

การดูดซับสีเบสและสีแอซิดโดยใช้วัสดุเชิงประกอบเซริซิน/แอลจีเนต



ปริญญานิพนธ์
ของ
เรือนแก้ว รังสรรค์ยุทธนา

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์

กรกฎาคม 2561

การดูดซับสีเบสและสีแอซิดโดยใช้วัสดุเชิงประกอบเซริซิน/แอลจีเนต



ปริญญาโท
ของ
เรือนแก้ว รังสรรค์ยุทธนา

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์

กรกฎาคม 2561

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การดูดซับสีเบสและสีแอซิดโดยใช้วัสดุเชิงประกอบเซรีซิน/แอลจีเนต



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทร์วิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์

กรกฎาคม 2561

เรื่อนแก้ว รังสรรค์ยุทธนา. (2561). การดูดซับสีเบสิกและสีแอซิดโดยใช้วัสดุเชิงประกอบเซริซิน/
แอลจินต วท.ม. (วัสดุศาสตร์). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาโท: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วลัยกร นิตยพัฒน์,
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ถนัด จินตโกศล.

เม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน/แอลจินตถูกนำมาใช้เป็นวัสดุดูดซับสำหรับการกำจัดสีเบสิก
และสีแอซิดจากสารละลาย เม็ดวัสดุเชิงประกอบเตรียมได้จากการผสมระหว่างเซริซินและแอลจินต
ด้วยกระบวนการเกิดเจล ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเม็ดวัสดุเชิงประกอบถูกวิเคราะห์ด้วยกล้อง
จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) การศึกษาการดูดซับถูกควบคุมโดยใช้ ความเข้มข้นของ
เซริซิน เวลาในการดูดซับ (60-480 นาที) ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย (1-10) ปริมาณตัว
ดูดซับ (1-7 กรัม) ผลการศึกษาพบว่าสภาวะสมดุลที่เวลา 360 นาที ที่ปริมาณเซริซิน 5% ค่าความ
เป็นกรด-ด่างของสีเบสิกและสีแอซิดเท่ากับ 8 และ 2 ตามลำดับ การศึกษาแบบจำลองไอโซเทิร์ม
แบบแลงเมียร์แสดงค่าสูงสุดในการดูดซับแบบชั้นเดียว สำหรับ basic orange 22 300%, blue BG
200% 01, yellow 3GL 200%, red N-2RBL, navy M-DNL และ yellow GC มีค่าเท่ากับ 8.31, 9.33,
5.98, 7.60, 7.60 และ 10.17 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ จลนศาสตร์การดูดซับสามารถอธิบายด้วย
สมการอัตราเร็วอันดับสองเทียม การทดลองการคายซับแสดงการคายซับซ้ำ 3 ครั้ง และแสดงให้เห็น
ว่าเม็ดวัสดุดูดซับสามารถนำกลับมาใช้ใหม่และใช้ซ้ำได้ ค่าความเป็นกรด-ด่างของการคายของ
สีเบสิกและสีแอซิดออกจากสารละลายเท่ากับ 4 และ 8 ตามลำดับ การศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นว่า
เม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน/แอลจินต เป็นวัสดุดูดซับที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีเบสิกและ
สีแอซิดจากสารละลายได้

ADSORPTION OF BASIC AND ACID DYES USING SERICIN/ALGINATE COMPOSITE

AN ARSTRACT

BY

RUENKAEW RUNGSANYUTTHANA

Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Master of Science Degree in Material Science
at Srinakharinwirot University

July 2018

Ruenkaew Rangsanyutthana. (2018). *Adsorption of basic and acid dyes using alginate/sericin composite beads*. Master Thesis, M.Sc. (Material Science).
Bangkok : Graduate School, Srinakharinwirot University. Advisor Committee:
Associate Professor Dr. Walaikorn Nitayaphat. and Associate Professor Dr. Thanut Jitakosol.

Alginate/sericin composite beads were used as the adsorbent for the removal of basic and acid dyes from an aqueous solution. The composite beads were prepared from a blend between sericin and alginate through the gelation process. The morphological structure of the beads was characterized by Scanning Electron Microscopy (SEM). The adsorption experiments were conducted using concentration of sericin, a contact time (60-480 min), pH (1-10), and adsorbent dosage (1-7 g). According to the results, equilibrium adsorption data was achieved within 360 min at 5% w/v of sericin. The pH of the basic and acid dyes solution was 8 and 2, respectively. The Langmuir isotherm model, showing the maximum monolayer adsorption capacity for basic orange 22 300%, blue BG 200% 01, yellow 3GL 200%, red N-2RBL, navy M-DNL and yellow GC was 8.31, 9.33, 5.98, 7.60, 7.60 and 10.17 mg/g, respectively. The adsorption kinetics was described by the pseudo second-order model. The desorption experiment was demonstrated repeat three times and exhibited that was regenerative and reusable. The pH of the desorption for basic and acid dyes from an aqueous solution were 4 and 8, respectively. This study demonstrates that the alginate/sericin composite beads were a very effective adsorbent for the removal of basic and acid dyes from an aqueous solution.

ประกาศคุณูปการ

ในการจัดทำปริญญาบัตรฉบับนี้ได้สำเร็จลงด้วยความกรุณาจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วลัยกร นิตยพัฒน์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ถนัด จินตโกศล ที่คอยให้คำปรึกษา คำแนะนำในการแก้ปัญหาและข้อบกพร่องต่างๆ และยังช่วยเหลือตลอดระยะเวลาการทำวิจัยด้วยความเอาใจใส่อย่างสูง ผู้วิจัยซาบซึ้งและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

กราบขอพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ปิยะพร คามภิรภาพพันธ์ และอาจารย์ ดร. ปณิธาน วนากมล ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเป็นคณะกรรมการในการสอบปากเปล่า (ปริญญาบัตร) รวมทั้งคำแนะนำและแก้ไขเพิ่มเติมทำให้ปริญญาบัตรฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

กราบขอพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวัสดุศาสตร์ทุกท่านที่ได้ให้คำปรึกษาและประสิทธิภาพประสิทธิผลตลอดระยะเวลาของการศึกษา จนผู้วิจัยสามารถนำความรู้มาใช้ในการทำปริญญาบัตรจนสำเร็จ

ขอขอบคุณคณาจารย์ เจ้าหน้าที่ เพื่อน พี่ นิสิตปริญญาโท ที่ได้คอยช่วยเหลือแนะนำอำนวยความสะดวกในการทำวิจัยและขอขอบคุณที่คอยช่วยเหลือและผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องที่ช่วยอำนวยความสะดวกและเป็นกำลังใจในการทำงานตลอดมา

ท้ายที่สุดผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา พี่ และครอบครัวของผู้วิจัยที่ส่งเสริมและสนับสนุนในทุกๆเรื่อง อีกทั้งยังให้ความรักและปรารถนาดีพร้อมทั้งเป็นกำลังใจให้เสมอมา

เรือนแก้ว รังสรรค์ยุทนา

ปริญญาบัตร
เรื่อง
การดูดซับสี่เบสิกและสี่แอสิตโดยใช้วัสดุเชิงประกอบเซริซิน/แอลจีเนต
ของ
เรือนแก้ว รังสรรค์ยุทธนา

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์
ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นายแพทย์ฉัตรชัย เอกปัญญาสกุล)
วันที่.....เดือน.....พ.ศ. 2561

อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาบัตร คณะกรรมการสอบปากเปล่า
.....ที่ปรึกษาหลักประธาน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วลัยกร นิตยพัฒน์) (รองศาสตราจารย์ ดร. ปิยะพร คามภิรภาพพันธ์)
.....ที่ปรึกษาร่วมกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ถนัด จินตโกศล) (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วลัยกร นิตยพัฒน์)
.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ถนัด จินตโกศล)
.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร. ปณิธาน วนากมล)

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ	1
ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
วัตถุประสงค์	2
ขอบเขตงานวิจัย	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
รังไหม (Cocoon).....	5
แอลจีเนต (Alginate).....	18
สีย้อม (Dye)	21
วัสดุเชิงประกอบ (Composite Materials).....	29
การบำบัดน้ำเสีย	33
การดูดซับ (Adsorption).....	45
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	54
เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ (Instrument technique).....	56
3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	61
สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	61
อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	62
เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	65
เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	62
สถานที่ดำเนินงานวิจัย	66
การดำเนินงานวิจัย.....	67
ขั้นตอนการวิจัย.....	68
4 ผลการวิจัย และการวิเคราะห์ผล	79
ขนาดและความหนาแน่นของเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน/แอลจีเนต	79
สภาวะความเป็นกรด-ด่างของสารละลายที่เหมาะสมในการดูดซับ.....	80
การศึกษาสมบัติในการดูดซับของวัสดุดูดซับ.....	82
การศึกษาอิทธิพลของความเป็นกรด-ด่างที่มีผลต่อการดูดซับ	89

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4 (ต่อ)	
ปริมาณของจำนวนเม็ดวัสดุเชิงประกอบที่เหมาะสมในการดูดซับ	92
ไอโซเทิร์มของการดูดซับ	99
จลนศาสตร์ของการดูดซับ	103
ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซีน 5%/แอลจีเนต	107
การเปรียบเทียบสมบัติในการคาย	110
การศึกษาเม็ดวัสดุดูดซับมาใช้ซ้ำ	113
5 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ	116
สรุปผลงานวิจัย	116
ข้อเสนอแนะ	119
บรรณานุกรม	120
ภาคผนวก	127
ภาคผนวก ก ตารางแสดงผลการวัดค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของสารละลายสีเบสิค และสีแอซิดที่ได้จาก เครื่อง UV-Vis spectrophotometer	128
ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์(R^2)	138
ภาคผนวก ค ภาพประกอบเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย	140
อภิธานศัพท์	144
ประวัติย่อผู้วิจัย	146

บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 กรดอะมิโนที่เป็นองค์ประกอบไฟโบรอินและเซรีซิน.....	7
2 ค่าเฉลี่ยน้ำเสียและน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอ พ.ศ.2556.....	34
3 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียภายใต้ระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ.....	42
4 เทคโนโลยีการบำบัดสีของน้ำเสียในอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอ.....	43
5 การเปรียบเทียบการดูดซับทางกายภาพและทางเคมี.....	47
6 ความยาวคลื่นที่วัดจากเครื่อง UV-Vis spectrophotometer ของสีเบสิกและสีแอซิด.....	72
7 อัตราส่วนผสมของเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซรีซิน/แอลจีเนต 6 อัตราส่วน.....	77
8 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของเซรีซิน ในอัตราส่วนต่างๆ กัน.....	79
9 ความหนาแน่นของเม็ดวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของเซรีซินในอัตราส่วนต่างๆ กัน.....	80
10 เปอร์เซนต์การดูดซับของสารละลายสีเบสิก (Basic orange 22 300%) เทียบกับเม็ดวัสดุ เชิงประกอบเซรีซิน/แอลจีเนต ที่อัตราส่วนต่างๆ และระยะเวลาในการดูดซับ 60-480 นาที เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสีเบสิก (Basic orange 22 300%) 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร.....	82
11 เปอร์เซนต์การดูดซับของสารละลายสีเบสิก (Blue BG 200% 01) เทียบกับเม็ดวัสดุ เชิงประกอบเซรีซิน/แอลจีเนต ที่อัตราส่วนต่างๆ และระยะเวลาในการดูดซับ 60-480 นาที เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสีเบสิก (Blue BG 200% 01) 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร.....	83
12 เปอร์เซนต์การดูดซับของสารละลายสีเบสิก (Yellow 3GL 200%) เทียบกับเม็ดวัสดุ เชิงประกอบเซรีซิน/แอลจีเนต ที่อัตราส่วนต่างๆ และระยะเวลาในการดูดซับ 60-480 นาที เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสีเบสิก (Yellow 3GL 200%) 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร.....	84
13 เปอร์เซนต์การดูดซับของสารละลายสีแอซิด (Red N-2RBL) เทียบกับเม็ดวัสดุ เชิงประกอบเซรีซิน/แอลจีเนต ที่อัตราส่วนต่างๆ และระยะเวลาในการดูดซับ 60-480 นาที เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสีแอซิด (Red N-2RBL) 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร.....	85

บัญชีตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
14 เปอร์เซนต์การดูดซับของสารละลายสีแอสิด (Navy M-DNL) เทียบกับเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน/แอลจีเนต ที่อัตราส่วนต่างๆ และระยะเวลาในการดูดซับ 60-480 นาที เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสีแอสิด (Navy M-DNL) 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร.....	86
15 เปอร์เซนต์การดูดซับของสารละลายสีแอสิด (Yellow GC) เทียบกับเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน/แอลจีเนต ที่อัตราส่วนต่างๆ และระยะเวลาในการดูดซับ 60-480 นาที เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสีแอสิด (Yellow GC) 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร.....	87
16 เปอร์เซนต์การดูดซับสารละลายสีเบสิกและสีแอสิดกับความเป็นกรด-ด่าง ด้วยเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจีเนต เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสีเบสิกและสีแอสิด 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่เวลา 360 นาที.....	89
17 เปอร์เซนต์การดูดซับสีเบสิก (Basic orange 22 300%) เทียบกับปริมาณเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจีเนต ระยะเวลาที่ 60-360 นาที เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 8 ความเข้มข้นของสารละลายสีเบสิก 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร.....	92
18 เปอร์เซนต์การดูดซับสีเบสิก (Blue BG 200% 01) เทียบกับปริมาณเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจีเนต ระยะเวลาที่ 60-360 นาที เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 8 ความเข้มข้นของสารละลายสีเบสิก 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร.....	93
19 เปอร์เซนต์การดูดซับสีเบสิก (Yellow 3GL 200%) เทียบกับปริมาณเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจีเนต ระยะเวลาที่ 60-360 นาที เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 8 ความเข้มข้นของสารละลายสีเบสิก 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร.....	94
20 เปอร์เซนต์การดูดซับสีแอสิด (Red N-2RBL) เทียบกับปริมาณเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจีเนต ระยะเวลาที่ 60-360 นาที เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 2 ความเข้มข้นของสารละลายสีแอสิด 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร.....	95
21 เปอร์เซนต์การดูดซับสีแอสิด (Navy M-DNL) เทียบกับปริมาณเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจีเนต ระยะเวลาที่ 60-360 นาที เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 2 ความเข้มข้นของสารละลายสีแอสิด 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร.....	96
22 เปอร์เซนต์การดูดซับสีแอสิด (Yellow GC) เทียบกับปริมาณเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจีเนต ระยะเวลาที่ 60-360 นาที เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 2 ความเข้มข้นของสารละลายสีแอสิด 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร.....	97

บัญชีตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
23 ผลไอโซเทิร์มการดูดซับสารละลายสีเบสิกและสีแอซิดตามทฤษฎีแลงเมียร์.....	99
24 ผลไอโซเทิร์มการดูดซับสารละลายของสีเบสิกและสีแอซิดตามทฤษฎีฟรุนดลิช	101
25 การจำลองจลนศาสตร์ Pseudo-first order model และ Pseudo-second order model ที่ใช้ในการดูดซับสารละลายสีเบสิกและสีแอซิด.....	105
26 เพอร์เซ็นต์การคายซับของสีเบสิกและสีแอซิดกับความเป็นกรด-ด่างระหว่าง 1-10 ด้วยเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจีเนต หลังการดูดซับสารละลายสีเบสิกและ สีแอซิดที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่เวลา 360 นาที	111
27 เพอร์เซ็นต์การคายซับของสารละลายสีเบสิกและสีแอซิด เมื่อนำเม็ดวัสดุดูดซับมาใช้ซ้ำ....	113



บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 รังไหม.....	5
2 ภาพตัดขวางของเส้นไหม	5
3 วงจรชีวิตของไหม.....	8
4 โครงสร้างทางเคมีของเส้นใยขนสัตว์	9
5 สมบัติ Amphoteric ของเส้นใยโปรตีน.....	9
6 รังเปื้อนภายนอก	10
7 รังเปื้อนภายใน.....	11
8 รังบาง	11
9 รังติดข้างจ่อ	12
10 รังผิดรูปร่าง	12
11 รังบางหัวท้าย	13
12 รังหลวม.....	13
13 รังแฝด	14
14 รังเจาะ	14
15 รังขึ้นรา.....	15
16 รังบวบ	15
17 กระบวนการลอกกาวไหม	16
18 โครงสร้างของแอลจินेट.....	19
19 กลไกการเกิดเจลของแอลจินेट	20
20 สีย้อมที่มีประจุลบ	22
21 สีย้อมที่มีประจุบวก.....	22
22 โครงสร้างของสีย้อมกลุ่ม (mono-azo) orange G ($C_{16}H_{10}N_2Na_2O_7S_2$).....	23
23 โครงสร้างของสีย้อมกลุ่ม (disazo).....	24
24 โครงสร้าง 9,10-anthracene dione	24
25 โครงสร้างสีย้อมชนิด indigoin	24
26 สมการการย้อมเส้นใยด้วยสีเบสิค	25
27 โครงสร้างของสี C.I. basic blue 22	26
28 โครงสร้างของสี Chrysidine yellow.....	26
29 โครงสร้างของสี malachite green	27
30 สมการการย้อมเส้นใยไนลอนด้วยสีแอซิด	27

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
31 โครงสร้างของสี C.I. acid blue 45 และ C.I. acid red 138	29
32 ภาพวาดแสดงอนุภาคของสารเสริมแรงในเนื้อหลักในรูปทรงและการวางเรียง แตกต่างกัน (a) ความเข้มข้น (b) ขนาด (c) รูปร่าง (d) การกระจาย (e) ทิศทางการเรียงตัว ซึ่งส่งผลต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ	30
33 การแบ่งประเภทของวัสดุเชิงประกอบ	31
34 ภาพวาดแสดงวัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยเส้นใย (a) ต่อเนื่องและวางแนว เดียวกัน (b) ไม่ต่อเนื่องและวางแนวเดียวกัน (c) ไม่ต่อเนื่องและวางแบบอิสระ	32
35 ตัวอย่างเทคโนโลยีการกำจัดสีน้ำเสียโดยการตกตะกอนทางเคมี	36
36 กระบวนการโอโซนออกซิเดชันในการกำจัดสีของน้ำเสียอุตสาหกรรมสิ่งทอ	38
37 ส่วนประกอบและการทำงานของระบบแอกติเวเต็ดสลัดจ์ (Activated sludge)	40
38 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบเติมอากาศ (Aerated lagoon).....	41
39 สัดส่วนของโรงงานที่มีระบบบำบัดน้ำเสียระบบต่าง ๆ	45
40 การดูดซับระหว่างของแข็งกับของเหลว.....	45
41 ลักษณะกราฟของ Langmuir adsorption isotherm	50
42 ลักษณะกราฟของ Freundlich adsorption isotherm	51
43 ลักษณะกราฟของ Pseudo-first order	52
44 ลักษณะของ Pseudo-second order	53
45 การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	57
46 เครื่องวัดความต่างศักย์บนผิวอนุภาค (Zetasizer)	58
47 หลักการทำงานของเครื่อง UV-Visible spectrophotometer.....	59
48 การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	59
49 กรดไฮโดรคลอริก	61
50 แคลเซียมคลอไรด์.....	61
51 โซเดียมไฮดรอกไซด์	62
52 ผงแอลจิเนต.....	62
53 ริงไทม์พินท์ J108	62
54 โครงสร้างสี Basic orange 22 300%	63
55 โครงสร้างสี Astrazon Blue BG 200%	63
56 โครงสร้างสี Sawacryl Yellow 3GL 200%.....	63
57 โครงสร้างสี Lanasyn Navy M-DNL	63

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
58 โครงสร้างสี Nylosan Red N-2RBL	64
59 โครงสร้างสี Yellow GC	64
60 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6380 LV, USA	65
61 เครื่องวัดความต่างศักย์บนผิวอนุภาค (Zetasizer)	66
62 เครื่อง UV-Vis spectrophotometer ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น UV-2450	66
63 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	67
64 การเตรียมผงเซริซิน	68
65 เตรียมวัสดุดูดซับ	70
66 ตัวอย่างวัสดุเชิงประกอบเซริซิน/แอลจินेटโดยการขึ้นรูปด้วยกระบวนการเกิดเจล	70
67 เวอร์เนียร์คาลิเปอร์	70
68 ขวดฟิคโนมิเตอร์	71
69 เม็ดวัสดุดูดซับบนแผ่นเหล็กแล้วเคลือบด้วยเครื่องเคลือบทอง	77
70 ค่าศักย์ซีต้าของ เซริซิน แอลจินेट และเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจินेट.....	81
71 เปอร์เซ็นต์การดูดซับไอออนของสีเบสิก (Basic orange 22 300%) เทียบกับ อัตราส่วนของเม็ดวัสดุดูดซับและระยะเวลาในการดูดซับ เมื่อความเข้มข้นของ สารละลายสีเบสิก 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร.....	83
72 เปอร์เซ็นต์การดูดซับไอออนของสีเบสิก (Blue BG 200% 01) เทียบกับ อัตราส่วนของเม็ดวัสดุดูดซับและระยะเวลาในการดูดซับ เมื่อความเข้มข้นของ สารละลายสีเบสิก 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร.....	84
73 เปอร์เซ็นต์การดูดซับของสารละลายสีเบสิก (Yellow 3GL 200%) เทียบกับ อัตราส่วนของเม็ดวัสดุดูดซับและระยะเวลาในการดูดซับ เมื่อความเข้มข้นของ สารละลายสีเบสิก (Yellow 3GL 200%) 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร	85
74 เปอร์เซ็นต์การดูดซับของสารละลายสีแดง (Red N-2RBL) เทียบกับ อัตราส่วนของเม็ดวัสดุดูดซับและระยะเวลาในการดูดซับ เมื่อความเข้มข้นของ สารละลายสีแดง (Red N-2RBL) 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร.....	86
75 เปอร์เซ็นต์การดูดซับของสารละลายสีแอสิต (Navy M-DNL) เทียบกับ อัตราส่วนของวัสดุดูดซับและระยะเวลาในการดูดซับ เมื่อความเข้มข้น ของสารละลายสีแอสิต 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร	87

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
76 เปอร์เซ็นต์การดูดซับของสารละลายสีเบสิก (Yellow GC) เทียบกับ อัตราส่วนของเม็ดวัสดุดูดซับและระยะเวลาในการดูดซับ เมื่อความเข้มข้น ของสารละลายสีเบสิก (Yellow GC) 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร.....	88
77 เปอร์เซ็นต์การดูดซับสารละลายสีเบสิกเทียบกับความเป็นกรด-ด่าง เมื่อ ความเข้มข้นของสารละลายสีเบสิก 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่เวลา 360 นาที.....	90
78 เปอร์เซ็นต์การดูดซับสารละลายสีแอสิตเทียบกับความเป็นกรด-ด่าง เมื่อ ความเข้มข้นของสารละลายสีแอสิต 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่เวลา 360 นาที.....	90
79 เปอร์เซ็นต์การดูดซับสารละลายสีเบสิก (Basic orange 22 300%) เทียบกับ ปริมาณเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจีเนต ระยะเวลาที่ 0-360 นาที เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 8 ความเข้มข้นของสารละลายสีเบสิก 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร	93
80 เปอร์เซ็นต์การดูดซับสารละลายสีเบสิก (Blue BG 200% 01) เทียบกับ ปริมาณเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจีเนต ระยะเวลาที่ 0-360 นาที เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 8 ความเข้มข้นของสารละลายสีเบสิก 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร	94
81 เปอร์เซ็นต์การดูดซับสารละลายสีเบสิก (Yellow 3GL 200%) เทียบกับปริมาณ เม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจีเนต ระยะเวลาที่ 0-360 นาที เมื่อค่าความเป็น กรด-ด่างเท่ากับ 8 ความเข้มข้นของสารละลายสีเบสิก 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร	95
82 เปอร์เซ็นต์การดูดซับสารละลายสีแอสิต (Red N-2RBL) เทียบกับปริมาณ เม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจีเนต ระยะเวลาที่ 0-360 นาที เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 2 ความเข้มข้นของสารละลายสีแอสิต 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร	96
83 เปอร์เซ็นต์การดูดซับสารละลายสีแอสิต (Navy M-DNL) เทียบกับปริมาณ เม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจีเนต ระยะเวลาที่ 0-360 นาที เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 2 ความเข้มข้นของสารละลายสีแอสิต 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร	97

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
84 เปรอ์เซ็นต์การดูดซับสารละลายสีแอมซิด (Yellow GC) เทียบกับปริมาณ เม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจินเต ระยะเวลาที่ 0-360 นาที เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 2 เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสีแอมซิด 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร98	
85 การจำลองการดูดซับสารละลายสีเบสิคตามทฤษฎีแลงเมียร์ 100	
86 การจำลองการดูดซับสารละลายสีแอมซิดตามทฤษฎีแลงเมียร์..... 100	
87 การจำลองการดูดซับสารละลายสีเบสิคตามทฤษฎีฟรุนดลิช 101	
88 การจำลองการดูดซับสารละลายสีแอมซิดตามทฤษฎีฟรุนดลิช..... 102	
89 การจำลองจลนศาสตร์ Pseudo-first order model ที่ใช้ในการดูดซับสีเบสิค เม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจินเต ระยะเวลาที่ 60-360 นาที เมื่อ ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 2 เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสีเบสิค 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร 103	
90 การจำลองจลนศาสตร์ Pseudo-first order model ที่ใช้ในการดูดซับสีแอมซิด เม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจินเต ระยะเวลาที่ 60-360 นาที เมื่อ ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 2 เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสีแอมซิด 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร 103	
91 การจำลองจลนศาสตร์ Pseudo-second order model ที่ใช้ในการดูดซับสีเบสิค เม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจินเต ระยะเวลาที่ 60-360 นาที เมื่อ ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 2 เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสีแอมซิด 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร 104	
92 การจำลองจลนศาสตร์ Pseudo-second order model ที่ใช้ในการดูดซับสีแอมซิด เม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจินเต ระยะเวลาที่ 60-360 นาที เมื่อ ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 2 เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสีแอมซิด 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร 104	
93 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจินเต ที่กำลังขยาย 40 เท่า และ 1,000 เท่า 107	
94 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจินเตหลัง การดูดซับสีเบสิค Orange (a-b), Yellow (c-d) และ Blue BG 200% 01 (e-f) ที่กำลังขยาย 40 เท่า และ 1,000 เท่า ตามลำดับ 108	

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
95 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซีน 5%/แอลจีเนตหลัง การดูดซับสีแอซิด Red N-2RBL (a-b), Yellow GC (c-d) และ Navy M-DNL (e-f) ที่กำลังขยาย 40 เท่า และ 1,000 เท่า ตามลำดับ	108
96 เปอร์เซ็นต์การคายซับสารละลายสีเบสิคเทียบกับน้ำกลั่นปรับสภาวะค่าความเป็น กรด-ด่างระหว่าง 1-10 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่เวลา 360 นาที	111
97 เปอร์เซ็นต์การคายซับสารละลายสีแอซิดเทียบกับน้ำกลั่นปรับสภาวะค่าความเป็น กรด-ด่างระหว่าง 1-10 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่เวลา 360 นาที	112
98 เปอร์เซ็นต์การคายซับสารละลายสีเบสิคในน้ำกลั่นค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4 ทำการคายซับจำนวน 3 ครั้ง ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่เวลา 360 นาที	114
99 เปอร์เซ็นต์การคายซับสารละลายสีแอซิดในน้ำกลั่นค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 8 ทำการคายซับจำนวน 3 ครั้ง ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่เวลา 360 นาที	114

บทที่ 1

บทนำ

1. ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ในปัจจุบันมีการนำสีย้อม (Dyes) มาใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ การฟอกหนัง การผลิตกระดาษ การผลิตเครื่องสำอาง อาหาร พลาสติกและการพิมพ์⁽¹⁻³⁾ จากฐานข้อมูลกรมโรงงานอุตสาหกรรม พบว่าในอุตสาหกรรมสิ่งทอก่อให้เกิดปัญหาน้ำเสียมากที่สุด เนื่องจากการปล่อยน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนของสีย้อม กล่าวคือ อนุภาคคอลลอยด์ของสีในน้ำเสีย จะเกิดการบดบังแสงอาทิตย์ที่ส่งลงไปสู่น้ำ ทำให้แสงอาทิตย์ไม่สามารถผ่านน้ำลงไปได้ ส่งผลกระทบต่อห่วงโซ่อาหาร และทำให้เสียทัศนียภาพ นอกจากนี้ สีย้อมยังเป็นสารเคมีสังเคราะห์ที่ทำให้เกิดการระคายเคือง เป็นสารก่อมะเร็งหรือทำให้เกิดการกลายพันธุ์ของพืชและสัตว์ได้ เนื่องจากในโครงสร้างของสีย้อมส่วนใหญ่มีวงแหวนแอโรมาติกอยู่ในโมเลกุล ดังนั้นจึงเกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและภาวะทางจิตใจ ด้านความปลอดภัยต่อสุขภาพของคนในชุมชนใกล้เคียงโรงงานสิ่งทอ⁽⁴⁻⁵⁾ กระทรวงอุตสาหกรรมจึงได้กำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน ฉบับที่ 2 พ.ศ. 2539 ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 โดยน้ำทิ้งที่โรงงานระบายออกมา ต้องมีความปลอดภัยต่อการใช้อุปโภคและบริโภค เช่น ค่าความเป็นกรด-ด่าง สี สารเคมีที่มีผลต่อคน และมลภาวะสิ่งแวดล้อม จึงเป็นเหตุจำเป็นที่ต้องใช้เทคโนโลยีในการกำจัดสีที่เจือปนในน้ำทิ้ง ก่อนจะปล่อยน้ำทิ้งลงสู่แหล่งน้ำเพื่อเป็นการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมให้น้อยที่สุด โดยการบำบัดน้ำเสียในอุตสาหกรรมฟอกย้อมสีสิ่งทอ มีการใช้งานหลายวิธี ได้แก่ การกรองโดยใช้เยื่อบาง (membrane filtration)⁽⁶⁾ กระบวนการสร้างและตกตะกอนทางเคมี (coagulation-flocculation)⁽⁷⁾ การย่อยสลายทางชีวภาพ (biodegradation)⁽⁸⁾ กระบวนการดูดซับ (adsorption process)⁽⁹⁾ and การแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange)⁽¹⁰⁾

กระบวนการดูดซับ (adsorption) เป็นกระบวนการที่ได้รับความสนใจในการระบบบำบัดน้ำเสียกลุ่มอุตสาหกรรมสิ่งทอ พบว่าวัสดุดูดซับ (adsorbent) ที่นิยมใช้กันมาก คือ ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการกำจัดสีย้อมหรือสารปนเปื้อนในน้ำเสีย⁽¹¹⁾ เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการดูดซับสูง แต่ด้วยมีข้อจำกัดด้านอายุการใช้งาน ในการนำถ่านกัมมันต์มาใช้ซ้ำทำได้ยากและใช้เงินลงทุนสูง ปัจจุบันจึงได้มีการพัฒนาวัสดุดูดซับขึ้นมาใช้งาน เช่น โพลีเมอร์ดินเหนียว⁽¹²⁾ วัสดุดูดซับจากธรรมชาติ⁽¹³⁾ และคอมโพสิต⁽¹⁴⁾

ในงานวิจัยนี้มีความสนใจวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร กล่าวคือ โปรตีนเซรีซินสามารถสกัดได้จากรังไหมเสีย รังไหมเสียเป็นวัสดุธรรมชาติที่เหลือใช้จากอุตสาหกรรมไหม เนื่องจากเป็นรังไหมที่ไม่สามารถนำไปใช้ในการผลิตเส้นไหมเพื่อทอเป็นผืนผ้าได้ พบว่าโปรตีนเซรีซินเป็นวัสดุธรรมชาติที่ไม่ก่อให้เกิดอันตรายแก่มนุษย์ เป็นโปรตีนที่สามารถละลายน้ำได้ มีสมบัติที่สำคัญหลาย

ประการ ได้แก่ การดูดซับความชื้นที่ดีเยี่ยม ความต้านทานต่อรังสียูวี ต้านการแข็งตัวของเลือด ป้องกันการเกิดมะเร็ง ยับยั้งเอนไซม์ไทโรซิเนส และเป็นตัวดูดซับที่มีต้นทุนต่ำ⁽¹⁵⁻¹⁶⁾

แอลจีเนต (Alginate) เป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากวัสดุธรรมชาติ เนื่องจากแอลจีเนตสามารถสกัดได้จากสาหร่ายสีน้ำตาล เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) แบบเส้นตรงที่ประกอบไปด้วย กรด α -L-guluronic และกรด β -D-mannuronic แอลจีเนตถูกนำมาประยุกต์ใช้กันอย่างแพร่หลายในการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากสมบัติความเข้ากันได้ทางชีวภาพ ความไม่เป็นพิษ ความหนืดสูง ต้นทุนต่ำ และมีสมบัติที่สำคัญในการเกิดเจลได้เมื่อทำปฏิกิริยากับไอออนบวกหรือโลหะ เช่น Ca^{2+} Na^+ โครงสร้างของเจลที่มีลักษณะคล้ายกล่องไข่ (egg box)⁽¹⁷⁻¹⁸⁾ จึงเกิดการจับตัวเป็นเม็ดวัสดุเชิงประกอบโปรตีนเซรีซินและแอลจีเนต นอกจากนี้โปรตีนเซรีซินและแอลจีเนตยังมีสมบัติในการปฏิสัมพันธ์ระหว่างโลหะและสี⁽¹⁸⁾

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมวัสดุดูดซับสีเบสิกและสีแอซิดจากโปรตีนเซรีซินและแอลจีเนต เพื่อช่วยในการดูดซับสีในน้ำทิ้ง จากโรงงานฟอกย้อมในอุตสาหกรรมสิ่งทอ

2. วัตถุประสงค์

- 2.1 เตรียมวัสดุดูดซับสีเบสิกและสีแอซิดจากโปรตีนเซรีซิน/แอลจีเนต
- 2.2 ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีเบสิกและสีแอซิดของวัสดุดูดซับจากโปรตีนเซรีซิน/แอลจีเนต
- 2.3 ศึกษาประสิทธิภาพการคายหลังจากการดูดซับสีเบสิกและสีแอซิดของวัสดุดูดซับจากโปรตีนเซรีซิน/แอลจีเนต

3. ขอบเขตงานวิจัย

- 3.1 สกัดโปรตีนเซรีซินจากรังไหมเสียพันธุ์ J108 ด้วยวิธีการลอกขาวไหมภายใต้ความดันสูงและอุณหภูมิสูง (High pressure high temperature degumming)
- 3.2 เตรียมวัสดุดูดซับด้วยวิธีการเกิดเจล (Gelation process) ที่ประกอบด้วยสารต่อไปนี้
 - 3.2.1 ผงเซรีซิน (Silk sericin powder)
 - 3.2.2 ผงโซเดียมแอลจีเนต (Alginate powder)
- 3.3 ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีเบสิกและสีแอซิด โดยพิจารณาตัวแปรดังต่อไปนี้
 - 3.3.1 อัตราส่วนระหว่างผงเซรีซิน ต่อ แอลจีเนต
 - 3.3.2 เวลาที่เข้าสู่สมดุลการดูดซับ
 - 3.3.3 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่เหมาะสมในการดูดซับ
 - 3.3.4 ปริมาณของวัสดุดูดซับที่ทำให้เวลาเข้าสู่สมดุลสั้นลง
 - 3.3.5 ไอโซเทิร์มการดูดซับตามทฤษฎีของแลงเมียร์และทฤษฎีของฟรุนดลิช

3.4 ศึกษาการคายสีเบสิกและสีแอซิดออกจากวัสดุดูดซับ

4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้วัสดุดูดซับจากรังไหมเสียที่เหลือทิ้งในอุตสาหกรรมไหม และเป็นวัตถุดิบทางเลือกทางธรรมชาติ ในการบำบัดสีย้อมสีเบสิกและสีแอซิด จากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อม



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการจัดทำงานวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำงานวิจัยตามหัวข้อต่อไปนี้

1. รังไหม (Cocoon)
 - 1.1 วงจรชีวิตของไหม (Lifecycle of silkworm)
 - 1.2 รังไหมเสีย (Cocoon waste)
 - 1.3 การลอกกาวไหม (Degumming)
2. แอลจีเนต (Alginate)
 - 2.1 วิธีการเกิดเจล (Gelation process)
3. สีย้อม (Dye)
 - 3.1 สีเบสิด (Basic dye)
 - 3.2 สีแอซิด (Acid dye)
4. วัสดุเชิงประกอบ (Composite Materials)
5. การบำบัดน้ำเสีย (Wastewater treatment)
6. การดูดซับ (Adsorption)
7. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Related research)
8. เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ (Instrument technique)

1. รังไหม (Cocoon)



ภาพประกอบ 1 รังไหม

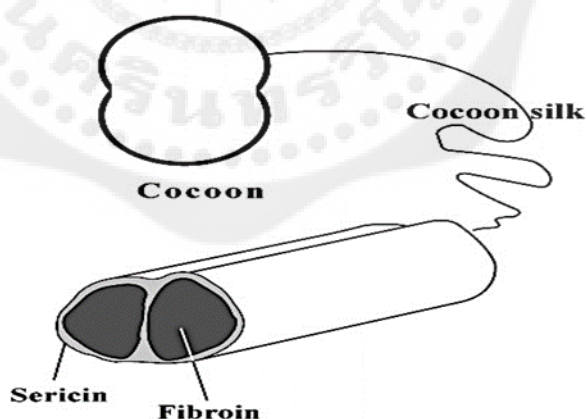
ไหม (Silkworm) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Bombyx mori* อยู่ในวงศ์ Bombycidae เป็นแมลงที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบสมบูรณ์ (Completely metamorphosis insect) เมื่อหนอนไหมกินใบหม่อนจนโตเต็มวัยแล้ว ก็จะสังเคราะห์โปรตีนเพื่อห่อหุ้มตัวเอง โดยมีลักษณะกลมรีคล้ายเมล็ดถั่ว เรียกว่า "รังไหม" แสดงดังภาพประกอบ 2.1 พบว่าเส้นใยไหมจะห่อหุ้มรังไหมเอาไว้ โดยเส้นใยไหมประกอบด้วยโปรตีนหลักๆ ได้แก่

1. ไฟโบรอิน (Fibroin) ประมาณร้อยละ 70-75⁽²⁰⁾

2. เซรีซิน (Sericin) ประมาณร้อยละ 25-30^(18,20)

และสิ่งเจือปนชนิดอื่นๆ เช่น ขี้ผึ้ง ไขมัน สีธรรมชาติ สิ่งสกปรก แร่ธาตุ อีกประมาณร้อยละ

2-1.5



ภาพประกอบ 2 ภาพตัดขวางของเส้นไหม

ที่มา: Ken-Ichiro T, Hideki S, Toshiki T. Utilization of transgenic silkworms for recombinant protein production. *J. Biotechnol & biomaterial* 2012;S9.

เซรีซิน (Sericin) เป็นโปรตีน ประกอบไปด้วยกรดอะมิโน 18 ชนิด ตัวอย่างเช่น เซอรีน (Serine) แอสพาร์ติก (Aspartic acid) กรดกลูตามิก (Glutamic acid/glutamine) และทรีโอนีน (Threonine) เป็นองค์ประกอบหลัก และกรดอะมิโนหลักทั้ง 4 มีสมบัติความชอบน้ำ (Hydrophilic) จึงทำให้เซรีซินสามารถละลายน้ำได้ เซรีซินมีลักษณะเป็นกาวเหนียว ทำหน้าที่เป็นกาวเชื่อมไฟโบรอิน 2 เส้น มีสมบัติในการรักษาความชุ่มชื้นและอุ้มน้ำได้ดี ช่วยป้องกันการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (ต้านอนุมูลอิสระ) ตูดกลืนรังสียูวีได้ดี และยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ไทโรซิเนส ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดฝ้า ในปัจจุบันจึงได้นำเซรีซินมาใช้ทำเครื่องสำอางประเภทต้านอนุมูลอิสระ⁽¹⁹⁻²²⁾

ไฟโบรอิน (Fibroin) คือ โปรตีนเส้นใยที่เราเอามาทำเป็นผืนผ้า โดยประกอบไปด้วยกรดอะมิโน เช่น ไกลซีน (Glycine) และ อะลานีน (Alanine) เป็นองค์ประกอบหลัก กรดอะมิโนทั้ง 2 มีสมบัติความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) จึงทำให้ไฟโบรอินไม่สามารถละลายน้ำ โครงสร้างของไฟโบรอินมีขนาดเล็กและแข็งแรงมาก จึงทำให้เส้นใยไหมมีความแข็งแรง ทนทาน สามารถนำมาสาวและทอเป็นผืนผ้าได้ นอกจากนี้ไฟโบรอิน ยังมีความคงทนต่อการทำลายจากแบคทีเรียและสามารถเข้ากับเนื้อเยื่อมนุษย์ได้ดี ในปัจจุบันจึงมีการพัฒนาเส้นใยไฟโบรอินในทางการแพทย์ เช่น หลอดเลือดเทียม อวัยวะเทียม สับเปลี่ยนเพาะเลี้ยงเซลล์ เป็นยารักษาแผลในปาก เป็นเมทริกซ์ในการตรึงเอนไซม์ ใช้เป็นหนังเทียม และใช้ในระบบส่งยา (Drug delivery system) ซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการรักษาให้มากขึ้น และพบว่าโครงสร้างของไฟโบรอินที่มีความแข็งแรงสามารถนำมาทำเป็นเกราะกันกระสุน ทำเบ็ดตกปลา ทำเครื่องดนตรี ได้อีกด้วย⁽²¹⁻²²⁾

ตาราง 1 กรดอะมิโนที่เป็นองค์ประกอบไฟโบรอินและเซรีซิน

ไฟโบรอิน		เซรีซิน	
กรดอะมิโน	%ที่พบ	กรดอะมิโน	%ที่พบ
Glycine	42.8	Serine	30.1
Alanine	32.4	Aspartic acid	16.8
Serine	14.7	Glutamic acid / Glutamine	10.1
Tyrosine	11.8	Threonine	8.5
Valine	3.0	Glycine	8.8
Aspartic acid	1.9	Lysine	5.5
Glutamic acid / Glutamine	1.7	Tyrosine	4.9
Threonine	1.2	Arginine	4.2
Phenylalanine	1.2	Alanine	4.0
Other	4.7	Other	8.0

*หมายเหตุ Glycine และ Alanine เป็นกรดอะมิโนหลักที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) และ Serine, Aspartic acid, Glutamic acid / Glutamine และ Threonine เป็นกรดอะมิโนหลักที่มีสมบัติความชอบน้ำ (Hydrophilic)

ที่มา: Ude AU, Eshkoo RA, Zulkifili R, Ariffin AK, Dzuraideh AW, Azhari CH. Bombyx mori silk fibre and its composite: A review of contemporary development. Materials&Design 2014;57:298-305.

1.1 วงจรชีวิตของไหม (Lifecycle of silkworm)⁽²³⁻²⁴⁾

ไหมมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบสมบูรณ์ (Completely metamorphosis insect) แบ่งออกเป็น 4 ระยะ ได้แก่

ระยะ 1 : ไข่ไหม (Eggs)

- ไข่ไหมที่พักรตัว (Hibernating eggs)
- ไข่ไหมที่ไม่พักรตัว (Non-hibernating eggs)

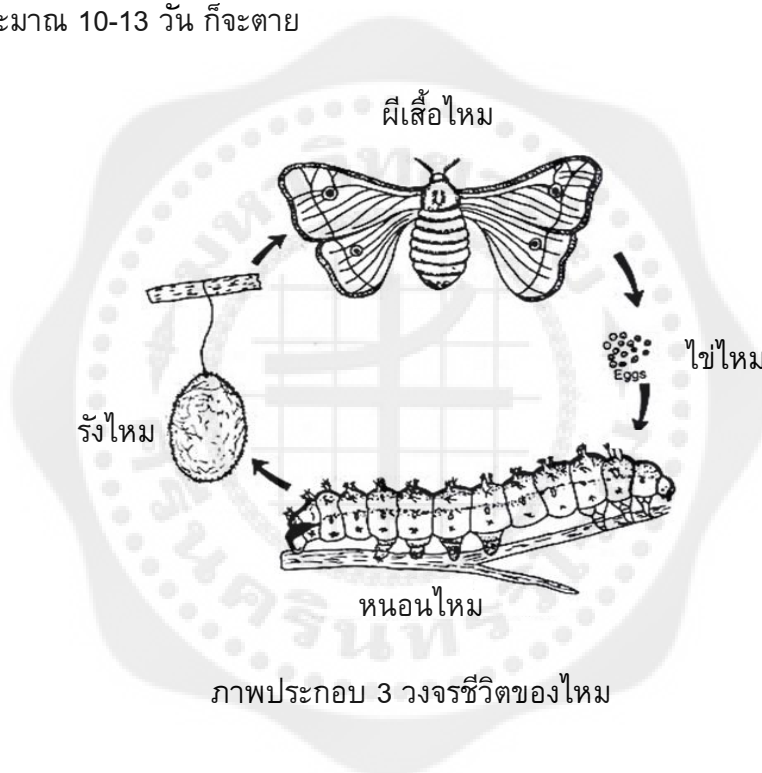
ไข่ไหมที่พักรตัวสามารถกระตุ้นให้พักเทียมไข่ไหมในสภาวะห้องที่ควบคุมอุณหภูมิ ความชื้น แสง และภายใต้สารละลายกรดเกลือ ไข่ไหมที่ผ่านการพักรตัวแล้วจะฟักออกเป็นตัวภายใน 11- 12 วัน ส่วนไข่ไหมชนิดไม่พักรตัวจะฟักออกภายใน 10-11 วันจึงจะฟักออกมาเป็นตัวอ่อนสีดำนี้นอกคลุมคล้ายมด

ระยะ 2 : หนอนไหม (Larvae) ระยะนี้มีอายุประมาณ 19-25 วัน หนอนไหมแรกเกิดมีสีดำนี้นานประมาณ 3 มิลลิเมตร หนักประมาณ 0.45 มิลลิกรัม ในระหว่างการเจริญเติบโตหนอนไหมจะ

แพะกินใบหม่อนตลอดเวลา จนตัวอ้วนเต็มที่ จึงลอกคราบ ปกติหนอนไหมจะมีการลอกคราบได้ 4 ครั้ง เมื่อหนอนไหมโตเต็มที่พร้อมจะทำรังเรียกว่า “ไหมสุก” ลำตัวใส สายหัวไปมาเพื่อพันเส้นใยทำรังในจ่อ ใช้เวลา 2-3 วัน ในการพันเส้นใยและลอกคราบเป็นดักแด้ โดยระยะที่ 1 และ 2 จะเป็นวัยเดี่ยวที่สามารถกินอาหารได้อย่างเต็มที่ก่อนจะเข้าสู่ระยะที่ 3

ระยะ 3 : ดักแด้ (Pupae) หรือ รังไหม (Cocoon) ระยะนี้ใช้เวลาประมาณ 10-13 วัน เป็นช่วงที่หนอนไหมจะพันโปรตีนออกมาล้อมรอบตัวเองเป็นรังไหม ซึ่งใช้เวลาในการทำ 2 วัน 2 คืน ก่อนจะลอกคราบกลายเป็นดักแด้พักตัวอยู่ในรังไหมเป็นเวลา 10 วัน

ระยะ 4 : ผีเสื้อไหม (Adult moth) เมื่อดักแด้เปลี่ยนเป็นผีเสื้อจะเจาะรังไหมออกมา โดยใช้ น้ำลายซึ่งมีฤทธิ์เป็นด่างละลายเส้นใยไหมและออกมาเพื่อผสมพันธุ์ วางไข่สืบสายพันธุ์ โดยจะมีชีวิตอยู่ในช่วงนี้ประมาณ 10-13 วัน ก็จะตาย



ที่มา: Samiksha S. Rearing of silkworm: life cycle and other details silkworms. Your articlelibrary. [Internet]. [เข้าถึงเมื่อ 17 พ.ย. 2559]. Available from:<http://www.yourarticlelibrary.com/zoology/rearing-of-silkworms-life-cycle-and-other-details-on-silkworms/23845/>

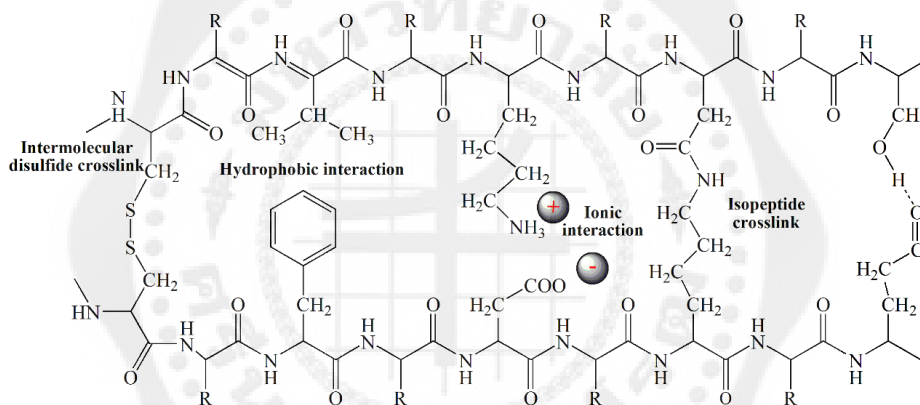
1.2 สมบัติที่เป็นได้ทั้งประจุบวกและประจุลบในโมเลกุลของเส้นใยโปรตีน

เส้นใยโปรตีนเป็นเส้นใยธรรมชาติที่ได้จากสัตว์ ได้แก่ เส้นใยขนสัตว์ (Wool) และเส้นใยไหม (Silk) โดยพบว่าโครงสร้างของเส้นใยโปรตีนเป็นพอลิเปปไทด์ (Polypeptide) ซึ่งมีโครงสร้างที่สลับซับซ้อน เส้นใยขนสัตว์คือ เส้นใยที่ได้จากขนที่ปกคลุมตัวสัตว์ ได้แก่ ขนแกะ แพะ อูฐ ขนมิงค์

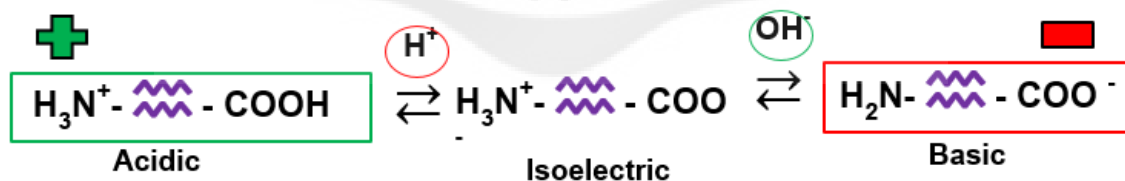
ส่วนเส้นใยไหม เป็นเส้นใยที่ได้จากตัวไหมซึ่งขับสารชนิดหนึ่งออกมาจากต่อมใกล้ปาก เพื่อสร้างรังห่อหุ้มให้กับตัวเองและเส้นใยไหมเป็นเส้นใยธรรมชาติเพียงชนิดเดียวที่เป็นเส้นใยยาว

หน่วยพื้นฐานของเส้นใยโปรตีนคือ กรดอะมิโน (Amino acid) ซึ่งในเส้นใยขนสัตว์จะพบหมู่ซีสเทอีน (Cystine) เป็นหมู่ที่เชื่อมขวางสายโปรตีน 2 สายเข้าด้วยกัน เรียกสะพานเชื่อมขวางนี้ว่า พันธะไดซัลไฟด์ (Disulphide linkage) เส้นใยโปรตีนที่มีองค์ประกอบของพันธะไดซัลไฟด์อยู่จะมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า เคราติน (Keratin) ซึ่งเคราตินพบในเส้นใยขนสัตว์และเส้นผม ในขณะที่เส้นใยไหมจะไม่พบพันธะไดซัลไฟด์ในองค์ประกอบเลย

เส้นใยโปรตีนมีองค์ประกอบทางเคมีที่มีความสำคัญ โดยพบว่าสามารถพบความเป็นด่างและกรดอยู่ในโครงสร้างเดียวกัน (Amphoteric) กล่าวคือ สามารถแสดงได้ทั้งประจุบวกในสภาวะที่เป็นกรด พบว่าสารที่สภาวะกรดสามารถให้โปรตอนกับสารอื่นๆ ได้ และประจุลบในสภาวะที่เป็นด่าง พบว่าสารที่สภาวะด่างสามารถรับโปรตอนจากสารอื่นได้ ดังภาพประกอบ 4-5



ภาพประกอบ 4 โครงสร้างทางเคมีของเส้นใยขนสัตว์



ภาพประกอบ 5 สมบัติ Amphoteric ของเส้นใยโปรตีน

1.3 รังไหมเสีย (Cocoon waste)

รังไหมเป็นวัตถุดิบที่มีความสำคัญต่อการผลิตเส้นไหม จึงควรมีการคัดแยกรัง โดยคัดแยกรังที่คุณภาพไม่ดีออกก่อนสาวไหม และแยกระหว่างรังดีและรังเสีย ทำการจัดเก็บแยกกันอย่างชัดเจน เพื่อพิจารณาแบ่งออกเป็น

1.3.1 รังไหมคุณภาพดี หรือ รังดี (Normal cocoons) ได้แก่ รังที่สาวออกง่าย รังมีความหนาและรูปร่างค่อนข้างสม่ำเสมอ และมีปริมาณเส้นใยสูง ส่วนรังไหมที่คุณภาพไม่ดี ได้แก่ รังที่สาวเส้นนอกยาก หรือเส้นขาดหลุดง่ายระหว่างสาว ซึ่งจะเป็นอุปสรรคในการสาวไหม มีผลทำให้เส้นไหมที่สาวได้มักมีปม เส้นรวมตัวไม่ดีมากกว่าที่ควร ส่งผลต่อคุณภาพเส้นไหม

1.3.2 รังที่ไม่สมบูรณ์ (Abnormal cocoons) รังที่ไม่สมบูรณ์มีได้หลายลักษณะ บางลักษณะไม่สามารถนำมาสาวเป็นเส้นได้ ขณะที่บางลักษณะสามารถสาวเป็นเส้นได้ แต่ไม่สามารถสาวรวมกับรังดีได้ ดังนั้นจึงเรียกรังเหล่านี้ว่า “รังเสีย หรือ รังบกพร่อง” ลักษณะรังไหมเสียที่ควรคัดออก ทั้งสิ้น 11 ลักษณะ ได้แก่

1. รังเปื้อนภายนอก (Outer soiled cocoon)

เกิดจากการที่หนอนไหมขับถ่ายปัสสาวะและมูลครั้งสุดท้ายก่อนทำรัง ทำให้เปื้อนรังไหมขณะที่อยู่ในจ่อเดียวกัน บางครั้งอาจเกิดจากการจับหนอนไหมที่อ่อนแอเข้าจ่อ การสาวไหมจากรังประเภทนี้ทำให้เส้นไหมคุณภาพไม่ดี กรณีรังไหมเปื้อนส่วนนอกสุดเพียงเล็กน้อยอาจมีผลกระทบต่อเส้นไหมไม่มาก แต่ถ้าสารขับถ่ายซึมเปื้อนมากหรือเป็นเวลานาน จะทำให้สาวดึงเส้นยาก รังและเส้นไหมเปื้อยและง่ายขณะต้มสาวไหม เนื่องจากสารขับถ่ายจากหนอนไหมมีฤทธิ์เป็นด่าง ดังภาพประกอบ 6



ภาพประกอบ 6 รังเปื้อนภายนอก

2. รังเปื้อนภายใน (Inner soiled cocoon)

เกิดจากหนอนไหมตายขณะทำรัง หรือตายหลังจากทำรังเสร็จ ทำให้รังไหมมีความหนาของเปลือกน้อยกว่ารังปกติ ของเหลวจากหนอนไหมและดักแด้ที่ตายเปื้อนติดภายในรัง มีสีน้ำตาลถึงน้ำตาลเข้มเกือบดำ นอกจากมีผลให้เส้นไหมที่สาวได้มีสีคล้ำดำ สกปรกแล้ว ยังมีผลต่อโปรตีนไหม ดังนั้นเมื่อนำรังไหมประเภทนี้ไปต้มสาวเส้น ทำให้สาวออกยาก เส้นไหมรวมตัวไม่ดี เกิดห้วงและมีเศษไหมมาก นอกจากนี้ความเหนียวและความยืดหยุ่น (การยืดตัว) ของเส้นไหมลดลงด้วย ดังภาพประกอบ 7



ภาพประกอบ 7 รังเปื้อนภายใน

3. รังบาง (Thin shell cocoon)

เกิดจากหนอนไหมเป็นโรคหรืออ่อนแอทำให้ทำรังได้ไม่สมบูรณ์ ลักษณะรังบางมักพบร่วมกับการที่หนอนไหมไม่สามารถพัฒนาเป็นดักแด้สมบูรณ์และเกิดรังเปื้อนภายในได้ด้วย อีกสาเหตุหนึ่งของการเกิดรังบางคือคุณภาพคือ การจับไหมเข้าจ่อช้าเกินไป หนอนไหมเริ่มพันใยไปแล้วจนเหลือปริมาณสารไหมน้อยเมื่อจับเข้าจ่อจึงสร้างรังได้บาง รังที่บางมีผลทำให้สาวเส้นไหมได้น้อย และเมื่อนำมาต้มสาวไหมร่วมกับรังปกติ รังบางจะนิ่มและละเอียดกว่าจึงเป็นอุปสรรคในการสาวไหม ดังภาพประกอบ 8



ภาพประกอบ 8 รังบาง

4. รังติดข้างจ่อ (Frame printed cocoon)

เกิดจากการใช้จ่อไม่เหมาะสม มีพื้นที่ในการทำรังแคบ หรือ จับหนอนไหมใส่จ่อมากเกินไป ทำให้รังเบียดกัน กาวเซริซินจึงก่ดทับติดกัน หรือติดกับข้างจ่อ กระดาษรองจ่อ การที่รังไหมมีส่วนใดส่วนหนึ่งของเส้นไหมแห้งแข็งเนื่องจากการเบียดทับกัน ทำให้สาวเส้นไหมออกได้ไม่ดีเมื่อเทียบกับรังปกติ จึงเป็นอุปสรรคในการสาวไหม ดังภาพประกอบ 9



ภาพประกอบ 9 รังติดข้างจ่อ

5. รังผิดรูปร่าง (Malformed cocoon หรือ deformed cocoon)

เกิดจากหนอนไหมอ่อนแอทำรังได้ไม่สมบูรณ์ ทำให้รังไหมที่มีรูปร่างบิดเบี้ยวไม่สมส่วน ลักษณะไม่ตรงตามพันธุ์ อาจเนื่องมาจากลักษณะจ่อที่ไม่เหมาะสม หรืออาจเป็นลักษณะประจำของพันธุ์ไหม เมื่อนำรังผิดรูปร่างไปต้มสาวไหม รังมักจะสุกอ่อนตัวไม่สม่ำเสมอ และไม่พร้อมกับรังปกติที่สาวรวมกัน อย่างไรก็ดี รังผิดรูปร่างมีผลกระทบต่อการสาวไหมและคุณภาพเส้นน้อยกว่าการสาวจากรังติดข้างจ่อ ดังภาพประกอบ 10



ภาพประกอบ 10 รังผิดรูปร่าง

6. รังบางหัวท้าย (Thin end cocoon)

เกิดจากอุณหภูมิและความชื้นไม่เหมาะสมในช่วงเลี้ยงไหม เช่น อากาศเย็นเกินไประหว่างหนอนไหมทำรัง หรืออาจเป็นลักษณะประจำของพันธุ์ไหม เมื่อนำรังบางหัวท้ายมาสาวไหมมักพบปัญหาคือ ส่วนหัวท้ายของรังที่บางจะนิ่มและเร็วกว่าส่วนอื่นๆ เส้นไหมมักจะขาดหลุด ทำให้สาวยากและได้เส้นไหมไม่เรียบ ดังภาพประกอบ 11



ภาพประกอบ 11 รังบางหัวท้าย

7. รังหลวม (Loose shell cocoon) หรือ รังหลวมฟู (Flossy cocoon)

เกิดจากสภาพแวดล้อมระหว่างทำรังไม่เหมาะสม ส่วนใหญ่เป็นเพราะอุณหภูมิสูงและแห้ง หรืออุณหภูมิและความชื้นเปลี่ยนแปลงกะทันหันเป็นช่วงๆ รังใหม่มีลักษณะเปลือกรังหลวมและมีหลายชั้น หรือรังหลวม รังเหล่านี้เมื่อสัมผัสจะมีลักษณะเนื้อรังฟู นิ่มผิดปกติ เมื่อผ่าดูอาจพบมีเปลือกรังหลายชั้นไม่ติดกัน (Double layer cocoon) นอกจากนี้อาจเป็นลักษณะพันธุ์ใหม่ก็ได้ เมื่อนำรังหลวมไปต้มสาวไหม พบว่า รังนิ่มและได้ง่าย และเส้นไหมักขาดหลุดบ่อยๆ จากการที่เปลือกรังไหมแยกเป็นชั้นๆ ดังภาพประกอบ 12



ภาพประกอบ 12 รังหลวม

8. รังแฝด (Double cocoon)

เกิดจากหนอนไหมตั้งแต่ 2 ตัวทำรังร่วมกัน อาจเนื่องจากลักษณะประจำพันธุ์ หรือเกิดจากลักษณะจ่อไม่เหมาะสม จ่อไม่เพียงพอ หรืออาจเกิดจากการจับหนอนไหมเข้าจ่อมากเกินไป การสาวรังแฝด จะสาวออกยากเส้นไหมติดและขาดหลุดง่าย เพราะเส้นไหมจากหนึ่งรังเกิดจากเส้นไหมได้มากกว่าหนึ่งเส้นพันเกี่ยวเนื่องกัน ดังภาพประกอบ 13



ภาพประกอบ 13 รังแฝด

9. รังเจาะ (Pierced cocoon)

รังเจาะ เป็นรังเสียโดยแท้จริง เพราะรังไหมเป็นรู จึงเท่ากับเส้นไหมถูกตัดให้ขาดทั้งเส้น เวลานำไปสาวเส้นจึงขาดบ่อยๆ เป็นช่วงๆ ทุกครั้งที่ดึงผ่านรอยขาด รังที่ถูกเจาะเป็นรู มักเกิดจากการกัดเจาะรังของแมลงวันลาย (Tachnia flies) ซึ่งเข้าวางไข่ตั้งแต่ระยะห่อนไหม มดเจาะรัง หรืออาจเกิดจากผีเสื้อไหมเองก็ได้ ดังนั้นรังประเภทนี้เป็นรังที่สาวไม่ได้ (Impossible in reeling) ดังภาพประกอบ 14



ภาพประกอบ 14 รังเจาะ

10. รังขึ้นรา (Moldy cocoon)

เกิดจากการเก็บรังไหมไม่เหมาะสม รังไหมสดที่เก็บรวมกันในที่ที่อากาศถ่ายเทไม่ดี หรืออาจเกิดจากการควบคุมความชื้นในห้องเก็บรังไหมไม่ดีพอ จนสะสมความร้อนมากเกินไปทำให้เชื้อราเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ราก็จะทำให้เส้นไหมเสื่อมคุณภาพ ความยืดตัว (Elongation) ถ้านำรังขึ้นราไปสาวเส้น เส้นขาดหลุดง่าย เส้นไหมไม่เรียบ สีซีดและดูสกปรก ความเหนียวและการยืดตัวลดลง ดังภาพประกอบ 15



ภาพประกอบที่ 15 รังขึ้นรา

ที่มา: กรมหม่อนไหม. การจัดการความรู้กรมหม่อนไหม [อินเทอร์เน็ต]. กรุงเทพฯ: [เข้าถึงเมื่อ 3 มิ.ย.2558]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.qsds.go.th/KMweb/knowledge/knowledge21.html>

11. รังบุบ (Crashed cocoon)

เกิดจากการกดทับในขณะที่ขนส่ง ทำให้เกิดการกระทบกระแทก โดยพบว่าเกิดจากใช้บรรจุภัณฑ์ที่ไม่เหมาะต่อการขนส่ง รวมทั้งการขนส่งรังสดเป็นระยะทางไกลใช้เวลาขนส่งนาน ความร้อนชื้นที่สะสมภายในกองรังไหม ทำให้รังนิ่มและถูกกดทับบุบได้ง่าย การกดทับที่รุนแรงทำให้เส้นใยหักแตกได้ ดังนั้นเมื่อนำรังประเภทนี้ไปสาวจะเกิดการขาดได้บ่อยๆ บริเวณที่รังบุบ⁽²⁵⁻²⁶⁾ ภาพประกอบ

16



ภาพประกอบ 16 รังบุบ

1.4 วิธีการลอกกาวยไหม (Silk degumming)



การลอกกาวยไหมมีกระบวนการลอกกาวยไหมดังภาพประกอบ 17 โดยการลอกกาวยไหมเป็นการขจัดกาวยไหมและสิ่งสกปรกออกจากเส้นไหม ไหมแต่ละพันธุ์จะมีปริมาณของกาวยไหมไม่เท่ากัน และการลอกกาวยไหมมีหลายวิธี แตกต่างกันไป นอกจากนี้ขึ้นอยู่กับพันธุ์ไหม รูปแบบของไหมก่อนการลอกก็ส่งผลต่อการลอก เช่น ไหมเป็นเส้นหรือเป็นผ้าฝืน โดยเลือกใช้ได้ทั้ง วิธีทางกายภาพหรือทางเคมี ซึ่งจะใช้วิธีใดก็ตาม จะต้องทำด้วยความระมัดระวังอย่างมาก เพื่อไม่ให้เส้นไหมเสียหาย วิธีที่นิยมใช้ ได้แก่

1. การลอกกาวยไหมภายใต้ความดันสูงและอุณหภูมิสูง (High pressure high temperature degumming) สามารถใช้น้ำได้ที่อุณหภูมิ 120-121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30-60 นาที การต้มไหมในน้ำเป็นเวลานานๆ จะทำให้เส้นไหมเกิดการเสื่อมสลายและไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) อย่างช้าๆ ในกรณีนี้หากใช้อุปกรณ์ความดันสูงจะทำให้เส้นไหมเสื่อมสลายหรือถูกทำลายน้อยที่สุด

2. การลอกกาวยไหมด้วยด่าง (Alkaline degumming) ในการลอกกาวยไหมด้วยสารละลายต่าง เช่น โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ยูเรีย (Urea) โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โดยต้องคำนึงถึงค่าความเป็นกรด-ด่าง และอุณหภูมิ หากลอกกาวย

ไหมด้วยสารละลายต่างที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง มากกว่า 9 กาวไหมจะถูกกำจัดออก อย่างรวดเร็ว และสมบูรณ์ หลังจากทำการลอกกาวเพียง 30 นาที อุณหภูมิที่ใช้ไม่ควรเกิน 90 องศาเซลเซียส เพื่อหลีกเลี่ยงไม่ให้เส้นไหมเปื่อย และค่าความเป็นกรด-ด่างของด่างลอกกาวก็จะมีผลต่อระดับการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของเส้นใยไฟโบรอินด้วย

3. การลอกกาวไหมด้วยกรด (Acid degumming) ในการลอกกาวไหมด้วยสารละลายกรดที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง น้อยกว่า 2.5 หรือระหว่าง 1.5-2 กาวไหมจะถูกกำจัดออกได้อย่างมีประสิทธิภาพ กรดที่นิยมนำมาใช้ได้แก่ กรดแร่ (Mineral acids) เช่น กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) กรดไฮโดรคลอริก (HCl) และกรดอินทรีย์ (Organic acids) โดยพบว่ากรดแร่จะมีประสิทธิภาพในการลอกกาวไหมมากกว่ากรดอินทรีย์ และอีกหนึ่งเหตุผลที่มีผลต่อระดับการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของเส้นใยไฟโบรอินคือ ค่าความเป็นกรด-ด่างของอ่างลอกกาว

4. การลอกกาวไหมด้วยสบู่ (Soap degumming) การลอกกาวไหมด้วยสบู่ต้องทำด้วยความระมัดระวังโดยต้มสารละลายสบู่และควบคุม ค่าความเป็นกรด-ด่าง ให้เป็นด่างน้อยๆ เท่านั้น เพื่อหลีกเลี่ยงไม่ให้เส้นไหมถูกทำลาย วิธีนี้จะต้มสารละลายสบู่ที่อุณหภูมิ 90-100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30-120 นาที น้ำที่ใช้ก็ควรเป็นน้ำอ่อนหรืออาจมีการเติมสารลดความกระด้างของน้ำ (Sequestering agent) เพื่อลดความกระด้างของน้ำ ทั้งนี้เพื่อให้สบู่ตกค้างและเปื้อนติดอยู่ในเส้นไหม

5. การลอกกาวไหมด้วยสารซักฟอกสังเคราะห์ (Synthetic detergent degumming) สารซักฟอกสังเคราะห์ได้ถูกนำมาใช้ลอกกาวไหมแทนการใช้สบู่มากขึ้นเนื่องจากสบู่มีข้อด้อยหลายประการ เช่น มีราคาแพง ต้องใช้ปริมาณสูง และเวลาลอกกาวนานถึง 60-120 นาที และอีกเหตุผลหนึ่งคือหากลอกกาวไหมด้วยสบู่โดยใช้เครื่องจักรแบบต่อเนื่อง (Continuous machine) สบู่จะไม่สามารถขจัดเศษหรือลดความเป็นกรดของผลผลิตที่เกิดจากการไฮโดรไลซิสกาวไหม (Sericin hydrolysis products) ที่สะสมอยู่ในอ่างลอกกาวไหมได้เหมือนสารซักฟอกสังเคราะห์ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดกาวไหมไม่ดี การลอกกาวไหมด้วยสารซักฟอกสังเคราะห์แทนการใช้สบู่จะลดการขึ้นขนของไหม (Silk lice, Pilling) อีกด้วย

6. การลอกกาวไหมด้วยเอนไซม์ (Enzymatic degumming) เทคโนโลยีชีวภาพที่ก้าวหน้าอย่างรวดเร็วทำให้เราสามารถผลิตเอนไซม์ที่หลากหลายประเภท และสมบัติที่ถูกปรับปรุงให้เหมาะสมกับการใช้งานประกอบกับเอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่มีความจำเพาะต่อเส้นใยหรือ substrate ทำให้ไม่เป็นอันตรายต่อเส้นใย ภาวะที่ใช้ก็ไม่รุนแรง สามารถนำมาใช้ในการลอกกาวไหมแทนสารเคมี ปริมาณที่ใช้ไม่สูงมากนัก สามารถประหยัดน้ำและพลังงาน ที่สำคัญสามารถตอบสนองต่อความต้องการในปัจจุบันที่ต้องการกระบวนการที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมจึงทำให้เอนไซม์เป็นทางเลือกหนึ่งที่มีก่นำมาศึกษาหรือใช้ในกระบวนการสิ่งทอ⁽²⁶⁻³¹⁾

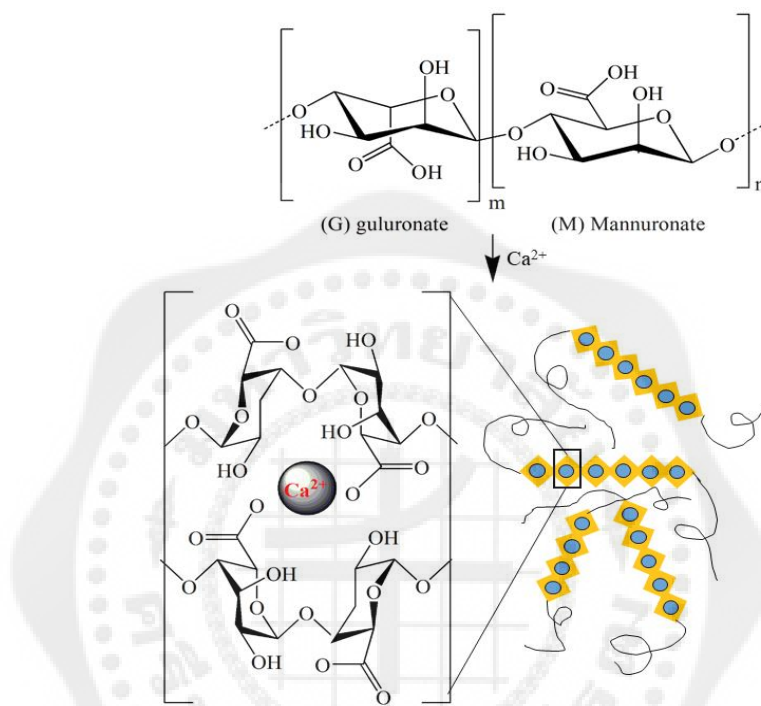
2. แอลจีเนต (Alginate)

แอลจีเนต (Alginate) หรือแอลจिन (Algin); กรดแอลจินิก (Alginic acid) เป็นสารสกัดได้จากสาหร่ายทะเลสีน้ำตาล (Phaeophyceae) ได้แก่ *macrocystis pyrifera* มีแอลจีเนตร้อยละ 14-19 ส่วน *luminaria cloustoni* และ *laminaria digitata* มีแอลจีเนตร้อยละ 15-40 ปริมาณที่พบจะขึ้นกับชนิดของสาหร่าย ฤดูกาล และแหล่งที่สาหร่ายเจริญเติบโต สาหร่ายเหล่านี้พบได้ทั่วไป และประเทศที่ผลิตแอลจีเนตมากที่สุด ได้แก่ อเมริกา อังกฤษ ฝรั่งเศส สเปน นอร์เวย์ แคนาดา และญี่ปุ่น แอลจีเนตเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ชนิดประจุลบ (Anionic polysaccharide) มีสูตรโมเลกุลคือ $(C_6H_8O_6)_n$ เป็นพอลิแซ็กคาไรด์สายตรงคล้ายแป้ง (Starch) และเซลลูโลสไม่มีหน่วยย่อยซ้ำๆ กัน ซึ่งสมบัตินี้ทำให้แอลจีเนตแตกต่างจากพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ พบแอลจีเนตแพร่กระจายในผนังเซลล์และช่องว่างระหว่างเซลล์ของสาหร่ายสีน้ำตาล โมเลกุลของแอลจีเนตทำให้พืชมีความยืดหยุ่นและความแข็งแรง ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการเจริญของพืชในทะเล แอลจีเนตถูกจัดอยู่ในชนิดไฮโดรคอลลอยด์ที่ได้มาจากธรรมชาติโดยไฮโดรคอลลอยด์ (Hydrocolloids) คือ พอลิเมอร์ชนิดชอบน้ำ (Hydrophilic) ที่ได้จากพืช สัตว์ จุลินทรีย์ โดยทั่วไปน้ำหนักโมเลกุลสูง ที่โมเลกุลประกอบไปด้วย หมู่ฟังก์ชัน (Functional groups) ของหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) หมู่คาร์บอกซิล (-COOH) จำนวนมาก และพอลิอิเล็กโทรไลต์ (Polyelectrolyte) อื่นๆ และแสดงหน้าที่ที่สำคัญในอาหาร เช่น เป็นสารให้ความหนืด ทำให้เกิดเจล เป็นอิมัลซิไฟเออร์ (Emulsifier) และเป็นสารที่ทำให้เกิดความคงตัวได้

แอลจีเนตมีโครงสร้างทางเคมีเป็นพอลิเมอร์ของสายโซ่พอลิแซ็กคาไรด์สายตรงแบบ Linear binary copolymer ประกอบด้วยกรดยูโรนิก (Uronic acid) เปลี่ยนไปเป็นเกลือในรูปของ β -D-manuronic acid (M) และ α -L-guluronic acid (G) โดยมีมอนอเมอร์เหล่านี้อาจมีการจัดเรียงโครงสร้างในบล็อก (Block) ของโฮโมพอลิเมอร์ (Homopolymeric regions) ของ G และ M ที่เรียกว่า G- และ M-blocks ตามลำดับ และยังมีบางส่วนของโมเลกุลเป็น MG-blocks⁽³²⁻³⁴⁾

ดั่งภาพประกอบ 18

โพแทสเซียม (K^+) โซเดียม (Na^+) แอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) และยังมีผลในรูปแบบของโพรพิลีนไกลคอล แอลจีเนต (Propylene glycol alginate) ซึ่งได้จากปฏิกิริยาของแอลจีเนตกับโพรพิลีนออกไซด์ (Propylene oxide) ภายใต้ความดัน อนุพันธ์เหล่านี้จะละลายได้ทั้งในน้ำร้อนและน้ำเย็น ความหนืดของสารละลายแอลจีเนตที่ได้ขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิ ความเข้มข้น น้ำหนักโมเลกุล และการมีโลหะประจุบวก (33-35)



ภาพประกอบ 19 กลไกการเกิดเจลของแอลจีเนต (Egg-box model)

ที่มา: Bruchet M, Melman A. Fabrication of patterned calcium cross-linked alginate hydrogel films and coatings through reductive cation exchange. Carbo. Polym. 2015;131:57-64.

2.2 ประโยชน์ของแอลจีเนต

เติมแอลจีเนตเป็นสารเติมแต่งในอาหาร (Food additive) มีความนิยมในการนำมาใช้ในอุตสาหกรรม พบว่าในปัจจุบันนี้มีการใช้แอลจีเนตมากขึ้นเนื่องจากความสามารถในการอุ้มน้ำ มีสมบัติการเกิดเจล เป็นสารให้ความหนืด และสารรักษาเสถียรภาพ (คงตัว) แอลจีเนตมีประโยชน์อย่างมากในทางการแพทย์ เช่น วัสดุทำแผลที่ใช้ในการผ่าตัดและการรักษาบาดแผล ผ้าปิดแผล พบว่าแอลจีเนตมีลักษณะที่เฉพาะ คือความเข้ากันได้ทางชีวภาพอย่างดีเลิศ เช่น ใช้ในการตรึงเซลล์ และเอนไซม์ ใช้ทางด้านชีวโมเลกุล Antibody และ Immunoisolated transplantation และมีการ

นำไปประยุกต์ใช้อื่นๆ เช่น เม็ดเจลแอลกอฮอล์ใช้เคลือบวัสดุอื่นๆ เช่น ใคโตะซาน เพื่อเพิ่มความแข็งแรงเชิงกล เม็ดเจลแอลกอฮอล์ในด้านเทคโนโลยีชีวภาพสำหรับห่อหุ้มเซลล์หรือสารเร่งปฏิกิริยาทางชีวภาพ (Biocatalyst)⁽³⁴⁾

3. สีย้อม (Dye)

สีย้อม (Dye) คือ สารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ ที่มีลักษณะเป็นผลึกหรือผงละเอียด สีย้อมบางชนิดละลายน้ำได้ บางชนิดละลายน้ำไม่ได้แต่สามารถละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ การย้อมสี (Dyeing) สามารถทำในสิ่งทอได้ทุกสภาพตั้งแต่ เส้นใย เส้นด้าย ผ้าฝ้าย หรือย้อมหลังจากตัดเป็นเสื้อผ้าแล้ว การย้อมเส้นใย เส้นด้าย โดยปกติจะย้อมผลิตภัณฑ์ที่มีสีหลายๆสี หรือผ้าแฟนซี เมื่อนำสีย้อมไปใช้ในกระบวนการย้อมจะทำให้โมเลกุลของสีย้อมซึมผ่านเข้าไปในโมเลกุลของเส้นใย โดยจะทำลายโครงสร้างผลึกของวัตถุนั้นชั่วคราว ซึ่งอาจเกิดพันธะไอออนิก (Ionic bond) หรือพันธะโควาเลนต์ (Covalent bond) กับวัตถุที่ต้องการย้อมโดยตรง

การมองเห็นสีบนวัสดุ เกิดจากโมเลกุลของสีบนวัสดุนั้นมีความสามารถในการดูดกลืนพลังงานในช่วงสเปกตรัมที่แตกต่างกัน ทำให้พลังงานแสงที่มนุษย์มองเห็นแตกต่างกัน โดยพบว่าแสงที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า (Visible light) จะมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 400–700 นาโนเมตร สีย้อมที่มีโครงสร้างทางโมเลกุลต่างกันจะมีความสามารถในการดูดกลืนพลังงานแสงในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ กันไป ส่วนวิธีการย้อมสามารถแบ่งได้เป็น การย้อมแบบแช่ (Exhaust dyeing) และการย้อมแบบต่อเนื่อง (Continuous dyeing) คำว่า การดูดซับ (Exhaustion) จึงใช้ในระดัของการส่งถ่ายสีจากอ่างย้อมไปสู่เส้นใย ซึ่งจะแสดงในรูปของอัตราส่วนของสีหรือสารที่ถูกดูดซับโดยวัสดุ เทียบกับปริมาณสีหรือสารที่มีอยู่เดิม

ทั้งนี้เราสามารถแบ่งสีย้อมตามแหล่งกำเนิดได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

1. สีย้อมที่กำเนิดจากธรรมชาติ (Natural dye) เป็นสีย้อมที่มาจากแหล่งธรรมชาติ โดยเฉพาะพืชและสัตว์ สีย้อมที่มาจากส่วนประกอบพืช เช่น ส่วนลำต้น ส่วนดอก ส่วนที่เป็นเปลือก ส่วนที่เป็นใบ เป็นต้น ตัวอย่างเช่น สีดำจากลูกมะเกลือ สีน้ำเงินจากต้นคราม สีเหลืองจากเนื้อไม้ไผ่ สีแดงจากดอกกรรณิการ์ สีแดงจากรากต้นเข็ม ส่วนสีย้อมที่มาจากสัตว์ เช่น สีม่วงแดงของครั่ง สีม่วงจากหอยสังข์หนาม เป็นต้น

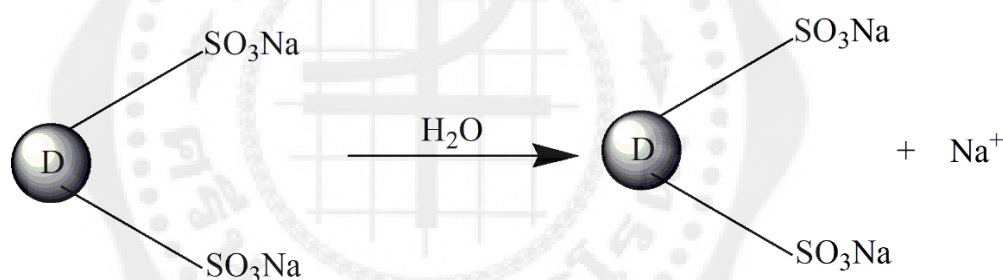
2. สีย้อมที่มนุษย์สังเคราะห์ขึ้น (Synthetic dye) เป็นสีย้อมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการทางเคมี เช่น สีแอซิด (Acid dye) สีไคโรเรกท์ (Direct dye) สีเบสิค (Basic or cationic dye) สีดีสเพิร์ส (Disperse dye) สีรีแอกทีฟ (Reactive dye) สีอะโซอิก (Azoic dye) สีแว็ต (Vat dye) สีมอร์แดนท์ (Mordant or chrome dye) สีอินเกรน (Ingrain dye) สีออกซิเดชัน (Oxidation dye) และสีซัลเฟอร์ (Sulfer dye)⁽³⁶⁾

3.1 ชนิดของสีย้อม

สีที่ใช้กับสิ่งทอแบ่งได้เป็น สีย้อมและสีฟิสิกเมนต์ สีฟิสิกเมนต์จะไม่ละลายน้ำ ดังนั้นจึงไม่ใช้ในการย้อมสิ่งทอแต่จะใช้ในการพิมพ์สิ่งทอ สีย้อมโดยเริ่มต้นสกัดมาจากวัตถุดิบธรรมชาติ เช่น พืชผัก แร่ธาตุ ส่วนสีย้อมชนิดใหม่จะมาจากการสังเคราะห์ สีย้อมสามารถจัดแบ่งได้หลายวิธี โดยในที่นี้จะกล่าวถึง การแบ่งตามพฤติกรรมทางประจุ การแบ่งตามโครงสร้างทางเคมีและการแบ่งตามวิธีการใช้งาน

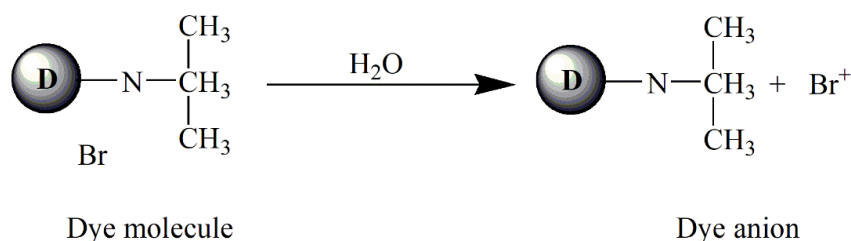
3.1.1 การแบ่งตามพฤติกรรมทางประจุ

โมเลกุลของสีย้อมจะถูกออกแบบมาให้ละลายน้ำได้ ดังนั้น น้ำจึงใช้เป็นตัวกลางในการย้อม เพื่อให้สีย้อมแพร่จากน้ำย้อมเข้าสู่เส้นใย สีย้อมแต่ละชนิดจะมีโครงสร้างที่ช่วยในการละลายน้ำ คือ จะมีหมู่ฟังก์ชันที่แตกตัวเป็นประจุในน้ำ โดยอาจเป็นประจุบวก หรือประจุลบ หมู่ฟังก์ชันที่ช่วยในการละลายน้ำและเกิดเป็นประจุลบเกาะติดกับสี ได้แก่ โซเดียมคาร์บอกซิเลต (Sodium carboxylate: $-\text{COONa}$) หรือ โซเดียมซัลเฟต (Sodium sulphate: $-\text{SO}_3\text{Na}$) โดย D แสดงโมเลกุลของสี



ภาพประกอบ 20 สีย้อมที่มีประจุลบ

ส่วนเอมีนมีหมู่ฟังก์ชันโดยเป็นหมู่แทนที่ 4 หมู่ เรียกว่า (Quaternary ammonium: $-\text{N}^+\text{R}_3$) เมื่อสร้างพันธะกับหมู่ฮาโลเจน (Cl, Br) จะเกิดเป็นหมู่ที่ช่วยในการละลายของสีย้อม โดยจะมีประจุบวก



Dye molecule

Dye anion

ภาพประกอบ 21 สีย้อมที่มีประจุบวก

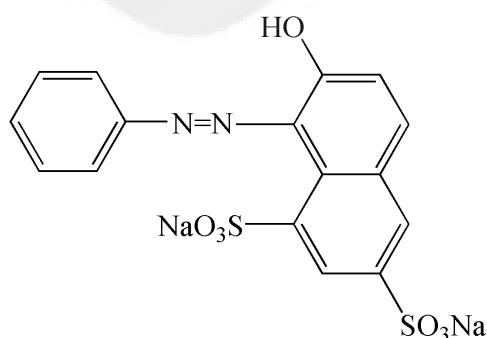
ดังนั้น สีย้อมที่มีประจุหลังจากการแตกตัวในน้ำ จะแบ่งได้เป็นสีย้อมที่มีประจุบวกและสีย้อมที่มีประจุลบ ส่วนสีย้อมอีกชนิดหนึ่งที่ไม่แสดงการมีประจุ จะเรียกว่า สีย้อมที่ไม่มีประจุ (Non-ionic dyes) ซึ่งรวมถึงสีย้อมที่รู้จักกันดี เช่น สีย้อมกระจาย (Disperse dyes) ในโครงสร้างของสีย้อมชนิดนี้จะไม่มีส่วนฟังก์ชันที่แตกตัวในน้ำ โดยจะมีหมู่ฟังก์ชันอื่นช่วยในการละลายน้ำ เช่น ไฮดรอกซิล (Hydroxyl: -OH) หรือ อะมิโน (Amino: -NH₂) ซึ่งอาจมีข้อจำกัดในการละลายน้ำแต่ก็เพียงพอในการช่วยละลายของสีย้อมที่ไม่มีประจุ เพราะสีย้อมชนิดนี้จะมีขนาดโครงสร้างเล็ก

3.1.2 การแบ่งตามโครงสร้างเคมี

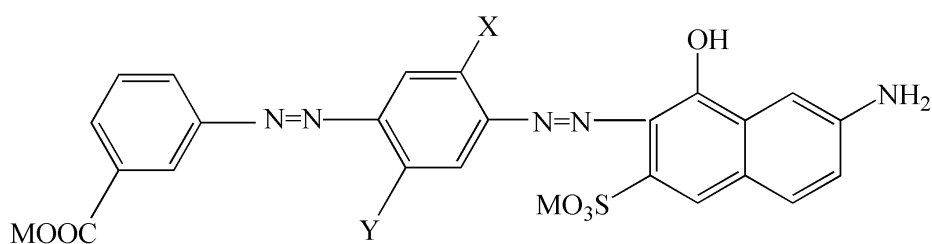
โครงสร้างของสารเคมีต้องประกอบด้วยกลุ่มโครโมฟอร์ (Chromophores) อย่างน้อยจำนวน 1 หรือ 2 กลุ่ม และอาจมีกลุ่มออกโซโครม (Auxochromes) ร่วมด้วย เช่น (Chlorine: -Cl), (Hydroxyl: -OH), (Amino group: -NH₂), -NHR และ สารประกอบไฮโดรคาร์บอน (-CH₃) เป็นต้น กลุ่มออกโซโครมนี้จะช่วยในเรื่องเจดสีและความเข้มของสี โมเลกุลที่ประกอบด้วยกลุ่มออกโซโครมอย่างเดียวจะไม่ปรากฏสีที่เข้ม กลุ่มโครโมฟอร์จะเป็นกลุ่มที่สำคัญในโครงสร้างของสี และเป็นตัวแบ่งประเภทของสีตามโครงสร้างทางเคมี ในที่นี้จะกล่าวถึงประเภทของสีที่พบบ่อยๆ เพียง 4 ชนิดแรกเท่านั้น

1. สีย้อมอะโซ (Azo dyes)

สีย้อมอะโซ ประกอบด้วยกลุ่ม -N=N- ซึ่งเป็นส่วนโครโมฟอร์ที่ให้สี สีประเภทนี้จะพบบ่อยกว่าครึ่งหนึ่งของสีย้อมที่ใช้ในท้องตลาด เจดสีของสีกลุ่มนี้จะเป็นสีเหลือง ส้ม แดง ม่วง ตัวอย่างของโครงสร้างสีที่ประกอบด้วยกลุ่มอะโซ 1 กลุ่ม (Mono-azo) แสดงในภาพประกอบ 2.22 หรือ 2 กลุ่ม (Disazo) แสดงในภาพประกอบ 2.3



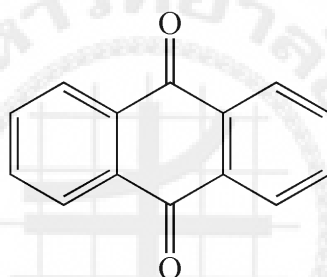
ภาพประกอบ 22 โครงสร้างของสีย้อมกลุ่ม (mono-azo) orange G (C₁₆H₁₀N₂Na₂O₇S₂)



ภาพประกอบ 23 โครงสร้างของสีย้อมกลุ่ม (disazo)

2. สีแอนทราควิโนน (Anthraquinone dyes)

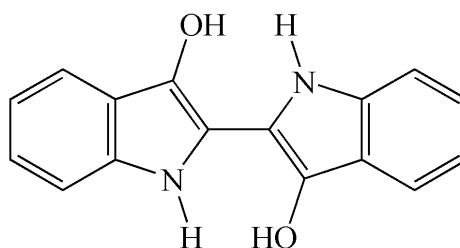
สีกลุ่มนี้จะพบมากเป็นอันดับสองรองจากสีอะโซ ซึ่งผลิตโดยปฏิกิริยาแทนที่ในโครงสร้าง 9,10 anthraquinone ซึ่งตัวมันเองไม่มีสี ตัวอย่างของสีกลุ่มนี้มีเจดสีเป็นสีน้ำเงิน แดง ม่วง น้ำเงิน และเขียว ความสว่างของสีมากกว่าสีอะโซ แต่มีราคาแพง แสดงดังภาพประกอบ 24



ภาพประกอบ 24 โครงสร้าง 9,10-anthracene dione

3. สีอินดิกอยด์ (Indigoid dyes)

สีย้อมชนิดนี้ใช้ในการย้อมผ้าฝ้ายมานานเป็นพันๆ ปีโดยให้สีน้ำเงินเดนิม โครงสร้างของสีอินดิกอยด์ สีชนิดนี้สกัดได้จากพืช แต่ในปัจจุบันผลิตได้จากการสังเคราะห์ ความคงทนของสีไม่ค่อยดี สีจะซีดลงเมื่อใช้งานไปนานๆ โทนสีจะเป็นสีน้ำเงิน น้ำเงินเขียว แสดงดังภาพประกอบ 25



ภาพประกอบ 25 โครงสร้างสีย้อมอินดิกอยด์ (Indigoid dyes)

2.3.1.3 การแบ่งตามวิธีการใช้งาน

การแบ่งตามวิธีการใช้งาน จะสะดวกสำหรับผู้ใช้งานในการจดจำประเภทของสีโดยไม่ได้ดูตามโครงสร้างทางเคมีแต่ดูตามวิธีการใช้งาน เช่น สีที่กระจายตัวในน้ำจะเรียกว่า สีดีสเพิร์ส สีที่ย้อมในน้ำย้อมที่มีสภาพเป็นกรด จะเรียกว่า สีแอซิด ส่วนสีรีแอกทีฟ จะเกิดพันธะทางเคมีที่ว่องไวในการทำปฏิกิริยากับเส้นใย เป็นต้น ชื่อของสีย้อมที่แบ่งตามการใช้งาน และชนิดของเส้นใยที่ย้อมสีได้

3.2 สีเบสิค

สีเบสิคจัดว่าเป็นสีสังเคราะห์สีแรกของโลก โดยเพอร์คิน W.H. Perkin ในปี ค.ศ. 1856 หรือ พ.ศ. 2399 สีตัวแรก คือสีม่วงสด (Mauve “โมฟ”) สีเบสิคนิยมใช้ย้อมเส้นใยไหม และเซลลูโลสแอซีเตต หลังจากนั้นในช่วงทศวรรษที่ 1950 พ.ศ.2493-2502 มีการค้นพบเส้นใยอะคริลิกและพบว่าสีเบสิคที่มีประจุบวกนั้นมีความสามารถในการย้อมเส้นใยอะคริลิกที่มีประจุลบได้ดีรวมถึงความคงทนต่อแสงและการซักล้างของการย้อมดี นอกจากนี้สีเบสิคบนเส้นใยอะคริลิกให้สีที่มีความสดใส

สีเบสิคเป็นสีที่มีประจุบวก มีความสามารถในการละลายน้ำดีมีสีสดใสเมื่อย้อมกับเส้นใยอะคริลิก ให้ช่วงของสีพบตามที่ต้องการซึ่งราคาของสีเบสิคไม่สูงนักและสีเบสิคบางตัว เป็นสีสะท้อนแสง

สีเบสิคนิยมย้อมกับเส้นใยที่มีประจุลบในน้ำพันธะไอออนิกจะเกิดขึ้นระหว่างประจุบบบนเส้นใยและประจุบวกของสี สีเบสิคในบางครั้งอาจเรียกว่า "สีแคทไอออนิก (Cationic dyes)" เนื่องจากมีประจุเป็นบวก มีความสามารถในการละลายน้ำดี สีเบสิคที่มีหมู่เป็นกรด เช่น คาร์บอกซิลิก (Carboxyl group: $-\text{COOH}$), ซัลโฟนิล (Sulfonic acid: $-\text{SO}_3\text{H}$) โดยพันธะที่เกิดขึ้น ระหว่างสีกับเส้นใยคือ พันธะไอออนิก (Ionic attraction)



ภาพประกอบ 26 สมการการย้อมเส้นใยด้วยสีเบสิค

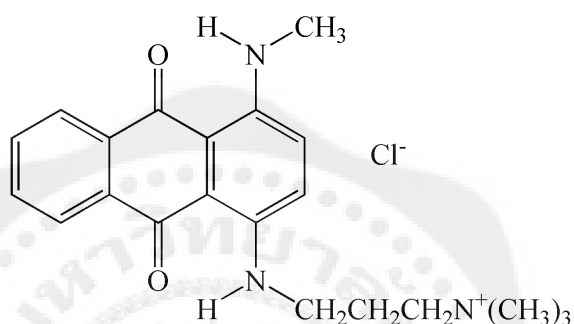
สีเบสิคจะถูกผลิตในรูปของเกลือคลอไรด์ ความทนทานของสีเบสิคไม่แน่นอน ขึ้นกับว่าใช้ย้อมเส้นใยชนิดใด กล่าวโดยทั่วไปถ้าใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนความทนทานต่อการซักและแสงของสีเบสิคจะค่อนข้างต่ำแต่ถ้าย้อมเส้นใยอะคริลิกความทนทานต่อการซักและแสง ของสีเบสิคจะอยู่ในระดับดีมาก

1. อิทธิพลที่มีผลต่อการย้อมสีเบสิค

- อิทธิพลในการเติมสารช่วยย้อม เพื่อควบคุมการย้อมให้ได้การย้อมที่มีความสม่ำเสมอ
- อิทธิพลของค่าความเป็นกรด-ด่าง ประมาณ 3.5-6.0 ในการย้อม

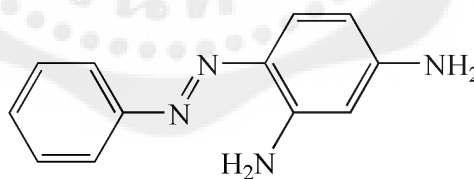
2. โครงสร้างสีเบสิค โครงสร้างของสีเบสิคแบ่งได้ 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

- กลุ่มที่มีประจุบวกอยู่ด้านข้าง นิยมเป็นอะตอมไนโตรเจน โครโมฟอร์ของสีเป็นกลุ่มอะโซ และสีแอนทราควิโนน แสดงดังภาพประกอบ 27



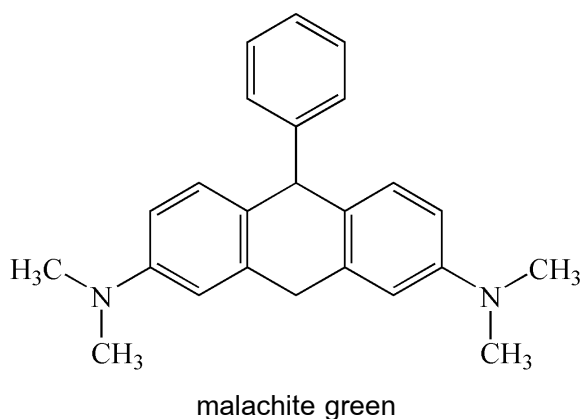
ภาพประกอบ 27 โครงสร้างของสี C.I. basic blue 22

- กลุ่มที่มีการเคลื่อนที่ของประจุบวกโดยตลอดโมเลกุล ได้แก่ สีอะโซ หรือ ไตรฟีนิลมีเทน (Triphenylmethane) สีกลุ่มนี้จะมีความเข้มและความสว่างของสีมากกว่ากลุ่มแรก แสดงดังภาพประกอบ 28



Chrysoidine yellow

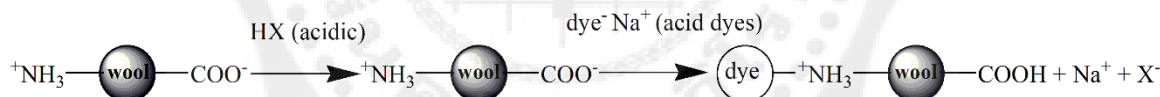
ภาพประกอบ 28 โครงสร้างของสี Chrysoidine yellow



ภาพประกอบ 29 โครงสร้างของสี Malachite green

3.3 สีแอซิด

สีแอซิดจำเป็นต้องย้อมในสภาวะกรดเท่านั้นและการเติมเกลือโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) เข้าช่วย ทำให้การกระจายของสีภายในเส้นใยเป็นไปอย่างสม่ำเสมอการเติมกรดลงไปในกระบวนการย้อมเพื่อกระตุ้น ให้สีเกิดการดูดซึมเข้าไปในเส้นใย เมื่อเส้นใยโปรตีนแสดงคุณสมบัติของประจุบวก ก็จะดึงเอาหมู่ซัลโฟเนต (Sulfonate group $-\text{SO}_3$) ของสีย้อมให้เข้าไปอยู่ใกล้ทำให้เกิดสีย้อมดูดติดกับเส้นใยได้ดังภาพประกอบ 30



ภาพประกอบ 30 สมการการย้อมเส้นใยในลอนด้วยสีแอซิด

แรงระหว่างโมเลกุลของสีแอซิดกับเส้นใยขนสัตว์นอกจากพันธะไอออนิก (Ionic attraction) แล้วยังมีแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der waals force) และพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bonding) ดังนั้นความคงทนของสีแอซิดบนเส้นใยขนสัตว์ขึ้นอยู่กับจำนวนพันธะไอออนิก และความสามารถในการเกิดพันธะไฮโดรเจนและแรงแวนเดอร์วาลส์

1. อิทธิพลที่มีผลต่อการย้อมสีแอซิด

- อิทธิพลของอัตราส่วนของน้ำย้อมต่อวัสดุย้อม (liquor ratio, L:R) อัตราส่วนของน้ำย้อมต่อวัสดุย้อม ถ้าน้ำย้อมน้อยเกินไป สีย้อมดูดซึมเข้าไปในเส้นใยไม่สม่ำเสมอ
- อิทธิพลของค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำย้อม กลุ่มสีแอซิดที่ต้องการกรดแก่ (Equaling acid) ต้องย้อมที่น้ำย้อมมีค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำมาก มีค่าประมาณ 2-3 ถ้าย้อมที่น้ำย้อมมีค่า

ความเป็นกรด-ต่างเป็นกลาง สีจะไม่ติดหรือติดจางๆ เท่านั้น ส่วนกลุ่ม สีแอซิดที่ต้องการกรดอ่อนมากหรือสภาวะค่าความเป็นกรด-ต่างเป็นกลาง (Super milling acid) สามารถควบคุมการดูดซึมของสีไว้ได้จนกระทั่งค่าความเป็นกรด-ต่าง มีค่าเท่ากับ 8

2. โครงสร้างสีแอซิด

สีแอซิดจัดเป็นสีประจุลบ โครงสร้างทางเคมีของสีแอซิดคล้ายกับสีไคเร็กซ์ คือประกอบด้วยหมู่ช่วยให้สีละลายน้ำซึ่งส่วนใหญ่เป็นหมู่ซัลเฟต (Sulfate group: SO_4^-) และส่วนให้สีละลายน้ำส่วนใหญ่เป็นหมู่ซัลเฟตและส่วนให้สีกลุ่มโครโมฟอร์ (Chromophores) สีแอซิดบางตัวมีขนาดโมเลกุลเล็กมาก ส่วนสีไคเร็กซ์มักมีโมเลกุลใหญ่เพื่อให้ยึดเหนี่ยวกับเส้นใยเซลลูโลสได้ดี

3. การจัดประเภทของสีแอซิด

เมื่อสีแอซิดมีน้ำหนักโมเลกุลมากขึ้น จะมีความสามารถในการติดสีที่เป็นประจุลบมากขึ้น จึงต้องการกรดในน้ำย้อมเพื่อให้ดูดซึมได้พอดีไม่แฉก ฉะนั้นจึงแบ่งสีแอซิดเป็น 3 กลุ่มตามปริมาณความต้องการกรดในน้ำย้อมของสีตัวนั้นๆ

กลุ่มที่ 1 สีที่ต้องการกรดแก่ (Leveling acid or equalizing acid dyes)

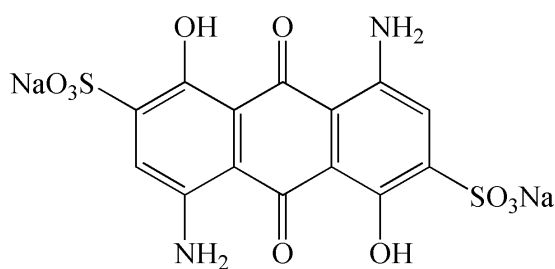
สีแอซิดเป็นสีที่ต้องการกรดแก่ที่ 2-4 ในการย้อม เช่น กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) โมเลกุลค่อนข้างเล็กสามารถละลายน้ำได้ดีการแทรกซึมของสีดี ย้อมสีได้สม่ำเสมอ มีความคงทนต่อแสงดี แต่ไม่ทนต่อการซักล้าง ตัวอย่างเช่น C.I. acid blue 45 ดังภาพประกอบ 31 ก)

กลุ่มที่ 2 สีที่ต้องการกรดปานกลาง (Milling acid dyes)

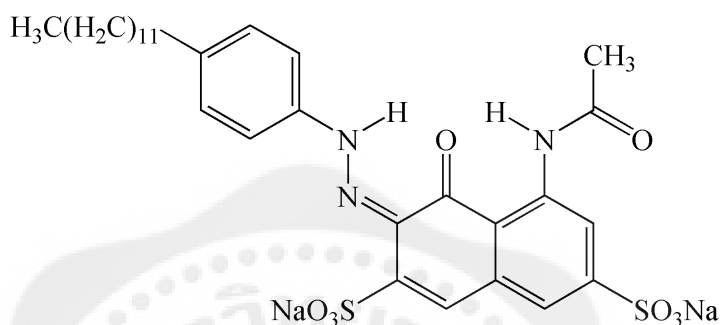
สีแอซิดเป็นสีที่ต้องการกรดปานกลางในการย้อม เช่น กรดอะซิติก (CH_3COOH) โมเลกุลสีมีขนาดใหญ่กว่ากลุ่มแรก สามารถละลายน้ำได้ดี มีความสม่ำเสมอหลังการย้อมได้ปานกลาง ความคงทนต่อการซักล้างดีขึ้น ตัวอย่างเช่น C.I. acid blue 45 ดังภาพประกอบ 31 ก)

กลุ่มที่ 3 สีที่ต้องการกรดอ่อน หรือสภาวะปานกลาง (Super milling acid dyes)

สีแอซิดเป็นสีที่ต้องการกรดอ่อนหรือสภาวะต่างอ่อนๆ ที่ค่าความเป็นกรด-ต่างเท่ากับ 6 - 8 ในการย้อม เช่น แอมโมเนียมอะซิเตด ($\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2\text{NH}_4$) หรือแอมโมเนียมซัลเฟต ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) โมเลกุลสีใหญ่กว่ากลุ่มที่ 2 สามารถละลายน้ำได้ดี ย้อมสีได้ไม่สม่ำเสมอ ความคงทนต่อการซักล้างดีเยี่ยม ตัวอย่างเช่น C.I. acid red 138⁽³⁶⁻³⁸⁾ ดังภาพประกอบ 31 ข)



ก) C.I. acid blue 45

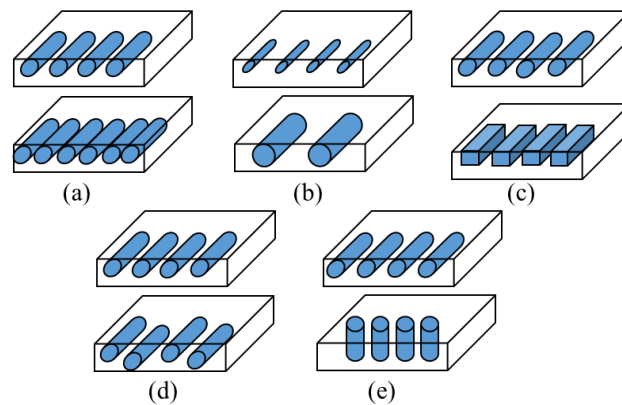


ข) C.I. acid red 138

ภาพประกอบ 31 โครงสร้างของสี C.I. acid blue 45 และ C.I. acid red 138

4. วัสดุเชิงประกอบ (Composite Materials)

วัสดุเชิงประกอบคือ การนำเอาวัสดุที่มีสมบัติแตกต่างกันตั้งแต่สองชนิดหรือมากกว่ามาผสมหรือมารวมกันและไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วทำให้สมบัติของวัสดุเชิงประกอบที่เกิดขึ้นมีสมบัติร่วมกันหรือสมบัติใหม่ที่มีคุณภาพดีกว่าหรือของวัสดุที่เป็นองค์ประกอบ มนุษย์ได้แนวความคิดของวัสดุเชิงประกอบขึ้นมา โดยองค์ประกอบของวัสดุเชิงประกอบ ได้แก่ วัสดุที่ทำหน้าที่เป็นเนื้อหลักและเป็นเฟสต่อเนื่องหรือเมตริกซ์ (Matrix phase) และวัสดุส่วนเหลือที่กระจายตัวอยู่ในเนื้อหลักของวัสดุนั้น เรียกว่า เฟสที่กระจาย (Dispersed phase) หรือสารเสริมแรง (Reinforcement) โดยเมตริกซ์จะทำหน้าที่ห่อหุ้มสารเสริมแรงและทำให้วัสดุเชิงประกอบเป็นรูปร่างขึ้น ส่วนสารเสริมแรงจะทำหน้าที่เสริมสมบัติให้เมตริกซ์และทำให้วัสดุเชิงประกอบมีสมบัติตามต้องการ โดยรูปร่างและขนาดของอนุภาค (Shape and size) การกระจายตัว (Distribution) และการเรียงตัว (Orientation) ลักษณะต่างๆ ดังภาพประกอบ 32



ภาพประกอบ 32 ภาพวาดแสดงอนุภาคของสารเสริมแรงในเนื้อหลักในรูปทรงและการวางเรียงแตกต่างกัน (a) ความเข้มข้น (b) ขนาด (c) รูปร่าง (d) การกระจาย (e) ทิศทางการเรียงตัว ซึ่งส่งผลต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ

ที่มา: William D. Callister, Jr. วัสดุศาสตร์และวิศวกรรมวัสดุพื้นฐาน. กรุงเทพฯ: ท้อป; 2548.

4.1 วิวัฒนาการของวัสดุเชิงประกอบ

วิวัฒนาการของวัสดุเชิงประกอบนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วง ได้แก่

1. วัสดุเชิงประกอบยุคแรกเริ่มนำมาใช้งาน

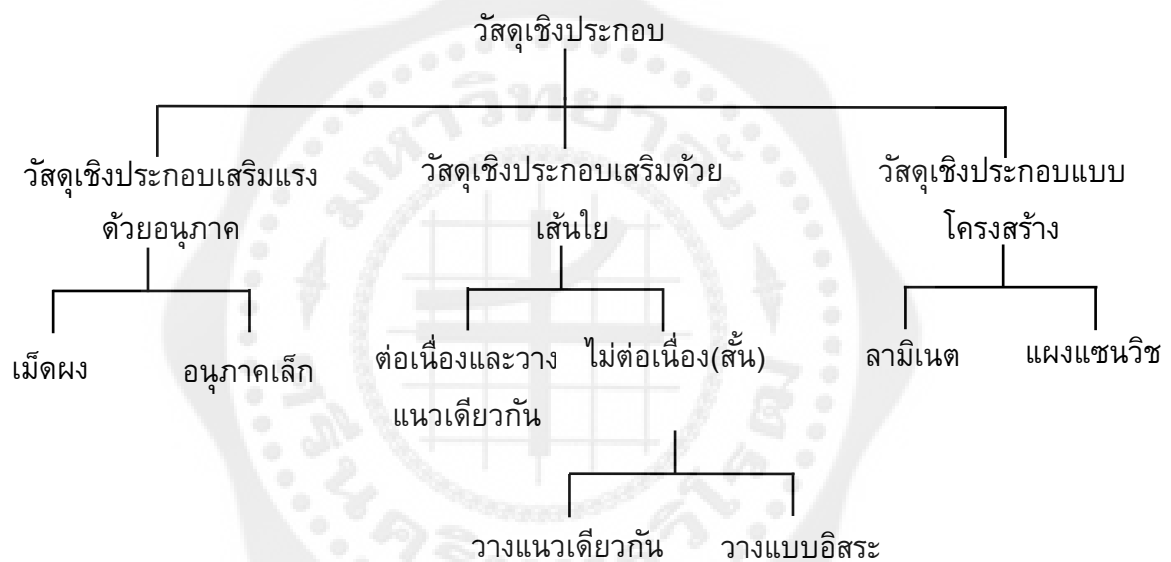
วัสดุเชิงประกอบนั้นมีมาตั้งแต่สมัยยุคก่อนประวัติศาสตร์ ซึ่งเป็นยุคที่มนุษย์เรียนรู้การใช้วัสดุเชิงประกอบในธรรมชาติ (Natural composite) ได้แก่ ไม้ (Wood) ที่ประกอบด้วยเส้นใยเซลลูโลส (Cellulose fiber) ผสมเฮมิเซลลูโลส (Hemi cellulose) ในเมตริกซ์ลิกนิน (Lignin) สำหรับตัวอย่างวัสดุเชิงประกอบที่มนุษย์ประดิษฐ์ขึ้นในยุคก่อนประวัติศาสตร์ ที่จะนำเอาเส้นใยธรรมชาติมาถักผสมกับดินเหนียวปั้นเพื่อทำเป็นวัสดุฉาบบนโครงไม้สำหรับทำเป็นที่อยู่อาศัย ซึ่งมีความแข็งแรงมากกว่าการใช้ดินเหนียวปั้นเพียงอย่างเดียว รวมถึงมีการนำเอาเส้นใยธรรมชาติมาประกอบเข้ากับวัสดุธรรมชาติอย่างอื่น เช่น ไม้ กระดุกสัตว์ เขาสัตว์ เอ็นสัตว์ เพื่อนำมาทำเป็นอาวุธที่ใช้สำหรับล่าสัตว์เป็นอาหาร นอกจากนี้ยังพบการใช้ซีเมนต์ (Cement) เป็นวัสดุประสานในการก่อสร้างพีระมิดในอียิปต์ วิหารทรงกลม และโรงละคร สมัยโรมัน

2. วัสดุเชิงประกอบยุคปัจจุบัน

วัสดุเชิงประกอบในยุคปัจจุบันเริ่มต้นราว กลางคริสต์ศตวรรษที่ 20 เป็นยุคที่ความรู้ความก้าวหน้าทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเริ่มเข้ามามีบทบาทต่อการพัฒนาในระยะต้นของศตวรรษเป็นวัสดุเชิงประกอบที่ใช้พอลิเมอร์เป็นเมตริกซ์ พร้อมทั้งมีการพัฒนาเพื่อเพิ่มคุณภาพของเส้นใยให้มีประสิทธิภาพในการเสริมแรงและมีสมบัติเชิงกลให้ดียิ่งขึ้น โดยสามารถนำเอาเส้นใยที่มีสมบัติ

เฉพาะมาใช้งานให้เหมาะสมกับความต้องการ เช่น การนำเอาเส้นใยที่มีสมบัติความเหนียวแน่น ทนทานและมีค่าความหนาแน่นต่ำ มาผสมกับพอลิเมอร์ซึ่งมีสมบัติเชิงกลที่ต่ำกว่า แต่สามารถขึ้นรูปได้ง่าย และมีสมบัติการยึดเกาะที่ดี ทนต่อการกัดกร่อนทางเคมี มีความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิและสภาพแวดล้อมได้เป็นอย่างดี เมื่อนำสมบัติที่ดีของวัสดุทั้งสองมารวมกันโดยผลิตเป็น วัสดุเชิงประกอบ ก็จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่แข็งแรง แต่ยืดหยุ่นและมีประโยชน์ต่อการประยุกต์ใช้งาน ได้เป็นอย่างดี ทั้งนี้การเลือกใช้วัสดุเริ่มต้นนั้น นับว่าเป็นเงื่อนไขที่มีความสำคัญมากซึ่งนอกจากจะ ส่งผลต่อสมบัติโดยรวมของวัสดุเชิงประกอบแล้ว ยังส่งผลต่อราคาต้นทุนที่ผู้ประกอบการจะต้อง พิจารณาอย่างรอบคอบ

4.2 ประเภทของวัสดุเชิงประกอบ



ภาพประกอบ 33 การแบ่งประเภทของวัสดุเชิงประกอบ

ที่มา: William D. Callister, Jr. วัสดุศาสตร์และวิศวกรรมวัสดุพื้นฐาน. กรุงเทพฯ: ท็อป; 2548.

ประเภทของวัสดุเชิงประกอบแสดงดังภาพประกอบ 33 สามารถแบ่งเป็น 3 ประเภทใหญ่ ได้แก่ วัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยอนุภาค (Particle-reinforced composite) วัสดุเชิงประกอบเสริมด้วยเส้นใย (Fiber-reinforced composite) และวัสดุเชิงประกอบแบบโครงสร้าง (Structural composite)

4.2.1 วัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยอนุภาค ในวัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยอนุภาคนั้นเฟสที่กระจายตัวจะมีรูปร่างแบบอควิวแอค (มิติของอนุภาคจะมีขนาดเท่ากันทุกทิศทาง) สามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มย่อย 2 กลุ่ม คือ

1. วัสดุเชิงประกอบเม็ดผง หรืออนุภาคขนาดใหญ่ (Large-particle composite) ตัวอย่างวัสดุเชิงประกอบเม็ดผงอนุภาคที่รู้จักกันดี เช่น คอนกรีต ซึ่งประกอบไปด้วยซีเมนต์เป็นเนื้อหลัก กับเม็ดทรายและก้อนหินกรวดเป็นตัวเสริมแรงชนิดเม็ดผง

2. วัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยอนุภาคเล็ก (Dispersion-strengthening composite) มักจะใช้กันในวัสดุเชิงประกอบประเภทโลหะและโลหะผสม เป็นการเพิ่มความแข็งแรงและความแข็ง โดยอนุภาคขนาดเล็กละเอียดและกระจายตัวสม่ำเสมอ ตัวอย่างเช่น นิกเกิลผสมอนุภาคทอเรีย (Thoria, ThO₂)

4.2.2 วัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยเส้นใย

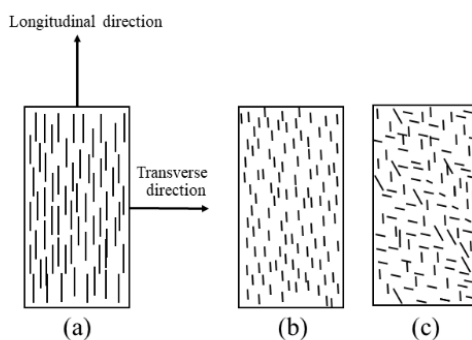
แสดงดังภาพประกอบ 34 เป็นวัสดุเชิงประกอบที่มีเฟสที่กระจายอยู่ในรูปของเส้นใย เส้นใยจะมีอัตราส่วนของความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางสูง โดยเส้นใยสามารถนำมาผลิตเป็นวัสดุเชิงประกอบได้นั้นมีทั้งที่เป็นเส้นใยธรรมชาติ (Natural fiber) เช่น เส้นใยฝ้าย ไยักัญชง และป่าน เป็นต้น หรืออาจจะเป็นเส้นใยสังเคราะห์ซึ่งนิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน เช่น เส้นใยแก้ว (Glass fiber) เส้นใยคาร์บอน (Carbon fiber) และเส้นใยอะรามิด (Aramid fiber) ส่วนเมตริกซ์นั้นทำหน้าที่ยึดให้เส้นใยดังกล่าวให้สามารถอยู่รวมกันได้ โดยทั่วไปนิยมใช้วัสดุในกลุ่มพอลิเมอร์เป็นเมตริกซ์ เพราะสามารถขึ้นรูปได้ง่าย และมีราคาถูก สามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มย่อย 3 กลุ่ม ได้แก่

1. ต่อเนื่องและวางแนวเดียวกัน (Continuous and aligned fiber composite) วัสดุเชิงประกอบที่มีเส้นใยเรียงแนวเดียวกันจะมีสมบัติแบบแอนไอโซโทรปิก (Anisotropic) กล่าวคือคุณสมบัติจะขึ้นกับทิศทาง

2. ไม่ต่อเนื่องและวางแนวเดียวกัน (Discontinuous and aligned fiber composite)

3. ไม่ต่อเนื่องและวางแบบอิสระ (Discontinuous and random oriented fiber composite)

4.2.3 วัสดุเชิงประกอบแบบโครงสร้าง (Structural composite)



ภาพประกอบ 34 ภาพวาดแสดงวัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยเส้นใย (a) ต่อเนื่องและวางแนวเดียวกัน (b) ไม่ต่อเนื่องและวางแนวเดียวกัน (c) ไม่ต่อเนื่องและวางแบบอิสระ

ที่มา: William D. Callister, Jr. วัสดุศาสตร์และวิศวกรรมวัสดุพื้นฐาน. กรุงเทพฯ: ท็อป; 2548.

สมบัติโดยทั่วไปของวัสดุเชิงประกอบนั้นจะมีคุณภาพที่ดีกว่าวัสดุเดิมหลายประการ เช่น มีค่าความแข็งดึงและความแข็งแรงสูง แต่มีความหนาแน่นต่ำ ซึ่งจะส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบนั้นเป็นวัสดุที่เบาแต่แข็งแรงโดยถ้าเปรียบเทียบความแข็งแรงต่อน้ำหนักจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดีกว่าผลิตภัณฑ์ที่ทำมาจากวัสดุในกลุ่มโลหะ ซึ่งมักจะมีน้ำหนักมาก นอกจากนี้ การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์สามารถทำได้ง่าย และวัสดุเชิงประกอบยังมีความได้เปรียบเรื่องความต้านทานต่อการกัดกร่อน (Corrosion resistance) การต้านทานต่อสภาวะแวดล้อม (Environmental resistance) ได้ดีอีกด้วย ด้วยเหตุผลดังกล่าวนี้เองทำให้วัสดุเชิงประกอบเป็นที่น่าสนใจที่จะนำมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุทั่วไปและวัสดุขั้นสูง โดยพิจารณาในแง่ของการลงทุนแล้ว จะสามารถผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพแต่ราคาไม่สูงมากนัก ถ้าเลือกใช้วัสดุพื้นฐานที่ราคาไม่แพงนัก อีกทั้งยังสามารถออกแบบผลิตภัณฑ์ที่มีรูปแบบที่ซับซ้อนและเหมาะสมกับการใช้งานได้ดี และอายุการใช้งานที่นานมากขึ้น⁽³⁹⁻⁴¹⁾

5. การบำบัดน้ำเสีย

จากฐานข้อมูลกรมโรงงานอุตสาหกรรมพบว่าโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอก่อให้เกิดน้ำเสียมากที่สุด อุตสาหกรรมหนึ่ง ทั้งนี้ปัญหาหนึ่งที่พบคือการปล่อยน้ำเสียที่มีสี โดยทั่วไปสีที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมนั้นมาจากกระบวนการย้อมสี การพิมพ์ผ้า และการฟอกขาว ซึ่งสีที่ใช้จัดว่าเป็นสารที่เป็นพิษต่ำ และไม่พบว่ามีอัตราการตายหรือเจ็บป่วยของผู้ที่ทำงานในโรงงานฟอกย้อมสูงกว่าบุคคลอาชีพอื่นแต่อย่างใด อย่างไรก็ตาม ปัญหาสำคัญของสีย้อมในน้ำทั้งปัจจุบันมิได้อยู่ที่ความเป็นพิษของสีย้อม แต่อยู่ที่สีของน้ำทั้งนี้เนื่องจากสีย้อมเป็นสารที่มีสีเข้ม ดังนั้นแม้มีสีอยู่ในน้ำ

เพียงเล็กน้อยก็สามารถทำให้น้ำมีสีเป็นที่น่ารังเกียจของผู้พบเห็นได้ ไม่เหมาะสมสำหรับใช้ประโยชน์อีกต่อไป จึงต้องมีการกำจัดสีของน้ำทิ้งก่อนที่จะปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม

โครงการศึกษาคุณภาพน้ำทิ้งเฉพาะประเภทอุตสาหกรรมเพื่อปรับปรุงปรับค่ามาตรฐานน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม ได้ดำเนินการศึกษาสำรวจอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอในกลุ่มแม่ข่ายทั่วประเทศจำนวนทั้งสิ้น 98 โรงงาน โดยเก็บตัวอย่างน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัดน้ำเสียและน้ำเสียของโรงงาน จำนวน 5 โรงงาน และจากผลการวิเคราะห์ทางสถิติเกี่ยวกับสีในน้ำทิ้งจากโรงงานกลุ่มเป้าหมายในโครงการนี้ดังตาราง 2

ตาราง 2 ค่าเฉลี่ยน้ำเสียและน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอ พ.ศ.2556

โรงงานลำดับที่	น้ำเสียก่อนเข้าระบบ		น้ำเสียออกจากระบบ	
	สี (เอดีเอ็มไอ)	ค่าความเป็นกรด-ด่าง	สารแขวนลอย	สี (เอดีเอ็มไอ)
22	738	7.31	51.98	190
22 (1)	902	7.96	47.10	99
22 (2)	786	7.02	56.70	194
22 (3)	642	7.10	55.36	150
22 (4)	621	7.16	48.75	317
24	125	7.29	27.67	199
98	162	7.69	59.60	65

หมายเหตุ : จำนวนตัวอย่าง 98 โรงงาน

ที่มา: ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. แนวทางการจัดการสีน้ำทิ้งของโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2556.

ในภาพรวมของโรงงานอุตสาหกรรมกลุ่มเป้าหมายทั้ง 98 โรงงาน พบว่าโรงงานส่วนใหญ่ (ไม่น้อยกว่าร้อยละ 85) จะมีค่าสีที่ค่อนข้างต่ำกว่า 300 เอดีเอ็มไอ โดยมีผลการวิเคราะห์สีน้ำทิ้งของโรงงานโดยแยกประเภทโรงงาน ดังนี้

- โรงงานลำดับที่ 22 คือ โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับฟอกย้อมสี ด้าย หรือเส้นใยสิ่งทอ และพิมพ์ผ้า มีค่าสีของน้ำทิ้งในกลุ่มโรงงานนี้มีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 190 เอดีเอ็มไอ

- โรงงานลำดับที่ 24 คือ โรงงานฟอกย้อมสีหรือแต่งสำเร็จผ้าถักพบว่าค่าสีของน้ำทิ้งในกลุ่มโรงงานนี้มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 199 เอดีเอ็มไอ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับกลุ่มโรงงานลำดับที่ 22

- โรงงานลำดับที่ 98 คือ โรงงานซักฟอกและย้อมผ้ายีนส์ มีค่าสีของน้ำทิ้งมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับอีกสองกลุ่มโรงงาน โดยมีค่าเฉลี่ยสีของน้ำทิ้งเท่ากับ 65 เอดีเอ็มไอ และในส่วนของค่าความเป็นกรดต่างของทั้งสามกลุ่มโรงงานมีค่าใกล้เคียงกัน คือ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.31, 7.29 และ 7.69 ตามลำดับ จะเห็นว่าลักษณะสมบัติของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ มีความหลากหลายและ

แปรผันสูง การเลือกใช้เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียที่เหมาะสมกับลักษณะสมบัติของน้ำเสีย จึงเป็นสิ่งสำคัญที่นำไปสู่การบำบัดน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เทคโนโลยีการกำจัดสิ่งเจือปนในน้ำทิ้งเนื่องจากการย้อมผ้า พิมพ์ผ้าในโรงงานฟอกย้อม ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสีย้อมและสารเคมีซึ่งเป็นส่วนที่เหลือตกค้างอยู่ในน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิต เทคโนโลยีการบำบัดสีน้ำเสียในกลุ่มโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอมีหลายวิธี ได้แก่

- กระบวนการบำบัดทางกายภาพ (Physical treatment)
- กระบวนการบำบัดทางฟิสิกส์-เคมี (Physicochemical treatment)
- กระบวนการบำบัดทางชีววิทยา (Biological treatment)

เทคนิคการบำบัดน้ำเสียในอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอที่มีการใช้งานทั่วไปประกอบหน่วยการบำบัดต่างๆ เช่น การบำบัดทางฟิสิกส์ ทางเคมี และทางชีวภาพ สามารถจำแนกตามระบบบำบัดที่เป็นที่นิยมใช้ มีรายละเอียด ดังนี้

5.1 ระบบบำบัดทางกายภาพ (Physical treatment)

ปกติจะเป็นการกำจัดสารแขวนลอยที่สามารถกำจัดออกได้ด้วยวิธีการฟิสิกส์ เช่น การแยกเศษขยะออกจากน้ำเสียด้วยตะแกรง การตกตะกอนกรวดทรายโดยอาศัยแรงโน้มถ่วง เพื่อเป็นการลดภาระการทำงานและเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดของหน่วยบำบัดขั้นต่อไป ระบบบำบัดขั้นต้นที่ใช้กันทั่วไป ได้แก่

5.1.1 ตะแกรงดักขยะ (Screen)

น้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอ มักมีของแข็งขนาดใหญ่ เช่น เศษผ้า เศษใยผ้า เส้นด้าย ซึ่งเป็นสาเหตุอุดตันและทำความเสียหายแก่อุปกรณ์ เครื่องจักรกลต่างๆ เช่น เครื่องสูบน้ำ วาล์ว และอุปกรณ์เครื่องวัดต่างๆ ดังนั้น ตะแกรงดักขยะเป็นหน่วยบำบัดขั้นต้นที่ใช้คัดแยกของแข็งขนาดใหญ่ มี 2 ประเภท คือ ตะแกรงหยาบ และตะแกรงละเอียด

5.1.2 ถังปรับสภาพ (Equalization) น้ำเสียของอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอ มักมีความแปรปรวนด้านความเข้มข้นตามลักษณะการฟอกย้อม บ่อปรับสภาพทำหน้าที่ควบคุมความเข้มข้นของน้ำเสียให้มีความสม่ำเสมอ และน้ำเสียประเภทนี้มักมีอุณหภูมิสูง ถังปรับสภาพจะช่วยลดอุณหภูมิของน้ำเสียก่อนเข้าระบบขั้นต่อไปเป็นการส่งเสริมให้ระบบบำบัดน้ำเสียมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น

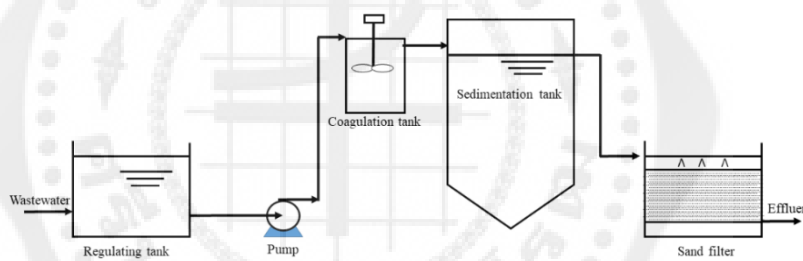
5.2 ระบบบำบัดทางฟิสิกส์-เคมี (Physicochemical treatment)

ระบบบำบัดทางฟิสิกส์-เคมีที่ใช้บำบัดสีในอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีหลายเทคโนโลยี ซึ่งระบบที่มีการใช้งานในประเทศไทย ได้แก่

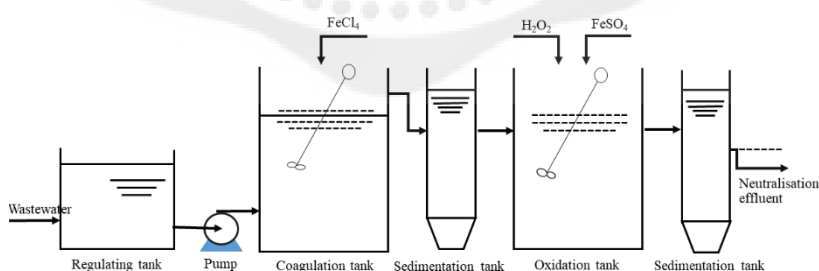
5.2.1 กระบวนการตกตะกอนทางเคมี (Chemical coagulation-flocculation)

การบำบัดน้ำเสียด้วยการตกตะกอนทางเคมีซึ่งประกอบด้วย ถังกวนเร็ว ถังกวนช้า และถังตกตะกอน เป็นระบบพื้นฐาน (Conventional) ที่นิยมใช้งานในปัจจุบัน สำหรับการแยกสาร

แขวนลอยที่มีขนาดเล็กออกจากน้ำเสีย โดยใช้สารเคมีในการทำลายเสถียรภาพประจุไฟฟ้าของสารแขวนลอย เช่น สารส้ม (Aluminium sulfate: alum) ปูนขาว (Calcium oxide) เหล็กในรูปเฟอร์รัสซัลเฟตหรือคลอไรด์ (Ferric sulfate/Ferric chloride) เป็นต้น โดยอาจมีการใช้สารกลุ่มพอลิเมอร์ร่วมด้วยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการตกตะกอน สำหรับระบบบำบัดน้ำเสียของกลุ่มอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอ นิยมใช้ระบบตกตะกอนทางเคมีในการกำจัดสี และสารอินทรีย์ เป็นระบบที่มีประสิทธิภาพสูงและเป็นการบำบัดสารอินทรีย์ก่อนเข้าระบบบำบัดชีวภาพ การตกตะกอนด้วยสารเคมีเป็นกระบวนการ ที่นิยมอย่างแพร่หลายในการกำจัดสีจริงและสีปรากฏในน้ำเสีย โดยส่วนใหญ่ใช้ร่วมกับการปรับค่าความเป็นกรด-ด่างให้เหมาะสม เพื่อประสิทธิภาพในการตกตะกอนที่สูงที่สุด เนื่องจากอนุภาคของสารแขวนลอยมีประจุไฟฟ้าลบเป็นส่วนใหญ่ เมื่ออนุภาคเหล่านั้นมาพบกันก็จะผลักรันไม่สามารถรวมตัวกันเป็นตะกอนขนาดใหญ่ ดังนั้นจึงทำลายประจุของอนุภาคหรือทำให้อนุภาคเป็นกลางโดยการเติมสารเคมีสร้างตะกอน เรียกว่า กระบวนการสร้างตะกอนถ้าสีย้อมมีโมเลกุลเล็ก เช่น ประเภทสีแอสซิด สีรีแอคทีฟ การเกิดตะกอนของสีโดยใช้สารส้มจะไม่สามารถทำได้ ดังนั้นต้องปรับปรุงประสิทธิภาพของปฏิกิริยาการตกตะกอนให้เป็นไปอย่างสมบูรณ์ โดยใช้สารช่วยให้เกิดการรวมตัวของตะกอน เช่น พอลิอิเล็กโทรไลต์ (Polymer electrolyte) ซึ่งต้องใช้ในปริมาณที่เหมาะสม



ก) การตกตะกอนด้วยสารส้ม



ข) การตกตะกอนด้วยเหล็กในรูปคลอไรด์/เฟอร์รัสซัลเฟต

ภาพประกอบ 35 ตัวอย่างเทคโนโลยีการกำจัดสีน้ำเสียโดยการตกตะกอนทางเคมี

ที่มา: ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. แนวทางการจัดการสีน้ำทิ้งของโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2556.

5.2.2 การดูดซับ (Adsorption)

ระบบบำบัดน้ำเสียกลุ่มอุตสาหกรรมฟอกย้อมสีสิ่งทอ นิยมใช้การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ ในการกำจัดสารอินทรีย์และสารปนเปื้อนที่ไม่สามารถกำจัดในระบบตกตะกอนทางเคมีหรือระบบบำบัดทางชีวภาพ คาร์บอนที่ใช้มี 2 ประเภท คือ คาร์บอนแบบเม็ด (Granular carbon) และคาร์บอนแบบผง (Powder carbon) สำหรับในระบบบำบัดน้ำเสียกลุ่มอุตสาหกรรมฟอกย้อมสีสิ่งทอ มักจะใช้เป็นระบบสุดท้ายก่อนระบายน้ำทิ้งออกจากโรงงาน

ข้อดี ของการดูดซับด้วยคาร์บอนมีประสิทธิภาพการดูดซับสีสูงเนื่องจากการมีรูพรุนขนาดเล็กทำให้สามารถกำจัดสีจริงและสีที่ปรากฏได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่มีข้อจำกัดที่น้ำหนักโมเลกุลของสีที่ถูกดูดซับต้องมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 400 ดังนั้นก่อนการกำจัดสีด้วยกระบวนการดูดซับบนถ่านกัมมันต์จะต้องมีการปรับขนาดโมเลกุลของสีให้มีความเหมาะสมก่อนโดยการไฮโดรไลซิสด้วยปูนขาวให้สารละลายมีค่าความเป็นกรด-ด่างประมาณ 10-11 ดังนั้น จำเป็นต้องมีการปรับค่าความเป็นกรด-ด่างให้เป็นกลางก่อนระบายน้ำทิ้ง

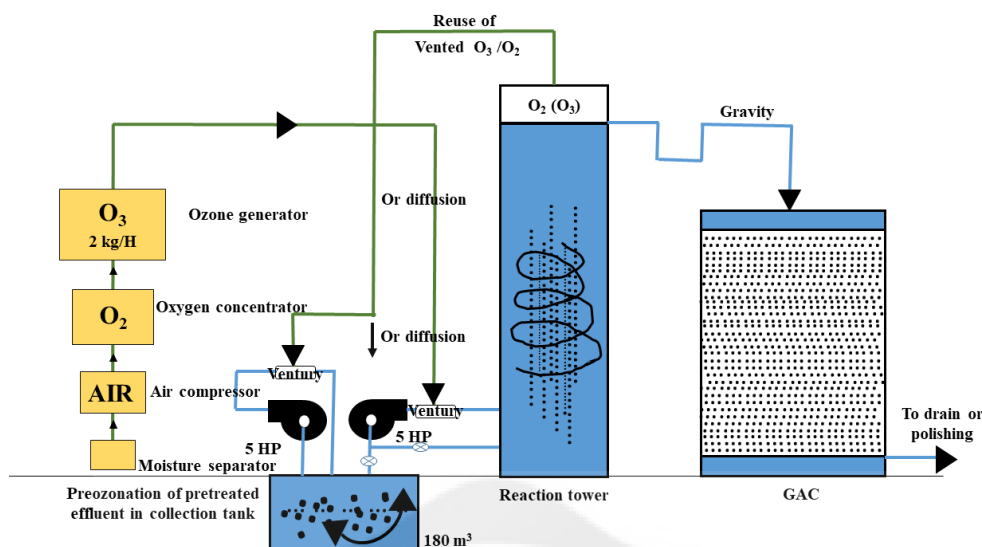
ข้อเสีย คือ ด้านอายุการใช้งานของคาร์บอน หากใช้งานคาร์บอนจนหมดสภาพการดูดซับ ประสิทธิภาพการดูดซับจะลดน้อยลงจนไม่ดูดซับสีและไม่คุ้มค่าในการฟื้นฟูน้ำกลับมาใช้ใหม่ (Regeneration) ส่วนใหญ่หากมีปริมาณใช้คาร์บอนไม่มากนัก มักจะทิ้งแล้วนำของใหม่มาใช้แทน ทำให้มีค่าใช้จ่ายสูงทำให้เทคนิคนี้ไม่เป็นที่นิยม

5.2.3 การทำโอโซนออกซิเดชัน (Ozone oxidation) โอโซน (O_3)

เป็นสารออกซิไดซ์ที่มีความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์สูง จึงนิยมนำมาใช้ในการย่อยสลายสีและสารอินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมฟอกย้อมสีสิ่งทอ

ข้อดี คือ ประสิทธิภาพการบำบัดสูง ใช้เวลาน้อย และไม่เกิดตะกอน เป็นต้น

ข้อด้อย คือ ค่าก่อสร้างและค่าเดินระบบสูง เนื่องจากโอโซนเป็นสารออกซิไดซ์รุนแรงจึงมีความเสี่ยงต่อผู้ควบคุมระบบ จึงจำเป็นต้องมีระบบป้องกันและการกำจัดโอโซนหากเกิดการรั่วไหล



ภาพประกอบ 36 กระบวนการโอโซนออกซิเดชันในการกำจัดสีของน้ำเสียอุตสาหกรรมสิ่งทอ

ที่มา: ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. แนวทางการจัดการสีน้ำทิ้งของโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2556.

5.2.4 การกรอง (Filtration)

ระบบการกรองที่ใช้ในระบบบำบัดน้ำเสียในอุตสาหกรรมสิ่งทอ มักใช้เป็นหน่วยบำบัดขั้นสุดท้ายก่อนระบายน้ำทิ้ง ทำหน้าที่กรองสารแขวนลอยหรือตะกอนเบาที่หลุดออกมาจากระบบบำบัดก่อนหน้า ปกตินิยมใช้เป็นถังกรองทราย โดยออกแบบให้ใช้ที่อัตราการกรองต่ำ สามารถกำจัดสารแขวนลอยและสีที่เกาะติดมากับตะกอนได้ และทำการล้างตะกอนที่ตกค้างไยชั้นกรองก่อนนำตะกอนดังกล่าวไปสู่ระบบกำจัดตะกอนต่อไป

5.2.5 กระบวนการไฟฟ้าเคมี

เป็นกระบวนการกำจัดสีแบบไฟฟ้าเคมีสามารถกำจัดสีรีแอกทีฟในน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมโดยเป็นกระบวนการที่มีความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาเคมีกับพลังงานไฟฟ้าเรียกว่า ปฏิกิริยารีดอกซ์ ซึ่งเกิดขึ้นโดยการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากสาร ที่เกิดออกซิเดชันไปยังสารที่เกิดรีดักชันผ่านตัวนำไฟฟ้าที่เหมาะสม ทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปไอออนของโลหะที่ก่อให้เกิดสีทำให้เลขออกซิเดชันของไอออนของโลหะเปลี่ยนไปและสามารถดูดซับกับสารแขวนลอยต่างๆ ที่ก่อให้เกิดสีด้วยตะกอนเบาในรูปของออกไซด์ ที่ได้จากการแตกตัวของอิเล็กโทรดให้เกิดการตกตะกอนขึ้น กระบวนการไฟฟ้าเคมี มีกลไกการกำจัดสีโดยกระบวนการสร้างตะกอน (Coagulation) การดูดซับ (Adsorption) การตกตะกอน (Precipitation) และการลอยตัว (Floatation) ทำให้สามารถกำจัดสีจากน้ำเสียได้

5.2.6 กระบวนการเฟนตัน

เป็นที่นิยมในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อน สารเคมีที่ใช้ในปฏิกิริยาเฟนตันเป็นสารผสมระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) กับเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) ซึ่งทำปฏิกิริยาได้เป็นอนุมูลไฮดรอกซิล ($OH\cdot$) โดยอนุมูลนี้มีความสามารถในการออกซิไดซ์ค่อนข้างสูงที่สามารถเป็นกรด โดยอนุมูลไฮดรอกซิลจะสามารถทำปฏิกิริยากับสารประกอบอินทรีย์ได้เกือบทั้งหมดได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ วิธีการนี้มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสีของโรงงานย้อมสีสิ่งทอ กระบวนการเฟนตันยังไม่นำมาใช้ในประเทศ

5.2.7 กระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส

กระบวนการกำจัดสีด้วยเยื่อแผ่น (Membrane) สามารถใช้ในการกำจัดสี สามารถนำสารเคมีที่ผ่านการย้อมสีและสีย้อมบางชนิดกลับมาใช้ใหม่ได้ แบ่งออกเป็น

1. ไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration)

ใช้ในการกำจัดสีย้อมที่มีลักษณะเป็นคอลลอยด์ (Colloid) ที่ถูกปล่อยออกจากหม้อย้อมหลังจากผ่านการล้าง โดยใช้กำจัดสีประเภท สีดีสเพิร์สที่ใช้ย้อมเส้นใยพอลิเอสเตอร์ และสีย้อมประเภท สีซัลเฟอร์ สีแวต และสีอะโซอิก ที่ใช้ย้อมเส้นใยฝ้าย และวิสคอส (Viscose) สีย้อมดีสเพิร์สเมื่อผ่านกระบวนการไมโครฟิลเตรชันแล้วสามารถนำกลับมาใช้ใหม่

2. ออสโมซิสย้อนกลับ (Reverse osmosis)

เหมาะสำหรับใช้กำจัดไอออนสีย้อมและโมเลกุลของสีย้อมที่มีขนาดใหญ่ เป็นการกรองแยกน้ำออกจากของแข็งแขวนลอย หรือของแข็งที่ละลายน้ำโดยผ่านรูพรุนขนาดเล็กและใช้ความดันเป็นแรงขับเคลื่อนให้น้ำไหลผ่านตัวกรอง เป็นกระบวนการที่ต้องผ่านเยื่อแผ่น 2 ชั้นตอน เยื่อแผ่นแรกจะสามารถกำจัดสีได้ถึงร้อยละ 90 ความเข้มข้นของสีที่เหลือจะถูกส่งผ่านไปยังเยื่อแผ่นที่สอง และสามารถกำจัดสีได้ถึงร้อยละ 94 อย่างไรก็ตาม สีย้อมที่ใช้ย้อมเส้นใยประเภทฝ้าย ไม่สามารถใช้กระบวนการนี้ได้

5.3 การบำบัดทางชีวภาพ (Biological treatment)

โดยทั่วไปการกำจัดสีย้อมที่เป็นน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมจะใช้วิธีการทางกายภาพและเคมี เช่น การใช้โอโซน (Ozone treatment) การกรองด้วยเยื่อ (Membrane filtration) และการตกตะกอนด้วยสารเคมี (Chemical coagulation) วิธีบำบัดดังกล่าวมีข้อเสีย คือ กากตะกอนเคมี (Sludge) และสารที่มีความเป็นพิษเกิดขึ้นในปริมาณมาก รวมทั้งค่าใช้จ่ายในการบำบัดสูง อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มเคมีเข้าสู่ระบบสิ่งแวดล้อม การใช้วิธีบำบัดทางชีวภาพจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ และน่าจะเหมาะสมในการนำมาบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม ซึ่งเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพนั้นมีจุดประสงค์หลักคือ การกำจัดบีโอดีซึ่งก่อให้เกิดปัญหาน้ำเสีย โดยอาศัยจุลินทรีย์มาทำการย่อยสลายแปรเปลี่ยนสภาพของสารอินทรีย์ต่างๆ ไปเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ถ้าใช้ระบบเติมอากาศ หรือไปเป็นแก๊สมีเทน (CH_4) และแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ถ้าใช้ระบบไม่เติมอากาศในระยะเวลาที่ผ่านมาได้มีการศึกษาการใช้กระบวนการทางชีววิทยาในการกำจัด

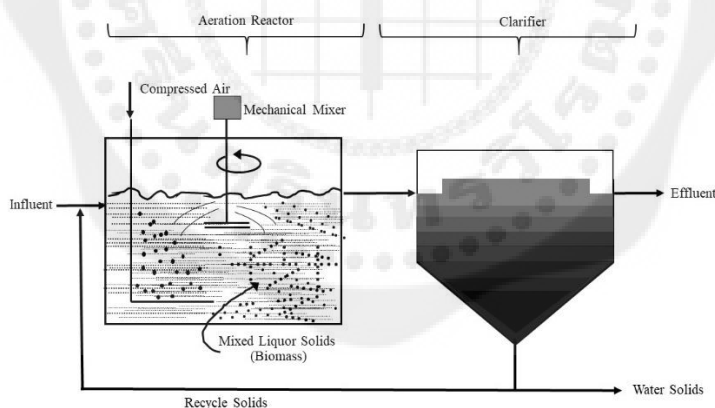
อินทรีย์และสีมากขึ้น เนื่องจากเป็นกระบวนการที่มีค่าใช้จ่ายต่ำกว่ากระบวนการอื่นๆ และเป็นระบบที่สามารถกำจัดสารอินทรีย์และกำจัดสีได้ แต่การบำบัดโดยกระบวนการทางชีววิทยาแบบใช้อากาศมักมีปัญหาในการกำจัดสี โดยพบว่าไม่สามารถกำจัดสีที่มีสารประกอบอะโซให้มีประสิทธิภาพสูงได้ แต่หากใช้กระบวนการทางชีวภาพแบบไร้อากาศจะพบว่า สามารถกำจัดสีได้ดีกว่า และเป็นระบบที่นิยมใช้กำจัดน้ำเสียที่มีพิษหรือกำจัดยาก โดยประสิทธิภาพในการบำบัดสีด้วยระบบใช้อากาศ แต่ระบบบำบัดแบบไร้อากาศ มักมีปัญหาในเรื่องกลิ่นและสารประกอบอะโรมาติกเอมีน ซึ่งสารดังกล่าวสามารถบำบัดได้โดยกระบวนการบำบัดแบบใช้อากาศทำให้การบำบัดน้ำเสียดังกล่าวไม่สามารถบำบัดสารอินทรีย์และสีพร้อมๆ กัน กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพที่ใช้ในการบำบัดสีน้ำเสียในอุตสาหกรรมสิ่งทอไทยสามารถแบ่งออกเป็น 3 ระบบ ได้แก่

5.3.1 ระบบบำบัดแบบใช้ออกซิเจน (Aerobic treatment process)

ระบบบำบัดแบบใช้ออกซิเจนที่นิยมใช้งานประกอบด้วย

1. ระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอกติเวตเต็ดสลัดจ์ (Activated sludge)

เป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยา โดยอาศัยสิ่งมีชีวิตพวกจุลินทรีย์หลายชนิดในการย่อยสลาย ดูดซับ หรือเปลี่ยนรูปของสารต่างๆ ที่มีอยู่ในน้ำเสียให้มีค่าความสกปรกน้อยลง สารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำเสียจะถูกจุลินทรีย์ใช้เป็นอาหารและน้ำ สามารถตกตะกอนในถังตกตะกอนได้ง่าย และแยกออกจากน้ำได้ง่ายขณะที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก็จะลอยขึ้นไปในอากาศ แสดงดังภาพประกอบ 37



ภาพประกอบ 37 ส่วนประกอบและการทำงานของระบบแอกติเวตเต็ดสลัดจ์ (Activated sludge)

ที่มา: ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. แนวทางการจัดการสีน้ำทิ้งของโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2556.

2. ระบบบำบัดน้ำเสียและสระเติมอากาศ (Aerated lagoon)

บ่อหรือสระเติมอากาศ อาจถือเป็นกระบวนการแอกติเวตเต็ดสลัดจ์แบบไม่มีการหมุนเวียนสลัดจ์ระบบบำบัดน้ำเสียนี้มักเป็นบ่อดินขนาดใหญ่ที่มีเวลากักน้ำหลายวัน มีการเติมอากาศด้วย

เครื่องเติมอากาศแบบลอยน้ำแต่ไม่มีถังตะกอน ดังภาพประกอบ 2.38 ด้วยเหตุนี้ น้ำทิ้งจึงมีจุลชีพติดออกไปด้วยทำให้ประสิทธิภาพของระบบต่ำกว่ากระบวนการแยกที่เวเต็ดสลัดจ์แบบอื่นๆ และเนื่องจากระบบไม่มีการหมุนเวียนสลัดจ์ ความเข้มข้นของแบคทีเรียในบ่อเติมอากาศจึงมีระดับต่ำกว่าระบบอื่นๆ น้อยกว่า 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร



ภาพประกอบ 38 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบเติมอากาศ (Aerated lagoon)

ที่มา: สุรีย์ บุญญาพงษ์ และ ณิชฐพงษ์ วรรณวิจิตร. ระบบบำบัดน้ำเสียมีกี่แบบ? ตอน1. [อินเทอร์เน็ต]. เชียงใหม่: สถาบันวิจัยสังคม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่; [เข้าถึงเมื่อ 2 ก.พ.2561]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.cheevaintertrade.com/>

5.3.2 ระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic treatment process)

การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการที่ไร้ออกซิเจนเป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ โดยอาศัยจุลินทรีย์ชนิดที่ไม่ใช้ออกซิเจนในการย่อยสลาย ดูดซับ เปลี่ยนรูปของมลสารต่างๆ ที่มีอยู่ในน้ำเสียให้มีค่าความสกปรกน้อยลง มลสารที่มีอยู่ในน้ำเสียจะถูกเปลี่ยนไปจุลินทรีย์เซลล์ใหม่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Dioxide: CO₂) และก๊าซมีเทน (Methane: CH₄) เนื่องจากปฏิกิริยาชีวเคมีที่เกิดขึ้นในกระบวนการไร้ออกซิเจน ได้พลังงานน้อยจากเซลล์ของจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ จากการศึกษพบว่ากระบวนการย่อยสลายทางชีววิทยาสามารถบำบัดสารอินทรีย์ได้น้อยกว่าแบบใช้อากาศ กล่าวคือ สามารถบำบัดสารอินทรีย์ได้ร้อยละ 50-80 และสามารถบำบัดสีได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งสรุปประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียภายใต้ระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศได้ดังตาราง 3

ตาราง 3 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียภายใต้ระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ

ประเภทระบบ	ระยะเวลาเก็บกักน้ำเสีย	สีย้อม (Chromophore)	ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัม/ลิตร)	การกำจัดสี (%)
UAF	48 ชั่วโมง	remazol black B (diazo)	500	>95
UASB	8 ชั่วโมง	mordant orange 1 (azo)		95
UASB	8 ชั่วโมง	mordant orange 1 (azo)		>99
	8 ชั่วโมง	azodisalicylate (azo)	75	99
	24 ชั่วโมง	azodisalicylate (azo)	75	89
ABR	20 ชั่วโมง	tartrazine (azo)		95
AR	5 วัน	vat blue 1 (indigoid)		>95
	10 วัน	reactive blue H3R (azo)		98
	10 วัน	reactive red HE7B (azo)		>99
AnACF	6 ชั่วโมง	reactive red 141 (diazo)	40	82
	12 ชั่วโมง	reactive red 141 (diazo)	40	95
	24 ชั่วโมง	reactive red 141 (diazo)	40	98

หมายเหตุ : UAF = upflow anaerobic filter, UASB = upflow anaerobic sludge blanket, ABR = anaerobic baffled reactor, AR = anaerobic reactor and AnACF = anaerobic activated carbon filter

ที่มา: ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. แนวทางการจัดการสีน้ำทิ้งของโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2556.

5.3.3 ระบบบำบัดน้ำเสียที่เลียนแบบกลไกทางธรรมชาติ

ระบบบำบัดน้ำเสียที่เลียนแบบกลไกทางธรรมชาติคือ ระบบบ่อปรับเสถียร (Stabilization pond) บ่อปรับเสถียรเป็นบ่อกักน้ำทิ้ง ที่มีความลึกของบ่อไม่มากนัก โดยรูปร่างและความลึกของบ่อขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ในการบำบัดน้ำทิ้ง ระบบนี้เป็นที่นิยมใช้กันมากในชุมชนขนาดเล็ก เนื่องจากค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างและดำเนินการต่ำ และไม่ต้องมีการควบคุมดูแลอย่างพิถีพิถัน

5.4 ข้อดีข้อด้อยของเทคโนโลยีการบำบัดสีน้ำเสีย

การเลือกเทคโนโลยีที่เหมาะสมกับน้ำเสียของโรงงานแต่ละประเภท ต้องคำนึงถึงลักษณะน้ำเสีย ปริมาณน้ำเสีย ประสิทธิภาพ ค่าใช้จ่าย ฯลฯ ในทางปฏิบัติควรมีการนำน้ำเสียมาทดสอบก่อนเพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้เทคโนโลยีที่เหมาะสมกับน้ำเสียจากอุตสาหกรรมนั้นๆ และเพื่อให้การบำบัดได้รับประสิทธิภาพสูงสุด เทคโนโลยีมีความแตกต่างกันโดยสามารถสรุปข้อดีข้อเสีย เพื่อเป็นแนวทางการเลือกใช้ให้เหมาะสมสำหรับน้ำเสียของแต่ละอุตสาหกรรม ดังตาราง 4

ตาราง 4 เทคโนโลยีการบำบัดสีของน้ำเสียในอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอ

เทคโนโลยีการบำบัด	ข้อดี	ข้อเสีย
กระบวนการบำบัดทางกายภาพ		
การดูดซับด้วย ถ่านกัมมันต์	เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการ บำบัดสูงสามารถกำจัดสีจริงและ สีปรากฏได้อย่างมีประสิทธิภาพ	- การนำกลับมาใช้ใหม่จะต้อง ฟื้นฟูสภาพด้วยการเผาที่ความ ร้อนสูง มีค่าใช้จ่ายสูง
การกรองผ่านเยื่อกรอง ออสโมซิสย้อนกลับ	- ใช้กำจัดไอออนสีย้อมและโมเลกุล ของสีย้อมที่มีขนาดใหญ่	- ไม่สามารถใช้กับสีย้อมที่ใช้ ย้อมเส้นใยประเภทฝ้ายได้ - เกิดปัญหาจากการอุดตันและ การเสียหายของเยื่อแผ่นขึ้นได้ ง่ายหากน้ำที่นำมาบำบัดมีการ ปนเปื้อนสูง
การกรองผ่านเยื่อกรอง อัลตราฟิลเตรชัน	- มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีสูง - สามารถนำวัสดุ (พีวีเอ โซดาไฟ สีย้อมอินดิโก) และน้ำกลับมาใช้ ใหม่ได้	- ค่าใช้จ่ายสูง
การกรองผ่านเยื่อกรอง ไมโครฟิลเตรชัน	- สีย้อมดีสเพิร์สเมื่อผ่านกระบวนการ แล้วสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้	- ค่าใช้จ่ายสูง
การกรองผ่านเยื่อกรอง นาโนฟิลเตรชัน	- มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีสูง - สามารถแยกสารพวก อิลโคโทรไลต์ออกมาและนำกลับ มาใหม่ได้	- ค่าใช้จ่ายสูง
กระบวนการบำบัดทางฟิสิกส์-เคมี		
การตกตะกอนเคมี	- เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูง	- ต้องควบคุมความเข้มข้น ของความเข้มข้นของ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H ₂ O ₂) อุณหภูมิ ค่าความ เป็นกรด-ด่าง และระยะเวลา ในการเกิดปฏิกิริยา
กระบวนการเฟ้นต้น	- เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการ กำจัดในโรงงานฟอกย้อม	

ตาราง 4 เทคโนโลยีการบำบัดสีของน้ำเสียในอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอ (ต่อ)

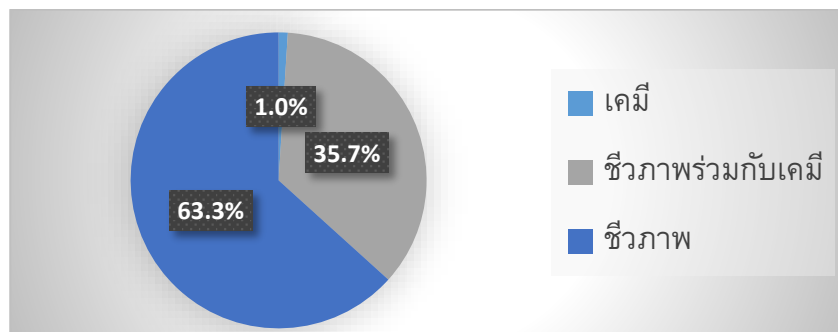
เทคโนโลยีการบำบัด	ข้อดี	ข้อเสีย
กระบวนการบำบัดทางฟิสิกส์-เคมี		
ระบบบำบัดแบบใช้ออกซิเจน	<ul style="list-style-type: none"> - สามารถกำจัดสีย้อมกลุ่มสีเอโซและสีแอนทราควิโนน เหมาะสมกับการใช้งานในโรงงาน - คุณภาพน้ำทิ้งได้มาตรฐาน - สามารถกำจัดสีรีแอคทีฟในน้ำเสีย 	<ul style="list-style-type: none"> - มีอัตราเร็วในการกำจัดสีต่ำ - เป็นระบบที่ต้องการแหล่งพลังงาน
ระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน	<ul style="list-style-type: none"> - อาจได้แก๊สชีวภาพเป็นแหล่งพลังงาน - ใช้แบคทีเรียที่เจริญเติบโตได้ในภาวะที่ไม่มีอากาศ หรือไม่มีออกซิเจนเท่านั้น (Obligate) และ แบคทีเรียที่สามารถเจริญได้ทั้งในสภาวะที่มีออกซิเจนและไม่มีออกซิเจน (Facultative) ในการกำจัดสีเอโซ 	<ul style="list-style-type: none"> - อาจเกิดสารที่เป็นพิษขึ้น - ต้องการระบบบำบัดขั้นที่สองต่อจากการบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน

ที่มา: ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. แนวทางการจัดการสีน้ำทิ้งของโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2556.

5.5 ข้อมูลสัดส่วนระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ

จากการสำรวจด้วยแบบสอบถามและเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งจากโรงงานทั้งหมดจำนวน 98 โรงงาน พบว่ามีระบบบำบัดน้ำเสียทุกโรงงาน โดยเป็นโรงงานที่ใช้กระบวนการบำบัดทางเคมีเท่านั้น (ไม่มีระบบบำบัดทางชีวภาพ) คิดเป็นร้อยละ 1.0 ทั้งนี้ ระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพจะแยกได้เป็นกลุ่มที่มีเฉพาะระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพเท่านั้น (ไม่มีกระบวนการบำบัดทางเคมี) คิดเป็นร้อยละ 63.3 และกลุ่มที่มีระบบบำบัดทางชีวภาพร่วมกับกระบวนการบำบัดทางเคมีคิดเป็นร้อยละ 35.7

(4) ดังภาพประกอบ 39

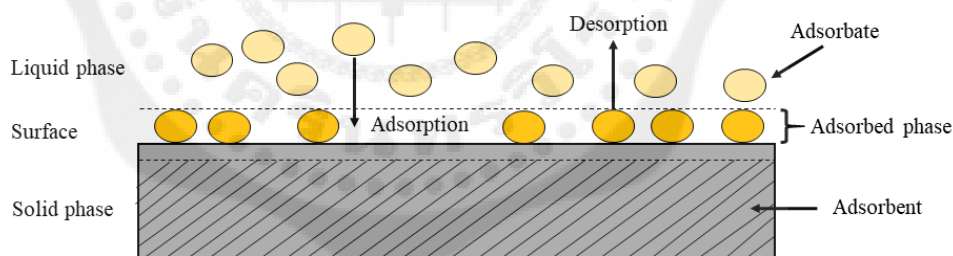


ภาพประกอบ 39 สัดส่วนของโรงงานที่มีระบบบำบัดน้ำเสียระบบต่าง ๆ

ที่มา: ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. แนวทางการจัดการน้ำทิ้งของโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2556.

6. การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับ คือ กระบวนการที่สารดูดซับถูกดึงโมเลกุลเข้ามาติดกับผิวของตัวดูดซับ เช่น ของเหลวกับของเหลว หรือของแข็งกับของเหลว ดังภาพประกอบ 2.40 แล้วทำให้ความเข้มข้นของสารในระบบลดลง โมเลกุลตัวถูกละลายที่ไปเกาะ เรียกว่า สารถูกดูดซับหรือตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) และผิวที่สัมผัสเกาะจับกับสารถูกดูดซับ เรียกว่า วัสดุดูดซับหรือตัวดูดซับ (Adsorbent)



ภาพประกอบ 40 การดูดซับระหว่างของแข็งกับของเหลว

ที่มา: Worch Eckhard. Adsorption technology in water treatment. Edition1. Germany: 2012.

กระบวนการดูดซับนี้สามารถเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติ เช่น สารอินทรีย์หรือโลหะถูกดูดซับในดินหรือตะกอนดินในทะเล มหาสมุทร และแม่น้ำ กระบวนการที่เกิดขึ้นเองโดยมนุษย์ เช่น การใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อน จากอากาศและน้ำ การใช้ดินเหนียวดูดซับยาฆ่าแมลงในดิน หรือดูดซับโลหะหนักจากแหล่งฝังกลบเพื่อป้องกันการปนเปื้อนของสารพิษที่จะลงสู่ชั้น

น้ำใต้ดิน โดยกระบวนการดูดซับแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ตามลักษณะของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสารถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ คือ การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) และการดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

1. การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption)

หรือเรียกว่า “Physisorption” เป็นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับกับพื้นผิวของตัวดูดซับ เป็นแรงดูดค่อนข้างอ่อน เช่น แรงแวนเดอวาลส์ (Van der waals force) เกิดจากการรวมแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic force) ซึ่งไม่แข็งแรงและต้องไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงพันธะเคมีทั้งวัสดุดูดซับและตัวถูกดูดซับ มักจะเกิดในสภาวะอุณหภูมิและพลังงานที่ใช้ในการดูดซับต่ำ นอกจากนี้วัสดุดูดซับและสารถูกดูดซับสามารถเกิดแบบหลายชั้น (Multilayers) บนพื้นผิวของวัสดุดูดซับ และโมเลกุลของสารถูกดูดซับสามารถหลุดออกจากผิวได้ นั่นคือ ตัวถูกดูดซับหลุดออกจากวัสดุดูดซับ ซึ่งกระบวนการย้อนกลับของการดูดซับนี้ เรียกว่า การคายซับ (Desorption)

2. การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

หรือเรียกว่า “Chemisorption” แตกต่างจากการดูดซับทางกายภาพ กล่าวคือ เป็นแรงยึดเหนี่ยวค่อนข้างสูงกว่าแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นในการดูดซับทางกายภาพ การดูดซับเป็นการสร้างพันธะเคมีระหว่างพื้นผิวของวัสดุดูดซับกับตัวถูกดูดซับ ปฏิกิริยาการดูดซับไม่สามารถผันกลับได้ โดยพบว่าจะมีการถ่ายโอนอิเล็กตรอน (Ionic bonds) หรือการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน (Covalent bonds) จึงแข็งแรงกว่าแรงแวนเดอวาลส์ และโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะเกาะบนผิวหน้าของตัวดูดซับเพียงชั้นเดียว (monolayer) การดูดซับแบบนี้เกิดขึ้นภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิสูงและพลังงานที่ใช้ในการดูดซับค่อนข้างสูง ซึ่งการคายซับของโมเลกุลเกิดขึ้นได้ยาก⁽⁴³⁻⁴⁹⁾

ตาราง 5 การเปรียบเทียบการดูดซับทางกายภาพและทางเคมี

ปัจจัย	การดูดซับทางกายภาพ	การดูดซับทางเคมี
แรงยึดเหนี่ยวระหว่างสารถูกดูดซับกับผิววัสดุดูดซับ	อ่อน	แข็งแรง
พลังงานในการดูดซับ	แรงแวนเดอร์วาลส์	แรงจากพันธะเคมี
สภาวะที่เกิดการดูดซับ	ต่ำ < 85 กิโลจูลต่อโมล	สูง > 85 กิโลจูลต่อโมล
ลักษณะการดูดซับ	อุณหภูมิต่ำ ใกล้เคียงกับสภาวะในการ ควบแน่นของแก๊ส	อุณหภูมิต่ำ อุณหภูมิต่ำ
กระบวนการดูดซับ	รวดเร็ว	ช้า
การนำไปใช้งาน	ไม่มีพลังงานกระตุ้นหลายชั้น ผันกลับได้	มีพลังงานกระตุ้นชั้นเดียว ผันกลับไม่ได้
	พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุน	จลนศาสตร์

ที่มา: มาลี สันติคุณภรณ์. การเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์และเทคโนโลยีการวิเคราะห์เบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์; 2557.

2.6 กลไกการดูดซับ

การดูดซับเป็นการเคลื่อนย้าย (Mass transfer) จากแก๊สหรือของเหลวมายังของแข็ง หรือของเหลวการเกาะติดบนพื้นผิวของตัวดูดซับเกิดขึ้นเป็น 3 ระยะติดต่อกัน ดังนี้

ระยะที่ 1 การแพร่ภายนอก (External diffusion) เป็นระยะที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับ (Absorbate) ในน้ำจะเคลื่อนที่ไปเกาะอยู่รอบนอกของวัสดุดูดซับ

ระยะที่ 2 การแพร่ภายใน (Intraparticle diffusion หรือ Pore diffusion) เป็นระยะที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะพุ่งกระจายเข้าไปในรูพรุนของวัสดุดูดซับ

ระยะที่ 3 การดูดซับ (Adsorption) เป็นระยะที่เกิดการเกาะติดบนผิวในรูพรุนระหว่างตัวถูกดูดซับและพื้นผิวของวัสดุดูดซับ การเกาะติดในระยะที่ 3 อาจจะเป็นการเกาะติดบนผิวด้วยแรงทางฟิสิกส์หรือเคมี ในกระบวนการกำจัดน้ำเสียการดูดซับจะพิจารณาเฉพาะ การเกาะติดด้วยแรงทางฟิสิกส์มากกว่าแรงทางเคมี⁽⁴⁸⁾

6.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ⁽⁴⁷⁻⁴⁸⁾

ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการดูดซับ คือ ธรรมชาติของวัสดุดูดซับและตัวถูกดูดซับ

6.2.1 ธรรมชาติของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับ ธรรมชาติของวัสดุดูดซับเป็นปัจจัยหลัก ปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับธรรมชาติของโมเลกุลที่เป็นวัสดุดูดซับ ได้แก่

1. พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุน

พื้นที่ผิวเป็นสมบัติอย่างหนึ่งที่มีผลต่อความสามารถของโมเลกุลที่เป็นวัสดุดูดซับในการดูดซับ นั่นคือความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวของโมเลกุลที่เป็นวัสดุดูดซับมากขึ้น แต่พื้นที่ผิวโมเลกุลที่เป็นวัสดุดูดซับไม่เพียงพอที่จะอธิบายความสามารถการดูดซับได้ดี โครงสร้างของรูพรุนก็มีส่วนช่วยให้พื้นที่ผิวมีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น เพราะถ้าขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับสามารถเข้าไปในรูพรุนของโมเลกุลของวัสดุดูดซับได้ การดูดซับก็จะเพิ่มขึ้น

2. ขนาดของวัสดุดูดซับ

อัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของวัสดุดูดซับ การลดขนาดของวัสดุดูดซับให้มีความขนาดเล็กทำให้อัตราในการดูดซับเร็วขึ้นกว่าสารที่มีขนาดใหญ่ เคมีที่ผิวหน้า หมู่ฟังก์ชันเฉพาะของโมเลกุลที่เป็นวัสดุดูดซับมีสมบัติที่มีผลต่อกระบวนการดูดซับ เช่น ถ้าโมเลกุลวัสดุดูดซับเป็นพวกออกไซด์และหมู่ฟังก์ชันที่เป็นกรด ความสามารถในการดูดซับจะลดลงด้วย

6.2.2 ธรรมชาติของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ ธรรมชาติของตัวดูดซับจะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับดังนี้

1. ความสามารถในการละลาย

ความสามารถในการละลายที่สูงจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงปฏิกิริยาของตัวทำละลายและตัวถูกละลาย ทำให้การแพร่ขยายการดูดซับลดลง เพราะก่อนที่จะเกิดกระบวนการดูดซับขึ้นต้องมีการทำลายพันธะของตัวถูกละลายก่อน

2. น้ำหนักโมเลกุลและขนาดโมเลกุล

มีผลต่อความสามารถในการดูดซับเมื่อน้ำหนักโมเลกุลและขนาดของโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น

3. ความมีขั้ว (Polarity) ของโมเลกุล

นอกจากธรรมชาติของโมเลกุลของสารแล้วยังขึ้นอยู่กับตัวทำละลายและวัสดุดูดซับของสารด้วย ซึ่งความสามารถในการดูดซับจะลดลงเมื่อความมีขั้วเพิ่มขึ้น เพราะการเพิ่มขั้วจะทำให้ความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้น

4. ผลของ $[H^+]$ หรือ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ถ้า $[H^+]$ ลดลง

อัตราการดูดซับจะเร็วและมาก เพราะเมื่อ $[H^+]$ เพิ่มขึ้นและยังสามารถเกาะติดผิววัสดุดูดซับ เช่น ถ่านกัมมันต์ได้ดี ทำให้คาร์บอนมีสภาพเป็นกลางเสมอ เนื่องจากคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ค่อนข้างจะ

มีประจุลบเล็กน้อย จึงทำให้โมเลกุลไม่มีขั้ว (Non-polarity) ของสารในน้ำมาเกาะที่ผิวคาร์บอนได้ดี ซึ่งค่าความเป็นกรด-ด่าง มีผลต่อความสามารถดูดซับ

5. ผลของอุณหภูมิ

ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอัตราเร็วของการดูดซับจะเพิ่มขึ้นแต่ความสามารถในการดูดซับที่ผิวจะลดลง เนื่องจากการดูดซับเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน

6. ความดันป่วน

อัตราเร็วในการดูดซับอาจขึ้นอยู่กับ การแพร่ชั้นฟิล์ม (Film diffusion) หรือการแพร่เข้าสู่รูพรุน (Pore diffusion) ซึ่งแล้วแต่ความดันป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความดันป่วนต่ำ ฟิล์มน้ำล้อมรอบวัสดุดูดซับจะมีความหนาแน่นมากทำให้เป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลที่จะเข้าไปในวัสดุดูดซับ ดังนั้น การแพร่ภายนอกเป็นปัจจัยที่กำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้าม ถ้ามีความดันป่วนสูงจะเกิดฟิล์มบาง ทำให้การแพร่ภายในเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ความดันป่วนในถังการดูดซับ คือ ความเร็วของน้ำที่ผ่านถังต่อหน่วยพื้นที่หน้าตัด ซึ่งตามทฤษฎีถ้าเพิ่มความเร็วจึงทำให้อัตราเร็วในการดูดซับเพิ่มขึ้นเนื่องจากความดันป่วนสูง

6.3 สมดุลการดูดซับ (Adsorption equilibrium)

สมดุลการดูดซับ คือ สภาวะที่จำนวนโมเลกุลของสารถูกดูดซับ (Adsorbate) เคลื่อนที่เข้ามาบนผิวของวัสดุดูดซับ (Adsorbent) และออกจากบริเวณผิวของวัสดุดูดซับมีจำนวนเท่ากัน อัตราการดูดซับและการหลุดออกจะเข้าสู่สภาวะคงที่ (Equilibrium state) หรือเรียกว่า สมดุลการดูดซับ (Adsorption equilibrium) ที่จุดนี้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ คือสารละลายจะมีค่าคงที่ สมดุลนี้เป็นลักษณะเฉพาะของสมดุลแต่ละระบบขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น ชนิดของสารถูกดูดซับ ชนิดของวัสดุดูดซับ ตัวทำละลาย ค่าความเป็นกรด-ด่าง เป็นต้น ที่จุดสมดุล ณ อุณหภูมิคงที่ สารถูกละลายจะอยู่ใน 2 เฟส คือ สารถูกละลายบนวัสดุดูดซับและสารถูกละลายในสารละลาย ซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารถูกดูดซับและปริมาณสารดูดซับบนวัสดุดูดซับ เรียกว่า ไอโซเทิร์มของการดูดซับ (Adsorption isotherm)

ไอโซเทิร์มของการดูดซับ (Adsorption isotherm) ปรากฏการณ์การดูดซับที่เกิดขึ้นนิยมนอธิบายด้วยทฤษฎีของ ทฤษฎีฟรุนดลิช (Freundlich adsorption isotherm) ทฤษฎีแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm) และจลนศาสตร์ (adsorption kinetic) ของการดูดซับ

6.3.1 แลงเมียร์ไอโซเทิร์ม (Langmuir adsorption isotherm)

ปี ค.ศ. 1916 เออร์วิง แลงเมียร์ (Irving Langmuir) ได้เสนอแบบจำลองไอโซเทิร์มการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) และมีความเป็นเนื้อเดียวกันในการดูดซับ (Homogeneous) ภายใต้สมมุติฐานดังนี้ “การดูดซับจะเกิดขึ้นบนพื้นผิวที่มีพื้นที่ในการดูดซับที่แน่นอนและเกิดได้เพียงชั้นเดียว (Monolayer) ด้วยพลังงานในการดูดซับมีค่าคงที่ (Energy of adsorption is constant) โมเลกุลไม่มีการเคลื่อนย้ายตำแหน่ง (No migration) ทำให้ปริมาณของสารที่ทำการดูดซับถูกจำกัดด้วย

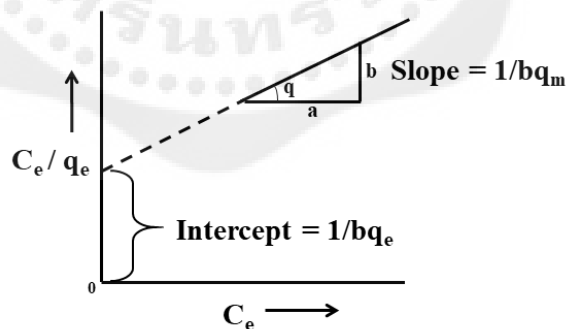
พื้นที่ผิวของวัสดุดูดซับ” เป็นกระบวนการดูดซับทางเคมี จากสมมติฐานดังกล่าว สามารถอธิบายสมการแลงเมียร์จากความสัมพันธ์ของปริมาณการดูดซับบนหน่วยวัสดุดูดซับ ดังสมการ 2.1

$$q_e = \frac{q_m b C_e}{1 + q_m b C_e} \quad \text{สมการ (2.1)}$$

- เมื่อ q_e คือ ปริมาณของสารถูกดูดซับบนวัสดุดูดซับ ณ ภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
- q_m คือ ความสามารถสูงสุดในการดูดซับแบบชั้นเดียว (มิลลิกรัมต่อกรัม)
- b คือ ค่าคงที่ของการดูดซับตามสมการแลงเมียร์
- C_e คือ ความเข้มข้นของสารละลาย ณ ภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

ความสามารถสูงสุดในการดูดซับแบบชั้นเดียว (q_m) และค่าคงที่ของการดูดซับตามสมการแลงเมียร์ (b) คำนวณได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง C_e/q_e และ (C_e) โดยค่าความชัน คือ $1/q_m$ และจุดตัดแกน y (Intercept) คือ $1/bq_m$ ตามสมการที่ 2.2 และภาพประกอบ 41

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m} C_e + \frac{1}{bq_m} \quad \text{สมการ (2.2)}$$



ภาพประกอบ 41 ลักษณะกราฟของ Langmuir adsorption isotherm

6.3.2 ฟรอนด์ลิชไอโซเทอรัม (Freundlich adsorption isotherm)

ในปี ค.ศ. 1909 Finlay Freundlich สามารถอธิบายการดูดซับของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ฟรอนด์ลิชไอโซเทอรัม เป็นไอโซเทอรัมที่พัฒนาจากแลงเมียร์ไอโซเทอรัม พื้นผิวของวัสดุดูดซับเป็นแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous adsorption surface) พื้นผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ในภาวะ

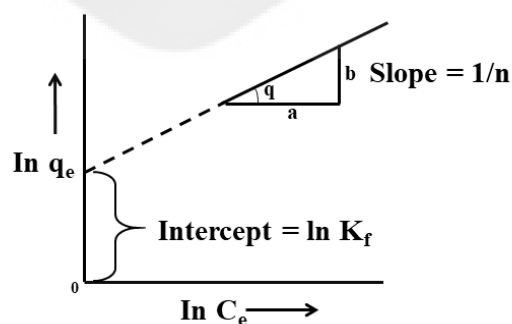
ที่การดูดซับบนผิววัสดุดูดซับเป็นแบบหลายชั้น (Multilayer) ทำให้วัสดุดูดซับสามารถดูดซับสารได้เรื่อยๆ อย่างไม่มีขีดจำกัดหรือไม่เกิดจุดอิ่มตัวของวัสดุดูดซับ เป็นกระบวนการดูดซับทางกายภาพสามารถอธิบายความสัมพันธ์ของปริมาณการดูดซับบนวัสดุดูดซับแบบหลายชั้น ดังสมการ (2.3)

$$q_e = K_f C_e^n \quad \text{สมการ (2.3)}$$

- เมื่อ q_e คือ ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับบนวัสดุดูดซับ ณ ภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
- C_e คือ ความเข้มข้นของสารละลาย ณ ภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
- n คือ ค่าคงที่ของฟรอนด์ลิช (Freundlich intensity parameter) (ลิตรต่อมิลลิกรัม)
- K_f คือ ค่าคงที่สมการการดูดซับแบบหลายชั้นของฟรอนด์ลิช
- จากสมการ (2.3) สามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของเส้นตรงได้ดังสมการ (2.4)

$$\ln q_e = \ln K_f + \frac{1}{n} C_e \quad \text{สมการ (2.4)}$$

ค่าคงที่ของ ฟรอนด์ลิช (n) และค่าคงที่สมการการดูดซับของฟรอนด์ลิช (K_f) คำนวณได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln q_e$ และ $\ln C_e$ โดยความชัน (Slope) คือ $1/n$ และจุดตัดแกน y (Intercept) คือ $\ln K_f$ ^(2,16) ตามสมการ (2.4) และภาพประกอบ 42



ภาพประกอบ 42 ลักษณะกราฟของ Freundlich adsorption isotherm

โดยสามารถสังเกตความสามารถในการดูดซับของวัสดุดูดซับ ได้จากลักษณะของกราฟที่ได้จากค่า $\frac{1}{n}$ ได้ดังนี้

ถ้า $\frac{1}{n} = 1$ แสดงว่า ไอโซเทิร์มของการดูดซับเป็นเส้นตรง

ถ้า $\frac{1}{n} < 1$ แสดงว่า ความสามารถในการดูดซับของวัสดุดูดซับจะต่ำ ในทุกค่าของความเข้มข้น C_e หรือกล่าวว่ามีปริมาณพื้นผิวบนวัสดุดูดซับในปริมาณจำกัดในการดูดซับ

ถ้า $\frac{1}{n} > 1$ แสดงว่า ความสามารถในการดูดซับของวัสดุดูดซับจะมาก หรือกล่าวว่ามีบริเวณพื้นที่ผิวของวัสดุดูดซับมีปริมาณมากในการดูดซับ⁽¹¹⁾

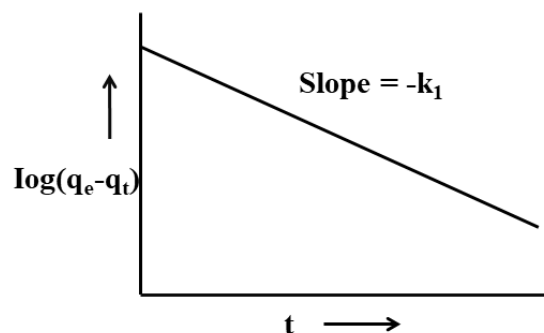
6.3.3 จลนศาสตร์การดูดซับ (Kinetic of adsorption)

เป็นการศึกษาอัตราเร็วการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการดูดซับ โดยใช้แบบจำลอง Lagergren's pseudo-first-order และ Ho's pseudo-second-order สมการ Pseudo-first Order แสดงดังสมการ (2.5) และ (2.6)

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad \text{สมการ (2.5)}$$

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1 t}{2.303} \quad \text{สมการ (2.6)}$$

- เมื่อ q_e คือ ปริมาณในการดูดซับของวัสดุดูดซับ ณ เวลาสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 q_t คือ ปริมาณในการดูดซับของวัสดุดูดซับ ณ เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 k_1 คือ ค่าคงที่ของอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง Pseudo-first order (min^{-1})
 t คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)



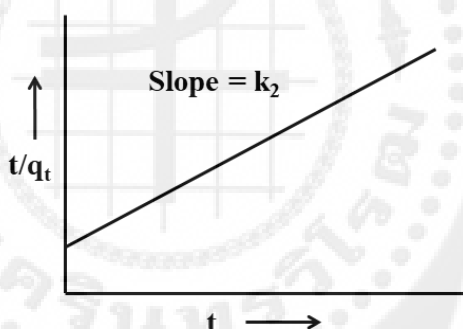
ภาพประกอบ 43 ลักษณะกราฟของ Pseudo-first order

นำข้อมูลจากการศึกษาผลความเข้มข้นและอุณหภูมิของการดูดซับจากสมการ (2.6) แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log (q_e - q_t)$ กับ t ได้กราฟเส้นตรงแสดงในภาพประกอบ 41 ค่าคงที่ของอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง Pseudo-first order หาได้จากความชัน (slope) คือ $-k_1$ และ q_e สามารถหาจุดตัดของเส้นตรงได้ สมการ Pseudo-second order แสดงดังสมการ (2.7) และ (2.8)

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2 (q_e - q_t) \quad \text{สมการ (2.7)}$$

$$\frac{t}{qt} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad \text{สมการ (2.8)}$$

เมื่อ k_2 คือ ค่าคงที่ของอัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่สอง Pseudo-second order ($\text{g mg}^{-1} \text{min}^{-1}$)



ภาพประกอบ 44 ลักษณะของ Pseudo-second order

นำข้อมูลผลความเข้มข้นและอุณหภูมิของการดูดซับจากสมการ (2.8) มาเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง t/qt กับ t จะได้กราฟเส้นตรง ดังแสดงในภาพประกอบ 39 ค่าคงที่ของอัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่สอง Pseudo-second order หาได้จากความชัน (slope) คือ k_2 และ $1/q_e^2$ สามารถหาจุดตัดแกนเส้นตรง⁽⁵⁰⁻⁵¹⁾ ดังแสดงในภาพประกอบ 44

7. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Belbachir และคณะ⁽⁵²⁾ ศึกษาการดูดซับสี Bezathren-Blue, Bezathren-Green และ Bezathren-Red ด้วยวัสดุดูดซับจากโซเดียมเบนโทไนต์ (Bt-Na+) โดยศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับได้แก่ ความเข้มข้นของสีย้อม ความเป็นกรด-ด่างของสีย้อม เวลา ผลการศึกษาพบว่า โซเดียมเบนโทไนต์มีความสามารถในการดูดซับรวดเร็วและดูดซับได้ดีที่ค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำสุด ความสามารถในการดูดซับสูงสุดของสี Bezathren-Blue, Bezathren-Green และ Bezathren-Red เท่ากับ 35.08, 32.88 และ 48.52 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ สำหรับเวลาที่สูงที่สุดใช้ในการดูดซับสี Bezathren-Blue ใช้เวลา 15 นาทีและใช้เวลา 45 นาที ในการดูดซับสีย้อมอื่นๆ

Geetha และคณะ⁽⁵⁴⁾ เตรียมวัสดุดูดซับจากผงโซเดียมแอลจีเนต 1 กรัม ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร และเติมน้ำผึ้ง 1 (w/v) เมื่อได้สารละลายโซเดียมแอลจีเนตที่ผสมน้ำผึ้งแล้ว จากนั้นนำมาหยดในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 1 (w/v) ต่อน้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร กวนสารละลายที่หยดลง สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ด้วยเครื่องกวนสารละลายเป็นเวลา 240 นาที ล้างทำความสะอาด และอบให้แห้งภายใต้สุญญากาศ ทำให้ได้วัสดุดูดซับที่มีอนุภาคระดับนาโนที่อยู่ในช่วง 102 นาโนเมตร ปัจจัยที่ศึกษา คือ ความเข้มข้นของสารละลาย ปริมาณของวัสดุดูดซับ เวลา และระดับความเป็นกรด-ด่าง ผลการศึกษาพบว่า วัสดุดูดซับที่เตรียมจากโซเดียมแอลจีเนต/น้ำผึ้งสามารถดูดซับ สารละลายโครเมียม (VI) ไอออนเท่ากับร้อยละ 93.5 ต่อปริมาณของวัสดุดูดซับเท่ากับ 0.02-0.08 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นเวลา 180 นาทีที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 4

Mohammadi และคณะ⁽⁵¹⁾ เตรียมวัสดุดูดซับจากเมล็ดทานตะวัน โดยการบดและกรองให้มีขนาดอนุภาคเท่ากับ 250 ไมโครเมตร แล้วนำมาแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ล้างให้สะอาด และอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส จากนั้นนำผงวัสดุดูดซับที่เตรียมได้มาทำการ ดูดซับสี ย้อมประเภทสไคเร็กซ์ ในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมย้อมผ้าฝ้าย ปัจจัยที่ศึกษา คือ ปริมาณของวัสดุดูดซับ อุณหภูมิการดูดซับ และระดับความเป็นกรด-ด่าง ผลการศึกษาพบว่า วัสดุดูดซับที่ได้จากเมล็ดทานตะวันสามารถดูดซับสีย้อมได้ 169.5 มิลลิกรัมต่อกรัมของวัสดุดูดซับ ภายใต้อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง ระหว่าง 2.0 และ 2.2

Silva และคณะ⁽¹⁸⁾ เตรียมวัสดุดูดซับจากรังไหม นำรังไหมตัดให้เป็นชิ้นเล็ก แล้วนำไปสกัด โปรตีนเซรีซินด้วยหม้อหนึ่งฆ่าเชื้อ ทำให้ได้สารละลายเซรีซิน จากนั้นนำผงโซเดียมแอลจีเนตมี สัดส่วนร้อยละ 1, 2 และ 3 ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร และเติมสารละลายเซรีซินร้อยละ 2.5 เมื่อได้ สารผสมแล้ว จากนั้นนำสารผสมมาหยดในสารละลาย 2 ชุด คือ 1.แคลเซียมคลอไรด์ - เปอร์เซนต์ ต่อน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร และ 2. สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ร้อยละ 3 ต่อน้ำแอลกอฮอล์ 100 มิลลิลิตร กวนสารผสมที่หยดลงสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ทั้ง 2 ชุด ด้วย อุณหภูมิ 40, 100, 125

และ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เกิดการ Crosslinking process เกิดขึ้น ภายหลังจาก เกิด Crosslinking process ไอออนของโซเดียมจะแลกเปลี่ยนกับไอออนของแคลเซียม จึงทำให้เกิด อนุภาคของเซอรีซิน/แคลเซียมแอลจิเนต ได้วัสดุดูดซับที่ต้องการ บัณฑิตที่ศึกษา คือ Thermal cross-linked particles ผลการศึกษาพบว่า ตัวดูดซับที่ผ่านกระบวนการ Cross-linked ที่อุณหภูมิ 125 และ 150 องศาเซลเซียส พบว่าโครงสร้างของวัสดุดูดซับเปลี่ยนทำให้สามารถละลายน้ำได้เพิ่มขึ้น และ ความสามารถในการดูดซับลดลง ดังนั้นวัสดุดูดซับที่ผ่านกระบวนการ Cross-linked ที่ 100 องศาเซลเซียส พบว่าวัสดุดูดซับชุดที่ 1. สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ต่อน้ำกลั่น สามารถดูดซับ ทองแดง (Cu^{2+}) เท่ากับร้อยละ 72.2 ต่อวัสดุดูดซับ 0.08 กรัม และสามารถดูดซับสังกะสี (Zn^{2+}) เท่ากับร้อยละ 65.2 ต่อวัสดุดูดซับ 0.07 กรัม และชุดที่ 2 สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ต่อน้ำ แอลกอฮอล์สามารถดูดซับทองแดง (Cu^{2+}) เท่ากับร้อยละ 74.5 ต่อวัสดุดูดซับ 0.08 กรัม และสามารถดูดซับสังกะสี (Zn^{2+}) เท่ากับร้อยละ 63.9 ต่อวัสดุดูดซับ 0.065 กรัม

Xinqing และคณะ⁽⁵⁵⁾ ศึกษาการดูดซับสี acid yellow 34, Copper (II) phthalocyanine-3,4',4''-tetrasulfonic acid (acidic dyes) และสีเมทิลีนบลูด้วยวัสดุดูดซับจากผงเซอรีซิน (silk sericin) นำผงเซอรีซินอบคั่งคั้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส บัณฑิตที่ศึกษา คือ พื้นผิวของวัสดุดูดซับ และค่าความเป็นกรด-ด่าง การทดลองครั้งนี้ใช้วัสดุดูดซับ 0.04 กรัมต่อปริมาตรน้ำย้อม 40 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ผลการศึกษาพบว่า ผงเซอรีซินสามารถดูดซับ Acid yellow 34 ได้มากที่สุด โดยประสิทธิภาพการดูดซับเท่ากับ 1.286 มิลลิกรัมต่อกรัมของวัสดุดูดซับ ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 1.5

Zhao และคณะ⁽¹⁶⁾ ได้ทำการศึกษาการเตรียมวัสดุดูดซับจาก Sericin/beta-cyclodextrin/PVA composite nanofiber ด้วยวิธีการ electrospun และเกิด thermal crosslinking โดยใช้กรดซิตริก (Citric acid) เป็นตัวสารเชื่อมขวาง (Crosslinking agents) พบว่าแบบการทดสอบ เป็น 3 ชุดโดยมีสัดส่วนแบ่งเป็น sericin/beta-cyclodextrin/PVA composite nanofiber, beta-cyclodextrin/PVA composite nanofiber และ PVA nanofiber บัณฑิตที่ศึกษา คือ ความเข้มข้นของ สารละลาย ปริมาณของวัสดุดูดซับ เวลา และระดับความเป็นกรด-ด่าง ผลการศึกษาพบว่า วัสดุดูดซับ sericin/beta-cyclodextrin/PVA composite nanofiber สามารถดูดซับสีย้อม เมทิลีนบลู (Methylene blue) ได้มากที่สุดมีค่าการดูดซับเท่ากับ 187.97 มิลลิกรัมต่อกรัมของวัสดุดูดซับ ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 240 นาที ที่ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 8

นิตยาพร และคณะ⁽⁵⁵⁾ ศึกษาการดูดซับสีเมทิลีนบลูด้วยวัสดุดูดซับจากกากชาเหลือใช้ โดย ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับได้แก่ ปริมาณของกากชา ความเข้มข้นของสีย้อม (6.5-65

มิลลิกรัมต่อลิตร) ความเป็นกรด-ต่างของสีย้อม และอุณหภูมิที่เหมาะสมในการดูดซับ (25-95 องศาเซลเซียส) โดยการตรวจวัดค่าดูดกลืนแสงของสีเมทิลีนบลูด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปี ที่ความยาวคลื่น 667 nm พร้อมทั้ง ศึกษาสภาพพื้นผิวก่อนและหลังการดูดซับสีย้อมของกากชาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ผลการศึกษาพบว่ากากชาสามารถดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 13 มิลลิกรัมต่อกรัมด้วยกากชาปริมาณ 0.1 กรัม มีค่าประมาณ 12.70 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่ความเป็นกรด-ต่างเท่ากับ 8 และอุณหภูมิที่กากชาสามารถดูดซับสีย้อมได้ดีที่สุดคืออุณหภูมิตั้งแต่ 70 องศาเซลเซียส

Qingwen และคณะ⁽⁵³⁾ ศึกษาการดูดซับสีเบสิคและสีแอซิดด้วยวัสดุดูดซับจาก MCA-E_{0.7}/CMC-g-PDMAAC microspheres ผลการศึกษาพบว่า MCA-E_{0.7}/CMC-g-PDMAAC microspheres โดยประสิทธิภาพการดูดซับของสีเบสิค (เมทิลีนบลู: Methylene blue) และสีแอซิด (Orange II) เท่ากับ 710.50 และ 200.50 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที และมีค่าความเป็นกรด-ต่างของสีเบสิคและสีแอซิด ที่ค่าความเป็นกรด-ต่างมากกว่า 4 กรดและน้อยกว่า 3 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาการคายซับของวัสดุดูดซับ MCA-E_{0.7}/CMC-g-PDMAAC microspheres ที่ผ่านการดูดซับแล้ว โดยพบว่าวัสดุดูดซับที่ผ่านการดูดซับด้วยสีเบสิคสามารถคายซับที่ความเป็นกรด-ต่างเท่ากับ 3 และสีแอซิดเท่ากับ 11 เปอร์เซ็นต์การคายซับสามารถคายซับได้ 98.54% สำหรับสีเบสิค และ 83.07% สำหรับสีแอซิด ใช้เวลาเท่ากับ 20 นาที

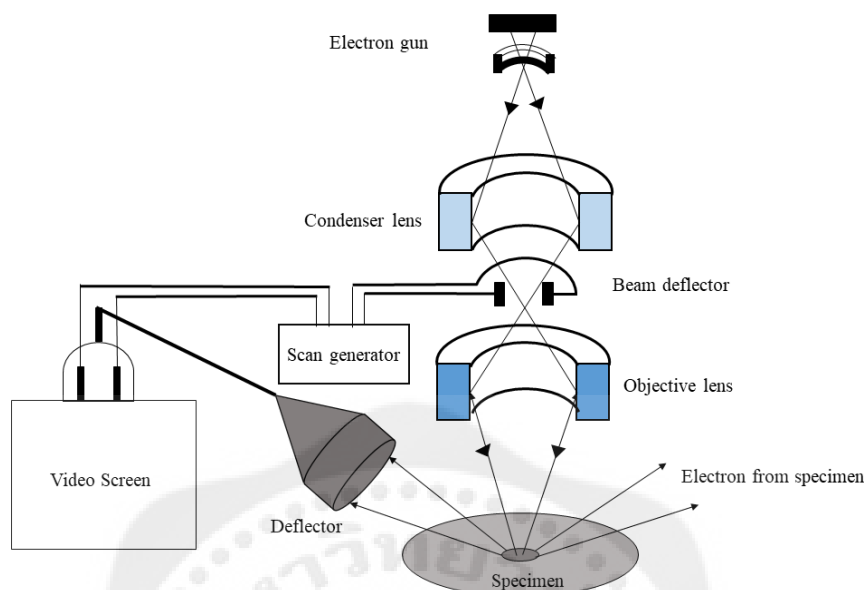
8. เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ (Instrument technique)

8.1 การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยา

1. การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยา กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM)

เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ลำแสงอิเล็กตรอนฉายหรือส่องกราดไปบนผิวของตัวอย่างที่ต้องการตรวจสอบให้ได้ข้อมูลลักษณะพื้นผิวปรากฏเป็นภาพขยายที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าหรืออาจบันทึกภาพที่บนแผ่นฟิล์ม ภาพที่ถูกบันทึกเป็นภาพลักษณะ 3 มิติ กำลังขยาย 20-80,000 เท่า โดยหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก จากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงาน จะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) ขึ้น สัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึก และแปลงไปเป็นสัญญาณทาง

อิเล็กทรอนิกส์ แล้วถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอมอนิเตอร์ และสามารถบันทึกภาพได้^(46,57-58) แสดง
 ดังภาพประกอบ 45



ภาพประกอบ 45 การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ที่มา: นิวัฒน์ ศรีสวัสดิ์, ภิญญา พานิชพันธ์, พินทิพ รื่นวงษา. มหัตถรรยนาโนเทคโนโลยี [อินเทอร์เน็ต]. กรุงเทพฯ: สถาบันนวัตกรรมและพัฒนาระบบการเรียนรู้มหาวิทยาลัยมหิดล; [เข้าถึงเมื่อ 24 ก.พ. 2559]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.il.mahidol.ac.th/e->

2. เครื่องวัดค่าศักย์ซีต้า (Zeta potential)

ค่าศักย์ซีต้า คือ ค่าความต่างศักย์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าบริเวณพื้นผิวอนุภาคกับศักย์ไฟฟ้าในชั้นสารละลาย ซึ่งค่าศักย์ซีต้าที่ได้สามารถทำนายค่าความคงตัวของการกระจายตัวของอนุภาคได้ อนุภาคที่มีค่าศักย์ซีต้าเป็นบวกหรือลบมากจะเกิดการหักล้างต่อกันเกิดเสถียรภาพการกระจายตัว แต่ถ้าอนุภาคมีค่าเป็นบวกหรือลบน้อยทำให้ไม่มีแรงป้องกันอนุภาคอื่นที่เข้ามา ดังนั้นจึงไม่เกิดเสถียรภาพการกระจายตัวหรือเกิดการรวมตัวโดยหลักการทำงานของเครื่องวัดค่าศักย์ซีต้าคือ การวัดอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของอนุภาคเมื่อทำให้อยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าโดยใช้ (Laser doppler velocimetry: LDV) ค่าศักย์ซีต้าขึ้นกับค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำ ซึ่งอนุภาคแขวนลอยจะเสถียรเมื่อค่าศักย์ซีต้ามีค่ามากกว่า +30 มิลลิโวลต์ หรือ น้อยกว่า -30 มิลลิโวลต์ สภาวะที่ค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำ (กรด) จะให้ค่าศักย์ซีต้าสูงกว่าสภาวะที่ค่าความเป็นกรด-ด่างสูง (ด่าง) ถ้าค่าศักย์ซีต้ามีค่าอยู่ในช่วง -30 ถึง 30 มิลลิโวลต์ หรือประมาณศูนย์ สารแขวนลอยจะไม่เสถียร จะมีการเกาะกันเป็นก้อนและตกตะกอน เรียกจุดที่ศักย์ซีต้าเท่ากับศูนย์ว่า "Isoelectric point"⁽⁵⁹⁾



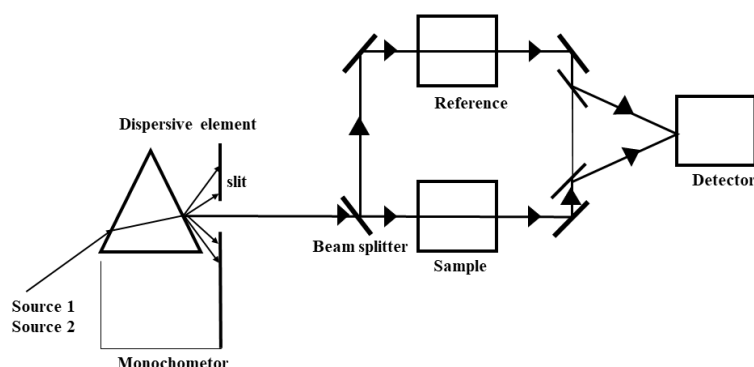
ภาพประกอบ 46 เครื่องวัดความต่างศักย์บนผิวอนุภาค (Zetasizer)

ที่มา: Spectra Research Corporation. Nanobrook omni particle size analyzer [Internet]. 2016 [cited 2016 Nov 1]. Available from: <http://www.spectraresearch.com/product/nanobrook-omni-particle-size-analyzer-2/>

8.2 เครื่องวัดการดูดกลืนแสงของสาร (UV-Visible spectrophotometer)

เป็นเครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) จะให้ความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิดแสง (Light source) แหล่งกำเนิดแสงในเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์จะต้องให้รังสีในช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการอย่างต่อเนื่องและคงที่ตลอดเวลา รวมทั้งมีความเข้มแสงที่มากพอ สำหรับความยาวคลื่นในช่วงอัลตราไวโอเล็ตหรือ รังสียูวี (UV) จะใช้หลอดดิวเทอเรียม (Deuterium lamp) เป็นแหล่งกำเนิดแสง ซึ่งให้แสงในช่วง 185-375 นาโนเมตร ส่วนหลอดทังสเตน (Tungsten filament lamp) จะให้ความยาวคลื่นครอบคลุมช่วงแสงที่มองเห็นได้ (Visible light) คือตั้งแต่ 320-2500 นาโนเมตร หลักการของหลอดดิวเทอเรียม และหลอดไฟทังสเตนธรรมดา จะคล้ายกัน คือให้กระแสไฟฟ้าผ่านเข้าไปจนกระทั่งอะตอมของดิวเทอเรียมที่อยู่ในสภาวะเร้าคายพลังงานออกมา ส่วนหลอดทังสเตนจะร้อนและเปล่งรังสีออกมา ดังนั้นจึงเป็นเครื่องมือที่สามารถตรวจวัดปริมาณแสงและค่าความเข้ม (Intensity) ในช่วงรังสียูวีและช่วงแสงขาวที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืน ตัวอย่าง โดยที่ความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของสารที่อยู่ในตัวอย่างซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อนและสารอนินทรีย์ ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้ได้

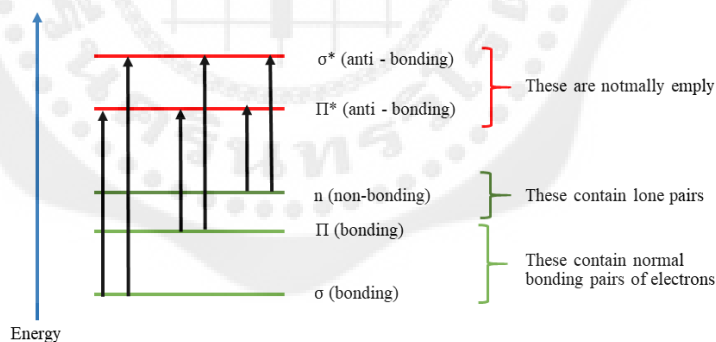
โดยทั่วไปจะมีส่วนประกอบหลักๆ ที่เหมือนกัน ได้แก่ แหล่งกำเนิดแสง (Light source) เกรตติ้ง (Grating) หรือโมโนโครเมเตอร์ (Monochromator) เซลล์ที่บรรจุ (Cell or cuvette) สารตัวอย่าง (Sample) และเครื่องตรวจ (Detector) ส่วนการบันทึกและแปรผลสัญญาณ (Decoder and processor) แสดงดังภาพประกอบ 47



ภาพประกอบ 47 หลักการทำงานของเครื่อง UV-Visible spectrophotometer

ที่มา: ปิ่นสุภา ปิติรักษ์สกุล. การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของพอลิเมอร์ polymer characterization. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง;2545.

สมบัติในการดูดกลืนแสงของสารเมื่อโมเลกุลของตัวอย่างถูกฉายด้วยแสงในช่วงรังสียูวีหรือแสงขาวที่มีพลังงานเหมาะสมจะทำให้อิเล็กตรอนภายในอะตอมเกิดการดูดกลืนแสงแล้วเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในชั้นที่มีระดับพลังงานสูงกว่า แสดงดังภาพประกอบ 48 และสามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของแสง (Frequency of light) และพลังงาน (Energy of light) ดังสมการ (2.9) และสมการ (2.10)



ภาพประกอบ 48 การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ที่มา: Jim Clark. UV-Visible adsorption spectra [Internet]. 2016 [cited 2016 Nov 1]. Available from: <http://www.chemguide.co.uk/analysis/uvvisible/theory.html>

$$E = h\nu \quad \text{สมการที่ (2.9)}$$

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad \text{สมการที่ (2.10)}$$

เมื่อ	E	คือ พลังงาน (Energy of light)
	h	คือ ค่าคงที่ของแพลนค์ (Planck's constant)
	V	คือ ความถี่ของแสงที่ถูกดูดกลืน (Frequency of light)
	c	คือ ความเร็วของแสง

ดังนั้นพลังงานของแสงอัลตราไวโอเล็ตและแสงที่ตามองเห็นจึงมีค่าระหว่าง 36-72 และสูงกว่า $143 \text{ kcal mol}^{-1}$ ตามลำดับ เมื่อความถี่วัดปริมาณของแสงที่ผ่านหรือสะท้อนมาจากตัวอย่าง เทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆ ตามกฎของ Beer-Lambert ค่าการดูดกลืนแสง ของสารจะแปรผันกับจำนวนโมเลกุลที่มีการดูดกลืนแสง ดังนั้นจึงสามารถใช้เทคนิคนี้ในระบบ ชนิดและปริมาณของสารต่างๆ ที่มีอยู่ในตัวอย่างได้^(45-46,60)



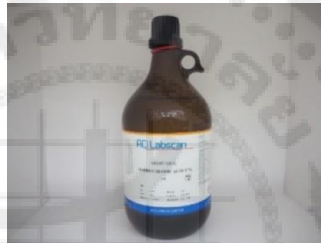
บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงสารเคมี อุปกรณ์ เครื่องมือ ขั้นตอนการเตรียมวัสดุดูดซับ การศึกษา ลักษณะทางสัณฐานวิทยา สมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงเคมีของวัสดุดูดซับ การศึกษาสมบัติ การดูดซับและการคายซับของวัสดุดูดซับ

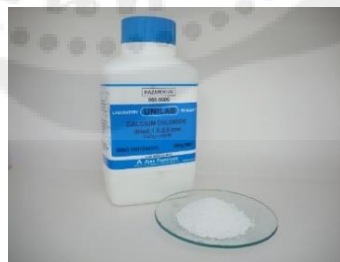
1. สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1.1 กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid: HCl)



ภาพประกอบ 49 กรดไฮโดรคลอริก

1.2 แคลเซียมคลอไรด์ (Calcium chloride: CaCl₂)



ภาพประกอบ 50 แคลเซียมคลอไรด์

1.3 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide: NaOH)



ภาพประกอบ 51 โซเดียมไฮดรอกไซด์

1.4 ผงแอลจีเนต (Sodium alginate powder) ยี่ห้อ Sigma-aldrich



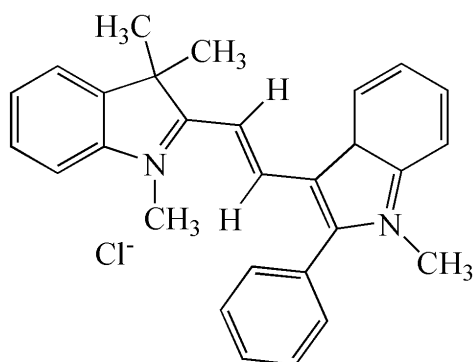
ภาพประกอบ 52 ผงแอลจีเนต

1.5 รังไหมพันธุ์ J108 (Cocoon) ได้รับความอนุเคราะห์จากกรมหม่อนไหม กระทรวงเกษตรและสหกรณ์

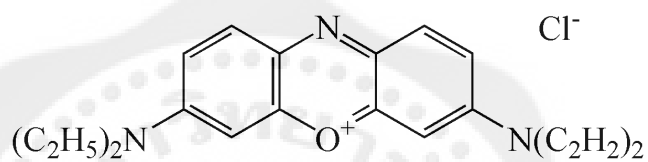


ภาพประกอบ 53 รังไหมพันธุ์ J108

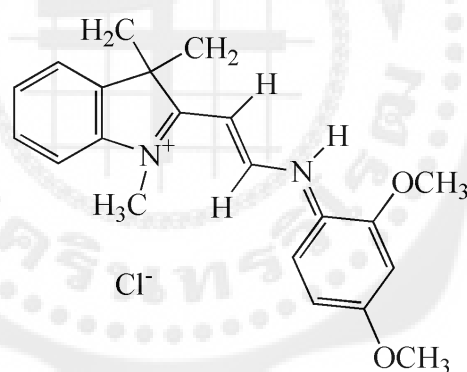
1.6 สีเบสิค (Basic dyes) ได้แก่



ภาพประกอบ 54 โครงสร้างสี Basic orange 22 300%

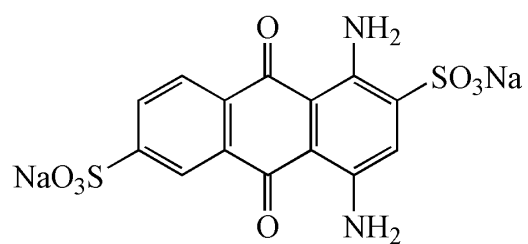


ภาพประกอบ 55 โครงสร้างสี Astrazon Blue BG 200% 01

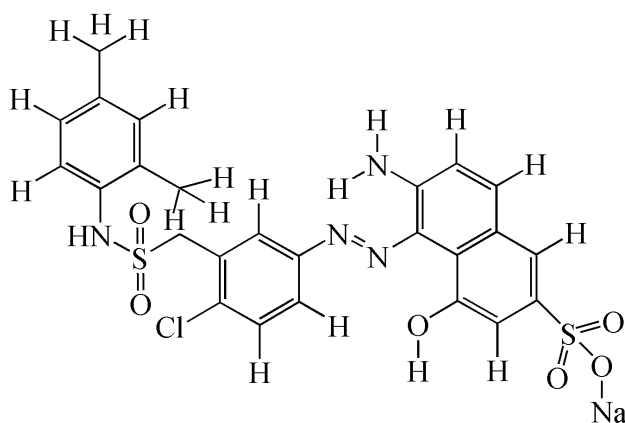


ภาพประกอบ 56 โครงสร้างสี Sawacryl Yellow 3GL 200%

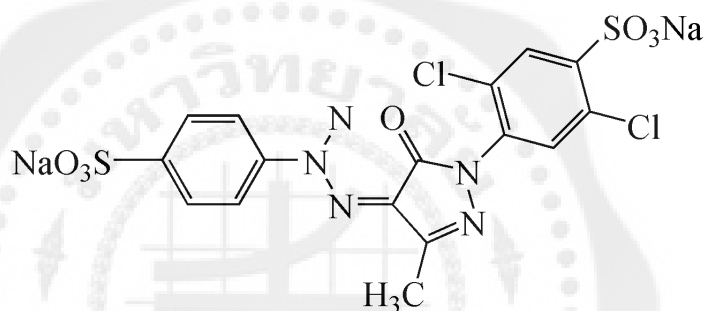
1.7 สีแอซิด (acid dyes) ได้แก่



ภาพประกอบ 57 โครงสร้างสี Lanasyne Navy M-DNL



ภาพประกอบ 58 โครงสร้างสี Nylosan Red N-2RBL



ภาพประกอบ 59 โครงสร้างสี Yellow GC

2. อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

- 2.1 กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 เส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร
- 2.2 กระดาษเซลโลเฟน
- 2.3 กระบอกตวง
- 2.4 ขวดขนาด 250 มิลลิลิตร
- 2.5 ช้อนตักสาร
- 2.6 เข็อก
- 2.7 ตะแกรงร่อน (sieve)
- 2.8 ถุงมือ
- 2.9 แท่งแม่เหล็กสำหรับกวนสาร
- 2.10 ปีกเกอร์
- 2.11 บีเปต
- 2.12 หลอดหยด (Syringe)

3. เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

- 3.1 กรองกรวยระบบสุญญากาศ (Buchner funnel)
- 3.2 กระดาษวัดค่าพีเอช (pH indicator strips)
- 3.3 ขวดพิคโนมิเตอร์ (Pycnometer)
- 3.4 เครื่องเขย่า ยี่ห้อ Orbital Shaker รุ่น GS-20
- 3.5 เครื่องชั่งดิจิตอล ยี่ห้อ Sartorius Model BSA224S-CW 220g/0.1mg
- 3.6 เครื่องชั่ง ยี่ห้อ Mattles Type BDI20I 1200g x .lg
- 3.7 เครื่องผสมสาร (Stirrer) ยี่ห้อ M TOPS รุ่น MS-300HS
- 3.8 เตอบไมโครเวฟ ยี่ห้อ Electrolux
- 3.9 ถ้วยกระเบื้อง (Crucible)
- 3.10 เวอร์เนียคาลิปเปอร์ (Vernier Calipers)
- 3.11 หม้อนึ่งฆ่าเชื้อ (Autoclave) ยี่ห้อ IWAKI รุ่น ACV-3167

4. เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

- 4.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM)



ภาพประกอบ 60 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ยี่ห้อ JEOL
รุ่น JSM-6380 LV, USA

4.2 เครื่องวัดความต่างศักย์บนผิวอนุภาค (Zetasizer)



ภาพประกอบ 61 เครื่องวัดความต่างศักย์บนผิวอนุภาค (Zetasizer)

ที่มา: UiO:Institute of clinical dentistry. Zetasizer Nano ZS [Internet]. 2013 [cited 2018 Feb 12]. Available from: <https://www.odont.uio.no/iko/english/about/organization/units/biomaterials/Capacities/zetasizer/>

4.3 เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis spectrophotometer)

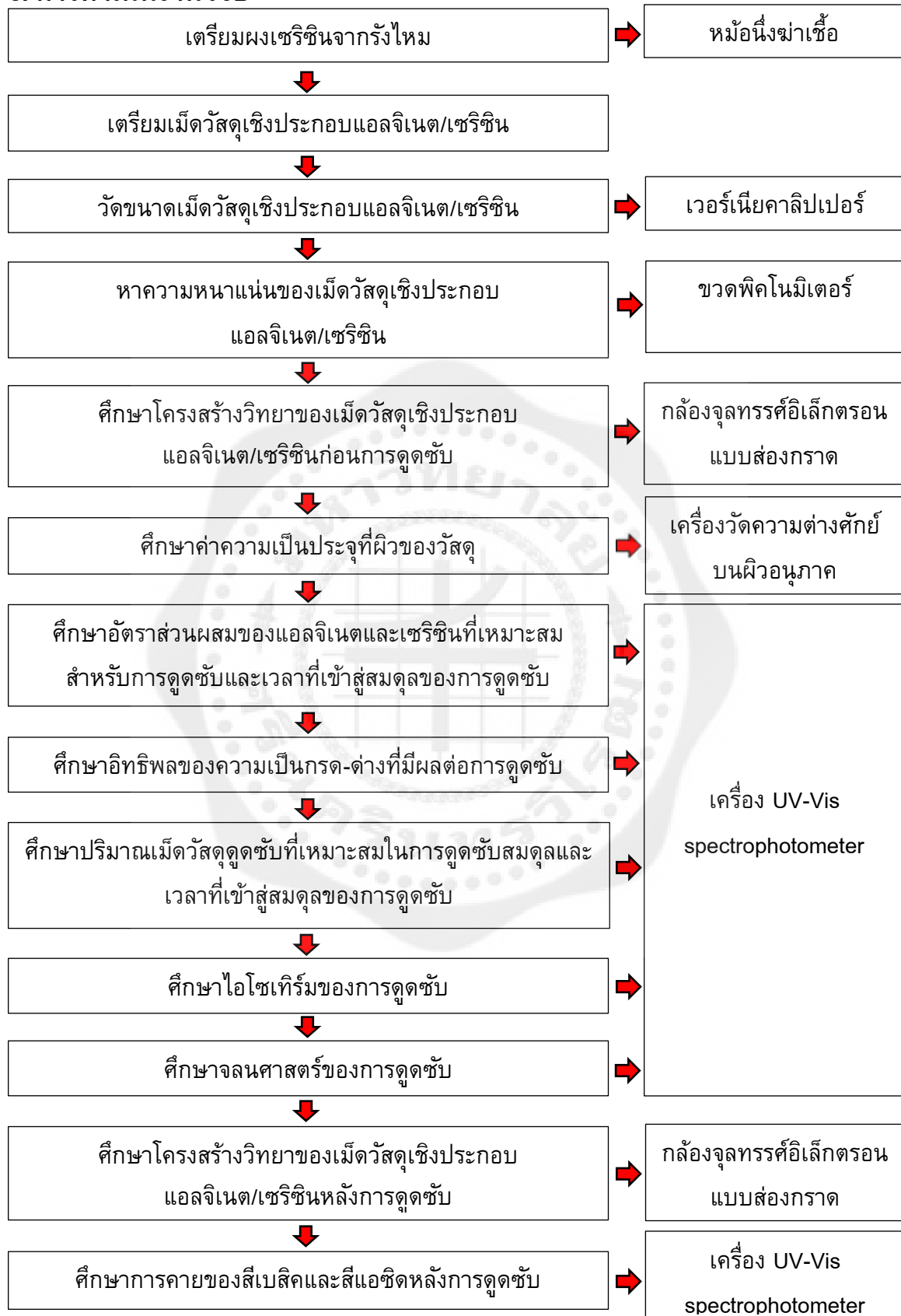


ภาพประกอบ 62 เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis spectrophotometer) ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น UV-2450

5. สถานที่ดำเนินงานวิจัย

- 5.1 ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
- 5.2 ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
- 5.3 สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย

6. การดำเนินงานวิจัย

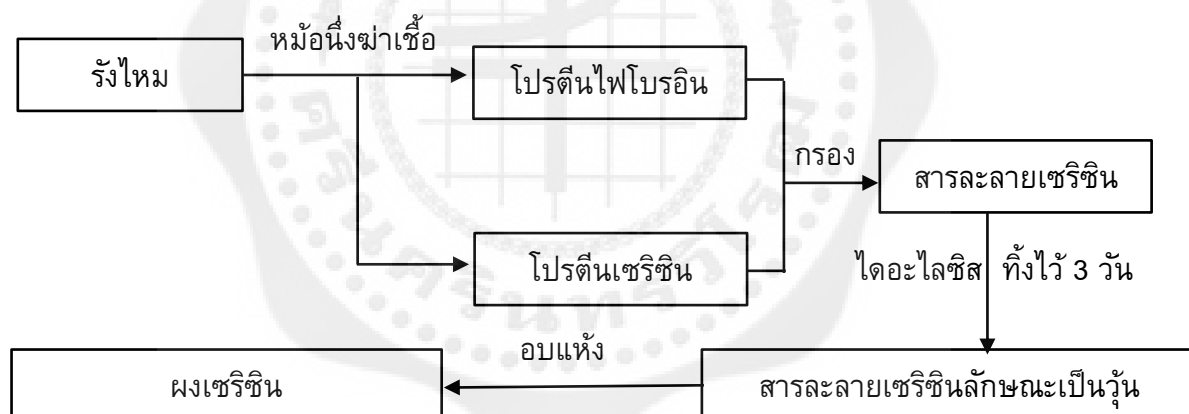


ภาพประกอบ 63 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

7. ขั้นตอนการวิจัย

7.1 การเตรียมผงเซรีซินจากรังไหม

1. ทำความสะอาดและตัดรังไหม ให้มีขนาด 0.5*0.5 เซนติเมตร อบรังไหมที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที
2. สกัดโปรตีนเซรีซินจากรังไหมด้วยวิธี High pressure high temperature ในหม้อหนึ่งฆ่าเชื้อ โดยซังรังไหมด้วยอัตราส่วน 1 กรัมต่อน้ำ 30 มิลลิกรัม ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
3. กรองด้วยตะแกรงร่อนเพื่อแยกสารละลายเซรีซินกับไฟโบรอินออกจากกัน
4. กรองสารละลายเซรีซินด้วยกระดาษกรองและกรวยกรองระบบสุญญากาศ เพื่อแยกสารละลายเซรีซินออกจากสิ่งเจือปนขนาดเล็ก
5. ทำการไดอะไลซิสด้วยกระดาษเซลโลเฟน เพื่อแยกน้ำออกจากสารละลายเซรีซินเป็นเวลา 3 วัน แช่ไว้ในตู้เย็น
6. จะได้สารละลายเซรีซินลักษณะเป็นวุ้น ทำการอบแห้งด้วยตู้อบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จนแห้งแล้วนำมาบดเป็นผง



ภาพประกอบ 64 การเตรียมผงเซรีซิน

7.2 การเตรียมเม็ดแอลจิเนต

1. เตรียมแอลจิเนต 2 กรัม ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร
2. เตรียมสารละลายแอลจิเนตเพื่อขึ้นรูปด้วยวิธีการเกิดเจล (Gelation process) โดยทำการปั่นผสมสารด้วยแท่งแม่เหล็กบนเครื่องผสมสาร (Stirrer) จนผงแอลจิเนตละลายระยะเวลาประมาณ 30 นาที ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส
3. ทำการเตรียมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl₂) ที่ส่วนผสมของแคลเซียมคลอไรด์ : น้ำกลั่น ด้วยอัตราส่วน 1 : 1 ปริมาณ 100 มิลลิลิตร

4. ทำการหยดสารละลายแอลจิเนตด้วยหลอดฉีดยา ให้อยู่ในรูปทรงกลม (Beads) ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่เตรียมไว้ข้างต้น
5. นำเม็ดแอลจิเนตที่อยู่ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ล้างด้วยน้ำกลั่น
6. เก็บเม็ดแอลจิเนตไว้ในน้ำกลั่น ก่อนนำไปใช้ในการดูดซับ

7.3 การเตรียมวัสดุเชิงประกอบเซริซิน/แอลจิเนต 5 อัตราส่วน

1. ละลายผงแอลจิเนต จำนวน 2 กรัม ในน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร และทำการปั่นผสมผงแอลจิเนตจนละลายหมด ด้วยแท่งแม่เหล็กบนเครื่องผสมสาร ระยะเวลาประมาณ 30 นาที ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

2. ทำการชั่งเซริซิน 5 อัตราส่วน คือ

- ผงเซริซิน 1 กรัม = ผงเซริซิน 1% ของสารละลาย
- ผงเซริซิน 2 กรัม = ผงเซริซิน 2% ของสารละลาย
- ผงเซริซิน 3 กรัม = ผงเซริซิน 3% ของสารละลาย
- ผงเซริซิน 4 กรัม = ผงเซริซิน 4% ของสารละลาย
- ผงเซริซิน 5 กรัม = ผงเซริซิน 5% ของสารละลาย

จากการศึกษาการผสมผงเซริซินในวัสดุเชิงประกอบเซริซิน/แอลจิเนตได้สูงสุดที่ 5 กรัม เนื่องจากเมื่อเพิ่มผงเซริซินเป็น 6 กรัม เม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน/แอลจิเนตไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเม็ดทรงกลมได้ จึงเลือกใช้ปริมาณผงเซริซินสูงสุดที่ 5 กรัม

3. นำผงเซริซินที่ชั่งไว้ ละลายในน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร จากนั้นทำการปั่นผสมสารด้วยแท่งแม่เหล็กบนเครื่องผสมสารเป็นเวลา 240 นาที ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

4. ผสมสารละลายเซริซินและสารละลายแอลจิเนต ด้วยเครื่องผสมสาร ระยะเวลาประมาณ 30 นาที ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

5. จากนั้นทำการเตรียมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ที่ส่วนผสมของแคลเซียมคลอไรด์ : น้ำกลั่น ด้วยอัตราส่วน 1 : 1 ปริมาณ 100 มิลลิลิตร

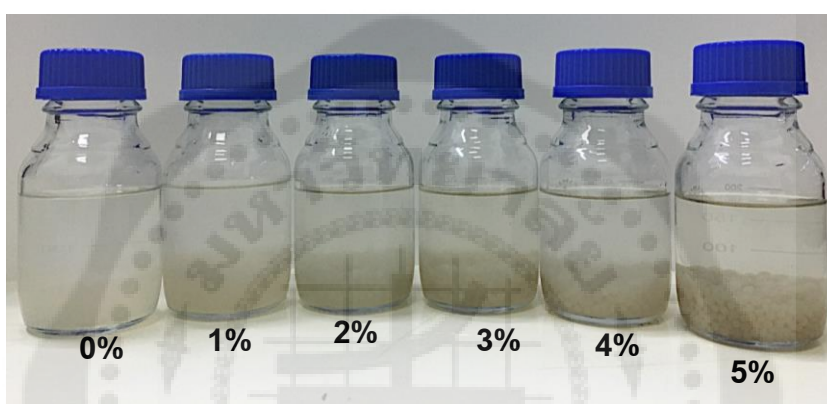
6. หยดสารละลายเซริซิน/แอลจิเนตทั้งหมดด้วยหลอดฉีดยา ให้อยู่ในรูปทรงกลม (Beads) ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่เตรียมไว้ข้างต้น

7. นำเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน/แอลจิเนตที่อยู่ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ล้างด้วยน้ำกลั่น

8. เก็บเม็ดวัสดุเชิงประกอบไว้ในน้ำกลั่น ก่อนนำไปใช้ในการดูดซับ



ภาพประกอบ 65 เตรียมวัสดุดูดซับ



ภาพประกอบ 66 ตัวอย่างวัสดุเชิงประกอบเซริซิน/แอลจิเนตโดยการขึ้นรูปด้วยกระบวนการเกิดเจล

7.4 การวัดขนาดและความหนาแน่นของเม็ตวัสดุเชิงประกอบเซริซิน/แอลจิเนต

ก. การวัดขนาดของเม็ตวัสดุเชิงประกอบเซริซิน/แอลจิเนต

1. เตรียมเม็ตวัสดุเชิงประกอบเซริซิน/แอลจิเนต ในอัตราส่วนของเซริซิน 0%, 1%, 2%, 3%, 4% และ 5% (w/v)
2. จากนั้นนำไปวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ตด้วยเวอร์เนียคาร์ลิปเปอร์ อย่างละ 3 ครั้ง
3. นำข้อมูลที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย



ภาพประกอบ 67 เวอร์เนียคาร์ลิปเปอร์

ข. การหาความหนาแน่นของเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน/แอลจิเนต

1. เตรียมเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน/แอลจิเนต ในอัตราส่วนของเซริซิน 0%, 1%, 2%, 3%, 4% และ 5% (w/v)

2. นำเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน/แอลจิเนตไปหาค่าความหนาแน่นโดยการใช้ขวดพิคโนมิเตอร์ ขนาด 50 มิลลิลิตร ซึ่งสามารถคำนวณความหนาแน่น แสดงดังสมการ (3.1)

$$G = \frac{(W - P)}{(W_1 - P) - (W_2 - W)} \quad \text{สมการ (3.1)}$$

เมื่อ	P	คือ น้ำหนักขวดพิคโนมิเตอร์
	W	คือ น้ำหนักขวดพิคโนมิเตอร์ + วัสดุดูดซับ
	W ₁	คือ น้ำหนักขวดพิคโนมิเตอร์ + น้ำ
	W ₂	คือ น้ำหนักขวดพิคโนมิเตอร์ + วัสดุดูดซับ + น้ำ



ภาพประกอบ 68 ขวดพิคโนมิเตอร์

7.5 การศึกษาค่าความเป็นประจุที่ผิวของวัสดุ ด้วยเครื่องวัดความต่างศักย์ (Zeta potential) บนผิวอนุภาค

1. เตรียมเซริซิน แอลจิเนต และเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจิเนต ตามเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจิเนต จนเม็ดวัสดุดูดซับแข็งตัว

2. บดเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจิเนต และเก็บตัวอย่างในที่มีความสะอาดสูง เพื่อป้องกันการกระเจิงของอนุภาคฝุ่นหรือสิ่งสกปรก

3. เติมน้ำเซริซิน ผงแอลจิเนต และผงวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจิเนต ลงในเซลล์วัดประจุที่ผิว (Flow cell)

4. นำเซลล์วัดประจุที่ผิวที่บรรจุตัวอย่างลงในเครื่องวัดความต่างศักย์

5. ปรับค่าความเป็นกรด-ด่างเพื่อวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของผงเซริซิน ผงแอลจินेट และผงวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจินेटให้อยู่ระหว่าง 4-10 โดยการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์และไฮโดรคลอริก

6. ใช้โปรแกรม Delsa™ Nano ในการทดลอง และเลือก SOP ให้ตรงกับชนิดของเซลล์ที่ใช้ในการบรรจุตัวอย่าง

7. วิเคราะห์ตัวอย่าง โดยทำการทดลองซ้ำจำนวน 3 ครั้งต่อ 1 ตัวอย่าง จะแสดง Zeta potential analysis data

8. ทำซ้ำตามข้อ 4-7 แต่เปลี่ยนตัวอย่างเป็น แอลจินेट และเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจินेट ตามลำดับ

9. นำข้อมูลที่ได้ มาสร้างเป็นกราฟ และวิเคราะห์ผล

7.6 การศึกษาสมบัติการดูดซับของวัสดุดูดซับ

ก. วิเคราะห์หาความยาวคลื่นด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer

1. ทำการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของสารละลายสีเบสิกและสีแอสิด ได้แก่ Basic orange 22 300%, Blue 3RL 200% และ Yellow 3GL 200% และสารละลายแอสิด ได้แก่ Red N-2RBL, Navy M-DNL และ Yellow GC ที่ไม่ผ่านการดูดซับมาก่อน ด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer โดยความยาวคลื่นที่วัดได้ แสดงดังตารางที่ 6

ตาราง 6 ความยาวคลื่นที่วัดจากเครื่อง UV-Vis spectrophotometer ของสีเบสิกและสีแอสิด

ชนิดของสี	ความยาวคลื่น (nm)
สีเบสิก	
● Basic orange 22 300%	497.0
● Blue BG 200% 01	641.5
● Yellow 3GL 200%	424.0
สีแอสิด	
● Red N-2RBL	303.5
● Navy M-DNL	576.0
● Yellow GC	400.5

2. นำสารละลายสีเบสิกและสีแอซิดที่ผ่านการดูดซับด้วยเม็ดวัสดุดูดซับในอัตราส่วนต่างๆ แล้วนำไปหาค่าการดูดซับแสงของสีย้อมด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer โดยใช้ความยาวคลื่นตามตารางที่ 6

3. นำไปหาเปอร์เซ็นต์ของการดูดซับของสีย้อม โดยสามารถคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมได้ดังสมการ (3.2)

$$\% \text{ Adsorption} = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100$$

สมการ (3.2)

เมื่อ A_0 คือ ค่าการดูดซับของสีย้อมก่อนการดูดซับ
 A_1 คือ ค่าการดูดซับของสีย้อมหลังการดูดซับ

ข. ศึกษาอัตราส่วนผสมของเม็ดวัสดุดูดซับและระยะเวลาที่เข้าสู่สมดุลในการดูดซับสีเบสิกและสีแอซิด

1. เตรียมเม็ดแอลจิเนตและเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน/แอลจิเนต 6 อัตราส่วนดังนี้

- แอลจิเนต 2 กรัม
- ผงเซริซิน 1 กรัม = ผงเซริซิน 1% ของสารละลาย + แอลจิเนต 2 กรัม
- ผงเซริซิน 2 กรัม = ผงเซริซิน 2% ของสารละลาย + แอลจิเนต 2 กรัม
- ผงเซริซิน 3 กรัม = ผงเซริซิน 3% ของสารละลาย + แอลจิเนต 2 กรัม
- ผงเซริซิน 4 กรัม = ผงเซริซิน 4% ของสารละลาย + แอลจิเนต 2 กรัม
- ผงเซริซิน 5 กรัม = ผงเซริซิน 5% ของสารละลาย + แอลจิเนต 2 กรัม

ตาราง 7 อัตราส่วนผสมของเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน/แอลจิเนต 6 อัตราส่วน

รหัสตัวอย่าง	เปอร์เซ็นต์ของเซริซิน (%)	อัตราส่วนผสม
AI	0%	แอลจิเนต 2 กรัม
AI-1% SS	1%	แอลจิเนต 2 กรัม + ผงเซริซิน 1 กรัม
AI-2% SS	2%	แอลจิเนต 2 กรัม + ผงเซริซิน 2 กรัม
AI-3% SS	3%	แอลจิเนต 2 กรัม + ผงเซริซิน 3 กรัม
AI-4% SS	4%	แอลจิเนต 2 กรัม + ผงเซริซิน 4 กรัม
AI-5% SS	5%	แอลจิเนต 2 กรัม + ผงเซริซิน 5 กรัม

2. ชั่งเม็ดวัสดุดูดซับ ที่มีส่วนผสมของเซริซิน 0-5% (w/v) ปริมาณ 1 กรัม ลงในขวดรูปชมพู่ (อย่างละ 8 ขวด)

3. เตรียมสารละลายสีเบสิกและสีแอซิดที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ทั้งหมด 2,500 มิลลิลิตร แบ่งเป็นส่วนละ 50 มิลลิลิตร เพื่อใช้ในการดูดซับและใช้สำหรับการวิเคราะห์ผล ด้วยเครื่อง UV-Visible spectrophotometer

4. เติมสารละลายสีเบสิกหรือสีแอซิดที่เตรียมไว้ ลงในขวดรูปชมพู่พร้อมๆ กัน โดยใช้ขวดละ 50 มิลลิลิตร

5. ปิดปากขวดรูปชมพู่ด้วยอลูมิเนียมฟรอยด์

6. นำขวดรูปชมพู่ใส่ลงในเครื่องเขย่า

7. เปิดเครื่องเขย่า โดยใช้อัตราการเขย่า 120 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง

8. ทำการจับเวลาโดยกำหนดได้คือ 60, 120, 180, 240, 300, 360, 420 และ 480 นาที เมื่อครบเวลาที่กำหนดในแต่ละช่วง แล้วจึงนำขวดรูปชมพู่ออกจากเครื่องเขย่า

9. กรอกแยกเม็ดวัสดุดูดซับออกจากสารละลายสีย้อม เก็บเม็ดวัสดุดูดซับไว้เพื่อนำไปวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยา ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและเก็บสารละลายสีย้อมเพื่อนำไปวิเคราะห์หาค่าการดูดซับของสีย้อมก่อนและหลังการดูดซับ ด้วยเครื่อง UV-Visible spectrophotometer

10. นำข้อมูลที่คำนวณได้ตั้งสมการ (3.2) มาสร้างกราฟ และสรุปผล

11. วิเคราะห์ผลหาอัตราส่วนผสมของเม็ดวัสดุดูดซับที่ดีที่สุด และช่วงเวลากการดูดซับที่เข้าสู่สมดุล

ค. การศึกษาอิทธิพลของความเป็นกรด-ด่างที่มีผลต่อการดูดซับ

1. เตรียมสารละลายสีเบสิกและสีแอซิดความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 600 มิลลิลิตร

2. ทำการปรับสภาวะสารละลายสีเบสิกและสีแอซิดให้มีค่าความเป็นกรด-ด่าง ระหว่าง 1-10 โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ปรับให้อยู่ในสภาวะต่างและใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ปรับให้อยู่ในสภาวะกรด

3. ชั่งเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน5%/แอลจินेट ปริมาณ 1 กรัม ลงในขวดรูปชมพู่ จำนวน 10 ขวด

4. เติมสารละลายสีเบสิกและสีแอซิดที่ปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง ระหว่าง 1-10 แล้ว ลงในขวดรูปชมพู่ปริมาตร 50 มิลลิลิตรต่อขวด

5. ปิดปากขวดรูปชมพู่ด้วยอลูมิเนียมฟรอยด์ และนำขวดรูปชมพู่ลงในเครื่องเขย่า โดยใช้อัตราการเขย่า 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 360 นาที ที่อุณหภูมิห้อง

6. เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด กรองเอาเม็ดวัสดุดูดซับออก และทำการเก็บสารละลายสีเบสิกและสีแอซิดที่ผ่านการดูดซับแล้ว เพื่อนำไปวิเคราะห์หาค่าการดูดซับของสีย้อมหลังการดูดซับ

7. นำสารละลายสีเบสิกและสีแอซิดที่ผ่านการดูดซับ นำไปตรวจหาค่าการดูดซับของสีย้อม หลังการดูดซับด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer โดยใช้ความยาวคลื่นดังตารางที่ 6

8. นำข้อมูลที่ได้จากเครื่อง UV-Vis spectrophotometer มาคำนวณดังสมการที่ (3.2) เพื่อสร้างกราฟ และสรุปผล

ง. การศึกษาปริมาณวัสดุดูดซับที่เหมาะสมในการดูดซับ

1. เตรียมเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจีเนต ซึ่งใส่ขวดรูปชมพู่ปริมาณ 1, 2, 3, 4, 5, 6 และ 7 กรัม ตามลำดับ

2. เตรียมสารละลายสีเบสิกและสีแอซิดความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 2,100 มิลลิลิตร

3. ปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง ของสารละลายสีเบสิกและสีแอซิด เป็นค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่มีการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 8 และ 2 ตามลำดับ

4. เทสารละลายสีเบสิกและสีแอซิด ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่พร้อมๆกัน

5. ปิดปากขวดรูปชมพู่ด้วยอะลูมิเนียมฟรอยด์ และนำขวดรูปชมพู่ลงไปในเครื่องเขย่า โดยใช้อัตราการเขย่า 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 360 นาที ที่อุณหภูมิห้อง

6. เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด กรองเอาวัสดุดูดซับออก และทำการเก็บสารละลายสีเบสิก และสีแอซิดที่ผ่านการดูดซับแล้ว เพื่อนำไปวิเคราะห์หาค่าการดูดซับของสีย้อมหลัง การดูดซับ

7. นำสารละลายสีเบสิกและสีแอซิดที่ผ่านการดูดซับ นำไปตรวจหาค่าการดูดซับของสีย้อม หลังการดูดซับ ด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer โดยใช้ความยาวคลื่นดังตาราง 6

8. นำข้อมูลที่ได้จากเครื่อง UV-Vis spectrophotometer มาคำนวณดังสมการ (3.2) เพื่อสร้างกราฟ และสรุปผล

7.7 การศึกษาไอโซเทิร์มของการดูดซับ

1. เตรียมเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจีเนต ปริมาณ 1 กรัม ลงในขวดรูปชมพู่

2. เตรียมสารละลายสีเบสิกและสีแอซิดความเข้มข้น 10-50 มิลลิกรัมต่อลิตร

3. ปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง ของสารละลายสีเบสิกและสีแอซิด เป็นค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่มีการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 8 และ 2 ตามลำดับ

4. เทสารละลายสีเบสิกและสีแอซิด ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่พร้อมๆกัน

5. ปิดปากขวดรูปชมพู่ด้วยอะลูมิเนียมฟรอยด์ และนำขวดรูปชมพู่ลงไปในเครื่องเขย่า โดยใช้อัตราการเขย่า 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 360 นาที ที่อุณหภูมิห้อง

6. เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด กรองเอาเม็ดวัสดุดูดซับออกและทำการเก็บสารละลายสีเบสิก และสีแอซิดที่ผ่านการดูดซับแล้ว เพื่อนำไปวิเคราะห์หาค่าการดูดซับของสีย้อมหลังการดูดซับ

7. นำสารละลายสีเบสสิกและสีแอซิดที่ผ่านการดูดซับ นำไปตรวจหาค่าการดูดซับของสีย้อมหลังการดูดซับ ด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer โดยใช้ความยาวคลื่นดังตารางที่ 6

8. นำข้อมูลที่ได้จากเครื่อง UV-Vis spectrophotometer มาคำนวณตามสมการของฟรุนดลิชและแลงเมียร์ นำผลมาวิเคราะห์และสร้างกราฟ พร้อมสรุปผล

7.8 การศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับ

1. เตรียมเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซีน 5%/แอลจีเนต ปริมาณ 1 กรัม ลงในขวดรูปชมพู่

2. เตรียมสารละลายสีเบสสิกและสีแอซิดความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

3. ปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง ของสารละลายสีเบสสิกและสีแอซิด เป็นค่าความเป็นกรด-ด่างที่มีการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 8 และ 2 ตามลำดับ

4. เทสารละลายสีเบสสิกและสีแอซิด ปริมาตร 50 มิลลิตร ลงในขวดรูปชมพู่พร้อมๆกัน

5. ปิดปากขวดรูปชมพู่ด้วยอะลูมิเนียมฟรอยด์ และนำขวดรูปชมพู่ลงไปในเครื่องเขย่า โดยใช้อัตราการเขย่า 120 รอบต่อนาที ใช้เวลา 60, 120, 180, 240, 300 และ 360 นาที ตามลำดับที่อุณหภูมิห้อง

6. เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด กรองเอาเม็ดวัสดุดูดซับออกและทำการเก็บสารละลายสีเบสสิกและสีแอซิดที่ผ่านการดูดซับแล้ว เพื่อนำไปวิเคราะห์หาค่าการดูดซับของสีย้อมหลังการดูดซับที่เวลาต่างๆ

7. นำสารละลายสีเบสสิกและสีแอซิดที่ผ่านการดูดซับ นำไปตรวจหาค่าการดูดซับของสีย้อมหลังการดูดซับ ด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer โดยใช้ความยาวคลื่นดังตารางที่ 6

8. นำข้อมูลที่ได้จากเครื่อง UV-Vis spectrophotometer มาคำนวณตามสมการ Lagergren's pseudo-first-order และ Ho's pseudo-second-order สมการ Pseudo-first Order นำผลมาวิเคราะห์และสร้างกราฟ พร้อมสรุปผล

7.9 การศึกษาโครงสร้างทางสัณฐานวิทยา ก่อนและหลังการดูดซับของวัสดุเชิงประกอบเซริซีน 5%/แอลจีเนต

1. เตรียมเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซีน 5%/แอลจีเนตก่อนและหลังการดูดซับ โดยนำไปแช่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นจาก 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 โมลต่อลิตรตามลำดับ จนเม็ดวัสดุดูดซับแข็งตัว

2. นำเม็ดวัสดุดูดซับตามข้อ 1. ตากไว้จนแห้ง

3. นำเม็ดวัสดุดูดซับที่แห้งแล้ว ไปวางบนแผ่นเหล็กรองตัวอย่างของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แล้วเคลือบด้วยเครื่องเคลือบทอง แสดงดังภาพประกอบที่ 71

4. นำเม็ดวัสดุดูดซับที่ได้ไปศึกษาโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แล้วถ่ายภาพที่กำลังขยาย 40 เท่า และ 1,000 เท่า

5. จากนั้นนำภาพถ่ายที่ได้ มาวิเคราะห์และสรุปผล



ภาพประกอบ 69 เม็ดวัสดุดูดซับบนแผ่นเหล็กแล้วเคลือบด้วยเครื่องเคลือบทอง

7.10 การศึกษาการคายสีเบสิดและสีแอสิดหลังการดูดซับ

1. เตรียมน้ำกลั่นปริมาตร 50 มิลลิลิตรต่อขวด เทน้ำกลั่นแล้วปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง ระหว่าง 1-10 โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ปรับให้อยู่ในสภาวะต่างและใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ปรับให้อยู่ในสภาวะกรด

2. นำวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจีเนต หลังการดูดซับสีเบสิดและสีแอสิด ใส่ลงไปในขวดรูปชมพู่

3. ปิดปากขวดรูปชมพู่ด้วยอะลูมิเนียมฟรอยด์ และนำขวดรูปชมพู่ลงไปในเครื่องเขย่า โดยใช้อัตราการเขย่า 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 360 นาที ที่อุณหภูมิห้อง

6. เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด กรองเอาเม็ดวัสดุดูดซับไปเก็บไว้ในน้ำกลั่นและทำการเก็บน้ำกลั่นที่ผ่านการคายซับ เพื่อนำไปวิเคราะห์หาค่าการดูดกลืนแสงของน้ำกลั่น

7. นำน้ำกลั่นที่ผ่านการคายดูดซับ นำไปตรวจหาค่าการดูดกลืนแสงของด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer

8. นำข้อมูลที่ได้จากเครื่อง UV-Vis spectrophotometer โดยใช้ความยาวคลื่นที่วัดได้แสดงดังตารางที่ 6 และสามารถคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การคายซับของสีย้อมได้ดังสมการที่ (3.3) เพื่อสร้างกราฟและสรุปผล

$$\% \text{Desorption} = \frac{D_1}{A_1} \times 100$$

สมการ (3.3)

เมื่อ D_1 คือ ค่าการคายซับของสีย้อมหลังการคายซับ

A_1 คือ ค่าการดูดซับของสีย้อมหลังการดูดซับ

7.11 การศึกษาเม็ทวัสตุดูดซับมาใช้ซ้ำ

1. เตรียมเม็ทวัสตุเชิงประกอบเซอร์ซิซัน 5%/แอลจิเนตที่ผ่านการดูดซับสีเบสิกและสีแอซิด ปริมาณ 1 กรัม ลงในขวดรูปชมพู่
2. เตรียมน้ำกลั่นปริมาตร 50 มิลลิลิตรต่อขวด ปรับค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำกลั่น สำหรับสีเบสิกและสีแอซิดที่มีค่าการคายซับสูงสุดเท่ากับ 4 และ 8 ตามลำดับ
3. ปิดปากขวดรูปชมพู่ด้วยอะลูมิเนียมฟรอยด์ และนำขวดรูปชมพู่ลงไปเครื่องเขย่า โดยใช้อัตราการเขย่า 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 360 นาที ที่อุณหภูมิห้อง
4. เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด กรองเอาเม็ทวัสตุดูดซับไปเก็บไว้ในน้ำกลั่นและทำการเก็บน้ำกลั่นที่ผ่านการคายซับ เพื่อนำไปวิเคราะห์หาค่าการดูดกลืนแสงของน้ำกลั่น
5. นำน้ำกลั่นที่ผ่านการคายดูดซับ นำไปตรวจหาค่าการคายซับหลังการคายซับ ด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer โดยใช้ความยาวคลื่นที่วัดได้แสดงดังตารางที่ 6 และสามารถคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การคายซับของสีย้อมได้ดังสมการ (3.3)
7. นำวัสตุดูดซับที่ผ่านการคายซับในครั้งแรก มาทำการคายซับซ้ำในครั้งที่ 2 และ 3 และทำซ้ำเช่นในข้อ 1-6
8. วิเคราะห์ผลการทำซ้ำทั้ง 3 ครั้ง เพื่อสร้างกราฟและสรุปผล

บทที่ 4

ผลการวิจัย และการวิเคราะห์ผล

ในงานวิจัยได้ทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสารละลายสีเบสิกและสีแอซิดด้วยเม็ดวัสดุเชิงประกอบแอลจินेट/เซริซิน พร้อมทั้งศึกษาผลของสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงเคมีของวัสดุดูดซับ การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา การศึกษาสมบัติการดูดซับและการคายซับของวัสดุดูดซับ

1. ขนาดและความหนาแน่นของเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน/แอลจินेट

ในการทดลองหาขนาดของเม็ดวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของเซริซินในอัตราส่วนต่างๆ กันก่อนนำไปศึกษาหาสมบัติต่างๆ จากการหาขนาดของเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน/แอลจินेटโดยใช้เวอร์เนียคาร์ลิปเปอร์ โดยทำการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน/แอลจินेटจำนวน 3 เม็ดและนำมาหาค่าเฉลี่ย ดังตาราง 8

ตาราง 8 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของเซริซินในอัตราส่วนต่างๆ กัน

เม็ดวัสดุเชิงประกอบ	AI	AI-1% SS	AI-2% SS	AI-3% SS	AI-4% SS	AI-5% SS
	0.52	0.47	0.51	0.66	0.72	0.75
เส้นผ่านศูนย์กลาง	0.51	0.45	0.53	0.67	0.73	0.76
(mm)	0.54	0.49	0.55	0.67	0.75	0.74
ค่าเฉลี่ย	0.52	0.47	0.53	0.67	0.73	0.75

จากตาราง 8 พบว่าเม็ดแอลจินेटมีค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.52 มิลลิเมตร และเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 1%, 2%, 3%, 4% และ 5%/แอลจินेट มีค่าค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.47, 0.53, 0.67, 0.73 และ 0.75 มิลลิเมตร ตามลำดับ พบว่าเมื่อเซริซินเพิ่มมาจาก 0% 1%, 2%, 3%, 4% และ 5% ในเม็ดวัสดุเชิงประกอบ ทำให้เนื้อของเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน/แอลจินेटมีขนาดใหญ่ขึ้นตามปริมาณของเซริซิน จึงส่งผลให้เส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน/แอลจินेटมีค่าเพิ่มขึ้น

ในการทดลองความหนาแน่น จะวัดความหนาของเม็ดวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของเซริซินในอัตราส่วนต่างๆ กันก่อนนำไปศึกษาหาสมบัติต่างๆ จากการทดลองหาความหนาแน่นโดยใช้

ขวัดพิคโนมิเตอร์ในการวัดความหนาแน่นของเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน/แอลจินต โดยทำการวัดเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน/แอลจินตจำนวน 3 ครั้งและนำมาหาค่าเฉลี่ย ดังตาราง 4.2

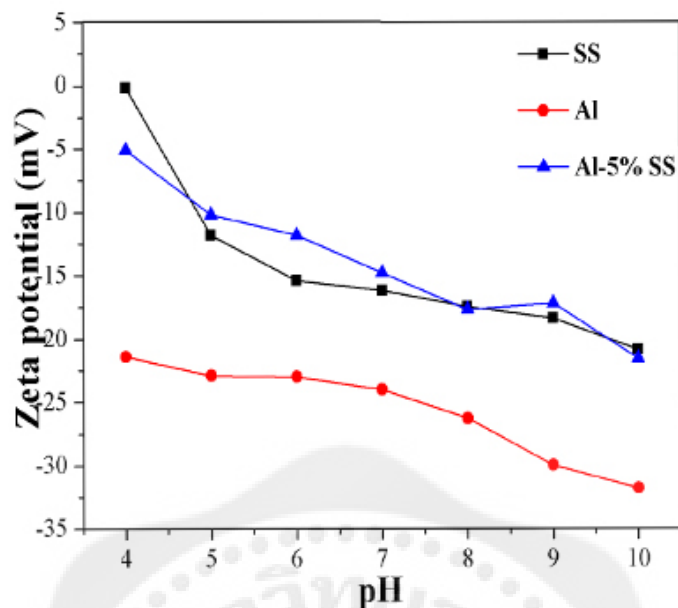
ตาราง 9 ความหนาแน่นของเม็ดวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของเซริซินในอัตราส่วนต่างๆ กัน

เม็ดวัสดุเชิงประกอบ	AI	AI-1% SS	AI-2% SS	AI-3% SS	AI-4% SS	AI-5% SS
	33.39	51.27	65.33	74.80	84.55	92.83
ความหนาแน่น (kg/m ³)	33.59	52.07	74.66	75.60	84.50	92.42
ค่าเฉลี่ย	33.34	51.51	68.42	74.95	84.13	92.97

จากตาราง 9 พบว่าเม็ดแอลจินตมีค่าความหนาแน่นเฉลี่ยเท่ากับ 33.34 กิโลกรัมต่อตารางมิลลิเมตร และเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 1%, 2%, 3%, 4% และ 5%/แอลจินต มีค่าความหนาแน่นเฉลี่ยเท่ากับ 51.51, 68.42, 74.95, 83.13 และ 92.97 กิโลกรัมต่อตารางมิลลิเมตรตามลำดับ พบว่าเมื่อเซริซินเพิ่มมาจาก 0% 1%, 2%, 3%, 4% และ 5% ในเม็ดวัสดุเชิงประกอบทำให้เนื้อของเม็ดวัสดุเชิงประกอบมีขนาดใหญ่ขึ้นตามปริมาณของเซริซิน จึงส่งผลให้ความหนาแน่นของเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน/แอลจินตมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

2. สภาวะความเป็นกรด-ด่างของสารละลายที่เหมาะสมในการดูดซับ

จากการทดลองได้นำ เซริซิน แอลจินต และเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจินต ไปวิเคราะห์หาค่าศักย์ซีต้า ด้วยเครื่องวัดความต่างศักย์ และได้ทำการเปรียบเทียบค่าศักย์ซีต้าของเซริซิน แอลจินต และเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจินต แสดงดังภาพประกอบ 4.1 ซึ่งสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการทำนายอันตรกิริยาต่างๆ ที่สามารถเกิดขึ้นได้ เช่น การเกิดแรงผลัก (Repulsion) และแรงดึงดูด (Attraction) ของประจุระหว่างอนุภาคและประจุ โดยพบว่าค่าศักย์ซีต้าที่มีค่าบวกหรือลบมากๆ จะเกิดการผลักกันของประจุได้



ภาพประกอบ 70 ค่าศักย์ซีต้าของ เซริซิน แอลจีเนต และเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/ แอลจีเนต

จากภาพประกอบ 70 พบว่าเซริซิน แอลจีเนต และเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/ แอลจีเนตมีค่าศักย์ซีต้าต่ำกว่าศูนย์ทั้งหมด ทำให้ผิวของวัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิดแสดงประจุลบทั้งหมด

เซริซิน และเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/ แอลจีเนต มีค่าความเป็นกรด-ด่างน้อยกว่าค่า Zero potential ค่าศักย์ซีต้าเป็นค่าลบแสดงถึงประจุลบที่ผิวของวัสดุดูดซับ พบว่าเซริซินมีสมบัติ Amphoteric สามารถแสดงประจุลบภายใต้สภาวะค่าความเป็นกรด-ด่างสูง และแสดงประจุบวกภายใต้สภาวะค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำ แต่เนื่องจากการทดลอง Zeta potential อยู่ในช่วงค่าความเป็นกรด-ด่างระหว่าง 4-10 จึงไม่สามารถพบค่าศักย์ซีต้าเป็นค่าบวกของเส้นที่แสดงเซริซินและเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/ แอลจีเนตในภาพประกอบ 70 โดยสมบัติ Amphoteric ของเส้นใยโปรตีนสามารถอธิบายในหัวข้อ 1.2 บทที่ 2

แอลจีเนตมีค่าความเป็นกรด-ด่างน้อยกว่าค่า Zero potential ค่าศักย์ซีต้าเป็นค่าลบแสดงถึงประจุลบที่ผิวของแอลจีเนต โดยโมเลกุลของแอลจีเนตประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชัน (Functional groups) ของหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) และหมู่คาร์บอกซิล (-COOH) จำนวนมาก จึงเป็นผลให้แอลจีเนตแสดงประจุลบภายใต้สภาวะค่าความเป็นกรด-ด่างต่างๆ และงานวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Qi และคณะ (Qi; et al. 2013: 132-139) Qi และคณะได้ทำการศึกษาการใช้ Porous calcium alginate membrane ในการศึกษาสมบัติการกรองและการดูดซับสีเมทิลีนบลู ศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่างระหว่าง 3-10 พบว่าผลของค่าความเป็นกรด-ด่างในช่วง 3.3-6.1 มีค่าการดูดซับสีเมทิลีนบลูเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว เกิดจากการแข่งขันของโมเลกุลสีเมทิลีนบลูและไฮโดรเจน

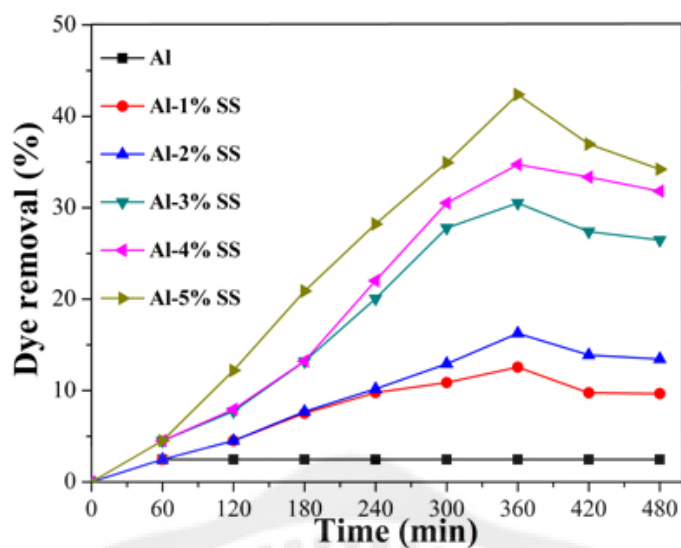
ไอออนที่จะไปดึงดูดกันกับ Alginate membrane และที่ค่าความเป็นกรด-ด่างในช่วง 6.1-10 การดูดซับสีเมทิลีนบลูค่อยๆเพิ่มขึ้น เกิดจากการดึงดูดกันของโมเลกุลสีเมทิลีนบลูกับ alginate membrane ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยในครั้งนี เนื่องจากค่าศักย์ซีต้าของแอลจิเนตเป็นค่าลบ จึงสรุปได้ว่า แอลจิเนตสามารถสนับสนุนการดูดซับสีที่มีโมเลกุลเป็นประจุบวก

3. การศึกษาสมบัติในการดูดซับของวัสดุดูดซับ

จากการเตรียมเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน/แอลจิเนต ในอัตราส่วนของเซริซินที่แตกต่างกัน แสดงดังตาราง 10-15 และภาพประกอบ 73-78 เพื่อนำไปหาอัตราส่วนที่มีความสามารถในการดูดซับของสารละลายสีเบสิกและสีแอสิดที่ดีที่สุด ในสารละลายเริ่มต้นของสีเบสิกและสีแอสิดความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้องและไม่ได้ทำการปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง (ซึ่งมีค่าเท่ากับ 8 และ 2 สำหรับสีเบสิกและสีแอสิด ตามลำดับ) โดยทำการตรวจหาปริมาณของสารละลายสีเบสิกและสีแอสิดที่เหลืออยู่หลังการดูดซับจากสารละลายสีเบสิกและสีแอสิด

ตาราง 10 เปอร์เซนต์การดูดซับของสารละลายสีเบสิก (Basic orange 22 300%) เทียบกับเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน/แอลจิเนต ที่อัตราส่วนต่างๆ และระยะเวลาในการดูดซับ 60-480 นาที เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสีเบสิก (Basic orange 22 300%) 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

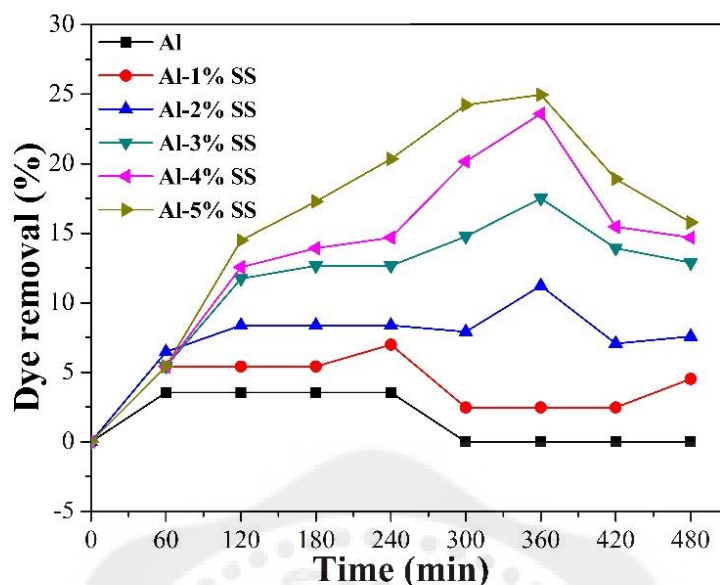
วัสดุดูดซับ เวลา (นาที)	เปอร์เซนต์การดูดซับของสารละลายสีเบสิก					
	AI	AI-1%SS	AI-2%SS	AI-3%SS	AI-4%SS	AI-5%SS
60	2.46	2.46	2.46	4.52	2.46	4.52
120	2.46	4.52	4.52	6.73	6.24	12.20
180	2.46	4.52	7.71	12.20	11.22	22.19
240	2.46	9.79	10.17	20.06	24.02	28.23
300	2.46	10.87	11.23	28.79	31.52	34.93
360	2.46	11.56	15.95	30.52	34.73	42.38
420	2.46	9.65	10.42	28.63	32.82	36.73
480	2.46	9.53	10.17	27.91	31.25	35.19



ภาพประกอบ 71 เปรอ์เซ็นต์การดูดซับสารละลายของสีเบสิก (Basic orange 22 300%) เทียบกับอัตราส่วนของเม็ดวัสดุดูดซับและระยะเวลาในการดูดซับ 60-480 นาที เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสีเบสิก 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

ตาราง 11 เปรอ์เซ็นต์การดูดซับของสารละลายสีเบสิก (Blue BG 200% 01) เทียบกับเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน/แอลจินेट ที่อัตราส่วนต่างๆ และระยะเวลาในการดูดซับ 60-480 นาที เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสีเบสิก (Blue BG 200% 01) 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

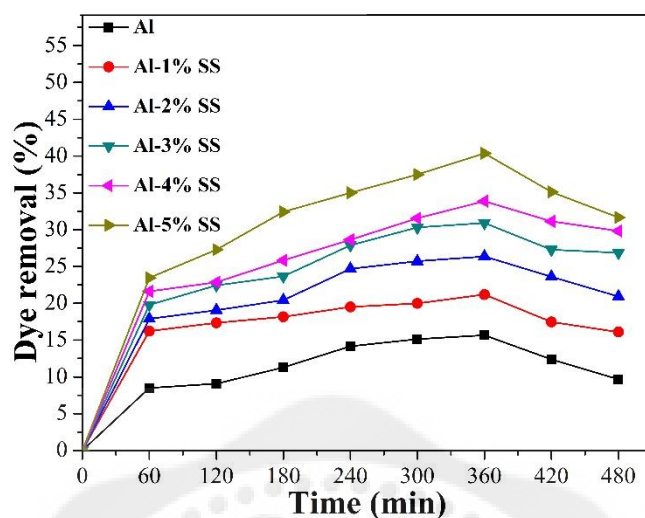
วัสดุดูดซับ เวลา (นาที)	เปอร์เซ็นต์การดูดซับของสารละลายสีเบสิก					
	AI	AI-1%SS	AI-2%SS	AI-3%SS	AI-4%SS	AI-5%SS
60	3.54	5.42	6.47	5.42	5.42	5.42
120	3.54	5.42	8.37	11.74	12.56	14.48
180	3.54	5.42	8.37	12.66	13.92	17.28
240	3.54	6.99	8.37	12.66	14.69	20.34
300	0	2.47	7.91	14.77	20.16	24.22
360	0	2.47	11.22	17.51	23.58	24.97
420	0	2.47	7.06	13.92	15.46	18.90
480	0	4.52	7.57	12.89	14.69	15.77



ภาพประกอบ 72 เปรอ์เซ็นต์การดูดซับสารละลายของสีเบสสิค (Blue BG 200% 01) เทียบกับอัตราส่วนของเม็ดวัสดุดูดซับและระยะเวลาในการดูดซับ 60-480 นาที เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสีเบสสิค 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

ตาราง 12 เปรอ์เซ็นต์การดูดซับของสารละลายสีเบสสิค (Yellow 3GL 200%) เทียบกับเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิม/แอลจินेट ที่อัตราส่วนต่างๆ และระยะเวลาในการดูดซับ 60-480 นาที เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสีเบสสิค (Yellow 3GL 200%) 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

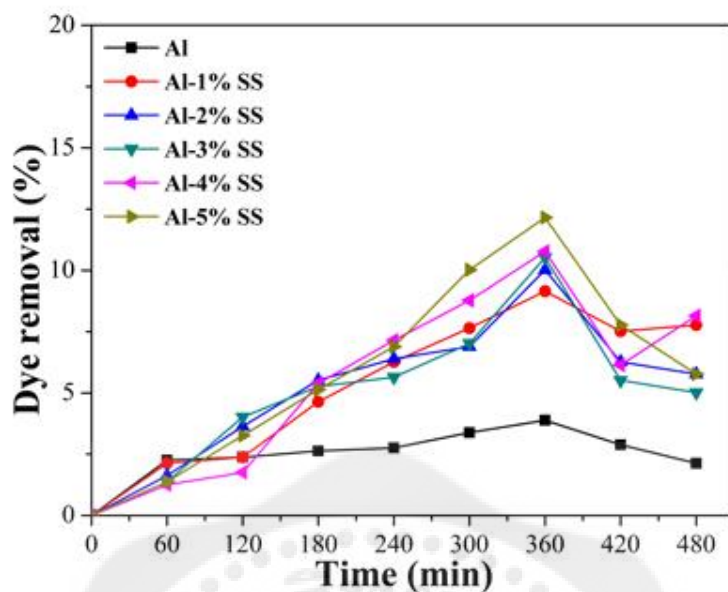
วัสดุดูดซับ เวลา (นาที)	เปอร์เซ็นต์การดูดซับของสารละลายสีเบสสิค					
	AI	AI-1%SS	AI-2%SS	AI-3%SS	AI-4%SS	AI-5%SS
60	8.48	16.20	17.88	19.77	21.61	23.45
120	9.07	17.34	19.07	22.42	22.85	27.28
180	11.29	18.15	20.42	23.66	25.82	32.41
240	14.15	19.50	24.68	27.88	28.63	35.01
300	15.13	19.98	25.72	30.31	31.55	37.49
360	15.67	21.17	26.36	30.90	33.87	40.36
420	12.37	17.45	23.61	27.28	31.12	35.12
480	9.67	16.09	20.91	26.85	29.82	31.65



ภาพประกอบ 73 เปรอ์เซ็นต์การดูดซับของสารละลายสีเบสิด (Yellow 3GL 200%) เทียบกับอัตราส่วนของเม็ดวัสดุดูดซับและระยะเวลาในการดูดซับ 60-480 นาที เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสีเบสิด (Yellow 3GL 200%) 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

ตาราง 13 เปรอ์เซ็นต์การดูดซับของสารละลายสีแอซิด (Red N-2RBL) เทียบกับเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน/แอลจิเนต ที่อัตราส่วนต่างๆ และระยะเวลาในการดูดซับ 60-480 นาที เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสีแอซิด (Red N-2RBL) 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

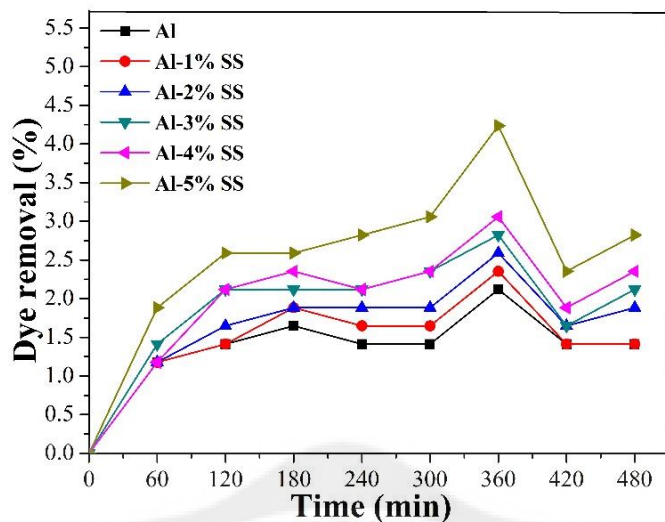
วัสดุดูดซับ เวลา (นาที)	เปอร์เซ็นต์การดูดซับของสารละลายสีแอซิด					
	Al	Al-1%SS	Al-2%SS	Al-3%SS	Al-4%SS	Al-5%SS
60	2.255	2.13	1.63	1.38	1.25	1.38
120	2.38	2.38	3.63	4.01	1.75	3.26
180	2.63	4.64	5.51	5.26	5.38	5.14
240	2.76	6.26	6.39	5.64	7.14	6.89
300	3.38	7.64	6.89	7.01	8.77	10.02
360	3.88	9.15	10.02	10.53	10.78	12.15
420	2.88	7.52	6.26	5.51	6.14	7.77
480	2.13	7.77	5.76	5.01	8.14	5.76



ภาพประกอบ 74 เปรอ์เซ็นต์การดูดซับของสารละลายสีแอสซิด (Red N-2RBL) เทียบกับอัตราส่วนของเม็ดวัสดุดูดซับและระยะเวลาในการดูดซับ 60-480 นาที เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสีแอสซิด (Red N-2RBL) 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

ตาราง 14 เปรอ์เซ็นต์การดูดซับของสารละลายสีแอสซิด (Navy M-DNL) เทียบกับเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิม/แอลจินเนต ที่อัตราส่วนต่างๆ และระยะเวลาในการดูดซับ 60-480 นาที เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสีแอสซิด (Navy M-DNL) 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

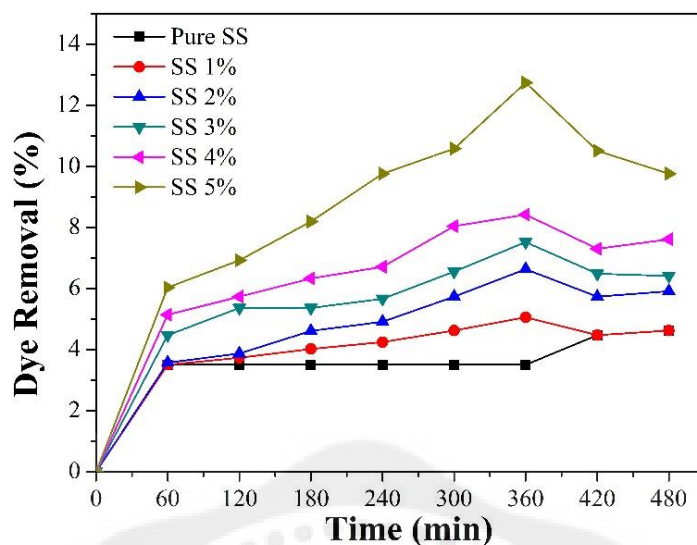
วัสดุดูดซับ เวลา (นาที)	เปอร์เซ็นต์การดูดซับของสารละลายสีแอสซิด					
	AI	AI-1%SS	AI-2%SS	AI-3%SS	AI-4%SS	AI-5%SS
60	1.17	1.17	1.17	1.41	1.17	1.88
120	1.41	1.41	1.64	2.11	2.11	2.58
180	1.64	1.88	1.88	2.11	2.35	2.58
240	1.41	1.64	1.88	2.11	2.11	2.823
300	1.41	1.64	1.88	2.35	2.35	3.05
360	2.11	2.35	2.58	2.82	3.05	4.23
420	1.41	1.41	1.64	1.64	1.88	2.35
480	1.41	1.41	1.88	2.11	2.35	2.82



ภาพประกอบ 75 เปรอ์เซ็นต์การดูดซับของสารละลายสีแอสิด (Navy M-DNL) เทียบกับอัตราส่วน
ของวัสดุดูดซับและระยะเวลาในการดูดซับ 60-480 นาที เมื่อความเข้มข้นของสารละลาย
สีแอสิด 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

ตาราง 15 เปรอ์เซ็นต์การดูดซับของสารละลายสีแอสิด (Yellow GC) เทียบกับเม็ดวัสดุเชิงประกอบ
เซริซิน/แอลจินेट ที่อัตราส่วนต่างๆ และระยะเวลาในการดูดซับ 60-480 นาที เมื่อความ
เข้มข้นของสารละลายสีแอสิด (Yellow GC) 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

เวลา (นาที)	เปอร์เซ็นต์การดูดซับของสารละลายสีแอสิด					
	AI	AI-1%SS	AI-2%SS	AI-3%SS	AI-4%SS	AI-5%SS
60	3.50	3.50	3.57	4.47	5.14	6.03
120	3.50	3.73	3.87	5.36	5.73	6.92
180	3.50	4.02	4.61	5.36	6.33	8.19
240	3.50	4.24	4.91	5.66	6.71	9.76
300	3.50	4.62	5.73	6.55	8.04	10.58
360	3.50	5.06	6.63	7.52	8.42	12.74
420	4.47	4.47	5.73	6.48	7.30	10.51
480	4.62	4.62	5.91	6.41	7.61	9.76



ภาพประกอบ 76 เปรอ์เซ็นต์การดูดซับของสารละลายสีเบสิก (Yellow GC) เทียบกับอัตราส่วนของเม็ดวัสดุดูดซับและระยะเวลาในการดูดซับ 60-480 นาที เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสีเบสิก (Yellow GC) 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

จากภาพประกอบ 71-76 เป็นการศึกษาเพื่อหาอัตราส่วนของเม็ดวัสดุดูดซับ และระยะเวลาในการดูดซับ โดยทำการเตรียมเม็ดวัสดุดูดซับทั้งหมด 6 อัตราส่วน ได้แก่อัตราส่วนของ เซริซิน 0%, 1%, 2%, 3%, 4% และ 5% (w/v) ของสารละลาย จากนั้นนำเม็ดวัสดุดูดซับไปดูดซับสารละลายสีเบสิกและสีแอสิด โดยระยะเวลาที่ใช้เริ่มต้นที่ 60-480 นาที ในสารละลายสีเบสิกและสีแอสิดที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 50 มิลลิลิตร ที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 7

พบว่าทุกอัตราส่วนมีแนวโน้มการดูดซับเพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น จากระยะเวลาที่ใช้เริ่มต้นที่ 60-360 นาที แต่เมื่อหลังจากเวลา 360-480 นาที อัตราการดูดซับเริ่มลดลง ทำให้ทราบถึงเวลาที่เข้าสู่สมดุลของสีเบสิกและสีแอสิดที่สามารถดูดซับได้สูงสุดที่เวลา 360 นาที และเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจินเนต มีความสามารถดูดซับสารละลายสีเบสิกและสีแอสิดได้ดีกว่าเม็ดวัสดุดูดซับที่มีอัตราส่วนของเซริซิน 0%, 1%, 2%, 3% และ 4% (w/v) จากการทดลองนี้จึงเลือกเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจินเนต และสามารถนำไปใช้ในขั้นตอนอื่นๆต่อไป ส่วนเม็ดวัสดุดูดซับที่มีอัตราส่วนของเซริซิน 0%, 1%, 2%, 3% และ 4% (w/v) ยังคงนำไปใช้ในการทดลองเพื่อทำการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การดูดซับของวัสดุดูดซับที่สภาวะต่างๆ ต่อไป

ระยะเวลาที่เข้าสู่สมดุลพบว่าอัตราส่วนที่มีประสิทธิภาพสูงในการดูดซับสารละลายสีเบสิกและสีแอสิดคือ เม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจินเนตที่เวลา 360 นาที สามารถดูดซับสารละลายสีเบสิกคือ Basic orange 22 300%, Blue 3RL 200% และ Yellow 3GL 200% พบเปอร์เซ็นต์การดูดซับได้แก่ 42.38%, 25.32% และ 40.35% ตามลำดับ และสามารถดูดซับ

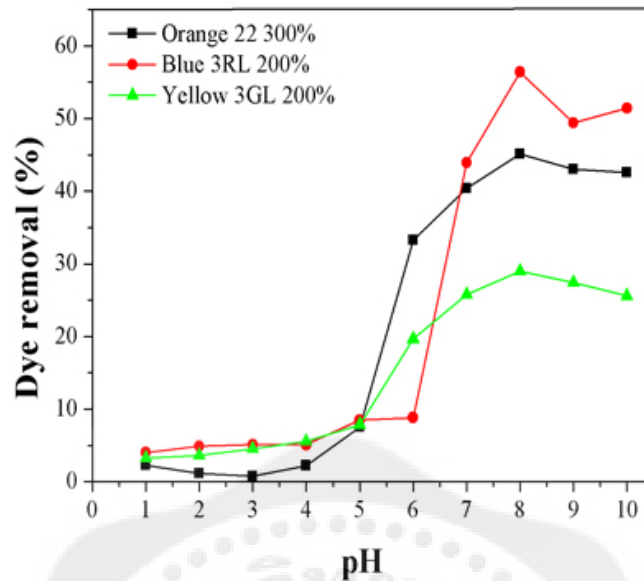
สารละลายสีแอสิดคือ Red N-2RBL, Navy M-DNL และ Yellow GC พบเปอร์เซ็นต์การดูดซับได้แก่ 12.16%, 14.24% และ 12.74% ตามลำดับ

4. การศึกษาอิทธิพลของความเป็นกรด-ด่างที่มีผลต่อการดูดซับ

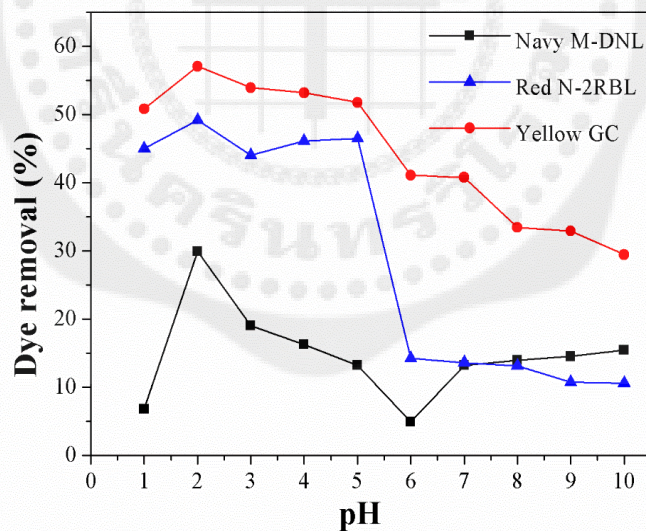
จากการทดลองหาอัตราส่วนของเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน/แอลจีเนต ที่มีความสามารถในการดูดซับที่ดีที่สุด และระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุลที่เร็วที่สุด จากนั้นเราจะทำการทดลองในขั้นต่อไปคือ การนำมาหาสภาวะความเป็นกรด-ด่างของสารละลายที่เหมาะสมที่ใช้ในการดูดซับ ผลการศึกษาประสิทธิภาพของการดูดซับที่ค่าความเป็นกรด-ด่างต่างๆ

ตาราง 16 เปอร์เซ็นต์การดูดซับสารละลายสีเบสิกและสีแอสิดกับความเป็นกรด-ด่าง ด้วยเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจีเนต เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสีเบสิกและสีแอสิด 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่เวลา 360 นาที

pH	เปอร์เซ็นต์การดูดซับสารละลายสีเบสิกและสีแอสิด					
	สีเบสิก			สีแอสิด		
	Orange	Yellow	Blue BG 200% 01	Red N-2RBL	Yellow GC	Navy M-DNL
1	5.01	4.02	2.30	45.01	50.80	6.81
2	5.47	4.88	1.15	49.18	57.06	29.92
3	4.55	5.09	0.80	44.01	53.93	19.01
4	5.60	5.09	2.24	46.15	53.18	16.29
5	7.86	8.48	7.54	46.53	51.77	13.22
6	19.64	8.82	33.23	14.24	41.10	4.90
7	25.74	43.91	40.38	13.61	40.77	13.22
8	28.97	56.39	45.10	13.11	33.44	13.97
9	27.44	49.37	43.02	10.71	32.90	14.51
10	25.56	51.41	42.56	10.59	29.44	15.40



ภาพประกอบ 77 เปรอ์เซ็นต์การดูดซับสารละลายสีเบสิคเทียบกับความเป็นกรด-ต่าง เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสีเบสิค 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่เวลา 360 นาที



ภาพประกอบ 78 เปรอ์เซ็นต์การดูดซับสารละลายสีแอซิดเทียบกับความเป็นกรด-ต่าง เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสีแอซิด 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่เวลา 360 นาที

จากภาพประกอบ 77-78 เป็นการศึกษาผลเพื่อหาสภาวะความเป็นกรด-ต่างของสารละลายสีเบสิคและสีแอซิดที่เหมาะสมในการดูดซับ โดยปรับสภาวะความเป็นกรด-ต่างของสารละลายสีเบสิคและสีแอซิดที่ความเข้มข้นเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 50 มิลลิลิตร ให้ค่าความเป็นกรด-

ต่างที่แตกต่างกันได้แก่ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 และ 10 โดยใช้วัสดุดูดซับเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจีเนต การดูดซับสารละลายสีเบสิกและสีแอซิด เป็นเวลา 360 นาที พบว่าความสามารถในการดูดซับสีเบสิกและสีแอซิดบนวัสดุดูดซับขึ้นอยู่กับประจุบนผิวของวัสดุดูดซับและประจุของสีเบสิกและสีแอซิด

จากภาพประกอบ 77 สีเบสิกมีค่าการดูดซับที่ค่าความเป็นกรด-ด่างสูงสุดเท่ากับ 8 พบว่าสีเบสิกมีประจุบวกในโมเลกุลจึงสามารถดูดซับได้ดีที่ค่าความเป็นกรด-ด่างสูง เนื่องจากเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจีเนตมีไอออนลบของหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) และหมู่คาร์บอกซิล (-COOH) ของแอลจีเนตและสมบัติของเซริซินเอง จึงเกิดการดึงดูดกันระหว่างประจุบวกในโมเลกุลของสีเบสิกและผิวของเม็ดวัสดุดูดซับ ซึ่งสอดคล้องกับกราฟ Zeta potential ดังภาพประกอบที่ 4.1 งานวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของอุษมานและคณะ (Othman; et al. 2018: 2803-2811) อุษมานและคณะได้ทำการศึกษาการใช้ graphene oxide-magnetic iron oxide nanoparticles (GO-MNP) เพื่อศึกษาการดูดซับสีเมทิลีนบลูโดยมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับสูงสุดที่สภาวะต่างๆ พบว่าค่าความเป็นกรด-ด่างที่ดีที่สุดเท่ากับ 9 เมื่อสภาวะค่าความเป็นกรด-ด่างสูง จึงทำให้พื้นผิวของ GO-MNP มีค่าประจุลบและสามารถดูดซับได้สูงที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยในครั้งนี้ เนื่องจากเม็ดวัสดุเชิงประกอบ เซริซิน 5%/แอลจีเนตเมื่ออยู่ในสภาวะค่าความเป็นกรด-ด่างสูง ทำให้พื้นผิวของวัสดุดูดซับมีค่าประจุลบตามสมบัติของแอลจีเนตและเซริซินทำให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับสีเบสิกมีค่าสูงที่ค่าความเป็นกรด-ด่างสูง และงานวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Yizhe และคณะ (Yizhe; et al. 2013: 132-139) Yizhe และคณะได้ทำการศึกษาการใช้ NaAlg-g-p(AA-co-St)/organo-I/S nanocomposite ในการศึกษาการดูดซับสีเมทิลีนบลู พบว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้นจากค่าความเป็นกรด-ด่างที่ 4-10 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยในครั้งนี้ เนื่องจากแอลจีเนตแสดงประจุลบและแอลจีเนตยังช่วยเพิ่มเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีเบสิกที่ค่าความเป็นกรด-ด่างสูง ทั้งสองงานวิจัยนี้จึงสนับสนุนการดูดซับสีเบสิกที่ค่าความเป็นกรด-ด่างสูง

จากภาพประกอบ 78 สีแอซิดดูดซับได้น้อยที่ค่าความเป็นกรด-ด่างสูง เนื่องจากโมเลกุลของสีแอซิดมีประจุลบจากหมู่ซัลโฟเนต ($-SO_3^-$) และเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจีเนตจะพบไอออนลบของหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) และหมู่คาร์บอกซิล (-COOH) ของแอลจีเนต จึงเกิดการผลัดกันระหว่างประจุลบในโมเลกุลของสีแอซิดและผิวของวัสดุดูดซับ ดังนั้นประจุลบในโมเลกุลของ สีแอซิดจะดูดซับได้ดีที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 2 เนื่องจากสมบัติ Amphoteric ของเซริซินเป็นตัวช่วยในการดูดซับและที่ค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำจะพบไอออนบวกจากไฮโดรเจนไอออนในปริมาณมาก จึงเกิดการดึงดูดกันระหว่างประจุลบในโมเลกุลของสีแอซิด ไฮโดรเจนไอออนและผิวของเม็ดวัสดุดูดซับ งานวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของเชนและคณะ (Chen; et al. 2012: 2803-2811) เชนและคณะได้ทำการศึกษาการใช้ผงเซริซิน เพื่อศึกษาการดูดซับสีแอซิด สีเมทิลีนบลู และ copper (II) phthalocyanine-3,4,4'-tetrakisulfonic acid จากการทดลองพบว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีแอซิด

มีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 1.5 เกิดจากการตั้งจุดกั้นระหว่างประจุลบในโมเลกุลของสีแอสซิดและกลุ่มอะมิโนที่เป็นประจุบวกในเซรีซิน และพบว่าที่ค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนสูง จึงเป็นส่วนช่วยในการดูดซับสีแอสซิดได้ดี งานวิจัยนี้จึงสนับสนุนการดูดซับสีแอสซิดด้วยเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซรีซิน 5%/แอลจีเนตที่ผู้วิจัยใช้ศึกษาในครั้งนี้

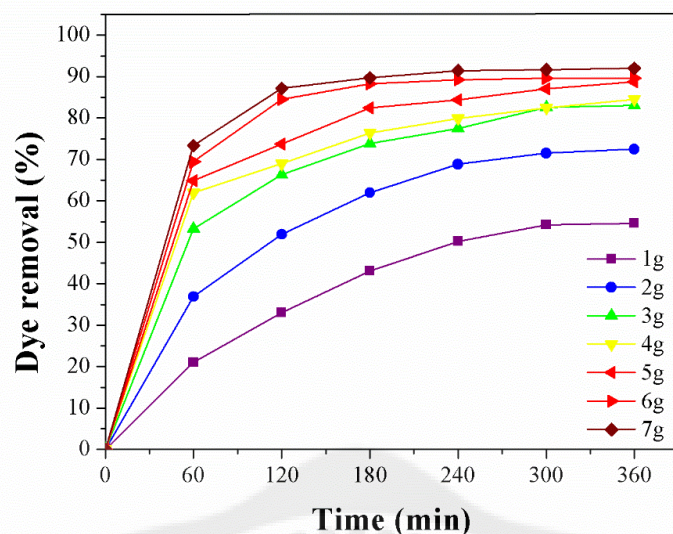
ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซรีซิน 5%/แอลจีเนต สามารถดูดซับสารละลายสีเบสิกคือ Basic orange 22 300%, Blue 3RL 200% และ Yellow 3GL 200% พบเปอร์เซ็นต์การดูดซับได้แก่ 28.97%, 56.39% และ 45.10% ตามลำดับ และสามารถดูดซับสีสารละลายแอสซิดคือ Red N-2RBL, Navy M-DNL และ Yellow GC พบเปอร์เซ็นต์การดูดซับได้แก่ 49.18%, 57.06% และ 29.92% ตามลำดับ ที่เวลา 360 นาที ปริมาณวัสดุดูดซับ 1 กรัม

5. ปริมาณของจำนวนเม็ดวัสดุเชิงประกอบที่เหมาะสมในการดูดซับ

จากการทดลองหาอัตราส่วนของเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซรีซิน/แอลจีเนต ที่มีความสามารถในการดูดซับที่ดีที่สุด และระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุลที่เร็วที่สุด และค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายสีเบสิกและสีแอสซิดแล้ว ขึ้นต่อไปในการทดลองคือการหาปริมาณของวัสดุดูดซับที่ดีที่สุด โดยใช้ปริมาณวัสดุดูดซับตั้งแต่ 1, 2, 3, 4, 5, 6 และ 7 กรัม

ตาราง 17 เปอร์เซ็นต์การดูดซับสารละลายสีเบสิก (Basic orange 22 300%) เทียบกับปริมาณเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซรีซิน 5%/แอลจีเนต ระยะเวลาที่ 60-360 นาที เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 8 ความเข้มข้นของสารละลายสีเบสิก 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

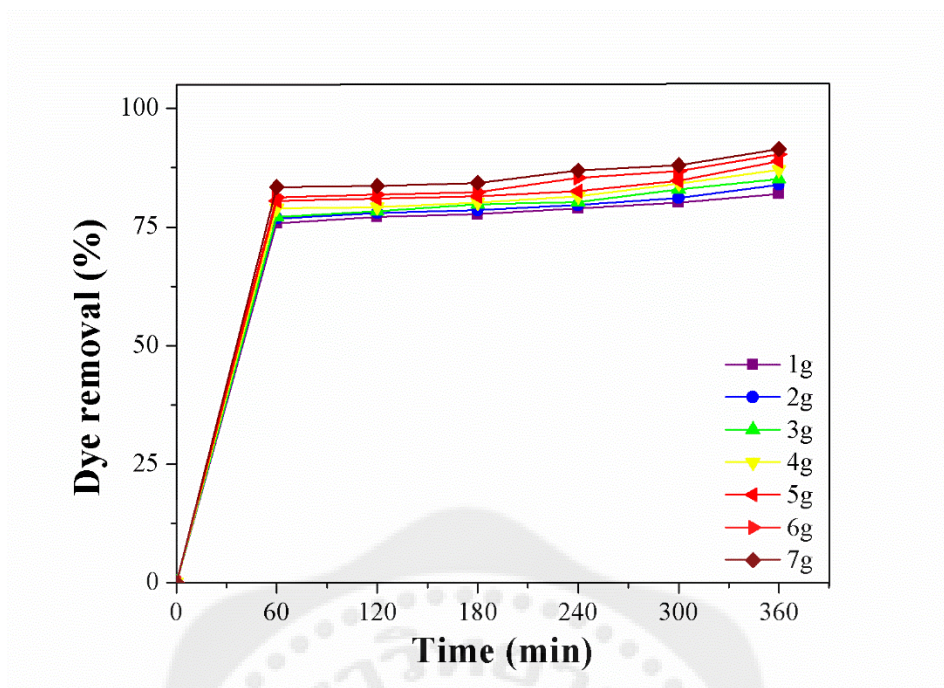
เวลา (นาที)	เปอร์เซ็นต์การดูดซับสารละลายสีเบสิก						
	ปริมาณวัสดุดูดซับ (กรัม)						
	1	2	3	4	5	6	7
60	21.00	36.87	53.27	61.94	64.83	69.43	73.33
120	32.98	51.89	66.31	68.93	73.67	84.48	87.11
180	43.06	61.98	73.9	76.35	82.41	88.28	89.67
240	50.22	68.86	77.46	79.94	84.43	89.23	91.46
300	54.19	71.51	82.6	82.51	87.03	89.56	91.66
360	54.64	72.47	83.11	84.55	88.72	89.64	92.00



ภาพประกอบ 79 เปรอ์เซ็นต์การดูดซับสารละลายสีเบสสิค (Basic orange 22 300%) เทียบกับ ปริมาณเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิม 5%/แอลจิเนต ระยะเวลาที่ 0-360 นาที เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 8 ความเข้มข้นของสารละลายสีเบสสิค 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

ตาราง 18 เปรอ์เซ็นต์การดูดซับสารละลายสีเบสสิค (Blue BG 200% 01) เทียบกับปริมาณเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิม 5%/แอลจิเนต ระยะเวลาที่ 60-360 นาที เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 8 ความเข้มข้นของสารละลายสีเบสสิค 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

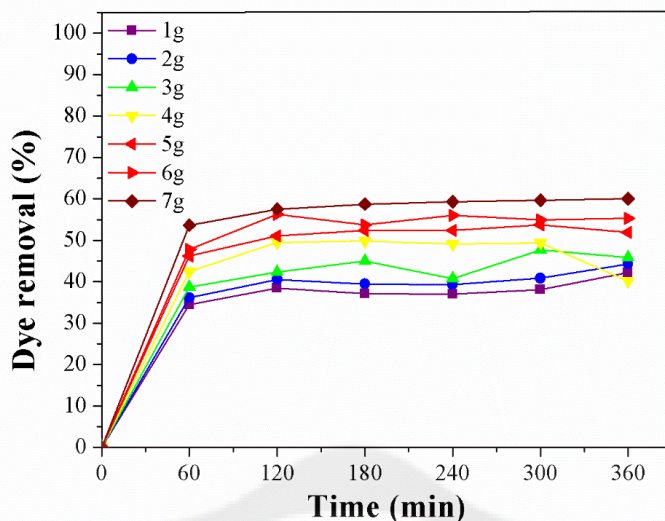
เวลา (นาที)	เปอ์เซ็นต์การดูดซับสารละลายสีเบสสิค						
	ปริมาณเม็ดวัสดุดูดซับ (กรัม)						
	1	2	3	4	5	6	7
60	75.84	76.78	77.13	78.94	80.53	81.23	83.42
120	77.11	77.98	78.37	79.16	80.97	81.88	83.65
180	77.67	78.53	79.76	80.10	81.54	82.32	84.32
240	78.95	79.61	80.27	81.43	82.55	85.38	86.87
300	80.12	81.15	82.93	84.15	84.73	86.79	88.01
360	82.01	83.92	85.16	87.09	88.93	90.28	91.42



ภาพประกอบ 80 เพอร์เซนต์การดูดซับสารละลายสีเบสิค (Blue BG 200% 01) เทียบกับปริมาณ
เม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิม 5%/แอลจีเนต ระยะเวลาที่ 0-360 นาที เมื่อค่าความเป็นกรด-ต่าง
เท่ากับ 8 ความเข้มข้นของสารละลายสีเบสิค 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

ตาราง 19 เพอร์เซนต์การดูดซับสารละลายสีเบสิค (Yellow 3GL 200%) เทียบกับปริมาณเม็ดวัสดุ
เชิงประกอบเซริซิม 5%/แอลจีเนต ระยะเวลาที่ 60-360 นาที เมื่อค่าความเป็นกรด-ต่างเท่ากับ
8 ความเข้มข้นของสารละลายสีเบสิค 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

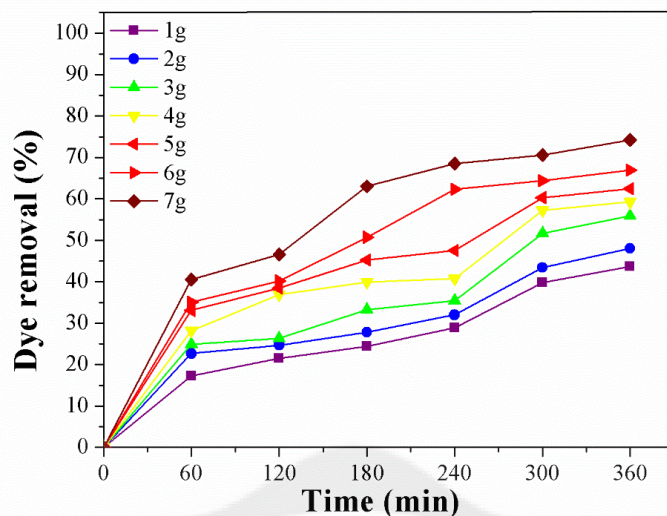
เวลา (นาที)	เพอร์เซนต์การดูดซับสารละลายสีเบสิค						
	ปริมาณเม็ดวัสดุดูดซับ (กรัม)						
	1	2	3	4	5	6	7
60	34.45	36.13	38.75	42.47	46.19	47.80	53.64
120	38.53	40.56	42.37	49.46	51.07	56.25	57.56
180	37.17	39.50	44.99	49.81	52.38	53.74	58.76
240	37.01	39.35	40.76	49.11	52.38	56.05	59.27
300	38.12	40.86	47.70	49.36	53.69	54.94	59.67
360	42.27	44.28	45.89	40.17	51.88	55.34	60.07



ภาพประกอบ 81 เปรอ์เซ็นต์การดูดซับสารละลายสีเบสิก (Yellow 3GL 200%) เทียบกับปริมาณเม็ตวัสดุเชิงประกอบเซริซัน 5%/แอลจิเนต ระยะเวลาที่ 0-360 นาที เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 8 ความเข้มข้นของสารละลายสีเบสิก 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

ตาราง 20 เปรอ์เซ็นต์การดูดซับสารละลายสีแอซิด (Red N-2RBL) เทียบกับปริมาณเม็ตวัสดุเชิงประกอบเซริซัน 5%/แอลจิเนต ระยะเวลาที่ 60-360 นาที เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 2 ความเข้มข้นของสารละลายสีแอซิด 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

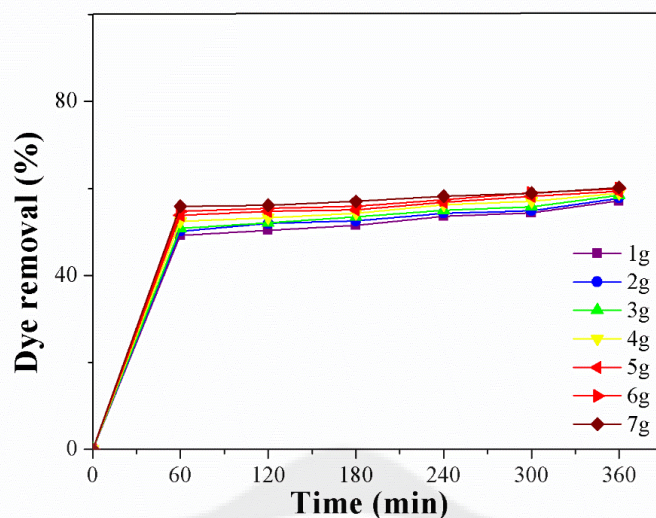
เวลา (นาที)	เปอร่เซ็นต์การดูดซับสารละลายสีแอซิด						
	ปริมาณเม็ตวัสดุดูดซับ (กรัม)						
	1	2	3	4	5	6	7
60	17.27	22.67	24.83	28.20	33.06	35.08	40.48
120	21.46	24.69	26.31	36.85	38.47	40.22	46.57
180	24.43	27.80	33.19	39.94	45.20	50.74	63.02
240	28.88	31.98	35.49	40.75	47.50	62.34	68.55
300	39.81	43.45	51.68	57.21	60.32	64.37	70.58
360	43.72	48.04	55.87	59.24	62.48	66.93	74.22



ภาพประกอบที่ 82 เปรอ์เซ็นต์การดูดซับสารละลายสีแอสิด (Red N-2RBL) เทียบกับปริมาณเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซัน 5%/แอลจิเนต ระยะเวลาที่ 0-360 นาที เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 2 ความเข้มข้นของสารละลายสีแอสิด 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

ตาราง 21 เปรอ์เซ็นต์การดูดซับสารละลายสีแอสิด (Navy M-DNL) เทียบกับปริมาณเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซัน 5%/แอลจิเนต ระยะเวลาที่ 60-360 นาที เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 2 ความเข้มข้นของสารละลายสีแอสิด 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

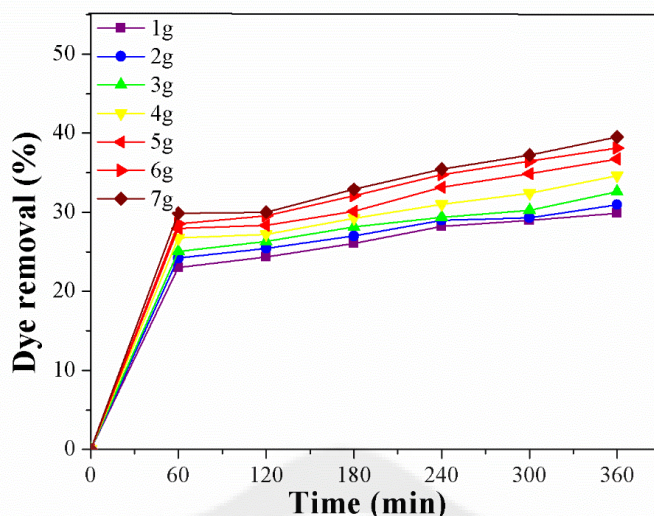
เวลา (นาที)	เปอร่เซ็นต์การดูดซับสารละลายสีแอสิด						
	ปริมาณเม็ดวัสดุดูดซับ (กรัม)						
	1	2	3	4	5	6	7
60	49.21	50.13	50.87	52.43	53.88	54.73	55.91
120	50.34	51.95	52.10	53.21	54.72	55.44	56.17
180	51.53	52.51	53.44	54.32	55.11	55.97	57.02
240	53.64	54.33	54.99	56.24	56.87	57.34	58.22
300	54.37	54.89	55.76	57.09	58.21	58.97	58.95
360	57.12	57.78	58.45	58.88	59.31	59.98	60.22



ภาพประกอบที่ 83 เปร้เซ็นต์การดูดซับสารละลายสีแอสิด (Navy M-DNL) เทียบกับปริมาณเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซัน 5%/แอลจิเนต ระยะเวลาที่ 0-360 นาที เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 2 ความเข้มข้นของสารละลายสีแอสิด 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

ตาราง 22 เปร้เซ็นต์การดูดซับสารละลายสีแอสิด (Yellow GC) เทียบกับปริมาณเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซัน 5%/แอลจิเนต ระยะเวลาที่ 60-360 นาที เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 2 ความเข้มข้นของสารละลายสีแอสิด 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

เวลา (นาที)	เป้เร้เซ็นต์การดูดซับสารละลายสีแอสิด						
	ปริมาณเม็ดวัสดุดูดซับ (กรัม)						
	1	2	3	4	5	6	7
60	23.01	24.18	25.05	26.72	27.98	28.55	29.87
120	24.35	25.44	26.31	27.19	28.34	29.57	30.01
180	26.07	26.98	28.12	29.21	30.11	32.10	32.88
240	28.21	28.99	29.35	30.98	33.17	34.78	35.44
300	28.95	29.31	30.22	32.37	34.87	36.43	37.22
360	29.85	30.94	32.56	34.61	36.73	38.11	39.53



ภาพประกอบ 84 เปรอ์เซ็นต์การดูดซับสารละลายสีแอสิด (Yellow GC) เทียบกับปริมาณเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจิเนต ระยะเวลาที่ 0-360 นาที เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 2 เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสีแอสิด 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

จากภาพประกอบ 79-83 และตารางที่ 17-22 เป็นผลแสดงปริมาณเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจิเนต ที่เหมาะสมต่อการดูดซับ โดยปรับสภาวะของสารละลายเบสิกและ สีแอสิด ความเข้มข้นของสารละลายเบสิกและสีแอสิด 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างสูงสุดสำหรับสารละลายเบสิกและสีแอสิดเท่ากับ 8 และ 2 ตามลำดับ ทำการดูดซับสารละลายเบสิกและสีแอสิดเป็นเวลาตั้งแต่ 0-360 นาที และใช้ปริมาณเม็ดวัสดุดูดซับตั้งแต่ 1, 2, 3, 4, 5, 6 และ 7 กรัม

จากภาพประกอบ 79 และ 82 สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อเพิ่มเวลาและปริมาณของวัสดุดูดซับเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ความสามารถในการดูดซับสารละลายเบสิก (Basic orange 22 300%) และสีแอสิด (Red N-2RBL) ค่อยๆเพิ่มขึ้นตามเวลาและปริมาณของเม็ดวัสดุดูดซับ เนื่องจากการเพิ่มปริมาณวัสดุดูดซับจะทำให้พื้นที่ผิวในการดูดซับมีมากขึ้น ซึ่งงานวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Huong และคณะ (Houng; et al. 2017: 220-229) Houng และคณะได้ใช้ mGO/beads ในการศึกษาการดูดซับ Cr(VI) และ As(V) พบว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับของทั้ง Cr(VI) และ As(V) เพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณของ mGO/beads ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยในครั้งนี้ เนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณวัสดุดูดซับจะทำให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน งานวิจัยนี้จึงสนับสนุนการเพิ่มปริมาณของวัสดุดูดซับเพื่อเพิ่มเปอร์เซ็นต์การดูดซับ

จากภาพประกอบ 80, 81, 83 และ 84 สังเกตได้ว่าเมื่อปริมาณวัสดุดูดซับ 1, 2, 3, 4, 5, 6 และ 7 กรัมมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับสารละลายเบสิกและสีแอสิดเพิ่มมากขึ้น โดยเซริซินปริมาณ 1 กรัม มีความสามารถในการดูดซับสารละลายเบสิกและสีแอสิดได้ใกล้เคียงกับเซริซินปริมาณ 2, 3,

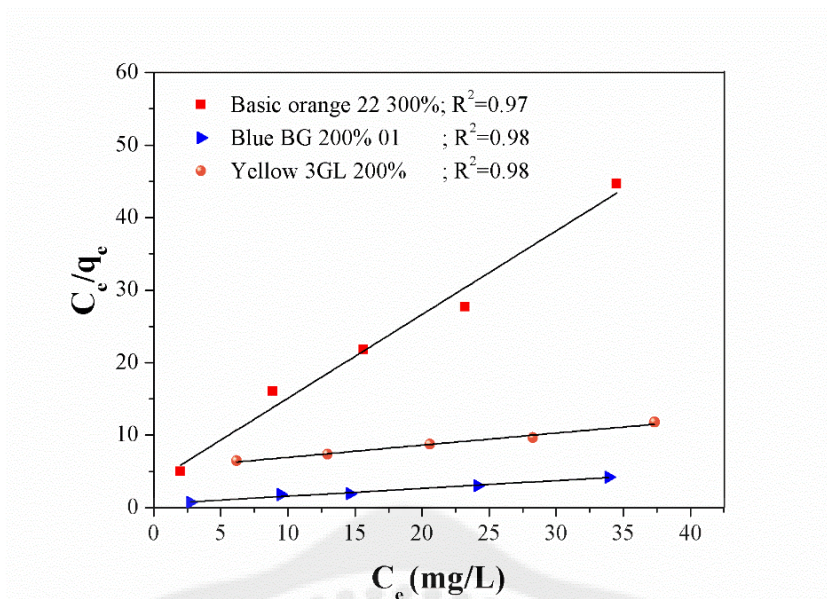
4, 5, 6 และ 7 กรัมเมื่อเพิ่มเวลามากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณเม็ดวัสดุดูดซับจะทำให้ผิวของเม็ดวัสดุดูดซับติดกันมากจนทำให้โมเลกุลของสีและผิวของเม็ดวัสดุดูดซับไม่สามารถติดกันได้ทั่วทั้งเม็ดรวมไปถึงอัตราการเขยาดด้วยเครื่องเขยาสารสามารถเขยาดได้ 120 รอบต่อนาที จึงส่งให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับของวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจีเนต ปริมาณ 1, 2, 3, 4, 5, 6 และ 7 กรัมไม่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามการเพิ่มปริมาณวัสดุดูดซับจะทำให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับหรือค่าปริมาณดูดซับจำเพาะมีค่าลดลงเนื่องจากน้ำหนักของสีย้อมต่อน้ำหนักของวัสดุดูดซับมีค่าลดลง

6. ไอโซเทิร์มของการดูดซับ

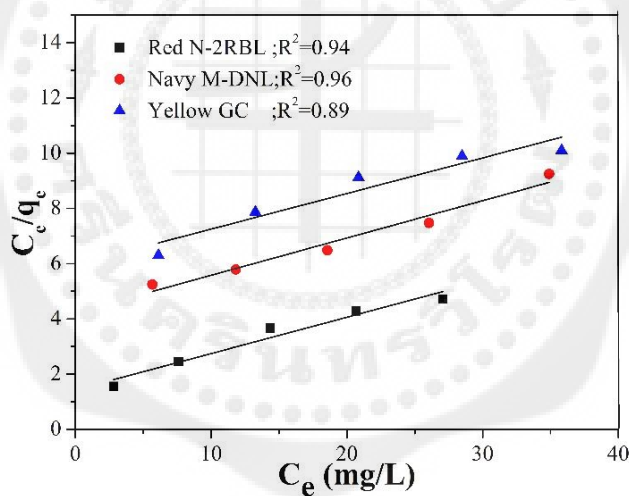
จากผลการศึกษาไอโซเทิร์มตามทฤษฎีแลงเมียร์และฟรุนดลิชของวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจีเนต ระยะเวลา 360 นาที ค่าความเป็นกรด-ด่างของสีเบสิคเท่ากับ 8 และสีเบสิคเท่ากับ 2 ปริมาณของวัสดุดูดซับ 1 กรัม สารละลายสีเบสิคและสีแอซิดความเข้มข้นระหว่าง 10-50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 50 มิลลิลิตร ความสัมพันธ์ของสารละลายสีเบสิคและสีแอซิดที่ถูกดูดซับบนวัสดุดูดซับ

ตาราง 23 ผลไอโซเทิร์มการดูดซับสารละลายสีเบสิคและสีแอซิดตามทฤษฎีแลงเมียร์

ชนิดของสารละลาย	Langmuir equation		
	q_m (mg/g)	b	R^2
สีเบสิค			
Basic orange 22 300%	8.31	37.06	0.97
Blue BG 200% 01	9.33	43.75	0.98
Yellow 3GL 200%	5.98	1.14	0.98
สีแอซิด			
Red N-2RBL	7.60	5.31	0.94
Navy M-DNL	7.60	5.32	0.96
Yellow GC	10.17	0.52	0.89



ภาพประกอบ 85 การจำลองการดูดซับสารละลายสีเบสิคตามทฤษฎีแลงเมียร์



ภาพประกอบ 86 การจำลองการดูดซับสารละลายสีแอซิดตามทฤษฎีแลงเมียร์

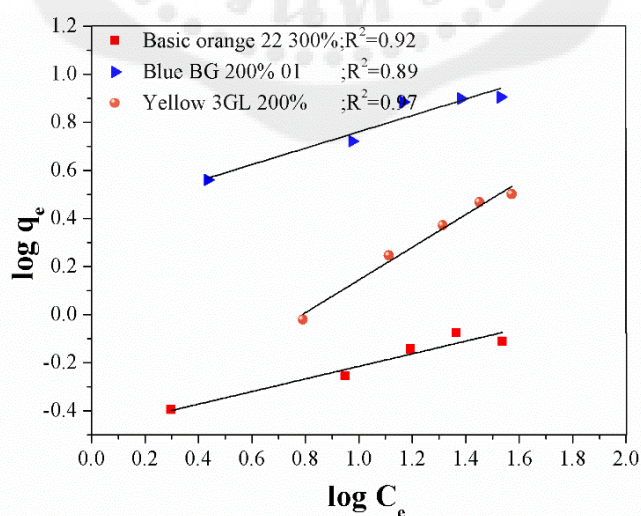
จากภาพประกอบที่ 85 แสดงการจำลองการดูดซับสารละลายสีเบสิคตามทฤษฎีแลงเมียร์ โดยสามารถอธิบายความสัมพันธ์ของปริมาณการดูดซับบนวัสดุดูดซับ จากสมการการดูดซับแบบแลงเมียร์ ในสมการที่ 2.1 เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง C_e/q_e กับ C_e ค่าคงที่ไอโซเทอรั่มของการดูดซับ ได้ผลดังตาราง 23 สามารถพิจารณาค่าความสามารถสูงสุดในการดูดซับแบบชั้นเดี่ยว (mg/g) ของสีเบสิคได้แก่ Basic orange 22 300%, Blue BG 200% 01 และ Yellow 3GL 200% มีค่าเท่ากับ 8.31, 9.33 และ 5.98 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ของสีเบสิคมีค่าเท่ากับ 0.97, 0.98 และ 0.98 ตามลำดับ

จากภาพประกอบ 86 แสดงการจำลองการดูดซับสารละลายสีแอมซิดตามทฤษฎีแลงเมียร์ โดยสามารถพิจารณาค่าความสามารถสูงสุดในการดูดซับแบบชั้นเดียว (mg/g) ของสีแอมซิด ได้แก่ Red N-2RBL, Navy M-DNL และ Yellow GC มีค่าเท่ากับ 7.60, 7.40 และ 10.17 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ของสีเบสิกมีค่าเท่ากับ 0.94, 0.97 และ 0.89 ตามลำดับ

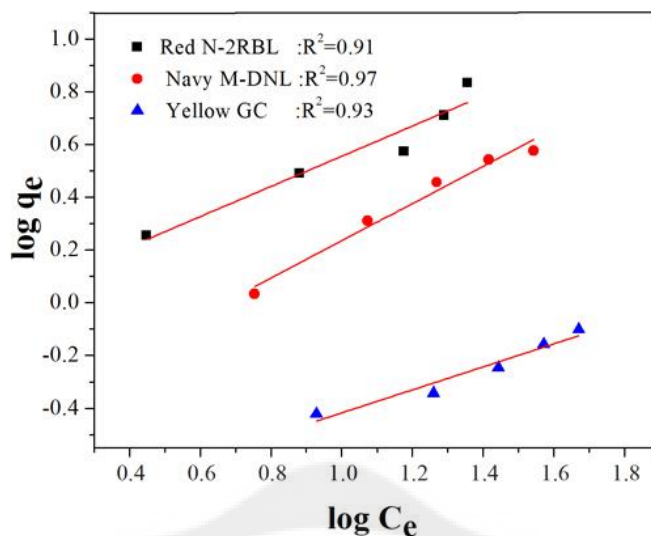
พบว่า การดูดซับของสีเบสิกและสีแอมซิดมีความสามารถสูงสุดในการดูดซับและค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ใกล้เคียงกัน

ตาราง 24 ผลไอโซเทิร์มการดูดซับสารละลายของสีเบสิกและสีแอมซิดตามทฤษฎีฟรุนดลิช

ชนิดของสารละลาย	Freundlich equation		
	K_f	$1/n$	R^2
สีเบสิก			
Basic orange 22 300%	3.33	0.26	0.92
Yellow 3GL 200%	0.29	0.68	0.97
Blue BG 200% 01	0.32	2.85	0.89
สีแอมซิด			
Red N-2RBL	0.96	0.57	0.91
Navy M-DNL	0.34	0.71	0.97
Yellow GC	0.14	0.44	0.93



ภาพประกอบ 87 การจำลองการดูดซับสารละลายสีเบสิกตามทฤษฎีฟรุนดลิช



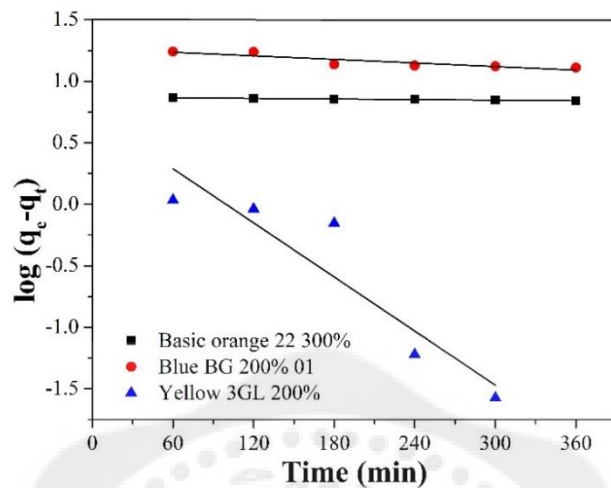
ภาพประกอบ 88 การจำลองการดูดซับสารละลายสีแอสิตตามทฤษฎีฟรุนดลิช

จากภาพประกอบ 89 แสดงการจำลองการดูดซับสารละลายสีเบสตามทฤษฎีฟรุนดลิช โดยสามารถอธิบายความสัมพันธ์ของปริมาณการดูดซับบนวัสดุดูดซับแบบหลายชั้น จากสมการการดูดซับแบบฟรุนดลิช ในสมการที่ 2.3 เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log C_e$ กับ $\log q_e$ ค่าคงที่ไอโซเทิร์มของการดูดซับ ได้ผลดังตารางที่ 24 สามารถพิจารณาค่าคงที่สมการการดูดซับแบบหลายชั้นของฟรุนดลิช ของสีเบสได้แก่ Basic orange 22 300%, Blue BG 200% 01 และ Yellow 3GL 200% มีค่าเท่ากับ 3.3, 0.29 และ 0.32 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ของสีเบสมีค่าเท่ากับ 0.92, 0.97 และ 0.89 ตามลำดับ

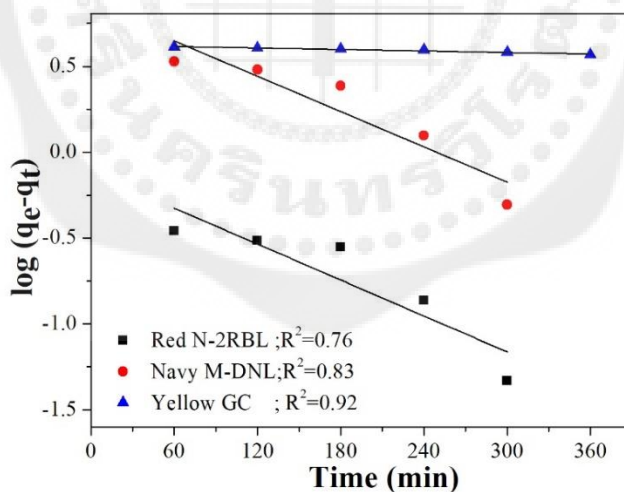
จากภาพประกอบ 90 แสดงการจำลองการดูดซับสารละลายสีแอสิตตามทฤษฎีฟรุนดลิช โดยสามารถพิจารณาค่าคงที่สมการการดูดซับแบบหลายชั้นของฟรุนดลิชของสีแอสิต ได้แก่ Red N-2RBL, Navy M-DNL และ Yellow GC มีค่าเท่ากับ 0.91, 0.97 และ 0.93 ตามลำดับและค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ของสีแอสิตมีค่าเท่ากับ 0.91, 0.97 และ 0.93 ตามลำดับ

พบว่าการดูดซับสีเบสและสีแอสิตสอดคล้องกับทฤษฎีแลงเมียร์ที่เกิดจากแรงดึงดูดทางกายภาพที่สามารถผันกลับได้โดยการดูดซับสูงสุดเกิดขึ้นแบบชั้นเดียว สามารถสังเกตได้ว่าการดูดซับสีเบสและสีแอสิตด้วยวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจินเนต จะสอดคล้องกับทฤษฎีการดูดซับแบบใด สามารถพิจารณาได้จากค่าสหสัมพันธ์ของสมการถดถอยเชิงเส้น (Linear regression correlation, R^2) จากการศึกษพบว่า สีย้อมแต่ละชนิดเมื่อถูกดูดซับด้วยวัสดุดูดซับที่แตกต่างกัน ก็จะมีพฤติกรรมดูดซับที่แตกต่างกันออกไป ทำให้สรุปได้ว่า พฤติกรรมดูดซับระหว่างสีย้อมใด ๆ กับวัสดุดูดซับที่ต่างชนิดกันจะมีรูปแบบที่เฉพาะในการดูดซับ ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองการดูดซับจะต้องศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับเท่านั้น

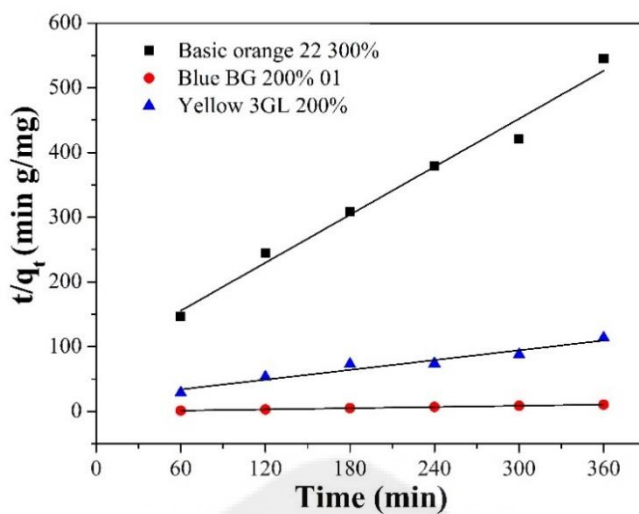
7. จลนศาสตร์ของการดูดซับ



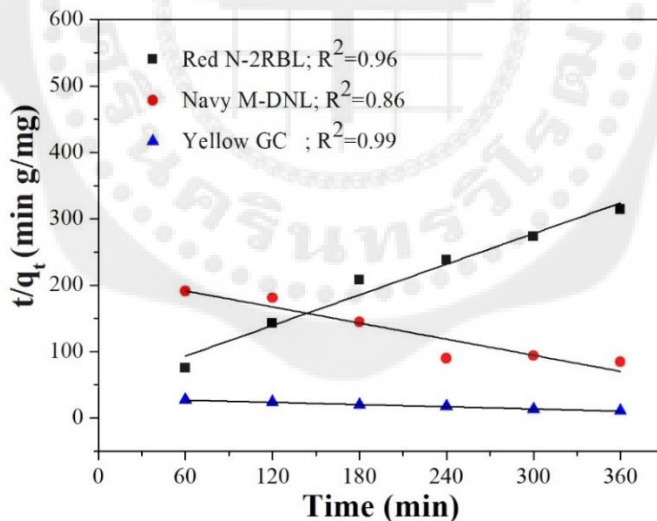
ภาพประกอบ 89 การจำลองจลนศาสตร์ Pseudo-first order model ที่ใช้ในการดูดซับสีเบสิก เม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซัน 5%/แอลจีเนต ระยะเวลาที่ 60-360 นาที เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 2 เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสีเบสิก 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร



ภาพประกอบ 90 การจำลองจลนศาสตร์ Pseudo-first order model ที่ใช้ในการดูดซับสีแอซิด เม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซัน 5%/แอลจีเนต ระยะเวลาที่ 60-360 นาที เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 2 เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสีแอซิด 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร



ภาพประกอบ 91 การจำลองจลนศาสตร์ Pseudo-second order model ที่ใช้ในการดูดซับสีเบสิก เม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิม 5%/แอลจีเนต ระยะเวลาที่ 60-360 นาที เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 2 เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสีแอสิด 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร



ภาพประกอบ 92 การจำลองจลนศาสตร์ Pseudo-second order model ที่ใช้ในการดูดซับสีแอสิด เม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิม 5%/แอลจีเนต ระยะเวลาที่ 60-360 นาที เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 2 เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสีแอสิด 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

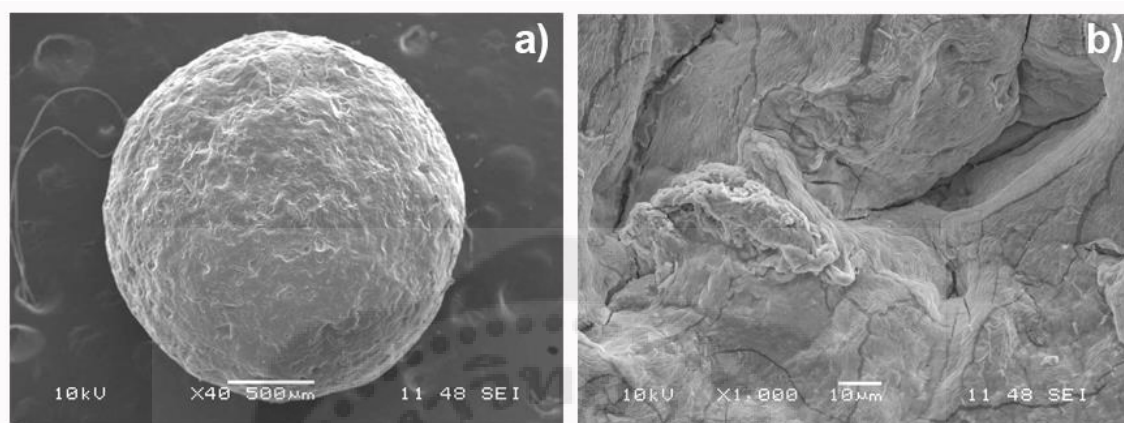
ตาราง 25 การจำลองจลนศาสตร์ Pseudo-first order model และ Pseudo-second order model ที่ใช้ในการดูดซับ สารละลายสีเบสและสีแอซิด

ชนิดของสารละลาย	$q_{e(\text{exp})}$	pseudo-first-order			pseudo-second-order		
		$q_{e(\text{cal})}$ (mg/g)	K_1 (min) ⁻¹	R^2	$q_{e(\text{cal})}$ (mg/g)	K_2 (g/mg min ⁻¹)	R^2
สีเบส							
Basic orange 22 300%	13.0272	0.7972	-0.0054	0.9643	8.0906	8.0428	0.9833
Blue BG 200% 01	8.0416	1.264	-0.0005	0.8055	32.2580	1974.165	0.9993
Yellow 3GL 200%	3.167	0.6767	-0.0072	0.8673	3.971	0.0001	0.9317
สีแอซิด							
Red N-2RBL	5.7316	0.7159	-0.0041	0.8907	6.5060	0.0002	0.9673
Navy M-DNL	3.6860	0.7300	-0.0025	0.7569	2.5000	0.0289	0.9266
Yellow GC	32.8872	0.6897	-0.0009	0.9022	1.8050	0.0101	0.9993

เมื่อ q_e และ q_t คือปริมาณในการดูดซับของวัสดุดูดซับ ณ เวลาสมมูล และปริมาณในการดูดซับของวัสดุดูดซับ ณ เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม), t คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที) และ k_1 และ k_2 คือ ค่าคงที่ของอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง Pseudo-first order และค่าคงที่ของอัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่สอง Pseudo-second order ตามลำดับ เมื่อนำข้อมูลจากการศึกษาอิทธิพลของเวลา มาเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง $\log(q_e - q_t)$ กับเวลา แสดงดังภาพประกอบที่ 89-90 และ t/q_t กับเวลา แสดงดังภาพประกอบ 91-92 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ของแบบจำลองสมการ Pseudo-second order ทั้งสี่เบสและสี่แอซิดให้ผลการทดลองสอดคล้องกับ Pseudo-second order มากกว่าแบบจำลองสมการ Pseudo-first order โดยมีค่าคงที่ของอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง Pseudo-first order ของสี่เบสได้แก่ Basic orange 22 300%, Blue BG 200% 01 และ Yellow 3GL 200% มีค่าเท่ากับ -0.0054, -0.0005 และ -0.0072 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) มีค่าเท่ากับ 0.96, 0.80 และ 0.86 ตามลำดับ ค่าคงที่ของอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง Pseudo-second order ของสี่เบสได้แก่ Basic orange 22 300%, Blue BG 200% 01 และ Yellow 3GL 200% มีค่าเท่ากับ 8.0428, 1974.165 และ 0.0001 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) มีค่าเท่ากับ 0.98, 0.99 และ 0.93 ตามลำดับ และผลการทดลองของสี่แอซิด โดยมีค่าคงที่ของอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง Pseudo-first order ของสี่แอซิดได้แก่ Red N-2RBL, Navy M-DNL และ Yellow GC มีค่าเท่ากับ -0.0041, -0.0025 และ -0.0001 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) มีค่าเท่ากับ 0.89, 0.75 และ 0.93 ตามลำดับ ค่าคงที่ของอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง Pseudo-second order ของสี่แอซิดได้แก่ Red N-2RBL, Navy M-DNL และ Yellow GC มีค่าเท่ากับ 6.5060, 2.5000 และ 1.8050 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) มีค่าเท่ากับ 0.96, 0.92 และ 0.99 ตามลำดับ

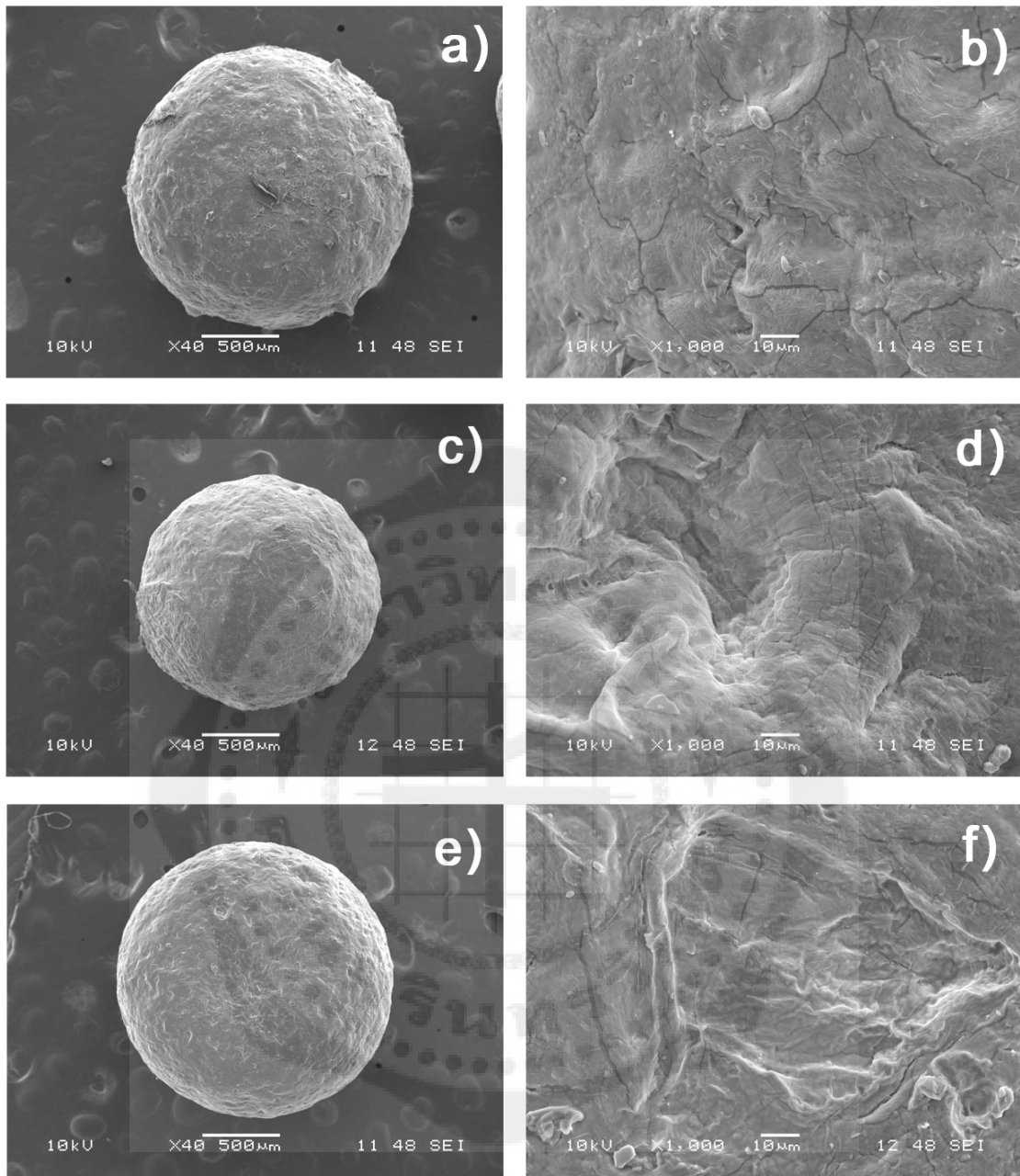
8. ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจีเนต

จากการนำตัวอย่างเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%แอลจีเนต ก่อนและหลังการดูดซับ สีเบสสิกและสีแอซิดไปวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ได้ผลดังภาพประกอบ 95-97



ภาพประกอบ 93 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจีเนตที่กำลังขยาย a) 40 เท่า และ b) 1,000 เท่า

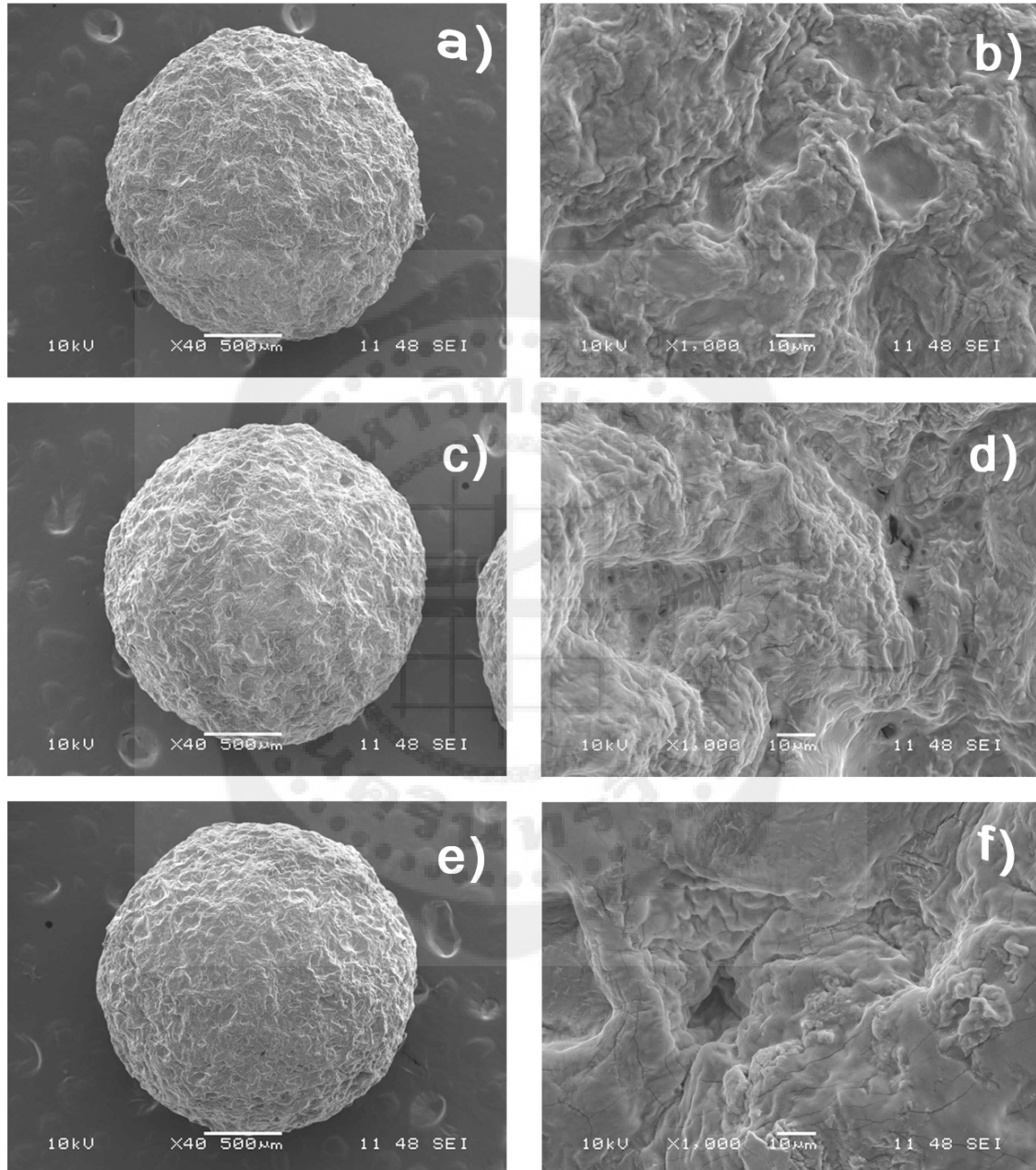
จากภาพประกอบ 93 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อศึกษา ลักษณะพื้นผิวของเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจีเนตก่อนการดูดซับที่กำลังขยาย 40 เท่า และ 1,000 เท่า สังเกตพบว่าพื้นผิวของเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจีเนตมีลักษณะขรุขระ เนื่องจากเนื้อในของเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจีเนตมีส่วนประกอบของเซริซินและแอลจีเนตซึ่งเป็นวัสดุต่างชนิดกันผสมกันเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน เส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจีเนตมีความยาวประมาณ 2,000 ไมโครเมตร



ภาพประกอบ 94 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจินเตหลังการดูดซับสารละลายสีเบส Basic orange 22 300% a)-b), Blue BG 200% c)-d) และ Yellow 3GL 200% e)-f) ที่กำลังขยาย 40 เท่า และ 1,000 เท่า ตามลำดับ

จากภาพประกอบ 94 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อศึกษา ลักษณะพื้นผิวของเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจินเตหลังการดูดซับด้วยสารละลายสีเบส ได้แก่ Basic orange 22 300% a)-b), Blue BG 200% 01 c)-d) และ Yellow 3GL 200% e)-f) ที่ กำลังขยาย 40 เท่า และ 1,000 เท่า จะสังเกตเห็นว่าพื้นผิวของเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอล

จินตมีลักษณะเรียบมากกว่าเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจินตก่อนการดูดซับ เนื่องจาก การดูดซับสี่เบสิกทำให้เกิดการเกาะติดของโมเลกุลของสีที่พื้นผิวของเม็ดวัสดุดูดซับ จึงทำให้เม็ด วัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจินตมีพื้นผิวเรียบขึ้นจากเดิม



ภาพประกอบ 95 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจินต หลังการดูดซับสารละลายสีแอซิด Red N-2RBL a)-b), Yellow GC c)-d) และ Navy M-DNL e)-f) ที่กำลังขยาย 40 เท่า และ 1,000 เท่า ตามลำดับ

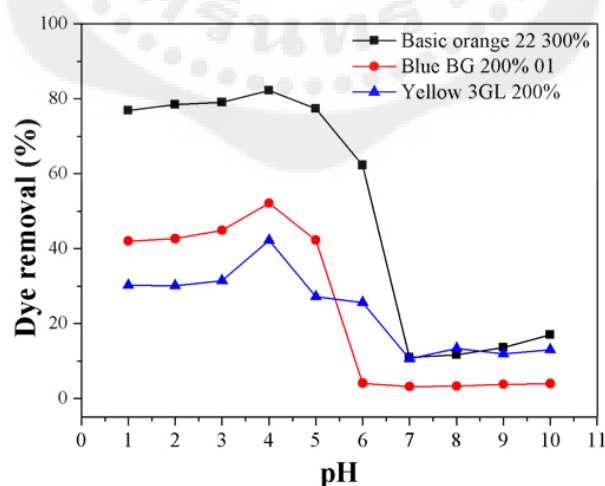
จากภาพประกอบ 95 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อศึกษา ลักษณะพื้นผิวของเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจินิตหลังการดูดซับด้วยสารละลายสีแอสิต ทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ Red N-2RBL a)-b), Navy M-DNL c)-d) และ Yellow GC e)-f) ที่กำลังขยาย 40 เท่า และ 1,000 เท่า สังเกตพบว่าพื้นผิวของเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจินิตมีลักษณะ ขรุขระมากกว่าเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจินิตก่อนการดูดซับ เนื่องจากการดูดซับ สารละลายสีแอสิตต้องผ่านการปรับสภาวะค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายสีแอสิตต่ำ จึงทำให้ แอลจินิตที่เป็นส่วนผสมของเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจินิตสลายตัว เนื่องจากแอลจินิต สลายตัวที่ค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำกว่า 5 และสูงกว่า 10 (Siddhesh; et al. 2012: 3279-3305) แต่ โมเลกุลของสีแอสิตยังคงเกิดจากการดึงดูดกันระหว่างประจุบวกของเซริซิน และไฮโดรเจน ไอออนที่ค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำในการดูดซับ

9. การเปรียบเทียบสมบัติในการคาย

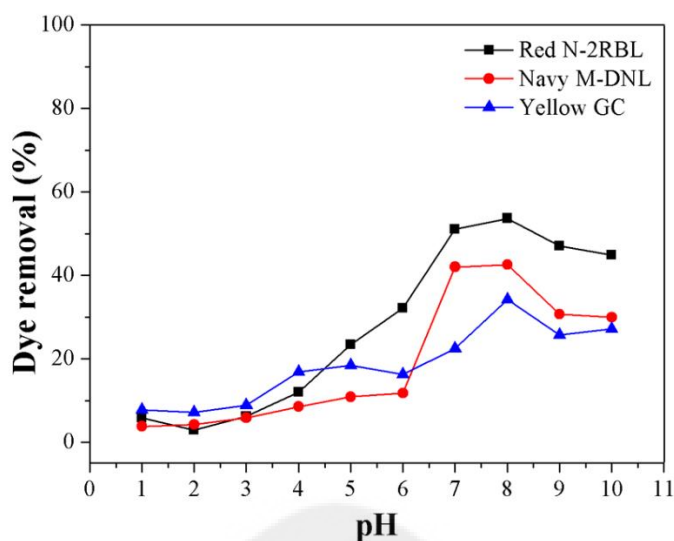
จากการศึกษากระบวนการดูดซับของเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจินิต จึงทำให้เกิดความสนใจในการนำเม็ดวัสดุดูดซับที่ใช้ในการดูดซับแล้ว และสามารถนำมาใช้ใหม่และเป็นการ ลดต้นทุนทางธุรกิจ จึงเกิดการศึกษาการคายซับของเม็ดวัสดุดูดซับที่ผ่านการดูดซับด้วยสารละลาย สีเบสิคและสีแอสิต โดยใช้น้ำกลั่นที่มีการปรับค่าความเป็นกรด-ด่างระหว่าง 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 และ 10 ได้ผลการศึกษาดังตาราง 26

ตาราง 26 เปรอร์เซ็นต์การคายชั้นของสีเบสิกและสีแอซิดกับความเป็นกรด-ต่างระหว่าง 1-10 ด้วย
เม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจีเนต หลังการดูดซับสารละลายสีเบสิกและสีแอซิดที่
ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่เวลา 360 นาที

pH	เปอร์เซ็นต์การคายชั้นของสีเบสิกและสีแอซิด					
	สีเบสิก			สีแอซิด		
	Basic orange 22 300%	Blue BG 200% 01	Yellow 3GL 200%	Red N-2RBL	Navy M-DNL	Yellow GC
1	76.83	42.01	30.23	5.83	3.81	7.76
2	78.45	42.63	30.04	2.91	4.26	7.20
3	79.07	44.85	31.45	6.20	5.87	8.88
4	82.19	52.15	42.15	12.04	8.54	16.88
5	77.36	42.23	27.13	23.35	10.86	18.4
6	62.23	4.07	25.57	32.11	11.78	16.24
7	10.91	3.19	10.54	51.09	42.01	22.40
8	11.67	3.29	13.30	53.64	42.56	34.16
9	13.58	3.79	11.86	47.08	30.67	25.68
10	17.02	3.93	12.96	44.89	29.93	27.20



ภาพประกอบ 96 เปรอร์เซ็นต์การคายชั้นสารละลายสีเบสิกเทียบกับน้ำกลั่นปรับสถานะค่าความเป็น
กรด-ต่างระหว่าง 1-10 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่เวลา 360 นาที



ภาพประกอบ 97 เปอร์เซ็นต์การคายซับสารละลายสีแอสิตเทียบน้ำกลั่นปรับสภาวะค่าความเป็นกรด-ด่างระหว่าง 1-10 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่เวลา 360 นาที

การทดลองการคายซับของสีเบสิคและสีแอสิตด้วยเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจินเนต โดยใช้น้ำกลั่นปรับสภาวะค่าความเป็นกรด-ด่างระหว่าง 1-10 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่เวลา 360 นาที ซึ่งได้ผลการคายซับตามตาราง 26

จากภาพประกอบ 96 การคายซับของสารละลายสีเบสิคทั้ง 3 ชนิด มีค่าการคายซับในช่วงค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำ โดยได้ใช้ไฮโดรคลอริกในการปรับให้น้ำกลั่นอยู่ในสภาวะกรด พบว่าที่สภาวะกรดทำให้โมเลกุลของสีเบสิคสามารถคายออกมาจากเม็ดวัสดุดูดซับ เนื่องจากไอออนของคลอไรด์มีความว่องไวในการดึงดูดโมเลกุลของสีเบสิค ทำให้โมเลกุลของสีเบสิคที่ถูกดูดซับแบบชั้นเดียวคายออกมาจากผิวของเม็ดวัสดุดูดซับ จึงสังเกตได้ว่าน้ำกลั่นที่ใช้ในการทดลองจะเปลี่ยนสี ส่วนในช่วงค่าความเป็นกรด-ด่างสูงพบว่าการคายโมเลกุลของสีเบสิคลดลง เนื่องจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ไม่สามารถดึงดูดโมเลกุลของสีเบสิคให้หลุดออกจากเม็ดวัสดุดูดซับได้

จากภาพประกอบ 97 การคายซับของสารละลายสีแอสิตทั้ง 3 ชนิดมีความสามารถในการคายในทางตรงกันข้ามกับสีเบสิค เนื่องจากสามารถคายซับที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 8 ที่โดยได้ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ในการปรับน้ำกลั่นให้อยู่ในสภาวะต่าง และสามารถคายซับได้น้อยในสภาวะกรด ซึ่งงานวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ มามูดีและคณะ (Mahmoodi; et al. 2011: 117–125.) มามูดีและคณะได้ใช้ Pine Cone (PC) ในการศึกษาการดูดซับสีแอสิต AB26, AG25 และ AB7 มีความสามารถในการคายซับสูงที่สุดที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 12 พบว่าเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้น พื้นผิวของวัสดุดูดซับจึงเป็นประจุลบเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการผลัดกันระหว่างพื้นผิววัสดุดูดซับที่มีประจุลบและสีแอสิต ทำให้คายซับได้ดีในช่วงค่าความเป็นกรด-ด่างสูง งานวิจัยนี้จึงสนับสนุนการคายซับของสีแอสิตที่ค่าความเป็นกรด-ด่างสูง

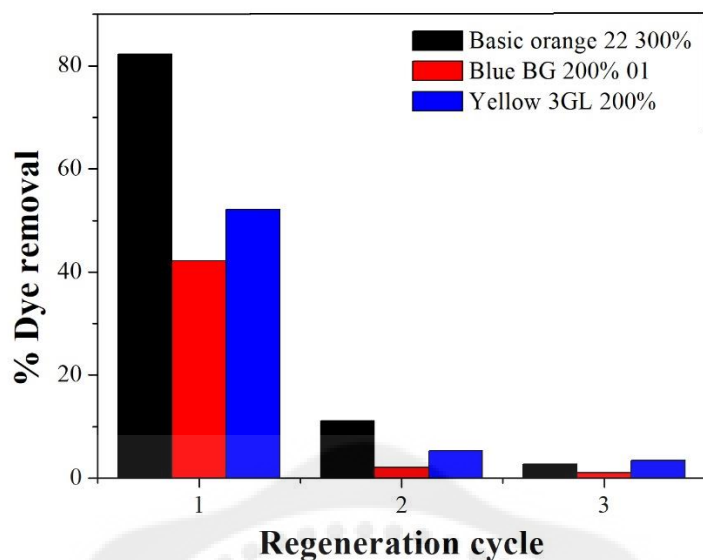
สรุปผลการทดลองได้ว่าการคายซึบของสีเบสิกสามารถคายซึบได้ในสภาวะที่เป็นกรด ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4 และสีแอสิดที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 8 แต่มีข้อจำกัดคือ ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำกว่า 4 และสูงกว่า 8 มีสภาพเป็นกรดแก่และด่างแก่จะทำให้วัสดุดูดซึบพองตัวและสลายไป ดังนั้นค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4 และ 8 จึงเป็นสภาวะกรดและด่างที่มีเปอร์เซ็นต์การคายซึบของสีเบสิกและสีแอสิดสูงที่สุด และยังพบว่า การคายซึบและการดูดซึบมีทิศทางตรงกันข้าม ของค่าความเป็นกรด-ด่าง

10. การศึกษาเมื่อดูดซึบมาใช้ซ้ำ

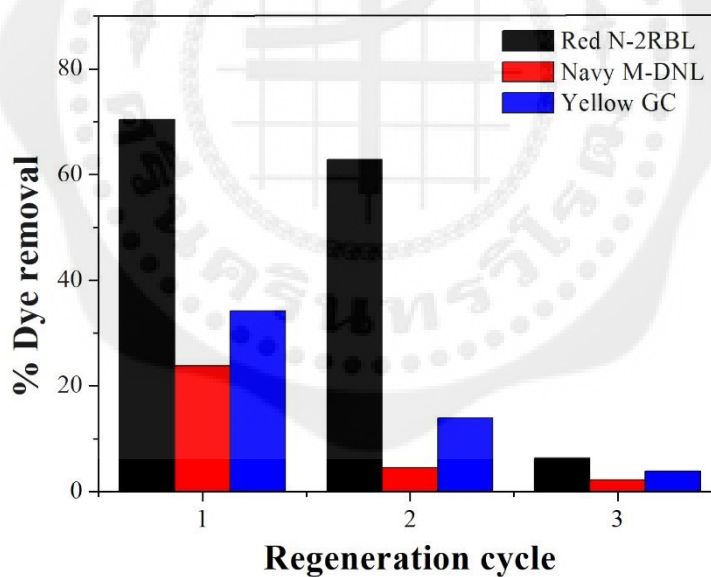
การคายซึบเป็นการศึกษาภายหลังการทราบค่าความเป็นกรด-ด่างในการคายซึบของเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิม 5%/แอลจินเนต พบว่าเม็ดวัสดุดูดซึบสามารถคายซึบได้สูงสุดที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4 และ 8 สำหรับสีเบสิกและสีแอสิด จากนั้นนำมาทดลองการคายซึบซ้ำสามครั้ง ซึ่งการศึกษาครั้งนี้แสดงการนำกลับมาใช้ใหม่ของเม็ดวัสดุดูดซึบที่ผ่านการดูดซึบแล้ว

ตาราง 27 เปอร์เซ็นต์การคายซึบของสารละลายสีเบสิกและสีแอสิด เมื่อนำเม็ดวัสดุดูดซึบมาใช้ซ้ำ

ชนิดของสารละลาย	เปอร์เซ็นต์การคายซึบ (%)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
สีเบสิก			
Basic orange 22 300%	82.19	11.11	2.77
Blue BG 200% 01	42.16	2.07	1.03
Yellow 3GL 200%	52.15	5.27	3.43
สีแอสิด			
Red N-2RBL	70.39	62.83	6.34
Navy M-DNL	23.81	4.51	2.15
Yellow GC	34.16	13.92	2.87



ภาพประกอบ 98 เปรอร์เซ็นต์การคายซับสารละลายสีเบสิคในน้ำกลั่นค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4 ทำการคายซับจำนวน 3 ครั้ง ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่เวลา 360 นาที



ภาพประกอบ 99 เปรอร์เซ็นต์การคายซับสารละลายสีแอสิดในน้ำกลั่นค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 8 ทำการคายซับจำนวน 3 ครั้ง ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่เวลา 360 นาที

จากภาพประกอบ 98-99 เป็นการศึกษาเมื่อดัชนีดูดซับมาใช้ซ้ำของเมื่อดัชนีดูดซับที่ผ่านการดูดซับสารละลายสีเบสิคและสีแอสิด โดยปรับสภาวะความเป็นกรด-ด่างของน้ำกลั่นที่มีการคายซับสูงสุด ปริมาณ 50 มิลลิลิตร เป็นเวลา 360 นาที

จากการนำเม็ดวัสดุดูดซับมาทำการคายซับสีเบสิกและสีแอซิดในครั้งที่ 1, 2 และ 3 ผลการทดลองแสดงดังตาราง 27 และแสดงดังภาพประกอบ 98-99 การคายซับพบว่าสีที่พบบนผิวเม็ดวัสดุดูดซับสามารถหลุดออกมาได้มากที่สุดในการครั้งที่ $1 > 2 > 3$ เปอร์เซ็นต์การคายซับของสารละลายสีเบสิกและสีแอซิดจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ และเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจินตเริ่มสลายไป



บทที่ 5

สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

1. สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของการดูดซับสีเบสิกและสีแอซิด ด้วยเม็ดวัสดุเชิงประกอบแอลจิเนต/เซริซินโดยใช้ แอลจิเนตในอัตราส่วน 2% (w/v) และผงเซริซินในปริมาณ 1%, 2%, 3%, 4% และ 5% (w/v) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ ความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย ปริมาณของวัสดุดูดซับ การศึกษาไอโซเทิร์มของการดูดซับ การศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับ การศึกษาโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาก่อนและหลังการดูดซับ และการศึกษาการคายสีเบสิกและสีแอซิดหลังการดูดซับ

1.1 การศึกษาขนาดและความหนาแน่นของเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน/แอลจิเนต

โดยกำหนดปริมาณแอลจิเนตที่ 2% (w/v) และปริมาณเซริซินที่ 0%, 1%, 2%, 3%, 4% และ 5% (w/v) ขนาดของเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน/แอลจิเนต มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเซริซินจาก 0%, 1%, 2%, 3%, 4% และ 5% (w/v) เช่นเดียวกันกับความหนาแน่นของเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน/แอลจิเนต มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีอัตราส่วนผสมของเซริซินเพิ่มขึ้น

1.2 การศึกษาสมบัติการดูดซับของวัสดุดูดซับ

ทำการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของสารละลายสีเบสิกและสีแอซิดก่อนการดูดซับ ด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer ได้แก่ Basic orange 22 300%, Blue 3RL 200% และ Yellow 3GL 200% ได้แก่ 497.0, 641.5 และ 424.0 นาโนเมตร ตามลำดับและสารละลายแอซิด ได้แก่ Red N-2RBL, Navy M-DNL และ Yellow GC ได้แก่ 303.5, 576.0 และ 400.5 นาโนเมตร ได้สภาวะที่เหมาะสมดังนี้

ก). ศึกษาอัตราส่วนผสมของเม็ดวัสดุดูดซับและระยะเวลาที่เข้าสู่สมดุลในการดูดซับ สารละลายสีเบสิกและสีแอซิด จากการศึกษาพบว่าเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจิเนต มีความสามารถดูดซับสารละลายสีเบสิกและสีแอซิดได้ดีกว่าเม็ดวัสดุดูดซับที่มีอัตราส่วนของเซริซิน 0%, 1%, 2%, 3% และ 4% (w/v) และการศึกษาระยะเวลาที่เข้าสู่สมดุลพบว่า เมื่อเริ่มทำการดูดซับ สารละลายสีเบสิกและสีแอซิดระหว่างเวลา 60-360 นาที การดูดซับสารละลายสีเบสิกและสีแอซิดมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับเพิ่มขึ้นจนถึง 360 นาที หลังจากนั้น 360-480 นาทีเปอร์เซ็นต์การดูดซับลดลง ดังนั้นเวลาที่ดีที่สุดที่ใช้ในการดูดซับคือ 360 นาที โดยสามารถดูดซับสารละลายสีเบสิกคือ Basic Orange 22 300%, Blue 3RL 200% และ Yellow 3GL 200% เปอร์เซ็นต์การดูดซับได้แก่ 42.38%,

25.32% และ 40.35% ตามลำดับ และสามารถดูดซับสีสารละลายแอซิดคือ Red N-2RBL, Navy M-DNL และ Yellow GC เปอร์เซ็นต์การดูดซับได้แก่ 12.16%, 14.24% และ 12.74% ตามลำดับ

ข). การศึกษาอิทธิพลของความเป็นกรด-ด่างที่มีผลต่อการดูดซับ โดยทำการเปรียบเทียบค่าความเป็นกรด-ด่างระหว่าง 1-10 ทำให้ทราบเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีเบสิกเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มค่าความเป็นกรด-ด่าง และสีแอซิดจะมีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีแอซิดเพิ่มขึ้นเมื่อลดค่าความเป็นกรด-ด่าง พบว่าสารละลายสีเบสิกและสีแอซิดมีค่าสูงสุดที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 8 และ 2 ตามลำดับ โดยสารละลายสีเบสิกที่ใช้ในการดูดซับคือ Basic orange 22 300%, Blue 3RL 200% และ Yellow 3GL 200% เปอร์เซ็นต์การดูดซับได้แก่ 28.97%, 56.39% และ 45.10% ตามลำดับ และสารละลายสีแอซิดใช้ในการดูดซับคือ Red N-2RBL, Navy M-DNL และ Yellow GC เปอร์เซ็นต์การดูดซับได้แก่ 49.18%, 57.06% และ 29.92% ตามลำดับ นอกจากนี้เปอร์เซ็นต์การดูดซับมีการเปลี่ยนแปลง เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างเปลี่ยนแปลง เนื่องจากประจุไฟฟ้าบนผิววัสดุดูดซับมีการเปลี่ยนแปลงตามสภาวะที่ใช้ในการดูดซับ เป็นการยืนยันได้ว่าทฤษฎีการดูดซับที่เกิดขึ้นนี้เป็นการดูดซับทางเคมี

ค). การศึกษาปริมาณเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน/แอลจิเนต ที่เหมาะสมในการดูดซับ เมื่อเพิ่มปริมาณด้วยเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจิเนตจาก 1-7 กรัม พบว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับสารละลายสีเบสิกและสีแอซิดเพิ่มขึ้นตามปริมาณของวัสดุดูดซับ อย่างไรก็ตามการเพิ่มปริมาณวัสดุดูดซับจะทำให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับหรือค่าปริมาณดูดซับจำเพาะมีค่าลดลงเนื่องจากน้ำหนักของสีย้อมต่อน้ำหนักของวัสดุดูดซับมีค่าลดลง

1.3 ศึกษาไอโซเทิร์มของการดูดซับสีเบสิกและสีแอซิด โดยเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจิเนต พบว่ามีความสอดคล้องกับแลงเมียร์ไอโซเทิร์ม พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในไอโซเทิร์มแบบแลงเมียร์มีค่ามากกว่าทฤษฎีฟรุนดลิช ดังนั้นการดูดซับสารละลายสีเบสิกและสีแอซิดเป็นกระบวนการดูดซับทางเคมี ซึ่งสามารถเกิดการดูดซับได้แบบชั้นเดียว ผลประสิทธิภาพของการดูดซับสีย้อมสูงสุดของสีเบสิกและสีแอซิด โดยสารละลายสีเบสิกที่ใช้ในการดูดซับคือ Basic orange 22 300%, Blue 3RL 200% และ Yellow 3GL 200% ค่าความสามารถสูงสุดในการดูดซับได้แก่ 8.31, 9.33 และ 5.98 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และสารละลายสีแอซิดใช้ในการดูดซับคือ Red N-2RBL, Navy M-DNL และ Yellow GC ค่าความสามารถสูงสุดในการดูดซับได้แก่ 7.60, 7.60 และ 10.17 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

1.4 ศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับ สามารถอธิบายโดยสมการ Pseudo-first order และ Pseudo-second order ผลการทดลองพบว่าสมการจลนศาสตร์ของ Pseudo-second order มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าใกล้เคียง 1 มากกว่า Pseudo-first order ในขณะเดียวกัน ผลการคำนวณค่าความ สามารถในการดูดซับสี่เบสิกและสี่แอซิดของสมการ Pseudo-second order มีความใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่า Pseudo-first order ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการดูดซับสี่เบสิกและสี่แอซิดของเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจีเนต สอดคล้องกับ Pseudo-second

1.5 การศึกษาโครงสร้างทางสัณฐานวิทยา ก่อนและหลังการดูดซับ ผลจากการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยใช้กำลังขยาย 40 เท่า และ 1,000 เท่า เม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจีเนต ก่อนและหลังการดูดซับสี่เบสิกและสี่แอซิด พบว่าพื้นผิวของวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจีเนต ก่อนการดูดซับสี่เบสิกและสี่แอซิด มีลักษณะผิวที่ขรุขระ ซึ่งวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจีเนต หลังการดูดซับสี่เบสิกมีลักษณะพื้นผิวเรียบกว่าพื้นผิวก่อนการดูดซับ และวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจีเนต หลังการดูดซับสี่แอซิด พบว่าพื้นผิวของเม็ดวัสดุดูดซับมีความขรุขระมากกว่าพื้นผิววัสดุดูดซับก่อนการดูดซับ

1.6 การศึกษาการคายสี่เบสิกและสี่แอซิดหลังการดูดซับ ด้วยเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจีเนต ที่ผ่านการดูดซับมาแล้ว การศึกษาการคายซับได้ใช้น้ำกลั่นที่ผ่านการปรับค่าความเป็นกรด-ต่างระหว่าง 1-10 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่เวลา 360 นาที พบว่าการคายซับของสี่เบสิกสามารถคายซับได้ในสภาวะกรด ที่ค่าความเป็นกรด-ต่างเท่ากับ 4 และสี่แอซิดสามารถคายซับที่ค่าความเป็นกรด-ต่างเท่ากับ 8 พบว่าการคายซับและการดูดซับมีค่าความเป็นกรด-ต่างตรงกันข้ามกัน

1.7 การศึกษาเม็ดวัสดุดูดซับมาใช้ซ้ำ เป็นการศึกษาภายหลังการทราบค่าความเป็นกรด-ต่างในการคายซับของเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจีเนต จึงได้นำเม็ดวัสดุดูดซับมาทำการคายซับในครั้งที่ 2 และ 3 ผลการทดลองการคายซับพบว่าสี่ที่พบบนผิววัสดุดูดซับสามารถหลุดออกมาได้มากที่สุด ในครั้งที่ $1 > 2 > 3$ เปอร์เซ็นต์การคายซับของสารละลายสี่เบสิกและสี่แอซิดจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ และมีวัสดุดูดซับเริ่มสลายไป

2. ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองโดยใช้วัสดุเชิงประกอบเซริซิน 5%/แอลจีเนต พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สอดคล้องกับทฤษฎีแลงเมียร์ ค่าความสามารถสูงสุดในการดูดซับสีเบสิคมีค่าเท่ากับ 8.31 5.98 และ 9.33 และสีแอสิดมีค่าเท่ากับ 7.60, 7.60 และ 10.17 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งมีค่าค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับวัสดุดูดซับอื่นๆ ดังนั้นจึงพัฒนาความสามารถสูงสุดในการดูดซับให้เพิ่มขึ้น ในงานวิจัยต่อไปอาจเพิ่มปริมาณของเซริซินที่ใช้ผสมในเม็ดวัสดุดูดซับ และต้องศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในการดูดซับ หรือศึกษาหาสารให้ความหนืดชนิดอื่นๆ เพื่อเป็นตัวช่วยในการเพิ่มค่าความสามารถสูงสุดในการดูดซับสีเบสิคและสีแอสิด





บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

1. Zuraida MS, Nurhaslina CR, Halim KHK. Removal of synthetic dyes from wastewater by using bacteria, *Lactobacillus delbruckii*. *International Refereed Journal of Engineering and Science*. 2013;2:1-7.
2. Srivastava V, Silianpaa M. Synthesis of malachite@clay nanocomposite for rapid scavenging of cationic and anionic dyes from synthetic wastewater. In press 2016.
3. Singh V, Preeti. Mesoporous titania. Spheres derived from sodium alginate-gum acacia composite beads: efficient adsorbent for "Reactive blue H5G" dye. *J. Environ. Chem. Eng.* 2015;3:2727-37.
4. ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. แนวทางการจัดการสีน้ำทิ้งของโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2556.
5. รวินิภา ศรีมูล. การบำบัดสีย้อมในน้ำเสียด้วยกระบวนการดูดซับ. *วารสารวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยขอนแก่น*. 2016;44:419-34.
6. Nikooe N, Saljoughi E, Preparation and characterization of novel PVDF nanofiltration membranes with hydrophilic property for filtration of dye aqueous solution. *App. Surf. Sci.* 2017;413:41-49.
7. Moghaddam S.S, Moghaddam M.R.A, Arami M. Coagulation/flocculation process for dye removal using sludge from watertreatment plant: Optimization through response surface methodology. *J. Hazard. Mater.* 2010;175:651-57.
8. Vijayalakshmidivi S.R, Muthukumar K, Improved biodegradation of textile dye effluent by coculture. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2015;114:23-30.
9. Jiang F, Dinh D.M, Hsieh Y.L, Adsorption and desorption of cationic malachite green dye on cellulose nanofibrill aerogels. *Carbo. Polym.* 2017;173:286-94.
10. Labanda J, Sabate J, Llorens J, Modeling of the dynamic adsorption of an anionic dye through ion-exchange membrane adsorber. *J. Membr. Sci.* 2009;340:234-40.
11. Tsai WT, Chang CY, Lin MC, Chien SF, Sun HF, Hsieh MF. Adsorption of acid dye onto activated carbon prepared from agricultural waste by $ZnCl_2$ activation. *Chemosphere*. 2001;45:51-8.
12. Moawed E.A, El-Hagrasy M.A, Farhat A.A.M. Application of magnetic isothiuronium polyurethane sorbent for there moval of acidic and basic dyes from wastewater. *J. Clean. Prod.* 2017;157:232-42.

13. Walaikorn N. Chitosan/coffee residue composite beads for removal of reactive dye. *Mater. Today*. 2017;4:6274-83.
14. Walaikorn N, Thanut J. Removal of silver (I) from aqueous solutions by chitosan/bamboo charcoal composite beads. *J. Clean. Prod.* 2015;87:850-55.
15. Silva V.R, Ribani M, Gimenes M.L, Scheer A.P. High molecular weight sericin obtained by high temperature and ultrafiltration process. *Procedia Eng.* 2012;42:833-41.
16. Zhao R, Wang Y, Li X, Sun B, Jiang Z, Wang C. Water-insoluble sericin/ β -cyclodextrin/PVA composite electrospun nanofibers as effective adsorbents towards methylene blue. *Coll. Surf. B: Bio.* 2015;136:375–82.
17. Hye-J. Hong a , Byoung-G. Kim a , Jeongsik H, Jungho, Taegong R, Kang-S. Chung . Enhanced Sr adsorption performance of MnO₂-alginate beads in seawater and evaluation of its mechanism. *Chem. Eng. J.* 2017;19:163–69.
18. Silva TLD, Silva JCDS, Vieira MGA, Gimenes ML, Silva MGCDs. Biosorption study of copper and zinc by particles produced from silk sericin e alginate blend: evaluation of blend proportion and thermal cross-linking process in particles production. *J. Clean. Prod.* 2016;137:1470-78.
19. Ken-Ichiro T, Hideki S, Toshiki T. Utilization of transgenic silkworms for recombinant protein production. *J. Biotechnol & biomaterial* 2012;S9.
20. ชูขวัญ ทรัพย์มณี. สกัดโปรตีนจากรังไหมสู่ผงไหม. *เกษตรกรรมธรรมชาติ*. 2555;5:10-7.
21. Ude AU, Eshkoo RA, Zulkifili R, Ariffin AK, Dzuraideh AW, Azhari CH. Bombyx mori silk fibre and its composite: A review of contemporary development. *Materials & Design* 2014;57:298-305.
22. กรมหม่อนไหม. วงจรชีวิตของตัวไหม [อินเทอร์เน็ต]. กรุงเทพฯ: [เข้าถึงเมื่อ 19 ธ.ค. 2558]. เข้าถึงได้จาก: https://www.qsds.go.th/qsds_nort/inside_page.php?pageid=65
23. Samiksha S. Rearing of silkworm: life cycle and other details silkworms. Your article library. [Internet]. [เข้าถึงเมื่อ 17 พ.ย. 2559]. Available from: <http://www.yourarticlelibrary.com/zoology/rearing-of-silkworms-life-cycle-and-other-details-on-silkworms/23845/>
24. กรมหม่อนไหม. การจัดการความรู้กรมหม่อนไหม [อินเทอร์เน็ต]. กรุงเทพฯ: [เข้าถึงเมื่อ 3 มิ.ย. 2558]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.qsds.go.th/KMweb/knowledge/knowledge21.html>
25. ศิริพร บุญชู, นันทวรรณ รักพงษ์ บรรณาธิการ. ภูมิปัญญาการผลิตเส้นไหมไทยพื้นบ้านอีสาน. กรุงเทพฯ: กรมหม่อนไหม กระทรวงเกษตรและสหกรณ์; 2555.

26. มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา. คู่มือการทอผ้าไหมทอมือ (ฝ้ายก) หน่วยการฝึกที่ 2 การลอกกาบ-ย้อมสีไหม. พระนครศรีอยุธยา; 2550.
27. มินะภาวะ โมโตกิ. วิทยาการไหม. เล่ม 1. กรุงเทพฯ: คณะกรรมการส่งเสริมสินค้าไหมไทย กรมส่งเสริมอุตสาหกรรมสิ่งทอ; 2530.
28. Aramwit P, Kanokpanont S, Nakpheng T, Srichana T. The effect of sericin from various extraction methods on cell viability and collagen production. *International journal of molecular sciences*. 2011;11(5):2200-11.
29. Yun H, Oh H, Kim MK, Kwak HW, Lee JY, Um IC, et al. Extraction condition of *Antheraea mylitta* sericin with high yields and minimum molecular weight degradation. *Int. J. Biol. Macromol.* 2013;52:59-65.
30. Kundu B, Kurland NE, Yadavalli VK, Kundu SC. Isolation and processing of silk proteins for biomedical application. *Int. J. Biol. Macromol.* 2014;70:70-7.
31. มนูญ จิตต์ใจฉ่ำ, สมชาย อุดร, โอภาส เซาวนันทน์, ศักดา ปรีชาวัฒน์สกุล. การพัฒนาผ้าไหมอีรี่ล้วนด้วยเครื่องจักรอุตสาหกรรมสิ่งทอ: กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล กรุงเทพฯ; 2551. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.
32. ดุษฎี อุดภาพ. Carbohydrate Technology บทที่ 4 สมบัติทางเคมีของคาร์โบไฮเดรต-ไฮโดรคอลลอยด์ และการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม [อินเทอร์เน็ต]. กรุงเทพฯ: คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี; [เข้าถึงเมื่อ 3 เม.ย. 2558]. เข้าถึงได้จาก:<http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/chapter4.htm>
33. สุขใจ ชูจันทร์. พอลิเมอร์จากจุลินทรีย์. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2557.
34. Yizhe W, Wenbo W, Aiqin W. Efficient adsorption of methylene blue on an alginate-based nanocomposite hydrogel enhanced by organo-illite/smectite clay. *Chem. Eng. J.* 2013;228:132-139.
35. Bruchet M, Melman A. Fabrication of patterned calcium cross-linked alginate hydrogel films and coatings through reductive cation exchange. *Carbo. Polym.* 2015;131:57-64.
36. ขนิษฐา. สีย้อม [อินเทอร์เน็ต]. กรุงเทพฯ: จากความรู้ด้านอุตสาหกรรม ความรู้วิชาการ;2550 [เข้าถึงเมื่อ 14 พ.ย. 2559]. เข้าถึงได้จาก: http://www.tpa.or.th/writer/read_this_book_topic.php?bookID=370&pageid=3&read=true&count=true
37. มณฑา โกเฮง. สิ่งทอเบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: ภาควิชาคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร; 2536.

38. กาวี ศรีกุลกิจ. หลักการย้อมสีสิ่งทอ. พิมพ์ครั้งที่1. กรุงเทพฯ: ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2544.
39. William D. Callister, Jr. วัสดุศาสตร์และวิศวกรรมวัสดุพื้นฐาน. กรุงเทพฯ: ท้อป; 2548.
40. วันดี ธรรมจารี. วัสดุเชิงประกอบเบื้องต้น. April-May 2013;40.
41. พรนภา เกษมศิริ. วัสดุประกอบพอลิเมอร์. ขอนแก่น: โรงพิมพ์คลังนานาวิทยา; 2560.
42. สุรีย์ บุญญาหงษ์ และ ณิชฐพงศ์ วรรณวิจิตร. ระบบบำบัดน้ำเสียมีกี่แบบ? ตอน1. [อินเทอร์เน็ต]. เชียงใหม่: สถาบันวิจัยสังคม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่; [เข้าถึงเมื่อ 2 ก.พ. 2561]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.cheevaintertrade.com/>
43. Worch Eckhard. Adsorption technology in water treatment. Edition1. Germany: 2012.
44. Xamplified free online education resource. Adsorption [Internet]. 2010 [cited 2016 Jan 16]. Available from: <http://www.chemistrylearning.com/adsorption/>
45. มาลี สันติคุณภรณ์. การเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์และเทคนิคการวิเคราะห์เบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์; 2557.
46. วิทยา เรื่องพรวิสุทธิ. เคมีวัสดุ เคมีพื้นผิว และปฏิกิริยาเร่ง. พิมพ์ครั้งที่1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2558.
47. ลลิตา แสงอาทิตย์. การดูดซับยาปฏิชีวนะ Norfloxacin โดยถ้ำแคลบที่ pH 5-8 [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต] กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยศิลปากร; 2554.
48. ประรัชกรณ สาทิตคุณ. การกำจัดน้ำเสียจากโรงงานเสื่อกกโดยใช้ซีโอไลต์ [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต]. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์; 2546.
49. พจนลักษณ์ ชัยพงศ์พุทธิ. การศึกษาพฤติกรรมการดูดซับสีแอกทีฟและโลหะหนักโครเมียมบนวัสดุดูดซับจากเยื่อหุ้มเมล็ดมะขาม [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต]. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์; 2554.
50. กรีพล แม่นวิวัฒน์กุล. จลนศาสตร์ของปฏิกิริยา และความคงตัวของเกสซ์รภัณฑ์ [อินเทอร์เน็ต]. กรุงเทพฯ; 2554 [เข้าถึงเมื่อ 9 พ.ย. 2559]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.slideshare.net/adriamycin/ss-8398509>.
51. Mohammadi A, Daemi H, Barikani M. Fast removal of malachite green dye using novel superparamagnetic sodium alginate-coated Fe₃O₄ nanoparticles. Int. J. Biol. Macromol. 2014;69:447–55.
52. Belbachir I, Makhoukhi B. Adsorption of Bezathren dyes onto sodic bentonite from aqueous solutions. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers. 2017; 75:105–11.
53. Qingwen L, Mengfan G, Jiali C, Hongzhu M. Adsorption properties of crosslinking carboxymethyl cellulose grafting dimethyldiallylammonium chloride for cationic and anionic dyes. 2016;151:283-94.


54. Geetha P, Latha MS, Pillai SS, Deepa B, Kumar KS, Koshy M. Green synthesis and characterization of alginate nanoparticles and its role as a biosorbent for Cr(VI) ions. *Journal of molecular structure* 2011;1150:54-60.
55. Xinqing C, Fung KL, Fong SM, Kwong WC, Nok T, YEUNG L. Assessment of sericin biosorbent for selective dye removal. *Chinese journal of chemical engineering* 2012;20:426-32.
56. นิสภาพ มุหะมัด, สมภาพ เกาทอง, อุบล ต้นสม และปิยศิริ สุนทรนนท์. การดูดซับสีด้วยกาก-ชา. รายงานวิจัย: มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา;2559.
57. ปิ่นสุภา ปิติรักษ์สกุล. การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของพอลิเมอร์ polymer characterization. พิมพ์ครั้งที่1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง;2545.
58. นิวัฒน์ ศรีสวัสดิ์, ภิญญา พานิชพันธ์, พินทิพ รื่นวงษา. มหัตถรรยนาโนเทคโนโลยี [อินเทอร์เน็ต]. กรุงเทพฯ: สถาบันนวัตกรรมและพัฒนาระบบการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล; [เข้าถึงเมื่อ 24 ก.พ. 2559]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit4-5.html>
59. พิศิษฐ์ สิงห์ใจ. การวัดขนาดอนุภาคระดับนาโนโดยใช้เครื่อง DLS และ Zeta potential sizer. *วารสารคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่* 2551;2:143-53.
60. Jim Clark. UV-Visible adsorption spectra [Internet]. 2016 [cited 2016 Nov 1]. Available from: <http://www.chemguide.co.uk/analysis/uvvisible/theory.html>
61. Spectra Research Corporation. Nanobrook omni particle size analyzer [Internet]. 2016 [cited 2016 Nov 1]. Available from: <http://www.spectraresearch.com/product/nanobrook-omni-particle-size-analyzer-2/>
62. UiO:Institute of clinical dentistry. Zetasizer Nano ZS [Internet]. 2013 [cited 2018 Feb 12]. Available from: <https://www.odont.uio.no/iko/english/about/organization/units/biomaterials/Capacities/zetasizer/>
63. Othman N.H, Alias N.H, Shahrudin M.Z, Bakar N.F.A, Him N.R.N and Lau W.J. Adsorption kinetics of methylene blue dyes onto magnetic graphene oxide. *J. Environ. Chem. Eng.* 2018;6:2803–11.
64. Huong C.V, Amarendra D.D, Thao T.L, Sung-Hee S, Eun-Ji K, Yoon-Seok C. Magnetite graphene oxide encapsulated in alginate beads for enhanced adsorption of Cr(VI) and As(V) from aqueous solutions: Role of crosslinking metal cations in pH control. *Chem. Eng. J.* 2017;307:220-229.
65. Mahmoodi N. Mohammad, Hayati B, Arami M, Christopher L. Adsorption of textile dyes on Pine Cone from colored wastewater: Kinetic, equilibrium and thermodynamic studies. *Desalination.* 2011;268:117-125.

66. สถิติเบื้องต้นง่ายๆ ที่จะทำให้คุณเข้าใจการวิเคราะห์มากขึ้น (ตอนที่ 2) [อินเทอร์เน็ต].
2560. [เข้าถึงเมื่อ 2 ก.ค. 2561]. เข้าถึงได้จาก: <https://medium.com/@info>





ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

ตารางแสดงผลการวัดค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของสารละลายสีเบสิดและสีแอซิดที่ได้จาก
เครื่อง UV-Vis spectrophotometer

การวัดค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดหลังการดูดซับสารละลายสีเบสิกและสีแอซิดที่ได้จาก เครื่อง UV-Vis spectrophotometer ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการหาเปอร์เซ็นต์การดูดซับสารละลายสีเบสิกและสีแอซิด

ตาราง ก ผลการวัดค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดหลังการดูดซับสารละลายสีเบสิก (Basic orange 22 300%) เทียบกับเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิม/แอลจีเนต ที่อัตราส่วนต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสีเบสิก (Basic orange 22 300%) 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

วัสดุดูดซับ เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง					
	AI	AI-1%SS	AI-2%SS	AI-3%SS	AI-4%SS	AI-5%SS
60	4.316	4.096	4.096	4.096	4.096	4.096
120	4.316	3.620	3.842	3.682	3.567	3.400
180	4.316	3.519	3.436	3.220	3.243	2.974
240	4.316	3.519	3.476	3.267	3.136	2.755
300	4.316	3.321	3.293	2.903	2.851	2.271
360	4.316	3.335	3.118	2.540	2.580	2.202
420	4.316	3.335	3.100	2.851	2.847	2.609
480	4.316	3.22	3.021	2.755	2.535	2.197

ตาราง ข ผลการวัดค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดหลังการดูดซับสารละลายสีเบสิก (Blue BG 200% 01) เทียบกับเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซรามิก/แอลจีเนต ที่อัตราส่วนต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสีเบสิก (Blue BG 200% 01) 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

วัสดุดูดซับ เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง					
	AI	AI-1%SS	AI-2%SS	AI-3%SS	AI-4%SS	AI-5%SS
60	3.950	3.755	3.682	3.543	3.593	3.682
120	3.950	3.755	3.593	3.036	3.022	3.336
180	3.950	3.755	3.383	3.036	2.867	3.177
240	3.950	3.842	3.497	3.109	2.555	3.044
300	3.950	3.755	3.268	2.898	2.702	2.888
360	3.950	3.842	3.268	2.756	2.522	2.95
420	3.755	3.682	3.543	3.593	3.682	3.755
480	3.755	3.593	3.036	3.022	3.336	3.755

ตาราง ค ผลการวัดค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดหลังการดูดซับสารละลายสีเบสิก (Yellow 3GL 200%) เทียบกับเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซรามิก/แอลจีเนต ที่อัตราส่วนต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสีเบสิก (Yellow 3GL 200%) 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

วัสดุดูดซับ เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง					
	AI	AI-1%SS	AI-2%SS	AI-3%SS	AI-4%SS	AI-5%SS
60	1.694	1.551	1.52	1.485	1.451	1.417
120	1.683	1.53	1.498	1.436	1.428	1.346
180	1.642	1.515	1.473	1.413	1.373	1.251
240	1.589	1.49	1.394	1.335	1.321	1.203
300	1.571	1.481	1.375	1.29	1.267	1.157
360	1.561	1.459	1.363	1.279	1.224	1.104
420	1.622	1.528	1.414	1.346	1.275	1.201
480	1.672	1.553	1.464	1.354	1.299	1.265

ตาราง ง ผลการวัดค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดหลังการดูดซับสารละลายสีแอสซิด (Red N-2RBL) เทียบกับเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน/แอลจิเนต ที่อัตราส่วนต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสีแอสซิด (Red N-2RBL) 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

เวลา (นาที)	วัสดุดูดซับ					
	AI	AI-1%SS	AI-2%SS	AI-3%SS	AI-4%SS	AI-5%SS
60	0.780	0.781	0.785	0.787	0.788	0.787
120	0.779	0.779	0.769	0.766	0.784	0.772
180	0.777	0.761	0.754	0.756	0.755	0.757
240	0.776	0.748	0.747	0.753	0.741	0.743
300	0.771	0.737	0.743	0.742	0.728	0.718
360	0.767	0.725	0.718	0.714	0.712	0.701
420	0.775	0.738	0.748	0.754	0.749	0.736
480	0.781	0.736	0.752	0.758	0.733	0.752

ตาราง จ ผลการวัดค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดหลังการดูดซับสารละลายสีแอสซิด (Navy M-DNL) เทียบกับเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน/แอลจิเนต ที่อัตราส่วนต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสีแอสซิด (Navy M-DNL) 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

เวลา (นาที)	วัสดุดูดซับ					
	AI	AI-1%SS	AI-2%SS	AI-3%SS	AI-4%SS	AI-5%SS
60	0.420	0.420	0.420	0.419	0.420	0.417
120	0.419	0.419	0.418	0.416	0.416	0.414
180	0.418	0.417	0.417	0.416	0.415	0.414
240	0.419	0.418	0.417	0.416	0.416	0.413
300	0.419	0.418	0.417	0.415	0.415	0.412
360	0.416	0.415	0.414	0.413	0.412	0.407
420	0.419	0.419	0.418	0.418	0.417	0.415
480	0.419	0.419	0.417	0.416	0.415	0.413

ตาราง ฉ ผลการวัดค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดหลังการดูดซับสารละลายสีแอสซิด (Yellow GC) เทียบกับเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิน/แอลจีเนต ที่อัตราส่วนต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสีแอสซิด (Yellow GC) 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

วัสดุดูดซับ เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง					
	AI	AI-1%SS	AI-2%SS	AI-3%SS	AI-4%SS	AI-5%SS
60	1.193	1.192	1.192	1.192	1.192	1.191
120	1.193	1.191	1.19	1.19	1.185	1.159
180	1.193	1.188	1.18	1.18	1.167	1.132
240	1.193	1.185	1.176	1.167	1.152	1.100
300	1.194	1.18	1.165	1.154	1.102	1.022
360	1.193	1.146	1.13	1.101	1.039	0.953
420	1.193	1.15	1.151	1.157	1.15	1.113
480	1.200	1.122	1.162	1.172	1.162	1.111

ตาราง ข ผลการวัดค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดหลังการดูดซับสารละลายสีเบสิกและสีแอซิดกับความ
เป็นกรด-ด่าง ด้วยเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิม 5%/แอลจีเนต เมื่อความเข้มข้นของสารละลาย
สีเบสิกและสีแอซิด 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่เวลา 360 นาที

pH	ค่าการดูดกลืนแสง					
	สีเบสิก			สีแอซิด		
	Orange	Blue BG 200% 01	Yellow 3GL 200%	Red N-2RBL	Navy M- DNL	Yellow GC
1	3.391	1.696	1.696	0.436	0.456	1.367
2	3.408	1.716	1.716	0.403	0.398	1.028
3	3.455	1.722	1.722	0.444	0.427	1.188
4	3.417	1.697	1.697	0.427	0.434	1.228
5	3.335	1.605	1.605	0.424	0.447	1.273
6	2.909	1.159	1.159	0.68	0.546	1.395
7	2.688	1.035	1.035	0.685	0.549	1.273
8	2.571	0.953	0.953	0.689	0.617	1.262
9	2.626	0.989	0.989	0.708	0.622	1.254
10	2.694	0.997	0.997	0.709	0.654	1.241

ตาราง ข ผลการวัดค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดหลังการดูดซับสีเบสิค (Basic orange 22 300%) เทียบกับปริมาณเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิม 5%/แอลจินต ระยะเวลาที่ 60-360 นาที เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 8 ความเข้มข้นของสารละลายสีเบสิค 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

เวลา (นาที)	เปอร์เซ็นต์การดูดซับสารละลายสีเบสิค						
	ปริมาณวัสดุดูดซับ (กรัม)						
	1	2	3	4	5	6	7
60	3.949	3.156	2.336	1.902	1.758	1.528	1.333
120	3.350	2.405	1.684	1.553	1.316	0.775	0.644
180	2.847	1.900	1.304	1.182	0.879	0.585	0.516
240	2.488	1.556	1.126	1.002	0.778	0.538	0.426
300	2.290	1.424	0.869	0.874	0.648	0.521	0.416
360	2.268	1.376	0.844	0.772	0.563	0.517	0.400

ตาราง ฉ ผลการวัดค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดหลังการดูดซับสีเบสิค (Blue BG 200% 01) เทียบกับปริมาณเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซิม 5%/แอลจินต ระยะเวลาที่ 60-360 นาที เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 8 ความเข้มข้นของสารละลายสีเบสิค 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

เวลา (นาที)	เปอร์เซ็นต์การดูดซับสารละลายสีเบสิค						
	ปริมาณวัสดุดูดซับ (กรัม)						
	1	2	3	4	5	6	7
60	2.291	2.270	2.270	2.270	2.270	2.272	2.252
120	2.192	2.183	2.183	2.171	2.167	2.152	2.252
180	2.143	2.143	2.132	2.122	2.122	2.119	2.091
240	2.021	2.022	1.981	1.982	1.982	1.982	1.984
300	1.952	1.961	1.962	1.962	1.952	1.933	1.927
360	1.886	1.852	1.852	1.851	1.785	1.795	1.766

ตาราง ฅ ผลการวัดค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดหลังการดูดซับสีเบสิก (Yellow 3GL 200%)เทียบกับปริมาณเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซัน 5%/แอลจินेट ระยะเวลาที่ 60-360 นาที เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 8 ความเข้มข้นของสารละลายสีเบสิก 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

เวลา (นาที)	เปอร์เซ็นต์การดูดซับสารละลายสีเบสิก						
	ปริมาณวัสดุดูดซับ (กรัม)						
	1	2	3	4	5	6	7
60	1.622	1.489	1.417	1.343	1.269	1.237	1.121
120	1.521	1.401	1.345	1.204	1.172	1.069	1.043
180	1.568	1.422	1.293	1.197	1.146	1.119	1.019
240	1.591	1.425	1.377	1.211	1.146	1.073	1.009
300	1.569	1.395	1.239	1.206	1.12	1.095	1.001
360	1.546	1.327	1.275	1.19	1.156	1.087	0.993

ตาราง ด ผลการวัดค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดหลังการดูดซับสีแอซิด (Red N-2RBL) เทียบกับปริมาณเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซัน 5%/แอลจินेट ระยะเวลาที่ 60-360 นาที เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 8 ความเข้มข้นของสารละลายสีแอซิด 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

เวลา (นาที)	เปอร์เซ็นต์การดูดซับสารละลายสีแอซิด						
	ปริมาณวัสดุดูดซับ (กรัม)						
	1	2	3	4	5	6	7
60	0.613	0.573	0.557	0.532	0.496	0.481	0.441
120	0.582	0.558	0.546	0.542	0.53	0.517	0.47
180	0.56	0.535	0.495	0.445	0.406	0.365	0.274
240	0.527	0.504	0.478	0.439	0.389	0.279	0.233
300	0.446	0.419	0.358	0.317	0.294	0.264	0.218
360	0.417	0.385	0.327	0.302	0.278	0.245	0.191

ตาราง ต ผลการวัดค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดหลังการดูดซับสีแอสซิด (Navy M-DNL) เทียบกับ ปริมาณเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซัน 5%/แอลจีเนต ระยะเวลาที่ 60-360 นาที เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 8 ความเข้มข้นของสารละลายสีแอสซิด 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

เวลา (นาที)	เปอร์เซ็นต์การดูดซับสารละลายสีแอสซิด						
	ปริมาณวัสดุดูดซับ (กรัม)						
	1	2	3	4	5	6	7
60	0.591	0.582	0.576	0.576	0.567	0.552	0.542
120	0.582	0.575	0.564	0.565	0.555	0.552	0.534
180	0.481	0.472	0.472	0.474	0.455	0.438	0.338
240	0.431	0.422	0.423	0.415	0.422	0.421	0.414
300	0.409	0.405	0.392	0.383	0.371	0.37	0.344
360	0.392	0.393	0.371	0.373	0.368	0.354	0.342

ตาราง ถ ผลการวัดค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดหลังการดูดซับสีแอสซิด (Yellow GC) เทียบกับปริมาณ เม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซัน 5%/แอลจีเนต ระยะเวลาที่ 60-360 นาที เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 8 ความเข้มข้นของสารละลายสีแอสซิด 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

เวลา (นาที)	เปอร์เซ็นต์การดูดซับสารละลายสีแอสซิด						
	ปริมาณวัสดุดูดซับ (กรัม)						
	1	2	3	4	5	6	7
60	1.221	1.231	1.242	1.230	1.162	1.137	1.122
120	1.253	1.240	1.203	1.203	1.173	1.164	1.141
180	1.364	1.321	1.322	1.291	1.243	1.221	1.211
240	1.291	1.241	1.231	1.218	1.192	1.171	1.152
300	1.267	1.297	1.235	1.204	1.202	1.193	1.166
360	1.120	1.122	1.121	1.106	1.097	1.085	1.078

ตาราง ข ผลการวัดค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด การคายซับของสีเบสิกและสีแอซิดกับความเป็นกรด-ด่างระหว่าง 1-10 ด้วยเม็ดวัสดุเชิงประกอบเซริซีน 5%/แอลจีเนต หลังการดูดซับสารละลายสีเบสิกและสีแอซิดที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่เวลา 360 นาที

pH	เปอร์เซ็นต์การคายซับของสีเบสิกและสีแอซิด					
	สีเบสิก			สีแอซิด		
	Basic orange 22 300%	Blue BG 200% 01	Yellow 3GL 200%	Red N- 2RBL	Navy M- DNL	Yellow GC
1	1.118	2.015	0.504	0.016	0.172	0.097
2	3.112	2.001	0.52	0.008	0.191	0.091
3	3.015	1.936	0.546	0.017	0.208	0.111
4	3.134	2.251	0.732	0.033	0.213	0.211
5	2.95	1.823	0.471	0.064	0.207	0.23
6	2.373	0.176	0.444	0.088	0.213	0.203
7	0.333	0.138	0.183	0.14	0.224	0.280
8	0.445	0.142	0.231	0.147	0.319	0.427
9	0.518	0.164	0.206	0.129	0.322	0.321
10	0.486	0.170	0.225	0.123	0.337	0.340



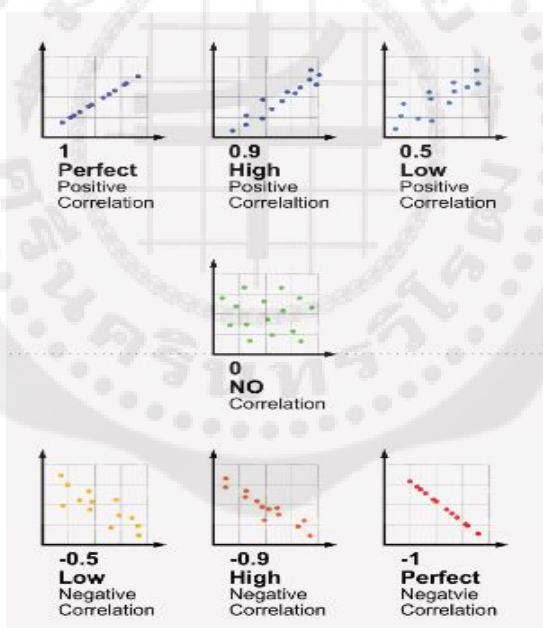
ภาคผนวก ข
ตัวอย่างการคำนวณ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2)

ค่าสหสัมพันธ์ (Correlation)⁽⁶⁶⁾

เป็นการดูทิศทางความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ตัว โดยมี Correlation Coefficient (R^2) หรือ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ เป็นตัวบ่งชี้ถึงความสัมพันธ์นี้ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์นี้จะมีค่าอยู่ระหว่าง -1.0 ถึง +1.0 ซึ่งหากมีค่าใกล้ -1.0 นั้นหมายความว่าตัวแปรทั้งสองตัวมีความสัมพันธ์กันอย่างมากในเชิงตรงกันข้าม หากมีค่าใกล้ +1.0 นั้นหมายความว่า ตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์กันโดยตรงอย่างมาก และหากมีค่าเป็น 0 นั้นหมายความว่า ตัวแปรทั้งสองตัวไม่มีความสัมพันธ์ต่อกัน

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}}$$

R-Squared = $\frac{\text{ความผันแปรที่สามารถอธิบายได้ (Explained variation)}}{\text{ความผันแปรทั้งหมด (Total variation)}}$



ภาพประกอบ ก กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์นี้จะมีค่าอยู่ระหว่าง -1.0 ถึง +1.0

ที่มา: สถิติเบื้องต้นง่ายๆ ที่จะทำให้คุณเข้าใจการวิเคราะห์มากขึ้น (ตอนที่ 2) [อินเทอร์เนต]. 2560. [เข้าถึงเมื่อ 2 ก.ค. 2561]. เข้าถึงได้จาก: <https://medium.com/@info>

โดย R-Squared เป็นค่าพิสูจน์ว่าชุดตัวอย่างที่ได้นั้นเหมาะสมหรือไม่ โดย ค่า R-Squared จะอยู่ระหว่าง 0-1 ซึ่งยิ่งเข้าใกล้ 1 ยิ่งดี ซึ่งค่า R-Squared ในงานวิจัยนี้สามารถอธิบาย



ภาคผนวก ค

ภาพประกอบเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย



ภาพประกอบ ข กระดาษวัดค่าพีเอช (pH indicator strips)



ภาพประกอบ ค เครื่องเขย่า ยี่ห้อ Orbital Shaker รุ่น GS-20



ภาพประกอบ ง เครื่องชั่งดิจิตอล ยี่ห้อ Sartorius Model BSA224S-CW 220g/0.1mg



ภาพประกอบ จ เครื่องชั่ง ยี่ห้อ Mettler Type BDI201 1200g x .1g



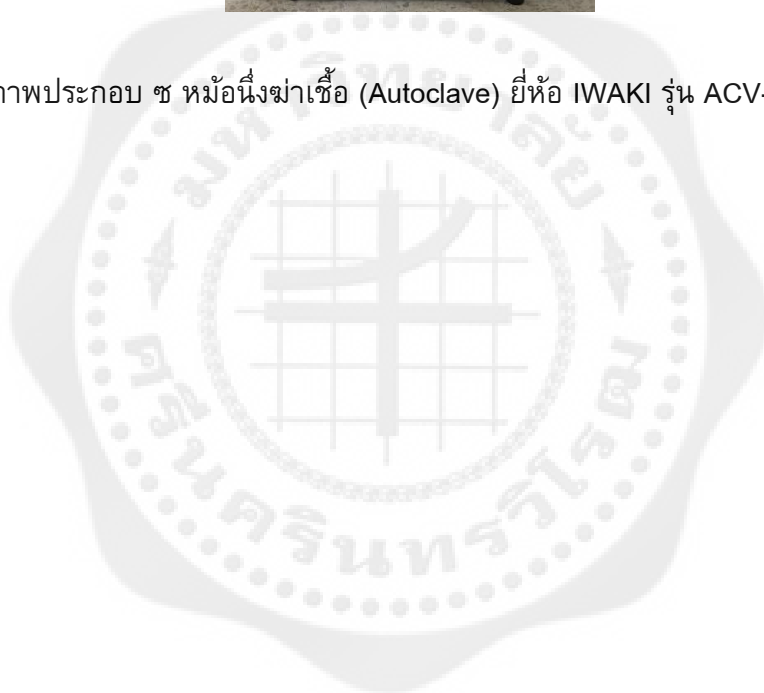
ภาพประกอบ ฉ เครื่องผสมสาร (Stirrer) ยี่ห้อ M TOPS รุ่น MS-300HS



ภาพประกอบ ช ถ้วยกระเบื้อง (Crucible)



ภาพประกอบ ซ หม้อนึ่งฆ่าเชื้อ (Autoclave) ยี่ห้อ IWAKI รุ่น ACV-3167





อภิธานศัพท์

อภิธานศัพท์

Adsorbate คือ สารที่ถูกดูดซับ

Adsorbent คือ สารดูดซับ ตัวดูดซับ

Adsorbtion คือ การดูดซับ

Absorption คือ การดูดซึม

A_0 คือ ค่าการดูดซับของสีย้อมก่อนการดูดซับ

A_1 คือ ค่าการดูดซับของสีย้อมหลังการดูดซับ

b คือ ค่าคงที่ของการดูดซับตามสมการแลงเมียร์

C_e คือ ความเข้มข้นของสารละลาย ณ ภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

c คือ ความเร็วของแสง

D_1 คือ ค่าการคายซับของสีย้อมหลังการคายซับ

E คือ พลังงาน (Energy of light)

h คือ ค่าคงที่ของแพลนค์ (Planck's constant)

K_f คือ ค่าคงที่สมการการดูดซับแบบหลายชั้นของฟรุนดลิช

k_1 คือ ค่าคงที่ของอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง Pseudo-first order (min^{-1})

k_2 คือ ค่าคงที่ของอัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่สอง Pseudo-second order ($\text{g mg}^{-1} \text{min}^{-1}$)

n คือ ค่าคงที่ของฟรุนดลิช (Freundlich intensity parameter) (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

P คือ น้ำหนักขวดฟิคโนมิเตอร์

q_e คือ ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับบนวัสดุดูดซับ ณ ภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_m คือ ความสามารถสูงสุดในการดูดซับแบบชั้นเดียว (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_t คือ ปริมาณในการดูดซับของวัสดุดูดซับ ณ เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

t คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)

V คือ ความถี่ของแสงที่ถูกดูดกลืน (Frequency of light)

W คือ น้ำหนักขวดฟิคโนมิเตอร์ + วัสดุดูดซับ

W_1 คือ น้ำหนักขวดฟิคโนมิเตอร์ + น้ำ

W_2 คือ น้ำหนักขวดฟิคโคมิเตอร์ + วัสดุดูดซับ + น้ำ

ประวัติย่อผู้วิจัย



ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ ชื่อสกุล	นางสาวเรือนแก้ว รังสรรค์ยุทธนา
วันเดือนปีเกิด	14 ธันวาคม 2535
สถานที่เกิด	อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	107/6 หมู่ 6 บ้านคำไฮ-หัวทุ่ง ตำบลบ้านเป็ด อำเภอเมือง จังหวัด ขอนแก่น 40000
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2551	มัธยมศึกษาตอนปลาย จาก โรงเรียนเทศบาลวัดกลาง จ.ขอนแก่น
พ.ศ. 2554	มัธยมศึกษาตอนปลาย จาก โรงเรียนแก่นนครวิทยาลัย จ.ขอนแก่น
พ.ศ. 2558	วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเกษตรศาสตร์ จาก คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
พ.ศ. 2561	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วท.ม.) สาขาวัสดุศาสตร์ จาก คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ