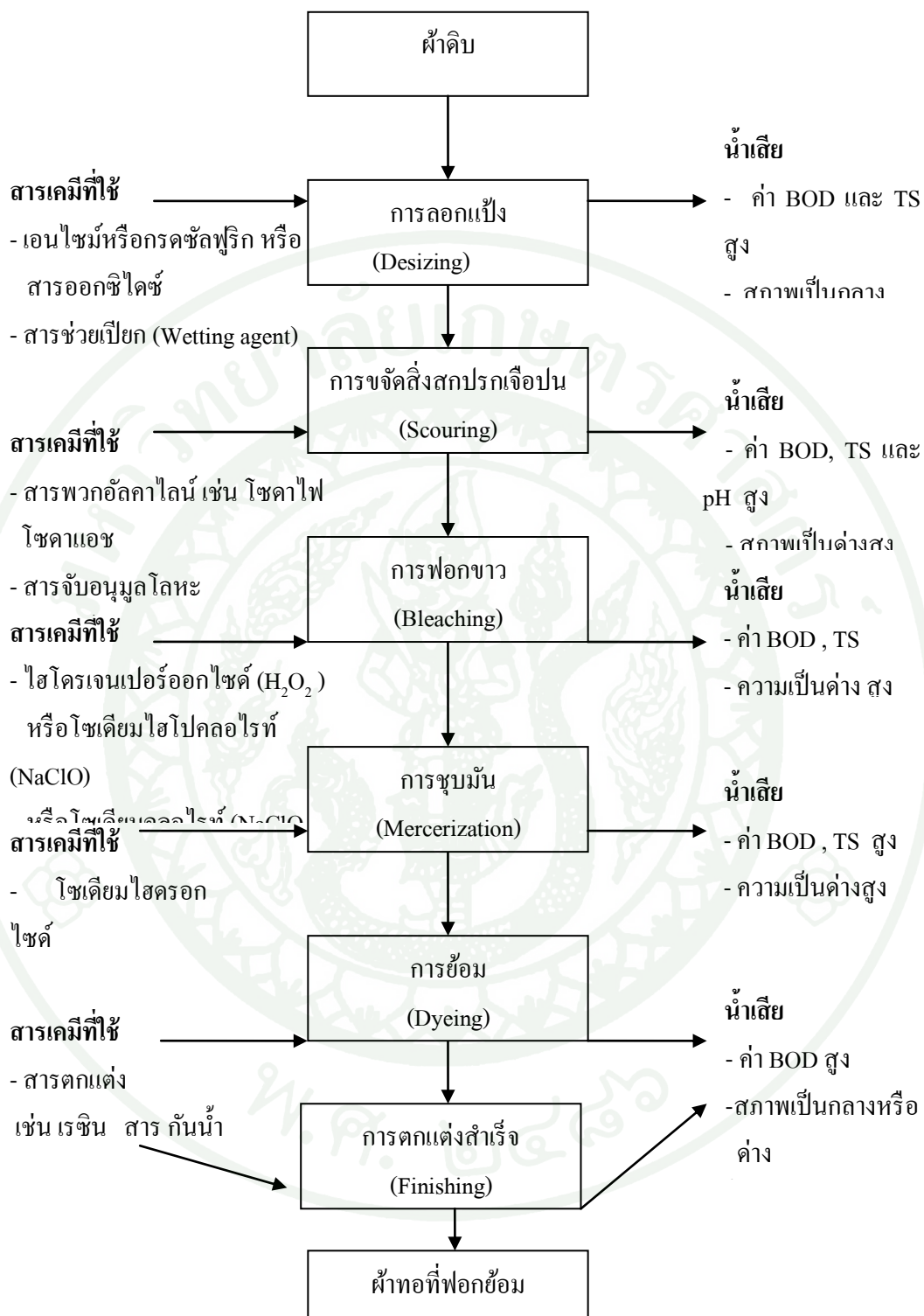
ภาพที่ 1 โครงสร้างสีย้อมรีแอคทีฟ บลู 4

2. น้ำเสียที่เกิดจากระบวนการฟอกย้อม

ปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากระบวนการฟอกย้อมมีทั้งอากาศเสีย น้ำเสีย และของเสียที่เป็นของแข็ง แต่ปัญหาที่เกิดขึ้นจากระบวนการฟอกย้อมส่วนใหญ่จะเกิดจากน้ำเสียที่ปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม

2.1 การเกิดน้ำเสียจากระบวนการฟอกย้อม

น้ำเสียที่เกิดจากระบวนการฟอกย้อม จะเกิดในทุกขั้นตอน ตั้งแต่ขั้นตอนการเตรียมผ้า ขั้นตอนการย้อมสี และขั้นตอนการตกแต่งสำเร็จ โดยเฉพาะในการชำระล้างทำความสะอาดของ แต่ละขั้นตอนจะมีการใช้น้ำในปริมาณสูง น้ำเสียที่ออกมาจากขั้นตอนต่างๆในกระบวนการฟอกย้อม (ผ้าทอ) แสดงดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 การเกิดน้ำเสียในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการฟอกย้อมผ้าทอ

2.2 ลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อม

จากข้อมูลของกรมโรงงานอุตสาหกรรมที่ทำการสำรวจและเก็บตัวอย่างน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑลจำนวน 100 ตัวอย่าง ซึ่งเก็บตัวอย่างแบบจ้วงตัก (Grab sample) ที่จุดรวมน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัดน้ำเสีย พารามิเตอร์ที่ทำการตรวจวัดได้แก่ ความสกปรกในรูปของค่าบีโอดี (BOD) ค่าซีโอดี (COD) ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ปริมาณของแข็งแขวนลอย (SS) และค่าปริมาณสี โดยใช้วิธีเทียบสี (Platinum Cobalt Method) ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ลักษณะน้ำเสียของกระบวนการฟอกย้อมแบ่งตามผลิตภัณฑ์ที่ฟอกย้อม

ผลิตภัณฑ์ที่ฟอกย้อม	จำนวนโรงงานที่สำรวจ	ลักษณะของน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัด				
		pH	BOD (มก./ล)	COD (มก./ล)	SS (มก./ล)	สี (Pt-Co)
ฟอกย้อมด้าย	13	8.2	120	300	43	450
ฟอกย้อมผ้าถัก	16	9.0	110	370	50	570
ฟอกย้อมผ้าทอ	41	8.6	110	1200	140	670
ฟอกย้อมผ้า	30	9.1	230	713	65	400

ที่มา: กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2542)

จากตารางที่ 2 แสดงลักษณะน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมพบว่า มีลักษณะดังนี้

- มีปริมาณสารอินทรีย์สูงเนื่องจากมีค่า BOD และค่า COD สูง และทำให้อัตราส่วนของ BOD₅/COD ต่ำ ซึ่งแสดงถึงความสามารถที่ถูกย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ได้ยาก ปริมาณสารอินทรีย์ที่ได้จาก กระบวนการฟอกย้อม ได้แก่ แป้ง สีย้อม เส้นใย และด้ายที่ปนออกมาจาก กระบวนการย้อมและตกแต่ง

- มีความเป็นด่างสูง สารที่ทำให้ให้น้ำมีลักษณะเป็นด่างคือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และ โซเดียมคาร์บอเนต ซึ่งมีการใช้ในขั้นตอนการกำจัดสิ่งสกปรกเจือปน (Scouring)

- มีอุณหภูมิสูงประมาณ 50 องศาเซลเซียส โดยเฉพาะในขั้นตอนที่มีการใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ขั้นตอนการกำจัดสิ่งสกปรกเจือปน ขั้นตอนการข้อม และขั้นตอนการตกแต่งสำเร็จ

- มีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำสูง ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำมาจากเกลือโซเดียมและกรดต่างๆ

- มีสีเข้มมาก ที่มาจากสีข้อมที่ไม่คิดเส้นใยในการข้อมผ้า

- มีปริมาณทีเอสเอส หรือของแข็งแขวนลอยทั้งหมดสูง โดยเฉพาะจากเศษเส้นใยที่หลุดออกมา ในระหว่างขั้นตอนการเตรียมผ้า เส้นใยหรือการข้อมสี

น้ำเสียที่ออกจากอุตสาหกรรมฟอกข้อมจะมีสีเข้มและปริมาณมาก อัตราส่วนค่าบีโอดีห้าวันต่อค่าซีโอดีสูง ซึ่งชี้ให้เห็นว่ายากต่อการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ (Sundrarajan, 2007) โดยการที่น้ำเสียจะถูกปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมต้องผ่านกระบวนการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกข้อมสามารถบำบัดได้ด้วยหลากหลายวิธีการ ซึ่งกระบวนการดูดซับก็เป็นกระบวนการหนึ่งซึ่งพบว่าการเหมาะสมต่อการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกข้อมทั้งในด้านต้นทุน ความง่ายในการออกแบบ และเหมาะสมต่อการบำบัดมลพิษ (Nevine Kamal Amin, 2009)

3. กระบวนการดูดซับ (Adsorption Process)

การดูดซับเป็นความสามารถของสารในการดึงโมเลกุลที่อยู่ในแก๊สหรือของเหลวให้มาเกาะจับและติดบนผิว โดยโมเลกุลที่เคลื่อนย้ายมาเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของตัวถูกดูดซับ เรียกว่า ตัวดูดซับ (adsorbent) การดูดซับจึงเป็นกระบวนการเคลื่อนย้ายของตัวถูกดูดซับจากตัวกลางหนึ่งไปสะสมที่พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อมีการสัมผัสกันของพื้นผิวระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับกับตัวถูกดูดซับ โดยที่ตัวถูกดูดซับจะไปเกาะที่ผิวของตัวดูดซับ สมบัติที่สำคัญที่สุดของตัวดูดซับ คือ ความพรุน เพื่อเพิ่มพื้นที่สัมผัสภายใน นอกจากนี้สมบัติอื่นๆของตัวดูดซับ เช่น โครงสร้าง การจัดเรียงตัว ขนาด และความสม่ำเสมอล้วนมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ การดูดซับมีบทบาทสำคัญต่อการเคลื่อนย้าย และการเปลี่ยนแปลงของสารเคมีในสิ่งแวดล้อม โดยที่โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจะถูกจำกัดความอิสระ ในการเคลื่อนย้าย(จะตกตะกอนไปพร้อมกับตัวดูดซับ) เทียบกับโมเลกุลอิสระส่วนที่ไม่ถูกดูดซับ และ

โมเลกุลที่ไม่ถูกดูดซับจะเกิดกระบวนการเปลี่ยนรูปของสารเคมี การย่อยสลายด้วยแสง หรือการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ สามารถเกิดขึ้นได้ง่ายกว่าโมเลกุลชนิดเดียวกัน แต่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับ (นิพนธ์ และคณิตา, 2550)

3.1 กลไกการดูดซับ

กลไกการดูดซับแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

3.1.1 การแพร่ภายนอก (external diffusion) การแพร่ภายนอกเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเข้าถึงตัวดูดซับ ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีของเหลวห่อหุ้ม โดยโมเลกุลแทรกผ่านชั้นของของเหลวเข้าถึงผิวหน้าของตัวดูดซับ

3.1.2 การแพร่ผ่านภายใน (internal reaction) เป็นกลไกซึ่งซึ่งโมเลกุลของตัวถูกดูดซับแทรกตัวเข้าถึงช่องว่างตัวดูดซับ เพื่อให้เกิดการดูดซับ

3.1.3 ปฏิกิริยาพื้นผิว (surface reaction) ปฏิกิริยาพื้นผิวเป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกดูดซับติดที่ผิวของตัวดูดซับซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่ ดังนั้นควรคำนึงถึงการต้านทานจากปฏิกิริยาพื้นผิวด้วย

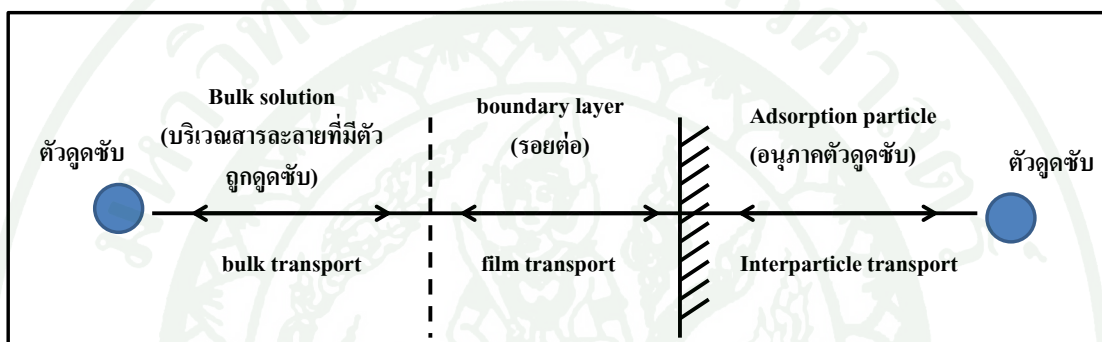
3.2 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ

อัตราการดูดซับมีความสำคัญมาก อัตราการดูดซับที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็ว อัตราการดูดซับจะถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่มีการต้านทานมากที่สุดในการเคลื่อนย้ายโมเลกุลซึ่งขั้นตอนที่ช้าที่สุดจะเป็นขั้นตอนกำหนดอัตราการดูดซับ ขั้นตอนการดูดซับแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนย่อย ได้แก่

3.2.1 การขนส่งอนุภาค (bulk transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกดูดซับในของเหลวจะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของของเหลวบางๆ หรือผิวสัมผัสน้ำที่ห่อหุ้มตัวดูดซับ

3.2.2 การขนส่งชั้นฟิล์ม (film transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวหน้าชั้นของเหลว บางๆ แทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดซับ การขนส่งชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่ตัวถูกดูดซับแพร่ ผ่านฟิล์มน้ำไปยังผิวของตัวดูดซับ จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับขั้นต้นหนึ่ง

3.2.3 การขนส่งภายในอนุภาค (interparticle transport) เป็นการแพร่ของโมเลกุลตัว ถูกละลายเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของสารดูดซับ (pore diffusion) และทำให้เกิดการดูดซับขึ้นภายใน ขั้นตอนนี้จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับเช่นเดียวกัน



ภาพที่ 3 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ

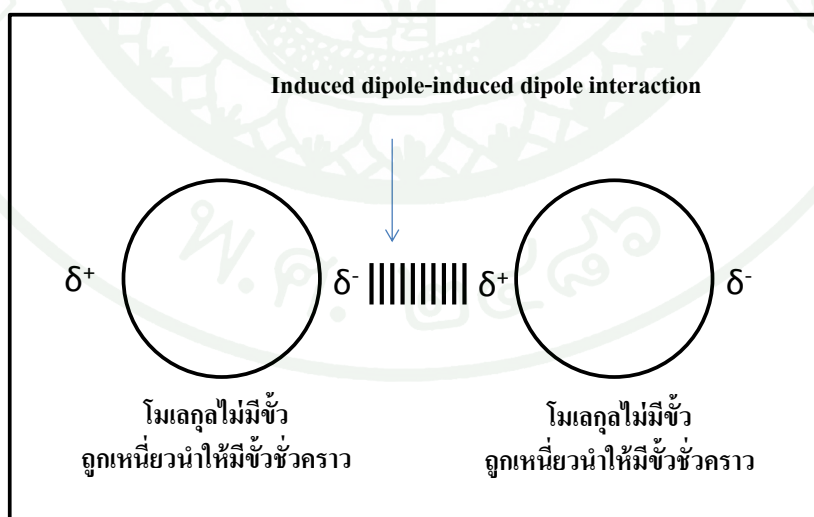
ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

3.3 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล

แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับนั้น อาจเป็นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแบบทางกายภาพ (physical force) หรือแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแบบทางเคมี (chemical force) หรือในบางกรณีอาจเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลทั้งสองแบบ

3.3.1 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแบบทางกายภาพที่เกี่ยวกับตัวดูดซับ ได้แก่ แรงแวนเดอร์วาลส์ (van der waal force) แรงแวนเดอร์วาลส์ คือ แรงที่ยึดเหนี่ยวโมเลกุล (โคเวเลนต์) ให้อยู่ด้วยกัน โดยโมเลกุล (โคเวเลนต์) ทุกชนิดทั้งโมเลกุลมีขั้วและโมเลกุลไม่มีขั้ว ต่างมีแรงแวนเดอร์วาลส์ยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลกับโมเลกุล เมื่อมวลโมเลกุลเพิ่มขึ้นแรงแวนเดอร์วาลส์จะเพิ่มขึ้น แรงแวนเดอร์วาลส์มี 3 ประเภท ดังนี้

1) แรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลไม่มีขั้ว ซึ่งเรียกว่าแรงลอนดอน (London force) หรือแรงแผ่กระจาย (dispersion force) เกิดขึ้นได้เนื่องจากอิเล็กตรอนในโมเลกุลเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลาในขณะใดขณะหนึ่ง กลุ่มหมอกอิเล็กตรอนในโมเลกุลไม่ได้กระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอในลักษณะที่สมมาตร แต่จะเคลื่อนที่ไปหนาแน่นด้านใดด้านหนึ่ง ทำให้ด้านนั้นมีขั้วไฟฟ้าลบมากขึ้นกว่าปกติ อีกด้านก็จะแสดงอำนาจขั้วไฟฟ้าบวก หรือกล่าวได้ว่า ทำให้โมเลกุลนั้นกลายเป็นโมเลกุลมีขั้วชั่วคราวขึ้นมา ขั้วของโมเลกุลที่เกิดขึ้นนี้จะไปเหนี่ยวนำโมเลกุลข้างเคียง ถ้าโมเลกุลมีขั้วหันขั้วบวกไปทางโมเลกุลใดก็จะเหนี่ยวนำให้โมเลกุลนั้นเกิดขั้วลบขึ้นทางด้านที่ติดกัน โดยวิธีนี้โมเลกุลจะเกิดการเหนี่ยวนำกันต่อไปจนเกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้ว ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ (induced dipole-induced dipole attraction) แรงแวนเดอร์วาลส์มีค่าเพิ่มขึ้นตามมวลโมเลกุล เพราะเมื่อโมเลกุลมีขนาดใหญ่ขึ้น จำนวนอิเล็กตรอนย่อมเพิ่มขึ้นด้วย เมื่ออิเล็กตรอนจำนวนมากไปอยู่หนาแน่นทางด้านใดด้านหนึ่งจะแสดงอำนาจไฟฟ้าลบมาก และด้านตรงข้ามก็จะมีอำนาจขั้วไฟฟ้าบวกมากด้วย แรงดึงดูดระหว่างขั้วที่เกิดจากการเหนี่ยวนำจึงมีความแข็งแรงมากขึ้นตามไปด้วย นอกจากจำนวนอิเล็กตรอนในโมเลกุลแล้วรูปร่างของโมเลกุลก็มีส่วนที่จะทำให้อำนาจแวนเดอร์วาลส์มีความแข็งแรงมากหรือน้อย เป็นต้นว่า ถ้าโมเลกุลไม่ซับซ้อน อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปอยู่หนาแน่นทางด้านใดด้านหนึ่งได้ง่าย การเหนี่ยวนำให้เกิดขั้วของโมเลกุลจึงเป็นไปได้ง่าย แต่ถ้าโมเลกุลมีรูปร่างซับซ้อน อิเล็กตรอนที่ถูกเหนี่ยวนำจะเกิดการบดบังกัน สภาพขั้วจึงน้อย ทำให้อำนาจดึงดูดน้อยตามไปด้วย



ภาพที่ 4 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลไม่มีขั้ว ที่ถูกเหนี่ยวนำให้มีขั้วชั่วคราว

ที่มา: นิพนธ์ และกนิดา (2550)

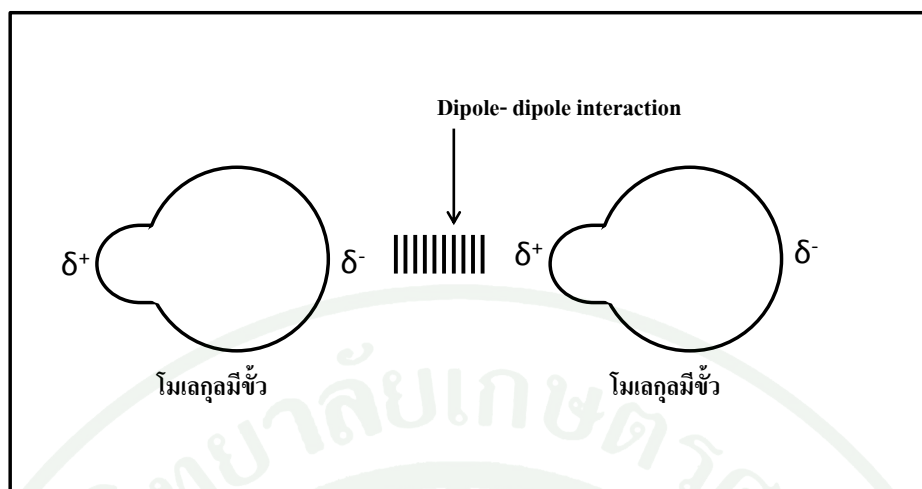
2) แรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลมีขั้วกับโมเลกุลไม่มีขั้ว กรณีเช่นนี้เกิดจากโมเลกุลมีขั้วเข้าใกล้โมเลกุลไม่มีขั้ว จะเกิดการเหนี่ยวนำทำให้โมเลกุลที่ถูกเหนี่ยวนำกลายเป็นโมเลกุลมีขั้วตามไปด้วย จึงเกิดแรงดึงดูดระหว่างขั้วกับขั้วที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ (dipole-induced dipole attraction)



ภาพที่ 5 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมีขั้วกับโมเลกุลไม่มีขั้ว ที่ถูกเหนี่ยวนำให้มีขั้วชั่วคราว

ที่มา: นิพนธ์ และกณิตา (2550)

3) แรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลมีขั้ว ด้านหนึ่งของโมเลกุลจะแสดงอำนาจขั้วไฟฟ้าบวกและอีกด้านหนึ่งแสดงอำนาจขั้วไฟฟ้าลบ ขั้วไฟฟ้าบวกกับขั้วไฟฟ้าลบ จึงดึงดูดกัน (dipole-dipole attraction) ในกรณีที่โมเลกุลประกอบด้วยอะตอมของไฮโดรเจนกับอะตอมของธาตุอื่นที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูง ทำให้เกิดพันธะสภาพมีขั้วสูง โดยด้านไฮโดรเจนอะตอมมีสภาพขั้วบวกจึงเกิดแรงดึงดูดกับอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวของอะตอมที่มีอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูงในโมเลกุลที่อยู่ข้างเคียง แรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นในลักษณะเช่นนี้เรียกว่า พันธะไฮโดรเจน แรงแวนเดอร์วาลส์ เป็นแรงที่ไม่แข็งแรงนักเมื่อเทียบกับแรงยึดเหนี่ยวชนิดอื่นๆเช่น การทำลายแรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลของคลอรีน (Cl_2) 1 โมล ใช้พลังงาน 25 กิโลจูลแต่พลังงานที่ต้องใช้เพื่อทำลายพันธะ Cl-Cl ในโมเลกุลคลอรีนมีค่าถึง 244 กิโลจูล/โมล ความแข็งแรงของแรงแวนเดอร์วาลส์มีค่าระหว่าง 0.01-0.1 ของพันธะโควาเลนต์ ดังนั้นการดูดซับทางกายภาพสามารถผันกลับคือเกิดการคายหรือเกิดการคายสารออก (desorption) อันเนื่องมาจากแรงยึดเหนี่ยว(แรงแวนเดอร์วาลส์) ที่ไม่แข็งแรงระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ



ภาพที่ 6 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมีขั้ว

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

3.3.2 แรงยึดเหนี่ยวทางเคมี คือ การสร้างพันธะเคมีระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ ซึ่งอาจเป็นพันธะไอออนิก (แรงดึงดูดระหว่างไอออนบวกกับไอออนลบ) หรือพันธะโควาเลนต์การใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน โดยเกิดสมมูลทั้งแรงดูด (อิเล็กตรอนกับโปรตอน) และแรงผลัก (อิเล็กตรอนกับอิเล็กตรอน และ โปรตอนกับโปรตอน) การเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ มีผลทำให้เกิดสารผลิตภัณฑ์ขึ้น และการดูดซับจะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayered) ทำให้ไม่สามารถผันกลับได้ (irreversible process) จึงไม่เกิดการคายซ้ำ

3.4 รูปแบบของการดูดซับ

3.4.1 การดูดซับทางกายภาพ (physisorption or physical adsorption or van der waals adsorption) เป็นผลมาจากปฏิกิริยาของแรงแวนเดอร์วาลส์ ซึ่งเกิดจากการรวมกันของแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic force) โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะถูกยึดติดแบบกายภาพกับโมเลกุลของตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเกาะอยู่บนผิวตัวดูดซับในลักษณะที่ซ้อนกันเป็นหลายชั้น (multilayered) โดยแต่ละชั้นของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะถูกดูดซับบนชั้น โมเลกุลที่ถูกดูดซับก่อนหน้านี้นี้ และจำนวนชั้นของโมเลกุลตัวถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับเพิ่มขึ้น แรงยึดเหนี่ยวระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวดูด

ซับ และระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับด้วยในระหว่างชั้น อาจเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์อย่างใดอย่างหนึ่ง การดูดซับทางกายภาพโดยทั่วไปจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้พลังงานของระบบลดลงเป็นการทำให้ระบบมีความเสถียรมากขึ้น

3.4.2 การดูดซับทางเคมี (chemisorption) เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ เกิดเป็นสารประกอบเคมีซึ่งแตกต่างจากการดูดซับทางกายภาพ กระบวนการนี้จะมีความหนาของโมเลกุลเพียงชั้นเดียว และไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับเองได้ ส่วนการดูดซับทางกายภาพที่สามารถผันกลับเองได้ เนื่องจากมีการจับตัวทางเคมีสร้างสารประกอบใหม่ที่ผิวของตัวดูดซับ การดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงเนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมีจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิต่ำ ความแข็งแรงของแรงดึงดูดสามารถวัดได้จากผลต่างจากความร้อนที่เกิดขึ้น จากการดูดซับทางกายภาพจะให้พลังงานต่ำโดยทั่วไปประมาณ 2-10 กิโลแคลอรี/โมล ส่วนการดูดซับทางเคมีจะให้พลังงานสูงโดยประมาณ 15-50 กิโลแคลอรี/โมล และยังพบว่าค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของกระบวนการดูดซับทางเคมีมีค่ามากกว่าทางกายภาพ ด้วยเหตุผลนี้ กระบวนการดูดซับทางกายภาพจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าทางเคมี

3.5 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

3.5.1 ความปั่นป่วน อัตราเร็วในการดูดซับอาจขึ้นอยู่กับ film diffusion หรือ pore diffusion ซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำ फिल्मน้ำซึ่งล้อมรอบตัวดูดซับจะมีความหนามากและเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับเข้าไปหาตัวดูดซับ ดังนั้นการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในตรงกันข้าม ถ้าความปั่นป่วนสูงจะเกิดฟิล์มบาง ทำให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มน้ำเข้าหาตัวดูดซับได้รวดเร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในรูพรุน ในการนี้การแพร่ผ่านรูพรุนจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วในการดูดซับ

3.5.2 ขนาดและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ความสามารถในการดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะ นั่นคือ ตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวมากจะดูด โมเลกุลของตัวถูกดูดซับได้มากกว่าตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวน้อย และอัตราการดูดซับเป็นอัตราส่วนผกผันกับขนาดตัวดูดซับ เช่น คาร์บอนผง (powder activated carbon, PAC) มีอัตราเร็วในการดูดซับสูงกว่าคาร์บอนแบบเกร็ด (granular activated carbon, GAC)

3.5.3 ขนาดและลักษณะของตัวดูดซับ ขนาดของสารหรือโมเลกุลมีความสำคัญมากต่อการดูดซับ ซึ่งส่วนใหญ่เกิดขึ้นในโพรงของตัวดูดซับ เช่น คาร์บอน การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุดเมื่อสารมีขนาดเล็กกว่าช่องว่างภายในพอลิ (พอลิเข้าไปในช่องว่างได้) ทั้งนี้เพราะว่าแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับและตัวดูดซับจะมีค่ามากที่สุด โมเลกุลขนาดเล็กจะถูกดูดเข้าไปในช่องว่างภายในก่อน จากนั้น โมเลกุลขนาดใหญ่กว่าจึงถูกดูดเข้าไปบ้าง อาจกล่าวได้ว่าความสามารถในการดูดซับจะแปรผกผันกับขนาดโมเลกุลของตัวดูดซับ นั่นคือ เมื่อน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะลดลง

3.5.4 ความสามารถในการละลายน้ำของตัวดูดซับ ความสามารถในการละลายน้ำของตัวดูดซับเป็นปัจจัยสำคัญในการดูดซับ การดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถในการละลายน้ำของตัวดูดซับในตัวทำละลายลดลง เนื่องจากในการดูดซับตัวดูดซับจะต้องถูกแยกออกจากตัวทำละลาย ในที่นี้คือ น้ำ ดังนั้นสารที่ไม่ละลายน้ำ หรือละลายได้น้อยจะสามารถดูดซับได้ดี

3.5.5 พิเอช มีอิทธิพลต่อการแตกตัวเป็นไอออนและการละลายน้ำของสารต่างๆ ดังนั้น จึงมีผลกระทบต่อ การดูดซับด้วย นอกจากนี้ไฮโดรเจนไอออนเองก็เป็นไอออนที่สามารถเกาะติดผิวของตัวดูดซับได้ดี

3.5.6 อุณหภูมิ มีอิทธิพลต่ออัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดซับ กล่าวคือ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้การแพร่ผ่านของสารที่ถูกดูดซับลงไปยังรูพรุนของตัวดูดซับได้เร็วขึ้น แต่จะส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับลดลง

3.5.7 เวลาสัมผัส เป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ และอายุการใช้งานของตัวดูดซับ โดยที่เวลาสัมผัสมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการดูดซับเพียงช่วงหนึ่งเท่านั้น ซึ่งถ้าเวลาสัมผัสเลยจากช่วงนี้แล้ว ก็จะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับเลย

3.6 สมดุลการดูดซับ (adsorption equilibrium)

เมื่อเติมตัวดูดซับปริมาณหนึ่งลงไปในสารละลายที่มีโมเลกุลตัวดูดซับเข้มข้น ตอนต้นโมเลกุลตัวดูดซับบางส่วนไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับ เมื่อเวลาผ่านไปจะมีจำนวนโมเลกุลตัวดูดซับไปเกาะติดพื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มมากขึ้น ในขณะเดียวกัน โมเลกุลตัวดูดซับบางส่วนที่เกาะติดกับพื้นผิวจะคายซับออกมา พบว่าอัตราการคายซับจะเกิดน้อยกว่าอัตราการดูดซับ เมื่อปล่อย

ให้กระบวนการดูดซับดำเนินไปจนกระทั่งอัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคายซับ ณ สภาวะสมดุลของการดูดซับ จะได้ว่าจำนวนโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและจำนวนโมเลกุลคายซับออกมามีปริมาณคงที่

3.7 ไอโซเทอมของการดูดซับ

ในงานวิจัยนี้จะใช้ทฤษฎีการดูดซับแบบแลงเมียร์ และ ฟรูนดลิช ในการศึกษา

3.7.1 สมการการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm)

สมการการดูดซับของแลงเมียร์ ได้มีข้อกำหนดว่า พื้นผิวบนตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมด (monogeneous adsorption surface) มีกลไกของการดูดซับเหมือนกัน การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียวตัวถูกดูดซับจะจัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับไม่เกิดการซ้อนทับกัน พื้นผิวบนตัวดูดซับจะมีจำนวนจำกัด และเมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับไว้แล้วจะไม่มี การเคลื่อนที่ (เคลื่อนย้าย) หรือเปลี่ยนแปลงกันกับตัวถูกดูดซับอื่นบนพื้นผิวตัวดูดซับพื้นผิวตัวดูดซับจะถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้นจนมีตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว (ถูกดูดซับได้มากที่สุด)

รูปแบบสมการแลงเมียร์จะใช้

$$q_e = \frac{q_m K_a C_e}{1 + K_a C_e} \quad \dots(1)$$

เมื่อจัดรูปแบบให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรงจะได้

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m} C_e + \frac{1}{K_a q_m} \quad \dots(2)$$

เมื่อ q_e = ปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ

(ความสามารถการดูดซับ) (mg/g)

q_m = ความสามารถสูงสุดในการดูดซับ (mg/g)

K_a = ค่าคงที่การดูดซับ

C_e = ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (mg/l)

พล็อตกราฟระหว่าง $\frac{C_e}{q_e}$ และ C_e จะได้กราฟเส้นตรงมีค่าความชันเท่ากับ $\frac{1}{q_m}$ และจุดตัดเท่ากับ $\frac{1}{K_d q_m}$ (Yuh-Shan Ho, 2006)

3.7.2 สมการการดูดซับของฟรอนด์ลิช (Freundlich adsorption isotherm)

สมการการดูดซับของฟรอนด์ลิชคือไอโซเทอร์มของการดูดซับภายใต้ สมมติฐานที่ว่าพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบวิวิธพันธ์ (heterogeneous adsorption surface พื้นผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด) มีรูปแบบของสมการเป็นดังนี้

$$q = KC^{1/n} \quad \dots(3)$$

K และ n เป็นค่าคงที่ของฟรอนด์ลิช (Freundlich constant) ของแต่ละระบบที่กำลังศึกษาหรือทดลอง และ n ใช้อธิบายลักษณะเส้นกราฟไอโซเทอร์มของการดูดซับ โดยทั่ว ๆ ไป n จะ มีค่ามากกว่าหนึ่ง

เมื่อจัดรูปสมการ ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง โดยใส่ลอการิทึมทั้งสองข้าง ของสมการจะได้

$$\log q = \log K + \frac{1}{n} \log C \quad \dots(4)$$

เมื่อ q = ปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ (ความสามารถการดูดซับ) (mg/g)

K = ค่าคงที่การดูดซับ

$\frac{1}{n}$ = ความชันของกราฟ

C = ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (mg/l)

เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง $\log q$ กับ $\log C$ จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $\frac{1}{n}$ และมีจุดตัดเท่ากับ $\log K$

3.8 จลนศาสตร์เคมี

จลนศาสตร์ของปฏิกิริยาเคมีคือ อัตราการเกิดปฏิกิริยา (Rate of Reaction) จลนศาสตร์ที่จะกล่าวถึงนี้เป็นจลนศาสตร์สำหรับปฏิกิริยาที่ไม่ผันกลับ ในปฏิกิริยาที่ไม่ผันกลับสารตั้งต้นจะทำปฏิกิริยากันเกิดเป็นผลิตภัณฑ์เกือบสมบูรณ์ ซึ่งเราจะพบโดยทั่วไปในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย

3.8.1 ปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง (First-order Reaction)

อัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นของปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสารตั้งต้น ดังนั้น

$$\frac{dc}{dt} = -k_1 c \quad \dots\dots(5)$$

โดย k_1 คือค่าคงที่ของอัตราของการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง (ต่อเวลา)

เมื่อแก้สมการที่ (5) โดยใช้ช่วงของความเข้มข้นจาก $c = C_0$ ถึง $c = C_t$ และช่วงเวลาจาก $t = 0$ ถึง $t = t$ และจัดรูปใหม่จะได้เป็น

$$\ln \frac{C_0}{C_t} = k_1 t \quad \dots\dots(6)$$

จัดสมการที่ (6) ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรงจะได้

$$\ln C = \ln C_0 - k_1 t \quad \dots\dots(7)$$

3.8.1 ปฏิกิริยาอันดับที่สอง (Second-order Reaction)

การเกิดปฏิกิริยาลำดับที่สองมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกำลังสองของความเข้มข้นของสารตั้งต้น ดังนั้น

$$\frac{dc}{dt} = -k_2 t$$

โดย k_2 คือค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่สอง (ต่อความเข้มข้นต่อเวลา)

เมื่อแก้สมการที่ (8) โดยใช้ช่วงของความเข้มข้นจาก $c = C_0$ ถึง $c = C_t$ และช่วงเวลาจาก $t = 0$ ถึง $t = t$ และจัดรูปใหม่ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง จะได้เป็น

$$\frac{1}{C_t} = k_2 t + \frac{1}{C_0}$$

โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้เปลือกกุ้งเป็นวัสดุดูดซับ ในเปลือกกุ้งมีองค์ประกอบของไคติน ไคโตซานซึ่งมีงานวิจัยมากมายชี้ให้เห็นว่าไคติน ไคโตซานมีความสามารถในการดูดซับสีย้อมได้

4. ไคติน และ ไคโตซาน (Chitin and Chitosan)

ไคติน-ไคโตซานเป็นสารโคโพลิเมอร์ธรรมชาติระหว่างสองโมโนเมอร์ คือ anhydro-N-acetyl-D-glucosamine และ anhydro-D-glucosamine ถัดสัดส่วนที่อยู่ร่วมกันเป็น anhydro-N-acetyl-D-glucosamine จะแสดงสมบัติเด่นของคติน แต่ถ้าสัดส่วนที่อยู่ร่วมกันเป็น anhydro-D-glucosamine มากกว่าจะแสดงสมบัติเด่นของไคโตซาน ไคตินและไคโตซานจัดอยู่ในกลุ่มคาร์โบไฮเดรตผสมที่ประกอบด้วยอนุพันธ์ของน้ำตาลกลูโคสที่มีธาตุไนโตรเจนเกาะอยู่ภายในโมเลกุลที่ตำแหน่งคาร์บอนตัวที่ 2 ทำให้มีสมบัติเฉพาะตัวในการเกิดปฏิกิริยากับสารอื่นๆ

4.1 ไคติน

ไคตินเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่พบมากเป็นอันดับสองของโลกรองจากเซลลูโลส (Cellulose) เป็นส่วนประกอบของผนังเซลล์ของสิ่งมีชีวิต ทำหน้าที่ห่อหุ้มอวัยวะและสร้างความแข็งแรงแก่ผนังเซลล์ (Exoskeleton) ไคตินพบได้ในสัตว์ทะเลหลายชนิด เช่น กุ้ง ปู และ ปลาหมึก เป็นต้น ไคตินเป็นสารพอลิเมอร์ธรรมชาติที่มีโมเลกุลยาวมาก สูตรโครงสร้างของไคติน คือ poly- β -(1,4)-2-acetamino-2-Deoxy-Glucose ซึ่งแต่ละหน่วยจะเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ β -(1,4) มีสูตรทั่วไปคือ $(C_8H_{13}NO_5)_n$ ประกอบด้วยคาร์บอนร้อยละ 47.29 ไฮโดรเจนร้อยละ 6.89 และ ออกซิเจนร้อยละ 39.11

คุณสมบัติทางกายภาพของไคติน

(1) การละลาย (Solubility)

ไคตินไม่ละลายในน้ำ กรดเจือจาง ด่างทั้งเจือจางและเข้มข้น แอลกอฮอล์และตัวทำละลายอินทรีย์อื่นๆ แต่สามารถละลายได้ในกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น กรดซัลฟูริก กรดฟอสฟอริก และ กรดฟอร์มิก ความยากในการละลายของไคตินในตัวทำละลายต่างๆ มีผลมาจากสายโซ่โมเลกุลที่อยู่กันอย่างหนาแน่นมีพันธะที่เกิดขึ้นทั้งภายในและระหว่างโมเลกุล

(2) Specific rotation

ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเริ่มแรก ไคตินมีค่า Specific rotation เป็น -14° จากนั้นค่านี้จะเปลี่ยนแปลง โดยเพิ่มขึ้นเป็น 50° การเปลี่ยนแปลงของสิ่งนี้จะเป็นตัวบ่งชี้ถึงลักษณะต่อของพันธะแบบ b-D-linkage

(3) ความร้อนในการกระตุ้นให้เกิดการสลายพันธะแบบไฮโดรไลซิส (Hydrolytic-heat of activation)

ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเป็นปฏิกิริยาการสลายพันธะที่มีน้ำเข้ามาเกี่ยวข้อง โดยมีกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสายโซ่พอลิเมอร์ของไคติน มีลักษณะเช่นเดียวกับเซลลูโลส ค่า Hydrolytic-heat of activation ของไคตินจะมีค่าประมาณ 29 kcal

(4) น้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight)

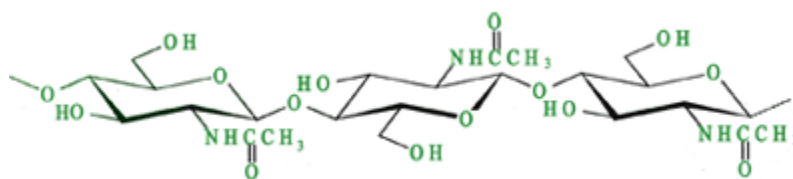
ไคตินในธรรมชาติจะมีน้ำหนักโมเลกุลสูงมากกว่า 1×10^6

(5) Molecular conformation ของไคติน

ไคตินมีโครงสร้างของผลึก (Crystal structure) ที่แข็งแรงและมีระดับของผลึก (degree-of-crystallinity) สูง รูปแบบของไคตินมี 3 ลักษณะ ประกอบด้วย α -chitin, β -chitin และ γ -chitin แต่ละลักษณะแตกต่างกันที่การเกิดระบบผลึก (crystal system) และปัจจัยการเกิดแลตติซผลึก (crystal lattice) ของหน่วยเซลล์ (unit cell) ภายในโครงสร้างผลึกมีความแตกต่างกัน เป็นผลมาจากรูปแบบการจัดเรียงตัวของโมเลกุลในแลตติซผลึก สายโซ่โมเลกุลที่ยาวของไคตินจะมีการจัดเรียงตัวเป็นแผ่นซ้อนทับกัน (pleated sheet) ในแลตติซผลึกของหน่วยเซลล์ซึ่งอาจเรียงตัวกันได้ 2 แบบ คือ รูปแบบขนานที่มุ่งไปในทิศทางเดียวกัน (parallel pattern) และแบบที่โครงสร้างเรียงตัวกันแบบสวนทางกัน (anti-parallel pattern) α -chitin มีโครงสร้างการเรียงตัวแบบสวนทางกันพบในไคตินของเปลือกกุ้งและกระดองปู ส่วนไคตินที่พบในแกนหมึกจะมีโครงสร้างที่เรียงตัวมุ่งไปในทิศทางเดียวกันเกิดเป็น β -chitin การจัดเรียงตัวแบบสายโซ่โมเลกุลแบบ γ -chitin นั้นเกิดจากโครงสร้างเรียงแบบสลับกันระหว่างสองแบบที่กล่าวมาแล้ว

(6) การเสื่อมสลาย (Degradation)

ไคตินเมื่อเกิดการเสื่อมสลายจะให้สายโซ่โมเลกุลเป็น โอลิโกเมอร์ (oligomer) หรือ โอลิโกแซคคาไรด์ (oligosaccharide) และเป็นหน่วยย่อยที่เล็กที่สุดเรียกว่า โมโนเมอร์ (monomer) โมโนแซคคาไรด์ของไคติน คือ N-acetyl-chitooligosaccharid ส่วน โมโนเมอร์หรือ โมโนแซคคาไรด์ของไคติน คือ N-acetyl-D-chitooligosaccharid ไคตินที่เสื่อมสลายโดยเอนไซม์ (Enzymic degradation) มีข้อดีกว่าใช้สารเคมีคือมีความจำเพาะเจาะจงกว่า



ภาพที่ 7 โครงสร้างทางเคมีของไคติน

ที่มา: bioline (2013)

4.2 ไคโตซาน

ไคโตซาน คือ ไคตินที่อยู่ในรูปที่มีปริมาณหมู่อะซิติลต่ำที่เกิดจากปฏิกิริยากำจัดหมู่อะซิติล(deacetylation) ของไคตินด้วยด่างเข้มข้น ทำให้โครงสร้างทางเคมีของไคตินเปลี่ยนไปโดยหมู่อะเซตาโด(NHCOCH₃) เปลี่ยนเป็นหมู่เอมิโน(-NH₂) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 ดังนั้น ไคโตซานคือ พอลิเมอร์ของ D-glucosamine (2-amino-2-D-glucose) ชื่อทางเคมีของไคโตซานคือ Poly β (1=>4)-2-amino-2-deoxy-D-glucose หรือ Poly N-Glucosamine มีสูตรเคมีของ โมโนเมอร์ คือ C₆H₁₂NO₄

คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของไคโตซาน

(1) การละลาย (Solubility)

ไคโตซานมีคุณสมบัติไม่ละลายในน้ำ ด่างและตัวทำละลายอินทรีย์(Organic solvent)แต่สามารถละลายได้ในสารละลายที่เป็นกรดอินทรีย์เกือบทุกชนิดที่มีค่า pH น้อยกว่า 6 สารละลายไคโตซานจะมีลักษณะเหนียวใส มีพฤติกรรมแบบนอน-นิวโตเนียน(Non-newtonian) ในสารละลายหมู่เอมิโนของไคโตซานจะแตกตัว โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ของการแตกตัว(pka)ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของประจุของพอลิเมอร์ โดย pka ของไคโตซานมีค่าอยู่ในช่วง 6.2-6.8

(2) น้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight)

น้ำหนักโมเลกุลของไคโตซานขึ้นอยู่กับขั้นตอนการผลิต โดยทั่วไปจะมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง $1 \times 10^5 - 1.2 \times 10^6$

(3) Degree of deacetylation

เป็นตัวบ่งชี้ความเป็นไคติน ไคโตซาน เนื่องจากไคติน – ไคโตซานเป็นโคพอลิเมอร์ระหว่างสองโมโนเมอร์ของ N-acetyl-D-glucosamin และ D-glucosamine ถ้าสัดส่วนที่อยู่รวมกันของโมโนเมอร์มากกว่า คือมีค่า degree of deacetylation ต่ำ จะแสดงสมบัติเด่นของไคติน แต่ถ้าสัดส่วนของโมโนเมอร์ที่สองมากกว่า คือ มีค่า degree of deacetylation สูงจะแสดงสมบัติเด่นของไคโตซาน

(5) ความหนืด (Viscosity)

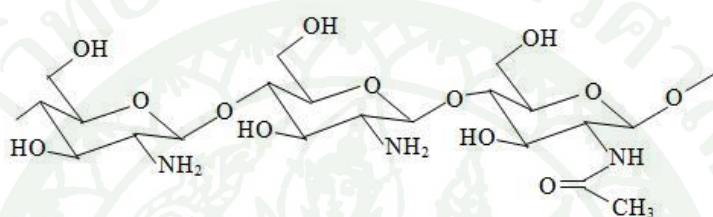
ความหนืดของสารละลายไคโตซานขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น degree of Deacetylation น้ำหนักของโมเลกุล ความเข้มข้น ionic strength ความเป็นกรด-ด่าง (pH) และ อุณหภูมิ โดยทั่วไปแล้วความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์จะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แต่ชนิดของกรดที่ใช้และการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ของสารละลายพอลิเมอร์จะให้ผลความหนืดแตกต่างกัน

(6) Molecular conformation

ไคโตซานเป็นพอลิอิเล็กโทรไลต์ประเภทบวก (cationic polyelectrolyte) เนื่องจากในสารละลายกรดหุ้มอะมิโนในสายโซ่โมเลกุลจะรับโปรตอนแล้วอยู่ในรูป $-NH_3^+$ conformation ของไคโตซาน โมเลกุลในสารละลายสามารถบ่งชี้ว่า โดยค่า Mark-Houwink exponent (ค่า a) ถ้า a มีค่าประมาณ 0.5 – 0.8 และ 1.8 บ่งชี้ว่าพอลิเมอร์ขดตัวเป็นทรงกลม (sphere) มีลักษณะเป็น random coil และ มีลักษณะเป็นแท่ง (rod) ตามลำดับ conformation ของไคโตซาน โมเลกุลที่แตกต่างกันในสารละลายขึ้นอยู่กับ ionic strength ค่า pH , อุณหภูมิ , ความเข้มข้นของยูเรีย น้ำหนักของโมเลกุลและ degree of deacetylation

(7) การเสื่อมสลาย (Degradation)

ไคโตซานก็เหมือนกับพอลิเมอร์หรือพอลิแซคคาไรด์ชนิดอื่นๆ ทั่วไปคือ เมื่อเกิดการเสื่อมสลายจะให้สายโซ่โมเลกุลที่สั้นลงเป็น โอลิโกเมอร์(oligomer)หรือ โอลิโกแซคคาไรด์ (oligosaccharide) และเป็นหน่วยย่อยที่เล็กที่สุดที่เรียกว่า โมโนเมอร์(Monomer) หรือ โมโนแซคคาไรด์ของไคโตซาน คือ Chitiligosaccharides ส่วนโมโนเมอร์หรือโมแซคคาไรด์ของไคโตซานคือ D-glucosamine



ภาพที่ 8 โครงสร้างทางเคมีของไคโตซาน

ที่มา: Tarun Kumar Satpathy (2008)

4.3 ขั้นตอนและกระบวนการผลิตไคติน-ไคโตซาน

4.1.1 กระบวนการกำจัดโปรตีน (deprotienation) โดยการทำปฏิกิริยากับด่าง ซึ่งส่วนใหญ่ใช้โซดาไฟ (NaOH) ในกระบวนการนี้โปรตีนส่วนใหญ่จะถูกขจัดออกไปจากวัตถุดิบ พร้อมกับบางส่วนของไขมันและรงควัตถุบางชนิดจะถูกขจัดออกไปด้วย อย่างไรก็ตามการพิจารณาใช้กระบวนการนี้ขึ้นอยู่กับประเภทของวัตถุดิบที่จะนำมาใช้ (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ และชมรมไคติน-ไคโตซาน,2551)

4.1.2 กระบวนการกำจัดแร่ธาตุ (demineralization) โดยการนำวัตถุดิบหรือวัตถุดิบซึ่งผ่านกระบวนการกำจัดโปรตีนมาแล้ว มาทำปฏิกิริยากับกรด ซึ่งส่วนใหญ่ใช้กรดเกลือ(HCl) ทำให้แร่ธาตุส่วนใหญ่ได้แก่ หินปูน (calcium carbomate, CaCO_3) ซึ่งจะถูกกำจัดออกไปโดยเปลี่ยนไปเป็นก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ (carbon dioxide, CO_2) พร้อมกันนี้บางส่วนของรงควัตถุและโปรตีนที่ละลายได้ในกรดจะถูกกำจัดออกไป วัสดุที่ได้หลังจากกระบวนการกำจัดแร่ธาตุนี้ คือ ไคติน (chitin) (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ และชมรมไคติน-ไคโตซาน, 2551)

4.1.3 กระบวนการแยกสี (decoloration) การผลิตไคตินจากขั้นตอนดังกล่าวข้างต้นนั้น พบว่าไคตินที่ได้มักจะยังคงมีสี ดังนั้นหากต้องการไคตินฟอกขาว จะต้องนำไคตินมาผ่านกระบวนการแยกสีโดยใช้สารฟอกขาว ได้แก่ เอทานอล (ethanol) โซเดียมไฮโปคลอไรท์ (NaOCl) อะซิโตน (acetone) และ 3% ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เป็นต้น (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2551)

4.1.4 กระบวนการกำจัดหรือลดหมู่อะซิติล (deacetylation) เป็นการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่ใช้ในการกำจัดหรือลดหมู่อะซิติล (-COCH₃) ที่มีอยู่บนโมเลกุลของไคติน เพื่อให้เกิดเป็นไคโตซาน (chitosan) ซึ่งเป็นการเพิ่มขึ้นของหมู่เอมีน (-NH₂) บนโมเลกุลของไคตินและหมู่เอมีนนี้มีความสามารถในการรับโปรตอนจากสารละลาย ซึ่งช่วยให้การละลายดีขึ้น เพราะมีสมบัติเป็นประจุบวก (cation) ส่วนใหญ่เมื่อปริมาณของหมู่อะซิติลถูกกำจัดไปมากกว่า 60% ขึ้นไป สารไคโตซาน ที่ได้สามารถละลายได้ในกรดอินทรีย์

งานวิจัยนี้ได้มีการนำกรดอะซิติคที่ผลิตจากเศษสับประดมาใช้ในการปรับปรุงประสิทธิภาพในการดูดซับสีของเปลือกกุ้ง

5. กรดอะซิติค

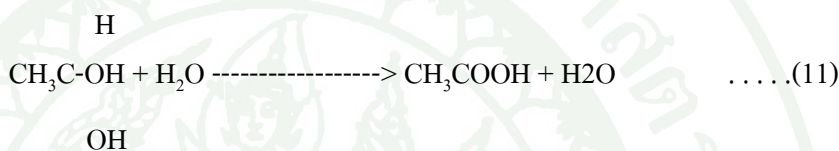
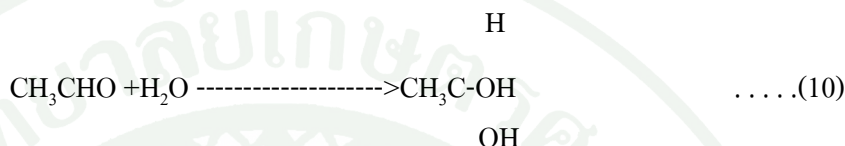
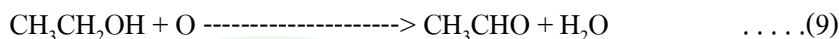
กรดอะซิติคเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้มาจากการเปลี่ยนเอทานอลเป็นกรดอะซิติค โดยการทำงานของแบคทีเรียกรดอะซิติค (acetic acid bacteria) โดยทั่วไปการผลิตกรดอะซิติคจะเกี่ยวข้องกับกระบวนการหมัก 2 ชนิด ได้แก่ การหมักเพื่อสร้างแอลกอฮอล์ และการเปลี่ยนแอลกอฮอล์เป็นกรดอะซิติค

1) การหมักแอลกอฮอล์ (Alcohol fermentation) เป็นการหมักโดยเปลี่ยนน้ำตาลเป็นแอลกอฮอล์ในภาวะที่ไม่มีออกซิเจน (anaerobic) มีปฏิกิริยาดังสมการที่ 8



โดยทั่วไปจะใช้เวลาในการหมักแอลกอฮอล์ประมาณ 48 – 72 ชั่วโมง ณ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสก็จะหมักได้สมบูรณ์

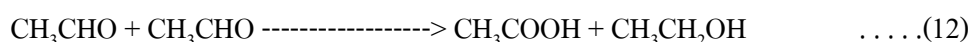
2) การหมักอะซิติก (Acetification) เป็นการหมักโดยใช้เชื้อจุลินทรีย์น้ำส้มสายชู (Acetobacter spp.) เปลี่ยนแอลกอฮอล์เป็นกรดอะซิติกในภาวะที่มีออกซิเจน (aerobic) ดังสมการที่ 9 10 และ 11



สมการที่ 9 เป็นการออกซิไดซ์เอทานอลเป็นอะซีตัลดีไฮด์ (acetaldehyde) โดยใช้เอนไซม์ แอลกอฮอล์ดีไฮโดรจีเนส (alcohol dehydrogenase)

สมการที่ 10 เป็นการสร้างกรดอะซิติกจากอะซีตัลดีไฮด์ ปฏิกิริยาแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกอะซีตัลดีไฮด์ รวมกับน้ำเป็นไฮเดรตอะซีตัลดีไฮด์ (hydrated acetaldehyde) จากนั้นเกิดปฏิกิริยาขั้นที่ 2 ไฮเดรตอะซีตัลดีไฮด์ถูกออกซิไดซ์หรือดีไฮโดรจีเนส (acetaldehyde dehydrogenase) ทำให้โปรตอน 2 ตัวของไฮเดรตอะซีตัลดีไฮด์ถูกส่งผ่านไปสู่อะตอมของออกซิเจน ดังสมการที่ 11

อะซีตัลดีไฮด์อาจจะเปลี่ยนเป็นกรดอะซิติกได้อีกทางหนึ่ง โดยอะซีตัลดีไฮด์ 2 โมเลกุล จากสมการที่ 9 ทำปฏิกิริยากันเองได้กรดอะซิติกและเอทานอลดังสมการที่ 12 ซึ่งปฏิกิริยาแบบนี้ เรียกว่า ปฏิกิริยาแคนนิซซาโร (Cannizaro reaction) ส่วนเอทานอลที่เกิดขึ้นจะเข้าสู่สมการที่ 1 อีก เป็นวัฏจักร จนกระทั่งกลายเป็นอะซิติกทั้งหมด



แบคทีเรียกรดอะซิติกเป็นแบคทีเรียที่ต้องการอากาศในการเจริญเติบโตและสามารถออกซิไดซ์เอทานอลไปเป็นกรดอะซิติกได้ แบคทีเรียกรดอะซิติกแบ่งออกเป็น 2 สกุล คือ

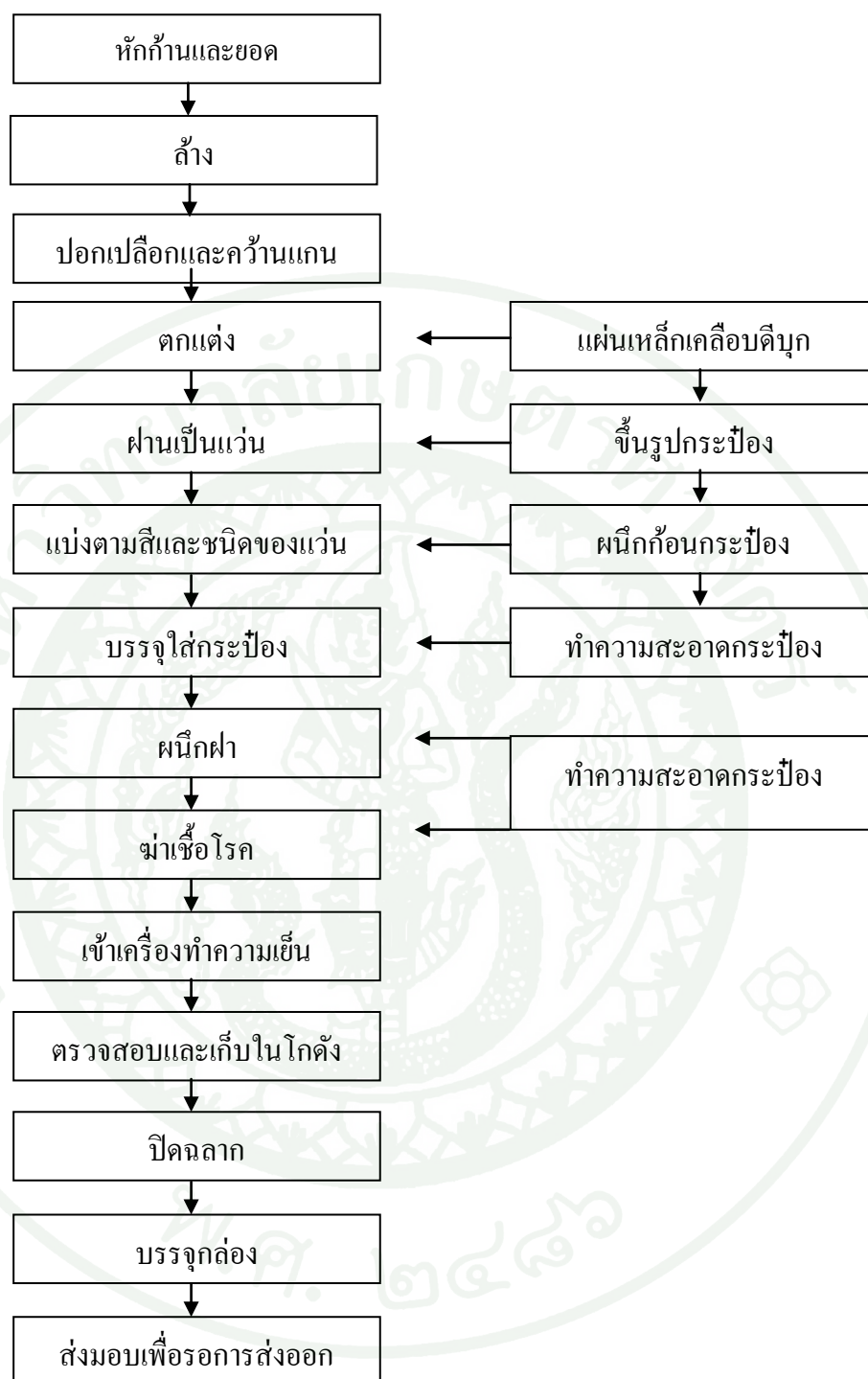
Acetobacter และ Gluconobacter โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้ Acetobacter มาใช้เนื่องจากมีความสามารถในการผลิตกรดอะซิติกที่มากกว่า

คุณสมบัติทั่วไปของ Acetobacter spp

Acetobacter spp มีรูปร่างของเซลล์ได้หลายลักษณะ โดยปกติจะพบทั้งรูปร่างค่อนข้างรีจนกระทั่งเป็นท่อนชัดเจน อาจพบเซลล์เดี่ยวๆ จับกันเป็นคู่ หรือต่อกันเป็นลูกโซ่ บางครั้งพบเซลล์ที่มีรูปร่างแปลกจากที่กล่าวมาแล้ว เช่น รูปร่างกลม หรือ บวมทรงกระบอก Acetobacter spp ย้อมติดสีแกรมลบ แต่เมื่ออายุมากขึ้นจะติดสี Gram variable ไม่พบการสร้างสปอร์ภายในเซลล์ ส่วนมากไม่สร้างรงควัตถุ เป็นแบคทีเรียที่ต้องใช้ออกซิเจนในการเจริญเติบโตเพราะไม่สามารถใช้สารอื่นนอกจากออกซิเจนเป็นตัวรับไฮโดรเจนตัวสุดท้ายในกระบวนการเปลี่ยนอาหารให้เป็นพลังงานได้ เชื้อ Acetobacter spp สามารถเติบโตได้ในช่วงอุณหภูมิ 5 – 42 องศาเซลเซียส แต่จะเจริญเติบโตได้ดีที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เชื้อเจริญได้ในที่มีความเป็นกรดต่างค่อนข้างต่ำ คือตั้งแต่ 4.0 – 4.5 แต่เจริญได้ดีที่ pH 5.4 – 6.3

6. อุตสาหกรรมสับปะรดกระป๋อง

สับปะรดเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญอย่างหนึ่งของประเทศ สับปะรดที่นิยมปลูกและมีคุณสมบัติเหมาะสม คือมีสัดส่วนของผลที่ใช้ประโยชน์ในเชิงเศรษฐกิจสูง และส่งโรงงานเพื่อแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ โดยปริมาณการเพาะปลูกสับปะรดในประเทศไทยมีการขยายตัวเพิ่มมากขึ้น โดยจะเห็นได้จากปี 2546 มีปริมาณผลผลิตเพิ่มมากขึ้นจากปี 2545 ถึงร้อยละ 12.6 (ธนาคารเพื่อการเกษตรและสหกรณ์การเกษตร) โดยที่สับปะรดสดภายในประเทศร้อยละ 70-80 จะส่งเข้าโรงงานแปรรูป ที่เหลือใช้บริโภคสดภายในประเทศร้อยละ 20-30 ผลิตภัณฑ์สับปะรดของประเทศไทยที่มีการส่งออกมีอยู่หลายประเภท ที่สำคัญสองอันดับแรกก็คือสับปะรดกระป๋อง และน้ำสับปะรดเข้มข้น เนื่องจากมีมูลค่าการส่งออกมากถึง ร้อยละ 69 และ ร้อยละ 24 ของมูลค่าการส่งออกผลิตภัณฑ์สับปะรดทั้งหมดในปี 2554 (กรมการค้าต่างประเทศ 2554) โดยที่ในกระบวนการผลิตสับปะรดกระป๋องและน้ำสับปะรดเข้มข้น จะเกิดของเสียจากกระบวนการผลิตมากมาย โดยที่สับปะรดหนึ่งผลจะหนักประมาณ 1,754.4 กรัม/ผล เมื่อเข้าแปรรูปในโรงงาน จะมีเสียเหลือใช้จากการทำสับปะรดกระป๋องประมาณ 1,228.1 กรัม/ผล (สมบัติและคณะ, 2537)



ภาพที่ 9 ขั้นตอนการผลิตสับประดกระป๋อง

ที่มา: ธนาคารเพื่อการส่งออกและนำเข้าแห่งประเทศไทย (2547)

7. การทบทวนงานวิจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง

สิริพร เกษมโชติพัฒน์ (2554) ได้ศึกษาการใช้โคโตซานในการดูดซับฟอรั่มัลดีไฮด์ การศึกษานี้ใช้โคโตซาน 2 ชนิด คือ โคโตซานจากเปลือกกุ้งและโคโตซานเชิงพาณิชย์ พบว่าที่สถานะที่เหมาะสมของโคโตซานจากเปลือกกุ้ง 5 กรัม พีเอชในช่วง 3-9 ความเร็วรอบในการเขย่า 50 รอบต่อนาที ระยะเวลาเขย่า 10 นาที และระยะเวลาเข้าสู่สมดุล 10 นาที สามารถดูดซับฟอรั่มัลดีไฮด์ได้ร้อยละ 48.34 และโคโตซานเชิงพาณิชย์ 3 กรัม ที่สถานะพีเอช 3 – 8 ความเร็วรอบในการเขย่า 150 รอบต่อนาที ระยะเวลาเขย่า 60 นาที และระยะเวลาเข้าสู่สมดุล 30 นาที สามารถดูดซับฟอรั่มัลดีไฮด์ได้ร้อยละ 53.10 ลักษณะการดูดซับของโคโตซานทั้งสองชนิดสอดคล้องกับไอโซเทอมของแลงเมียร์ และจากการทดลองการดูดซับด้วยวิธีการไหลแบบต่อเนื่องของโคโตซานทั้งสองชนิด พบว่าโคโตซานทั้งสองชนิดมีประสิทธิภาพการดูดซับดีที่สุดที่อัตราการไหล 80 มิลลิลิตรต่อนาที และจะเริ่มหมดประสิทธิภาพการดูดซับที่ปริมาตรของสารละลายฟอรั่มัลดีไฮด์เท่ากับ 2.4 และ 3.2 ลิตรตามลำดับ และหมดประสิทธิภาพการดูดซับที่ปริมาตรน้ำทิ้งเท่ากับ 8.8 และ 9.6 ลิตรตามลำดับ

Gurusamy *et al.* (2007) ได้ศึกษาการดูดซับสีย้อม Ramazol black 13 ด้วยโคโตซาน โดยทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ระยะเวลาสัมผัส ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น ขนาดตัวดูดซับ พีเอช และอุณหภูมิ พบว่าปริมาณสีย้อมที่มากที่สุดที่สามารถถูกดูดซับได้บนถ่าน 1 กรัมที่สถานะสมดุล (qm) มีค่าเท่า 91.47 – 130 มิลลิกรัมต่อกรัม โดยใช้อะมิโนกรุปเป็นกลไกในการดูดซับ และเมื่อพิจารณาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับเป็นแบบ pseudo-first และ second-order

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

- 1.1 คอลัมน์อะคริลิกทรงกระบอกเส้นผ่าน ศูนย์กลาง 2.54 ซม. สูง 1 เมตร
- 1.2 เครื่องอัลตราไวโอเล็ต-วิสิเบิลสเปกโตร โฟโตมิเตอร์ (UV-Visible Spectrophotometer) บริษัท Hitachi รุ่น U-2800
- 1.3 ตู้ปลอดเชื้อ (Laminar Flow Cabinet) บริษัท แลป เซอร์วิส, Thailand
- 1.4 เครื่องเขย่าสาร (Shaker) บริษัท New Brunswick
- 1.5 ปุ่มดูดจ่ายสารเคมี ยี่ห้อ Masterflex รุ่น Model 7518-00
- 1.6 หม้อนึ่งความดัน (Autoclave) ยี่ห้อ Tomy รุ่น SX-500
- 1.7 เครื่องปั่นเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifuge) บริษัท Hettich รุ่น 1200
- 1.8 เครื่องพีเอชมิเตอร์ (pH meter) บริษัท Oakton รุ่น 510
- 1.9 ตู้ดูดความชื้น (Desiccators)
- 2.0 ตู้อบ (Hot air oven)
- 2.1 เครื่องผสมสาร (Vortex mixer)
- 2.2 เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 2 ตำแหน่ง และ 4 ตำแหน่ง (Analytical balance)

2. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 2.1 กระบอกตวง (Cylinder)
- 2.2 ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask)
- 2.3 หลอดทดลอง (Test tube)
- 2.4 บีกเกอร์ (Beaker)
- 2.5 บิวเรต (Burette)
- 2.6 ปิเปต (Pipette)
- 2.7 ขวดปรับปริมาตร (Volumetric flask)
- 2.8 แท่งแก้วคนสาร (Stirrer rod)
- 2.9 ช้อนตักสารเคมี (Spatula)

- 2.10 ลูกยางคูปิเปต (Bulb)
- 2.11 คิวเวตต์ (Cuvette)
- 2.12 ขาตั้งพร้อมตัวหนีบยึด
- 2.13 จานเพาะเชื้อ (Petri dish)
- 2.14 แผงแก้วเกลี่ยเชื้อ (Spreader)
- 2.15 หัวง่ายเชื้อ และเข็มเขี่ยเชื้อ (Loop and Needle)

3. สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 3.1 สีย้อมรีแอคทีฟ บลู 4 บริษัท เคซีบี เท็กซ์ไทล์
- 3.2 เศษลัมประรดที่ผ่านการคั้นน้ำ
- 3.3 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เกรดวิเคราะห์ ยี่ห้อ
- 3.4 กรดซัลฟิวริก (H₂SO₄) เกรดวิเคราะห์ ยี่ห้อ
- 3.5 แคลเซียม คาร์บอเนต (CaCO₃) เกรดวิเคราะห์ ยี่ห้อ
- 3.6 กรดอะซิติก (CH₃COOH) เกรดวิเคราะห์ ยี่ห้อ
- 3.7 ผงวุ้น (AGAR) ยี่ห้อ
- 3.8 เปลือกกุ้ง

4. เชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลอง

- 4.1 *Acetobacter aceti* TISTR 103 (ได้จากศูนย์จุลินทรีย์ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย)

วิธีการ

1. การศึกษาการผลิตกรดอะซิติก

การผลิตกรดอะซิติกจากเศษสับปรดด้วยเชื้อ *Acetobacter aceti* โดยทำการทดลอง 4 สภาวะ ได้แก่ สภาวะที่ไม่มีการเจือจางความเข้มข้นของเศษสับปรด และมีการเจือจางความเข้มข้นของเศษสับปรดในอัตราส่วนเศษสับปรด (กรัม) ต่อน้ำกลั่น (มิลลิลิตร) 10:10 10:20 และ 10:30 โดยศึกษาที่ระยะเวลาการหมัก 3 และ 5 วัน ขั้นตอนการทดลองมีดังนี้

1.1 เลี้ยงเชื้อ *Acetobacter aceti* ในอาหารเลี้ยงเชื้อ Glucose Yeast Extract Broth(GYEB) (การเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อดูได้ในหัวข้อ 1 ภาคผนวก ก1) เป็นระยะเวลา 3 วัน

1.2 ใช้ปิเปตดูดอาหารเลี้ยงเชื้อ GYEB ที่บ่มไว้ในข้อที่ 1.1 ใส่ในขวดรูปชมพู่ที่บรรจุเศษสับปรดที่ไม่ผ่านการเจือจาง และ ผ่านการเจือจางด้วยน้ำกลั่นในอัตราส่วนเศษสับปรด(กรัม) ต่อน้ำกลั่น(มิลลิลิตร) 10:10 10:20 และ 10:30 อัตราส่วนละ 10 มิลลิลิตร

1.3 นำขวดรูปชมพู่ที่ได้จากข้อ 1.2 มาปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องเขย่าสารความเร็วรอบ 178 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 3 และ 5 วัน

1.4 นำเศษสับปรดที่ผ่านการหมักมาทำการปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่ความเร็ว 1000 รอบต่อนาที

1.5 นำส่วนใสมาทำการวิเคราะห์หาปริมาณกรดที่ผลิตได้ (วิธีวิเคราะห์ดูได้ใน ภาคผนวก ก2)

2. ตัวอย่างน้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง

น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสีขุ่น โดยในการทดลองนี้ใช้ สีข้อมรี แอคทีฟ บลู 4 เตรียมโดยการชั่งสีข้อม 2.00 กรัม ละลายในน้ำกลั่นปริมาตรเป็น 1000 มิลลิลิตร ได้ความเข้มข้นสีข้อมรีแอคทีฟสังเคราะห์ในสต็อกเท่ากับ 2000 มิลลิกรัมต่อลิตร

3. การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีของวัสดุดูดซับต่างๆ

3.1 การเตรียมวัสดุดูดซับ

3.1.1 เปลือกกุ้ง

นำเปลือกกุ้งสดมาล้างทำความสะอาดและอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นทำการแช่เปลือกกุ้งด้วยกรดอะซิติกที่ผลิตจากสับปะรดที่ได้จากการทดลองที่ 1 ในอัตราส่วนกรดอะซิติก 1 ลิตร ต่อ เปลือกกุ้ง 10 กรัม เพื่อกำจัดแร่ธาตุออกจากเปลือกกุ้ง เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นล้างเปลือกกุ้งให้สะอาด อบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นระยะ 6 ชั่วโมง นำเปลือกกุ้งที่ผ่านการกำจัดแร่ธาตุและอบแห้งแล้วมาสับย่อยขนาด และทำการคัดขนาดด้วยตะแกรงร่อนให้มีขนาดอยู่ระหว่าง 8 ถึง 9.51 มิลลิเมตร

3.1.2 ถ่านกัมมันต์

นำถ่านกัมมันต์ไปร่อนคัดขนาดผ่านตะแกรงร่อน โดยเลือกให้มีขนาดอยู่ระหว่าง 2.36 – 3.35 มิลลิเมตร จากนั้นนำถ่านกัมมันต์ไปล้างด้วยน้ำกลั่นเพื่อกำจัดเศษผงและสิ่งปนเปื้อนต่างๆออก จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เพื่อไล่ความชื้น เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำมาพักให้เย็นในตู้ดูดความชื้น

3.2 การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสีของรีแอกทีฟ บลู 4 ของเปลือกกุ้งที่ผ่านการปรับปรุงประสิทธิภาพและถ่านกัมมันต์

3.2.1 การศึกษาเปรียบเทียบผลของระยะเวลาสัมผัสต่อการดูดซับสีของ

การศึกษาเปรียบเทียบผลของระยะเวลาดูดซับสีของรีแอกทีฟ บลู 4 ของเปลือกกุ้งที่ผ่านการปรับปรุงประสิทธิภาพและถ่านกัมมันต์ โดยกำหนดให้จลนพลศาสตร์ของการดูดซับสีของรีแอกทีฟ บลู 4 เป็นไปตามปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง เปรียบเทียบค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยา และหาระยะเวลาบำบัด ณ จุดสมดุลเพื่อนำไปใช้ในการทดลองวิเคราะห์ไอโซเทอมการดูดซับ ขั้นตอนการทดลองมีดังนี้

- 1) ชั่งเปลือกกุ้งที่ผ่านการกำจัดแร่ธาตุ 1 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ที่มีน้ำเสียสีเขียว 4 บลู 4 ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิตร
- 2) ทำการปั่นเปื่อยด้วยเครื่องเขย่าสารความเร็วรอบ 175 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง โดยทำการเก็บตัวอย่างทุกๆ 3 ชั่วโมง
- 3) นำตัวอย่างที่เก็บวิเคราะห์ไปปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็ว 3000 รอบต่อนาที นำส่วนใสไปวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นสีของที่เหลือ (ดูรายละเอียดการวิเคราะห์และการคำนวณในหัวข้อ ก - 3 ภาคผนวก ก)
- 4) นำมาพล็อตกราฟเพื่อวิเคราะห์ระยะเวลาบำบัด ณ จุดสมดุล และ วิเคราะห์หาค่าคงที่อัตราเร็วโดยกำหนดให้อันดับปฏิกิริยาเป็นอันดับ 1
- 5) ทำซ้ำขั้นตอนที่ 1) และ 4) แต่เปลี่ยนตัวดูดซับเป็นถ่านกัมมันต์ และทำการเก็บตัวอย่างทุกๆ 10 นาที

3.2.2 การศึกษาไอโซเทอมการบำบัดสีข้อม

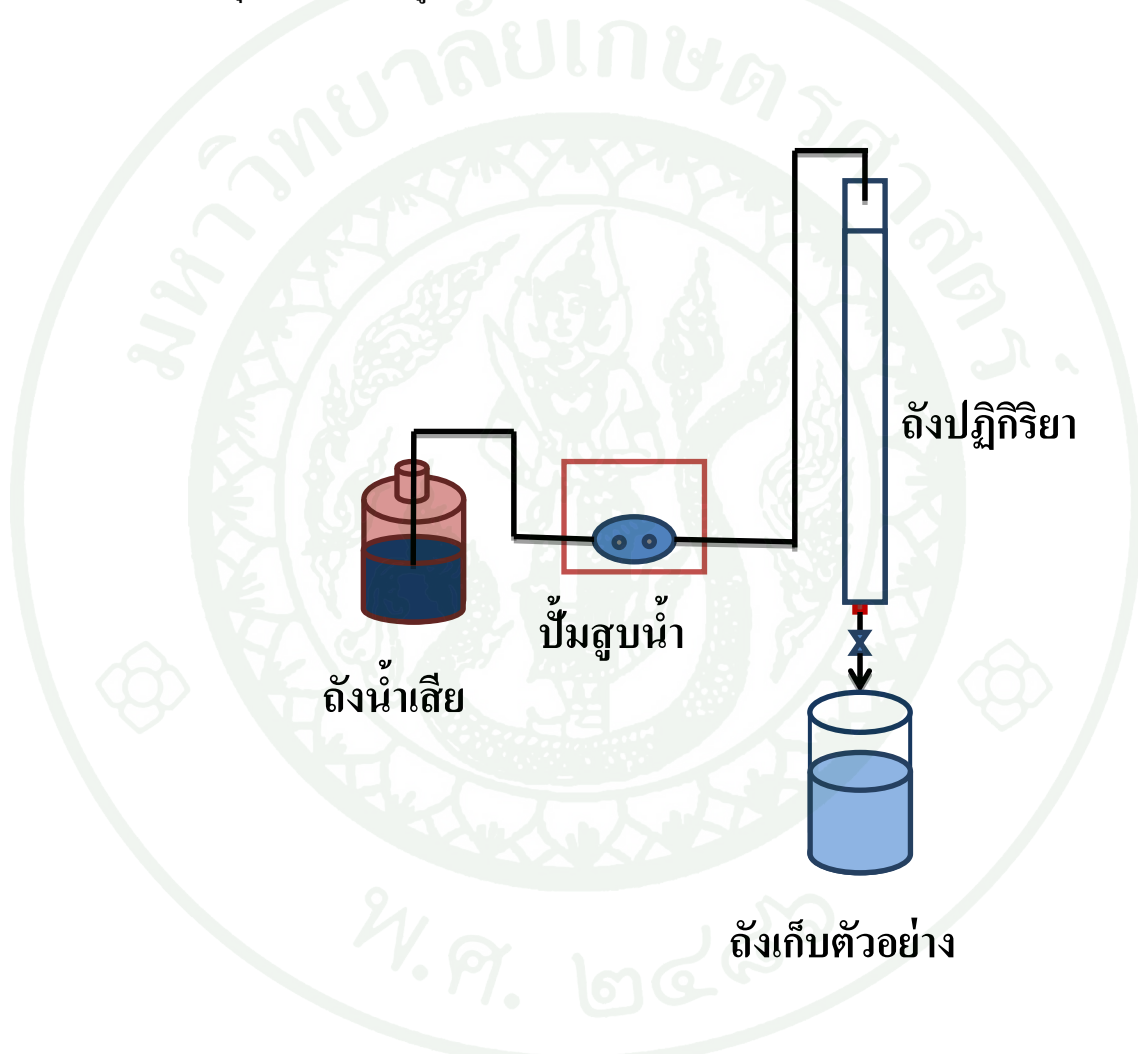
การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับสีข้อมรีแอกทีฟ บลู 4 ของตัวดูดซับทั้งสองชนิด เพื่อพิจารณาหาชนิดของการดูดซับและหาปริมาณสีข้อมที่ตัวดูดซับ 1 กรัมสามารถดูดซับได้มากที่สุด ณ จุดสมดุล โดยใช้สมการแลงเมียร์ และ ฟรุนดลิช ในการวิเคราะห์ มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

- 1) ชั่งเปลือกกุ้งที่ผ่านการกำจัดแร่ธาตุ 1 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ที่มีน้ำเสียสีเขียว 4 บลู 4 ความเข้มข้น 25 50 75 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิตร
- 2) นำขวดรูปชมพู่จากข้อ 2.3.1 มาทำการปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องเขย่าสารความเร็วรอบ 175 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลาที่ระบบเข้าสู่จุดสมดุลซึ่งได้จากการทดลองที่ 3.2.1
- 3) นำตัวอย่างที่เก็บวิเคราะห์ไปเหวี่ยงด้วยความเร็ว 3000 รอบต่อนาที
- 4) นำส่วนใสวัดความเข้มข้นสีของที่เหลือและนำค่าที่ได้ไปพิจารณาไอโซเทอมการดูดซับ
- 5) ทำซ้ำขั้นตอนที่ 1) และ 4) แต่เปลี่ยนตัวดูดซับเป็นถ่านกัมมันต์

4. การศึกษาการดูดซับสีด้วยเปลือกกุ้งที่ผ่านการกำจัดแร่ธาตุแบบต่อเนื่องในถังปฏิบัติการแบบคอลัมน์เดี่ยว

4.1 การติดตั้งระบบ

ถังปฏิบัติการทำจากอะคริลิก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร สูง 1000 เซนติเมตร โดยมีจุดเก็บตัวอย่างอยู่บริเวณก้นถัง ดังแสดงในภาพที่ 10



ภาพที่ 10 การติดตั้งระบบบำบัดแบบต่อเนื่อง

ในถังปฏิบัติการทำการบรรจุเปลือกกุ้งที่ผ่านการปรับปรุงประสิทธิภาพในการดูดซับ โดยใส่เปลือกกุ้งลงในถังปฏิบัติการ 17 กรัม มีความสูงของชั้นดูดซับ 90 เซนติเมตร การเดินระบบแบบต่อเนื่องใช้ปั๊มดูดจ่ายสารเคมีทำการสูบน้ำเสีย เข้าทางด้านบนของถังปฏิบัติการ และควบคุมอัตราการไหลของระบบด้วยวาล์วที่กั้นถังปฏิบัติการ

4.2 การเดินระบบการดูดซับแบบต่อเนื่อง

ทำการทดลองเดินระบบที่สภาวะความเข้มข้นสีข้อมรีแอกทีฟ บลู 4 เริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้อัตราการไหล 0.3 มิลลิตรต่อนาที และ 0.7 มิลลิตรต่อนาที การเดินระบบแบบต่อเนื่อง ทำการเก็บตัวอย่างทุกๆ 24 ชั่วโมง นำตัวอย่างที่เก็บได้ไปปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที นำส่วนใสไปวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นสีข้อมที่เหลือ

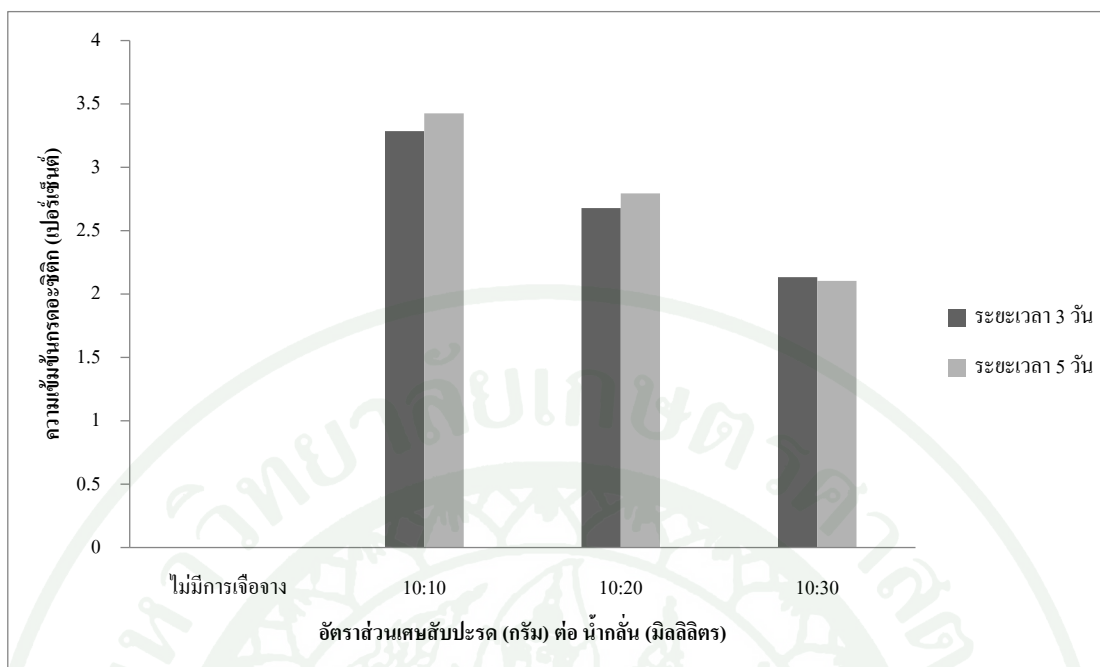


ผลและวิจารณ์

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการผลิตกรดอะซิติกจากเศษสับประดด้วยเชื้อ *Acetobacter aceti* จากนั้นนำกรดที่ผลิตได้มาทำการแช่เปลือกกุ้งกำจัดแร่ธาตุเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับและเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสีข้อมริแอกทีฟ บลู 4 เทียบกับถ่านกัมมันต์ โดยพิจารณาค่าคงที่อัตราเร็วการดูดซับและความสามารถในการดูดซับสีข้อมริแอกทีฟ บลู 4 มากที่สุดบนตัวดูดซับ 1 กรัม และศึกษาการบำบัดสีข้อมริแอกทีฟ บลู 4 ด้วยเปลือกกุ้งที่ผ่านการปรับปรุงประสิทธิภาพแบบต่อเนื่องในถังปฏิกรณ์ฯ ได้ผลการศึกษาดังต่อไปนี้

1. การศึกษาการผลิตกรดอะซิติกจากเศษสับประดด้วยเชื้อ *Acetobacter aceti*

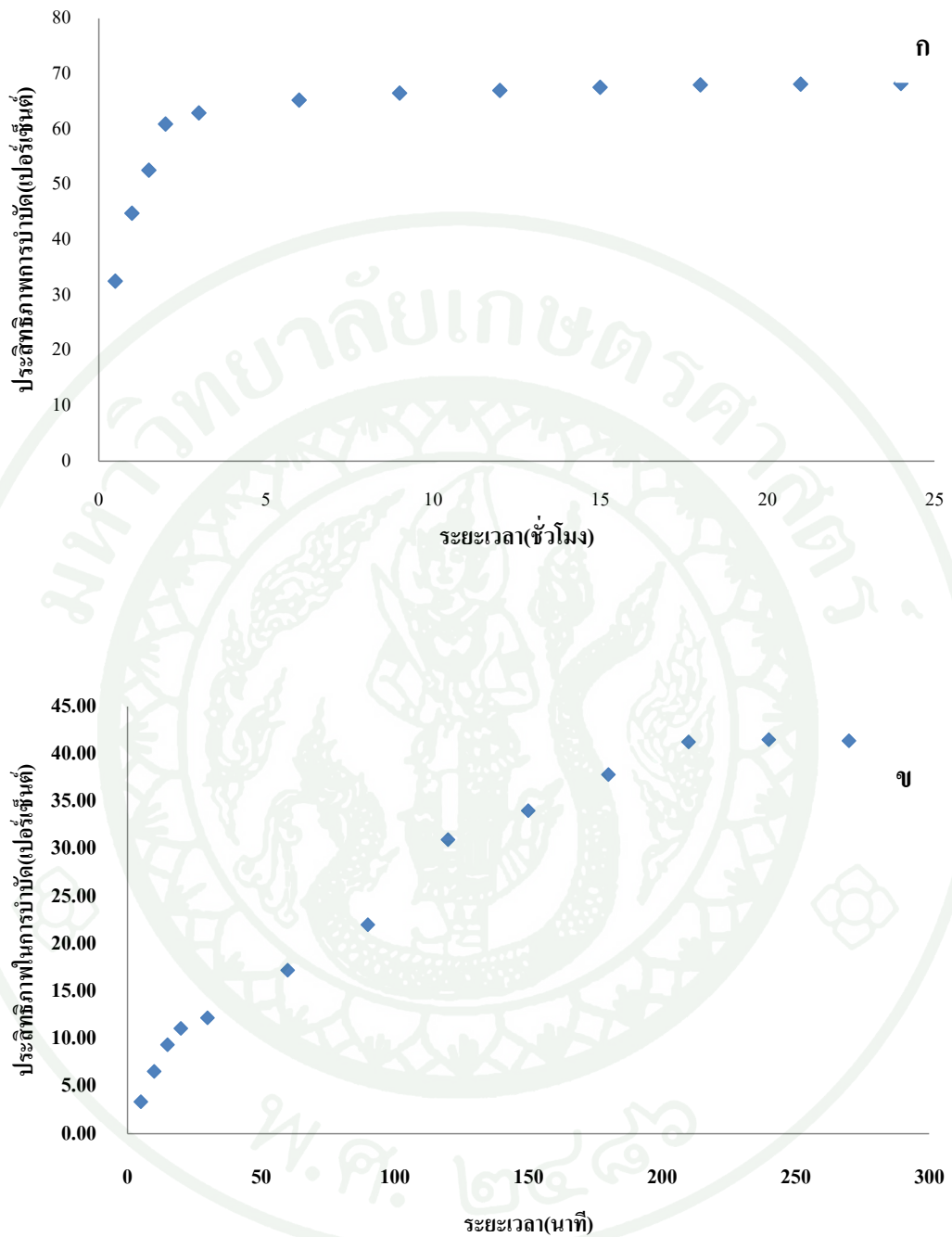
จากการศึกษาความสามารถของเชื้อ *Acetobacter aceti* ในการผลิตกรดอะซิติกจากเศษสับประด ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โดยทำการศึกษาใน 4 สภาวะ ได้แก่ ที่ไม่มีการเจือจางความเข้มข้นสับประด และมีการเจือจางความเข้มข้นสับประดที่อัตราส่วน เศษสับประด (กรัม) ต่อ น้ำกลั่น (มิลลิลิตร) 10:10 10:20 และ 10:30 โดยการใช้หัวเชื้อ *Acetobacter aceti* ที่เลี้ยงในอาหาร Glucose yeast extract broth เป็นระยะเวลา 3 วัน วัดค่าไอดีได้เท่ากับ 0.7 ซึ่งเมื่อนำไปนับจำนวนจุลินทรีย์พบว่ามีความเท่ากับ 10.2×10^8 ซีเอฟยูต่อมิลลิลิตร(ศึกษาวิธีการนับจำนวนจุลินทรีย์จากภาคผนวก ก4) จากภาพที่ 11 จะเห็นได้ว่าที่ระยะเวลาการหมัก 3 และ 5 วัน เศษสับประดที่ไม่ผ่านการเจือจางความเข้มข้นจุลินทรีย์ไม่สามารถผลิตกรดอะซิติกได้ เนื่องจากความเข้มข้นที่มากเกินไป จุลินทรีย์ไม่สามารถปรับตัวและทำงานได้ และเมื่อพิจารณาการผลิตกรดอะซิติกของเศษสับประดที่ผ่านเจือจางความเข้มข้นพบว่าที่ระยะเวลา 3 วัน ที่อัตราส่วน 10:10 จุลินทรีย์สามารถผลิตกรดอะซิติกได้มากที่สุด คือ 3.29 เปอร์เซ็นต์ และจะลดลงเมื่อมีการเจือจางความเข้มข้นมากขึ้น เมื่อพิจารณาการเพิ่มระยะเวลาการหมักเป็น 5 วัน พบว่าปริมาณกรดที่ผลิตได้จะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย



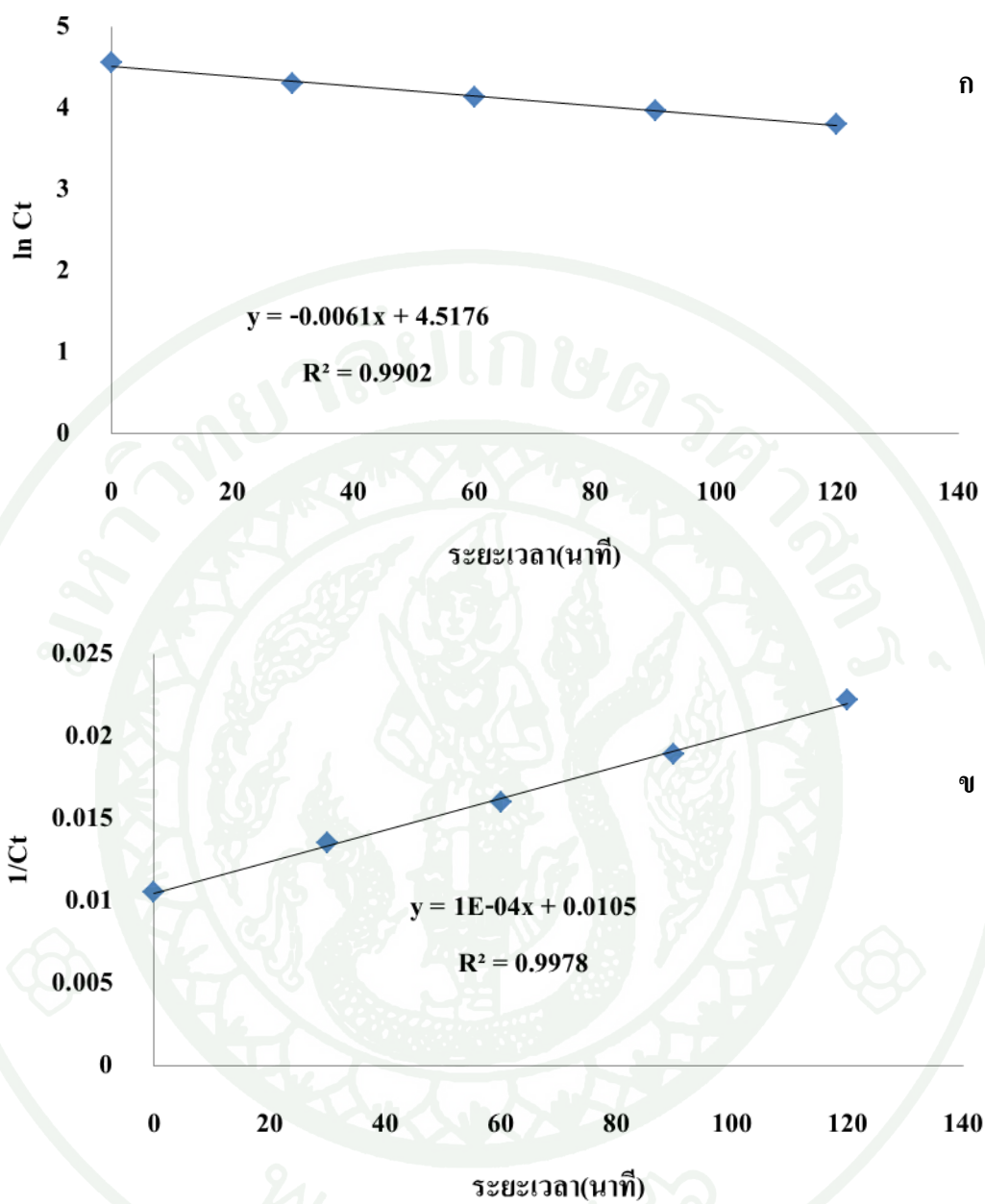
ภาพที่ 11 เปรียบเทียบปริมาณกรดที่ผลิตได้ในแต่ละอัตราส่วนการเจือจาง

2. การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ บลู 4 ของเปลือกกุ้งที่ผ่านการปรับปรุงประสิทธิภาพและถ่านกัมมันต์

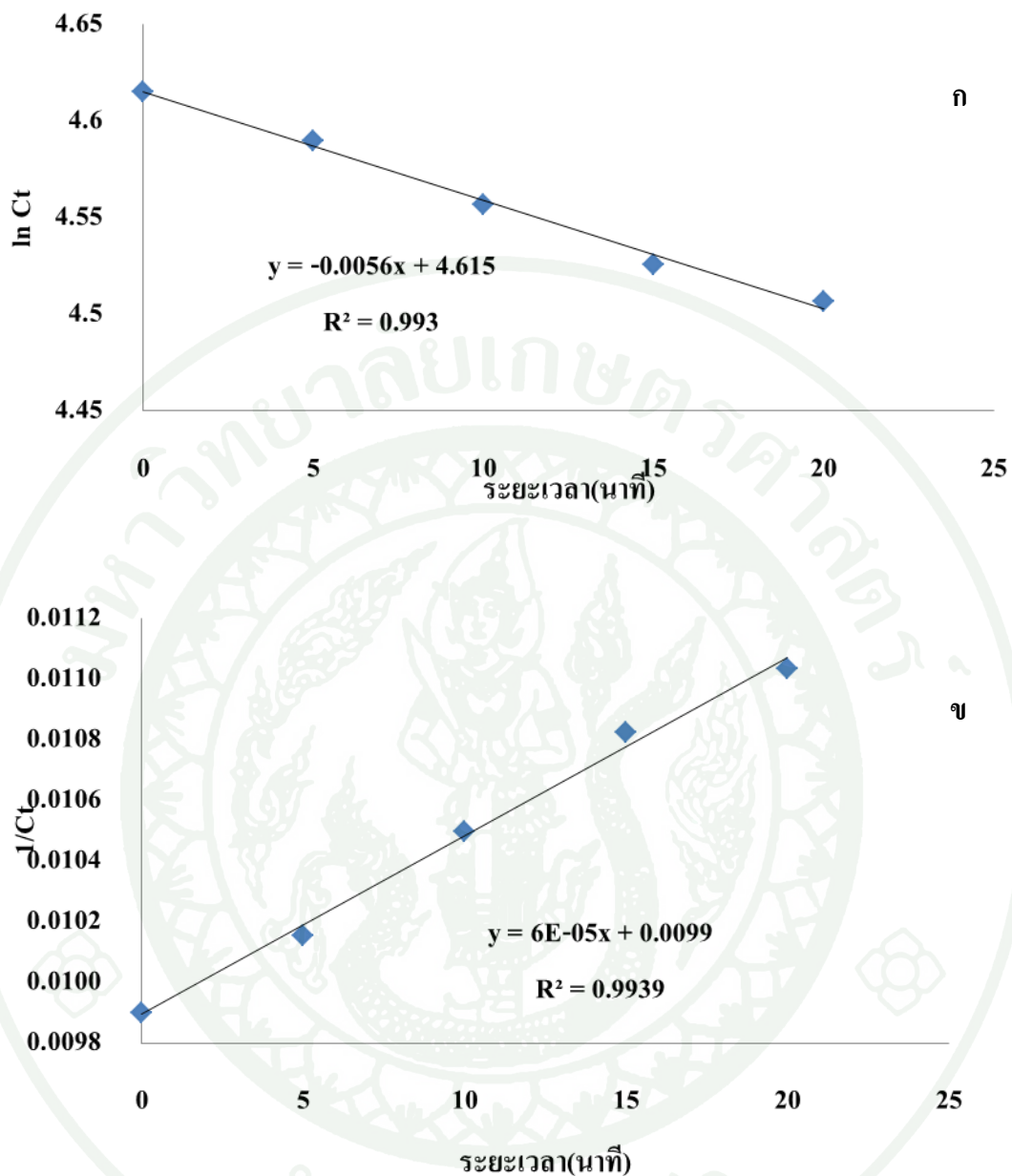
การศึกษาผลของระยะสัมผัสต่อการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ บลู 4 โดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 100 มิลลิลิตรต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 1 กรัม อุณหภูมิ 30.5 องศาเซลเซียส ค่าพีเอชที่จุดสมดุลของเปลือกกุ้งที่ผ่านการปรับปรุงประสิทธิภาพและถ่านกัมมันต์มีค่าเท่ากับ 8.78 และ 8.02 ตามลำดับ เป็นการหาระยะเวลาการดูดซับที่จุดสมดุลเพื่อนำไปใช้ในการทดลองวิเคราะห์หาไอโซเทอมการดูดซับของตัวดูดซับ จากรูปที่ 12ก. เมื่อพิจารณาผลของระยะเวลาดูดซับสีย้อมของเปลือกกุ้งที่ผ่านการปรับปรุงประสิทธิภาพ พบว่า ที่ระยะเวลาสัมผัส 3 ชั่วโมงแรกเปลือกกุ้งสามารถบำบัดสีย้อมได้อย่างรวดเร็วถึง 62.88 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นความสามารถในการบำบัดสีย้อมจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ เมื่อระยะเวลาสัมผัสมากขึ้น และสามารถดูดซับได้สูงสุดคือ 68.22 เปอร์เซ็นต์ เมื่อระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 24 ชั่วโมง ซึ่งเป็นระยะเวลาที่เปลือกกุ้งเข้าสู่จุดสมดุล จากจากรูปที่ 12ข. แสดงผลของระยะเวลาดูดซับสีย้อมของถ่านกัมมันต์ พบว่าที่ระยะเวลาสัมผัส 30 นาทีแรกถ่านกัมมันต์สามารถบำบัดสีย้อมได้อย่างรวดเร็วถึง 12.85 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นความสามารถบำบัดสีย้อมจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนเข้าสู่จุดสมดุลเมื่อระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 4 ชั่วโมง ซึ่งสามารถบำบัดได้ 59.63 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 12 ผลของระยะเวลาสัมผัสต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีข้อมที่สภาวะความเข้มข้นสีข้อมเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 1 กรัม อุณหภูมิ 30.5 องศาเซลเซียส
 ก) เปลือกกุ้งผ่านการปรับปรุงประสิทธิภาพ ข) ถ่านกัมมันต์



ภาพที่ 13 กราฟแสดงจลนพลศาสตร์ของเปลือกกุ้งที่ผ่านการปรับปรุงประสิทธิภาพ
 ก) ปฏิกริยาอันดับ 1 ข) ปฏิกริยาอันดับ 2

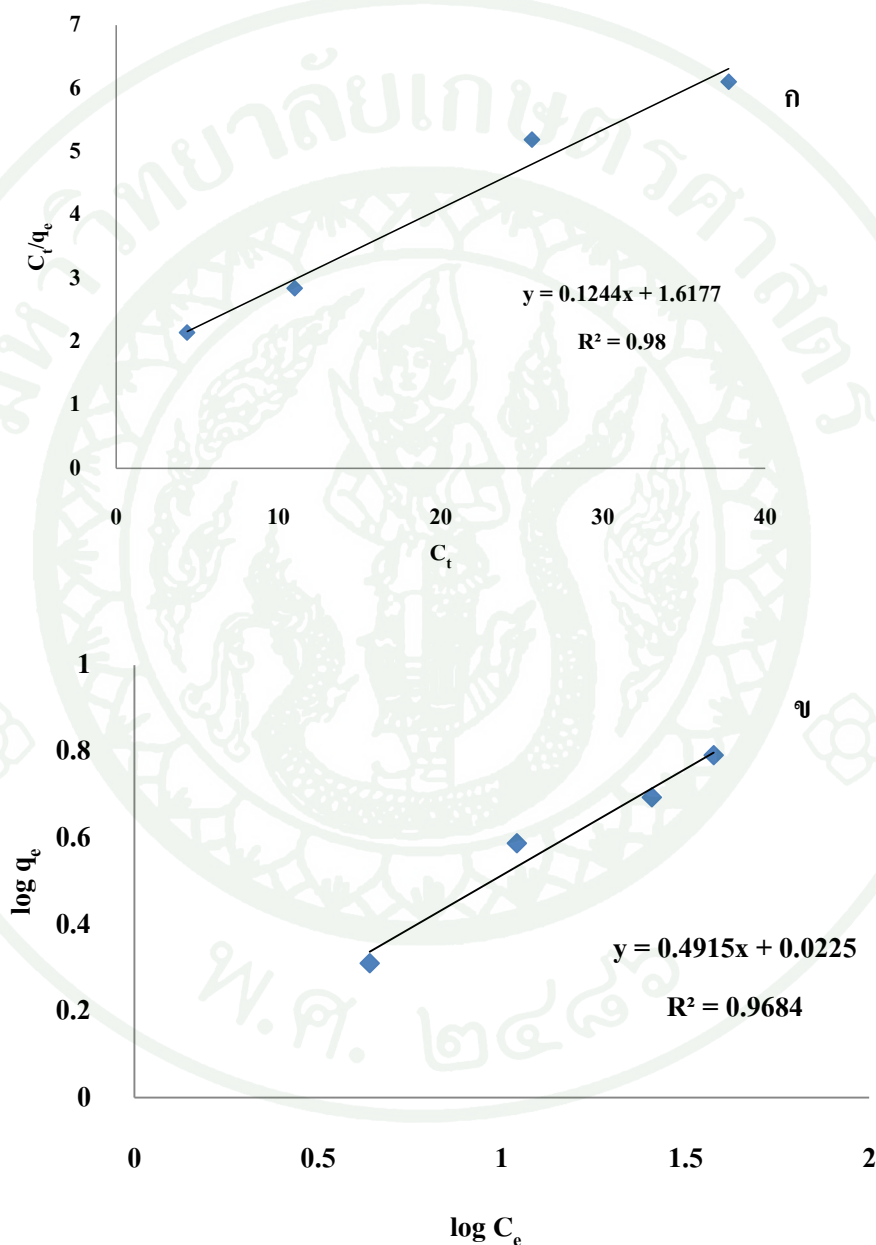


ภาพที่ 14 กราฟแสดงจลนพลศาสตร์ของถ่านกัมมันต์

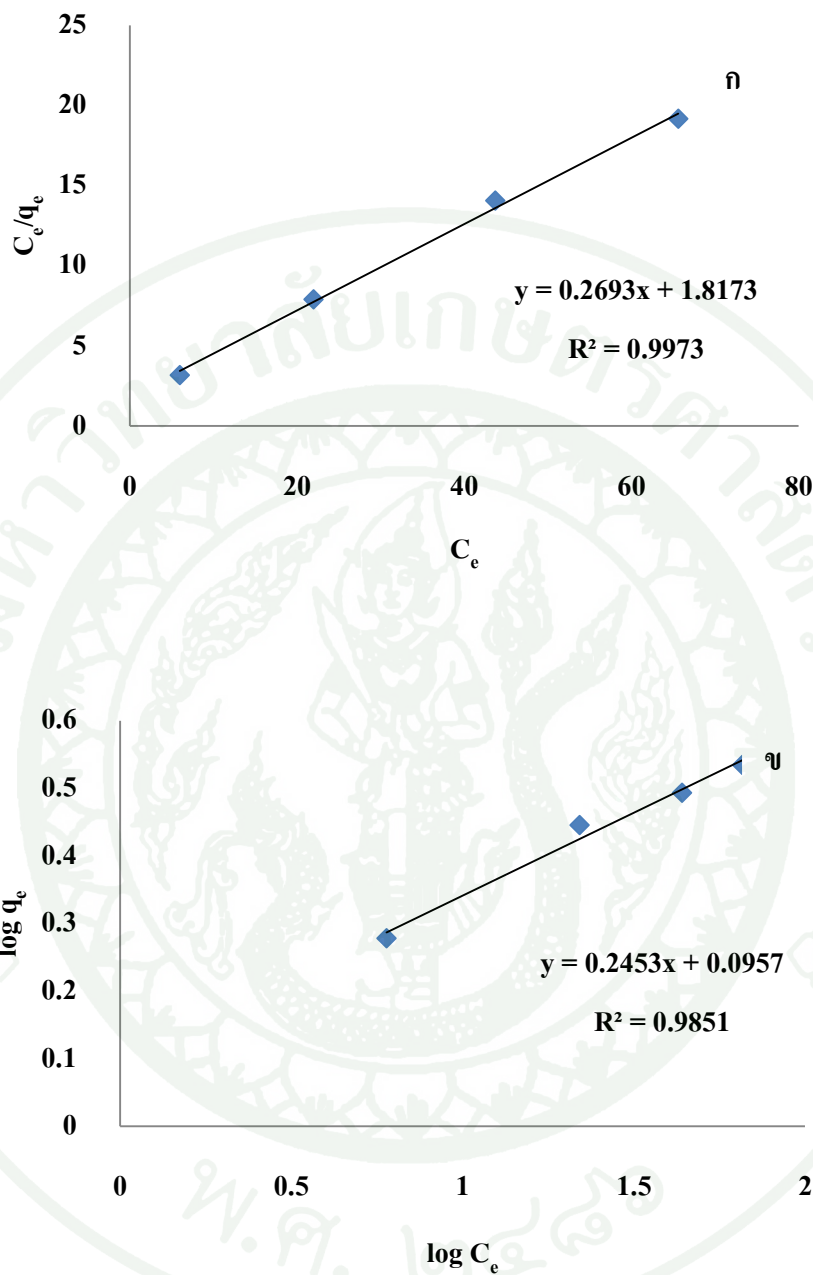
ก) ปฏิกริยาอันดับ 1 ข) ปฏิกริยาอันดับ 2

จากนั้นทำการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับของตัวดูดซับทั้งสองชนิด ทำการวิเคราะห์สมการเชิงเส้นเพื่อทำนายอันดับปฏิกิริยา โดยทำการศึกษาปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง และปฏิกิริยาอันดับสองพล็อต จากภาพที่ 13 และ 14 เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) พบว่าลักษณะการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับของตัวดูดซับทั้งสองชนิด เป็นไปตามปฏิกิริยาอันดับสอง แต่เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของอันดับปฏิกิริยาทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกันมาก เพื่อง่ายต่อ

การศึกษาและนำไปใช้ต่อจึงทำการพิจารณาค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งแทน จากภาพที่ 13ก และ 14ก พบว่าค่าคงที่อัตราเร็วของเปลือกกึ่งที่ผ่านการปรับปรุงประสิทธิภาพและถ่านกัมมันต์มีค่าใกล้เคียงกันโดยอยู่ที่ $0.0061 \text{ วินาที}^{-1}$ และ $0.0056 \text{ วินาที}^{-1}$ ตามลำดับ โดยที่เปลือกกึ่งที่ผ่านการปรับปรุงประสิทธิภาพจะมีค่าคงที่อัตราเร็วมากกว่าถ่านกัมมันต์อยู่เล็กน้อย



ภาพที่ 15 แสดงไอโซเทอมการดูดซับของเปลือกกึ่งที่ผ่านการปรับปรุงประสิทธิภาพ ที่สภาวะ ปริมาณตัวดูดซับ 1 กรัม อุณหภูมิ 30.5 องศาเซลเซียส
 ก) แลงเมียร์ไอโซเทอม ข) ฟรุนดิชไอโซเทอม



ภาพที่ 16 แสดงไอโซเทอมการดูดซับของถ่านกัมมันต์ ที่สภาวะปริมาณตัวดูดซับ 1 กรัม อุณหภูมิ 30.5 องศาเซลเซียส
 ก) แล่งเมียร์ไอโซเทอม ข) ฟรอนดิชไอโซเทอม

และเมื่อนำระยะเวลาการดูดซับที่จุดสมดุลของตัวดูดซับทั้งสองชนิด มาใช้ทดลองหาไอโซเทอมการดูดซับสี่อ้อมรีแอกทีฟดู 4 ที่อุณหภูมิ 30.5 องศาเซลเซียส โดยใช้สมการไอโซเทอมการ

ดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดิชในการวิเคราะห์ โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) พบว่าการดูดซับสี่ข้อมรีแอกทีฟบลู 4 ของตัวดูดซับทั้งสองชนิด เป็นไปตามสมการของแลงเมียร์ซึ่งเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว ไม่เกิดการซ้อนทับและเมื่อมลสารถูกดูดซับไว้แล้วจะไม่มีเคลื่อนที่ เมื่อพิจารณาตารางที่ 3 จะเห็นว่าค่าปริมาณสี่ข้อมที่สามารถดูดซับได้มากที่สุดบนถ่าน 1 กรัม เปลือกกุ้งที่ผ่านการเพิ่มประสิทธิภาพจะมีความสามารถในการดูดซับสี่ข้อมเท่ากับ 8.038 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งมากกว่าถ่านกัมมันต์ซึ่งสามารถดูดซับสี่ข้อมได้เพียง 3.713 มิลลิกรัมต่อกรัม

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบคุณสมบัติในการดูดซับของเปลือกกุ้งและถ่านกัมมันต์

ตัวดูดซับ	สมการ	R^2	q_m (mg/g)	K_a (L/mg)
เปลือกกุ้ง	$y = 0.1244x + 1.6177$	0.98	8.038	0.077
ถ่านกัมมันต์	$y = 0.2693x + 1.8173$	0.9973	3.713	0.148

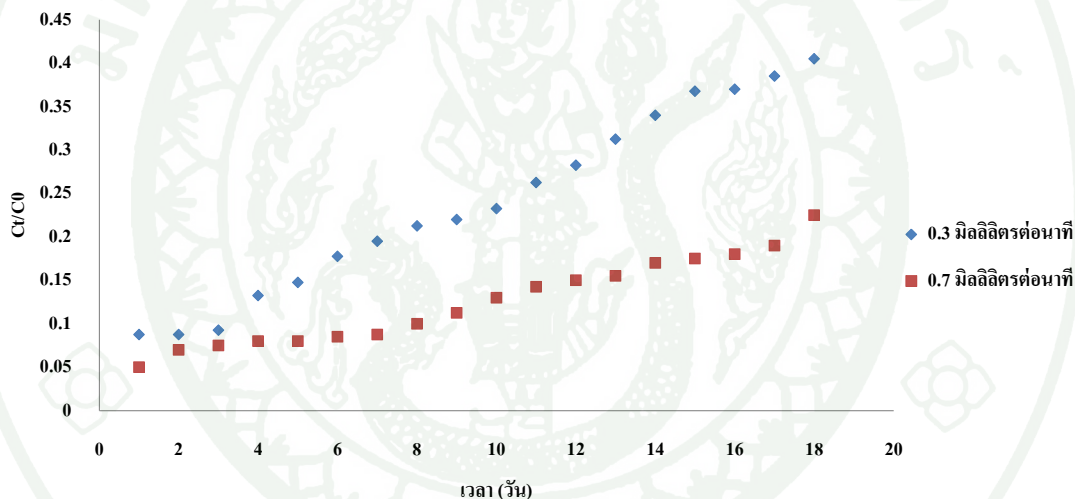
ซึ่งเมื่อพิจารณาค่าคงที่อัตราเร็วควบคู่กับปริมาณสี่ข้อมที่สามารถดูดซับได้มากที่สุดบนตัวดูดซับ 1 กรัม จะสามารถอธิบายได้ว่า ตัวดูดซับทั้งสองชนิดที่มีค่าคงที่อัตราเร็วใกล้เคียงกัน แต่เปลือกกุ้งที่ผ่านการปรับปรุงประสิทธิภาพมีความสามารถในการดูดซับสี่ข้อมได้มากกว่าจึงส่งผลทำให้มีระยะเวลาการดูดซับเข้าสู่สมดุลนานกว่าถ่านกัมมันต์

3. การศึกษาการดูดซับสี่ข้อมแบบต่อเนื่องในถังปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เดี่ยวของเปลือกกุ้งที่ผ่านการปรับปรุงประสิทธิภาพ

การศึกษาการดูดซับสี่ข้อมรีแอกทีฟบลู 4 แบบต่อเนื่องในถังปฏิกรณ์ทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว ปริมาตร 450 มิลลิลิตร มีการสูบน้ำเสียสี่ข้อมความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตรเข้าทางด้านบนของถังปฏิกรณ์ โดยกำหนดให้จุดเบรกทรวงอยู่ที่ค่าความเข้มข้นสี่ข้อมที่เหลือต่อความเข้มข้นสี่ข้อมเริ่มต้นเท่ากับ 0.1 ทำการศึกษาที่อัตราการไหล 0.3 และ 0.7 มิลลิตรต่อนาที ผลที่ได้แสดงดังภาพประกอบที่ 16 พบว่าที่อัตราการไหล 0.3 มิลลิตรต่อนาที ระยะเวลาเบรกทรวงจะอยู่ที่ 7 วัน และเมื่อเพิ่มอัตราการไหลเป็น 0.7 มิลลิตรต่อนาที จะส่งผลทำให้ระยะเวลาเบรกทรวงเหลือเพียง 3 วัน เนื่องจากการเพิ่มอัตราการไหลจะส่งผลทำให้ระยะเวลาสัมผัสระหว่างน้ำเสียและตัวดูดซับลดลง และเมื่อพิจารณาจากตารางที่ 4 จะพบว่าการเพิ่มอัตราการไหลจะส่งผลทำให้ค่าภาระเชิงมวลเพิ่มมากขึ้น เมื่อดำเนินหาปริมาณการดูดซับสี่ข้อมมากที่สุดที่เปลือกกุ้ง

สามารถดูดซับได้โดยใช้ค่าที่ได้จากการทดลองการดูดซับสี่ข้อมแบบต่อเนื่องที่อัตราการไหล 0.3 และ 0.7 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันเท่ากับ 8.22 และ 8.10 มิลลิลิตรต่อกรัม ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับที่ได้จากการทดลองแบบครั้ง (Batch test) และเมื่อพิจารณา Usage rate พบว่าที่อัตราการไหล 0.3 และ 0.7 มิลลิลิตรต่อนาที มีค่าเท่ากัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่อัตราการไหล 0.7 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นค่าที่เหมาะสมต่อการบำบัดสี่ข้อมที่สภาวะดังกล่าว และเมื่อลดอัตราการไหลก็ไม่ส่งผลต่อค่า Usage rate

และเมื่อนำโรตัม โหมดลมศึกษาพฤติกรรมของการดูดซับสี่ข้อมรีแอกทีฟ บลู 4 บนเปลือกกุ้งที่ผ่านการปรับปรุงประสิทธิภาพ โดยใช้ข้อมูลการศึกษาหลังจุดเบรกทรู จนถึงจุดเสื่อมสภาพ (Exhaust point) โดยทำการพิจารณาที่อัตราการไหลต่างๆพบว่าค่าคงที่อัตราเร็วโรตัม (k_{th}) และปริมาณการดูดซับสูงสุดบนตัวดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลเพิ่มมากขึ้น



ภาพที่ 17 การศึกษาการบำบัดสี่ข้อมแบบต่อเนื่องในถังปฏิกริยา

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบคุณสมบัติของแต่ละอัตราการไหล

อัตราการไหล (ml/min)	0.3	0.7
ความเร็วในการไหล (m/min)	0.00059	0.00138
อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ (ml/(min·cm ²))	0.0593	0.1383
ภาระเชิงมวล (mg/day)	24.6	50.4
Usage volume (L)	3.02	3.02
Usage rate(g/L)	5.29	5.29
adsorption capacity(mg/g)	8.22	8.10
k_{th} (mL/(mg·day))	0.0022	0.0028
q_c from thomas model(mg/g)	18.58	52.36

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากการศึกษาการผลิตกรดอะซิติกจากเศษสับประรดด้วยเชื้อจุลินทรีย์ *Acetobacter aceti* พบว่า ที่สภาวะอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จุลินทรีย์สามารถผลิตกรดได้มากที่สุดที่อัตราส่วนการเจือจางเศษสับประรด(กรัม) ต่อ น้ำกลั่น(มิลลิลิตร) 10 ต่อ 10 สามารถผลิตได้ถึง 3.29 เปอร์เซ็นต์ เมื่อนำกรดอะซิติกที่ผลิตได้ดังกล่าวไปแช่เปลือกกุ้งเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับสีข้อม จะพบว่าเปลือกกุ้งที่ผ่านปรับปรุงประสิทธิภาพ เมื่อนำมาดูดซับสีข้อมรีแอกทีฟ บลู 4 พบว่ามีลักษณะไอโซเทอมการดูดซับเป็นแบบแลงเมียร์ เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการดูดซับกับถ่านกัมมันต์โดยกำหนดให้จุดพลศาสตร์ของการดูดซับสีข้อมเป็นไปตามปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง พบว่าตัวดูดซับทั้งสองชนิดมีค่าคงที่อัตราเร็วการดูดซับใกล้เคียงกัน คือ 0.006 และ 0.0056 วินาที⁻¹ ตามลำดับ แต่เมื่อศึกษาความสามารถในการดูดซับสีข้อมรีแอกทีฟบลู 4 มากที่สุดบนถ่านหนึ่งกรัม พบว่าเปลือกกุ้งที่ผ่านการปรับปรุงประสิทธิภาพสามารถดูดซับสีข้อม ได้มากกว่าถ่านกัมมันต์ถึง 4.325 มิลลิกรัมต่อกรัม และเมื่อนำเปลือกกุ้งที่ผ่านการปรับปรุงประสิทธิภาพไปศึกษาการบำบัดน้ำเสียสีข้อมรีแอกทีฟบลู 4 แบบต่อเนื่องในถังปฏิกริยาพบว่าระยะเวลาเบรกทิวอัตราการไหล 0.3 และ 0.7 มิลลิลิตรต่ออนาทีอยู่ที่ 7 และ 3 วัน ตามลำดับ

ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้มีการใช้น้ำเสียสังเคราะห์สีข้อมซึ่งมีความแตกต่างจากน้ำเสียจริงจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมอย่างมาก ทำให้ผลการวิจัยนี้ยังไม่สามารถนำไปประยุกต์ใช้จริงได้ จึงควรมีการนำเอาน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมจริง มาทำการศึกษาทดลองเพื่อให้ได้ผลที่ชัดเจนยิ่งขึ้น
2. เนื่องจากการศึกษานี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเปลือกกุ้งที่ผ่านการแช่กรดอะซิติกเพื่อกำจัดแร่ธาตุมาบำบัดสีน้ำเสียสีข้อม จึงไม่ได้มีการศึกษาปัจจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น ค่าพีเอช หรือ ผลของขนาดตัวดูดซับ จึงควรมีการศึกษาปัจจัยอื่นๆ ในการบำบัดต่อไป

3. ในงานวิจัยนี้เปลือกกุ้งที่นำมาคูดซับได้มีการย่อยขนาดด้วยกรรไกร ทำให้มีรูปทรงที่ไม่สมมาตร และแตกต่างกันไป เพื่อให้เหมาะสมต่อการนำไปใช้จริง จึงควรมีการศึกษาการแปรรูปวัสดุคูดซับ ให้เหมาะสมต่อการนำไปใช้ต่อไป

4. ถึงปฏิกิริยาที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นถึงขนาดเล็ก ขนาดพื้นที่หน้าตัดน้อย อาจจะทำให้ผลการบำบัดไม่เหมาะสมเท่าที่ควร ในงานวิจัยต่อไปควรมีการทดลองขยายขนาดถึงปฏิกิริยาให้ใหญ่ขึ้น

5. เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริง จึงควรมีการศึกษาความสามารถในการบำบัดพารามิเตอร์อื่นๆ ด้วย เช่น ค่าบีโอดี หรือ ค่าซีโอดี เป็นต้น

6. เพื่อเป็นการศึกษาว่าการบำบัดสีข้อมด้วยเปลือกกุ้งที่ผ่านการปรับปรุงประสิทธิภาพไม่ก่อให้เกิดสารอินทรีย์ชนิดอื่นๆ ขึ้นมาแทนจึงควรมีศึกษาปริมาณค่าทีโอซีประกอบด้วย

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2552. การบำบัดน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 3. มิตรนราการพิมพ์, กรุงเทพฯ.

กรมการค้าต่างประเทศ. 2554. สถานการณ์สินค้าล้าสมัยและผลิตภัณฑ์ล้าสมัย ไตรมาส 4 ปี 2554. กรุงเทพฯ.

จूरียรัตน์ ลิสมิทธิ. 2552. ปฏิบัติการจุลชีววิทยาทั่วไป. พิมพ์ครั้งที่ 2. สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ธนาคารเพื่อการส่งออกและนำเข้าแห่งประเทศไทย. 2547. อุตสาหกรรมล้าสมัยปกป้อง. กรุงเทพฯ.

นิพนธ์ ตั้งคณานุกรักษ์ และ คณิดา ตั้งคณานุกรักษ์. 2550. หลักการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางเคมี. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ณัฐดา วิโรจน์แสงอรุณ และ สมบูรณ์ ธนาสุภวัฒน์. 2533. การผลิตน้ำส้มสายชูจากเชื้อ *Acetobactor species* ที่แยกจากวัสดุธรรมชาติ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สถาบันพัฒนาเทคโนโลยีการควบคุมมลพิษ. 2545. การจัดทำแนวทางการออกแบบวิศวกรรมเพื่อปรับปรุงระบบบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมให้มีประสิทธิภาพและประหยัดพลังงานโดยระบบไมโครออกซิเจน เล่ม 3/5. (คู่มือ). กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ.

สถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมสิ่งทอ. 2552. สถิติสิ่งทอไทย 2550/2551. กรุงเทพฯ

สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม [สศอ.](2555). สถิติอุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ

สุเทพ สิริวิทยาปกรณ. 2552. เทคโนโลยีน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 2. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

Annadurai, G., L. L. Yi and L. J. Fwu. 2008. Adsorption of reactive dye from an aqueous solution by chitosan: isotherm, kinetic and thermodynamic analysis. **Journal of Hazardous Materials** 152: 337-346.

Ho, Y.S. 2006. Isotherms for the Sorption of Lead onto Peat: Comparison of Linear and Non-Linear Methods. **Polish Journal of Environmental Studies** 15(1): 81-86.

Reynolds, T.D. and P.A. Richards. 1992. **Unit Operations and Processes in Environmental Engineering**. CENGAGE Learning

Sundrarajan, M., G. Vishnu and K. Joseph. 2007. Decolorisation of exhausted reactive dye bath using ozonator for reuse. **Journal Environmental Science Technology**: 263 – 270.

Wenhong, L., Q. Yue, P. Tu, Z. Ma, B. Gao, J. Li, and X. Xu. 2011. Adsorption characteristics of dyes in columns of activated carbon prepared from paper mill sewage sludge. **Chemical Engineering Journal** 178: 197-203.



ภาคผนวก



ภาคผนวกที่ ก1 การเตรียมสารเคมีสำหรับงานด้านจุลชีววิทยา

1) Glucose Yeast Extract Agar (GYEA /NO.4)

Glucose	100.0 กรัม
Yeast Extract	10.0 กรัม
CaCO ₃	10.0 กรัม
Agar	20.0 กรัม
น้ำกลั่น	1.0 ลิตร

ละลายส่วนผสมทั้งหมดด้วยน้ำกลั่น คนให้เข้ากัน ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้เป็น 1 ลิตร ทำการให้ความร้อนด้วยเครื่องอังไอน้ำเพื่อละลายผงวุ้น จากนั้นนำไปนึ่งฆ่าเชื้อด้วยอุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นระยะเวลา 15 นาที นำไปเทใส่เพลท ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิ 1 คีน ทำการตรวจสอบว่ามีเชื้อจุลินทรีย์เกิดขึ้นหรือไม่

2) Glucose Yeast Extract Broth (GYEB)

Glucose	100.0 กรัม
Yeast Extract	10.0 กรัม
น้ำกลั่น	1.0 ลิตร

ละลายส่วนผสมทั้งหมดด้วยน้ำกลั่น คนให้เข้ากัน ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้เป็น 1 ลิตร จากนั้นนำไปนึ่งฆ่าเชื้อด้วยอุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นระยะเวลา 15 นาที นำไปเทใส่ขวดรูปชมพู่ ปิดฝาสำลี ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิ 1 คีน ทำการตรวจสอบว่ามีเชื้อจุลินทรีย์เกิดขึ้นหรือไม่

3) การเตรียมน้ำสำหรับเชื้อจาง

NaCl	8.5 กรัม
น้ำกลั่น	1.0 ลิตร

ละลายโซเดียมคลอไรด์ในน้ำกลั่น ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้เป็น 1 ลิตร จากนั้นนำไปนึ่งฆ่าเชื้อด้วยอุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นระยะเวลา 15 นาที

ภาคผนวกที่ ก2 การวัดปริมาณกรดที่ผลิตได้ทั้งหมด

1) สารเคมี

1. น้ำกลั่น

2. สารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 นอร์มอล

ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) จำนวน 4 กรัม ละลายในน้ำกลั่นและปรับปริมาตรให้ได้ 1000 มิลลิลิตร จะให้ความเข้มข้นสารละลายเท่ากับ 0.1 N การหาความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำการชั่ง Potassium hydrogen phthalate (อบ ชั่วโงงที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส แล้วทิ้งให้เย็นในตู้ดูดความชื้น) ด้วยเครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง 0.3 กรัม

3. สารละลายฟีนอล์ฟทาเลอิน (Phenolphthalein) ชั่งฟีนอล์ฟทาเลอิน 1 กรัม ละลายในเอทิลแอลกอฮอล์ 95 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

2) วิธีการวิเคราะห์

1. ปิเปิดน้ำตัวอย่าง 10 มิลลิลิตร ใส่ขวดรูปชมพู่ เติมฟีนอล์ฟทาเลอิน 2 – 3

2. ไทเทรตด้วยสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 N จนถึงจุดยุติ จะเห็นสีน้ำตัวอย่างเป็นสีชมพู

3. คำนวณปริมาณกรดอะซิติคได้จากสูตร

$$\text{ปริมาณกรดทั้งหมด (กรัมต่อ 100 มล.)} = \frac{N \times V \times 60.1 \times 100}{10000}$$

กำหนดให้ N = ความเข้มข้นมาตรฐาน โซเดียมไฮดรอกไซด์

V = ปริมาตรของสารละลายมาตรฐาน โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้

ภาคผนวกที่ ก3 การวัดความเข้มข้นของสีในหน่วย มิลลิกรัมต่อลิตร

1) การเตรียมสารละลายสต็อกสีย้อมรีแอกทีฟที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 2000 มิลลิกรัมต่อลิตรซึ่งสีย้อมรีแอกทีฟ บลู 4 มา 2.00 กรัม ลงในบีกเกอร์ ขนาด 250 มิลลิลิตร ละลายด้วยน้ำกลั่นจนหมด ถ่ายลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

2) เตรียมสารละลายมาตรฐานสีย้อมรีแอกทีฟ

เตรียมกราฟมาตรฐานสีย้อมรีแอกทีฟ บลู 4 ที่มีความเข้มข้น 0 - 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปิเปตสารละลายสต็อกสีย้อม รีแอกทีฟ บลู 4 ที่มีความเข้มข้น 2000 มิลลิกรัมต่อลิตรมา 5 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจะได้สารละลายสีย้อม รีแอกทีฟ บลู 4 เข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และปิเปตสารละลายสีย้อม รีแอกทีฟ บลู 4 ที่มีความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรมา 5, 10, 20, 40 และ 50 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น จะได้สารละลายสีย้อม รีแอกทีฟ บลู 4 เข้มข้น 10, 20, 40, 80 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร นำสารละลายสีย้อม รีแอกทีฟ บลู 4 มาวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาว 595 นาโนเมตร โดยใช้ น้ำกลั่นเป็นเบลงค์ จากนั้นนำค่าที่ได้ไปพล็อตกราฟมาตรฐานโดยให้ค่าการดูดกลืนแสงเป็นแกน Y และความเข้มข้นเป็นแกน X จากนั้นนำน้ำตัวอย่างมาเจือจางให้อยู่ในช่วงของความเข้มข้นในกราฟมาตรฐานและนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยใช้น้ำกลั่นเป็นเบลงค์ เมื่อได้ค่าการดูดกลืนแสงแล้วให้นำไปแทนค่าในสมการของกราฟมาตรฐาน โดยให้ค่าการดูดกลืนแสงเป็นค่า y จากนั้นคำนวณหาค่าความเข้มข้นสีย้อมเป็นค่า x หลังเจือจางแล้ว ทำการคำนวณกลับไปสู่ความเข้มข้นก่อนเจือจางต่อไป จะได้ความเข้มข้นสีย้อมในน้ำตัวอย่าง กราฟมาตรฐานความเข้มข้นสีย้อมควรมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ยอมรับได้ 0.99 ขึ้นเป็นไป

ภาคผนวกที่ ก4 การนับจำนวนจุลินทรีย์เริ่มต้น ด้วยวิธี Spread plate

1) สารเคมี

1. สารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0.85 เปอร์เซ็นต์ที่ผ่านการนึ่งฆ่าเชื้อ
2. สารอาหารเลี้ยงเชื้อ Glucose Yeast Extract Agar
3. สารอาหารเลี้ยงเชื้อ Glucose Yeast Extract Broth

2) วิธีการทดลอง

1. ทำ serial dilution ของเชื้อ *Acetobacter aceti* ด้วย สารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.85 เปอร์เซ็นต์ที่ผ่านการนึ่งฆ่าเชื้อ ให้ได้ระดับความเข้มข้น 10^{-1} - 10^{-7}
 - 1.1 ใช้ปิเปตที่ผ่านการฆ่าเชื้อ ขนาด 10 ml คูด สารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.85 เปอร์เซ็นต์ที่ผ่านการนึ่งฆ่าเชื้อ ปริมาตร 9 มิลลิลิตร ใส่ลงใน หลอดทดลองที่ผ่านการฆ่าเชื้อ ทั้ง 7 หลอด
 - 1.2 ใช้ปิเปตที่ผ่านการฆ่าเชื้อขนาด 1 มิลลิลิตร คูดอาหารเลี้ยงเชื้อ GYEB ที่ผ่านการเลี้ยงเชื้อ *Acetobacter aceti* เป็นระยะเวลา 3 วัน ปริมาตร 1 มิลลิลิตร แล้วถ่ายลงในหลอดที่ 1 (ความเข้มข้น 10^{-1})
 - 1.3 ใช้ปิเปตที่ผ่านการฆ่าเชื้อขนาด 1 มิลลิลิตร อันใหม่คูดสารละลายในหลอดที่ 1 ขึ้นลง ประมาณ 2-3 ครั้ง เพื่อให้เชื้อ *Acetobacter aceti* ผสมเข้ากันกับสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.85 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นจึงถ่ายสารละลายจากหลอดที่ 1 ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ลงในหลอดที่ 2 (ความเข้มข้น 10^{-2})
 - 1.4 ทำ serial dilution เช่นนี้ไปเรื่อยๆจนถึงหลอดที่ 7 (ความเข้มข้น 10^{-7})
2. ใช้ปิเปตที่ผ่านการฆ่าเชื้อขนาด 1 มิลลิลิตร คูดสารละลายจากหลอดที่ 7(ความเข้มข้น 10^{-7}) ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร ลงใน เพลทที่บรรจุ Glucose Yeast Extract Agar
3. ทำเช่นเดียวกับสารละลายหลอดที่ 6 5 และ 4 ตามลำดับ โดยไม่ต้องเปลี่ยนปิเปตอันใหม่ (ใช้เฉพาะกรณีที่คูดสารละลายจากความเข้มข้นต่ำไปสูง)
4. จุ่ม spreader ลงใน beaker ที่บรรจุ 95% เปอร์เซ็นต์ แอลกอฮอล์
5. เผลา spreader ด้วยเปลวไฟ ทิ้งไว้ให้เย็น 10-15วินาที แล้วใช้ spreader เกลี่ย สารละลายให้ทั่ว โดยเกลี่ยซ้ำหลายๆครั้งจนแน่ใจว่าเชื้อกระจายทั่วผิวหน้าอาหาร และผิวหน้าอาหารแห้ง
6. คว่ำจานเพาะเชื้อทั้งหมดใส่ในถุงพลาสติก รัดหนังยางเพื่อป้องกันแมลง บ่มไว้ที่

อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 3 วัน

7. นับจำนวนโคโลนีเดี่ยวของเชื้อ และทำการคำนวณกลับ
8. ในการนับเชื้อควรจะทำควบคู่ไปครั้งละ 2 เพลทเพื่อเป็นการตรวจเช็คความถูกต้อง





ภาคผนวก ข
ผลการทดลอง

ตารางผนวกที่ ข1 ปริมาณกรดที่ผลิตได้

ระยะเวลา หมัก	อัตราส่วนเศษ สับประรด(กรัม)ต่อ น้ำกลั่น(มิลลิลิตร)	ปริมาณกรดที่ผลิตได้(กรัมต่อ100 มล.)			ค่าเฉลี่ย	SD
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
3	10:10	3.26	3.27	3.33	3.29	0.03
	10:20	2.68	2.68	2.68	2.68	0.00
	10:30	2.13	2.07	2.19	2.13	0.06
5	10:10	3.43	3.37	3.49	3.43	0.06
	10:20	2.79	2.79	2.79	2.79	0.00
	10:30	2.25	1.80	2.25	2.10	0.26

ตารางผนวกที่ ข2 ผลของระยะเวลาต่อการบำบัดสีของเปลือกกุ้งที่ผ่านการปรับปรุงประสิทธิภาพ

เวลา(นาที)	ความเข้มข้นสีข้อม(มก./ล.)			เฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0	95.00	95.00	95.00	95.00	0.00
30	73.5	73.75	73.63	73.63	0.13
60	62.75	62.63	62.13	62.50	0.33
90	52.50	52.50	53.25	52.75	0.43
120	45.25	45.13	44.63	45.00	0.33
180	38.20	38.31	37.08	37.87	0.68
360	35.96	35.96	35.96	35.96	0.00
540	34.27	33.71	33.15	33.71	0.56
720	32.58	32.70	32.13	32.47	0.30
900	32.13	32.02	31.91	32.02	0.11
1080	31.35	31.35	31.69	31.46	0.19
1260	30.90	31.01	31.12	31.01	0.11
1440	31.01	30.90	30.79	30.90	0.11

ตารางผนวกที่ ข3 ผลของระยะเวลาสัมพัทธ์ต่อการบำบัดสีเขียวของถ่านกัมมันต์

เวลา(นาทีก)	ความเข้มข้นสีเขียว(มก./ล.)			เฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0	101.00	101.00	101.00	101.00	0.00
5	98.75	98.75	98.00	98.50	0.43
10	95.50	95.25	95.00	95.25	0.25
15	92.50	92.50	92.13	92.38	0.22
20	90.63	91.00	90.25	90.63	0.38
30	89.38	89.63	89.50	89.50	0.13
60	84.50	84.63	84.00	84.38	0.33
90	79.58	79.38	79.25	79.40	0.17
120	70.38	70.38	70.38	70.38	0.00
150	67.38	67.13	67.25	67.25	0.13
180	63.13	63.25	63.63	63.33	0.26
210	60.00	59.88	59.63	59.83	0.19
240	59.75	59.75	59.50	59.67	0.14
270	59.75	59.63	59.88	59.75	0.13

ตารางผนวกที่ ข4 ไอโซเทอมการดูดซับของเปลือกกุ้งที่ผ่านการปรับปรุงประสิทธิภาพ

ปริมาณตัวดูด ซับ(กรัม)	C_0 (มก./ล.)	C_t (มก./ล.)	X	X/M	C_e/q_e	$\log q_e$	$\log C_e$
1.0	25	4.375	2.063	2.044	2.140	0.311	0.641
1.0	50	11	3.900	3.873	2.840	0.588	1.041
1.0	75	25.625	4.938	4.942	5.185	0.694	1.409
1.0	100	37.75	6.225	6.189	6.099	0.792	1.577

ตารางผนวกที่ ขร ไอโซเทอมการดูดซับของถ่านกัมมันต์

ปริมาณ ตัวดูดซับ (กรัม)	C_0 (มก./ล.)	C_i (มก./ล.)	X	X/M	C_e/q_e	$\log q_e$	$\log C_e$
1.0	25	6.000	1.900	1.897	3.163	0.278	0.778
1.0	50	22.000	2.800	2.790	7.886	0.446	1.342
1.0	75	43.750	3.125	3.114	14.050	0.493	1.641
1.0	100	65.625	3.438	3.424	19.167	0.535	1.817

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ-นามสกุล	นายเจตนิพิฐ์ สุตทองคง
วัน เดือน ปี ที่เกิด	1 เมษายน 2531
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	วท.บ.(เคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

