

การพัฒนาวัสดุดูดซับไฮโดรเจลจากเจลาติน/มอนต์มอริลโลไนต์ตัดแปรด้วย
ไคโตซานสำหรับการกำจัดสีย้อม

DEVELOPMENT OF GELATIN/CHITOSAN-MODIFIED
MONTMORILLONITE HYDROGEL ABSORBENT FOR DYE REMOVAL

พิชชาภา เดชวรรคณีย์
PITCHAPA DEATVAKKANEE

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2562

KMITL-2019-SC-M-014-064

การพัฒนาวัสดุดูดซับไฮโดรเจลจากเจลาติน/มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วย
ไคโตซานสำหรับการกำจัดสีย้อม

DEVELOPMENT OF GELATIN/CHITOSAN-MODIFIED
MONTMORILLONITE HYDROGEL ABSORBENT FOR DYE REMOVAL

พิชชาภา เดชวรรคณีย์
PITCHAPA DEATVAKKANEE

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2562
KMITL-2019-SC-M-014-064

DEVELOPMENT OF GELATIN/CHITOSAN-MODIFIED
MONTMORILLONITE HYDROGEL ABSORBENT FOR DYE REMOVAL

PITCHAPA DEATVAKKANEE

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE
DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN POLYMER TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF CHEMISTRY FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2019
KMITL-2019-SC-M-014-064

COPYRIGHT 2019

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาวัสดุดูดซับไฮโดรเจลจากเจลาติน/มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยโคโตซานสำหรับการกำจัดสีย้อม
ชื่อนักศึกษา	นางสาวพิชชาภา เดชวรรคณีย์
รหัสประจำตัว	60605058
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีพอลิเมอร์)
ภาควิชา	เคมี
พ.ศ.	2562
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเตรียมไฮโดรเจลดูดซับจากเจลาติน (G) และมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร (CS-M) หรือไม่ดัดแปรด้วยโคโตซาน (M, MMT) มี 4 ตัวอย่างคือ M3G15, M5G15 และ M6G15 ซึ่งมีอัตราส่วน M:G เท่ากับ 1:5, 1:3 และ 2:5 โดยน้ำหนัก และ CS-M5G15 ซึ่งมีอัตราส่วน CS-M:G เท่ากับ 1:3 จากนั้นผ่านเทคนิคการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง และเชื่อมโยงทางเคมีด้วยสารละลายกลูตารัลดีไฮด์เข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร จากผลการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของมอนต์มอริลโลไนต์ที่ถูกดัดแปรด้วยโคโตซานโดยเทคนิค XRD, FT-IR และ TGA พบว่าโคโตซานสามารถแทรกเข้าไปอยู่ระหว่างชั้นของมอนต์มอริลโลไนต์ จากนั้นศึกษาปริมาณของแข็งคงเหลือ และพฤติกรรมการดูดซับน้ำของไฮโดรเจลดูดซับพบว่า ไฮโดรเจลดูดซับทุกสูตรสามารถคงตัวอยู่ได้ดีในน้ำกลั่นเมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง โดยมีปริมาณของแข็งคงเหลือมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ และมีพฤติกรรมการดูดซับน้ำที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยสามารถดูดซับน้ำได้มากกว่า 200 เปอร์เซ็นต์ จากการพิสูจน์เอกลักษณ์ของไฮโดรเจลดูดซับด้วยเทคนิค SEM พบว่าเมื่อปริมาณ MMT เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ไฮโดรเจลดูดซับมีปริมาณรูพรุนเพิ่มขึ้น ส่วน CS-M5G15 มีปริมาณรูพรุนน้อยที่สุด เนื่องจากเกิดฟิล์มปกคลุมบนพื้นผิว จากการศึกษาพฤติกรรมการดูดซับสารละลายสีย้อมเบสิกบลู 9 เข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า M3G15, M5G15 และ M6G15 สามารถดูดซับสารละลายสีย้อมได้มากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ ส่วน CS-M5G15 ดูดซับสารละลายสีย้อมได้ต่ำกว่า 40 เปอร์เซ็นต์ จากการศึกษาหาเวลาที่เข้าสู่สมดุลโดยใช้ M5G15 พบว่าระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับสารละลายสีย้อมเบสิกบลู 9 เข้มข้น 800 มิลลิกรัมต่อลิตร คือ 720 นาทีเป็นต้นไป จากการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับพบว่า การดูดซับสารละลายสีย้อมเบสิกบลู 9 เป็นไปตามแบบจำลองปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง บ่งบอกว่าเป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงทางเคมี และจากการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับพบว่า การดูดซับเป็นไปตามสมการแลงเมียร์ บ่งบอกว่าเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption) โดยมีค่าความสามารถการดูดซับสูงสุด (q_m) เท่ากับ 20.83 มิลลิกรัมต่อกรัม

คำสำคัญ : โคโตซาน เจลาติน ทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรโคโตซาน ไฮโดรเจลดูดซับ

Thesis title	Development of gelatin /chitosan-modified montmorillonite hydrogel absorbent for dye removal
Student name	Miss Pitchapa Deatvakkanee
Student ID	60605058
Degree	Master of degree (Polymer Technology)
Department	Chemistry
Year	2019
Thesis advisor	Assoc. Prof .Dr. Pathavuth Monvisade

Abstract

This research studied on preparation of hydrogel absorbents from gelatin (G) and pure Montmorillonite (M, MMT) or chitosan-modified Montmorillonite (CS-M) including four formula i.e., M3G15, M5G15, M6G15 (M:G equal to 1:5, 1:3 and 2:5, respectively), and CS-M5G15 (CS-M:G equal to 2:5) by using freeze-drying technique and crosslinked by 1% v/v glutaraldehyde solution. CS-M was characterized by using XRD, FT-IR and TGA. The results indicated that chitosan can intercalated between the layers of MMT structure. Solid remain and water adsorption behavior were also studied, the results shown that all formula can maintain their shapes after immersed in distilled water for 24 hour with higher than 90% of solid remain and more than 200% of water content. The SEM results of hydrogel absorbents showed that porosity contents depended on amount of MMT. Higher MMT contents led to more porosity contents. However, CS-M5G15 had the least of porosity due to the coverage of film on the surface. Adsorption percentages of M3G15, M5G15 and M6G15 in Basic blue 9 at concentration of 100 mg/L were higher than 80% but, CS-M5G15 was less than 40%. Equilibrium adsorption time of M5G15 in Basic blue 9 at concentration of 800 mg/L was found at about 720 min. The adsorption kinetic was followed the pseudo-second order model indicating that the adsorption between hydrogel absorbent and Basic blue 9 was due to chemical interaction. In case of isotherm models, Langmuir model was fitted meaning that hydrogel absorbents were covered by dyes as monolayer on the surfaces. The maximum adsorption capacity (q_m) of M5G15 was at 20.83 mg/g.

Keywords : Chitosan, Gelatin, Freeze-drying, Chitosan-modified-montmorillonite, Hydrogel absorbent

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ภัทรารุช มนต์วิเศษ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา ความช่วยเหลือ และความรู้ต่าง ๆ อบรมให้เกิดการทำงานอย่างมีระบบระเบียบ พร้อมทั้งตรวจทาน การดำเนินงานวิจัย ทำให้การจัดทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ์ และ ผศ.ดร.ธนิดา ตระกูลสุจริตโชค อาจารย์ คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการตรวจทาน และเสนอแนะข้อคิดเห็น เพื่อแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ในวิทยานิพนธ์นี้ เพื่อให้เกิดความถูกต้องสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้โอกาสสมอบทุนอุดหนุนการศึกษาตลอด 2 ปี

ขอขอบพระคุณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่มอบทุนเสนอ ผลงานวิจัยให้ ทำให้มีโอกาสนำงานวิจัยไปเผยแพร่แก่ผู้อื่น และได้รับประสบการณ์ต่าง ๆ รวมถึง ความรู้ที่เพิ่มมากขึ้น

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ของศูนย์เครื่องมือฯ และเจ้าหน้าที่ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อำนวยความสะดวก และให้ความช่วยเหลือในการ ใช้เครื่องมือในการวิเคราะห์งานต่าง ๆ จนวิทยานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ครอบครัว เพื่อน ๆ พี่ ๆ และน้อง ๆ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้กำลังใจ ให้คำแนะนำ และให้ความช่วยเหลือ ต่าง ๆ ในการดำเนินงานวิจัยนี้

สุดท้ายนี้ประโยชน์ และความรู้อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบแต่ ครอบครัว ผู้มี พระคุณ และคณาจารย์ทุกท่าน หากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้ศึกษาขออน้อมรับ และขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

นางสาวพิชชาภา เดชวรรณณีย์

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.1 ประเภทของดิน	14
2.2.2 แร่ดินเหนียวหรือแร่ลูมิโนซิลิเกต	15
2.2.2.1 การดูดซับไอออน (Ion adsorption)	19
2.2.2.2 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange)	20
2.2.2.3 เทคนิคการพิสูจน์เอกลักษณ์ของแร่ดินเหนียว	21
2.3 มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite)	21
2.3.1 การดูดซับของแรมอนต์มอริลโลไนต์	22
2.3.2 การแลกเปลี่ยนไอออนของมอนต์มอริลโลไนต์	22
2.3.3 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานของมอนต์มอริลโลไนต์	22
2.4 การดัดแปรแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ (Modification of Montmorillonite)	22
2.4.1 การดัดแปรด้วยสารลดแรงตึงผิว	22
2.4.2 การดัดแปรแร่ดินด้วยโคโตซาน	23
2.4.3 การดัดแปรแร่ดินโดยการกระตุ้นด้วยกรด	25
2.4.4 การดัดแปรด้วยการสร้างเสาค้ำในโครงสร้าง	25
2.5 ไฮโดรเจล (Hydrogel)	25
2.5.1 ประเภทของไฮโดรเจล	26
2.5.1.1 จำแนกตามแหล่งที่มา	26
2.5.1.2 จำแนกตามองค์ประกอบของพอลิเมอร์	26
2.5.1.3 จำแนกตามโครงสร้างทางเคมี	26
2.5.1.4 จำแนกตามการเชื่อมโยงโมเลกุล	26
2.5.1.5 จำแนกตามลักษณะการเกิดประจุในโครงสร้าง	27
2.5.1.6 จำแนกตามลักษณะการสังเคราะห์	27
2.5.1.7 จำแนกตามขนาดรูพรุน	28
2.5.2 วิธีการเตรียมไฮโดรเจล	29
2.5.2.1 การเชื่อมโยงทางเคมี	29
2.5.2.2 การเชื่อมโยงด้วยรังสี	29
2.5.2.3 การผลิตไฮโดรเจลแบบโครงร่างตาข่ายแบบสอดไขว้	29
2.5.3 สมบัติของไฮโดรเจล	29
2.5.3.1 สมบัติทางเคมี	29
2.5.3.2 สมบัติทางกายภาพ	29
2.5.4 การบวมตัว และปัจจัยที่มีผลต่อการบวมตัวของไฮโดรเจล	30
2.5.5 การวิเคราะห์สมบัติของไฮโดรเจล	30
2.5.6 การประยุกต์ใช้งานไฮโดรเจล	31
2.6 เจลาติน (Gelatin)	32
2.6.1 สมบัติทางกายภาพ และเคมีของเจลาติน	32

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6.2 องค์ประกอบทางเคมีของเจลาติน.....	33
2.6.3 แหล่งที่มาของเจลาติน.....	34
2.6.4 กรรมวิธีการผลิตเจลาติน.....	34
2.6.5 การนำเจลาตินไปใช้ประโยชน์.....	34
2.7 ไคติน และไคโตซาน (Chitin and chitosan).....	35
2.7.1 แหล่งที่พบไคติน และไคโตซาน.....	36
2.7.2 การจัดเรียงตัวของผลึกไคติน และไคโตซาน.....	36
2.7.3 สมบัติของไคติน และไคโตซาน.....	36
2.7.3.1 สมบัติการละลาย.....	36
2.7.3.2 น้ำหนักโมเลกุล.....	36
2.7.3.3 องศาการกำจัดหมู่อะเซทิล (Degree of deacetylation, %DD).....	37
2.7.3.4 ความหนืด.....	37
2.7.3.5 ความสามารถในการสร้างตะกอน (Ability of coagulation).....	37
2.7.3.6 การเกิดไฮโดรไลซิส (Hydrolysis).....	37
2.7.3.7 การย่อยสลายในสภาวะต่าง (Alkaline degradation).....	37
2.7.3.8 การย่อยสลายโดยการสั่นด้วยคลื่นเสียง (Degradation by.....	37
sonication)	
2.7.3.9 การย่อยสลายทางความร้อน (Thermal degradation).....	37
2.7.3.10 สมบัติทางชีวภาพ.....	37
2.7.4 วิธีการนำไคติน และไคโตซานไปใช้งาน.....	37
2.7.5 กระบวนการผลิตไคติน และไคโตซาน.....	38
2.7.6 การนำไคติน และไคโตซานไปประยุกต์ใช้งาน.....	38
2.8 สีย้อม (Dyestuffs).....	39
2.8.1 ประเภทของสีย้อม.....	39
2.8.2 เมทิลีนบลู (Methylene blue).....	39
2.9 ระบบบำบัดน้ำทิ้ง (Wastewater treatment).....	40
2.9.1 การบำบัดน้ำทิ้งทางกายภาพ (Physical treatment).....	40
2.9.2 การบำบัดน้ำทิ้งทางเคมี (Chemical treatment).....	40
2.9.3 การบำบัดน้ำทิ้งทางชีวภาพ (Biological treatment).....	40
2.9.4 การบำบัดน้ำทิ้งทางกายภาพ-เคมี.....	40
2.9.4.1 การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated carbon adsorption).....	40
2.9.4.2 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange process).....	40
2.9.4.3 การแยกด้วยไฟฟ้า และเยื่อกรอง (Electrodialysis).....	41
2.9.4.4 การรีเวอร์สออสโมซิส (Reverse osmosis).....	41
2.9.4.5 การกรองแบบอัลตราฟิวเทรชัน (Ultrafiltration).....	41

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	41
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	45
3.1 สารเคมี.....	45
3.2 อุปกรณ์ และเครื่องมือ	45
3.3 ขั้นตอนการตัดแปรโครงสร้างมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยโคโตซาน	47
3.4 ขั้นตอนการเตรียมไฮโดรเจลดูดซับ.....	47
3.4.1 การเตรียมไฮโดรเจลดูดซับจากเจลาติน และมอนต์มอริลโลไนต์	47
3.4.2 การเตรียมไฮโดรเจลดูดซับจากเจลาติน และมอนต์มอริลโลไนต์	48
ตัดแปรด้วยโคโตซาน	
3.5 การตรวจวิเคราะห์ และพิสูจน์เอกลักษณ์.....	48
3.5.1 การวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาคโดยใช้หลักการการกระเจิง	48
แสงของเลเซอร์ (Laser Scattering Size Distribution Analyzer)	
3.5.2 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วย XRD	48
3.5.3 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิควิเคราะห์การเปลี่ยนแปลง	49
ของสารโดยอาศัยสมบัติทางความร้อน (TGA)	
3.5.4 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี	49
(FT-IR)	
3.5.5 ขนาดของไฮโดรเจล.....	49
3.5.6 ความหนาแน่นของไฮโดรเจล.....	49
3.5.7 การทดสอบหารูพรุนของไฮโดรเจล.....	49
3.5.8 สัณฐานวิทยาของไฮโดรเจล (Morphology).....	50
3.5.9 การทดสอบพฤติกรรมดูดซับน้ำของไฮโดรเจล	50
3.5.10 การทดสอบหาปริมาณของแข็งคงเหลือ.....	50
3.5.11 การศึกษาพฤติกรรมดูดซับสีย้อมเบสิกลู 9.....	50
3.5.11.1 การเตรียมกราฟมาตรฐาน (Standard calibration curve).....	50
3.5.11.2 การทดสอบการดูดซับสีย้อมเบสิกลู 9 ด้วยไฮโดรเจลดูดซับ.....	51
แบบแบตช์ (Adsorption batch test)	
3.5.11.3 การศึกษาเวลาที่เข้าสู่สมดุลในการดูดซับสีย้อมเบสิกลู 9 ด้วย ..	51
ไฮโดรเจลดูดซับ	
3.5.11.4 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับสีย้อมเบสิกลู 9 ด้วยไฮโดรเจล..	52
ดูดซับ	
3.5.11.5 การทดสอบการดูดซับสีย้อมเบสิกลู 9 ด้วยไฮโดรเจลดูดซับ.....	53
แบบต่อเนื่อง (Adsorption continuous test)	
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	55

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1 การเตรียมมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยเคโตะซาน	55
4.1.1 การวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาคโดยใช้หลักการกระเจิง ของแสงเลเซอร์	56
4.1.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกด้วย XRD	56
4.1.3 การวิเคราะห์ปริมาณการสลายตัวขององค์ประกอบด้วย TGA	57
(Thermo gravimetric analyzer)	
4.1.4 การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีด้วย FT-IR (Fourier Transform.....	59
Infrared Spectroscopy)	
4.2 การเตรียมไฮโดรเจลดูดซับ	61
4.3 สมบัติการต้านทานน้ำของไฮโดรเจลดูดซับ	63
4.4 การศึกษาสัณฐานวิทยาของไฮโดรเจลดูดซับ	64
4.4.1 ปริมาณรูพรุนของไฮโดรเจลดูดซับ	64
4.4.2 ภาพพื้นผิวของไฮโดรเจลดูดซับด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด.....	64
(SEM)	
4.4.3 ภาพภาคตัดขวางของไฮโดรเจลดูดซับด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบ.....	66
ส่องกราด (SEM)	
4.5 การศึกษาประสิทธิภาพ และพฤติกรรมการดูดซับสีเบสิกลู 9	67
4.5.1 กราฟเทียบมาตรฐานของสารละลายสีเบสิกลู 9	68
4.5.2 การศึกษาความสามารถการดูดซับของไฮโดรเจลดูดซับแบบแบดซ์	68
4.5.3 การศึกษาเวลาที่เข้าสู่สมดุลในการดูดซับ	70
4.5.4 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ	71
4.5.5 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ	72
4.6 การศึกษาความสามารถการดูดซับแบบต่อเนื่อง	74
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	77
5.1 สรุปผลการวิจัย	77
5.2 ข้อเสนอแนะ	78
เอกสารอ้างอิง	80
ภาคผนวก	88
ภาคผนวก ก	89
ภาคผนวก ข	90
ภาคผนวก ค	91
ภาคผนวก ง	92
ภาคผนวก จ	96
ภาคผนวก ฉ	97
ภาคผนวก ช	98

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ช.....	100
ภาคผนวก ณ.....	102
ภาคผนวก ญ.....	104
ประวัติผู้เขียน.....	105

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ความแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพ และทางเคมี	5
2.2 ตัวอย่างความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนที่ขึ้นอยู่กับเนื้อดิน	20
2.3 ตัวอย่างความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนที่ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ.....	20
2.4 การเปรียบเทียบสมบัติของเจลาตินชนิดเอ และชนิดบี.....	34
3.1 สัดส่วนสารที่ใช้ในการสังเคราะห์ไฮโดรเจลดูดซับ	48
4.1 ผลการวิเคราะห์ MMT และ CS-MMT ด้วยเทคนิค TGA.....	59
4.2 พิกที่สำคัญของมอนต์มอริลโลไนต์	60
4.3 พิกที่สำคัญของโคโตซาน.....	60
4.4 พิกที่สำคัญของมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยโคโตซาน.....	60
4.5 พฤติกรรมการดูดซับน้ำ และปริมาณของแข็งคงเหลือหลังผ่านการแช่ในน้ำกลั่นเป็นเวลา.... 1 และ 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง	63
4.6 ปริมาณรพูนของไฮโดรเจลหลังผ่านการแช่ลงในไอโซโพรพานอลเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง	65
4.7 ค่าคงที่จากสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ และฟรุนดิช.....	74
ค.1 ขนาดของตัวอย่างก่อนการเชื่อมโยงด้วยสารละลายกลูตารัลดีไฮด์ 1	91
เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร	
ค.2 ขนาดของตัวอย่างหลังผ่านการเชื่อมโยงด้วยสารละลายกลูตารัลดีไฮด์ 1	91
เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร	
จ.1 ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำในไฮโดรเจลดูดซับสูตร M3G15 ในน้ำกลั่น	92
ที่อุณหภูมิห้อง	
จ.2 ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำในไฮโดรเจลดูดซับสูตร M5G15 ในน้ำกลั่น	93
ที่อุณหภูมิห้อง	
จ.3 ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำในไฮโดรเจลดูดซับสูตร M6G15 ในน้ำกลั่น	94
ที่อุณหภูมิห้อง	
จ.4 ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำในไฮโดรเจลดูดซับสูตร CS-M5G15 ในน้ำกลั่น.....	95
ที่อุณหภูมิห้อง	
ฉ.1 ค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณของแข็งคงเหลือของไฮโดรเจลดูดซับในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้อง.....	96
เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	
ฉ.2 ค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณของแข็งคงเหลือของไฮโดรเจลดูดซับในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้อง.....	96
เป็นเวลา 24 ชั่วโมง	
ฉ.1 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อมเบสิกบลู 9 ที่ $\lambda_{max} = 668$ นาโนเมตร	97
ข.1 ผลของการดูดซับสารละลายสีย้อมเบสิกบลู 9 ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	98
ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง ด้วยไฮโดรเจลดูดซับสูตร M3G15, M5G15,	

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
M6G15 และ CS-M5G15 ปริมาณ 0.5 กรัม	
ซ.1 ผลของการดูดซับสารละลายสีย้อมเบสิคบลู 9 ที่ความเข้มข้น 10, 100, 500, 800 และ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ที่เวลา 24 ชั่วโมง ด้วย M5G15 ปริมาณ 0.5 กรัม	99
ซ.2 ผลของการดูดซับสารละลายสีย้อมเบสิคบลู 9 ที่ความเข้มข้น 800 มิลลิกรัมต่อลิตร..... ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ด้วย M5G15 ปริมาณ 0.5 กรัม	100
ณ.1 พารามิเตอร์แบบจำลองจลนพลศาสตร์ Pseudo-first order ในการดูดซับสารละลาย..... สีย้อมเบสิคบลู 9 ความเข้มข้นเริ่มต้น 800 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้องด้วย M5G15 ปริมาณ 0.5 กรัม	101
ณ.2 พารามิเตอร์แบบจำลองจลนพลศาสตร์ Pseudo-first order ในการดูดซับสารละลาย..... สีย้อมเบสิคบลู 9 ความเข้มข้นเริ่มต้น 800 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้องด้วย M5G15 ปริมาณ 0.5 กรัม	102
ญ.1 พารามิเตอร์ของสมการไอโซเทอมแลงเมียร์ในการดูดซับสารละลายสีย้อมเบสิคบลู 9 ด้วย M5G15	103
ญ.2 พารามิเตอร์ของสมการไอโซเทอมฟรุนดิชในการดูดซับสารละลายสีย้อมเบสิคบลู 9..... ด้วย M5G15	103

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารถูกดูดซับไปยังสารดูดซับ	5
2.2 ไอโซเทอมการดูดซับของ IUPAC	7
2.3 กราฟไอโซเทอมของแลงเมียร์	9
2.4 กราฟเชิงเส้นของแลงเมียร์	9
2.5 กราฟไอโซเทอมของฟรุนดิช	10
2.6 กราฟเชิงเส้นของฟรุนดิช	11
2.7 การบวมตัว และการหดตัวของแร่ดินเหนียว	15
2.8 องค์กรประกอบของแร่ดินเหนียว	16
2.9 องค์กรประกอบทางเคมีของแร่โคลิไนต์	17
2.10 แร่โคลิไนต์หรือแร่ดินขาว	17
2.11 องค์กรประกอบทางเคมีของแร่สเมกไตต์	18
2.12 องค์กรประกอบทางเคมีของแร่อิลไลต์	18
2.13 หน่วยเซลล์ของแร่บรูไซต์	19
2.14 องค์กรประกอบทางเคมีของแร่คลอไรท์	19
2.15 โครงสร้างทางเคมีของแรมอนต์มอริลโลไนต์	21
2.16 การดูดซับของแรมอนต์มอริลโลไนต์	22
2.17 โครงสร้างทางเคมีของ Quaternary Ammonium Compounds (QACs)	23
2.18 แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ก่อน และหลังทำการดัดแปรด้วยสารลดแรงตึงผิว	23
ประเภท QACs	
2.19 โครงสร้างโมเลกุลของไคโตซาน	24
2.20 โครงสร้างของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ถูกดัดแปรด้วยไคโตซาน	24
2.21 การสร้างเสาค้ำยันภายในโครงสร้างของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์	25
2.22 ไอโซทรเจลแบบเชื่อมโยงทางกายภาพ	27
2.23 ไอโซทรเจลแบบโครงร่างตาข่าย	27
2.24 ไอโซทรเจลแบบกราฟท์บนพื้นผิว	28
2.25 ไอโซทรเจลแบบอินเตอร์เพเนตเรตติงพอลิเมอร์เน็ตเวิร์ก	28
2.26 องค์กรประกอบของหนังสือตัว	32
2.27 องค์กรประกอบทางเคมีของเจลาติน	33
2.28 โครงสร้างทางเคมีของไคติน	35
2.29 ปฏิกิริยากำจัดหมู่อะเซทิล (Deacetylation)	36
2.30 โครงสร้างทางเคมีของสีย้อมเมทิลีนบลู	39
3.1 แม่พิมพ์ยางซิลิโคนรูปทรงกระบอก และรูปลูกบาศก์	45

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.2 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทดสอบการดูดซับสีย้อมเบสิกบลู 9 ด้วยไฮโดรเจลดูดซับ..... แบบต่อเนื่อง	54
3.3 ไฮโดรเจลดูดซับที่บรรจุในคอลัมน์.....	54
4.1 ผงมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยไคโตซาน	56
4.2 การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของมอนต์มอริลโลไนต์ และมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วย..... ไคโตซาน	57
4.3 เทอร์โมแกรมของไคโตซาน	58
4.4 เทอร์โมแกรมของมอนต์มอริลโลไนต์.....	58
4.5 เทอร์โมแกรมของมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยไคโตซาน	58
4.6 FT-IR สเปกตร้าของการดูดกลืนแสงของไคโตซาน, มอนต์มอริลโลไนต์..... และมอนต์มอริลโลไนต์ที่ถูกดัดแปรด้วยไคโตซาน	59
4.7 การแทรกตัวของไคโตซานบริเวณระหว่างชั้นของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์..... แบบชั้นเดี่ยว และแบบสองชั้น	61
4.8 ตัวอย่างไฮโดรเจลก่อน และหลังผ่านการเชื่อมโยงด้วยสารละลายกลูตารัลดีไฮด์..... 1 เปอร์เซนต์โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิห้อง	62
4.9 ความหนาแน่นของไฮโดรเจลก่อน และหลังเชื่อมโยงด้วยสารละลายกลูตารัลดีไฮด์..... 1 เปอร์เซนต์โดยปริมาตร ปริมาตร 20 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง	62
4.10 ปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงไปของไฮโดรเจลหลังผ่านการเชื่อมโยงด้วยสาร..... ละลายกลูตารัลดีไฮด์ 1 เปอร์เซนต์โดยปริมาตร ปริมาตร 20 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง	63
4.11 กราฟแสดงพฤติกรรมของการดูดซับน้ำของไฮโดรเจลสูตร M5G15 ที่อุณหภูมิห้อง.....	64
4.12 ภาพพื้นผิวของไฮโดรเจลดูดซับสูตร M3G15, M5G15, M6G15 และ CS-M5G15..... ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่กำลังขยาย 250, 500 และ 1000 เท่า	65
4.13 ภาพภาคตัดขวาง และการกระจายตัวของธาตุ Al กับ Si ในไฮโดรเจลดูดซับสูตร..... M3G15 ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่กำลังขยาย 250 เท่า	66
4.14 ภาพภาคตัดขวาง และการกระจายตัวของธาตุ Al กับ Si ในไฮโดรเจลดูดซับสูตร..... M5G15 ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่กำลังขยาย 250 เท่า	66
4.15 ภาพภาคตัดขวาง และการกระจายตัวของธาตุ Al กับ Si ในไฮโดรเจลดูดซับสูตร..... M6G15 ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่กำลังขยาย 250 เท่า	67
4.16 ภาพภาคตัดขวาง และการกระจายตัวของธาตุ Al กับ Si ในไฮโดรเจลดูดซับสูตร..... CS-M5G15 ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่กำลังขยาย 250 เท่า	67
4.17 กราฟเทียบมาตรฐานของสารละลายสีย้อมเบสิกบลู 9 ที่ความยาวคลื่น 668 นาโนเมตร.....	68
4.18 ร้อยละการดูดซับสีย้อมเบสิกบลู 9 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร... ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ค่าพีเอชเท่ากับ 7 ที่อุณหภูมิห้อง ด้วยไฮโดรเจลดูดซับสูตร M3G15, M5G15, M6G15 และ CS-M5G15 ตามลำดับ ปริมาณ 0.5 กรัม	69

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
เป็นเวลา 2 และ 24 ชั่วโมง	
4.19 ร้อยละ และความสามารถการดูดซับสีย้อมเบสิกบลู 9 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 70 10, 100, 500, 800 และ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ที่ค่าพีเอช เท่ากับ 7 ด้วยไฮโดรเจลดูดซับสูตร M5G15 ปริมาณ 0.5 กรัม เป็นเวลา 24 ชั่วโมง	
4.20 ผลของระยะเวลาที่มีต่อความสามารถในการดูดซับสีย้อมเบสิกบลู 9 ที่ความเข้มข้น 71 เริ่มต้นเท่ากับ 800 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยไฮโดรเจลดูดซับสูตร M5G15	
4.21 แบบจำลองจลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของการดูดซับสีเบสิกบลู 9 72 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 800 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ของไฮโดรเจลดูดซับ สูตร M5G15	
4.22 แบบจำลองจลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาอันดับสองของการดูดซับสีเบสิกบลู 9 72 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 800 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ของไฮโดรเจลดูดซับ สูตร M5G15	
4.23 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ของการดูดซับสีเบสิกบลู 9 ด้วยไฮโดรเจลดูดซับ 73 สูตร M5G15	
4.24 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดิชของการดูดซับสีเบสิกบลู 9 ด้วยไฮโดรเจลดูดซับ 73 สูตร M5G15	
4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับ และเวลา 75	
4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับ และปริมาตร 75	
4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของสีย้อมผ่านไฮโดรเจลดูดซับ 76 และปริมาตรสีย้อม	
4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของสีย้อมผ่านไฮโดรเจลดูดซับ 76 และเวลาที่ใช้ในการดูดซับผ่านคอลัมน์	
ก.1 การกระจายขนาดอนุภาคของมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยโคโตซาน 89	
ข.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของมอนต์มอริลโลไนต์ 90	
ข.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยโคโตซาน 90	
ง.1 กราฟแสดงพฤติกรรมกรรมการดูดซับน้ำในไฮโดรเจลสูตร M3G15 ที่อุณหภูมิห้อง 92	
ง.2 กราฟแสดงพฤติกรรมกรรมการดูดซับน้ำในไฮโดรเจลสูตร M5G15 ที่อุณหภูมิห้อง 93	
ง.3 กราฟแสดงพฤติกรรมกรรมการดูดซับน้ำในไฮโดรเจลสูตร M6G15 ที่อุณหภูมิห้อง 94	
ง.4 กราฟแสดงพฤติกรรมกรรมการดูดซับน้ำในไฮโดรเจลสูตร CS-M5G15 ที่อุณหภูมิห้อง 95	
ฉ.1 กราฟมาตรฐานของสารละลายสีย้อมเบสิกบลู 9 97	

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
Gel, G	Gelatin
CS	Chitosan
MMT, M	Montmorillonite
DD	Degree of deacetylation
SEM	Scanning electron microscope
XRD	X-ray diffraction
TGA	Thermo gravimetric analysis
FT-IR	Fourier transform infrared spectroscopy

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันมีการเจริญเติบโตของอุตสาหกรรมต่าง ๆ อย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดปัญหาด้านวิกฤตพลังงาน และมลพิษทางสิ่งแวดล้อม อุตสาหกรรมด้านการพิมพ์เป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมที่ก่อมลพิษโดยผลิตน้ำเสียที่มีสีขุ่นปนเปื้อน น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีสีขุ่นเหล่านี้ปนเปื้อนอยู่ หากไม่ได้รับการบำบัดใด ๆ จะก่อให้เกิดผลเสียต่อสมดุลนิเวศวิทยาและสุขภาพของมนุษย์ จึงจำเป็นต้องมีวิธีการบำบัดน้ำทิ้งที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพก่อนระบายออกจากโรงงาน [1-5] โดยทั่วไปการบำบัดน้ำทิ้งในอุตสาหกรรมมีหลากหลายวิธี [6] เช่น การบำบัดด้วยโอโซน (Ozone Treatment) [7] การตกตะกอนด้วยสารเคมี (Chemical Coagulation) [8] การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) [9] การกรองด้วยเยื่อเลือกผ่าน (Membrane filtration) [10] แต่วิธีการเหล่านี้มีความยุ่งยากและค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง อาจทำให้โรงงานบางแห่งละเลยต่อการบำบัดน้ำทิ้งให้ได้ค่าตามมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง การพัฒนาวัสดุดูดซับจากพอลิเมอร์ธรรมชาติเป็นทางเลือกหนึ่งในกระบวนการกำจัดน้ำเสีย เนื่องจากเป็นวัสดุที่หาง่าย ราคาถูก ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดยสามารถทำเป็นลักษณะไฮโดรเจลจากนั้นผ่านกระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze-dry) ซึ่งกระบวนการนี้ทำให้เกิดรูพรุนจำนวนมากและสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับ [11]

ไฮโดรเจล (Hydrogel) เป็นวัสดุที่ชอบน้ำ มีโครงสร้างแบบโครงร่างตาข่ายสามมิติ มีสมบัติเด่นในเรื่องการดูดซับน้ำ ซึ่งบางชนิดสามารถดูดซับน้ำได้สูงถึง 600 เท่าของน้ำหนักตัว และยอมให้โมเลกุลต่าง ๆ เช่น น้ำ ก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และโปรตีนแพร่ผ่านได้ เป็นต้น โดยอาจสังเคราะห์ได้จากพอลิเมอร์สังเคราะห์จากปิโตรเคมี เช่น พอลิอะคริลาไมด์ (Polyacrylamide) พอลิเมทาคริลิกแอซิด (Polymethacrylic acid) พอลิเอทิลีนออกไซด์ (Polyethylene oxide) หรือสังเคราะห์ได้จากพอลิเมอร์ธรรมชาติ เช่น เซลลูโลส แป้ง ไคโตซาน และโปรตีน เป็นต้น โดยไฮโดรเจลสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ เช่น วัสดุที่ใช้ผลิตบรรจุภัณฑ์ (Packaging materials) คอนแทคเลนส์ชนิดนิ่ม (Soft lens) และวัสดุดูดซับยิ่งยวด (Superabsorbents) [12-20] เป็นต้น

วัสดุดูดซับ (Adsorbent) เป็นวัสดุที่สามารถเกิดการดูดซับสารโมเลกุลอื่นไว้กับวัสดุได้ ซึ่งวัสดุดูดซับที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือ ถ่านกัมมันต์ แต่มีข้อจำกัดในเรื่องของการทำงานและต้นทุนที่สูง นักวิจัยจำนวนมากจึงให้ความสนใจในเรื่องต้นทุนและวัสดุที่สามารถนำมาทดแทนได้ [21] เช่น เปลือกข้าวสาลี (Wheat shells) [22] แลคเคส (Immobilized laccase) [23] กาบมะพร้าว (Coconut husk) [24] ใบชา (Tea leaves) [25] เถ้า (Fly ash) [26] ดินเหนียว (Clay) [27] และทราย (Sand) [28] เป็นต้น ซึ่งดินเหนียวได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในการนำมาใช้เพื่อกำจัดสีขุ่น เนื่องจากต้นทุนต่ำ พบได้ง่าย และมีศักยภาพในการแลกเปลี่ยนไอออน [21] เช่น ดินขาว (Kaolin) มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite) เบนโทไนท์ (Bentonite) และแผ่นซิลิกาเรดับนาโน (Silica nano-sheets) อย่างไรก็ตามสารดูดซับเหล่านี้ยังมีประสิทธิภาพในการดูดซับสีขุ่นต่ำ จึงมีการพัฒนาเป็นวัสดุไฮโดรเจลคอมโพสิตจากพอลิเมอร์ผสมดินเหนียว เนื่องจากต้นทุนการผลิตต่ำ มีความแข็งแรง และสามารถดูดซับสีขุ่นบางชนิดได้ เช่น ในงานวิจัยของ Meijuan, S. และคณะ [29] ได้ศึกษาสมบัติการดูดซับของไฮโดรเจลคอมโพสิตจากเจลลาตินผสมมอนต์มอริลโลไนต์ผ่านการเชื่อมโยง

ทางเคมีด้วยกลูตารัลดีไฮด์ พบว่ามีความสามารถในการดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ตได้อย่างดีเยี่ยม เป็นต้น

มอนต์มอริลโลไนต์เป็นหนึ่งในวัสดุทดแทนที่สามารถนำมาใช้ในงานดูดซับสีย้อม เนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะมาก มีความสามารถในการดูดซับดี และสามารถแลกเปลี่ยนไอออนบวกได้ [30] แต่เนื่องจากมีขนาดอนุภาคที่เล็กมาก และยากต่อการแยกออกจากสารที่ถูกดูดซับ [31] จึงมีการประยุกต์ใช้มอนต์มอริลโลไนต์ผสมเข้ากับพอลิเมอร์ชีวภาพเพื่อทำเป็นวัสดุไฮโดรเจลคอมโพสิตดูดซับยิ่งยวด [32] นอกจากนี้ยังสามารถดัดแปรโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ โดยใช้โคโตซานขยายขนาดช่องว่างระหว่างชั้นของมอนต์มอริลโลไนต์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมของมอนต์มอริลโลไนต์ พบว่าเกิดโครงสร้างแยกตัวแบบแทรกสอด (Intercalated) เนื่องจากการเกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลบริเวณขอบของมอนต์มอริลโลไนต์กับหมู่อะมิโนของโคโตซาน [33] เป็นต้น

เจลาติน (Gelatin) เป็นสารประกอบโปรตีนที่ได้จากการสกัดคอลลาเจน (Collagen) ซึ่งเป็นองค์ประกอบของเนื้อเยื่อเกี่ยวพันที่พบในกระดูก ผิวหนัง และเอ็นของสัตว์ เจลาตินสามารถหลอมเหลวได้เมื่อได้รับความร้อนและแข็งตัวเป็นเจลได้เมื่อได้รับความเย็น โดยพบว่าเจลาตินเป็นพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ราคาไม่แพง พบได้ทั่วไป และสามารถทำขึ้นมาใหม่ได้ [34-35] นอกจากนี้เจลาตินยังสามารถประยุกต์ใช้ในงานดูดซับเนื่องจากเจลาตินเป็นโปรตีนที่มีโครงสร้างหมู่ข้างเคียงทั้งส่วนที่มีขั้วและไม่มีขั้ว จึงใช้ในการเชื่อมโยงได้ดี [32] ดังในงานวิจัยของ Bajpai, A.K. [36] ซึ่งศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับของเจลาตินที่บริเวณรอยต่อระหว่างของแข็งและของเหลว เป็นต้น นอกจากนี้เจลาตินยังสามารถใช้เป็นสารก่อเจลเพื่อช่วยให้เกิดการคงรูปแก้วสด

การดัดแปรแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยโคโตซาน เป็นหนึ่งในวิธีการปรับปรุงแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเพิ่มมากขึ้น ซึ่งการดัดแปรด้วยวิธีนี้เกิดจากการแลกเปลี่ยนประจุระหว่างไอออนบวกของโลหะ เช่น โซเดียมไอออน และแคลเซียมไอออน ที่อยู่ในช่องว่างระหว่างชั้นของแร่ดินกับประจุบวกของหมู่อะมิโนในโครงสร้างของโคโตซาน โดยเกิดการยึดเหนี่ยวของโคโตซานบนพื้นผิวของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์อันเนื่องมาจากการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่อะมิโน และหมู่ไฮดรอกซิลของโคโตซานกับไฮดรอกซิลในแผ่นซิลิเกตของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ ทำให้มีความสามารถในการดูดซับสีย้อมที่มีประจุลบเพิ่มมากขึ้น และยังสามารถดูดซับสีย้อมที่มีประจุบวกได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากโดยทั่วไปมอนต์มอริลโลไนต์สามารถดูดซับสีย้อมที่มีประจุบวกได้ดี ส่วนโคโตซานสามารถดูดซับสีย้อมที่มีประจุลบได้ดี [37]

จากข้อมูลงานวิจัยข้างต้น งานวิจัยนี้จึงศึกษาการเตรียมวัสดุไฮโดรเจลดูดซับที่ได้จากวัสดุธรรมชาติ ได้แก่ เจลาติน แร่มอนต์มอริลโลไนต์ และโคโตซานซึ่งใช้ในการดัดแปรโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ ผ่านการเชื่อมโยงทางเคมีด้วยกลูตารัลดีไฮด์ โดยเตรียมผ่านเทคนิคการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง จากนั้นพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค SEM และศึกษาพฤติกรรมดูดซับน้ำ ปริมาณของแข็งคงเหลือ ปริมาณรพูนของไฮโดรเจล ศึกษาพฤติกรรมดูดซับสีย้อมแบบแบตช์ ศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ ศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมเบสิกบลู 9 และศึกษาพฤติกรรมดูดซับแบบต่อเนื่องในรูปแบบของคอลัมน์

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาการพัฒนาวัสดุไฮโดรเจลดูดซับจากวัสดุธรรมชาติ

- 2) เพื่อศึกษาการดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยไคโตซาน และผลของความเข้มข้นมอนต์มอริลโลไนต์ที่มีต่อพฤติกรรม และประสิทธิภาพการดูดซับสีของไฮโดรเจลดูดซับ
- 3) เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์ และไอโซเทอมการดูดซับสีของเบสิกลู 9 ด้วยไฮโดรเจลดูดซับ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) เตรียมมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยไคโตซาน
- 2) เตรียมวัสดุไฮโดรเจลดูดซับจากเจลาตินผสมมอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปร และไม่ดัดแปรด้วยไคโตซานผ่านการเชื่อมโยงทางเคมีด้วยสารละลายไกลูตาร์ลดีไฮด์ และเทคนิคการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง
- 3) พิสูจน์เอกลักษณ์มอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปร และไม่ดัดแปรด้วยไคโตซาน
- 4) ทดสอบสมบัติการต้านทานน้ำ โดยศึกษาพฤติกรรมดูดซับน้ำหลังผ่านการแช่ตามเวลาที่กำหนด และปริมาณของแข็งคงเหลือของไฮโดรเจลดูดซับ
- 5) ศึกษาพฤติกรรมดูดซับสีของเบสิกลู 9 แบบแบตช์
- 6) ศึกษาจลนพลศาสตร์ และไอโซเทอมการดูดซับของเบสิกลู 9 ด้วยไฮโดรเจลดูดซับ
- 7) ศึกษาพฤติกรรมดูดซับสีของเบสิกลู 9 แบบต่อเนื่องในรูปแบบคอลัมน์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถเตรียมวัสดุไฮโดรเจลชีวภาพซึ่งสามารถดูดซับสีได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของความเข้มข้นสารที่บริเวณพื้นผิว (Surface) หรือระหว่างผิว (Interface) ซึ่งเกิดบริเวณผิวสัมผัสระหว่างสองสถานะใด ๆ เช่น ของเหลวกับของแข็ง ก๊าซกับของแข็ง ก๊าซกับของเหลว และของเหลวกับของเหลว โดยสารที่มีพลังงานอิสระที่ผิว (Surface free energy) ต่ำจะถูกดูดซับได้แต่สารที่มีพลังงานอิสระที่ผิวสูงจะไม่ถูกดูดซับ [39]

โมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่ถูกดูดซับเรียกว่า สารถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนสารที่ทำหน้าที่ดูดซับเรียกว่า สารดูดซับ (Adsorbent) ซึ่งความสามารถในการดูดซับขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ธรรมชาติของสารถูกดูดซับกับสารดูดซับ พื้นที่ผิวของสารดูดซับ พลังงานกระตุ้นของสารดูดซับ และสถานะการดูดซับ ได้แก่ อุณหภูมิ ความเข้มข้น ความดัน และพลังงานศักย์ของอันตรกิริยาระหว่างสารที่ถูกดูดซับ (อาจเป็นของแข็ง ของเหลวหรือก๊าซ) กับสารดูดซับ (อาจเป็นของแข็งหรือของเหลว) เป็นต้น [40]

2.1.1 ประเภทของการดูดซับ [40]

ปัจจัยสำคัญที่ใช้ในการแบ่งประเภทคือ แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลระหว่างสารถูกดูดซับและสารดูดซับ

2.1.1.1 การดูดซับทางกายภาพ

การดูดซับทางกายภาพเป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน ได้แก่ แวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals) ซึ่งเกิดจากการรวมแรงสองชนิดเข้าด้วยกันคือ แรงลอนดอน (London dispersion force) และแรงทางไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic force) เนื่องจากเป็นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน การดูดซับประเภทนี้จึงมีพลังงานการคายความร้อนค่อนข้างต่ำคือน้อยกว่า 20 กิโลจูลต่อโมลและสามารถเกิดกระบวนการผันกลับได้ (Reversible) ง่าย ซึ่งถือว่าเป็นข้อดีเพราะสามารถฟื้นฟูสภาพของสารดูดซับได้ง่าย โดยสารที่ถูกดูดซับสามารถเกาะอยู่รอบ ๆ พื้นผิวของสารดูดซับได้หลายชั้น (Multilayer) หรือสารถูกดูดซับสามารถเกาะติดกับชั้นของโมเลกุลสารดูดซับชั้นก่อนหน้า ซึ่งจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของสารถูกดูดซับและเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่สูงขึ้น

2.1.1.2 การดูดซับทางเคมี

การดูดซับทางเคมีเป็นการดูดซับที่เกิดเมื่อสารถูกดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกับสารดูดซับแล้วเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของสารถูกดูดซับเดิมคือ มีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมเดิมแล้วเกิดการจัดเรียงอะตอม โดยสร้างพันธะเคมีซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรงขึ้นกลายเป็นสารประกอบใหม่ การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงประมาณ 50-400 กิโลจูลต่อโมล จึงไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาแบบผันกลับได้ (Irreversible) และเป็น การดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) เท่านั้น

ตารางที่ 2.1 ความแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและทางเคมี [40]

ตัวแปร	การดูดซับทางกายภาพ	การดูดซับทางเคมี
ค่าความร้อนของการดูดซับ	น้อยกว่า 20 กิโลจูลต่อโมล	50-400 กิโลจูลต่อโมล
อุณหภูมิที่เกิดการดูดซับ	ต่ำ	สูง
แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล	แรงแวนเดอร์วาลส์	พันธะเคมี
การผันกลับของปฏิกิริยา	ผันกลับได้	ผันกลับไม่ได้
การดูดซับบนก๊าซ-ของแข็ง	เกิดได้เกือบทุกชนิด	เกิดเฉพาะบางระบบ
พลังงานก่อกัมมันต์ในกระบวนการเกิด	ไม่เกี่ยวข้อง	เกี่ยวข้อง
รูปแบบชั้นของการดูดซับ	Monolayer และ Multilayer	Monolayer

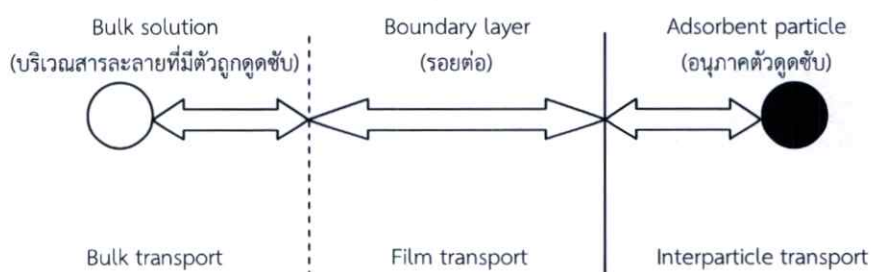
2.1.2 กลไกการดูดซับ [41]

กลไกการดูดซับสามารถแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

- ขั้นตอนที่ 1 การแพร่ภายนอก (External diffusion) เป็นกลไกที่โมเลกุลของสารถูกดูดซับเข้าถึงสารดูดซับ โดยที่พื้นผิวของสารดูดซับมีของเหลวห่อหุ้มอยู่จากนั้นโมเลกุลของสารถูกดูดซับจะแทรกผ่านชั้นของเหลวบาง ๆ เข้าไปถึงผิวหน้าของสารดูดซับ ขั้นตอนนี้อาจเรียกว่าการขนส่งอนุภาค (Bulk transport) ซึ่งเป็นขั้นตอนที่เกิดได้รวดเร็วที่สุด

- ขั้นตอนที่ 2 การแพร่ภายใน (Internal diffusion) เป็นกลไกการดูดซับที่โมเลกุลของสารถูกดูดซับเกิดการแพร่กระจายเข้าสู่โพรงของสารดูดซับเพื่อให้เกิดการดูดซับ ซึ่งเป็นกระบวนการที่สารถูกดูดซับเกิดการแพร่ผ่านฟิล์มที่เป็นน้ำเพื่อไปยังผิวหน้าของสารดูดซับ โดยขั้นตอนนี้อาจเรียกอีกอย่างว่า การขนส่งชั้นฟิล์ม (Film transport) จัดว่าเป็นขั้นตอนที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการกำหนดอัตราการดูดซับขั้นตอนหนึ่ง

- ขั้นตอนที่ 3 ปฏิกิริยาพื้นผิว (Surface reaction) เป็นกลไกที่โมเลกุลของสารถูกดูดซับถูกดูดติดที่พื้นผิวของสารดูดซับ โดยเป็นการแพร่ของโมเลกุลตัวถูกละลายเข้าไปสู่อรูพรุนหรือโพรงของสารดูดซับอาจเรียกว่า การแพร่เข้าสู่โพรง (Pore diffusion) ซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมากเมื่อเทียบกับกระบวนการแพร่ จึงสามารถละเลยการต้านทานจากปฏิกิริยาพื้นผิวได้ ขั้นตอนนี้จัดว่าเป็นขั้นตอนที่กำหนดอัตราการดูดซับเช่นกัน



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารถูกดูดซับไปยังสารดูดซับ [41]

2.1.3 สารดูดซับ (Adsorbent) [42]

สารดูดซับ คือ สารที่มีความสามารถในการดูดซับ แบ่งได้เป็น 5 ประเภท

1. สารอนินทรีย์

สารดูดซับอนินทรีย์จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 50-200 ตารางเมตรต่อกรัมและสามารถดูดซับสารได้เพียงไม่กี่ชนิดจึงมีการใช้งานที่จำกัด เช่น ดินเหนียวชนิดต่าง ๆ แมกนีเซียมออกไซด์ ซิลิกาแกมมันต์ อะลูมิเนียมแกมมันต์ ถ่านกระดุก และสินแร่จำพวกอะลูมิเนียมซิลิเกต เช่น Kaolinite เป็นต้น

2. ถ่านกัมมันต์

เป็นสารดูดซับที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 500-1,400 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งจัดว่าเป็นสารดูดซับที่มีประสิทธิภาพและมีการนำไปใช้งานอย่างกว้างขวาง เช่น ฟอกสี ใช้ในการกำจัดกลิ่นและรส ใช้กำจัดตะกอนในโรงงานเบียร์ เป็นต้น

3. สารอินทรีย์สังเคราะห์

เป็นสารดูดซับที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300-500 ตารางเมตรต่อกรัม ได้แก่ สารแลกเปลี่ยนไอออน (เรซิน) ชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นมาเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่าง ๆ

4. วัสดุชีวภาพ (Biomaterials)

ส่วนมากจะเป็นวัสดุเหลือใช้จากการเกษตร เช่น ชี้อ้อย ใคโตซาน กากกาแฟ กากชากากถั่วเหลือง ฟางข้าว เปลือกไม้ ถั่ว และแกลบดำ เป็นต้น

5. สารดูดซับชีวภาพ (Biosorbent)

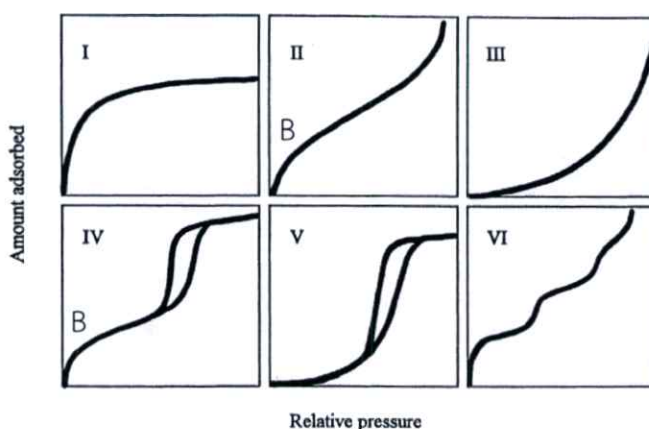
ได้แก่ เซลล์ของจุลินทรีย์ เช่น เซลล์ของแบคทีเรีย

2.1.4 สมดุลการดูดซับ (Adsorption equilibrium) [39, 41]

สมดุลการดูดซับพบว่าเมื่อเติมสารดูดซับปริมาณหนึ่งลงในสารละลาย ในช่วงเริ่มต้นสารถูกดูดซับบางส่วนจะไปเกาะติดกับพื้นผิวของสารดูดซับและเมื่อระยะเวลาผ่านไปจะมีสารถูกดูดซับไปเกาะติดพื้นผิวของสารดูดซับเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่เดียวกันสารถูกดูดซับบางส่วนซึ่งเกาะติดกับพื้นผิวจะคายออกมา โดยอัตราการคายจะเกิดน้อยกว่าอัตราการดูดซับ จากนั้นเมื่อปล่อยให้กระบวนการดูดซับดำเนินไปจนกระทั่งอัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคาย ระบบจะเข้าสู่ภาวะสมดุลซึ่ง ณ ภาวะสมดุลการดูดซับนั้นจำนวนของสารถูกดูดซับและจำนวนสารถูกดูดซับที่คายออกมามีปริมาณคงที่

สมดุลการดูดซับจะอาศัยความสัมพันธ์ที่ภาวะสมดุลของมวลสาร โดยกระบวนการดูดซับเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องซึ่งสารจะถูกดูดซับและคายการดูดซับ (Desorption) ไปพร้อมกันแล้วเกิดสมดุลเมื่ออัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคายการดูดซับ จากนั้นสามารถวัดปริมาณสารที่ถูกดูดซับ ณ อุณหภูมิคงที่หนึ่ง ๆ ในรูปกราฟที่เรียกว่า ไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption isotherm) ดังรูปที่ 2.2

รูปร่างของไอโซเทอมการดูดซับจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการดูดซับและปริมาณของสารถูกดูดซับบนพื้นผิวของสารดูดซับ ไอโซเทอมการดูดซับมีหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับชนิดของสารดูดซับ ชนิดสารที่ถูกดูดซับ และอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลกับพื้นผิวของสารดูดซับ



รูปที่ 2.2 ไอโซเทอมการดูดซับของ IUPAC [43]

- แบบ I เป็นไอโซเทอมการดูดซับของสารดูดซับที่มีขนาดเล็กกว่า 2 นาโนเมตร (Microporous-absorbent) ส่วนมากเป็นการดูดซับในรูพรุนขนาดเล็ก ลักษณะไอโซเทอมจะโค้ง (Concave) เข้าหาแกน Relative pressure (P/P_0) มีข้อจำกัดคือ ถ้าสารถูกดูดซับมีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของสารดูดซับก็จะไม่สามารถเข้าไปยังรูพรุนขนาดเล็กได้ การดูดซับนี้เป็นการบรรจุโมเลกุลเล็กลงในรูพรุนขนาดเล็กของสารดูดซับและมีการอึดตัวที่แน่นอนโดยเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียวบางครั้งเรียกว่า Langmiur หรือ L-shape isotherm
- แบบ II เป็นไอโซเทอมปกติที่เกิดจากสารดูดซับแบบไม่มีรูพรุน (nonporous) หรือสารดูดซับที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ (Microporous) ซึ่งจะเกิดการดูดซับต่อเนื่อง โดยเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) อย่างสมบูรณ์ก่อนแล้วจึงเกิดแบบหลายชั้น (Multilayer) ต่อ โดยบริเวณจุดเปลี่ยนโค้งของกราฟหรือจุด B (Break through) จะแสดงถึงการดูดซับแบบชั้นเดียวที่เสร็จสมบูรณ์แล้ว จากนั้นเมื่อความดันสูงขึ้นจะเกิดการดูดซับต่อเนื่องจากชั้นแรกและจะเกิดการดูดซับเสร็จสมบูรณ์ที่ความดันย่อยสูง ๆ ซึ่งอาจเรียกไอโซเทอมนี้ว่า Sigmoid หรือ S-Shape isotherm
- แบบ III เป็นการดูดซับที่มีแรงดึงดูดอ่อน ๆ ระหว่างสารดูดซับและสารถูกดูดซับ แต่แรงดึงดูดระหว่างสารถูกดูดซับด้วยกันเองมีค่าค่อนข้างมาก ทำให้สารถูกดูดซับเกิดการรวมตัวกันก่อนที่การดูดซับชั้นแรกจะเสร็จสมบูรณ์ การดูดซับแบบนี้จะมีแรงกระทำระหว่างสารถูกดูดซับและพื้นผิวของสารดูดซับมากกว่าแบบ II โดยเส้นกราฟจะโค้งออก (Convex) จากแกน Relative pressure (P/P_0) จำนวนสารที่ถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างไม่มีจำกัดจึงเป็นแบบพิเศษ
- แบบ IV เป็นไอโซเทอมการดูดซับที่สารดูดซับรูพรุนขนาดใหญ่กว่าเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวถูกดูดซับมากจึงเกิดการเรียงตัวของสารถูกดูดซับบนสารดูดซับเป็นแบบสองชั้น (Bilayer) เมื่อความดันเพิ่มขึ้นความชันของกราฟจะเพิ่มขึ้นแสดงให้เห็นว่าสารถูกดูดซับเริ่มเข้าไปในรูพรุนของสารดูดซับอีกครั้งและเกิดการเปลี่ยนระดับของกราฟเมื่อความดันเพิ่มขึ้นอีกเป็นผลเนื่องจากการควบแน่นภายในรูพรุนของของแข็ง (Capillary condensation in pores) ซึ่งลักษณะกราฟในช่วงแรกจะเหมือนแบบ II โดยจุดเปลี่ยนโค้งของกราฟแสดงถึงการดูดซับแบบชั้นเดียวที่เสร็จสมบูรณ์แล้ว

- แบบ V เป็นไอโซเทอมรูปแบบพิเศษที่คล้ายกับแบบ III เกิดเมื่อมีแรงดึงดูดระหว่างสารดูดซับกับสารดูดซับน้อย พบในสารดูดซับที่มีรูพรุนประมาณเดียวกับแบบ IV (ไอโซเทอมแบบ III และ V จะคำนวณหาพื้นที่ผิวได้ยากเพราะการดูดซับชั้นที่สอง จะถูกสร้างขึ้นมาก่อนที่การดูดซับชั้นแรกจะเสร็จสมบูรณ์)
- แบบ VI เป็นไอโซเทอมของการดูดซับแบบหลายชั้นเป็นชั้น ๆ ชั้นบนพื้นผิวของสารดูดซับแบบไม่มีรูพรุน (Nonporous) โดยความสูงของแต่ละชั้นจะขึ้นกับความสามารถของชั้นนั้น ๆ

2.1.5 การวิเคราะห์การดูดซับ [39, 41]

การดูดซับเป็นกระบวนการที่สารถูกดูดซับเคลื่อนที่จากเฟสหนึ่งไปยังอีกเฟสหนึ่ง เนื่องมาจากความแตกต่างกันของสามโมเลกุล ได้แก่ สารดูดซับ สารถูกดูดซับ และสารละลาย โดยจะมีแรงขับเคลื่อนหลังการดูดซับคือ แรงดึงดูดระหว่างสารดูดซับและสารถูกดูดซับ ได้แก่ แรงดึงดูดทางไฟฟ้า (Electrical attraction) แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals force) พันธะโควาเลนต์ (Covalent bond) หรือพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond)

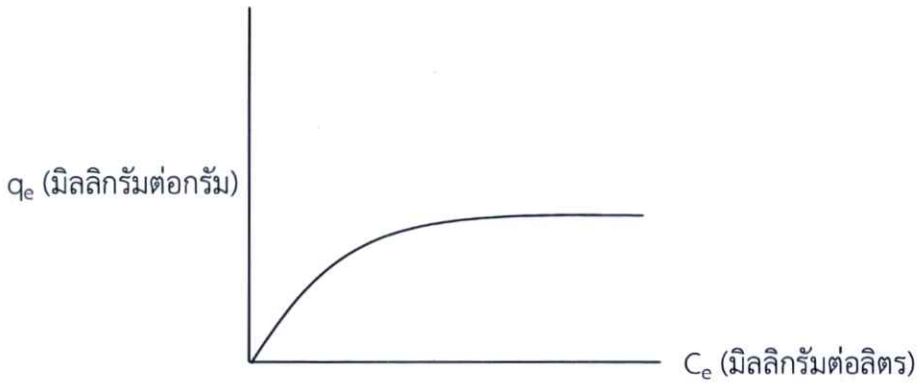
โดยวิธีวิเคราะห์การดูดซับที่นิยมมากที่สุดคือ ไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) และไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดิช (Freundlich isotherm) ซึ่งสามารถเลือกใช้ได้ทั้งสองวิธี

2.1.5.1 ไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) [39, 41]

แบบจำลองนี้มีสมมติฐานว่า 1.) สารถูกดูดซับสะสมอยู่ที่พื้นผิวของของแข็งเพียงชั้นเดียวเท่านั้น (Monolayer adsorption) 2.) โมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวนและตำแหน่งของการดูดซับที่แน่นอน 3.) แต่ละโมเลกุลของสารดูดซับจะดูดซับโมเลกุลของสารถูกดูดซับได้เพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้น ค่าความร้อนของการดูดซับแต่ละตำแหน่งมีค่าเท่ากันและคงที่ ไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่ตำแหน่งใกล้เคียงกัน รวมถึงพลังงานการดูดซับจะเหมือนกันในทุก ๆ พื้นผิวของสารดูดซับ 4.) โมเลกุลของสารถูกดูดซับไม่สามารถย้ายข้ามผิวหรือเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลข้างเคียงใด ๆ

โดยกราฟของแบบจำลองนี้สามารถอธิบายได้ว่าการปกคลุมของสารถูกดูดซับที่พื้นผิวของสารดูดซับ (Adsorbent) ในสัดส่วนที่มากขึ้น เมื่อถึงความเข้มข้นหนึ่งจะอิ่มตัวอย่างสมบูรณ์โดยไม่มีการดูดซับใด ๆ เพิ่มขึ้นอีกถึงแม้ว่าความเข้มข้นจะเพิ่มสูงกว่านี้ก็ตามดังรูปที่ 2.3

สมการแลงเมียร์มีข้อจำกัดในการทำงานดังนี้ พลังงานของการดูดซับเป็นอิสระจากการควบคุม แรงที่ใช้ในการดึงดูดเป็นแรงอ่อน ๆ ที่สามารถผันกลับได้และใช้ได้กับกรณีที่เป็นการดูดซับเพียงชั้นเดียวเท่านั้น



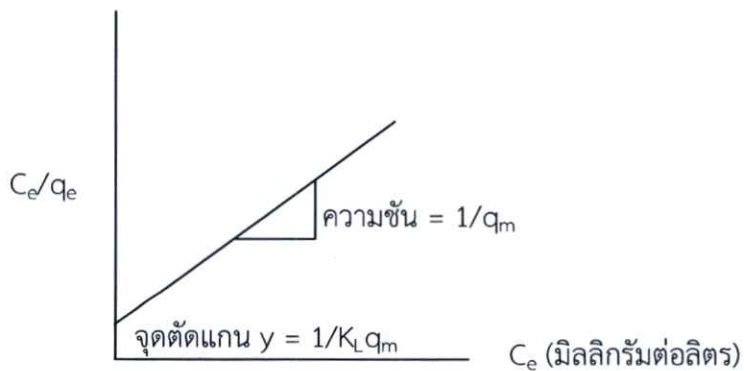
รูปที่ 2.3 กราฟไอโซเทอมของแลงเมียร์ [41]

สมการแลงเมียร์

$$C_e/q_e = (1/K_L q_m) + C_e/q_m \quad (2.1)$$

เมื่อ	C_e	คือ ความเข้มข้นของสารละลาย ณ สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)
	q_e	คือ ความสามารถในการดูดซับที่สมดุลต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของวัสดุดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
	K_L	คือ ค่าคงที่แลงเมียร์ (ลิตรต่อมิลลิกรัม)
	q_m	คือ ความสามารถในการดูดซับสูงสุดที่สามารถเกิดการปกคลุมแบบชั้นเดียวได้อย่างสมบูรณ์ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของวัสดุดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง C_e/q_e กับ C_e จะได้ความชันของกราฟคือ $1/q_m$ และจุดตัดแกน y คือ $1/K_L q_m$ ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กราฟเชิงเส้นของแลงเมียร์ [41]

2.1.5.2 ไอโซเทอมการดูดซับของฟรอนด์ลิช (Freundlich isotherm) [39, 41]

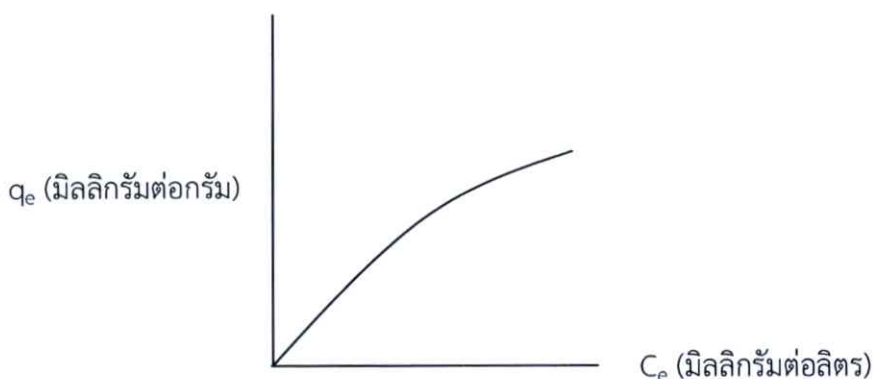
ไอโซเทอมนี้นี้พัฒนามาจากไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ซึ่งมีสมมติฐานว่าพื้นผิวของสารดูดซับไม่ได้เป็นเนื้อเดียวกันตลอด (Heterogeneous) มีการกระจายตัวของพื้นที่ผิวและพลังงานแบบเลขชี้กำลัง ใช้ได้ทั้งกับการดูดซับทางเคมีและกายภาพ โดยที่การดูดซับเป็นแบบการดูดซับหลายชั้น (Multilayer) การดูดซับจะยังดำเนินต่อไปเรื่อย ๆ เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นสารดูดซับ

สมการฟรอนด์ลิช

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (2.2)$$

เมื่อ	q_e	คือ ความสามารถในการดูดซับที่สมดุลต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของวัสดุดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
	K_F	คือ ค่าคงที่ฟรอนด์ลิช
	C_e	คือ ความเข้มข้นของสารละลาย ณ สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)
	n	คือ ค่าคงที่ที่ใช้อธิบายลักษณะเส้นกราฟไอโซเทอมของการดูดซับ โดยทั่วไปจะมีค่ามากกว่าหนึ่ง (ถ้า $1/n$ มีค่าใกล้เคียง 1 แสดงว่ามีความสามารถในการดูดซับที่ดี)

โดยกราฟของแบบจำลองนี้แสดงได้ดังรูปที่ 2.5 ซึ่งจะเห็นได้ว่ามวลของสารที่ถูกดูดซับ (Adsorbate) ที่ความเข้มข้นต่ำ ๆ จะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของสารละลาย และลดลงเมื่อสารถูกดูดซับเกิดการสะสมบนพื้นผิวของสารดูดซับ (Adsorbent) โดยที่การดูดซับยังคงดำเนินต่อไปเมื่อความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในสารละลายเพิ่มขึ้น แต่จะเพิ่มขึ้นในสัดส่วนที่น้อยลง

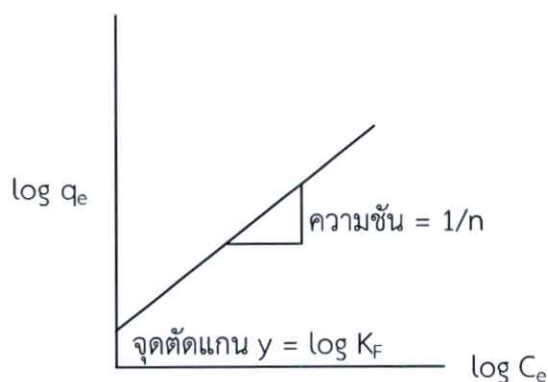


รูปที่ 2.5 กราฟไอโซเทอมของฟรอนด์ลิช [41]

จากสมการสามารถเขียนในรูปลอการิทึมได้ดังนี้

$$\log q_e = \log K_F + 1/n \log C_e \quad (2.3)$$

เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง $\log q_e$ และ $\log C_e$ จะได้กราฟเส้นตรง โดยหาค่า K_F ได้จาก $K_F = 10^{\text{y-intercept}}$ และ $1/n =$ ความชัน ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 กราฟเชิงเส้นของฟรอนดิช [41]

2.1.6 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ [39]

สมการจลนพลศาสตร์ของการดูดซับที่นิยมคือ สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง (Pseudo-first order) และอันดับสอง (Pseudo-second order) ซึ่งเป็นสมการที่ใช้อธิบายการดูดซับที่พื้นผิวของสารดูดซับ พบว่าการแพร่ภายในรูพรุนของสารดูดซับมีบทบาทสำคัญในขั้นตอนการดูดซับ ดังนั้นสมการการแพร่ภายในรูพรุน (Intraparticle diffusion) จึงเป็นอีกสมการหนึ่งที่ใช้อธิบายจลนพลศาสตร์การดูดซับด้วย

2.1.6.1 สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง (Pseudo-first order)

จากสมมติฐานการดูดซับของสารถูกดูดซับบนพื้นผิวของสารดูดซับซึ่งเป็นผลมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้า (Electrostatic interaction) ระหว่างพื้นผิวสารถูกดูดซับกับโมเลกุลของสารดูดซับและเป็นการดูดซับทางเคมี สามารถคำนวณหาอัตราเร็วการดูดซับได้โดยใช้สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับของ Lagergren

จากปฏิกิริยาการดูดซับ



เมื่อ A คือ สารถูกดูดซับ (Adsorbate)
S คือ สารดูดซับ (Adsorbent)
A*S คือ สารประกอบที่เกิดจากการดูดซับ (Adsorbed compound)

สามารถเขียนสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่งได้ดังนี้

$$dq_t/dt = k_1(q_e - q_t) \quad (2.5)$$

เมื่อ k_1 คือ ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง (นาที⁻¹)
 q_t คือ ค่าการดูดซับของสารดูดซับ ณ เวลาใด ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 q_e คือ ค่าการดูดซับของสารดูดซับ ณ สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

เมื่ออินทิเกรตสมการ (2.6) โดยมีขอบเขตตั้งแต่ $t=0$ จนถึง $t=t$ และตั้งแต่ $q_t=0$ จนถึง $q_t=t$ จะได้สมการดังนี้

$$\log(q_e/q_e - q_t) = (k_1/2.303)t \quad (2.6)$$

เมื่อจัดให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้นจะได้สมการดังนี้

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - (k_1/2.303)t \quad (2.7)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log(q_e - q_t)$ กับ t จะได้ความชันเท่ากับ $-k_1/2.303$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $\log q_e$

2.1.6.2 สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง (Pseudo-second order)

สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสองเป็นอีกหนึ่งสมการจลนพลศาสตร์ที่นิยมใช้อธิบายการดูดซับบนพื้นผิวของสารดูดซับจากสมมติฐานการดูดซับของสารถูกดูดซับบนพื้นผิวของสารดูดซับซึ่งเป็นผลมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าและเป็นการดูดซับทางเคมีที่มีผลมาจากตำแหน่งการเกิดปฏิกิริยา (Active site)

จากปฏิกิริยาการดูดซับ



สามารถเขียนสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสองได้ดังนี้

$$dq_t/dt = k_2(q_e - q_t)^2 \quad (2.9)$$

เมื่อ k_2 คือ ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง (นาที⁻¹)

เมื่ออินทิเกรตสมการ (2.10) โดยมีขอบเขตตั้งแต่ $t=0$ จนถึง $t=t$ และตั้งแต่ $q_t=0$ จนถึง $q_t=t$ จะได้สมการดังนี้

$$1/(q_e - q_t) = (1/q_e) - k_2 t \quad (2.10)$$

เมื่อจัดให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้นจะได้สมการดังนี้

$$1/q_t = (1/k_2 q_e^2) + (1/q_e) t \quad (2.11)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $1/q_t$ กับ t จะได้ความชันเท่ากับ $1/q_e$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $1/k_2 q_e^2$

2.1.6.3 การแพร่ภายในรูพรุน (Intraparticle diffusion)

จลนพลศาสตร์อาจเกี่ยวข้องกับการแพร่ภายในรูพรุนด้วย ดังนั้นการแพร่ภายในรูพรุนจึงเป็นอีกสมการหนึ่งที่ใช้ทำนายจลนพลศาสตร์การดูดซับ

สมการการแพร่ภายในรูพรุนของ Weber และ Morris สามารถเขียนให้อยู่ในรูปเชิงเส้นได้ดังนี้

$$q_t = k_t t^{0.5} + C \quad (2.12)$$

เมื่อ k คือ ค่าคงที่อัตราเร็วการดูดซับของการแพร่ภายในรูพรุน (มิลลิกรัมต่อกรัม·นาท^{0.5})

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง q_t กับ $t^{0.5}$ จะได้ความชันเท่ากับ k_t และจุดตัดแกน y เท่ากับ C โดยค่า C จะบ่งบอกถึงผลกระทบที่เกิดจากความหนาของชั้นฟิล์ม ยิ่งค่า C สูงผลกระทบจากความหนาของชั้นฟิล์มจะยิ่งมาก

2.1.7 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ [41]

2.1.7.1 ธรรมชาติของสารดูดซับ

พื้นที่ผิวของสารดูดซับมีผลต่อการดูดซับ เมื่อพื้นที่ผิวของสารดูดซับเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามนอกจากพื้นที่ผิวแล้วโครงสร้างของรูพรุนก็มีส่วนช่วยให้พื้นที่ผิวมีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น ถ้าสารดูดซับไม่มีรูพรุน พื้นที่ผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของสารดูดซับลดลง แต่ถ้าสารดูดซับมีรูพรุนมาก ๆ พื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดซับอยู่ในรูพรุน ขนาดของสารดูดซับจะไม่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ

2.1.7.2 ธรรมชาติของสารถูกดูดซับ

ความสามารถในการละลายน้ำของสารถูกดูดซับมีผลต่อการดูดซับ โดยความสามารถในการดูดซับจะลดลงเมื่อโมเลกุลสารดูดซับละลายน้ำได้ดี เนื่องจากก่อนที่จะเกิดกระบวนการดูดซับต้องมีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับกับน้ำก่อน เพื่อให้โมเลกุลของสารถูกดูดซับหลุดออกจากน้ำไปเกาะบนพื้นผิวของสารดูดซับได้ โมเลกุลของสารถูกดูดซับที่มีขนาดใหญ่จะมีความสามารถในการละลายน้ำลดลง ทำให้ถูกดูดซับบนพื้นผิวของสารดูดซับได้เพิ่มขึ้น

2.1.7.3 อัตราเร่งการปั่นกววน

อัตราเร็วของการดูดซับขึ้นกับการขนส่งโมเลกุลในระบบ โดยขั้นตอนนี้ประกอบด้วย การแพร่ผ่านฟิล์มและการแพร่เข้าสู่โพรง ซึ่งขึ้นอยู่กับความเร็วการปั่นกววน ถ้าความเร็วการปั่นกววนต่ำ ฟิล์มน้ำที่ล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนามากและเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลสารถูกดูดซับไปสู่สารดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้าความเร็วการปั่นกววนสูงจะส่งผลให้ความหนาของชั้นฟิล์มลดลง ซึ่งทำให้โมเลกุลของสารถูกดูดซับเคลื่อนที่เข้าหาสารดูดซับได้เร็ว ดังนั้นการแพร่เข้าสู่โพรงจึงเป็นขั้นตอนในการกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

2.1.7.4 อุณหภูมิ

เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จะส่งผลให้ความเร็วในการแพร่ผ่านของสารที่ถูกดูดซับไปยังรูพรุนของสารดูดซับมากขึ้น แต่ส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับกับพื้นผิวของสารดูดซับลดลง

2.1.7.5 ผลของความเป็นกรด-เบส

ประสิทธิภาพการดูดซับขึ้นอยู่กับสภาพความเป็นขั้วของพื้นผิวสารดูดซับ เมื่อสารละลายมีสภาพความเป็นกรดต่ำจะส่งผลให้เกิดไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) บนพื้นผิวของสารดูดซับเพิ่มขึ้น ทำให้กระบวนการดูดซับไอออนลบเพิ่มขึ้นและเมื่อสารละลายมีความเป็นกรด-เบสเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) บนพื้นผิวของสารดูดซับเพิ่มขึ้นและดูดซับไอออนบวกได้มากขึ้น แต่ถ้าสารละลายมีความเป็นกรด-เบสที่ค่าพีเอชมากกว่า 9 จะทำให้โลหะไอออนตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์และถูกดูดซับได้น้อยลง

2.2 ดิน (Soil)

ดินเป็นวัตถุที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ ซึ่งได้จากการย่อยสลายตัวทางกายภาพและทางเคมีของหินและแร่ร่วมกับการสลายตัวของสารอินทรีย์ที่ได้จากซากพืชและซากสัตว์ ดินมีลักษณะและสมบัติต่างกันไปขึ้นอยู่กับภูมิอากาศ ภูมิประเทศ วัตถุดิบกำเนิด สิ่งมีชีวิต และระยะเวลาการสร้างตัวของดิน [44]

2.2.1 ประเภทของดิน [44]

- ดินเหนียว

ดินชนิดนี้เป็นดินที่มีเนื้อละเอียดซึ่งมีการระบายน้ำ และอากาศที่ไม่ดี เมื่อดินแห้งจะแตกออกเป็นก้อนแข็งแต่ถ้าเปียกน้ำจะมีความยืดหยุ่นปั้นเป็นก้อนหรือคลึงเป็นเส้นยาวได้ มีความเหนียวสามารถอุ้มน้ำ และแลกเปลี่ยนธาตุอาหารของพืชได้ดี เหมาะในการใช้เพื่อทำนาปลูกข้าวเนื่องจากกักเก็บน้ำได้นาน

- ดินร่วน

ดินร่วนเป็นดินที่มีเนื้อค่อนข้างละเอียด นุ่ม เมื่อดินแห้งจะเป็นก้อนแข็งพอประมาณแต่ถ้าดินชื้นจะยืดหยุ่นได้เล็กน้อย มีการระบายน้ำได้ดีระดับปานกลาง จัดว่าเป็นเนื้อดินที่เหมาะสมต่อการเพาะปลูก

- ดินทราย

เนื้อดินชนิดนี้มีการเกาะตัวกันแบบหลวม ๆ สามารถมองเห็นเป็นเม็ดเดี่ยว ๆ ได้

2.2.2 แร่ดินเหนียวหรือแร่อลูมิเนียมซิลิเกต [45]

แร่ดินเหนียวเป็นกลุ่มแร่อลูมิเนียมซิลิเกต (Alumino silicate mineral) ประกอบด้วยแผ่นซิลิกา และแผ่นอลูมินาซ้อนกันอยู่ ซึ่งโดยทั่วไปจะมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 2 ไมโครเมตร

- สมบัติที่สำคัญของแร่ดินเหนียว

- รูปร่างและขนาด (Shape and size)

รูปร่างทั่วไปมีลักษณะเป็นแผ่นบาง (Flake like) ซ้อนกัน บางครั้งเห็นเป็นลักษณะผลึกชัดเจน เช่น แผ่นหกเหลี่ยม (Hexagonal) โดยที่ขนาดจะขึ้นอยู่กับชนิดของแร่ดินเหนียว องค์ประกอบแร่ และสภาพที่เกิดขึ้น โดยทั่วไปมีขนาดอนุภาคประมาณ 0.01-5.0 ไมโครเมตร

- พื้นที่ผิว (Surface area)

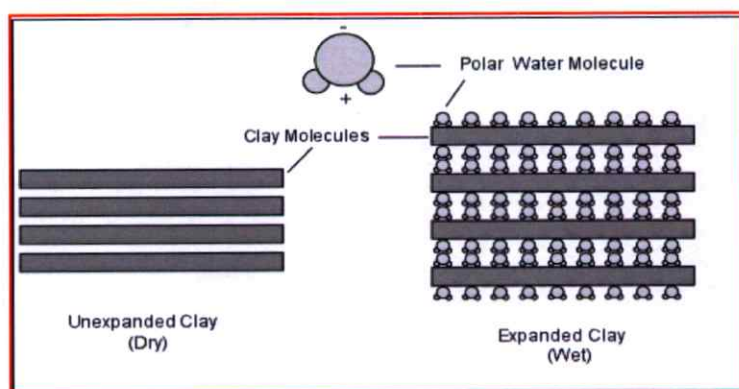
แร่ดินเหนียวมีพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface) สูงมากเนื่องจากมีรูปร่างเป็นแผ่นบาง โดยพื้นที่ผิวประกอบด้วยพื้นผิวภายนอก (External surface) ซึ่งเป็นพื้นผิวภายนอกของแร่ดินเหนียว และพื้นผิวภายใน (Internal surface) ซึ่งเป็นพื้นผิวที่อยู่ระหว่างแผ่นผลึกของแร่ดินเหนียว และซ้อนทับกันเป็นอนุภาค (Micelle) ของแร่

- ความเชื่อมแน่น (Cohesion) และสภาพพลาสติก (Plasticity)

ความเชื่อมแน่นคือ ความสามารถในการยึดเกาะกันระหว่างอนุภาคแร่ดินเหนียว โดยขึ้นอยู่กับพื้นผิวภายนอกของแร่ ส่วนสภาพพลาสติกคือ ความสามารถในการเปลี่ยนรูปได้ของแร่ดินเหนียวเมื่อมีความชื้น โดยขึ้นอยู่กับความเชื่อมแน่น และพื้นผิวภายนอกของแร่

- การบวมตัว (Swelling) และการหดตัว (Shrinking)

การบวมตัวเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลน้ำสามารถแทรกเข้าไปอยู่ระหว่างแผ่นผลึก แล้วเกาะยึดกับพื้นผิวภายในของแร่ดินเหนียวมากขึ้นเรื่อย ๆ ซึ่งเกิดขึ้นในแร่ดินเหนียวบางชนิดเท่านั้น ส่วนการหดตัวเกิดขึ้นเมื่อสูญเสียโมเลกุลน้ำที่แทรกอยู่ระหว่างแผ่นผลึก อาจด้วยการระเหย จึงทำให้ดินเกิดการหดตัวลง ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การบวมตัวและการหดตัวของแร่ดินเหนียว [45]

- ประจุลบ (Electronegativity charge) และการดูดซับแคตไอออน (Adsorption of cation)

ประจุลบโดยทั่วไปเกิดจากการแทนที่ของไอออนบวกที่ขนาดเท่ากันแต่มีประจุว้นน้อยกว่าในแผ่นอลูมินา โดยที่โครงสร้างไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง จึงทำให้แร่ดินเหนียวมีลักษณะคล้ายแอนไอออน (Anion) ส่วนการดูดซับแคตไอออนจะเกิดขึ้นบริเวณผิวของแร่ดินเหนียว ซึ่งดูดซับกันอย่างอ่อน เรียกว่า แคตไอออนที่สามารถแลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable cation) โดยแคตไอออนที่ถูกดูดซับได้แก่ H^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ และ Na^+

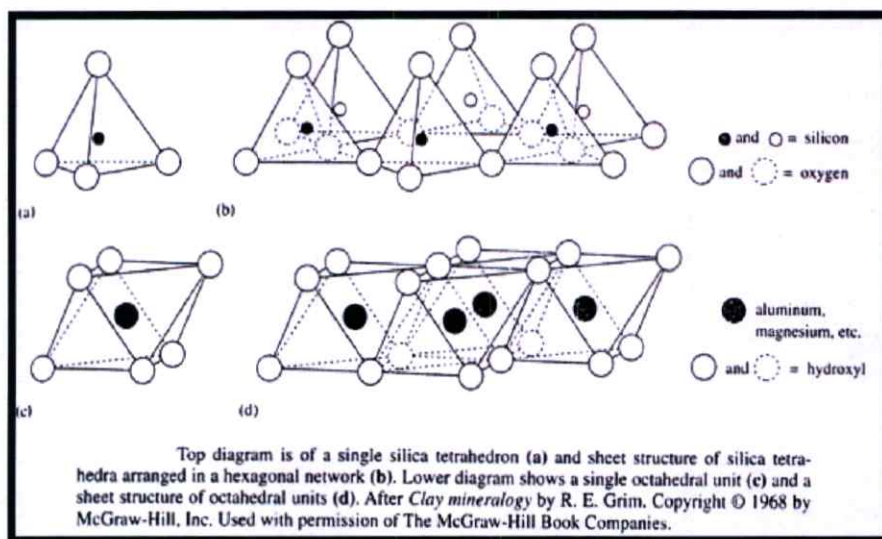
— โครงสร้าง

➤ Silica tetrahedral unit

หน่วยโครงสร้างเชื่อมโยงกันคล้ายแผ่นรังผึ้ง เรียกว่า แผ่นซิลิกา โดยประกอบด้วยซิลิกา 1 อะตอมซึ่งถูกล้อมรอบด้วยออกซิเจน 4 อะตอม เกิดเป็นรูปที่มีสี่ด้าน ดังรูปที่ 2.8

➤ Alumina octahedral unit

หน่วยโครงสร้างเชื่อมโยงกันเป็นแผ่นแน่นทึบ เรียกว่า แผ่นอลูมินา โดยประกอบด้วยอลูมินัม 1 อะตอมซึ่งถูกล้อมรอบด้วยออกซิเจน 6 อะตอม เกิดเป็นรูปที่มี 8 ด้าน ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 องค์ประกอบของแร่ดินเหนียว [45]

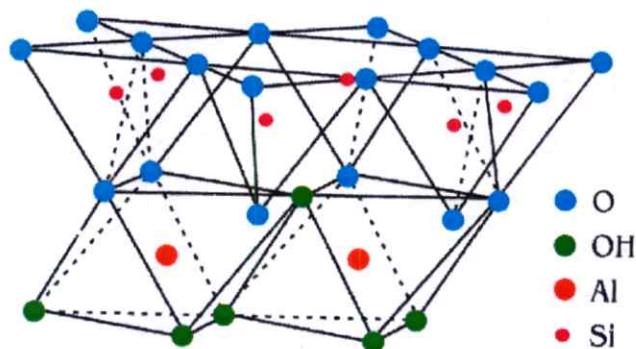
— ชนิดของแร่ดินเหนียวที่สำคัญ [45-46]

➤ แร่เคโอลิไนต์ (Kaolinite)

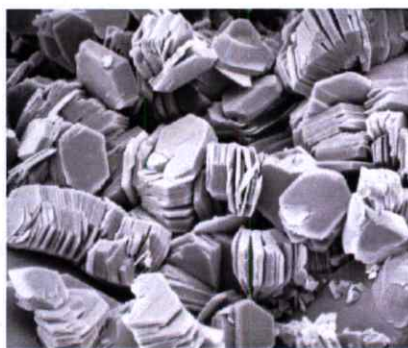
แร่กลุ่มนี้เป็นพวกไฮเดรต อลูมิโนซิลิเกต (Hydrated aluminosilicate) มีสูตรเคมีคือ $Si_4Al_4O_{10}(OH)_8$ ซึ่งสัดส่วนองค์ประกอบเป็นดังนี้ $Al_2O_3 : SiO_2 : H_2O$ เท่ากับ 1:2:2 ดังรูปที่ 2.9 โดยประกอบด้วยแผ่นซิลิกา และแผ่นอลูมินาอย่างละ 1 แผ่นประกบกัน เรียกโครงสร้างแบบนี้ว่า ฟิลโลซิลิเกต (Phyllosilicate) คือเป็นแผ่น ๆ ชนิด 1:1 และแต่ละแผ่นวางตัวไม่สมมาตรกัน ลักษณะภายนอกเป็นผลึกรูปหกเหลี่ยมต่อกันในแนวระนาบไม่จำกัด ดังรูปที่ 2.10 แผ่นโครงสร้างมีความหนา 0.08 ไมโครเมตร ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1 ไมโครเมตร ภายในโครงสร้างประกอบด้วยพันธะไฮโดรเจนเกาะกันอย่างเหนียวแน่น ทำให้ระยะห่างระหว่างผลึกแคบ และขยายออกไม่ได้ เมื่อเปียก

น้ำจึงไม่เกิดการขยายตัว และไม่หดตัวเมื่อแห้ง รวมทั้งยังไม่มี การแทนที่ของไอออนประจุบวกจึงทำให้ ประจุสุทธิเป็นกลาง ซึ่งอาจเรียกรแร่โคลิไนต์ว่า แร่ดินขาว

แร่โคลิไนต์แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม โดยกลุ่มแรกเป็นแร่ที่มีโครงสร้าง และสูตรเคมี คล้ายคลึงกับโคลิไนต์ ได้แก่ ดิสออดเดอร์ โคลิไนต์ (Disordered and poorly crystalline kaolinite) ดิกไคต์ (Dickite) เนโคริต (Nacrite) เมตาฮัลลอยไซต์ (Metahalloysite) และดิสออดเดอร์ ฮัลลอยไซต์ (Disordered halloysite) กลุ่มที่สองเป็นโครงสร้างที่มีโมเลกุลของน้ำเพิ่มขึ้น ได้แก่ แอลโลเฟน (Allophane) และฮัลลอยไซต์ (Halloysite)



รูปที่ 2.9 องค์ประกอบทางเคมีของแร่โคลิไนต์ [47]

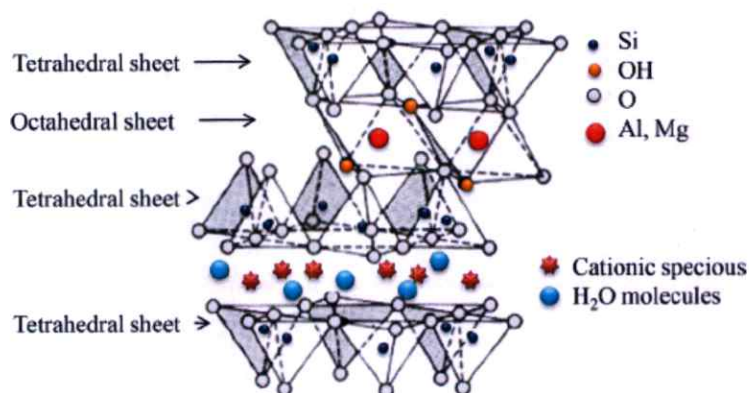


รูปที่ 2.10 แร่โคลิไนต์หรือแร่ดินขาว [48]

➤ แร่สมกไทต์ (Smectite)

แร่กลุ่มนี้มีโครงสร้างทางเคมีที่ซับซ้อน และไม่แน่นอน มีสูตรทางเคมีโดยทั่วไปคือ $(OH)_4Al_4Si_8O_{20} \cdot nH_2O$ ซึ่งชนิดที่มีสูตรเสถียร ได้แก่ ไพโรฟิลไรท์ (Pyrophyllite) มีสูตรทางเคมีคือ $Si_8Al_4O_{20}(OH)_4$ ประกอบด้วยแผ่นซิลิกา 2 แผ่นประกบกับแผ่นอลูมินา 1 แผ่นดังรูปที่ 2.11 แผ่นโครงสร้าง และช่องว่างระหว่างแผ่นที่ซ้อนทับกันมีความหนา 9-21 อังสตรอม มีพันธะระหว่างผลึกซึ่งเป็นแรงแบบอ่อน คือ พันธะ O-O จึงทำให้โมเลกุลของน้ำ และแคตไอออนสามารถแทรกเข้าไปด้านในช่องว่างระหว่างผลึกได้แล้วก่อให้เกิดการบวมตัวขึ้น แต่เมื่อระเหยโมเลกุลของน้ำออกจะเกิดการหดตัวลง ตัวอย่างกลุ่มแร่สมกไทต์ เช่น มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite) ไบเดลไลต์

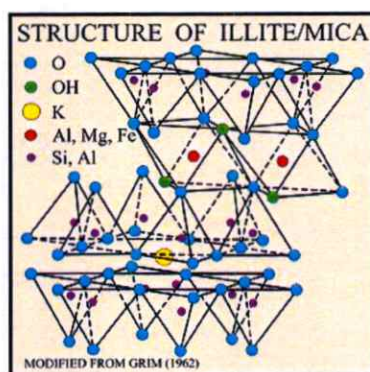
(Beidellite) นอนโทรไนต์ (Nontronite) เฮคโตไรต์ (Hectorite) ซาโปไนต์ (Saponite) ซอโคไนต์ (Sauconite) และอื่น ๆ เป็นต้น



รูปที่ 2.11 องค์ประกอบทางเคมีของแร่สเมกไทต์ [49]

➤ แร้อิลไลต์ (Illite)

แร่กลุ่มนี้มีสูตรเคมีคือ $K_{1.33}(Si_{6.66}Al_{1.33})Al_4O_{20}(OH)_4$ ซึ่งมี Al แทนที่ Si ในแผ่นซิลิกา และประจุค้ำที่เหลืออยู่ถูกชดเชยให้เป็นกลางด้วย K ดังรูปที่ 2.12 จึงทำให้โครงสร้างไม่สามารถบวม และหดตัวได้เนื่องจากมี K ที่อยู่ในช่องว่างระหว่างแผ่นดึงดูดแผ่นซิลิกาไว้ แต่เกิดการบวม และหดตัวได้เมื่อมีการสูญเสีย K ในโครงสร้างออกไป มีโครงสร้างทั่ว ๆ ไปเหมือนแร่สเมกไทต์ ซึ่งแผ่นโครงสร้าง และช่องว่างระหว่างแผ่นที่ซ้อนทับกันมีความหนา 10 อังสตรอม กลุ่มแร้อิลไลต์มีโครงสร้างขนาดเล็กคล้ายคลึงกับแร่ไมกา (Mica) บางครั้งอาจเรียกว่า ไฮดรอสไมกา (Hydrous mica) และมีสมบัติอยู่ระหว่างแร่เคโอลิไนต์ และสเมกไทต์



รูปที่ 2.12 องค์ประกอบทางเคมีของแร้อิลไลต์ [50]

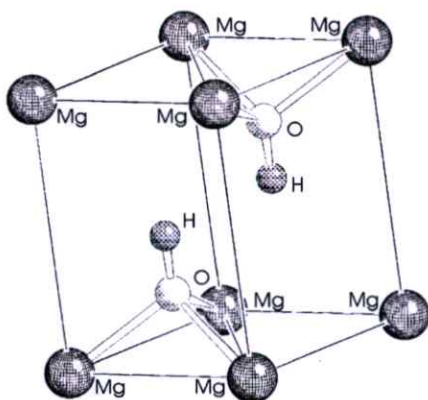
➤ แร่เวอร์มิคิวไลต์ (Vermiculite)

แร่กลุ่มนี้มีลักษณะโครงสร้างคล้ายกับแร้อิลไลต์แต่อลูมิเนียมในแผ่นอลูมินาซึ่งเป็น Dioctahedral ถูกแทนที่ด้วย Mg ซึ่งเป็น Trioctahedral และช่องว่างระหว่างชั้นมี Ca และ Mg ดึงดูดเป็นส่วนใหญ่ หดตัวได้พอ ๆ กับแร้อิลไลต์ มีสูตรโครงสร้างเคมีโดยทั่วไปคือ

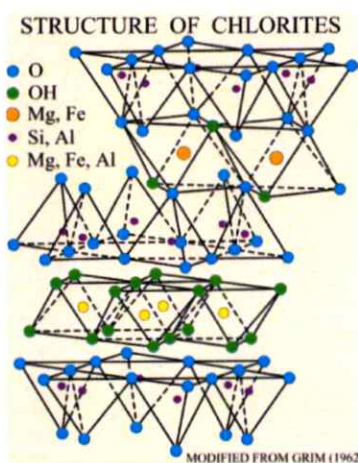
$(\text{OH})_4(\text{Mg}\cdot\text{Ca})_x(\text{Si}_{8-x}\cdot\text{Al}_x)(\text{Mg}\cdot\text{Fe})_6\text{O}_{20}\cdot\text{YH}_2\text{O}$ เมื่อ X มีค่าเท่ากับ 1-1.4 และ Y มีค่าเท่ากับ 8 โดยประมาณ

➤ แร่คลอไรต์ (Chlorite)

แร่กลุ่มนี้มีลักษณะแผ่นผลึกคล้ายคลึงกับไมกา และแร่บรูไซต์ (Brucite) ดังรูปที่ 2.13 ซึ่งสูตรโครงสร้างเคมีคือ $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ประกอบทับกันอย่างมีระเบียบอีกต่อหนึ่ง แร่คลอไรต์มีสูตรโครงสร้างทางเคมีคือ $(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})_6(\text{Al}, \text{Si})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ แสดงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.13 หน่วยเซลล์ของแร่บรูไซต์ [51]



รูปที่ 2.14 องค์ประกอบทางเคมีของแร่คลอไรต์ [52]

2.2.2.1 การดูดซับไอออน (Ion adsorption) [53]

โดยทั่วไปดินมักจะมีทั้งประจุเปลี่ยนแปลง และถาวร ซึ่งปริมาณประจุแต่ละชนิดขึ้นอยู่กับปริมาณอินทรีย์วัตถุ และชนิดของแร่ดินเหนียว ส่งผลให้ดินมีประจุสามารถดูดซับแคตไอออน และแอนไอออนปริมาณหนึ่งไว้ได้ โดยปริมาณไอออนที่ดินดูดซับได้มีค่าใกล้เคียงกับปริมาณประจุในดินที่มีอยู่

2.2.2.2 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) [53-54]

การแลกเปลี่ยนไอออนเกิดขึ้นเมื่อมีความแตกต่างของความเข้มข้นของไอออนชนิดใดชนิดหนึ่งในสารละลายดินสูงขึ้น ส่งผลให้ไอออนชนิดนั้นเคลื่อนที่จากสารละลายไปยังพื้นผิวของอนุภาค ซึ่งจะไปแทนที่ไอออนอื่นที่ถูกดูดซับอยู่ก่อนให้ออกมาอยู่ในสารละลายเพื่อรักษาสมดุลของประจุ

การแลกเปลี่ยนแคตไอออน (Cation exchange capacity, CEC) คือ ความจุในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนที่สูงที่สุดต่อหน่วยน้ำหนักที่ดินสามารถดูดซับได้ รายงานในหน่วยของ Milliequivalent per 100 g soil หรือหน่วยของ SI Unit จะรายงานเป็น cmol/kg soil ซึ่ง 1 meq/100g มีค่าเท่ากับ 1 cmol/kg

ค่าการแลกเปลี่ยนแคตไอออนขึ้นอยู่กับเนื้อดิน อินทรีย์วัตถุ ชนิดของแร่ดินเหนียว และปริมาณดินเหนียว โดยตัวอย่างค่าการแลกเปลี่ยนแคตไอออนดังแสดงในตารางที่ 2.2 และ 2.3

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนที่ขึ้นอยู่กับเนื้อดิน [45]

เนื้อดิน	CEC (cmol (+)/kg)
ทราย (Sand)	1-5
ดินร่วนปนทรายละเอียด (Fine sandy loam)	5-10
ดินร่วน และดินร่วนปนตะกอนทราย (Loam and silt loam)	5-15
ดินเหนียวปนดินร่วน (Clay loam)	15-30
ดินเหนียว (Clay)	> 30

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนที่ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ [45]

องค์ประกอบ	CEC (cmol (+)/kg)
ฮิวมัส (Humus)	100-300
เวอร์มิคิวไลต์ (Vermiculite)	80-150
มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite)	60-100
เคโอลิไนต์ (Kaolinite)	3-15
ออกไซด์ (Oxide)	0-3

ชนิดของแคตไอออนที่สามารถแลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable cation) ที่พบมากในดินมีอยู่ 6 ชนิด ได้แก่ Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , Al^{3+} และ H^+ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ประเภท

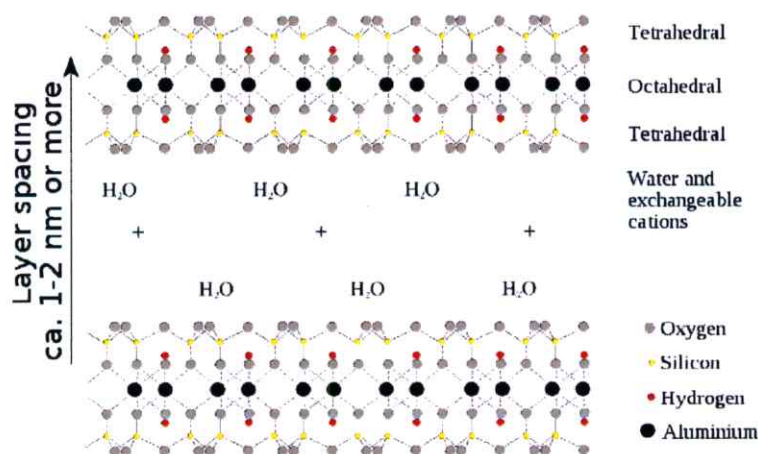
1. Basic cation ได้แก่ Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ และ Na^+
2. Acid cation ได้แก่ Al^{3+} และ H^+

2.2.2.3 เทคนิคการพิสูจน์เอกลักษณ์ของแร่ดินเหนียว [53]

- เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction, XRD)
- เทคนิควิเคราะห์สมบัติความแตกต่างทางความร้อนของสสาร (Differential thermal analysis, DTA)
- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Electron microscope)
- การวิเคราะห์ทางเคมี

2.3 มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite) [55-56]

คำว่า Montmorillonite ดัดแปลงมาจากคำว่า Montmorillon ซึ่งเป็นภาษาฝรั่งเศส อยู่ในกลุ่มดินสมกไทต์ (Smectite) ซึ่งเป็นแร่ดินเหนียวชนิดหนึ่ง มีลักษณะโครงสร้างพื้นฐานเป็นแผ่นหรือเกล็ดขนาดเล็กละเอียด 3 ชั้น โดยแต่ละแผ่นมีขนาด 200-300 นาโนเมตร ในขณะที่ความหนาเพียง 1 นาโนเมตร ซึ่งแผ่นตรงกลางเป็นแผ่นของกลุ่มโมเลกุลอลูมิเนียมไฮดรอกซิลทรงแปดหน้า (Octahedral aluminum hydroxyl) อยู่ระหว่างแผ่นของกลุ่มโมเลกุลซิลิกอนออกไซด์ทรงสี่หน้า (Tetrahedral silicon oxide) ดังรูปที่ 2.15 โครงสร้างลักษณะนี้อาจเรียกว่า T-O-T ซึ่งจัดว่าเป็นโครงสร้างพื้นฐานของแร่ไพโรฟิลไลต์ (Pyrophyllite) โดยที่อะตอมของอลูมิเนียม (Al) บางส่วนจะถูกแทนที่ด้วยแมกนีเซียม (Mg) หรืออะตอมของธาตุเหล็ก (Fe) ส่งผลให้เกิดประจุลบบนแผ่นระนาบของโมเลกุลซิลิกา และมีการสร้างสมดุลของประจุโดยการแลกเปลี่ยนประจุบวกกับแผ่นที่อยู่ติดกัน ซึ่งประจุบวกเหล่านี้มักจะเป็นแคลเซียม (Ca) โซเดียม (Na) หรือแมกนีเซียม (Mg) ขึ้นอยู่กับสภาพดินฟ้าอากาศ สภาพแวดล้อมในช่วงเวลาที่ก่อตัว และลักษณะการก่อตัวขึ้นของแร่ เป็นต้น แร่กลุ่มนี้มีแรงยึดระหว่างผลึกค่อนข้างอ่อน เป็นเพียงแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals) เท่านั้น ส่งผลให้โมเลกุลของน้ำสามารถแทรกเข้าไปในโครงสร้างได้แล้วทำให้เกิดการบวมตัวขึ้น มีสูตรโครงสร้างทางเคมีดังนี้ $(\text{Na}, \text{Ca})_{0.33}(\text{Al}, \text{Mg})_2(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$



รูปที่ 2.15 โครงสร้างทางเคมีของแร่มอนต์มอริลโลไนต์ [57]

2.3.1 การดูดซับของแร่มอนต์มอริลโลไนต์

แร่มอนต์มอริลโลไนต์มีธรรมชาติเป็นประจุลบ ในทางตรงกันข้ามอินทรีย์วัตถุ ซึ่งมีธรรมชาติเป็นประจุบวก ส่งผลให้สามารถดึงดูดสารที่มีประจุบวกเข้ามาเก็บในแผ่นชั้นที่ทับซ้อนกันของผลึกแร่มอนต์มอริลโลไนต์ได้ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 การดูดซับของแร่มอนต์มอริลโลไนต์ [56]

2.3.2 การแลกเปลี่ยนไอออนของมอนต์มอริลโลไนต์

บริเวณระหว่างชั้นของแร่มอนต์มอริลโลไนต์โดยเฉพาะอย่างยิ่งตรงที่มีทั้งประจุบวกและลบ เมื่อเกิดการสัมผัสกับสารอื่น ๆ ที่มีไอออนบวกจะส่งผลให้เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนซึ่งกันและกัน

2.3.3 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานของมอนต์มอริลโลไนต์ [58]

- ใช้ในอุตสาหกรรมขุดเจาะน้ำมัน
- ใช้ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยา
- ใช้ในเครื่องสำอาง
- ใช้ผลิตดินที่มีรูพรุนสำหรับสนามเด็กเล่น
- ใช้ในการดูดซับโลหะหนักหรือสีย้อม
- ใช้รักษาโรคติดต่อทางผิวหนัง
- ใช้เป็นส่วนผสมในอาหารสุนัขและแมว

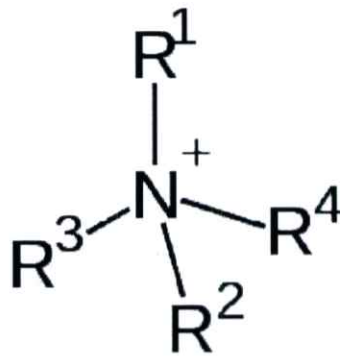
2.4 การดัดแปรแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ (Modification of Montmorillonite) [37]

มอนต์มอริลโลไนต์เป็นแร่ดินที่นิยมนำมาใช้เป็นตัวดูดซับสีย้อมที่มีประจุบวกเนื่องจากมีราคาถูก และพื้นที่ผิวจำเพาะสูง นอกจากนี้ยังสามารถดัดแปรโครงสร้างเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม โดยสามารถแบ่งออกเป็น 4 วิธีหลักดังนี้

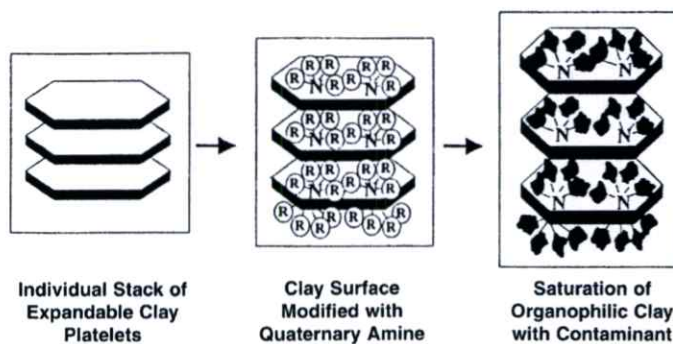
2.4.1 การดัดแปรด้วยสารลดแรงตึงผิว

สารลดแรงตึงผิวมีรูปร่างโมเลกุลเป็นสายโซ่ยาว ปลายด้านหนึ่งประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobicity) และปลายอีกด้านหนึ่งประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำ (Hydrophilicity) โดยสารลดแรงตึงผิวที่นิยมใช้ คือ QACs (Quaternary Ammonium Compounds) ซึ่งภายในโครงสร้างประกอบด้วยหมู่ NR_4^+ โดยหมู่ R คือ หมู่แอลคิล (Alkyl groups) หรือหมู่อาริล (Aryl groups) โดยมีประจุบวกภายในโมเลกุลเป็นประจุบวกถาวร (Permanently charge) ที่ไม่ขึ้นกับค่าพีเอชของสารละลายดังรูปที่ 2.17 สาร QACs ที่นิยมใช้ได้แก่ TMA

(Trimethyl Ammonium Bromide) TDMA-Br (Tetradecyltrimethyl Ammonium Bromide) HDTMA-Br (Hexadecyltrimethyl Ammonium Bromide) BDHDMA-Br (Benzyl Dimethyl Hexadecyl Ammonium Bromide) และ OTA-Br (Octadecyl Trimethyl Ammonium Bromide) เป็นต้น ซึ่งสาร QACs แตกต่างกันในความยาวสายโซ่คาร์บอน แต่มีหมู่ฟังก์ชัน NR_4^+ ที่มีประจุบวกเหมือนกัน การดัดแปรโครงสร้างมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยวิธีนี้เกิดขึ้นเนื่องจากการแลกเปลี่ยนประจุบวก (ion exchange) ระหว่างไอออนบวกของสาร QACs และไอออนบวกของโลหะที่อยู่ในช่องว่างระหว่างชั้นของแร่ดิน ส่งผลให้ช่องว่างระหว่างชั้นของแร่ดินกว้างขึ้น นอกจากนี้ยังเกิดการเปลี่ยนสมบัติจากชอบน้ำเป็นไม่ชอบน้ำหรือมีสมบัติที่ชอบสารอินทรีย์ (Organophilicity) ดังแสดงในรูปที่ 2.18 ซึ่งแร่ดินที่ถูกดัดแปรแล้วเรียกว่า Organo-clay โดยแร่ดินดัดแปรชนิดนี้เป็นแร่ดินที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมที่มีประจุลบเมื่อทำการเปรียบเทียบกับแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ แต่มีปริมาณการดูดซับสีย้อมที่มีประจุบวกลดลงกว่าแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ



รูปที่ 2.17 โครงสร้างทางเคมีของ Quaternary Ammonium Compounds [59]

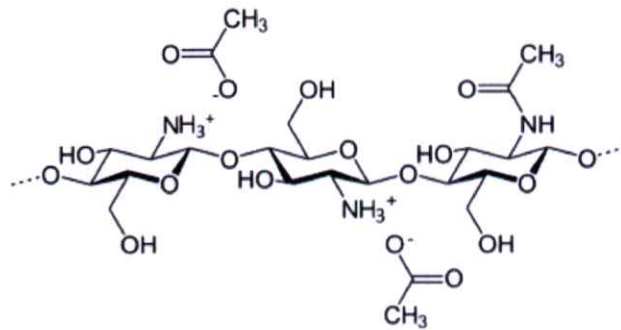


รูปที่ 2.18 แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ก่อน และหลังทำการดัดแปรด้วยสารลดแรงตึงผิวประเภท QACs [60]

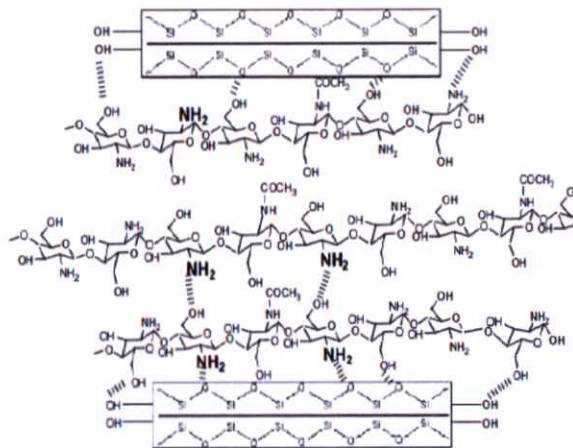
2.4.2 การดัดแปรแร่ดินด้วยไคโตซาน

โครงสร้างโมเลกุลของไคโตซานมีหมู่อะมิโน ($-\text{NH}_2$) และหมู่ไฮดรอกซิล ($-\text{OH}$) อยู่บนสายโซ่ดังรูปที่ 2.19 ซึ่งทำหน้าที่ยึดเหนี่ยวด้วยแรงทางเคมี ส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนที่มีประจุบวก เช่น ไอออนบวกของทองแดง และไอออนลบของสีย้อม เป็นต้น ส่วนประสิทธิภาพในการดูดซับขึ้นอยู่กับ การรับโปรตอนของหมู่อะมิโนกลายเป็นประจุบวกของหมู่อะมิโน (NH_3^+) โดยทั่วไปไคโตซานสามารถเป็นวัสดุดูดซับที่ดีแต่มีข้อด้อยบางประการ คือ ไคโตซานเกิดการบวมตัว

ได้มากเมื่อละลายอยู่ในน้ำ และมีความถ่วงจำเพาะต่ำจึงอาจไม่สะดวกต่อการใช้งาน ซึ่งสามารถปรับปรุงได้ด้วยการนำไปเคลือบบนพื้นผิวของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ การยึดเหนี่ยวที่แข็งแรงของไคโตซานบนพื้นผิวของแร่ดินเกิดจากพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่อะมิโน และหมู่ไฮดรอกซิลของไคโตซานกับหมู่ไฮดรอกซิลในแผ่นซิลิเกตของแร่ดิน ดังรูปที่ 2.20 การแทนที่ของหมู่อะมิโนในไคโตซานบนแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์สามารถศึกษาได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FT-IR) ซึ่งพบว่าเมื่อเกิดการแลกเปลี่ยนประจุบวกของไอออนโซเดียมกับไอออนบวกของหมู่อะมิโนที่ถูกโปรโตเนตส่งผลให้เกิดการย้ายของพีคมอนต์มอริลโลไนต์จาก 1594 cm^{-1} มาที่พีค 1520 cm^{-1} ในแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ถูกปรับปรุงด้วยไคโตซาน นอกจากนี้เมื่อทำการศึกษาด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) พบว่าช่องว่างระหว่างชั้นของแร่ดินขยายใหญ่ขึ้น ซึ่งแสดงด้วยค่า d_{001} เนื่องจากสายโซ่ของไคโตซานเกิดการแทรกตัว และค้ำยันอยู่ภายในช่องว่างระหว่างชั้นของแร่ดิน แร่ดินที่ถูกดัดแปรนี้สามารถดูดซับได้ทั้งสีย้อมที่มีประจุบวก และประจุลบ เนื่องจากไคโตซานมีทั้งประจุบวก และประจุลบอยู่ในโมเลกุล



รูปที่ 2.19 โครงสร้างโมเลกุลของไคโตซาน [61]



รูปที่ 2.20 โครงสร้างของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ถูกดัดแปรด้วยไคโตซาน [37]

2.4.3 การตัดแปรแร่ดินโดยการกระตุ้นด้วยกรด

การกระตุ้นด้วยกรด เช่น กรดไฮโดรคลอริก (HCl) จะไปเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะ และขนาดของรูพรุนเฉลี่ยของแร่ดิน โดยการตัดแปรด้วยวิธีนี้เกิดขึ้นเนื่องจากการแลกเปลี่ยนประจุบวกระหว่างไอออนอะลูมิเนียม แมกนีเซียม หรือเหล็กที่อยู่ในแผ่นอะลูมินาของแร่ดินกับโปรตอน (H^+) ของกรด ซึ่งขนาดของไอออนเหล่านี้ใหญ่กว่าโปรตอน จึงทำให้มีพื้นที่ผิวภายในโครงสร้างของแร่ดินเพิ่มมากขึ้น ทำให้ดูดซับสีย้อมที่มีประจุบวก และลบได้สูงกว่าแรมอนต์มอริลโลไนต์ที่ไม่ถูกตัดแปร แต่การตัดแปรด้วยวิธีนี้ส่งผลให้แร่ดินมอริลโลไนต์ที่ถูกตัดแปรมีความสามารถดูดซับสีย้อมที่มีประจุบวกได้สูงกว่าสีย้อมที่มีประจุลบ

2.4.4 การตัดแปรด้วยการสร้างเสาเข็มในโครงสร้าง

การตัดแปรโดยวิธีนี้เกิดจากการนำแร่ดินไปตัดแปรด้วยสารไฮดรอกซิลพอลิแคตไอออน (Metal hydroxyl-polycations) ดังรูปที่ 2.21 ซึ่งจะเกิดการแลกเปลี่ยนประจุระหว่างไอออนบวกของสารไฮดรอกซิลพอลิแคตไอออนของโลหะกับไอออนบวกของโลหะที่อยู่ในช่องว่างระหว่างชั้นของแร่ดินทำให้มีช่องว่างที่กว้างขึ้น และมีพื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มสูงขึ้น โดยการตัดแปรลักษณะนี้ทำให้ตัวดูดซับที่ได้มีประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมที่มีประจุบวก และลบสูงขึ้น

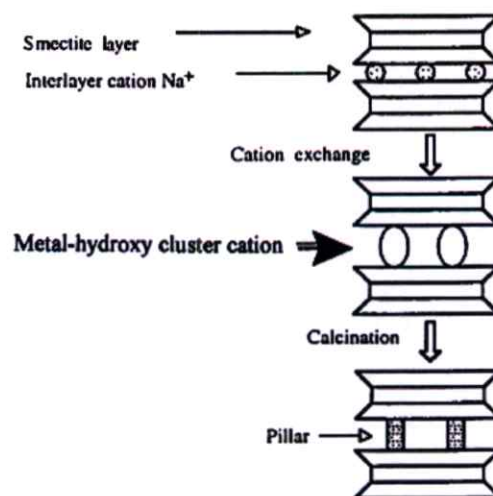


Figure 1. Schematic diagram for the preparation of pillared clay minerals (adapted from Moore and Reynolds²⁹).

รูปที่ 2.21 การสร้างเสาเข็มภายในโครงสร้างของแร่ดินมอริลโลไนต์ [62]

2.5 ไฮโดรเจล (Hydrogels) [63]

ไฮโดรเจลเป็นพอลิเมอร์ชนิดไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic) ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างร่างตาข่ายสามมิติ (Three-dimensional network) ภายในโครงสร้างประกอบด้วยโมเลกุลที่ชอบน้ำ เช่น หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) หมู่คาร์บอนิล (-COOH) หมู่ซัลโฟนิก (-SO₃H) หมู่เอไมด์ (-CONH₂) เป็นต้น จึงทำให้ไฮโดรเจลสามารถดูดซับน้ำได้ในปริมาณมาก ไฮโดรเจลอาจดูดซับน้ำได้น้อยกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักรวม แต่ถ้าดูดซับน้ำได้มากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักรวมจะเรียกไฮโดรเจลชนิดนี้ว่า วัสดุดูดซับยิ่งยวด (Superabsorbent) โดยไฮโดรเจลมีสมบัติพิเศษคือ เมื่ออยู่ในน้ำที่มีปริมาณมาก จะเกิดการพองตัวเนื่องจากดูดซับน้ำเข้าไปในโครงสร้างตาข่าย แต่ถ้ามีการระเหยน้ำออกจนได้

ไฮโดรเจลที่มีลักษณะแห้งจะเรียกว่า ซีโรเจล (Xerogel) หรือเจลแห้ง (Dry gel) ซึ่งในกระบวนการระเหยน้ำออกนี้หากไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างใด ๆ ของเจลจะได้เจลแห้งที่มีรูพรุนเรียกว่า แอร์โรเจล (Aerogel) หรือฟองน้ำ (Sponge) ซึ่งปริมาณการดูดซับของไฮโดรเจลจะขึ้นอยู่กับปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ เช่น ค่าพีเอช (pH) อุณหภูมิ ค่าความแรงไอออน (Ionic strength) สนามไฟฟ้าของตัวทำละลาย (Electric field solvent) ความดัน และชนิดของเกลือ เป็นต้น

2.5.1 ประเภทของไฮโดรเจล

การจำแนกประเภทของไฮโดรเจลมีได้หลากหลายรูปแบบ ดังนี้ [64]

2.5.1.1 จำแนกตามแหล่งที่มา ดังนี้

- ไฮโดรเจลธรรมชาติ (Natural hydrogel)
- ไฮโดรเจลสังเคราะห์ (Synthetic hydrogel)

2.5.1.2 จำแนกตามองค์ประกอบของพอลิเมอร์ ดังนี้

- โฮโมพอลิเมอร์ ไฮโดรเจล (Homopolymeric hydrogel) คือ ไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้จากมอนอเมอร์เพียงชนิดเดียวเป็นหน่วยโครงสร้างพื้นฐานของโครงสร้างตาข่าย ซึ่งลักษณะโครงสร้างร่างแหขึ้นอยู่กับธรรมชาติของมอนอเมอร์ และวิธีการพอลิเมอร์ไรเซชัน

- โคพอลิเมอร์ ไฮโดรเจล (Copolymeric hydrogel) คือ ไฮโดรเจลโครงสร้างตาข่ายที่สังเคราะห์ได้จากมอนอเมอร์ 2 ชนิดหรือมากกว่า โดยมอนอเมอร์อาจจัดเรียงโครงสร้างแบบสุ่ม (Random) บล็อก (Block) และสลับ (Alternating) เป็นต้น

- มัลติพอลิเมอร์ (Multipolymer) หรือ ไฮโดรเจลโครงร่างตาข่ายพอลิเมอร์ชนิดแทรกสอด (Interpenetrating network hydrogel, IPN Hydrogel) เป็นไฮโดรเจลที่มีโครงร่างตาข่าย 2 ชนิดแทรกกันอยู่ ไม่สามารถแยกออกจากกันได้ส่งผลให้โครงสร้างโดยรวมมีความแข็งแรงมากขึ้น ส่วนไฮโดรเจลโครงร่างตาข่ายพอลิเมอร์ชนิดกึ่งแทรกสอด (Semi-Interpenetrating network hydrogel, Semi-IPN Hydrogel) เป็นไฮโดรเจลที่เกิดจากการแทรกกันอยู่ระหว่างองค์ประกอบหนึ่งที่มีโครงร่างตาข่าย ส่วนอีกองค์ประกอบหนึ่งไม่มีโครงร่างตาข่าย

2.5.1.3 จำแนกตามโครงสร้างทางเคมี

- อสัณฐาน (Amorphous) คือ ไฮโดรเจลที่ไม่มีส่วนที่เป็นผลึก
- กึ่งผลึก (Semicrystalline) คือ ไฮโดรเจลที่มีทั้งส่วนที่เป็นผลึก และไม่เป็นผลึก
- ผลึก (Crystalline) คือ ไฮโดรเจลที่มีแต่ส่วนที่เป็นผลึก

2.5.1.4 จำแนกตามการเชื่อมโยงโมเลกุล

- เชื่อมโยงทางเคมี (Chemical cross-linking) เป็นไฮโดรเจลที่มีการเชื่อมโยงที่แข็งแรง เกิดพันธะโควาเลนต์ระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ โดยไฮโดรเจลไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับทางความร้อน กล่าวคือ ไม่สามารถหลอมได้อีก หากให้ความร้อนจนถึงจุดที่พันธะแตกออกแล้วเกิดการสลายตัว สมบัติจะเปลี่ยนไปจากเดิม อาจเรียกว่า ไฮโดรเจลชนิดเทอร์โมเซต

- เชื่อมโยงทางกายภาพ (Physical cross-linking) เป็นไฮโดรเจลที่มีการเชื่อมโยงแบบสายโซ่พอลิเมอร์เกี่ยวพันกันหรือเกิดอันตรกิริยาทางกายภาพ เช่น อันตรกิริยาไอออนิก พันธะไฮโดรเจน แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ไม่ชอบน้ำ และแรงแวนเดอร์วาลส์ เป็นต้น ซึ่งมีความแข็งแรงน้อยกว่าพันธะโควาเลนต์ ไฮโดรเจลชนิดนี้จะสามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับทาง

ความร้อนได้ กล่าวคือ สามารถเกิดการหลอมได้เมื่อให้ความร้อน และแข็งตัวเมื่อเย็นตัวลง โดยไม่ส่งผลต่อสมบัติทางเคมี และทางกายภาพของไฮโดรเจล อาจเรียกว่า ไฮโดรเจลชนิดเทอร์โมพลาสติก

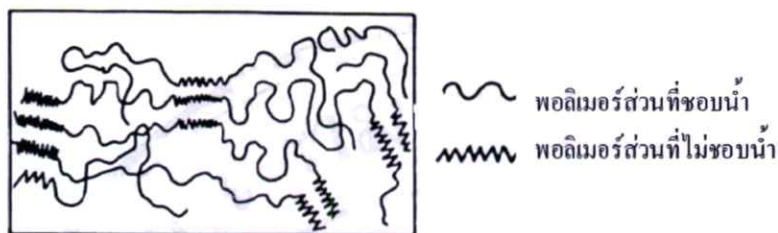
2.5.1.5 จำแนกตามลักษณะการเกิดประจุในโครงสร้าง

จำแนกประเภทตามประจุไฟฟ้าของไฮโดรเจลออกเป็น 4 กลุ่ม

- แบบไม่มีประจุทางไฟฟ้า (Nonionic) คือ ไฮโดรเจลที่เป็นกลางทางไฟฟ้า
- แบบมีประจุทางไฟฟ้า (Ionic) คือ ไฮโดรเจลที่มีประจุไฟฟ้าเป็นลบ (Anionic) หรือบวก (Cationic)
- แอมโฟเทอริก อิเล็กโทรไลต์ (Amphoteric electrolyte) คือ ไฮโดรเจลที่ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันที่เป็นกรด และเบสอยู่ในโครงสร้างเดียวกัน
- สวิทเทอร์ไอออนิก (Zwitterionic) คือ ไฮโดรเจลที่มีทั้งประจุลบ และบวก อยู่ในโมเลกุลที่เป็นหน่วยย่อยซ้ำ ๆ เดียวกัน

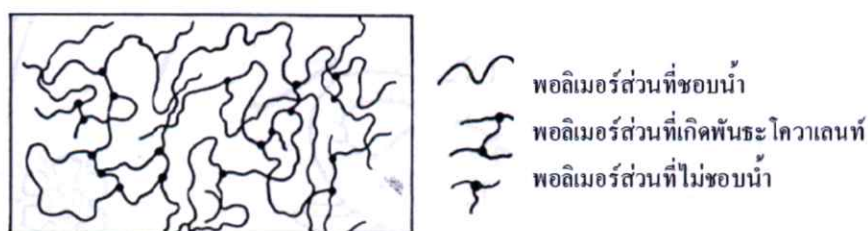
2.5.1.6 จำแนกตามลักษณะการสังเคราะห์ [65]

- ไฮโดรเจลแบบเชื่อมโยงทางกายภาพ (Physical crosslink)
โครงสร้างภายในประกอบด้วยส่วนที่ไม่ชอบน้ำ และชอบน้ำ ซึ่งส่วนที่ไม่ชอบน้ำจะเป็นส่วนป้องกันพอลิเมอร์ไม่ให้ละลายในตัวทำละลายต่าง ๆ ส่วนมากมีการนำไฮโดรเจลชนิดนี้ไปใช้เพื่อเคลือบผิวของวัสดุต่าง ๆ โดยไฮโดรเจลแบบเชื่อมโยงทางกายภาพมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 ไฮโดรเจลแบบเชื่อมโยงทางกายภาพ [66]

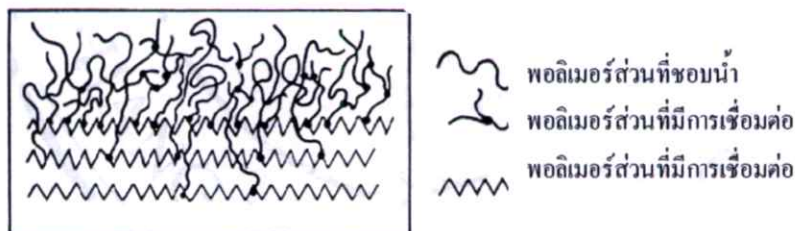
- ไฮโดรเจลแบบโครงร่างตาข่าย (Crosslinked network)
เกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันระหว่างสารละลายผสมของมอนอเมอร์ตัวริเริ่มปฏิกิริยา และสารเชื่อมโยงสายโซ่ หรือในบางกรณีอาจเติมตัวทำละลายลงไปด้วย โดยไฮโดรเจลแบบโครงร่างตาข่ายมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 ไฮโดรเจลแบบโครงร่างตาข่าย [66]

- ไฮโดรเจลแบบกราฟท์บนพื้นผิว (Surface grafted polymer)

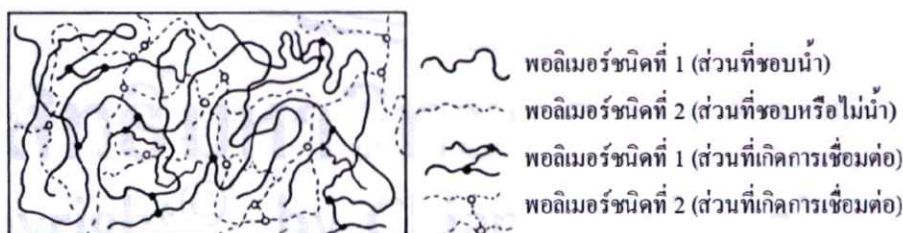
ไฮโดรเจลแบบกราฟท์บนพื้นผิวเกิดจากการพอลิเมอไรเซชันของพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำบนพอลิเมอร์อื่นที่ไม่ชอบน้ำ ทำให้สามารถปรับปรุงสมบัติของไฮโดรเจลได้ตามต้องการ จึงได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในเรื่องของการปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้ดีขึ้น หรือทำให้ไฮโดรเจลที่ละลายน้ำได้กลายเป็นไฮโดรเจลที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ โดยไฮโดรเจลแบบกราฟท์บนพื้นผิวมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 ไฮโดรเจลแบบกราฟท์บนพื้นผิว [66]

- ไฮโดรเจลแบบอินเตอร์เพเนตเรตติงพอลิเมอร์เน็ตเวิร์ก (Interpenetrating polymer network, IPN)

ไฮโดรเจลชนิดนี้เกิดจากโครงสร้างตาข่าย 2 ชนิดแทรกกันอยู่ ซึ่งไม่สามารถแยกออกจากกันได้ จึงมีความแข็งแรง และมีสมบัติต่าง ๆ ในการใช้งานที่ดีขึ้น นอกจากนี้ยังมีชนิดกึ่งอินเตอร์เพเนตเรตติงพอลิเมอร์เน็ตเวิร์ก (Semi-Interpenetrating polymer network, Semi-IPN) เป็นไฮโดรเจลที่เกิดจากการแทรกกันอยู่ระหว่างองค์ประกอบหนึ่งที่มีโครงสร้างตาข่าย ส่วนอีกองค์ประกอบหนึ่งไม่มีโครงสร้างตาข่าย โดยไฮโดรเจลแบบอินเตอร์เพเนตเรตติงพอลิเมอร์เน็ตเวิร์กมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 ไฮโดรเจลแบบอินเตอร์เพเนตเรตติงพอลิเมอร์เน็ตเวิร์ก [66]

2.5.1.7 จำแนกตามขนาดรูพรุน [65]

- ไฮโดรเจลที่มีรูพรุนขนาดเล็ก (Microporous hydrogel)

ไฮโดรเจลที่มีรูพรุนขนาดเล็กเป็นไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ในตัวทำละลายที่ดีซึ่งมอนอเมอร์ สารเชื่อมโยง และพอลิเมอร์สามารถละลายในตัวทำละลายได้ อาจเรียกไฮโดรเจลชนิดนี้ว่า ไฮโดรเจลแบบเนื้อเดียว (Homogeneous hydrogel)

- ไฮโดรเจลที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ (Macroporous hydrogel)

ไฮโดรเจลที่มีรูพรุนขนาดใหญ่เป็นไฮโดรเจลที่พอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นไม่สามารถละลายได้ในตัวทำละลายในขณะที่ทำการสังเคราะห์ โดยจะตกตะกอนแยกออกมา อาจเรียกไฮโดรเจลชนิดนี้ว่า ไฮโดรเจลแบบเนื้อผสม (Heterogeneous hydrogel)

2.5.2 วิธีการเตรียมไฮโดรเจล [65]

2.5.2.1 การเชื่อมโยงทางเคมี

การเชื่อมโยงทางเคมีเกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันโดยมอนอเมอร์ชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกัน และมีสารเชื่อมโยงเป็นเสมือนสะพานเชื่อมระหว่างสายโซ่โมเลกุลแต่ละสายให้เชื่อมโยงติดกันที่ตำแหน่งต่าง ๆ ได้เป็นพอลิเมอร์เชิงซ้อนโครงร่างตาข่าย และมีรูพรุนเกิดขึ้น

2.5.2.2 การเชื่อมโยงด้วยรังสี

ไฮโดรเจลที่ได้จากการใช้รังสีกระตุ้นโมเลกุลจะเกิดการแตกตัวเป็นไอออน และเหนี่ยวนำให้เกิดการเชื่อมโยงผ่านกลไกอนุมูลอิสระ ตัวอย่างรังสีที่ใช้ผลิตไฮโดรเจล เช่น รังสีแกมมา รังสีเอ็กซ์ และรังสีอัลตราไวโอเล็ต เป็นต้น

2.5.2.3 การผลิตไฮโดรเจลแบบโครงร่างตาข่ายแบบสอดไขว้

ไฮโดรเจลแบบโครงร่างตาข่ายแบบสอดไขว้เกิดจากการผสมพอลิเมอร์มากกว่า 2 ชนิดทำปฏิกิริยากันภายใต้การให้ความร้อนจากระบบภายนอกจนเกิดการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุลของมอนอเมอร์ชนิดหนึ่งแทรกผ่านสายโซ่โมเลกุลของมอนอเมอร์อีกชนิดหนึ่ง ซึ่งความร้อนที่ใช้ควรมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temp, T_g) แต่ต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลว (Melting temperature, T_m)

2.5.3 สมบัติของไฮโดรเจล [65]

ไฮโดรเจลเป็นพอลิเมอร์ที่มีลักษณะโครงสร้างแบบโครงร่างตาข่ายสามมิติ (Three-dimensional network) โดยสายโซ่โมเลกุลเชื่อมต่อกันด้วยพันธะโควาเลนต์ พันธะไฮโดรเจน หรือเกิดอันตรกิริยากันระหว่างหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ในสายโซ่ ประกอบเป็นสายโซ่ยาวเกี่ยวพันกัน จึงทำให้ไฮโดรเจลมีความยืดหยุ่นสูง และเกิดช่องว่างภายในโครงสร้าง ส่งผลให้มีรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก ซึ่งสมบัติของไฮโดรเจลขึ้นอยู่กับวัสดุพอลิเมอร์ที่นำมาผลิตไฮโดรเจล

2.5.3.1 สมบัติทางเคมี

สายโซ่หลักโมเลกุลของพอลิเมอร์แต่ละชนิดประกอบด้วยธาตุคาร์บอน ออกซิเจน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และอาจมีฟลูออรีนหรือคลอรีน เป็นต้น เชื่อมต่อกันด้วยพันธะเคมี เช่น พันธะโควาเลนต์ระหว่างคาร์บอนกับคาร์บอน หรือคาร์บอนและไฮโดรเจน เป็นต้น ส่งผลให้พอลิเมอร์มีสมบัติเป็นกลางทางไฟฟ้า ส่วนอะตอมอื่น ๆ เช่น ออกซิเจน จะส่งผลให้พอลิเมอร์แสดงสมบัติความเป็นขั้วทางไฟฟ้า และอาจมีคู่อิเล็กตรอนที่สามารถจับกับอิเล็กตรอนข้างเคียงได้

ความสามารถในการบวมตัวของไฮโดรเจลเกิดเมื่อพอลิเมอร์ละลายในตัวทำละลาย ทำให้สายโซ่โมเลกุลคลายตัว เนื่องจากอะตอมของออกซิเจนเกิดอันตรกิริยากับอะตอมของตัวทำละลายที่มีขั้ว จากนั้นเกิดการดูดซับน้ำ เนื่องจากอะตอมหรือหมู่ที่มีขั้วของโมเลกุลพอลิเมอร์ไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำแต่เกิดการจับกับโมเลกุลของน้ำ ส่งผลให้ไฮโดรเจลเกิดการบวมตัว และสายโซ่โมเลกุลขยายตัวขึ้น

2.5.3.2 สมบัติทางกายภาพ

สายโซ่โมเลกุลของไฮโดรเจลมีการจัดเรียงโครงสร้างแบบไม่เป็นระเบียบเรียกว่า ออสัณฐาน ในขณะที่ส่วนที่เป็นระเบียบเรียกว่า ผลึก ซึ่งยึดเหนี่ยวกันด้วยแรงลอนดอน ไดโพล พันธะไอออน-

นิก และพันธะไฮโดรเจน โดยโมเลกุลอาจจัดเรียงโครงสร้างแบบ อะแทคติก (Atactic) ไอโซแทคติก (Isotactic) และซินไดโอแทคติก (Syndiotactic) เป็นต้น ซึ่งขึ้นอยู่กับกระบวนการเตรียม และกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน

2.5.4 การบวมตัว และปัจจัยที่มีผลต่อการบวมตัวของไฮโดรเจล [65]

ไฮโดรเจลเป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างร่างแห ซึ่งประกอบด้วยส่วนที่ชอบน้ำ และไม่ชอบน้ำ โดยยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะโควาเลนต์ ทำให้ไฮโดรเจลไม่สามารถละลายน้ำได้ รวมถึงยังไม่สามารถแยกขาดออกจากกันได้เมื่อเกิดการขยายตัว ส่งผลให้เกิดการบวมตัวขึ้น ซึ่งประสิทธิภาพการบวมตัวขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้

- แร่งตันออสโมติก
ถ้าปริมาณน้ำภายใน และภายนอกของไฮโดรเจลไม่เท่ากัน จะส่งผลให้เกิดความแตกต่างของแรงดันออสโมติก ทำให้น้ำจากภายนอกแพร่เข้าสู่ช่องว่างหรือรูพรุนของไฮโดรเจลได้มากขึ้น
- แร่งกระหำระหว่างโมเลกุลน้ำกับไฮโดรเจล
ไฮโดรเจลมีโครงสร้างทางเคมีที่สามารถเกิดอันตรกิริยากับโมเลกุลของน้ำได้มาก ส่งผลให้เกิดการบวมตัวขึ้น เช่น พันธะไฮโดรเจนหรือแรงดึงดูดระหว่างขั้ว ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำโมเลกุลของน้ำแพร่เข้าสู่ไฮโดรเจลได้
- ช่องว่างระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์
โครงสร้างของไฮโดรเจลมีรูพรุนหรือช่องว่างจำนวนมาก ส่งผลให้เกิดการแพร่ของน้ำเข้ามาในโครงสร้างได้
- ความยืดหยุ่นของสายโซ่พอลิเมอร์
ถ้าสายโซ่พอลิเมอร์มีความยืดหยุ่น จะส่งผลให้เกิดการลดแรงต้านการแพร่ของโมเลกุลน้ำ น้ำจึงแพร่เข้าสู่ไฮโดรเจลได้
- ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์
ถ้าความหนาแน่นของการเชื่อมโยงมาก จะส่งผลให้เกิดแรงต้านต่อการขยายตัวของไฮโดรเจลมากขึ้น ส่งผลให้การบวมตัวลดลง

2.5.5 การวิเคราะห์สมบัติของไฮโดรเจล [67]

- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)
เทคนิคนี้ทำให้เห็นโครงสร้างจุลภาคหรือสัณฐานวิทยาของไฮโดรเจล ซึ่งให้ข้อมูลทางกายภาพ ได้แก่ ลักษณะพื้นผิว (Surface) โครงร่างตาข่าย (Network) และรูพรุนของไฮโดรเจล เป็นต้น
- ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier transform spectrometer, FT-IR)
เทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่ใช้ระบุองค์ประกอบหรือโมเลกุลของสารภายในโครงสร้างไฮโดรเจล ซึ่งได้จากการวัดอันตรกิริยาระหว่างการสั่นของโมเลกุลกับการหมุนของอะตอมในโมเลกุล และคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ทำให้ไดโพลโมเมนต์สุทธิของโมเลกุลเปลี่ยนแปลงไป

- เทคนิคการวัดความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างสารตัวอย่าง และสารอ้างอิง (Differential scanning calorimetry, DSC)
เทคนิคนี้ใช้วัดความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างสารตัวอย่างและสารอ้างอิงหรือการถ่ายเทความร้อน (Heat flow) ที่เปลี่ยนแปลงของสารตัวอย่างเมื่อสารตัวอย่างดูดความร้อน (Endotherm) หรือคายความร้อน (Exotherm) ภายใต้การให้ความร้อนเข้าสู่ระบบ เพื่อใช้ในการหาอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) และอุณหภูมิหลอมเหลว (Melting temperature, T_m) ของไฮโดรเจล
- การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยสมบัติทางความร้อน (Thermo gravimetric analysis, TGA)
เทคนิคนี้ใช้ศึกษาความเสถียรทางความร้อนของไฮโดรเจล โดยวัดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักหรือมวลของสารตัวอย่างเมื่อให้ความร้อน ภายใต้บรรยากาศของก๊าซเฉื่อย จากนั้นสร้างกราฟมวลหรือเปอร์เซ็นต์มวลที่หายไปของสารตัวอย่าง เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิหรือเวลา จะได้เทอร์โมแกรม (Thermogram)
- การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometry, XRD)
เทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่ใช้ศึกษาลักษณะโครงสร้างขนาดเล็ก (Microstructure) ความเป็นผลึกหรืออสัณฐานของไฮโดรเจล โดยดูจากลักษณะพีคของ XRD ถ้าพีคแหลมสูงแสดงว่ามีลักษณะโครงสร้างเป็นผลึก และมีความเป็นระเบียบสูง แต่ถ้าพีคกว้างแสดงว่ามีลักษณะโครงสร้างเป็นอสัณฐาน
- จุดปริมาณน้ำสมดุล (Equilibrium water content, EWC)
จุดปริมาณน้ำสมดุลเป็นจุดที่ไฮโดรเจลสามารถดูดซับน้ำได้มากที่สุด หาได้จากการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับน้ำ (Water content, %WC) กับเวลา (นาท) ซึ่งจะเห็นแนวโน้มของกราฟเริ่มคงที่ แสดงถึงการเกิดจุดปริมาณน้ำสมดุล หลังจากนั้นกราฟจะคงที่ ดังนั้นจุดแรกที่กราฟเริ่มคงที่คือ จุดปริมาณน้ำสมดุล โดยสามารถคำนวณความสามารถในการดูดซับน้ำ (%WC) ได้จากสมการดังนี้

$$\%WC = \frac{\text{wt. of swollen gel} - \text{wt. of dry gel}}{\text{wt. of swollen gel}} \times 100 \quad (2.13)$$

เมื่อ %WC คือ ความสามารถในการดูดซับของไฮโดรเจล
wt. of dry gel คือ น้ำหนักไฮโดรเจลเริ่มต้นก่อนดูดซับน้ำ (กรัม)
wt. of swollen gel น้ำหนักไฮโดรเจลหลังจากดูดซับน้ำ (กรัม)

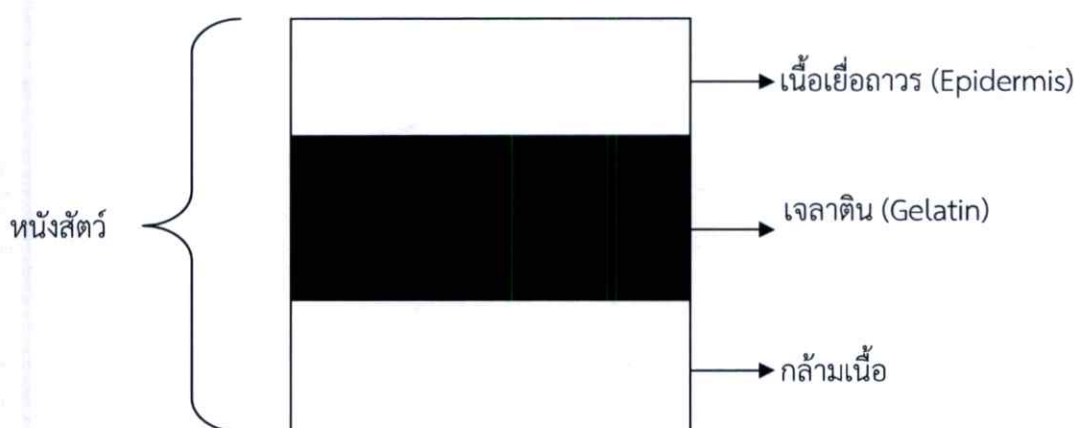
2.5.6 การประยุกต์ใช้งานไฮโดรเจล [67]

ไฮโดรเจลสามารถนำมาใช้งานได้หลายด้าน เช่น ด้านเกษตรกรรม ระบบนำส่งยา ระบบการนำส่งโปรตีน วัสดุตกแต่งแผล เครื่องสำอาง วิศวกรรมเนื้อเยื่อ ชีวการแพทย์ และใช้เป็นตัวดูดซับในการดูดซับโลหะหนัก เป็นต้น เนื่องจากมีโครงสร้างเป็นโครงร่างตาข่าย และมีรูพรุนมากมาย ทำให้สามารถดูดซับน้ำได้โดยปราศจากการละลาย และคงรูปอยู่ได้

2.6 เจลาติน (Gelatin)

เจลาตินเป็นสารประกอบประเภทโปรตีนที่ได้จากการสกัดคอลลาเจน (Collagen) ซึ่งพบได้ในเอ็น และพังผืดของสัตว์ ดังรูปที่ 2.26 มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 10,000-100,000 ซึ่งน้อยกว่าคอลลาเจนประมาณ 3 เท่า เนื่องจากคอลลาเจนมีโครงสร้างเป็นโปรตีน 3 โมเลกุลเกี่ยวพันกันเป็นเกลียว เมื่อให้ความร้อนแก่คอลลาเจนจะส่งผลให้โครงสร้างเกลียวหลุดออกกลายเป็นสายโซ่โมเลกุลเดี่ยว ได้เป็นเจลาติน

ถ้าสายโซ่โมเลกุลถูกไฮโดรไลซ์มากเกินไป สายโซ่โมเลกุลจะถูกตัดสั้นลง และไม่เกิดเป็นเจลาตินแบบนี้จะถูกนำไปใช้งานในรูปของกาว (Animal glue) [68]



รูปที่ 2.26 องค์ประกอบของหนังสัตว์ [68]

2.6.1 สมบัติทางกายภาพ และเคมีของเจลาติน [68-69]

ลักษณะภายนอกเป็นผงหรือเกล็ด แต่ส่วนมากจำหน่ายในรูปของผง ไม่มีกลิ่นและรส มีความชื้นประมาณ 9-12 เปอร์เซ็นต์ ความหนาแน่นอยู่ในช่วง 1.3-1.4 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ไม่สามารถละลายในเอทานอลบริสุทธิ์ อะซิโตน คาร์บอนเตตระคลอไรด์ อีเทอร์ เป็นต้น แต่สามารถละลายได้ในน้ำหรือสารละลายที่มีขั้วสูงกว่าน้ำ ได้แก่ กรดอะซิติก สารละลายแอลกอฮอล์ที่มีหมู่ไฮดรอกซิลหลายหมู่ในน้ำ เช่น สารละลายกลีเซอรอลในน้ำ เป็นต้น สามารถบวมตัว และอูมน้ำได้ ความหนืดของเจลาตินจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้น และอุณหภูมิ โดยมีอุณหภูมิสลายตัว (Decomposition temperature) อยู่ที่ 100 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิการเผาไหม้สมบูรณ์ (Complete combustion temperature) อยู่ที่ 500 องศาเซลเซียส เสถียรภาพของเจลาตินขึ้นอยู่กับค่าพีเอช (pH) อุณหภูมิ และการนำไฟฟ้าของระบบ (Electrolyte) [68]

เจลาตินสามารถละลายได้บางส่วนในน้ำเย็น โดยการละลายเจลาตินต้องทำที่อุณหภูมิไม่เกิน 60 องศาเซลเซียส หากอุณหภูมิสูงกว่านี้อาจทำให้โครงสร้างเจลาตินถูกทำลาย และส่งผลต่อคุณภาพของเจล ซึ่งช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการละลายเจลาตินคือ 50-55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที ที่ความเข้มข้นร้อยละ 6.67 [69]

กลไกการเกิดเจลของเจลาตินคือ เมื่อให้ความร้อนแก่สารละลายเจลาติน สารละลายเจลาตินจะเปลี่ยนไปเป็นสารละลายคอลลอยด์ (Colloidal solution) หรือโซล (Sol) ซึ่งสายโซ่โมเลกุลของเจลาตินจะยึดออกอยู่ในรูปของเกลียวที่ไม่มีระเบียบ (Random coil) จากนั้นเมื่อลดอุณหภูมิลง สาย

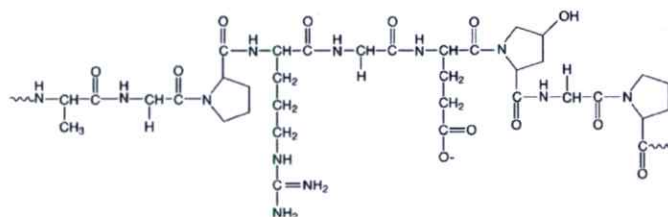
โซโมเลกุลจะเริ่มขดตัว (Fold) อย่างช้า ๆ โดยเมื่อลดอุณหภูมิลงจนถึงจุดก่อเจลจะเกิดอันตรกิริยาระหว่างสายโซ่ของโมเลกุลมากขึ้น และรวมตัวกันจนเป็นโครงสร้างร่างแหที่แข็งแรงซึ่งเชื่อมกันด้วยพันธะไฮโดรเจน ไอออนิก หรือไฮโดรโฟบิก จนเกิดเป็นโครงร่างตาข่ายสามมิติ หากมีการให้ความร้อนอีกครั้งหนึ่งจะสามารถหลอมเหลวกลายเป็นสารละลายหรือโซล ซึ่งการเปลี่ยนเฟสระหว่างโซลและเจลเรียกว่า Sol-gel transition โดยอุณหภูมิในการเกิดเจลของเจลาตินขึ้นอยู่กับระยะเวลา และความเข้มข้นที่ใช้ ทั้งนี้การเกิดเจลเร็วหรือช้าจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของเจลาตินที่ใช้ [69]

อุณหภูมิในการหลอมเหลวของเจล เป็นอุณหภูมิที่ทำให้เจลกลายเป็นสารละลายอีกครั้ง ซึ่งเจลาตินจากสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมจะมีอุณหภูมิหลอมเหลวที่สูงกว่าเจลาตินจากปลา เนื่องจากมีปริมาณกรดอะมิโนชนิดโพรลีน และไฮดรอกซีโพรลีนที่สูงกว่า ทำให้เจลาตินจากปลามีข้อจำกัดในการใช้งาน [69]

ความแข็งของเจล (Bloom strength) เกิดจากการเชื่อมโยงระหว่างพันธะเปปไทด์ ซึ่งประกอบกันเป็นสายโซ่พอลิเปปไทด์จากนั้นมีการบิดเป็นเกลียววนซ้าย (Left-handed-helix) โดยมีพันธะไฮโดรเจนเชื่อมโยงระหว่างกรดอะมิโน ซึ่งทำให้คงตัว และเกิดความแข็งของเจลขึ้น หากโครงสร้างเกลียวเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นด้วย โดยทั่วไปค่ามาตรฐานความแข็งของเจลทางการค้ามีค่าอยู่ในช่วง 250-260 กรัม (ของตุ้มน้ำหนัก) ซึ่งพบว่าเจลาตินจากสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมที่ความเข้มข้นร้อยละ 6.67 มีค่าความแข็งของเจลเท่ากับ 230-290 กรัม (ของตุ้มน้ำหนัก) ส่วนเจลาตินจากปลาที่ความเข้มข้นร้อยละ 6.67 มีค่าความแข็งของเจลเท่ากับ 90-243 กรัม (ของตุ้มน้ำหนัก) [69]

2.6.2 องค์ประกอบทางเคมีของเจลาติน [68-69]

เจลาตินเป็นสารก่อเจลประเภทโปรตีนซึ่งมีโครงสร้างเป็นพอลิเปปไทด์ (Mixture of complex polypeptide) ประกอบด้วยกรดอะมิโนชนิดต่าง ๆ มาต่อกันเป็นสายโซ่ยาว ได้แก่ อะลานีน อาร์จินีน กรดแอสปาทิก ซีสเตอีน กรดกลูตามิก โกลซีน ฮีสติดีน ไฮดรอกซีลีน ไฮดรอกซีโพรลีน ลิวซีน ไลซีน เมไทโอนีน ฟีนิลอะลานีน โพรลีน ซีรีน ทรีโอนีน ทริโตนแฟน ไทโรซีน และวาเลีน ดังรูปที่ 2.27 โดยพบโกลซีนมากที่สุด ประมาณร้อยละ 33 ของกรดอะมิโนทั้งหมด พบโพรลีนร้อยละ 12 และไฮดรอกซีโพรลีนร้อยละ 11 โครงสร้างทั่วไปของเจลาตินมักเป็นไปในทำนองเดียวกันคือ ประกอบด้วยกรดอะมิโนโพรลีน ไฮดรอกซีโพรลีน และโกลซีน ซึ่งในโมเลกุลประกอบด้วยหน่วยย่อย glycine-X-Y triplets ที่ซ้ำ ๆ กันโดย X และ Y มักเป็นกรดอะมิโนโพรลีน และไฮดรอกซีโพรลีน ตามลำดับ โดยจะมีพันธะเปปไทด์เชื่อมระหว่างกรดอะมิโนแต่ละชนิดเพื่อประกอบกันเป็นสายโซ่พอลิเปปไทด์ จากนั้นสายโซ่พอลิเปปไทด์จะบิดเป็นเกลียวโดยมีพันธะไฮโดรเจนเชื่อมอยู่ระหว่างกรดอะมิโนทำให้เกิดเป็นโครงสร้างเกลียว (α -chain) ซึ่งโพรลีน และไฮดรอกซีโพรลีนเป็นกรดอะมิโนสำคัญที่ส่งผลต่อความแข็งของเจล โดยโพรลีนทำให้โครงสร้างเกลียวเสถียร ส่วนไฮดรอกซีโพรลีนทำให้โมเลกุลคอลลาเจนเสถียร



รูปที่ 2.27 องค์ประกอบทางเคมีของเจลาติน [73]

2.6.3 แหล่งที่มาของเจลาติน [71]

- เนื้อหรือมันติดกระดูก พบเจลาตินอยู่ 14-18 เปอร์เซ็นต์
- เนื้อสุกร พบเจลาตินอยู่ 18-22 เปอร์เซ็นต์

2.6.4 กรรมวิธีการผลิตเจลาติน [72, 74-75]

การผลิตเจลาตินโดยทั่วไปมี 2 แบบ

1. แบบใช้กรด (Acid treatment) มีจุดไอโซอิเล็กทริกระหว่าง 7.0-9.0
วิธีนี้ใช้กับหนัง และกระดูกสุกร โดยเจลาตินที่ได้เรียกว่า เจลาตินชนิดเอ (Gelatin type-A)

type-A)

2. แบบใช้ด่าง (Alkaline treatment) มีจุดไอโซอิเล็กทริกระหว่าง 4.0-5.0
วิธีนี้ใช้กับหนัง และกระดูกของโคและกระบือ โดยเจลาตินที่ได้เรียกว่าเจลาติน

ชนิดบี (Gelatin type-B)

อย่างไรก็ตามทั้งสองวิธีนี้ต่างก็มีกรรมวิธีในการผลิตที่เหมือนกัน คือ เริ่มจากการนำกระดูกสัตว์มาล้างทำความสะอาด จากนั้นปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง แล้วนำไปแยกแคลเซียมออกให้เหลือแต่โปรตีนอย่างเดียว นำเข้าถังสกัดได้ออกมาเป็นน้ำโปรตีนหรือน้ำเจลาตินใส ๆ แล้วนำมาผ่านการกรองให้เหลือแต่โปรตีนบริสุทธิ์ 100 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นฉีดออกมาเป็นเส้น ๆ เข้าตู้อบแล้วอบให้ได้ขนาดตามที่ต้องการ

ตารางที่ 2.4 การเปรียบเทียบสมบัติของเจลาตินชนิดเอ และชนิดบี [72, 75]

สมบัติของเจลาติน	ชนิดเอ	ชนิดบี
วัตถุดิบ	หนังและกระดูกสุกร	หนังและกระดูกโคและกระบือ
สารละลายที่ใช้เตรียม	กรด	เบส
ความแข็งของเจล (กรัมของตุ้มน้ำหนัก)	50-300	50-200
ความหนืด (เซนติพอยส์)	2.0-7.5	2.0-7.5
ถั่ว (ร้อยละ)	0.3-2.0	0.05-2.0
ความเป็นกรด-เบส	3.8-6.0	5.0-7.4
ไอโซอิเล็กทริกพอยต์ (Isoelectric point)	7.0-9.0	4.0-5.0

2.6.5 การนำเจลาตินไปใช้ประโยชน์ [68-69]

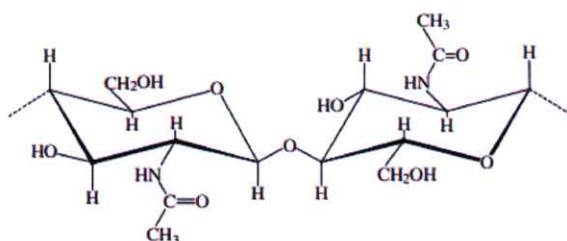
เจลาตินสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย ได้แก่

- อุตสาหกรรมด้านอาหาร เช่น ไอศกรีม โยเกิร์ต วุ้น ครีม เพื่อเพิ่มความข้นหนืด และคงตัวของผลิตภัณฑ์
- อุตสาหกรรมการผลิตยา เช่น การใช้เจลาตินเคลือบเม็ดยา และผลิตในรูปแบบของแคปซูล การทำสำลีจากเจลาติน
- อุตสาหกรรมการถ่ายภาพ เช่น ใช้เจลาตินในการเคลือบฟิล์ม

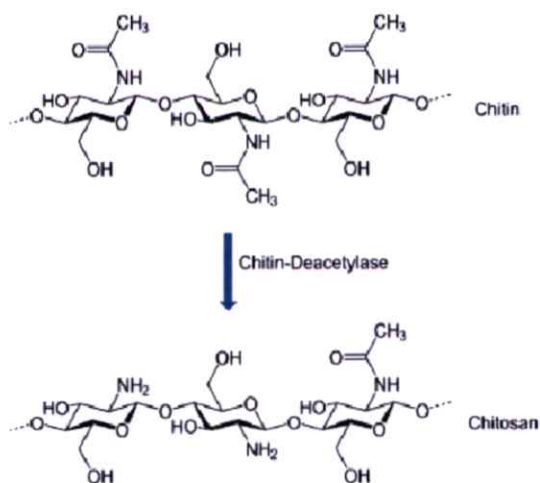
- อุตสาหกรรมกาว
- อาหารเลี้ยงเชื้อ
- อุตสาหกรรมกระดาษ
- งานเคลือบ

2.7 ไคติน และไคโตซาน (Chitin and chitosan)

ไคตินเป็นพอลิเมอร์ประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ที่มีไนโตรเจนในโครงสร้าง เป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่พบมากเป็นอันดับสองในโลกรองมาจากเซลลูโลส ซึ่งโครงสร้างของไคตินประกอบด้วยหน่วยที่ซ้ำ ๆ กันของ N-acetylglucosamine หรือ 2-acetamido-2-deoxy-D-glucose หรือ N-acetyl-D-glucose ที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิก $\beta(1\rightarrow4)$ โดยไคตินมีชื่อทางเคมีคือ Poly $\beta(1\rightarrow4)$ -linked-2-acetamido-2-deoxy-D-glucose ดังรูปที่ 2.28 ไคตินมักถูกมองว่าเป็นอนุพันธ์ของเซลลูโลสเนื่องจากมีโครงสร้างคล้ายคลึงกับเซลลูโลส แต่โครงสร้างของไคตินมีหมู่อะเซตาไมด์ ($-\text{NHCOCH}_3$) อยู่ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 แทนที่หมู่ไฮดรอกซิล ($-\text{OH}$) จึงทำให้มีความแตกต่างจากเซลลูโลส [74] ไคตินมีโครงสร้างที่เสถียรมากจึงยากต่อการนำไปใช้งานในรูปสารละลาย [75] ส่วนไคโตซานเป็นอนุพันธ์ของไคติน ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ $\alpha(1\rightarrow4)$ -linked-2-amino-2-deoxy-D-glucose เชิงเส้นตรงที่ได้จากการกำจัดหมู่อะเซทิล (Deacetylation) ออกจากไคติน [74] ดังรูปที่ 2.29 โดยทั่วไปไคโตซานจะประกอบด้วยหน่วยที่กำจัดหมู่อะเซทิลออก (Degree of Deacetylation, %DD) แล้วประมาณ 60-100 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้จะขึ้นกับแหล่งที่มาของไคติน และขั้นตอนการสังเคราะห์ไคโตซาน ซึ่งมีวิธีการตรวจสอบ %DD โดยการใช้เครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรมิเตอร์ (Nuclear magnetic resonance spectrometer) [68] ไคโตซานสามารถนำไปใช้งานในรูปสารละลายได้เมื่อเติมโปรตอนให้กับคาร์บอนตำแหน่งที่ 2 โดยการนำไคโตซานไปละลายด้วยกรดอินทรีย์ [75]



รูปที่ 2.28 โครงสร้างทางเคมีของไคติน [74]



รูปที่ 2.29 ปฏิกริยาการกำจัดหมู่อะเซทิล (Deacetylation) ออกจากไคติน [76]

หมู่อะมิโนในไคโตซานมีค่า pKa ประมาณ 6.5 ส่งผลให้ไคโตซานมีประจุบวกในสภาวะสารละลายที่เป็นกรดหรือกลาง ซึ่งความหนาแน่นของประจุขึ้นกับค่า pH และ %DD ไคโตซานสามารถยึดติดกับพื้นผิวที่มีประจุลบได้ดี จึงทำหน้าที่เป็นสารยึดติดทางชีวภาพ

2.7.1 แหล่งที่พบไคติน และไคโตซาน [68]

- โครงสร้างแข็งของสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลัง เช่น แมลง กุ้ง ปู ปลาหมึก หอยมุก
- ผนังเซลล์ของรา ยีสต์ และจุลินทรีย์หลายชนิด
- สาหร่ายบางชนิด

2.7.2 การจัดเรียงตัวของผลึกไคติน และไคโตซาน [75]

- การจัดเรียงตัวแบบแอลฟา (Alpha form) พบในกุ้ง ปู
- การจัดเรียงตัวแบบบีตา (Beta form) พบในแกนปลาหมึก
- การจัดเรียงตัวแบบแกมมา (Gamma form) พบในเห็ดหรือราบางชนิด

2.7.3 สมบัติของไคติน และไคโตซาน [68]

2.7.3.1 สมบัติการละลาย

ไคตินสามารถละลายได้ในกรดอินทรีย์เกือบทุกชนิดที่มีค่าพีเอชน้อยกว่า 6 เช่น กรดอะซิติก (CH_3COOH) กรดฟอร์มิก (HCOOH) ส่วนกรดอนินทรีย์ เช่น กรดไนตริก (HNO_3) ไฮโดรคลอริกเข้มข้น (HCl) กรดซัลฟิวริกเข้มข้น (H_2SO_4) กรดฟอสฟอริกเข้มข้น (H_3PO_4) กรดเปอร์คลอริก (HClO_4) และ N, N-dimethylacetamide-Lithium chloride (DMAc-LiCl) แต่ต้องมีการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงปานกลาง และมีการบั่นทอน ไคตินไม่สามารถละลายในน้ำ กรดเจือจางต่างเจือจาง แอลกอฮอล์ และตัวทำละลายอินทรีย์อื่น ๆ เป็นต้น

2.7.3.2 น้ำหนักโมเลกุล

ไคตินมีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่า 1,000,000 ส่วนไคโตซานมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 100,000-1,200,000 ขึ้นกับขั้นตอนการผลิต

2.7.3.3 องศาการกำจัดหมู่อะเซทิล (Degree of deacetylation, %DD)

เป็นตัวบ่งชี้ถึงความเป็นไคตินหรือไคโตซาน ซึ่งถ้าค่า %DD ต่ำจะแสดงถึงความเป็นไคติน ในทางตรงกันข้ามถ้าค่า %DD สูงจะแสดงถึงความเป็นไคโตซาน

2.7.3.4 ความหนืด

ความหนืดของไคติน และไคโตซานขึ้นกับค่าองศาการกำจัดหมู่อะเซทิล น้ำหนักโมเลกุล ค่าพีเอช และอุณหภูมิ เป็นต้น เช่น ความหนืดจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความหนืดของไคโตซานในกรดอะซิติกจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าพีเอชลดลง ความหนืดของไคโตซานในกรดไฮโดรคลอริกจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้น เป็นต้น

2.7.3.5 ความสามารถในการสร้างตะกอน (Ability of coagulation)

ไคโตซานเป็นตัวเหนียวน้ำในการสร้างตะกอน และช่วยให้เกิดการตกตะกอนที่ดี (Flocculating and coagulating agents) เนื่องจากมีหมู่อะมิโนจำนวนมากซึ่งสามารถแตกตัวเป็นประจุบวก และจับตัวกับสารที่มีประจุลบได้ เช่น สีย้อม โปรตีน และพอลิเมอร์อื่น ๆ เป็นต้น หรือจับกับโลหะหนักโดยไนโตรเจนในหมู่อะมิโนจะเป็นตัวให้อิเล็กตรอนแล้วเกิดการสร้างพันธะเชิงซ้อนขึ้น ซึ่งหมู่อะมิโนในไคโตซานจะมีประสิทธิภาพในการจับไอออนของโลหะได้ดีกว่าหมู่อะเซทิลในไคติน ดังนั้นไคโตซานที่มีองศาการกำจัดอะเซทิลสูง จะมีความสามารถในการจับโลหะได้สูงด้วย

2.7.3.6 การเกิดไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

ไคติน และไคโตซานสามารถเกิดการไฮโดรไลซ์ด้วยกรด (Acid hydrolysis) ได้ ซึ่งจะเกิดแบบสุ่ม (Random) แล้วได้อิโกลิโกเมอร์ (Oligomer) ออกมา

2.7.3.7 การย่อยสลายในสภาวะต่าง (Alkaline degradation)

ไคติน และไคโตซานสามารถเกิดการย่อยสลายในสภาวะต่างได้ โดยเริ่มต้นจากส่วนปลายของสายโซ่โมเลกุล เรียกว่า Peeling reaction

2.7.3.8 การย่อยสลายโดยการสั่นด้วยคลื่นเสียง (Degradation by sonication)

ไคติน และไคโตซานสามารถย่อยสลายด้วยการสั่นภายใต้คลื่นเสียง ได้เป็นอิโกลิโกเมอร์ที่มีขนาดใกล้เคียงกัน

2.7.3.9 การย่อยสลายทางความร้อน (Thermal degradation)

ไคติน และไคโตซานสามารถใช้ความร้อนในการย่อยสลายได้

2.7.3.10 สมบัติทางชีวภาพ

ไคตินและ ไคโตซานมีสมบัติทางชีวภาพดังนี้ มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ปลอดภัย และไม่มีความเป็นพิษ [74]

2.7.4 วิธีการนำไคติน และไคโตซานไปใช้งาน [75]

- ไคตินโดยทั่วไปจะถูกนำไปใช้งานในรูปของแข็งหรือบดเป็นผงแล้วนำไปละลายเพื่อทำการตรวจวัดสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ นอกจากนี้ยังสามารถนำไปละลายเพื่อใช้งานได้ ซึ่งไคตินสามารถละลายได้ในสารผสมของ Dimethylacetamide (DMAc หรือ DMA) และ N-methylpyrrolidone (NMP) ในลิเทียมคลอไรด์ซึ่งมีความเป็นพิษสูง

- ไคโตซานโดยทั่วไปถูกนำไปใช้งานทั้งในรูปของแข็ง และสารละลาย ซึ่งสามารถละลายไคโตซานได้ด้วยกรดอินทรีย์ เช่น กรดอะซิติก กรดแลคติก กรดกลูตามิก และอื่น ๆ เป็นต้น โดยจะได้สารละลายที่มีลักษณะเหนียวใสสามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อได้

2.7.5 กระบวนการผลิตไคติน และไคโตซาน [68]

กระบวนการผลิตทำได้โดยนำของเหลือจากกุ้ง ปู และปลาหมึกมาบดเพื่อคัดขนาด แล้วแยกโปรตีนออกโดยการต้มกับด่างเจือจาง 4-8 เปอร์เซ็นต์ นำมาล้างน้ำให้ต่างหมดไป จากนั้นแยกเกลือแร่ ออกโดยการต้มกับกรดเจือจาง 4-8 เปอร์เซ็นต์ แล้วนำมาล้างน้ำ และทำให้แห้งจะได้เป็นไคตินออกมา ส่วนไคโตซานได้จากการทำปฏิกิริยากำจัดหมู่อะเซทิลโดยใช้ด่างเข้มข้น 40-50 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้อุณหภูมิสูง จากนั้นล้างน้ำแล้วทำให้แห้ง

2.7.6 การนำไคติน และไคโตซานไปประยุกต์ใช้งาน [68, 75]

สิ่งที่จะต้องพิจารณาก่อนการนำไปใช้คือ องศาการกำจัดหมู่อะเซทิล (Degree of deacetylation) น้ำหนักโมเลกุล ความชื้น ปริมาณเถ้า (Ash content) ปริมาณของโปรตีน (Protein content) และความหนืด

มีการนำไคติน และไคโตซานไปประยุกต์ใช้งานอย่างหลากหลายทั้งในเรื่องทางการแพทย์ ผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง การป้องกันศัตรูพืช รวมไปถึงการบำบัดน้ำเสีย

- เครื่องสำอาง เช่น เป็นสารชั้น และสารเติมแต่งในเครื่องสำอาง ได้แก่ ครีมทาหน้า ครีมทาผิว ครีมสำหรับผิวสวย และครีมอาบน้ำ เป็นต้น
- การบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากไคติน และไคโตซานมีสมบัติเป็นพอลิอิเล็กโทรไลต์ และสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะหนักได้ เป็นต้น
- อุตสาหกรรมกระดาษ เช่น ใช้ปรับปรุงพื้นผิวของกระดาษ เป็นสารที่ช่วยยึดติดเยื่อกระดาษ และเพิ่มความทนทานของกระดาษขณะเปียก เป็นต้น
- ด้านเทคโนโลยีชีวภาพ เช่น ใช้ในการแยกโปรตีน และใช้เป็นเยื่อเลือกผ่านในโครมาโทกราฟี คอลัมน์ เป็นต้น
- ด้านการเกษตร เช่น ใช้เป็นส่วนผสมในอาหารสัตว์ เป็นสารเคลือบเมล็ดพันธุ์เพื่อป้องกันแมลงหรือเชื้อรา เป็นส่วนผสมในยาฆ่าแมลง เป็นพอลิเมอร์อู๋มน้ำใช้ในการเพาะเลี้ยงกล้าพืช และเป็นสารควบคุมการปลดปล่อยสารเคมีที่ใช้ในทางการเกษตร เป็นต้น
- วัสดุทางการแพทย์ เช่น วัสดุตกแต่งแผล ไหมเย็บแผล ผิวนั่งเทียม คอนแทคเลนส์ เยื่อของไตเทียม (Artificial kidney membranes) และตัวควบคุมการปลดปล่อยยา เป็นต้น
- อาหาร และเครื่องดื่ม เช่น อาหารเสริมสำหรับควบคุมน้ำหนัก (Diet food) บรรจุภัณฑ์สำหรับอาหาร สารเติมแต่งในอาหาร และสารที่ทำให้อาหารคงตัว (Food stabilizer)
- อุตสาหกรรมสิ่งทอ เช่น เป็นสารต่อต้านไฟฟ้าสถิต (Antistatic) และป้องกันสิ่งปนเปื้อนให้แก่ผ้า (Soil repellent) ใช้ในขั้นตอนการพิมพ์ (Printing) และขั้นตอนการตกแต่งขั้นสุดท้าย (Finishing) และสามารถกำจัดสีย้อมในท่อน้ำทิ้งได้ เป็นต้น
- เจลไคโตซาน สามารถใช้เป็นองค์ประกอบในเลเซอร์ (Laser) และไดโอดเปล่งแสง (Light-emitting devices, LEDs)

2.8 สีย้อม (Dyestuffs)

สีย้อม คือ สีชนิดหนึ่งที่ใช้ในการย้อมเส้นใยของผ้า โดยอาจเป็นสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ เป็นผลึกหรือผงละเอียด ละลายน้ำได้หรือไม่ได้ แต่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ได้ เมื่อทำการย้อมผ้าสีย้อมจะซึมผ่านเข้าไปในโมเลกุลของเส้นใย ซึ่งทำลายผลึกของวัตถุนั้นชั่วคราว โดยอาจเกิดเป็นพันธะไอออนิก (Ionic bond) หรือพันธะโควาเลนต์ (Covalent bond) กับวัตถุที่ต้องการย้อมโดยตรง ส่วนสีที่เห็นนั้นเกิดจากอิเล็กตรอนที่พันธะคู่ซึ่งอยู่ในโมเลกุลของสีย้อมมีความสามารถในการดูดกลืนพลังงานที่ช่วงสเปกตรัมต่าง ๆ กัน ส่งผลให้เห็นโมเลกุลสีย้อมต่างโทนสีกัน โดยพลังงานแสงในช่วงสายตาสสามารถมองเห็นได้อยู่ในช่วงความยาวคลื่นแสง 400-700 นาโนเมตร [77]

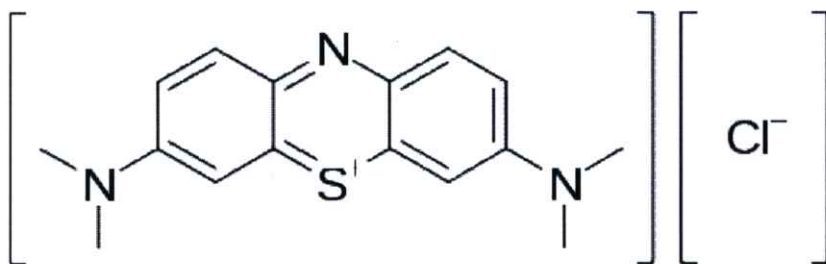
2.8.1 ประเภทของสีย้อม

ประเภทสีย้อมสามารถจำแนกได้หลายแบบ ได้แก่ [78]

- จำแนกตามประจุ เช่น ประจุบวก ประจุลบ และไม่มีประจุ เป็นต้น
- จำแนกตามโครงสร้างทางเคมี เช่น เอโซ และแอนทราควิโนน เป็นต้น
- จำแนกตามสีที่มองเห็น เช่น สีดำ สีแดง และสีเขียว เป็นต้น
- จำแนกตามชื่อสี เช่น สีแอซิด สีไดเร็กซ์ และสีดีสเพอร์ส เป็นต้น
- จำแนกตามเส้นใยที่สามารถย้อมได้ เช่น สีย้อมเส้นใยเซลลูโลส และสีย้อมเส้นใยสังเคราะห์ เป็นต้น
- จำแนกตามแหล่งกำเนิดสี เช่น สีย้อมสังเคราะห์ และสีย้อมจากธรรมชาติ เป็นต้น

2.8.2 เมทิลีนบลู (Methylene blue) [79]

สีย้อมเมทิลีนบลูอาจเรียกว่า เบสิคบลู 9 (Basic blue 9) สวิสบลู (Swiss blue) หรือเมทิลไทโอนีนีเยมคลอไรด์ (Methylthionium chloride) มีสูตรโมเลกุลคือ $C_{16}H_{18}ClN_3S$ ลักษณะภายนอกเป็นผงสีเขียวเข้ม และกลายเป็นสารละลายสีฟ้าเมื่อละลายน้ำหรือเอทานอล เมทิลีนบลูเป็นสีย้อมสังเคราะห์ประเภทเบสิคซึ่งมีลักษณะเป็นเกลือของต่างอินทรีย์ โดยเมื่อละลายน้ำจะเกิดประจุบวก บางครั้งอาจเรียกว่า สีแคตไอออน อาการข้างเคียงจากการสัมผัสสีย้อมเมทิลีนบลู เช่น อาการปวดหัว อาเจียน สับสน หายใจถี่ และความดันโลหิตสูง นอกจากนี้ยังสามารถเกิดกลุ่มอาการเซโรโทนิน เซลล์เม็ดเลือดแดงแตก และเกิดอาการแพ้ เป็นต้น เมทิลีนบลูมีโครงสร้างทางเคมีดังรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.30 โครงสร้างทางเคมีของสีย้อมเมทิลีนบลู [79]

2.9 ระบบบำบัดน้ำทิ้ง (Wastewater treatment) [80]

การเลือกชนิดของระบบการบำบัดน้ำทิ้งพิจารณาจาก ลักษณะน้ำทิ้ง วัตถุประสงค์ในการบำบัด และคุณภาพน้ำที่ต้องการ เช่น การนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ การกำจัดสารพิษ ปริมาณสารที่ต้องการกำจัด ข้อกำหนดทางกฎหมาย กระบวนการบำบัดที่เหมาะสม ต้นทุน ข้อพิจารณาด้านสิ่งแวดล้อม และพลังงาน

หลักการบำบัดขึ้นอยู่กับสิ่งเจือปนในน้ำทิ้ง ซึ่งของแข็งหรือสารแขวนลอยจะบำบัดด้วยวิธีทางกายภาพ ตะกอนขนาดเล็กหรือสารละลายจะบำบัดด้วยวิธีการทางเคมีและชีวภาพ เป็นต้น

2.9.1 การบำบัดน้ำทิ้งทางกายภาพ (Physical treatment)

การบำบัดลักษณะนี้เป็นการกำจัดของแข็ง เศษวัสดุ และกรวดทรายที่ปนมากับน้ำทิ้ง ซึ่งสามารถลดค่าปริมาณออกซิเจนที่จุลินทรีย์ต้องการใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำ (Biochemical oxygen demand, BOD) ได้บางส่วน โดยการบำบัดน้ำทิ้งทางกายภาพประกอบด้วย การใช้ตะแกรงแยก (Screening) การบดหรือตัด (Comminution) การกวาด (Skimming) การกำจัดกรวดและทราย (Grit chamber) การดักไขมัน (Grease traps) การทำให้ลอย (Flotation) การตกตะกอนของแข็งขนาดเล็ก (Primary sedimentation)

2.9.2 การบำบัดน้ำทิ้งทางเคมี (Chemical treatment)

การบำบัดน้ำทิ้งทางเคมีเป็นการแยกสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำ เช่น คลอไรด์ ซัลเฟต โซเดียมไฮยาไนด์ เป็นต้น ออกจากน้ำโดยมีวัตถุประสงค์ในการบำบัดคือ ปรับสภาพน้ำให้เหมาะสมกับความต้องการ เช่น ค่าพีเอช เป็นต้น

การบำบัดน้ำทิ้งทางเคมีมีวิธีการดังนี้ การสร้างตะกอนทางเคมี (Chemical coagulation) การตกตะกอน (Precipitation) การให้และรับอิเล็กตรอน (Oxidation and reduction) การทำให้เป็นกลาง (Neutralization) การฆ่าเชื้อโรค (Disinfection) และการปรับสภาพตะกอน (Sludge conditioning)

2.9.3 การบำบัดน้ำทิ้งทางชีวภาพ (Biological treatment)

การบำบัดน้ำทิ้งด้วยวิธีนี้เป็นการใช้จุลินทรีย์โดยเฉพาะแบคทีเรียในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำทิ้ง เช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส เป็นต้น โดยชนิดของจุลินทรีย์ที่มีความสำคัญต่อการบำบัดน้ำทิ้งได้แก่ เชื้อแบคทีเรีย เชื้อรา สาหร่าย ไวรัส โปรโตซัว เป็นต้น

2.9.4 การบำบัดน้ำทิ้งทางกายภาพ-เคมี

วิธีนี้มีความนิยมอย่างมากในการใช้บำบัดเป็นขั้นตอนสุดท้ายหลังผ่านการบำบัดด้วยวิธีทางกายภาพ เคมี หรือชีวภาพ เพื่อให้ได้น้ำทิ้งที่มีคุณภาพดีเทียบเท่ากับน้ำบริโภค สามารถแบ่งออกเป็น 5 แบบ ดังนี้

2.9.4.1 การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated carbon adsorption)

ถ่านกัมมันต์ได้มาจากการเผาสารอินทรีย์ที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบที่อุณหภูมิสูง จึงเกิดรูพรุนมากมายซึ่งสามารถคิดเป็นพื้นที่ผิวตั้งแต่ 500-1,500 ตารางเมตรต่อกรัม

2.9.4.2 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange process)

วิธีนี้เป็นการกำจัดแร่ธาตุทั้งที่มีประจุบวกและลบในน้ำทิ้ง เช่น Cu^{2+} NH_4^+ CrO_4^{2-} Zn^{2+} และ Ni^{2+} เป็นต้น โดยการแทนที่ไอออนดังกล่าวกับไอออนที่เรซิน เช่น H^+ Na^+ และ OH^- เป็นต้น ซึ่งการแลกเปลี่ยนไอออนสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ระบบคือ แบบประจุบวก (Cation exchange resin) และแบบประจุลบ (Anion exchange resin) โดยอาจติดตั้งระบบทั้งสอง

แบบต่อเนื่องหรือแบบผสมที่บรรจุสารทั้งสองชนิดไว้ในถังเดียวกัน จากนั้นมีการทำให้เรซินกลับคืนสภาพ (Regeneration) ด้วยกรดแก่สำหรับเรซินแบบประจุบวก และเบสแก่สำหรับเรซินแบบประจุลบ

2.9.4.3 การแยกด้วยไฟฟ้า และเยื่อกรอง (Electrodialysis)

ระบบนี้เป็นการติดตั้งแผ่นเยื่อกรองแบบกึ่งซึมผ่าน 2 ชนิด คือ เยื่อกรองประจุบวก และเยื่อกรองประจุลบเรียงสลับจากนั้นผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าระบบ เมื่อสารละลายเกลือเคลื่อนที่ผ่านเยื่อกรอง ส่วนของประจุบวกจะถูกจับไว้ด้วยเยื่อกรองประจุลบ และส่วนของประจุลบจะถูกจับไว้ด้วยเยื่อกรองประจุบวก

2.9.4.4 การรีเวอร์สออสโมซิส (Reverse osmosis)

วิธีนี้เป็นการกำจัดเกลือ และสิ่งสกปรกในน้ำโดยใช้แผ่นเยื่อกรองสังเคราะห์แบบกึ่งซึมผ่านได้ (Semi-permeable membrane) เช่น เซลลูโลสอะซิเตท และไนลอน เป็นต้น วัตถุประสงค์ของระบบนี้คือ ลดปริมาณไนเตรต ซัลเฟต โซเดียม และปริมาณของแข็งที่ละลายได้ โดยแผ่นเยื่อกรองที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบจะสามารถลดปริมาณสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้

2.9.4.5 การกรองแบบอัลตราฟิวเทรชัน (Ultrafiltration)

การกรองแบบนี้เป็นการใช้แผ่นเยื่อกรองแบบที่มีรูพรุนซึ่งทำจากเซลลูโลสอะซิเตท และพอลิเมอร์สังเคราะห์ต่าง ๆ โดยสามารถแยกสารละลายตามขนาด และโครงสร้าง อาศัยแรงดันประมาณ 40 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ระบบการกรองแบบนี้สามารถใช้ได้กับการผลิตน้ำเพื่อบริโภค การบำบัดขั้นต้นสำหรับระบบรีเวอร์สออสโมซิส และการกรองน้ำที่ผ่านการบำบัดขั้นที่สองซึ่งมีต้นทุนการดำเนินงาน และการดูแลรักษาต่ำ

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Rathna, G.V.N. และคณะ [81] ได้เตรียมไฮโดรเจลจากเจลาติน และโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่สัดส่วนต่าง ๆ เชื่อมโยงด้วยกลูตารัลดีไฮด์ จากนั้นทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกลไกการบวมตัวของไฮโดรเจลซึ่งเป็นฟังก์ชันกับสัดส่วน อุณหภูมิ ค่าพีเอช และค่าความแรงไอออน เป็นต้น พบว่าเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสกับเจลาติน และเมื่อใส่สารเชื่อมโยงกลูตารัลดีไฮด์ลงไป ส่งผลให้เกิดพันธะโควาเลนต์ภายใน และระหว่างสายโซ่โมเลกุลบริเวณหมู่เอมิโนของเจลาติน เกิดไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงแบบกึ่งแทรกสอด (Semi-interpenetrating network, Semi-IPN) ส่วนอัตราการบวมตัว และสมดุลของการบวมตัวขึ้นอยู่กับปริมาณของโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส นอกจากนี้สมดุลการบวมตัวยังเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของระบบเพิ่มขึ้น ไฮโดรเจลที่เตรียมได้มีความเป็นกรดอ่อน ๆ และสามารถบวมตัวได้เมื่อระบบมีค่าพีเอชที่สูงขึ้น การบวมตัวถูกยับยั้งเมื่ออยู่ในสารละลายเกลือ ดังในทฤษฎีของ Donnan ที่กล่าวว่าการบวมตัวสามารถเกิดขึ้นในสารละลายเกลือที่มีประจุ +1 (Monovalent) ได้ดีกว่าสารละลายเกลือที่มีประจุ +2 (Divalent) สรุปได้ว่าการบวมตัวของไฮโดรเจลมีความไวต่ออุณหภูมิห้อง ค่าพีเอช และอิเลกโตรไลต์ที่ความเข้มข้นต่ำ แต่การบวมตัวจะถูกยับยั้งเมื่อมีความเข้มข้นของอิเลกโตรไลต์ที่สูง

ชุตินา แกมกิจ [82] ได้ศึกษาการเตรียมวัสดุประกอบนาโนเคลย์ระหว่างไคโตซานละลายน้ำกับมอนตมอริลโลไนต์สำหรับประยุกต์ใช้ในงานดูดซับสีย้อม แล้วพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRD, XRF, FT-IR และ TGA ซึ่งไคโตซานที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้มีอยู่ 3 ชนิด คือ ไคโตซานน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ไฮดรอกซีเอทิลอะคริลไคโตซาน และไฮดรอกซีเอทิลอะคริลไคโตซานน้ำหนักโมเลกุลต่ำ จากนั้น

นำวัสดุประกอบที่เตรียมได้ไปทดสอบการดูดซับสีย้อม ซึ่งสีย้อมที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ สีเบสิกบลู 66, สีเบสิกเยลโล่ 1 และสีแอสิตเรด 91 พบว่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมที่ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ของวัสดุประกอบทั้ง 3 ชนิดมีค่าสูงกว่ามอนต์มอริลโลไนต์ และโคโตซานอย่างเห็นได้ชัด เมื่อศึกษาจลนพลศาสตร์ และไอโซเทอมการดูดซับของวัสดุประกอบระหว่างโคโตซานน้ำหนักโมเลกุลต่ำกับมอนต์มอริลโลไนต์ และไฮดรอกซีเอทิลอะคริลโคโตซานกับมอนต์มอริลโลไนต์ในการดูดซับสีย้อมเบสิกเยลโล่ 1 พบว่าสมการจลนพลศาสตร์ของ Pseudo-second order มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) เข้าใกล้ 1 มากกว่า Pseudo-first order สรุปได้ว่าการดูดซับเป็นไปตาม Pseudo-second order ซึ่งเป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงทางเคมี ส่วนไอโซเทอมการดูดซับสีย้อมเบสิกเยลโล่ 1 เป็นไปตามสมการ Langmuir adsorption โดยมีค่า R^2 เข้าใกล้ 1 มากกว่าสมการ Freundlich adsorption จึงอธิบายได้ว่าเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption) ซึ่งมีค่าการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 188.7 และ 294.1 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ การศึกษาจลนพลศาสตร์ และไอโซเทอมการดูดซับของสีย้อมแอสิตเรด 91 ด้วยวัสดุประกอบระหว่างไฮดรอกซีเอทิลอะคริลโคโตซานกับมอนต์มอริลโลไนต์พบว่าเป็นไปตาม Pseudo-second order จึงเป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงทางเคมี ส่วนไอโซเทอมการดูดซับพบว่าเป็นไปตามสมการ Freundlich adsorption ซึ่งมีค่า R^2 เข้าใกล้ 1 มากกว่าสมการ Langmuir adsorption จึงเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer adsorption) และมีค่า n เท่ากับ 1.569 ซึ่งอธิบายได้ว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นแบบ Good adsorption คือ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเพียงเล็กน้อยจะมีผลต่ออัตราการดูดซับมาก เมื่อความเข้มข้นต่ำอัตราการดูดซับก็จะต่ำ และเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น

Slamet, R. และ Erdawati, B. [82] ได้สังเคราะห์ พิสูจันเอกลักษณะ และประยุกต์ใช้วัสดุดูดซับชีวภาพจากมอนต์มอริลโลไนต์ที่ถูกดัดแปรด้วยโคโตซานสำหรับการกำจัดสีย้อมคองโกเรดด้วยวิธีการดูดซับแบบแบดซ์ และคอลัมน์โดยทำการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ เช่น อัตราการไหล, น้ำหนักของสารดูดซับที่อัตราการไหลต่ำ และคุณภาพของน้ำ เป็นต้น ซึ่งทำการพิสูจันเอกลักษณะด้วยเทคนิค FT-IR, BET และ XRD จากนั้นศึกษาระยะเวลาการใช้งานจากแบบจำลอง Thomas นอกจากนี้ยังศึกษาการนำคอลัมน์, สีย้อม และมอนต์มอริลโลไนต์ที่ถูกดัดแปรด้วยโคโตซานกลับมาใช้งานใหม่ จากการทดลองพบว่ามอนต์มอริลโลไนต์ที่ถูกดัดแปรด้วยโคโตซานที่ได้จากการสังเคราะห์มีเสถียรภาพทางความร้อนสูงขึ้น ความสามารถในการดูดซับสีย้อมคองโกเรดขึ้นอยู่กับน้ำหนักของสารดูดซับ, อัตราการไหล และความเข้มข้นของสีย้อม

Hayeeye, F. และคณะ [83] ได้ศึกษาการเตรียมเม็ดปิดส์คอมโพลิตที่ใช้ในการดูดซับสีย้อมโรดามีน บี ออกจากสารละลาย โดยเตรียมได้จากเจลาตินผสมถ่านกัมมันต์ ซึ่งเม็ดปิดส์ที่เตรียมได้มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ไม่เป็นพิษ ปราศจากสารก่อมะเร็ง สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ และต้นทุนต่ำ โดยศึกษาความสามารถการดูดซับจากปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ ระยะเวลาสัมผัส ปริมาณสารดูดซับ ค่าพีเอช และอุณหภูมิ นอกจากนี้ยังศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมโรดามีน บี พบว่าพฤติกรรมดูดซับเป็นไปตามสมการแลงเมียร์ ซึ่งมีความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 256.41 มิลลิกรัมต่อกรัมที่ค่าพีเอชเท่ากับ 4 และอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองสามารถบ่งบอกได้ว่าเม็ดปิดส์ที่เตรียมได้มีศักยภาพในการประยุกต์ใช้เพื่อบำบัดน้ำทิ้ง

Li, W. และคณะ [84] ได้เตรียมเม็ดปิดส์คอมโพลิตจากเจลาตินผสมเบนโทไนท์สำหรับการกำจัดสีย้อมแอนไอออนิก และแคตไอออนิก จากนั้นพิสูจันเอกลักษณะด้วยเทคนิค SEM, XRD, FT-IR,

TGA และ Zeta potential ศึกษาสมบัติการดูดซับสีย้อมของเม็ดบีดส์จากสัดส่วนมวลของเบนโทไนท์ต่อเจลาติน รวมถึงศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ ระยะเวลาการสัมผัส (Contact time) อุณหภูมิ และค่าพีเอช ของการดูดซับสีย้อมคองโกเรด (สีย้อมแอนไอออนิก) และเมทิลีนบลู (สีย้อมแคตไอออนิก) บนเม็ดบีดส์ที่มีสัดส่วนเบนโทไนท์ 12.5 เปอร์เซ็นต์ของเนื้อเจลาติน โดยสมบัติการดูดซับเฉพาะในสีย้อมเมทิลีนบลูผสมคองโกเรดถูกศึกษาภายใต้การใส่สารลดแรงตึงผิวประเภทแอนไอออนิก คือ Sodium dodecyl sulfate (SDS) และสารประกอบอนินทรีย์เกลือโซเดียมคลอไรด์ที่ค่าพีเอชต่าง ๆ จากนั้นศึกษาแบบจำลองไอโซเทอม (Isotherm model) แข็งเส้น และไม่แข็งเส้น นอกจากนี้ยังศึกษาแบบจำลองจลนพลศาสตร์ (Kinetic model) และพฤติกรรมการบวมตัว (Swelling behavior) ของเม็ดบีดส์คอมโพสิต รวมถึงยังศึกษากลไกความเป็นไปได้ในการดูดซับสีย้อม พบว่าการดูดซับสีย้อมคองโกเรดหรือเมทิลีนบลูบนเม็ดบีดส์ที่มีสัดส่วนเบนโทไนท์ 12.5 เปอร์เซ็นต์ของเนื้อเจลาตินสามารถอธิบายได้ด้วยจลนพลศาสตร์ Pseudo-second order และแบบจำลองไอโซเทอมของ Langmuir บ่งบอกได้ว่าการดูดซับที่บริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงทางเคมี และเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) โดยผลลัพธ์ของการดูดซับเฉพาะในระบบสีย้อมเมทิลีนบลูผสมคองโกเรดภายใต้การใส่สารลดแรงตึงผิวประเภทแอนไอออนิก คือ Sodium dodecyl sulfate (SDS) และสารประกอบอนินทรีย์เกลือโซเดียมคลอไรด์ที่ค่าพีเอชต่าง ๆ พบว่ามีการดูดซับดีเยี่ยมทั้งในสีย้อมระบบเดี่ยวของสีย้อมคองโกเรดหรือเมทิลีนบลู และมีการดูดซับเฉพาะในระบบไบนารี (Binary system) ที่ผสมระหว่างสีย้อมคองโกเรดกับเมทิลีนบลูได้อย่างดีเยี่ยม จึงสรุปได้ว่าเม็ดบีดส์คอมโพสิตจากเจลาตินผสมเบนโทไนท์มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย

Pal, P. และคณะ [85] ได้ศึกษาการเตรียมวัสดุประกอบจากเจลาติน และมอนต์มอริลโลไนต์สำหรับการกำจัดตะกั่วออกจากสารละลาย จากนั้นพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRD, FT-IR, SEM และ EDX นอกจากนี้ศึกษาการนำวัสดุประกอบมาใช้งานใหม่จากพฤติกรรมการบวมตัวและการเกิดซินเนอร์จิส ศึกษาความสามารถการดูดซับจากปัจจัยต่าง ๆ เช่น ระยะเวลาการสัมผัส, ความเข้มข้นของไอออนโลหะ, ปริมาณสารดูดซับ, ค่าพีเอชของสารละลาย และสารดูดซับที่ผ่านกระบวนการนำกลับมาใช้งานใหม่ พบว่าจลนพลศาสตร์เป็นไปตามแบบจำลอง Pseudo-first order ซึ่งมีสมมูลการดูดซับที่เวลา 4 ชั่วโมง และสามารถดูดซับตะกั่วได้ 73.7 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้ไอโซเทอม Langmuir, Freundlich และ Temkin ในการอธิบายสมมูลการดูดซับ พบว่าการดูดซับเป็นไปตามสมการไอโซเทอมของ Langmuir ซึ่งมีความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 47.169 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ความสามารถการดูดซับตะกั่วยังขึ้นอยู่กับค่าพีเอชของสารละลาย และพบว่าวัสดุประกอบที่สังเคราะห์ได้สามารถฟื้นฟูสภาพการใช้งานในกรดไนตริกเข้มข้น 0.1 N ได้อย่างดีเยี่ยม โดยสามารถนำกลับมาใช้งานได้มากถึง 10 ครั้ง

Francisco, A.R. และคณะ [86] ได้เตรียมเม็ดบีดส์ชีวภาพจากโคโตซาน และมอนต์มอริลโลไนต์โดยใช้โซเดียม ไตรโพลีฟอสเฟต (Sodium tripolyphosphate) เป็นสารเชื่อมโยง จากนั้นทำการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิควิเคราะห์ธาตุเคมี CHN, XRD, FT-IR, ¹³C NMR, TGA, SEM, TEM และการหาประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (Point of zero charge, pH_{pzc}) พบว่าสมบัติต่าง ๆ ของเม็ดบีดส์ดีขึ้นเมื่อเทียบกับการใส่โคโตซาน หรือมอนต์มอริลโลไนต์เพียงอย่างเดียว และยังสามารถดูดซับสีย้อม Remazol blue ภายใต้สภาวะที่ค่าพีเอช (pH) เท่ากับ 2-8 ระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 0-660 นาที และความเข้มข้นของสีย้อมเท่ากับ 100-1,600 มิลลิกรัมต่อลิตร แล้วทำการศึกษาจลนพลศาสตร์ และสมมูลการดูดซับโดยใช้แบบจำลอง Pseudo-first order กับ Pseudo-second order รวมถึงสมการ

ของ Langmuir กับ Freundlich โดยจากงานวิจัยนี้พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Remazol blue คือ สภาวะที่สารละลายมีค่าพีเอชเท่ากับ 3 ในช่วงระยะเวลา 480 นาทีตามแบบจำลองจลนพลศาสตร์ Pseudo-second order ซึ่งค่าคงที่อัตราขึ้นอยู่กับปริมาณของมอนต์มอริลโลไนต์ ส่วนไอโซเทอมสมดุลการดูดซับพบว่าความสามารถในการดูดซับสีย้อม Remazol blue ไม่ขึ้นอยู่กับปริมาณดินเหนียวในเม็ดบีดส์ บ่งบอกได้ว่าเม็ดบีดส์สามารถใช้เพื่อดูดซับสีย้อมแอนไอออนิกจากน้ำทิ้งได้ถึงแม้ในสภาวะที่เป็นกรด

Aleksandra, R.N. และคณะ [87] ได้สังเคราะห์ และพิสูจน์เอกลักษณ์เยื่อเลือกผ่านจากไคโตซาน และมอนต์มอริลโลไนต์ที่สัดส่วน 10-50 เปอร์เซ็นต์ เพื่อใช้ในงานดูดซับสีย้อม Bezactiv orange V-3R จากนั้นพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FT-IR, TGA และ SEM โดยพิจารณาหลักการดูดซับสีย้อมที่ความเข้มข้นเท่ากับ 30, 50 และ 80 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าความสามารถในการดูดซับมากขึ้นเมื่อปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์เพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถดูดซับได้สูงสุดเมื่อสีย้อมมีความเข้มข้น 80 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าพีเอชของสารละลายที่เหมาะสมแก่การดูดซับมีค่าเท่ากับ 6 จากนั้นทำการเปรียบเทียบแบบจำลอง Pseudo-first order, Pseudo-second order และการแพร่ภายในรูพรุน (Intra-particle diffusion) แล้วศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ Langmuir กับ Freundlich โดยจากงานวิจัยนี้พบว่าเป็นการดูดซับตามสมการ Pseudo-second order และสมการ Freundlich คือความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสีย้อมในสารละลายมากขึ้น สรุปได้ว่าเยื่อเลือกผ่านจากไคโตซานผสมมอนต์มอริลโลไนต์มีประสิทธิภาพในการใช้ดูดซับสีย้อม Bezactiv orange V-3R

Pereira, F.A.R. และคณะ [88] ได้เตรียมเม็ดบีดส์คอมโพสิตจากไคโตซานผสมมอนต์มอริลโลไนต์ซึ่งเชื่อมโยงเข้ากับเพนตะโซเดียม ไตรฟอสเฟต (Pentasodium tripolyphosphate) เพื่อใช้ในการกำจัดคอปเปอร์ (II) ออกจากสารละลาย จากนั้นพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRD, FT-IR และ TGA พบว่าการดูดซับเป็นไปตามแบบจำลอง Pseudo-second order และ Lemkin โดยความสามารถในการดูดซับสูงสุดเป็นไปตามลำดับดังนี้ ไคโตซานมีค่ามากที่สุด รองลงมาคือไคโตซานผสมมอนต์มอริลโลไนต์ และมอนต์มอริลโลไนต์ตามลำดับ ส่วนร้อยละการคายการดูดซับ (Desorption) คอปเปอร์ไอออนออกจากเม็ดบีดส์หลังผ่านวงจรการคายการดูดซับ 3 ครั้ง ภายใต้สารละลาย Ethylene diamine tetra-acetic acid (EDTA) ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารช่วยฟื้นฟูสภาพ (Regeneration agents) ได้ค่าดังนี้คือ 86, 85 และ 84 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จากงานวิจัยนี้สรุปได้ว่าเม็ดบีดส์คอมโพสิตจากไคโตซานผสมมอนต์มอริลโลไนต์สามารถใช้เป็นทางเลือกหนึ่งในการกำจัดโลหะในน้ำทิ้ง

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้น งานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาการเตรียมวัสดุไฮโดรเจลดูดซับที่ได้จากวัสดุธรรมชาติ ได้แก่ เจลาติน แร่มอนต์มอริลโลไนต์ และไคโตซานซึ่งใช้ในการดัดแปรโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ ผ่านการเชื่อมโยงทางเคมีด้วยกลูตารัลดีไฮด์ โดยเตรียมผ่านเทคนิคการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งเพื่อใช้ในงานดูดซับสีย้อมเบสิกบลู 9 จากนั้นศึกษาสมบัติการดูดซับสีย้อมผ่านเทคนิค UV-VIS spectroscopy ศึกษาไอโซเทอมการดูดซับโดยใช้สมการ Langmuir และ Freundlich และกลไกการดูดซับโดยใช้แบบจำลอง Pseudo-first order และ Pseudo-second order ศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM และพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค TGA, XRD และ FT-IR

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี

1. เจลาติน (Gelatin) เกรดการค้า บริษัท รวมเคมี 1986 จำกัด
2. มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite) Grade SAC-P (Mac-Gel[®]) Thai Nippon Chemical Industry Co., Ltd. (Maximum moisture content = 12%/ pH = 10.0-11.0 at 5% suspension/Minimum Swelling index = 45 ml per 2 g of clay/ Viscosity at 600 rpm (2% w/v) = 12-20/ Minimum dry particle size (pass 200 mesh) = 80%)
3. ไคโตซาน (Chitosan) เกรดวิเคราะห์ Eland International (Thailand) Co.,Ltd. ($M_n = 83000$, $M_w=270000$, PDI = 3.30 เมื่อ Eluent คือ Acetate buffer pH = 4 [90])
4. กรดอะซิติก (CH_3COOH) เกรดวิเคราะห์ Avantor Performance Materials, Inc.
5. สารละลายกลูตาไรลดีไฮด์ความเข้มข้น 25 เปอร์เซ็นต์โดยมวล เกรดวิเคราะห์ Sigma-Aldrich, Inc.
6. เบสิคบลู 9 (Basic blue 9) dye content 95% wt (Loba Chemie Pvt. Ltd.)
7. โซเดียมเบนโซเอต เกรดวิเคราะห์ บริษัท CARLO ERBA Reagents S.A.S
8. ไอโซโพรพานอล เกรดวิเคราะห์ บริษัท CARLO ERBA Reagents S.A.S

3.2 อุปกรณ์ และเครื่องมือ

1. บริภัณฑ์เครื่องแก้ว
2. งานเพาะเชื้อพอลิสไตรีน
3. แม่พิมพ์ยางซิลิโคนรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร สูง 2 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.1 (ก) และแม่พิมพ์ซิลิโคนรูปลูกบาศก์ขนาดกว้าง 2 เซนติเมตร ยาว 2 เซนติเมตร สูง 2 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.1 (ข)



รูปที่ 3.1 แม่พิมพ์ยางซิลิโคน (ก) รูปทรงกระบอก และ (ข) รูปลูกบาศก์

4. ไม้บรรทัด
5. ด้ามมีดผ้าตัดเบอร์ 4 และใบมีดผ้าตัดเบอร์ 22
6. แท่งแม่เหล็กกวนสาร (Magnetic bar)
7. เครื่องกวนสารละลายพร้อมให้ความร้อน (Magnetic stirrer) รุ่น RW 20 digital, IKA Co., Ltd.
8. เครื่องกวนผสมสารเคมี (Mechanical overhead stirrer), IKA Co., Ltd.
9. เครื่องชั่งน้ำหนักแบบอ่านละเอียด 4 ตำแหน่ง รุ่น Sartorius (M-pact), GIBTHAI Co., Ltd.
10. เวอร์เนียคาลิปเปอร์ (Vernier caliper) ยี่ห้อ NAZA
11. เครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze-dryer) ยี่ห้อ Scan Vac รุ่น CoolSafe 110-4
12. ปั๊มดูดจ่ายของเหลวแบบรีดท่อ (Peristaltic pump) ยี่ห้อ LEAD FLUID[®] รุ่น YZ15
13. สายยางใสสำหรับปั๊มดูดจ่ายของเหลวแบบรีดท่อความยาว 1 เมตร
14. เดซิเคเตอร์
15. ซิลิกาเจล
16. กระจกชนิดขยายชนิดดูดออก
17. ตู้อบ รุ่น Isotemp, Fisher Scientific International, Inc.
18. ตู้เย็น
19. ตู้แช่แข็ง (Deep freezer) รุ่น DW-40L92, Haier Medical and Laboratory Products Co., Ltd.
20. เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV/VIS spectrometer) ยี่ห้อ Labtech
21. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) รุ่น LEO1455VP, LEO Electron Microscopy, Inc.
22. เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยสมบัติทางความร้อน (Thermo gravimetric analysis, TGA) รุ่น Pyris TGA, Perkin Elmer, Inc.
23. เครื่องอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrophotometer, FT-IR) รุ่น FTIR Spectrum GX, Perkin Elmer, Inc. โดยเตรียมตัวอย่างด้วยการบดผสมกับโพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) จากนั้นอัดเป็นแผ่นด้วยเครื่องอัดตัวอย่าง
24. เครื่องอัดตัวอย่างสำหรับ IR รุ่น SSP-10A, Shimadzu Corp.
25. เครื่องวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer, XRD) รุ่น D8 ADVANCE, BRUKER Corp.
26. ฝอบลมร้อนอเนกประสงค์ (Convection oven) ยี่ห้อ OXYGEN รุ่น KT-122
27. โกร่งบดยา
28. ตะแกรงกรอง
29. เครื่องปั่นเหวี่ยง ยี่ห้อ Hettich รุ่น Universal 320
30. เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (Particle size analyzer) ยี่ห้อ Horiba รุ่น Partica LA-950V2
31. กล้องจุลทรรศน์แบบดิจิทัล (Digital microscope) ยี่ห้อ Dino-Lite รุ่น Pro 2

3.3 ขั้นตอนการตัดแปรโครงสร้างมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยโคโตซาน

1. ชั่งโคโตซาน 1.0 กรัม และกรดอะซิติก 1.0 มิลลิลิตร จากนั้นละลายลงในน้ำกลั่นแล้วปรับให้มีปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร และปั่นกวนสารละลายโคโตซานที่อุณหภูมิห้อง จนสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน
2. ชั่งมอนต์มอริลโลไนต์ 1.0 กรัม จากนั้นกระจายผงมอนต์มอริลโลไนต์ในน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร พร้อมปั่นกวนที่อุณหภูมิห้อง
3. ถ่ายสารละลายจากข้อ 1. ไปยังสารแขวนลอยที่ได้จากข้อ 2. ผ่านปั๊มดูดจ่ายของเหลวแบบรีดท่อ (Peristaltic pump) ด้วยอัตราเร็วในการเติมเท่ากับ 1.0 มิลลิลิตรต่อนาที พร้อมปั่นกวนภายใต้อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จนกระทั่งสารละลายโคโตซานหมด
4. นำสารละลายจากข้อ 3. ไปล้างน้ำกลั่น 3 รอบ โดยเข้าเครื่องหมุนเหวี่ยงด้วยอัตราเร็วรอบเท่ากับ 3500 รอบต่อนาที
5. นำตะกอนที่ได้จากข้อ 4. ไปเข้าตู้แช่แข็งที่อุณหภูมิ -40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน
6. นำไปเข้าเครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งเป็นเวลา 2 วัน หรือจนกระทั่งแห้ง
7. นำไปบดด้วยโกรังบดยา
8. ร่อนผ่านตะแกรง ได้ผงมอนต์มอริลโลไนต์ตัดแปรด้วยโคโตซาน
9. เก็บรักษาในเดซิเคเตอร์ (ความชื้นสัมพัทธ์ = 38 ± 5 เปอร์เซ็นต์) ก่อนการนำไปใช้งานในขั้นต่อไป

3.4 ขั้นตอนการเตรียมไฮโดรเจลคูดซ์

3.4.1 การเตรียมไฮโดรเจลคูดซ์จากเจลาติน และมอนต์มอริลโลไนต์

1. ชั่งมอนต์มอริลโลไนต์ เจลาตินตามสัดส่วนดังตารางที่ 3.1 และโซเดียมเบนโซเอต 0.1 กรัม
2. ละลายมอนต์มอริลโลไนต์ เจลาติน และโซเดียมเบนโซเอตลงในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ตามลำดับพร้อมปั่นกวนด้วยเครื่องกวนผสมสารเคมีภายใต้อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส
3. เทใส่แม่พิมพ์ซิลิโคน และตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 15 นาที
4. แช่ตู้เย็นในช่องธรรมดาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
5. นำไปแช่แข็งที่อุณหภูมิ -40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน
6. แกะออกจากแม่พิมพ์แล้วนำเข้าเครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งเป็นเวลา 2 วัน
7. แช่ตัวอย่างลงในสารละลายกลูตารัลดีไฮด์เจือจางความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
8. ล้างตัวอย่างด้วยน้ำกลั่น 3 ครั้ง
9. แช่ตัวอย่างให้แห้งด้วยทิชชู แล้วอบตัวอย่างในฝาทอบลมร้อนเป็นเวลา 8 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

3.4.2 การเตรียมไฮโดรเจลดูดซับจากเจลาติน และมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยไคโตซาน

1. ชั่งมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยไคโตซาน เจลาตินตามสัดส่วนดังตารางที่ 3.1 และโซเดียมเบนโซเอต 0.1 กรัม
2. ละลายมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยไคโตซาน เจลาติน และโซเดียมเบนโซเอตลงในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ตามลำดับพร้อมปั่นกวนด้วยเครื่องกวนผสมสารเคมีภายใต้อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส
3. เทใส่แม่พิมพ์ซิลิโคน (ที่ผ่านการแช่แข็งในตู้แช่แข็ง) และตั้งทิ้งไว้ในภาชนะอะลูมิเนียมที่ใส่น้ำเย็นเป็นเวลา 15 นาที
4. แช่ตู้เย็นในช่องธรรมดาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
5. นำไปแช่แข็งที่อุณหภูมิ -40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน
6. แกะออกจากแม่พิมพ์แล้วนำเข้าเครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งเป็นเวลา 2 วัน
7. แช่ตัวอย่างลงในสารละลายกลูตารัลดีไฮด์เจือจางความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
8. ล้างตัวอย่างด้วยน้ำกลั่น 3 ครั้ง
9. ซับตัวอย่างให้แห้งด้วยทิชชู แล้วอบตัวอย่างในฝาทอบลมร้อนเป็นเวลา 8 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 3.1 สัดส่วนสารที่ใช้ในการสังเคราะห์ไฮโดรเจลดูดซับ

สูตร	MMT (กรัม)	CS-MMT (กรัม)	Gelatin (กรัม)
M3G15	3	-	15
M5G15	5	-	15
M6G15	6	-	15
CS-M5G15	-	5	15

3.5 การตรวจวิเคราะห์ และการพิสูจน์เอกลักษณ์

3.5.1 การวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาคโดยใช้หลักการกระเจิงแสงของเลเซอร์ (Laser Scattering Particle Size Distribution Analyzer)

นำตัวอย่างมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยไคโตซานที่เตรียมได้ไปวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (Particle size analyzer)

3.5.2 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRD

นำตัวอย่างมอนต์มอริลโลไนต์ และมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยไคโตซานที่เตรียมได้ไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer, XRD) โดยกำหนดสภาวะดังนี้

ช่วงมุม 2θ ที่ใช้วิเคราะห์ : 5 – 25 องศา
 Step size : 0.040 องศา

Step time : 1 วินาที

3.5.3 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิควิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยสมบัติทางความร้อน (TGA)

นำตัวอย่างมอนต์มอริลโลไนต์ และมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยโคโตซานที่เตรียมได้เข้าเครื่อง TGA โดยใช้อุณหภูมิทดสอบ 30-900 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน และกำหนดอัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที จากนั้นศึกษาอุณหภูมิการสลายตัว และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป (% weight loss) จากกราฟ

3.5.4 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FT-IR)

นำตัวอย่างมอนต์มอริลโลไนต์ และมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยโคโตซานปริมาณเล็กน้อยบดรวมผสมกับโพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) ซึ่งใช้เป็นสารอ้างอิง โดยการบดให้เป็นผงละเอียด แล้วอัดให้เป็นแผ่นบาง ๆ ด้วยเครื่องอัดตัวอย่าง จากนั้นนำไปเข้าเครื่อง FT-IR วิเคราะห์ในช่วงเลขคลื่น (Wave number) เท่ากับ $4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ ศึกษาพีคที่ได้เพื่อศึกษาหมู่ฟังก์ชัน

3.5.5 ขนาดของไฮโดรเจล

วัดความหนา และเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรเจลโดยใช้เวอร์เนียร์ (Vernier caliper) วัด 5 ตำแหน่ง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย

3.5.6 ความหนาแน่นของไฮโดรเจล

ชั่งน้ำหนักไฮโดรเจล แล้วหาความหนาแน่นจากสมการดังนี้

$$\text{ความหนาแน่น} = \frac{\text{น้ำหนักไฮโดรเจล (กรัม)}}{\text{ปริมาตรไฮโดรเจล (ลูกบาศก์เซนติเมตร)}} \quad (3.1)$$

3.5.7 การทดสอบหารูพรุนของไฮโดรเจล

1. ชั่งน้ำหนักแห้งของไฮโดรเจลเป็น w_1
2. แช่ไฮโดรเจลลงในไอโซโพรพานอลปริมาตร 30 มิลลิลิตร เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
3. ชั่งน้ำหนักรวมของไอโซโพรพานอล และไฮโดรเจลที่เปลี่ยนแปลงไปเป็น w_2
4. นำไฮโดรเจลออกจากไอโซโพรพานอล แล้วบันทึกน้ำหนักไอโซโพรพานอลที่คงเหลือเป็น w_3
5. ทำการทดลองข้างต้น 3 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยรูพรุนของไฮโดรเจล
6. คำนวณเปอร์เซ็นต์รูพรุนของไฮโดรเจล (%P) จากสมการดังนี้

$$\text{Porosity (\%)} = [(w_2 - w_1 - w_3)] / [(w_2 - w_3)] \times 100 \quad (3.2)$$

เมื่อ	w_1	คือ น้ำหนักไฮโดรเจลเริ่มต้น (กรัม)
	w_2	คือ น้ำหนักรวมของไอโซโพรพานอล และไฮโดรเจลหลังผ่านการแช่ในไอโซโพรพานอล (กรัม)
	w_3	คือ น้ำหนักของไอโซโพรพานอลคงเหลือหลังจากนำไฮโดรเจลออกจากสารละลาย (กรัม)

3.5.8 สัณฐานวิทยาของไฮโดรเจล (Morphology)

ศึกษาขนาดรูพรุนเฉลี่ยบริเวณพื้นผิวของไฮโดรเจลด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบดิจิทัลโดยใช้กำลังขยาย 90 เท่า และศึกษาสัณฐานวิทยาของไฮโดรเจล รวมถึงการกระจายตัวของมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) โดยเตรียมชิ้นงานขนาด 0.5x0.5 ตารางเซนติเมตร

3.5.9 การทดสอบพฤติกรรมการดูดซับน้ำของไฮโดรเจลดูดซับ

1. ตัดไฮโดรเจลรูปลูกบาศก์ขนาด 2x2x0.7 ลูกบาศก์เซนติเมตร
2. ชั่งน้ำหนักไฮโดรเจล (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง)
3. แช่ไฮโดรเจลลงในน้ำกลั่นปริมาตร 100 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง
4. นำชิ้นงานตัวอย่างขึ้นมาชั่งน้ำแล้วนำไปชั่งน้ำหนักที่เวลาต่าง ๆ กันดังนี้ 5, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 180, 240, 300, 360, 420, 480 และ 1440 นาที
5. คำนวณหาการบวมตัวจากสมการดังนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์การบวมตัว} = \frac{\text{น้ำหนักเจลที่บวมตัว} - \text{น้ำหนักเจลแห้งก่อนการบวมตัว}}{\text{น้ำหนักเจลแห้งก่อนการบวมตัว}} \times 100 \quad (3.3)$$

6. ทำซ้ำ 3 ชิ้นงาน

3.5.10 การทดสอบหาปริมาณของแข็งคงเหลือ

1. ตัดไฮโดรเจลรูปลูกบาศก์ขนาด 2x2x0.7 ลูกบาศก์เซนติเมตร
2. ชั่งน้ำหนักไฮโดรเจล (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง)
3. แช่ไฮโดรเจลลงในน้ำกลั่นเป็นเวลา 1 ชั่วโมงและ 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง
4. นำไฮโดรเจลไปอบจนแห้ง
5. ชั่งน้ำหนักไฮโดรเจล
6. คำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของแข็งคงเหลือจากสมการดังนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์ของแข็งคงเหลือ} = \frac{\text{น้ำหนักไฮโดรเจลที่อบแห้ง}}{\text{น้ำหนักไฮโดรเจลเริ่มต้น}} \times 100 \quad (3.4)$$

7. ทำซ้ำ 3 ชิ้นงาน

3.5.11 การศึกษาพฤติกรรมการดูดซับสีย้อมเบสิกบลู 9

3.5.11.1 การเตรียมกราฟมาตรฐาน (Standard Calibration curve)

1. เตรียมสารละลายเบสิกบลู 9 เข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร
2. เจือจางสารละลายให้มีความเข้มข้น 1-10 มิลลิกรัมต่อลิตร
3. นำสารละลายที่เตรียมได้ไปวัดการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-VIS spectrophotometer ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 668 นาโนเมตร [91]

4. พล็อตกราฟระหว่างค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายเบสิกลู 9 และความเข้มข้นของเบสิกลู 9 เมื่อแกน X คือความเข้มข้นเบสิกลู 9 และแกน Y คือค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานเบสิกลู 9

3.5.11.2 การทดสอบการดูดซับสีของเบสิกลู 9 ด้วยไฮโดรเจลดูดซับแบบแบดจ์

1. เติมสารละลายเบสิกลู 9 เข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ลงในไฮโดรเจลดูดซับ 0.5 กรัม
2. ปั่นกวนด้วยแท่งแม่เหล็กที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
3. ทำการแยกไฮโดรเจลดูดซับออกจากสารละลายเบสิกลู 9
4. นำสารละลายที่แยกส่วนของแข็งออก แล้วไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-VIS spectrophotometer ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 668 นาโนเมตร
5. ปรับเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นของสี้อมเป็น 100, 500, 800 และ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร
5. คำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับสี้อมจากสมการดังนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์การดูดซับ} = \frac{\text{ความเข้มข้นเริ่มต้น} - \text{ความเข้มข้นที่เหลือ}}{\text{ความเข้มข้นเริ่มต้น}} \times 100 \quad (3.5)$$

เมื่อ ความเข้มข้นเริ่มต้นคือ ความเข้มข้นสารละลายสี้อมก่อนการดูดซับ
ความเข้มข้นที่เหลือคือ ความเข้มข้นของสารละลายสี้อมหลังการดูดซับ

3.5.11.3 การศึกษาเวลาที่เข้าสู่สมดุลในการดูดซับสีของเบสิกลู 9 ด้วยไฮโดรเจลดูดซับ

1. เติมสารละลายเบสิกลู 9 เข้มข้น 800 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ลงในไฮโดรเจลดูดซับ 0.5 กรัม
2. ปั่นกวนด้วยแท่งแม่เหล็กเป็นเวลา 5, 10, 30, 45, 60, 90, 120, 180, 240, 300, 360, 420, 480, 540, 600, 660, 720 และ 780 นาที แล้วตั้งทิ้งไว้ในอุณหภูมิห้องจนครบเวลา 1440 นาที
3. ทำการแยกไฮโดรเจลดูดซับออกจากสารละลายเบสิกลู 9
4. นำสารละลายเบสิกลู 9 จากข้อ 3. ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-VIS spectrophotometer ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 668 นาโนเมตร
5. คำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับสี้อมได้ดังสมการที่ 3.5
6. คำนวณหาความสามารถในการดูดซับที่เวลาใด ๆ (q_t) ในหน่วยมิลลิกรัมต่อกรัม
7. คำนวณหาความสามารถในการดูดซับที่สมดุล (q_e) ในหน่วยมิลลิกรัมต่อกรัม ดังสมการที่ 3.6

สมการหาความสามารถในการดูดซับที่สมดุล

$$q_e = ((C_i - C_e) \times V) / W \quad (3.6)$$

เมื่อ	q_e	คือ ความสามารถในการดูดซับสีย้อมที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
	C_i	คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร)
	C_e	คือ ความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลายสีย้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร)
	V	คือ ปริมาณของสีย้อม (ลูกบาศก์เซนติเมตร)
	W	คือ น้ำหนักของตัวดูดซับ (กรัม)

8. พล็อตกราฟระหว่างเวลา (นาที) กับ $\log (q_e - q_t)$ และเวลา (นาที) กับ t/q_t เพื่อหาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับดังสมการที่ 3.7-3.8

สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง (Pseudo-first order)

$$\log (q_e - q_t) = \log q_e - k_1 t / 2.303 \quad (3.7)$$

เมื่อ	q_e	คือ ความสามารถในการดูดซับสีย้อมที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
	q_t	คือ ความสามารถในการดูดซับสีย้อม ณ เวลาใด ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
	k_1	คือ ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง (นาที ⁻¹)
	t	คือ เวลา (นาที)

สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง (Pseudo-second order)

$$t/q_t = (1/k_2 q_e^2) + (1/q_e)t \quad (3.8)$$

เมื่อ	q_e	คือ ความสามารถในการดูดซับสีย้อมที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
	q_t	คือ ความสามารถในการดูดซับสีย้อม ณ เวลาใด ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
	k_2	คือ ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง (นาที ⁻¹)
	t	คือ เวลา (นาที)

3.5.11.4 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับสีย้อมเบสิกบลู 9 ด้วยไฮโดรเจลดูดซับ

1. เติมสารละลายเบสิกบลู 9 เข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ลงในไฮโดรเจลดูดซับ 0.5 กรัม
2. ปั่นกวนด้วยแท่งแม่เหล็กโดยใช้เวลาที่เข้าสู่สมดุลจากหัวข้อ 3.5.11.3
3. ทำการแยกไฮโดรเจลดูดซับออกจากสารละลายเบสิกบลู 9

4. ทำการทดลองตามวิธีข้างต้น โดยเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเบสิกบลู 9 เป็น 100, 500, 800 และ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร
5. นำสารละลายจากข้อ 4. ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-VIS spectrophotometer ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 668 นาโนเมตร
6. คำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมได้ตั้งสมการที่ 3.5
7. พล็อตกราฟระหว่าง C_e/q_e กับ C_e และ $\log q_e$ กับ $\log C_e$ เพื่อศึกษาไอโซเทอมการดูดซับตั้งสมการที่ 3.9-3.10

สมการแลงเมียร์

$$C_e/q_e = (1/K_L q_m) + (C_e/q_m) \quad (3.9)$$

เมื่อ	C_e	คือ ความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลายสีย้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร)
	q_e	คือ ความสามารถในการดูดซับสีย้อมที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
	q_m	คือ ความสามารถในการดูดซับสีย้อมสูงสุดที่สามารถดูดซับแบบชั้นเดียว (มิลลิกรัมต่อกรัม)
	K_L	คือ ค่าคงที่แลงเมียร์ (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

สมการฟรุนดิช

$$\log q_e = \log K_F + (1/n) \log C_e \quad (3.10)$$

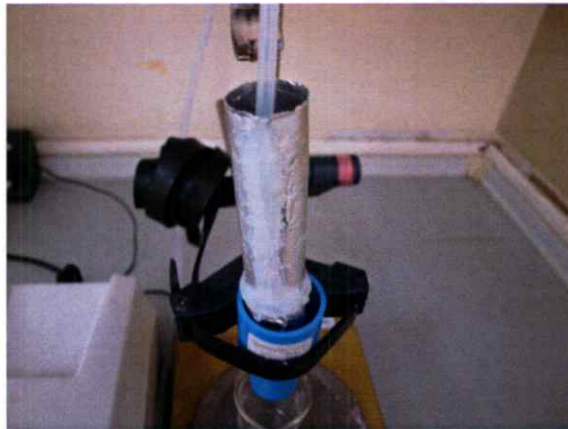
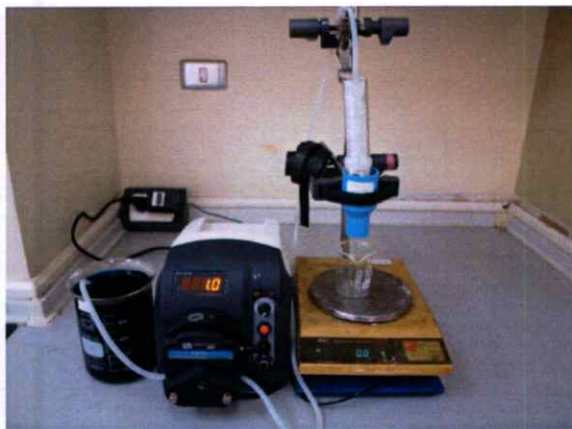
เมื่อ	C_e	คือ ความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลายสีย้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร)
	q_e	คือ ความสามารถในการดูดซับสีย้อมที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
	K_F	คือ ค่าคงที่ฟรุนดิช (ลิตรต่อมิลลิกรัม)
	n	คือ ค่าสัมประสิทธิ์จากการทดลอง

3.5.11.5 การทดสอบการดูดซับสีย้อมเบสิกบลู 9 ด้วยไฮโดรเจลดูดซับแบบต่อเนื่อง

1. หยดสารละลายเบสิกบลู 9 เข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยปั๊มดูดจ่ายของเหลวแบบรีดท่อ (Peristaltic pump) โดยใช้อัตราเร็ว 0.2 มิลลิลิตรต่อนาที ผ่านไฮโดรเจลดูดซับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร หนา 0.76 เซนติเมตร จำนวน 2 ชั้นซึ่งถูกบรรจุในคอลัมน์ที่ทำจากอะลูมิเนียมฟอยล์แล้ววางในท่อพีวีซี ดังรูปที่ 3.2 และ 3.3

2. เก็บสารละลายตัวอย่างทุก ๆ 5 มิลลิลิตร พร้อมบันทึกเวลาจนครบ 200 มิลลิลิตร

3. นำสารละลายจากที่เก็บไว้ทุก ๆ 5 มิลลิลิตร ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-VIS spectrophotometer ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 668 นาโนเมตร
4. คำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมได้ดังสมการที่ 3.5



รูปที่ 3.2 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทดสอบการดูดซับสีย้อมเบสิกบลู 9 ด้วยไฮโดรเจลดูดซับแบบต่อเนื่อง



รูปที่ 3.3 ไฮโดรเจลดูดซับที่บรรจุในคอลัมน์

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมวัสดุไฮโดรเจลดูดซับจากเจลาติน และมอนต์มอริลโลไนต์ หรือมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยไคโตซาน เพื่อประยุกต์ใช้ในงานกำจัดสีย้อม เนื่องจากในปัจจุบันมีการใช้งานสีย้อมเป็นจำนวนมาก ซึ่งก่อมลพิษโดยผลิตน้ำเสียที่มีสีย้อมปนเปื้อน โรงงานหลายแห่งได้มีการลดเลเยอร์การบำบัดน้ำเสีย ส่งผลเสียต่อสมดุลนิเวศวิทยา และสุขภาพของมนุษย์ จึงจำเป็นต้องมีวิธีการบำบัดน้ำทิ้งที่เหมาะสม มีประสิทธิภาพ ต้นทุนต่ำ เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และสามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ พบว่าการกำจัดสีย้อมด้วยวิธีการดูดซับเป็นวิธีที่ต้นทุนต่ำ กระบวนการผลิตไม่ยุ่งยากซับซ้อน และง่ายต่อการประยุกต์ใช้งาน ในงานวิจัยนี้เลือกใช้เจลาติน และมอนต์มอริลโลไนต์ในการเตรียมเป็นไฮโดรเจลดูดซับเนื่องจากเป็นวัสดุที่ได้จากธรรมชาติ หาง่าย และต้นทุนต่ำ โดยได้มีการดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยไคโตซานเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม

4.1 การเตรียมมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยไคโตซาน

การเตรียมมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยไคโตซานอ้างอิงจากงานวิจัยของชุตติมา แกมกิจ [6] โดยศึกษาการเตรียมวัสดุประกอบนาโนเคลียร์ระหว่างไคโตซานละลายน้ำกับมอนต์มอริลโลไนต์สำหรับประยุกต์ใช้ในงานดูดซับสีย้อม ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้มีการสังเคราะห์มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยไคโตซานจากสารละลายมอนต์มอริลโลไนต์ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และสารละลายไคโตซาน 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร โดยถ่ายสารละลายไคโตซานไปยังสารละลายมอนต์มอริลโลไนต์ผ่านเครื่องปั๊มดูดจ่ายของเหลวแบบรีดท่อด้วยอัตราเร็วในการเติมเท่ากับ 1.0 มิลลิลิตรต่อนาที พร้อมปั่นกวนภายใต้อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จนกระทั่งสารละลายไคโตซานหมดจากนั้นนำไปล้างด้วยน้ำกลั่น โดยนำเข้าเครื่องหมุนเหวี่ยงเพื่อแยกส่วนของสารละลายออกจากตะกอนที่ความเร็วรอบ 3,500 รอบต่อนาที เป็นจำนวน 3 ครั้ง แล้วนำตะกอนมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยไคโตซานที่สังเคราะห์ได้ไปแช่แข็งที่อุณหภูมิ -40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน และนำเข้าเครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งเป็นเวลา 2 วัน หรือจนกระทั่งแห้ง จากนั้นนำมาบดด้วยโม่บดสารและกรองผ่านตะแกรงกรอง พบว่าได้ผงมอนต์มอริลโลไนต์ที่มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีเทาขาวดังรูปที่ 4.1 เก็บรักษาตัวอย่างในเดซิเคเตอร์ (ความชื้นสัมพัทธ์ = 38 ± 5 เปอร์เซ็นต์) ก่อนนำไปตรวจวิเคราะห์ และใช้งาน



รูปที่ 4.1 ผงมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยไคโตซาน

4.1.1 การวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาคโดยใช้หลักการกระเจิงแสงของเลเซอร์

การวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคมอนต์มอริลโลไนต์ที่ถูกดัดแปรด้วยไคโตซาน พบว่ามีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 8-777 ไมโครเมตร และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 206 ± 133 ไมโครเมตร ดังแสดงในภาคผนวก ก.1

4.1.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD

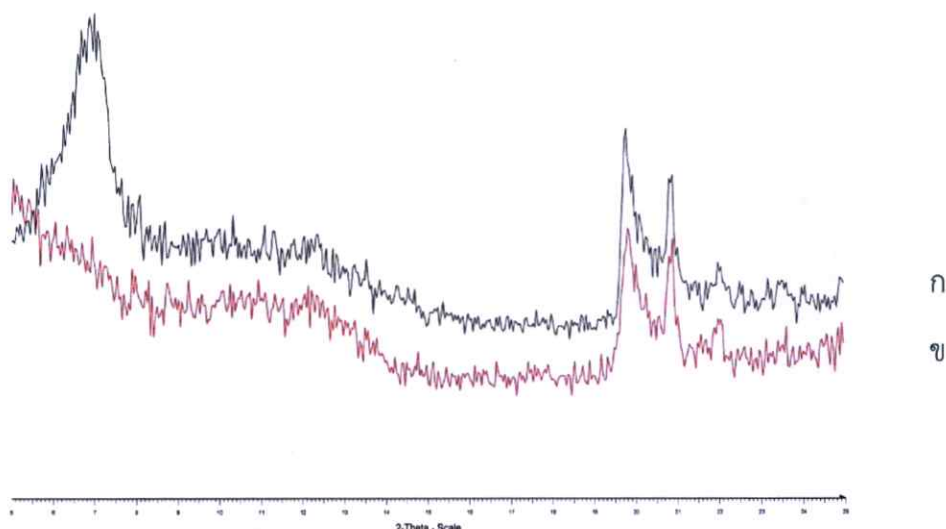
สูตรการคำนวณหาระยะห่างระหว่างระนาบ 001 ของมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยไคโตซาน (CS-M) แสดงดังสมการที่ 4.1

จากสมการของ Braggs

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (4.1)$$

เมื่อ	n	คือ ค่าคงที่จำนวนเต็มบวก ($n = 1, 2, 3, \dots$)
	λ	คือ ความยาวของคลื่นรังสีเอ็กซ์ (มีค่าเท่ากับ 1.54 อังสตรอม)
	d	คือ ระยะห่างระหว่างระนาบอะตอมของผลึก
	θ	คือ มุมตกกระทบเทียบกับระนาบอะตอมของผลึก (องศา)

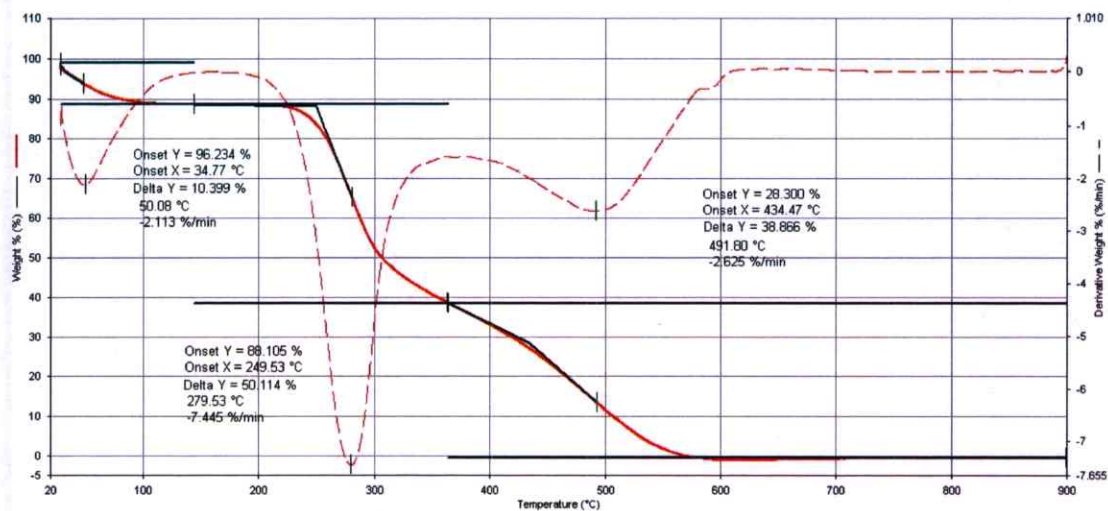
เมื่อทำการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์มอนต์มอริลโลไนต์ (MMT) และมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยไคโตซาน (CS-MMT) ด้วยเทคนิค XRD โดยใช้มุม 2θ เท่ากับ 5 ถึง 25 องศา พบว่า MMT ปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 6.88 องศา ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาระยะห่างระหว่างระนาบ 001 (d_{001}) จากสมการที่ 4.1 ได้เท่ากับ 1.29 นาโนเมตร ส่วน CS-MMT พบว่าปรากฏพีค d_{001} ที่ตำแหน่ง 2θ ในตำแหน่งต่ำกว่าพีคของ MMT แสดงให้เห็นว่า CS-MMT มีระยะห่างระหว่างระนาบผลึกที่มากกว่าซึ่งเกิดจากการที่ไคโตซานสามารถแทรกเข้าไปอยู่ระหว่างชั้นของ MMT นอกจากนี้การลดลงของความเข้มพีค CS-MMT แสดงถึงความเป็นผลึกภายในโครงสร้างที่ลดลงเมื่อเทียบกับ MMT ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.2 และภาคผนวก ข



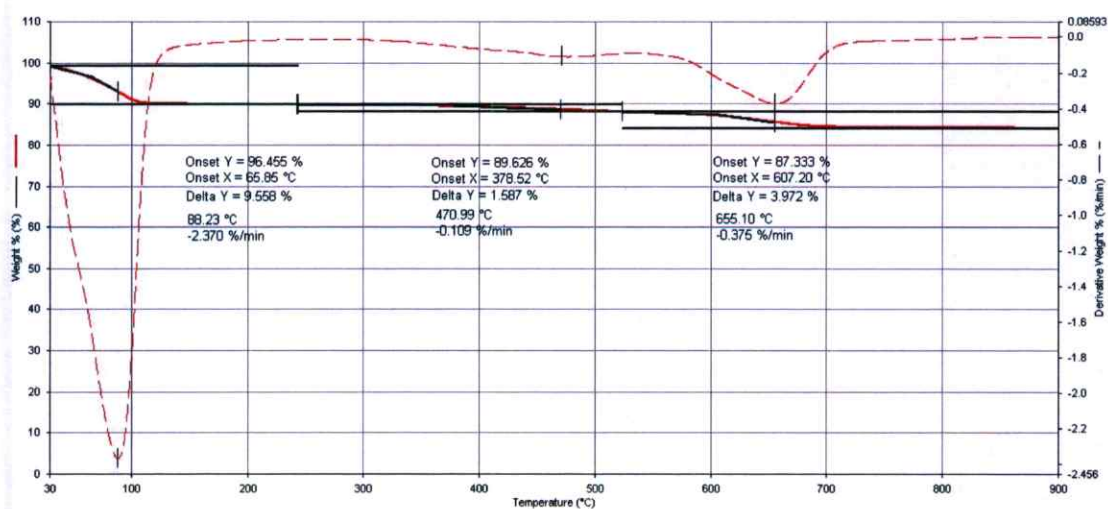
รูปที่ 4.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ (ก) มอนต์มอริลโลไนต์ และ (ข) มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยไคโตซาน

4.1.3 การวิเคราะห์ปริมาณการสลายตัวขององค์ประกอบด้วยเทคนิค TGA

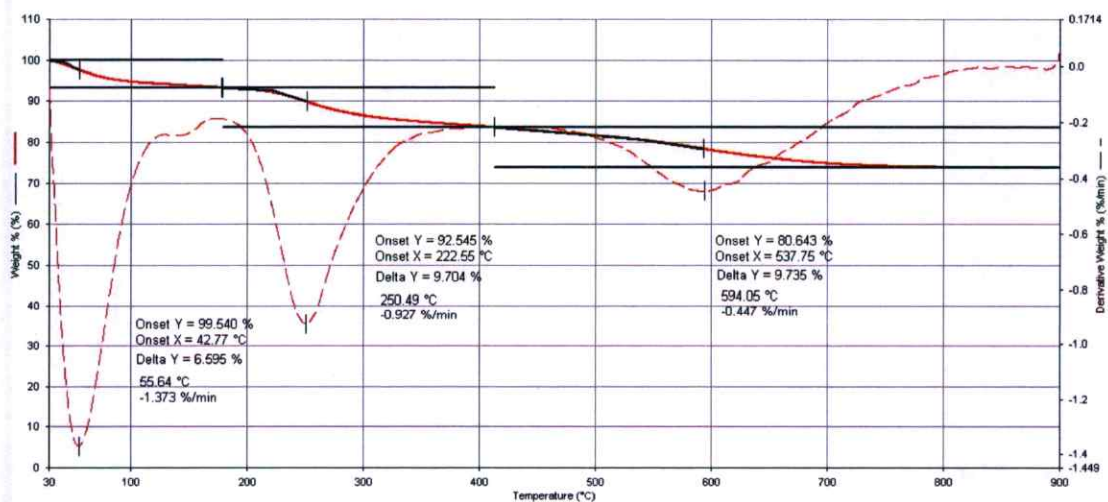
เมื่อนำไคโตซาน, มอนต์มอริลโลไนต์ (MMT) และมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยไคโตซาน (CS-MMT) มาตรวจวิเคราะห์หาปริมาณการสลายตัวขององค์ประกอบด้วยเทคนิค TGA โดยทำการทดสอบในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 900 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน และอัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.3-4.5 พบว่าไคโตซานสามารถเกิดการสลายตัวได้เกือบ 100 เปอร์เซ็นต์ที่อุณหภูมิประมาณ 600 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิการสลายตัวที่สูงกว่า 900 องศาเซลเซียสเป็นของมอนต์มอริลโลไนต์เท่านั้น ซึ่ง MMT เกิดการสลายตัวสามช่วงอุณหภูมิ โดยช่วงแรกเป็นการสลายตัวของน้ำที่คิดเป็น 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่วนช่วงที่สอง และสามเป็นการสลายตัวของสารอินทรีย์ที่แทรกอยู่ในโครงสร้าง MMT รวมทั้งหมด 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่วนสารอนินทรีย์ไม่สามารถสลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 900 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่า MMT ธรรมชาติมีปริมาณสารที่ไม่สลายตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่า 900 องศาเซลเซียส 84 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่วน CS-MMT มอนต์มอริลโลไนต์มีการดัดแปรโครงสร้างด้วยไคโตซานจึงพบว่ามีปริมาณสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น 14 เปอร์เซ็นต์ และปริมาณสารอนินทรีย์ลดลง 11 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเมื่อเทียบกับ MMT ดังแสดงในรูปที่ 4.4-4.5 และตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.3 เทอร์โมแกรมของโคโคไซน



รูปที่ 4.4 เทอร์โมแกรมของมอนต์มอริลโลไนต์



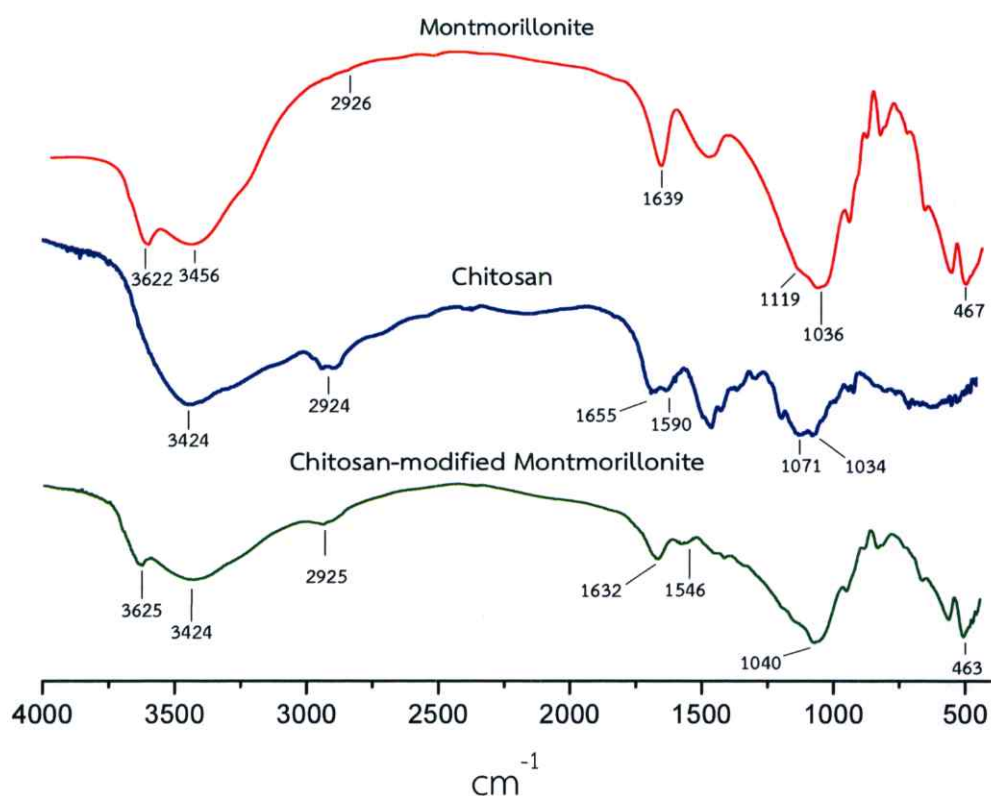
รูปที่ 4.5 เทอร์โมแกรมของมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยโคโคไซน

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ MMT และ CS-MMT ด้วยเทคนิค TGA

ตัวอย่าง	ความชื้น (%)	สารอินทรีย์ (%)	สารอนินทรีย์ (%)
ไคโตซาน	10	89	1
MMT	10	6	84
CS-MMT	7	20	73

4.1.4 การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค FT-IR

การตรวจวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FT-IR แสดงแถบการดูดกลืนแสง ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.6 และแสดงค่าตำแหน่งต่าง ๆ ดังตารางที่ 4.2-4.4 โดยพบการเคลื่อนย้ายพีคการสั่นแบบงอของพันธะ N-H ภายในโครงสร้างของไคโตซานที่ 1590 cm^{-1} ไปยัง 1546 cm^{-1} เมื่อถูกดัดแปรด้วยไคโตซานเนื่องจากเกิดการแทรกตัวของไคโตซานภายในโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ โดยการยึดเหนี่ยวที่แข็งแรงของไคโตซานบนพื้นผิวของแร่ดิน ซึ่งเกิดจากพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่อะมิโนและหมู่ไฮดรอกซิลของไคโตซานกับหมู่ไฮดรอกซิลในแผ่นซิลิเกตของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์



รูปที่ 4.6 FTIR สเปกตร้าของการดูดกลืนแสงของไคโตซาน, มอนต์มอริลโลไนต์ และมอนต์มอริลโลไนต์ที่ถูกดัดแปรด้วยไคโตซาน

ตารางที่ 4.2 พีคที่สำคัญของมอนต์มอริลโลไนต์

ν (cm^{-1})	หมู่ฟังก์ชัน
3622	การสั่นแบบยืดของพันธะ O-H
3456	การสั่นแบบยืดของพันธะ H-O-H
2926	การสั่นแบบยืดของพันธะ C-H
1639	การสั่นแบบยืดของพันธะ Si-O
1119-1036	การสั่นแบบยืดของพันธะ Si-O
467	การสั่นแบบงอของพันธะ Si-O-Si

ตารางที่ 4.3 พีคที่สำคัญของโคโตซาน

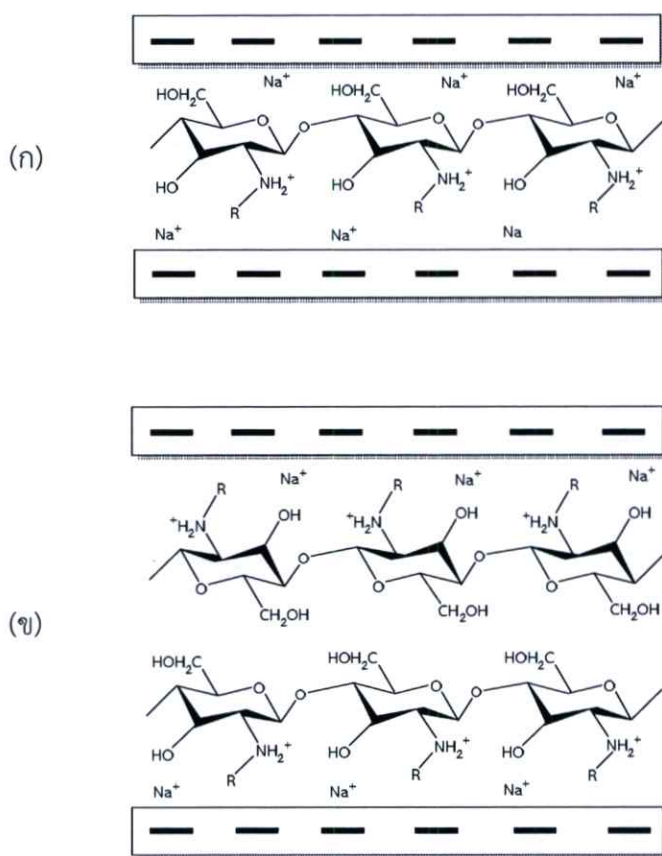
ν (cm^{-1})	หมู่ฟังก์ชัน
3424	การสั่นแบบยืดของพันธะ N-H
2924	การสั่นแบบยืดสมมาตรของพันธะ C-H
1655	การสั่นแบบยืดของพันธะ C=O
1590	การสั่นแบบงอของพันธะ N-H
1071	การสั่นแบบยืดของพันธะ C-O
1034	การสั่นแบบยืดของพันธะ C-O

ตารางที่ 4.4 พีคที่สำคัญของมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยโคโตซาน

ν (cm^{-1})	หมู่ฟังก์ชัน
3625	การสั่นแบบยืดของพันธะ O-H
3424	การสั่นแบบยืดของพันธะ H-O-H
2925	การสั่นแบบยืดของพันธะ C-H ของ Aliphatic hydrocarbon
1632	การสั่นแบบงอของพันธะ H-O-H
1546	แสดงการย้ายของพีคจาก 1590 cm^{-1} มาอยู่ในตำแหน่งที่ต่ำกว่า ซึ่งเป็นการสั่นแบบงอของพันธะ N-H เนื่องจากเกิดการแทรกตัวของโคโตซานภายในโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์
1040	การสั่นแบบยืดของพันธะ Si-O
463	การสั่นแบบงอของพันธะ Si-O-Si

จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ซึ่งปรากฏพีค d_{001} ที่ตำแหน่ง 2θ ในตำแหน่งต่ำกว่าพีคของ MMT แสดงให้เห็นว่า CS-MMT มีระยะห่างระหว่างระนาบผลึกที่มากกว่า นอกจากนี้การลดลง

ของความเข้มข้น CS-MMT แสดงถึงความเป็นผลึกภายในโครงสร้างที่ลดน้อยลงเมื่อเทียบกับ MMT จากนั้นเมื่อศึกษาด้วยเทคนิค TGA พบว่า CS-MMT มอนต์มอริลโลไนต์มีการดัดแปรโครงสร้างด้วยไคโตซานเนื่องจาก CS-MMT มีปริมาณสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น 14 เปอร์เซ็นต์ และปริมาณของสารอินทรีย์ลดลง 11 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเมื่อเทียบกับ MMT นอกจากนี้ยังศึกษาด้วยเทคนิค FT-IR พบว่าเกิดการเคลื่อนย้ายฟิสิกการสั่นแบบงอของพันธะ N-H ภายในโครงสร้างของไคโตซานที่ 1590 cm^{-1} ไปยัง 1546 cm^{-1} ซึ่งอนุมานได้ว่าไคโตซานสามารถแทรกตัวหรือค้ำยันอยู่ระหว่างชั้นของมอนต์มอริลโลไนต์โดยเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่อะมิโน และหมู่ไฮดรอกซิลของไคโตซานกับหมู่ไฮดรอกซิลในแผ่นซิลิเกตของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ ซึ่งมีแบบจำลองการแทรกตัวแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 การแทรกตัวของไคโตซานบริเวณระหว่างชั้นของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ (ก) แบบชั้นเดียว (ข) แบบสองชั้น [82]

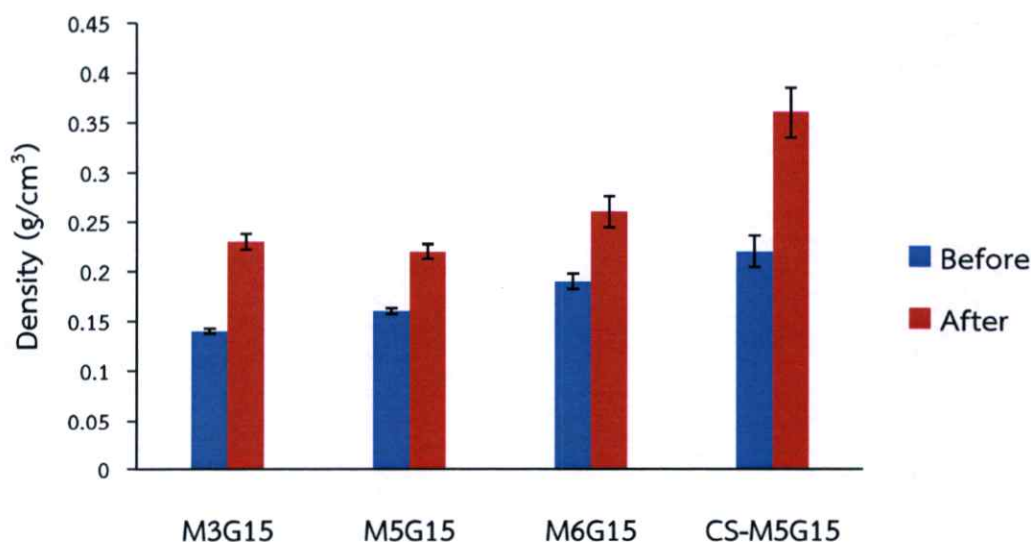
4.2 การเตรียมไฮโดรเจลดูดซับ

การเตรียมไฮโดรเจลดูดซับได้พัฒนาวิธีการโดยอ้างอิงจากงานวิจัยของ Rathna, G.V.N. และคณะ [89] โดยเตรียมไฮโดรเจลจากเจลาติน และมอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปรหรือไม่ดัดแปรด้วยไคโตซาน ภายใต้อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส หลังจากปั่นกวจนเป็นเนื้อเดียวกันแล้วนำไปใส่แม่พิมพ์และแช่ตู้เย็นที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาทีเพื่อให้เกิดเจล จากนั้นนำไปแช่แข็งที่

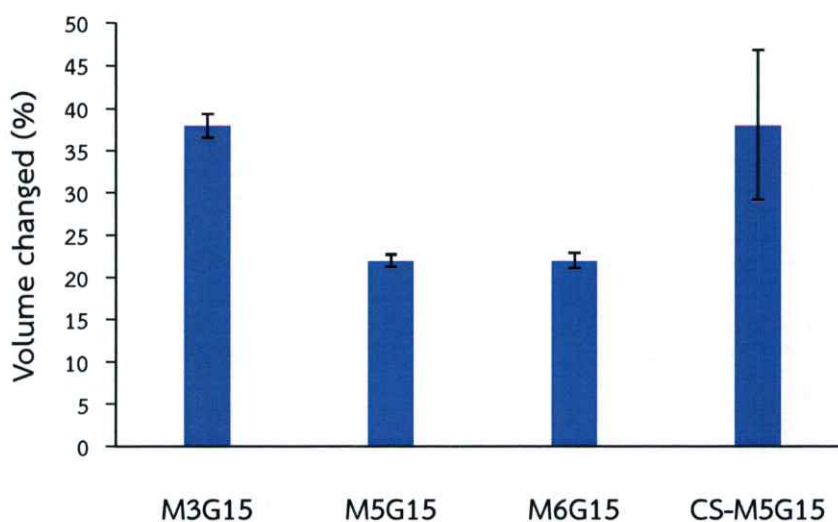
อุณหภูมิ -40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วันก่อนนำไปเข้าเครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งเป็นเวลา 2 วัน เพื่อให้ได้ไฮโดรเจลที่มีรูพรุน จากนั้นนำไฮโดรเจลที่ได้ไปแช่ในสารละลายกลูตารัลดีไฮด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เป็นเวลา 4 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งไฮโดรเจลก่อน และหลังการเชื่อมโยงมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4.8 และมีขนาดดังแสดงในภาคผนวก ค โดยพบว่าการเชื่อมโยงส่งผลให้ไฮโดรเจลมีความหนาแน่นที่มากขึ้นจาก 0.14, 0.16, 0.19 และ 0.22 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ไปเป็น 0.23, 0.22, 0.26 และ 0.36 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร สำหรับไฮโดรเจลสูตร M3G15, M5G15, M6G15 และ CS-M5G15 ตามลำดับ (รูปที่ 4.9) ส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการหดตัวเล็กน้อย แสดงผลในรูปของเปอร์เซ็นต์ปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงไปดังแสดงในรูปที่ 4.10 โดย M5G15 และ M6G15 เกิดการหดตัวประมาณ 22 เปอร์เซ็นต์ ส่วน M3G15 และ CS-M5G15 เกิดการหดตัวประมาณ 38 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.8 ตัวอย่างไฮโดรเจลก่อน และหลังผ่านการเชื่อมโยงด้วยสารละลายกลูตารัลดีไฮด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 4.9 ความหนาแน่นของไฮโดรเจลก่อน และหลังเชื่อมโยงด้วยสารละลายกลูตารัลดีไฮด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ปริมาตร 20 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง



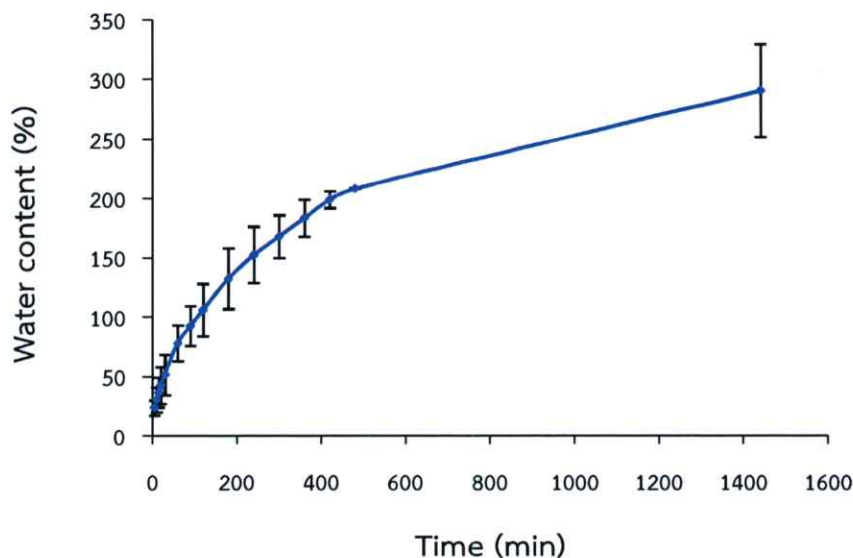
รูปที่ 4.10 ปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงไปของไฮโดรเจลหลังผ่านการเชื่อมโยงด้วยสารละลายกลูตารัลดีไฮด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ปริมาตร 20 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง

4.3 สมบัติการต้านทานน้ำของไฮโดรเจลดูดซับ

สมบัติการต้านทานน้ำของไฮโดรเจลดูดซับศึกษาได้จากพฤติกรรมการดูดซับน้ำในไฮโดรเจล และปริมาณของแข็งคงเหลือภายหลังการแช่ตัวอย่างในน้ำกลั่นเป็นเวลา 1 และ 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง พบว่าไฮโดรเจลดูดซับทุกสูตรมีพฤติกรรมการดูดซับน้ำไม่แตกต่างกัน ซึ่งมีพฤติกรรมการดูดซับน้ำแสดงดังรูปที่ 4.11 และภาคผนวก ง ส่วนความสามารถในการต้านทานน้ำ พบว่าไฮโดรเจลดูดซับทุกสูตรมีค่าปริมาณของแข็งคงเหลือที่สูงกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าใกล้เคียงกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.5 และภาคผนวก จ

ตารางที่ 4.5 พฤติกรรมการดูดซับน้ำ และปริมาณของแข็งคงเหลือหลังผ่านการแช่ในน้ำกลั่นเป็นเวลา 1 และ 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง

สูตร	ปริมาณน้ำในไฮโดรเจล (%)		ปริมาณของแข็งคงเหลือ (%)	
	1 ชั่วโมง	24 ชั่วโมง	1 ชั่วโมง	24 ชั่วโมง
M3G15	72	239	95	94
M5G15	78	290	97	97
M6G15	79	245	96	94
CS-M5G15	95	234	95	93



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงพฤติกรรม การดูดซับน้ำในไฮโดรเจลสูตร M5G15 ที่อุณหภูมิห้อง

4.4 การศึกษาสัณฐานวิทยาของไฮโดรเจลดูดซับ

4.4.1 ปริมาณรูพรุนของไฮโดรเจลดูดซับ

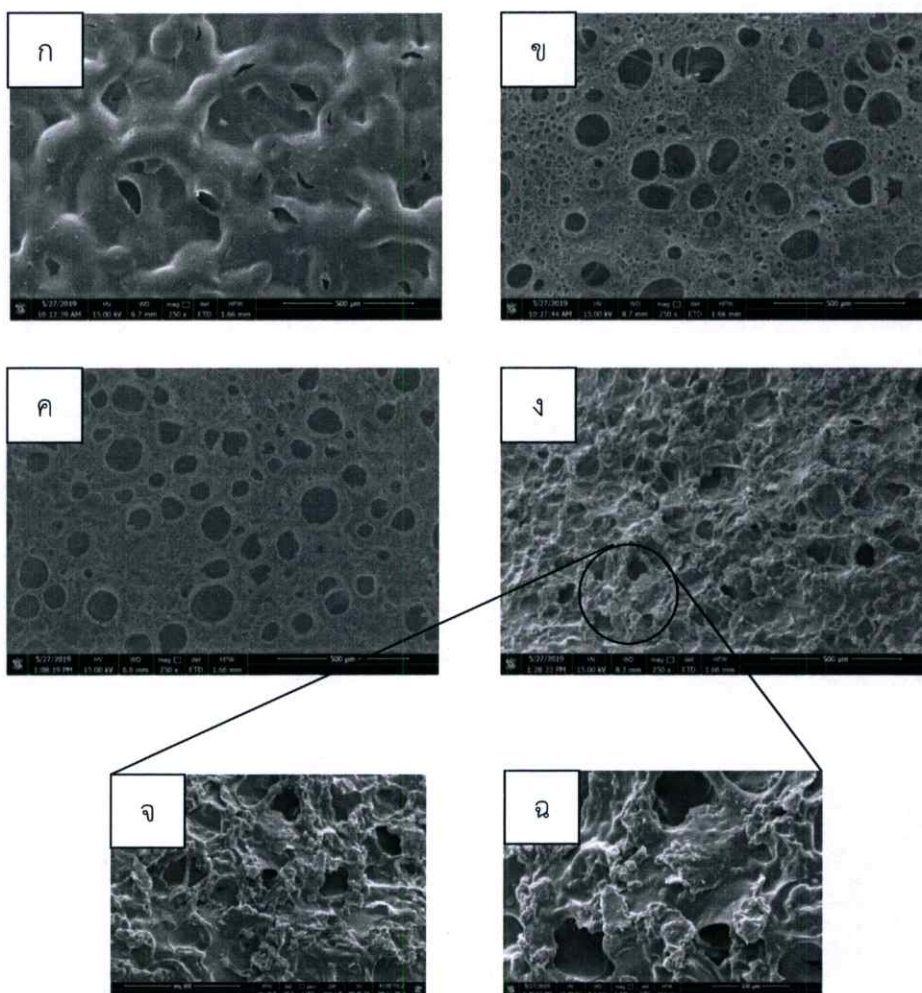
ศึกษาหาปริมาณรูพรุนของไฮโดรเจลดูดซับ โดยศึกษาจากการแช่ตัวอย่างลงในไอโซโพรพานอลเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.6 พบว่า M3G15, M5G15 และ M6G15 มีปริมาณรูพรุนเพิ่มขึ้นตามปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ที่เพิ่มมากขึ้น คาดว่าการเพิ่มปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์เปรียบเสมือนการเพิ่มอนุภาคของแข็ง ทำให้ความแข็งแรงของเนื้อไฮโดรเจลเพิ่มขึ้น เมื่อเกิดการก่อเจลจึงส่งผลให้มีปริมาณรูพรุนจำนวนมากกระจายทั่วทั้งเมทริกซ์ โดยคำนวณได้จากสมการที่ 3.2 ส่วนไฮโดรเจลสูตร CS-M5G15 มีปริมาณรูพรุนน้อยที่สุด เนื่องจากหลังผ่านการเชื่อมโยงทางเคมีด้วยสารละลายกลูตารัลดีไฮด์จึงเกิดการหดตัว และทำให้ไฮโดรเจลยุบตัวส่งผลให้ไฮโดรเจลมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น และปริมาตรเปลี่ยนแปลงอย่างมาก

4.4.2 ภาพพื้นผิวของไฮโดรเจลดูดซับด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM)

การศึกษาสัณฐานวิทยาของไฮโดรเจลดูดซับสูตร M3G15, M5G15, M6G15 และ CS-M5G15 ที่บริเวณพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด โดยใช้กำลังขยายเท่ากับ 250 เท่า พบว่า M5G15 (รูปที่ 4.12 ข) และ M6G15 (รูปที่ 4.12 ค) มีปริมาณรูพรุนจำนวนมาก ในขณะที่ M3G15 (รูปที่ 4.12 ก) และ CS-M5G15 (รูปที่ 4.12 ง) มีปริมาณรูพรุนน้อยกว่า นอกจากนี้ยังพบว่า CS-M5G15 เกิดลักษณะของฟิล์มเคลือบปิดบนพื้นผิว ทำให้รูพรุนมีขนาดเล็กลง (รูปที่ 4.12 ง, จ และ ฉ)

ตารางที่ 4.6 ปริมาณรูพรุนของไฮโดรเจลดูดซับ

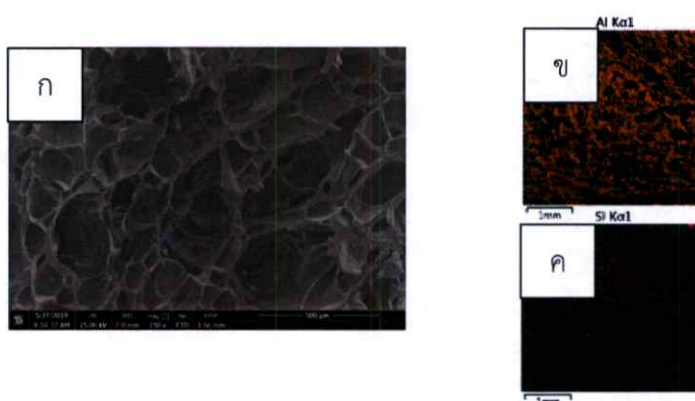
สูตร	ปริมาณรูพรุน (%)
M3G15	31.13 ± 6.60
M5G15	45.51 ± 8.70
M6G15	48.73 ± 2.30
CS-M5G15	25.65 ± 2.38



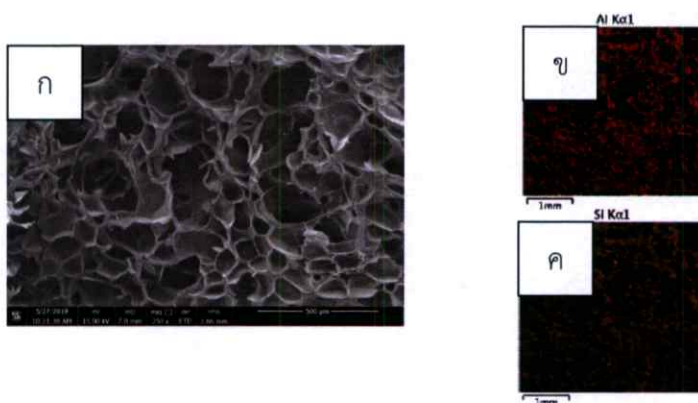
รูปที่ 4.12 ภาพพื้นผิวของไฮโดรเจลดูดซับสูตร (ก) M3G15, (ข) M5G15, (ค) M6G15 (ง) CS-M5G15 ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่กำลังขยาย 250 เท่า (จ) CS-M5G15 ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่กำลังขยาย 500 เท่า และ (ฉ) CS-M5G15 ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1000 เท่า

4.4.3 ภาพภาคตัดขวางของไฮโดรเจลดูดซับด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM)

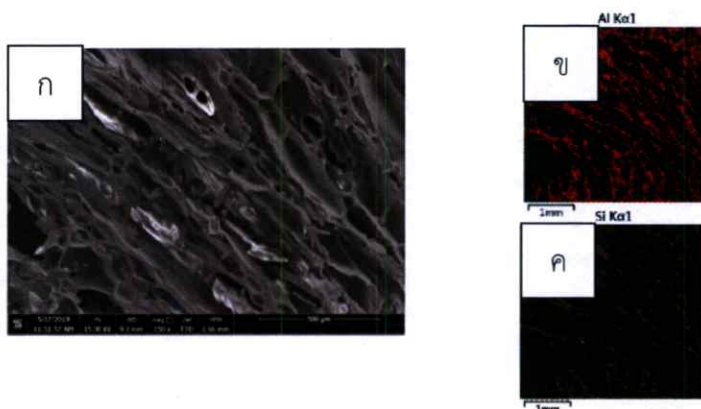
นำไฮโดรเจลดูดซับสูตร M3G15, M5G15, M6G15 และ CS-M5G15 มาศึกษาภาคตัดขวางด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่กำลังขยาย 250 เท่า แสดงในรูปที่ 4.13-4.16 พบว่า M3G15, M5G15 และ M6G15 มีรูพรุนเป็นจำนวนมาก ส่วน CS-M5G15 มีรูพรุนที่ไม่สม่ำเสมอ และเกิดลักษณะของฟิล์มเคลือบปิดที่พื้นผิว ทำให้รูพรุนน้อยลง จากนั้นเมื่อใช้เทคนิค EDS เพื่อดูการกระจายตัวของธาตุ Al และ Si ซึ่งเป็นองค์ประกอบของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ พบว่า M3G15, M5G15 และ M6G15 มีการกระจายตัวของธาตุ Al และ Si ที่สม่ำเสมอ ส่วน CS-M5G15 มีการกระจายตัวของธาตุ Al และ Si ที่ด้านล่างของตัวอย่างมากกว่าด้านบน แสดงให้เห็นว่าอาจเกิดการตกตะกอนของมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยไคโตซานในขณะที่ทำการขึ้นรูปเจลเนื่องจากสารละลายมีความหนืดต่ำ



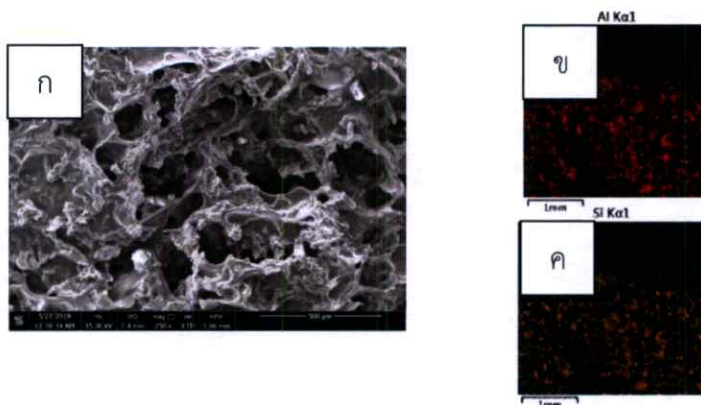
รูปที่ 4.13 ภาพภาคตัดขวางของไฮโดรเจลดูดซับสูตร M3G15; ก) ภาพภาคตัดขวาง, ข) ภาพการกระจายตัวของธาตุ Al และ ค) ภาพการกระจายตัวของธาตุ Si ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่กำลังขยาย 250 เท่า



รูปที่ 4.14 ภาพภาคตัดขวางของไฮโดรเจลดูดซับสูตร M5G15; ก) ภาพภาคตัดขวาง, ข) ภาพการกระจายตัวของธาตุ Al และ ค) ภาพการกระจายตัวของธาตุ Si ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่กำลังขยาย 250 เท่า



รูปที่ 4.15 ภาพภาคตัดขวางของไฮโดรเจลดูดซับสูตร M6G15; ก) ภาพภาคตัดขวาง, ข) ภาพการกระจายตัวของธาตุ Al และ ค) ภาพการกระจายตัวของธาตุ Si ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่กำลังขยาย 250 เท่า



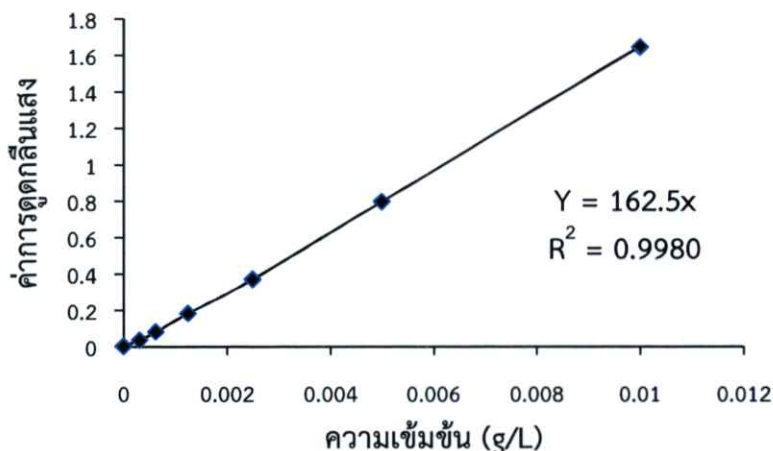
รูปที่ 4.16 ภาพภาคตัดขวางของไฮโดรเจลดูดซับสูตร CS-M5G15; ก) ภาพภาคตัดขวาง, ข) ภาพการกระจายตัวของธาตุ Al และ ค) ภาพการกระจายตัวของธาตุ Si ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่กำลังขยาย 250 เท่า

4.5 การศึกษาประสิทธิภาพ และพฤติกรรมการดูดซับสีเบสิกลู 9

การศึกษาประสิทธิภาพ และพฤติกรรมการดูดซับสีย้อมเบสิกลู 9 ทำได้โดยนำไฮโดรเจลดูดซับจากเจลาติน และมอนต์มอริลโลไนต์หรือมอนต์มอริลโลไนต์ที่ถูกดัดแปรด้วยไคโตซานมาดูดซับสีย้อมที่ความเข้มข้นต่าง ๆ จากนั้นนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น (λ_{max}) เท่ากับ 668 นาโนเมตร แล้วนำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้มาคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับเพื่อนำไปหาจลนพลศาสตร์ และไอโซเทอมการดูดซับ โดยใช้สมการที่ได้จากกราฟมาตรฐานของสีย้อมเบสิกลู 9

4.5.1 กราฟเทียบมาตรฐานของสารละลายสีเบสิกลู 9

กราฟเทียบมาตรฐานของสารละลายสีเบสิกลู 9 ทำได้โดยเตรียมสารละลายสีเบสิกลู 9 เจือจางในน้ำกลั่นที่ความเข้มข้น 1-10 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 668 นาโนเมตร ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (y) และความเข้มข้นในหน่วยกรัมต่อลิตร (x) คือ $y = 162.5x$ โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9980 ดังแสดงในรูปที่ 4.17 และภาคผนวก ฉ

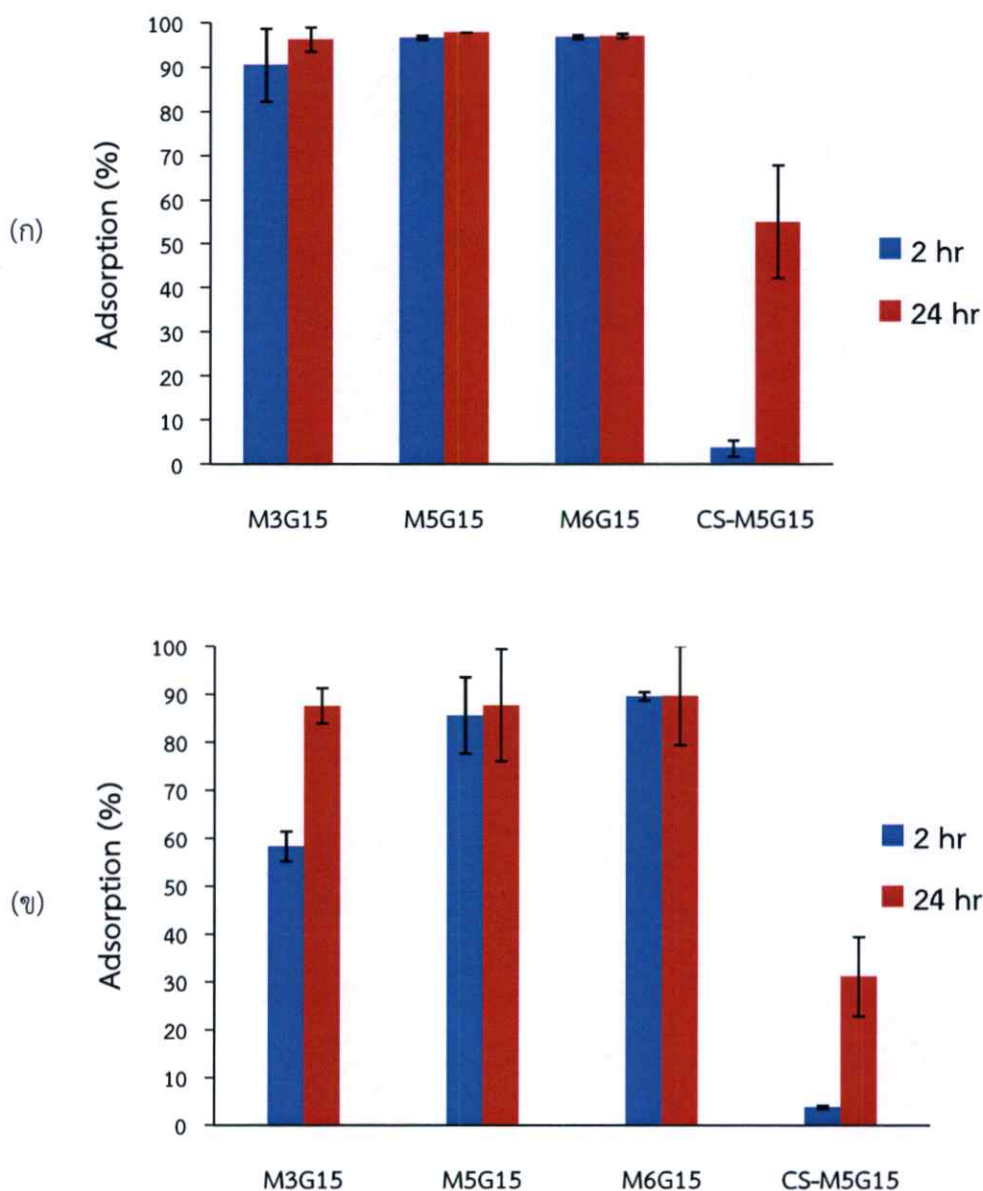


รูปที่ 4.17 กราฟเทียบมาตรฐานของสารละลายสีเบสิกลู 9 ที่ความยาวคลื่น 668 นาโนเมตร

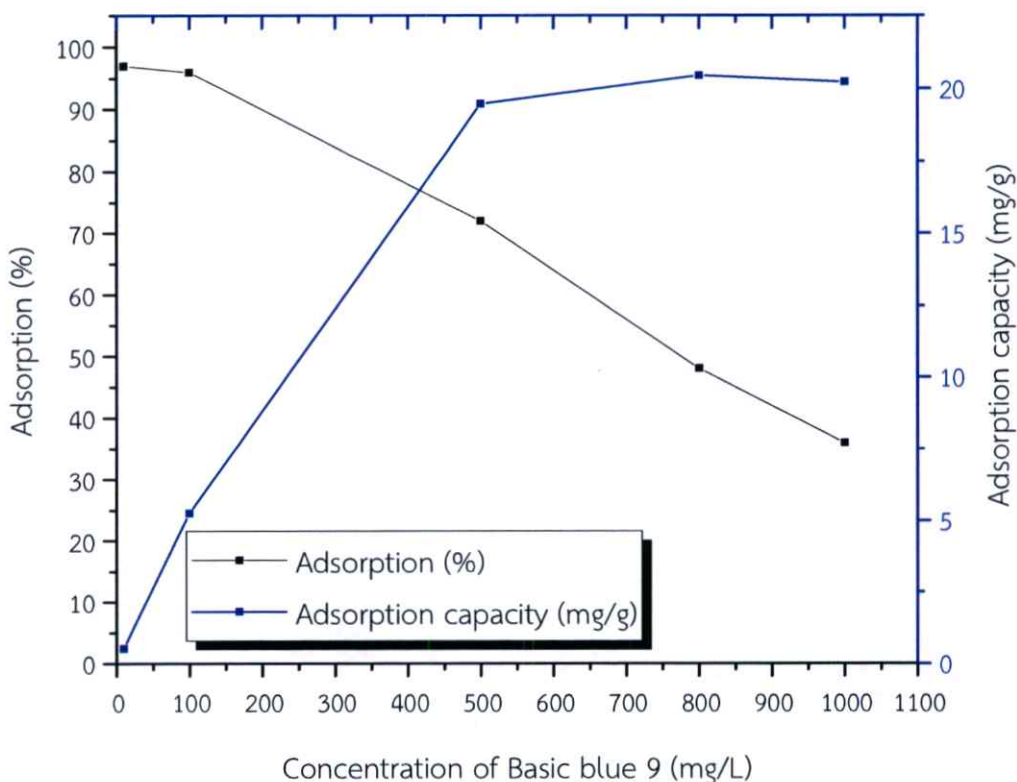
4.5.2 การศึกษาความสามารถการดูดซับของไฮโดรเจลดูดซับแบบแบดซ์

การศึกษาความสามารถการดูดซับแบบแบดซ์ทำได้โดยนำไฮโดรเจลดูดซับรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด $2 \times 2 \times 0.7$ ลูกบาศก์เซนติเมตร ใส่ลงในสารละลายสีเบสิกลู 9 ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการปั่นกวนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นตั้งทิ้งไว้จนครบ 24 ชั่วโมงแล้วนำสารละลายหลังผ่านการดูดซับไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 668 นาโนเมตร เพื่อหาความเข้มข้นที่เหลือจากการเทียบกราฟมาตรฐาน จากนั้นคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมได้ดังสมการที่ 3.5 พบว่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมของไฮโดรเจลดูดซับสูตร M3G15, M5G15 และ M6G15 ขึ้นอยู่กับปริมาณของมอนต์มอริลโลไนต์ โดยพบว่าเมื่อปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์มากขึ้นจะส่งผลให้ความสามารถการดูดซับเพิ่มมากขึ้น โดยไฮโดรเจลดูดซับสูตร M6G15 มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับสูงสุด รองลงมาคือ M5G15 และ M3G15 ตามลำดับ ซึ่ง M3G15, M5G15 และ M6G15 มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับที่เวลา 24 ชั่วโมง สูงกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ CS-M5G15 ดูดซับสีย้อมได้ 55 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.18 (ก) จากนั้นเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นเป็น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า M3G15, M5G15 และ M6G15 มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับที่เวลา 24 ชั่วโมง สูงกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ CS-M5G15 ดูดซับสีย้อมได้ต่ำกว่า 40 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.18 (ข) แล้วเปลี่ยนความเข้มข้นเป็น 500, 800 และ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นที่มีต่อการดูดซับสีย้อมเบสิกลู 9 ของไฮโดรเจลดูดซับ โดยสูตรไฮโดรเจลดูดซับที่นำมาศึกษาคือ M5G15 ซึ่งเป็นสูตรที่มีรูปร่างเสถียรมากที่สุด เนื่องจากหลังผ่านการเชื่อมโยงแล้ว M5G15 เกิดการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่น

และปริมาตรต่ำที่สุดเมื่อทำการเปรียบเทียบกับสูตรอื่น ๆ จากการทดลองพบว่าร้อยละการดูดซับลดลงเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเพิ่มมากขึ้นจาก 96 เปอร์เซ็นต์ ไปเป็น 72, 48 และ 36 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมจาก 100 มิลลิกรัมต่อลิตรไปเป็น 500, 800 และ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ และความสามารถการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 10-500 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยจะเริ่มเข้าสู่สมดุลการดูดซับที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังแสดงในรูปที่ 4.19



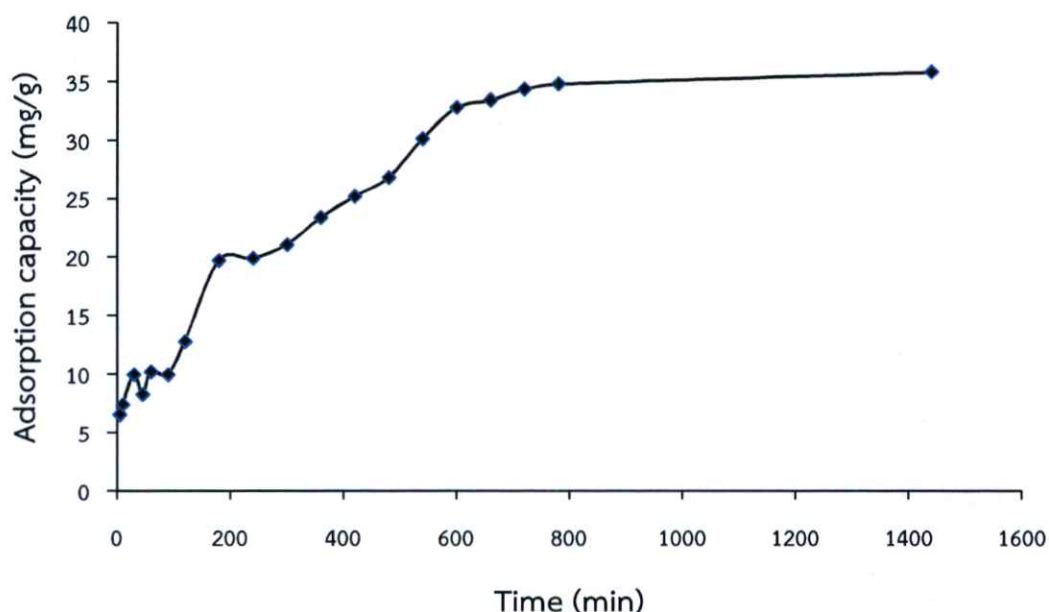
รูปที่ 4.18 ร้อยละการดูดซับสีย้อมเบสิกบลู 9 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น (ก) 10 และ (ข) 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ค่าพีเอชเท่ากับ 7 ที่อุณหภูมิห้อง ด้วยไฮโดรเจลดูดซับสูตร M3G15, M5G15, M6G15 และ CS-M5G15 ตามลำดับ ปริมาณ 0.5 กรัม เป็นเวลา 2 และ 24 ชั่วโมง



รูปที่ 4.19 ร้อยละ และความสามารถการดูดซับสีย้อมเบสิคบลู 9 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10, 100, 500, 800 และ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 7 ด้วยไฮโดรเจลดูดซับสูตร M5G15 ปริมาณ 0.5 กรัม เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

4.5.3 การศึกษาเวลาที่เข้าสู่สมดุลในการดูดซับ

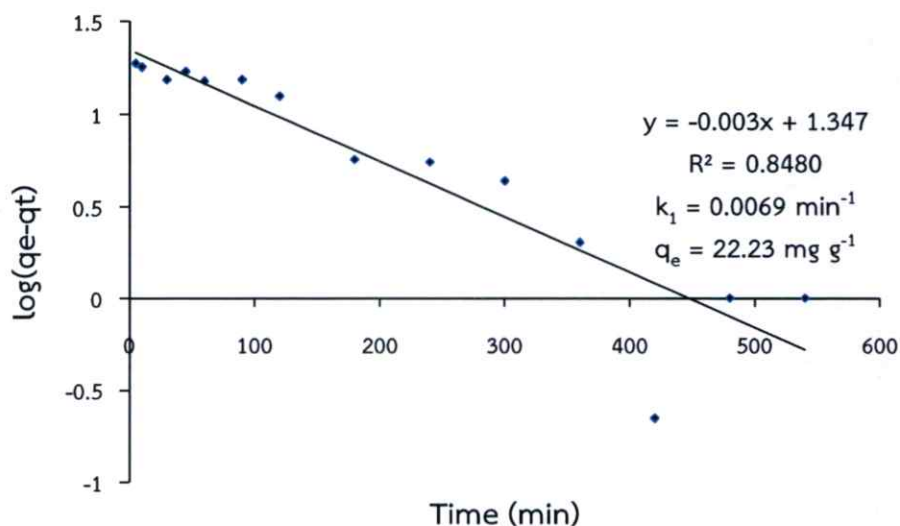
การศึกษาเวลาที่เข้าสู่สมดุลการดูดซับ ทำได้โดยศึกษาจากความสัมพันธ์ของระยะเวลาที่มีต่อความสามารถการดูดซับสีย้อมเบสิคบลู 9 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 800 มิลลิกรัมต่อลิตร ของไฮโดรเจลดูดซับสูตร M5G15 โดยในการทดลองมีการปรับเปลี่ยนระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับเป็น 5, 10, 30, 45, 60, 90, 120, 180, 240, 300, 360, 420, 480, 540, 600, 660, 720, 780 และ 1440 นาที ตามลำดับ จากนั้นนำสีย้อมที่ผ่านการดูดซับในทุกช่วงเวลาดังกล่าวไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ที่มีความยาวคลื่น 668 นาโนเมตร เพื่อหาความเข้มข้นที่เหลือจากการเทียบกราฟมาตรฐาน แล้วคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมได้ดังสมการที่ 3.5 จากผลการทดลองพบว่าเมื่อระยะเวลาในการดูดซับมากขึ้น จะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเบสิคบลู 9 เพิ่มมากขึ้น โดยมีอัตราเร็วในการดูดซับสูงมากในช่วง 600 นาทีแรก จนกระทั่งระยะเวลาของการดูดซับประมาณ 720 นาทีเป็นต้นไป อัตราการดูดซับจะเริ่มคงที่จนเข้าสู่สมดุล เนื่องจากมีค่าความสามารถในการดูดซับไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับสีย้อมเบสิคบลู 9 โดยใช้ไฮโดรเจลสูตร M5G15 คือ 720 นาทีเป็นต้นไป ดังแสดงในรูปที่ 4.20



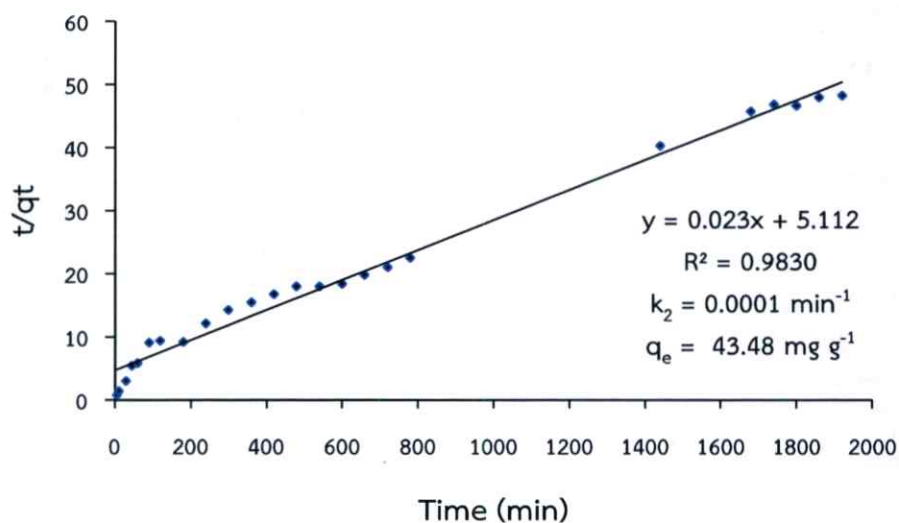
รูปที่ 4.20 ผลของระยะเวลาที่มีต่อความสามารถในการดูดซับสีย้อมเบสสีบลู 9 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 800 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยไฮโดรเจลดูดซับสูตร M5G15

4.5.4 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ

เมื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับความสามารถในการดูดซับสีเบสสีบลู 9 ที่ความเข้มข้น 800 มิลลิกรัมต่อลิตร ในช่วงเวลา 0-1440 นาที โดยพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลา (นาที) กับ $\log(q_e - q_t)$ เพื่อนำมาเขียนความสัมพันธ์ของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (Pseudo-first order) ได้สมการเส้นตรงคือ $y = -0.003x + 1.347$ และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.8480 ดังรูปที่ 4.21 และพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลา (นาที) กับ t/q_t เพื่อนำมาเขียนความสัมพันธ์ของปฏิกิริยาอันดับสอง (Pseudo-second order) ได้สมการเส้นตรงคือ $y = 0.023x + 5.112$ และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.9830 ดังรูปที่ 4.22 ดังนั้นไฮโดรเจลดูดซับสูตร M5G15 มีจลนพลศาสตร์แบบปฏิกิริยาอันดับสองเนื่องจากกราฟมีความเป็นเส้นตรงมากกว่า ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ใกล้เคียง 1 มากกว่าแบบปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ดังนั้นการดูดซับสีเบสสีบลู 9 ด้วยไฮโดรเจลดูดซับสูตร M5G15 จึงเป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงทางเคมี ซึ่งมีค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง (k_2) เท่ากับ 0.0001 นาที^{-1} และความสามารถการดูดซับที่สมดุลเท่ากับ 43.48 มิลลิกรัมต่อกรัม



รูปที่ 4.21 แบบจำลองจลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของการดูดซับสีเบสิกลู 9 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 800 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ของไฮโดรเจลดูดซับสูตร M5G15

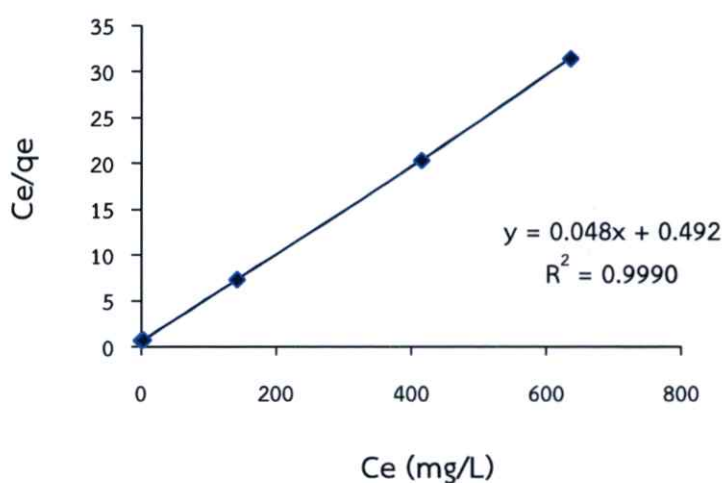


รูปที่ 4.22 แบบจำลองจลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาอันดับสองของการดูดซับสีเบสิกลู 9 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 800 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ของไฮโดรเจลดูดซับสูตร M5G15

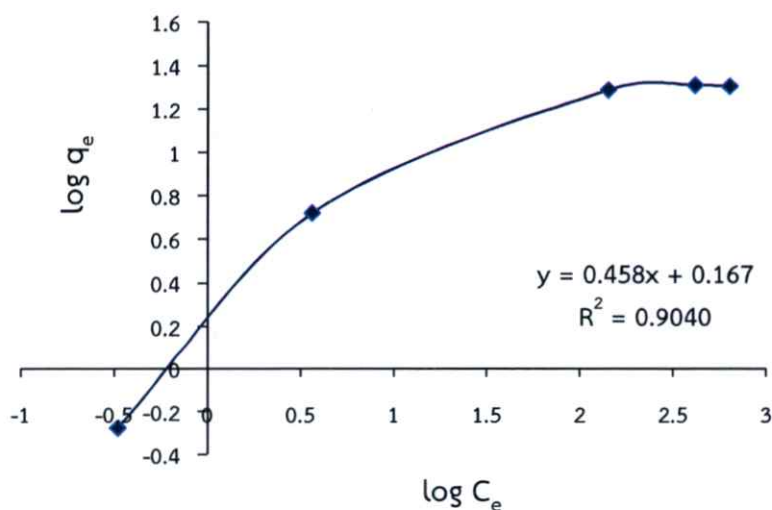
4.5.5 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ

จากการทดลองหาไอโซเทอมการดูดซับสีย้อมเบสิกลู 9 ด้วยไฮโดรเจลดูดซับสูตร M5G15 เมื่อสีย้อมมีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 10, 100, 500, 800 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ มาป็นกวนโดยใช้เวลาที่เข้าสู่สมดุลคือ 1440 นาที ซึ่งได้จากหัวข้อที่ 4.5.3 พบว่าไฮโดรเจลดูดซับสูตร M5G15 มีความสามารถในการดูดซับสีเบสิกลู 9 เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจาก 0.5-20.0 มิลลิกรัมต่อกรัม เมื่อสีย้อมมีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 10-500 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังจากนั้นจะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ จนคงที่ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมเท่ากับ 800 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังแสดงในรูปที่ 4.19 และจากการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับโดยพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง C_e/q_e กับ C_e

เพื่อนำมาศึกษาสมการแลงเมียร์ และพล็อตกราฟระหว่าง $\log q_e$ กับ $\log C_e$ เพื่อนำมาศึกษาสมการฟรุนดิช พบว่าพฤติกรรมการดูดซับของไฮโดรเจลดูดซับสูตร M5G15 เป็นไปตามสมการแลงเมียร์ โดยมีสมการเส้นตรงคือ $y = 0.048x + 0.492$ และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.9990 ในขณะที่สมการฟรุนดิชมีสมการเส้นตรงคือ $y = 0.458x + 0.167$ และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.9040 ดังแสดงในรูปที่ 4.23 และ 4.24 โดยแสดงค่าคงที่ของทั้งสองสมการดังตารางที่ 4.7 ซึ่งพฤติกรรมการดูดซับที่เป็นไปตามสมการแลงเมียร์สามารถอธิบายได้ว่าเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption) ซึ่งเกิดจากการปกคลุมของสีย้อมที่พื้นผิวของไฮโดรเจลดูดซับในสัดส่วนที่มากขึ้น เมื่อถึงความเข้มข้นหนึ่งจะอิ่มตัวอย่างสมบูรณ์โดยไม่มีการดูดซับใด ๆ เพิ่มขึ้นอีก ถึงแม้ว่าความเข้มข้นจะเพิ่มสูงกว่านี้ก็ตาม โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด (q_m) เท่ากับ 20.83 มิลลิกรัมต่อกรัม และค่าคงที่แลงเมียร์เท่ากับ 0.0976 ซึ่งเกี่ยวข้องกับพลังงานของการดูดซับ



รูปที่ 4.23 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ของการดูดซับสีเบสิกลู 9 ด้วยไฮโดรเจลดูดซับสูตร M5G15



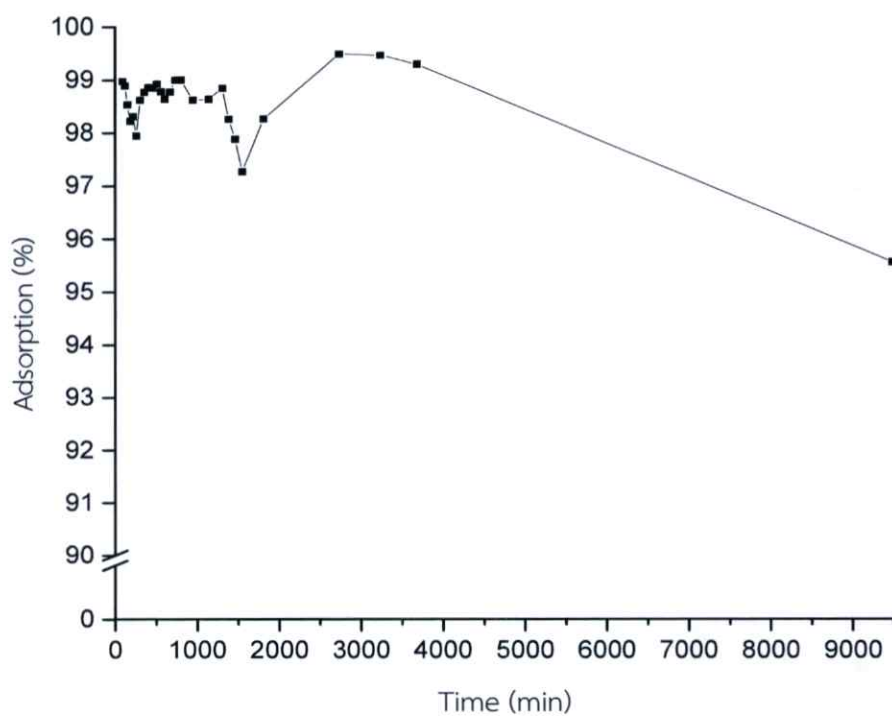
รูปที่ 4.24 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดิชของการดูดซับสีเบสิกลู 9 ด้วยไฮโดรเจลดูดซับสูตร M5G15

ตารางที่ 4.7 ค่าคงที่จากสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ และฟรุนดลิช

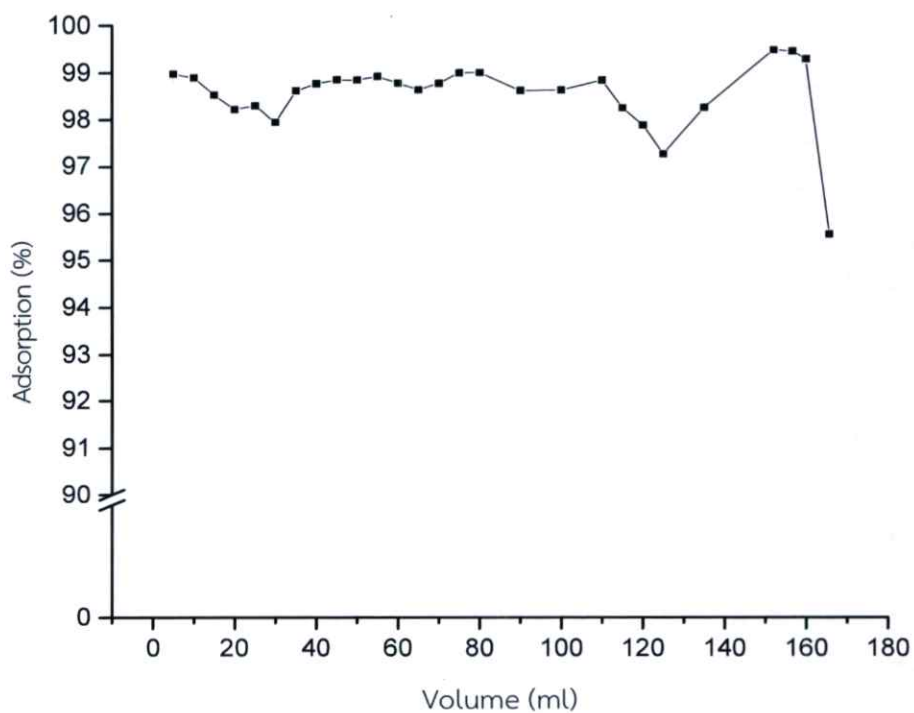
ค่าคงที่สมการแลงเมียร์		
R^2	K_L	q_m (mg/g)
0.9990	0.0976	20.83
ค่าคงที่สมการฟรุนดลิช		
R^2	K_F	n
0.9040	1.4689	2.18

4.6 การศึกษาความสามารถการดูดซับของไฮโดรเจลดูดซับแบบต่อเนื่อง

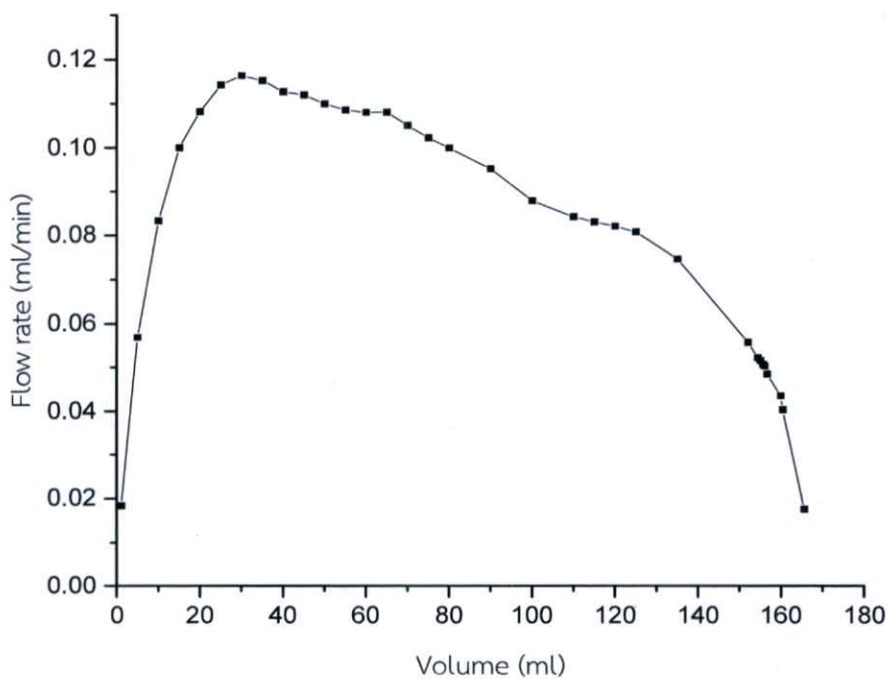
เมื่อนำไฮโดรเจลดูดซับสูตร M5G15 จำนวน 2 ชิ้น มาจำลองเป็นคอลัมน์เพื่อศึกษาการดูดซับแบบต่อเนื่องดังรูปที่ 3.2-3.3 โดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้อง อัตราเร็วการไหลดสีย้อมผ่านคอลัมน์ด้วยเครื่องปั๊มดูดจ่ายของเหลวแบบรีดท่อเท่ากับ 0.1 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่าสีย้อมเริ่มมีการไหลผ่านคอลัมน์หยุดแรกที่เวลา 42 นาที และใช้เวลาไหลผ่านจนมีปริมาตรครบ 1 มิลลิลิตรแรกที่เวลา 1 ชั่วโมง โดยเก็บตัวอย่างทุก ๆ 5 มิลลิลิตร และบันทึกเวลา ซึ่งไฮโดรเจลดูดซับมีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับสูงกว่า 97 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะเวลาทดสอบ 0 ถึง 3981 นาที (160 มิลลิลิตร) หลังจากนั้นจึงเริ่มลดประสิทธิภาพลง โดยพบว่าสีย้อมหลังผ่านการดูดซับมีสีที่เข้ม และขุ่นมากขึ้น โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับที่เวลา 9478 นาที (166 มิลลิลิตร) เท่ากับ 95 เปอร์เซ็นต์ ดังรูปที่ 4.25-4.26 นอกจากนี้เมื่อทำการศึกษาอัตราการไหลของสีย้อมผ่านไฮโดรเจลดูดซับที่ช่วงเวลาต่าง ๆ แล้วคำนวณเป็นค่าอัตราการไหลผ่าน (มิลลิลิตรต่อนาที) พบว่ามีอัตราการไหลผ่านสูงสุดเท่ากับ 0.12 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราการไหลผ่านต่ำสุดเท่ากับ 0.02 มิลลิลิตรต่อนาที ดังรูปที่ 4.27 ซึ่งอัตราการไหลผ่านสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเวลา 0-258 นาที (ปริมาณสีย้อมไหลผ่านเท่ากับ 0-30 มิลลิลิตรแรก) หลังจากนั้นอัตราการไหลผ่านจะลดลงอย่างต่อเนื่อง ดังแสดงในรูปที่ 4.27-4.28 แสดงให้เห็นว่าไฮโดรเจลดูดซับไม่เหมาะสมที่จะใช้งานในลักษณะคอลัมน์เนื่องจากมีอัตราการไหลผ่านต่ำ จึงต้องใช้เวลาในการดูดซับนาน



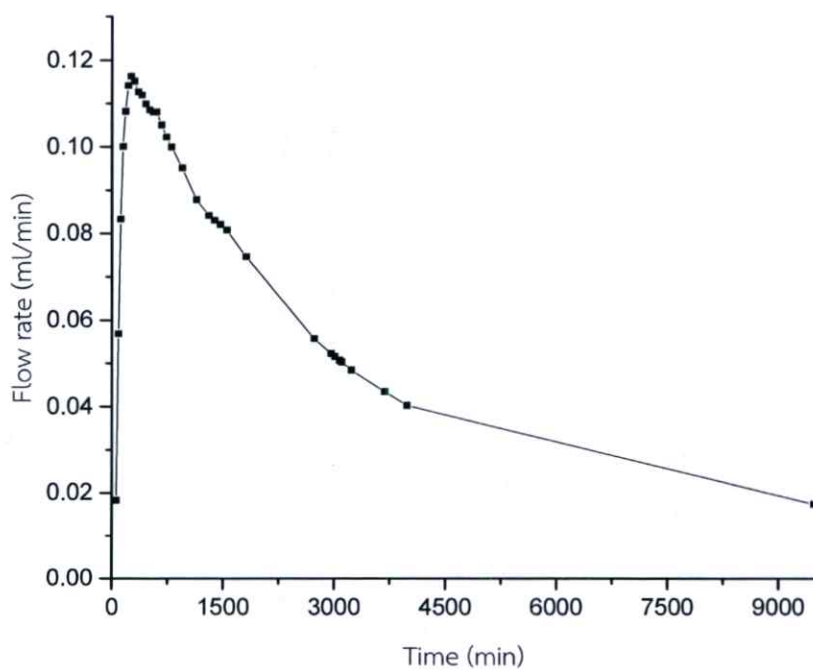
รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับ และเวลา



รูปที่ 4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับ และปริมาตร



รูปที่ 4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของสีย้อมผ่านไฮโดรเจลดูดซับ และ ปริมาตรของสีย้อม



รูปที่ 4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของสีย้อมผ่านไฮโดรเจลดูดซับ และเวลาที่ ใช้ในการดูดซับผ่านคอลัมน์

บทที่ 5

สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลงานวิจัย

ไฮโดรเจลดูดซับที่เตรียมจากเจลาตินผสมมอนต์มอริลโลไนต์ (MMT) หรือมอนต์มอริลโลไนต์ที่ถูกดัดแปรด้วยไคโตซาน (CS-M) มี 4 ตัวอย่างคือ M3G15, M5G15, M6G15 ซึ่งมีอัตราส่วนระหว่างมอนต์มอริลโลไนต์ต่อเจลาตินเท่ากับ 1:5, 1:3 และ 2:5 โดยน้ำหนักตามลำดับ และ CS-M5G15 ซึ่งมีอัตราส่วนระหว่างมอนต์มอริลโลไนต์ที่ถูกดัดแปรด้วยไคโตซานต่อเจลาตินเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก การตรวจวิเคราะห์ของ CS-M พบว่ามีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 8-777 ไมโครเมตร และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 206 ± 133 ไมโครเมตร (MMT ~ 74 ไมโครเมตร) ผลจาก XRD พบว่า MMT ปรากฏ 2θ ที่ตำแหน่งต่ำกว่า MMT แสดงให้เห็นว่า CS-M มีระยะห่างระหว่างระนาบผลึกมากกว่าจากการที่ไคโตซานสามารถแทรกเข้าไปอยู่ระหว่างชั้นของ MMT นอกจากนี้ความเข้มพีกที่ลดลงยังแสดงถึงความเป็นผลึกภายในโครงสร้างของ CS-M ที่ลดลงเมื่อเทียบกับ MMT จากการศึกษาการสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA พบว่า CS-M มีปริมาณการสสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น 14 เปอร์เซ็นต์ และปริมาณสารอนินทรีย์ลดลง 11 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับ MMT แสดงให้เห็นว่าไคโตซานสามารถเกิดปฏิกิริยากับ MMT ได้เป็น CS-M และองค์ประกอบทางเคมีจากเทคนิค FT-IR พบว่า CS-M เกิดการย้ายพิกัดการสั่นแบบของพันธะ N-H จาก 1590 cm^{-1} ไปเป็น 1546 cm^{-1} แสดงถึงการแทรกตัวของไคโตซานในโครงสร้างมอนต์มอริลโลไนต์

การศึกษาหาปริมาณรูพรุนหลังผ่านการแช่ในไฮโซโพรพานอลเป็นเวลา 24 ชั่วโมงพบว่า M6G15 มีเปอร์เซ็นต์ปริมาณรูพรุนมากที่สุดเท่ากับ 48.73 ± 2.30 รองลงมาคือ M5G15 และ M3G15 (45.51 ± 8.70 และ 31.13 ± 6.60 ตามลำดับ) ซึ่งมีปริมาณรูพรุนมากขึ้นตามปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ที่เพิ่มขึ้น ส่วน CS-M5G15 มีปริมาณรูพรุนน้อยที่สุดโดยมีค่าเท่ากับ 25.65 ± 2.38 เปอร์เซ็นต์ จากการศึกษาสัณฐานวิทยาของไฮโดรเจลดูดซับด้วยเทคนิค SEM พบว่าพื้นผิวของ M5G15 และ M6G15 มีปริมาณรูพรุนเป็นจำนวนมาก ในขณะที่ M3G15 และ CS-M5G15 มีปริมาณรูพรุนเล็กน้อย ซึ่งในสูตร CS-M5G15 สามารถเห็นกลุ่มอนุภาคของมอนต์มอริลโลไนต์ที่ถูกดัดแปรด้วยไคโตซานกระจายอยู่ในเมทริกซ์ โดยมีลักษณะเป็นฟิล์มเคลือบทั่วพื้นผิวเมื่อศึกษาการกระจายตัวของมอนต์มอริลโลไนต์หรือมอนต์มอริลโลไนต์ที่ถูกดัดแปรด้วยไคโตซานที่บริเวณภาคตัดขวางพบว่า สูตร M3G15, M5G15 และ M6G15 มีการกระจายตัวของมอนต์มอริลโลไนต์ที่สม่ำเสมอ ส่วนสูตร CS-M5G15 มีการกระจายตัวของมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยไคโตซานที่ไม่สม่ำเสมอ โดยศึกษาจากการกระจายตัวของธาตุ Al และ Si ซึ่งเป็นองค์ประกอบของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์

พฤติกรรมการดูดซับสีย้อมเบสิกลู 9 พบว่า M3G15, M5G15 และ M6G15 มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับที่เวลา 24 ชั่วโมงสูงกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ CS-M5G15 มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมต่ำกว่า 40 เปอร์เซ็นต์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และร้อยละการดูดซับสีย้อมลดลงจาก 96 เปอร์เซ็นต์ ไปเป็น 72, 48 และ 36 เปอร์เซ็นต์ เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเปลี่ยนไปเป็น 500, 800 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และความสามารถการดูดซับ

เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมเท่ากับ 10-500 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยจะเริ่มเข้าสู่สมดุลการดูดซับที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นศึกษาหาเวลาที่เข้าสู่สมดุลเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมเท่ากับ 800 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่ามีอัตราการดูดซับสูงในช่วง 600 นาทีแรก และเริ่มคงที่จนเข้าสู่สมดุลที่เวลาประมาณ 720 นาที จลนพลศาสตร์การดูดซับสารละลายสีย้อมเบสิกบลู 9 ที่ความเข้มข้น 800 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ M5G15 พบว่ามีจลนพลศาสตร์แบบปฏิกิริยาอันดับสอง จึงเป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงทางเคมี ซึ่งมีค่าคงที่ปฏิกิริยาเท่ากับ 0.0001 นาที^{-1} และความสามารถการดูดซับที่สมดุลเท่ากับ 43.48 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับไอโซเทอมการดูดซับสารละลายสีย้อมเบสิกบลู 9 พบว่าพฤติกรรมของการดูดซับสีย้อมเป็นไปตามสมการแลงเมียร์ โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด (q_m) เท่ากับ 20.83 มิลลิกรัมต่อกรัม และค่าคงที่แลงเมียร์เท่ากับ 0.0976

ผลการดูดซับแบบต่อเนื่องโดยจำลองเป็นคอลัมน์ที่บรรจุไฮโดรเจลดูดซับสูตร M5G15 เมื่อสารละลายสีย้อมมีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าสีย้อมเริ่มมีการไหลผ่านคอลัมน์หยดแรกที่เวลา 42 นาที และใช้เวลาไหลผ่านจนมีปริมาตรครบ 1 มิลลิลิตร แรกทีเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งไฮโดรเจลดูดซับมีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับสูงกว่า 97 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะเวลาทดสอบ 0 ถึง 3981 นาที หลังจากนั้นจึงเริ่มลดประสิทธิภาพลง โดยพบว่าสีย้อมหลังผ่านการดูดซับมีสีที่เข้มและขุ่นมากขึ้น มีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับที่เวลา 9478 นาที เท่ากับ 95 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้เมื่อศึกษาอัตราการไหลของสีย้อมผ่านไฮโดรเจลดูดซับที่ช่วงเวลาต่าง ๆ พบว่ามีอัตราการไหลผ่านสูงสุดเท่ากับ 0.12 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราการไหลผ่านต่ำสุดเท่ากับ 0.02 มิลลิลิตรต่อนาที ซึ่งอัตราเร็วการไหลผ่านสูงขึ้นอย่างมากในช่วงเวลา 0-258 นาที โดยมีปริมาณสีย้อมไหลผ่านเท่ากับ 0-30 มิลลิลิตรแรก หลังจากนั้นอัตราเร็วการไหลผ่านจะลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อมีปริมาณสีย้อม และเวลาการทดสอบมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าไฮโดรเจลดูดซับไม่เหมาะสมที่จะใช้งานในลักษณะคอลัมน์เนื่องจากมีอัตราการไหลผ่านต่ำ ซึ่งใช้เวลาในการดูดซับนาน

สรุปได้ว่า CS-M5G15 ไม่เหมาะสมในการนำมาใช้กำจัดสีย้อมเนื่องจากมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมต่ำ และไฮโดรเจลดูดซับทุกสูตรไม่เหมาะสมในการใช้งานลักษณะคอลัมน์โดยวิธีการหยดสารละลายสีย้อมด้วยเครื่องปั๊มดูดจ่ายของเหลวแบบรีดท่อผ่านคอลัมน์ที่มีการบรรจุไฮโดรเจลดูดซับเนื่องจากมีอัตราการไหลผ่านที่ต่ำมาก โดยสูตร M5G15 มีความเหมาะสมในการนำมาพัฒนาเป็นวัสดุดูดซับสีย้อมมากที่สุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาหาชนิดของพอลิเมอร์ที่สามารถนำมาผสมกับมอนต์มอริลโลไนต์ที่ถูกดัดแปรด้วยโคโตซาน โดยสามารถคงรูปร่างได้ เพื่อพัฒนาเป็นวัสดุดูดซับ
2. ศึกษาหาวิธีการเตรียมไฮโดรเจลดูดซับมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยโคโตซาน โดยทำให้เกิดการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ
3. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถการดูดซับสีย้อม เช่น ชนิดสีย้อม อัตราเร็วของการปั่นกววน ปริมาณของตัวดูดซับ และค่าพีเอชของสารละลายสีย้อม เป็นต้น รวมถึงการนำไฮโดรเจลดูดซับกลับมาใช้ใหม่ และการคำนวณหาความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุแคตไอออน (Cation exchange capacity, CEC) ของมอนต์มอริลโลไนต์หรือมอนต์มอริลโลไนต์ที่ถูกดัดแปรด้วยโคโตซาน เพื่อนำไปพัฒนาไฮโดรเจลดูดซับ

4. การขัดพื้นผิวของไฮโดรเจลดูดซับเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิว และรูพรุนก่อนนำไปทดสอบความสามารถการดูดซับสีย้อม เพื่อนำไปสู่ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมที่ดีขึ้น
5. เพิ่มความดันในคอลัมน์ขณะทดสอบการดูดซับแบบต่อเนื่อง

เอกสารอ้างอิง

- [1] Fan, Y. Liu, H.J. Zhang, Y. and Chen, Y. 2015. "Adsorption of anionic MO or cationic MB from MO/MB mixture using polyacrylonitrile fiber hydrothermally treated with hyper-branched polyethylenimine." *Journal of hazardous Materials*. 283(1) : 321-328.
- [2] Bulut, Y. and Karaer, H. 2015. "Adsorption of methylene blue from aqueous solution by crosslinked chitosan/bentonite composite." *Journal of Dispersion Science and Technology*. 36(1) : 61-67.
- [3] Hameed, B.H. Din, A.T.M. and Ahmad, A.L. 2007. Sorption of methylene Blue onto bamboobased activated carbon: kinetics and equilibrium studies." *Journal of Hazardous Materials*. 141(1) : 819-825.
- [4] Yan, H. Zhang, W.X. Kan, X.W. Dong, L. Jiang, Z.W. Li, H.J. et al. 2011. "Sorption of methylene blue by carboxymethyl cellulose and reuse process in a secondary sorption. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects." 380(1) : 143-151.
- [5] Chung, K.T. 2000. "Mutagenicity and carcinogenicity of aromatic amines metabolically produced from azo dyes." *Journal of Environmental Science and Health, Part C*. 18(1) : 51-74.
- [6] ชุตติมา แกมกิจ. 2555. "การเตรียมนาโนเคลย์ระหว่างไคโตซานละลายน้ำกัลป์มอนต์มอริลโลไนต์สำหรับประยุกต์ใช้ในงานดูดซับสีย้อม." ปรินูญานิพนธ์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [7] Shah, J. Taskar, M. Singh, P. Vaishampayan, S. and Patil, S.B. 2016. "Use of ozone in water treatment." *Ird india*. 4(3) : 42-47.
- [8] Tzoupanos, N.D. and Zouboulis, A.I. 2008. "Coagulation-flocculation processes in water /waste water treatment: the application of new generation of chemical reagents." *ResearchGate*. 309-317.
- [9] Patel, J. 2016. "Ion exchange resins." *ResearchGate*. 1-7.
- [10] Schlosser, S. 2014. "Membrane filtration." *ResearchGate*. 1-40.
- [11] Kang, S. Zhao, Y. Wang, W. Zhang, T. Chen, T. Yi, H. Rao, F. and Song, S. 2018. "Removal of methylene blue from water with montmorillonite nanosheets/chitosan hydrogels as adsorbent." *Applied Surface Science*. 448(1) : 203-211.

- [12] Zohuriaan-Mehr, M.J. Omidian, H. Doroudiani, S. and Kabir, K. 2010. "Advances in non-hygienic applications of superabsorbent hydrogel materials." *Journal of Materials science*. 45(21) : 5711-5735.
- [13] Musetti, A. Paderni, K. Fabbri, P. Pulvirenti, A. Al-Moghazy, M. and Fava, P. 2014. "Poly(vinyl alcohol)-Based Film Potentially Suitable for Antimicrobial Packaging Applications." *Journal of Food Science*. 79(4) : 1-6.
- [14] Dong, L. Agarwal, A.K. Beebe, D.J. and Jiang, H. 2006. "Adaptive liquid Microlenses activated by stimuli-responsive hydrogels." *Nature*. 442(1) : 551-554.
- [15] Beebe, D.J. Moore, J.S. Bauer, J.M. Yu, Q. Liu, R.H. Devadoss, C. and Jo, B.H. 2000. "Functional hydrogel structures for autonomous flow control inside microfluidic channels." *Nature*. 404(6778) : 588-590.
- [16] Cirillo, G. Nicoletta, F.P. Curcio, M. Spizzirri, U.G. Picci, N. and Lemma, F. "Enzyme immobilization on smart polymers: *Catalysis on demand*." *Reactive and Functional Polymers*. 83(1) : 62-69.
- [17] Sahiner, N. and Seven, F. 2014. "The use of superporous p(AAc (acrylic acid)) cryogels as support for Co and Ni nanoparticle preparation and as reactor in H₂ production from sodium borohydride hydrolysis." *Energy*. 71(1) : 170-179.
- [18] Alam, M.A. Takafuji, M. and Ihara, H. 2010. "Silica nanoparticle-nanocomposites: a review of applications as remote controlled biomaterials crosslinked thermosensitive hybrid hydrogels as potential drug-release carriers." *Polymer Journal*. 46(1) : 293-300.
- [19] Gaharwar, A.K. Peppas, N.A. and Khademhosseini, A. 2013. "Nanocomposite Hydrogels for biomedical applications." *Biotechnology and Bioengineering*. 111(3) : 441-453.
- [20] Satarkar, N.S. Biswal, D. and Hilt, J.Z. 2010. "Hydrogel." *Soft Matter*. 6(11) : 2364-2371.
- [21] Liu, Y. Zheng, Y. and Wang, A. 2010. "Enhanced adsorption of Methylene Blue from aqueous solution by chitosan-g-poly (acrylic acid)/vermiculite hydrogel composites." *Journal of Environmental Sciences*. 22(4) : 486-493.
- [22] Banerjee, S. Chattopadhyaya, M.C. Sharma, U. and Sharma, Y.C. 2014. "Adsorption characteristics of modified wheat husk for the removal of a toxic dye, methylene blue, from aqueous solutions." *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*. 18(1) : 56-63.

- [23] Wang, Q. Cui, J. Li, G. Zhang, J. Li, D. Huang, F. and Wei, Q. 2014. "Laccase immobilized on a PAN/adsorbents composite nanofibrous membrane for catechol treatment by a biocatalysis/adsorption process." *Molecules*. 19(3) : 3376-3388.
- [24] Man, H.C. Akinbile, C.O. and Jun, C.X. 2015. "Coconut husk adsorbent for the removal of methylene blue dye from wastewater." *Bioresources*. 10(2) : 2859-2872.
- [25] Jeyaseelan, C. and Gupta, A. 2016. "Green tea leaves as a natural adsorbent for the removal of Cr(VI) from aqueous solutions." *Air, Soil and Water Research*. 9(9) : 13-19.
- [26] Khan, T.A. Ali, I. Singh, V.V. and Sharma, S. 2009. "Utilization of fly ash as low-cost adsorbent for the removal of methylene blue, malachite green and rhodamine B dyes from textile wastewater." *Journal of Environmental Protection Science*. 3(1) : 11-22.
- [27] Uddin, M.K. 2017. "A review on the adsorption of heavy metals by clay minerals, with special focus on the past decade." *Chemical Engineering Journal*. 438-462.
- [28] Bello, O.S. Bello, I.A. and Adegoke, K.A. 2013. "Adsorption of dyes using different types of sand: A review." *South African journal of chemistry*. 66(1) : 117-129.
- [29] Meijuan, S. Xuman, W. Caining, Z. Xiaoxiao, L. Xiao, L. and Qing, L. 2018. "Adsorption properties of gelatin/Montmorillonite composite on crystal violet." *Basic Sciences Journal of Textile Universities*. 31(2) : 140-145.
- [30] Khedr, M.A. Waly, A.I. Hafez, A.I. and Ali, H. 2012. "Synthesis of modified chitosan-montmorillonite nanocomposites." *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. 6(6) : 216-226.
- [31] Kang, S. Zhao, Y. Wang, W. Zhang, T. Chen, T. Yi, H. Rao, F. and Song S. 2018. "Removal of methylene blue from water with Montmorillonite nanosheets/chitosan hydrogels as adsorbent." *Applied Surface Science*. 448(1) : 203-211.
- [32] Zhang, J. Wang, L. and Wang, A. 2014. "Preparation of chitosan-g-poly (acrylic acid)/montmorillonite superabsorbent nano composites: via in situ intercalative polymerization." *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 131(1) : 2497-2502.
- [33] Kittinaovarat, S. Kansomwan, P. and Jiratumnukul, N. 2010. "Chitosan/modified montmorillonite beads and adsorption Reactive Red 120." *Applied Clay Science*. 48(1-2) : 87-91.

- [34] Ninan, N. Grohens, Y. Elain, A. Kalarikkal, N. and Thomas, S. 2014. "Synthesis and characterization of gelatin/zeolite porous scaffold." *European Polymer Journal*. 49(9) : 2433–2445.
- [35] วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. 2559. เจลาติน. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B9%80%E0%B8%88%E0%B8%A5%E0%B8%B2%E0%B8%95%E0%B8%B4%E0%B8%99>.
- [36] Bajpai, A.K. 1994. "Kinetic behavior of adsorption of gelatin at solid-liquid interface." *Polymer international*. 33(1) : 315-319.
- [37] จักรกฤษณ์ อัมพูช. 2555. "การดัดแปรแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์เพื่อการกำจัดสีย้อมจากน้ำเสีย". *บทความวิชาการ วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์*. 5(1) : 56-66.
- [39] วรวิทย์ จันทร์สุวรรณ. 2558. "ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่วจากสารละลายโดยใช้อิฐมวลเบาเป็นตัวดูดซับ." *วิทยานิพนธ์ดุษฎีบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร*.
- [40] Pradthana, P. 2551. **กระบวนการดูดซับ (Adsorption Process)**. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <https://pradthana.wordpress.com/tag/adsorbate/>.
- [41] เสาวภาคย์ ผลเจริญ. 2556. "ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมในน้ำทิ้งโรงงานย้อมผ้าด้วยตุ้งโดยใช้ตัวดูดซับเถ้าลอยลิกไนต์ผสมดินเป็นวัสดุเพาะปลูกในระบบบำบัดแบบหมุนำกรองน้ำเสีย." *ปริญาวิทยาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อมบัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์*.
- [42] ไกรศรี ทองเสมียน. 2551. "ความสามารถในการดูดซับไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของดินต่อระบบการปลูกมันสำปะหลังอินทรีย์." *วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์ และ เทคโนโลยี สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์*.
- [43] Thommes, M. Kaneko, K. Neimark, A.V. Olivier, J.P. Reinoso, F.R. Rouquerol, J. and Sing, K.S.W. 2015. "Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report)." *Pure and Applied Chemistry*. 1-19.
- [44] วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. 2561. ดิน. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B8%94%E0%B8%B4%E0%B8%99>.
- [45] นิวัตติ องค์กรักษ์. 2551. **เอกสารประกอบการสอนวิชาปฐพีศาสตร์เบื้องต้น**. กรุงเทพฯ : ภาควิชาพืชศาสตร์ และปฐพีศาสตร์ สาขาวิชาปฐพีศาสตร์ และอนุรักษศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [46] นิรนาม. 2561. **แร่ดินวิทยา**. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : http://www.dmr.go.th/download/document/minerals/clays/e_007_016.pdf.
- [47] SHREE RAM MINERALS. 2018. **ABOUT KAOLIN**. [online]. Available : <http://shree ramminerals.com/minerals/about-kaolin/>.
- [48] Tim Tyler. 2018. **The origin of life**. [online]. Available : <http://originoflife.net>

[/micrographs/?fbclid=IwAR2kx8CYCCZeAyeoTquAll1Yrjll9N3Z7fMaWnEDGZGC_aLU8otTyxZuOI.](#)

- [49] Ghadiri, M. Chrzanowski, W. and Rohanizadeh, R. 2015. "Biomedical applications of cationic clay minerals." *ROYAL SOCIETY OF CHEMISTRY*. 5(1) : 29467-29481.
- [50] WIKIPEDIA The Free Encyclopedia. 2018. **Illite crystallinity**. [online]. Available : https://en.wikipedia.org/wiki/Illite_crystallinity.
- [51] Birkbeck. 1996. **Coordination in Brucite**. [online]. Available : www.cryst.bbk.ac.uk/PPS2/projects/loesel/chap04.htm.
- [52] USGS. 2018. **CHLORITE GROUP**. [online]. Available : <https://pubs.usgs.gov/of/2001/of01-041/html/docs/clays/chlor.htm>
- [53] สมศักดิ์ มณีพงศ์. 2561. **สมบัติทางเคมีของดิน**. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : www.nana-bio.com/image%20web2/nana%20story/E%20Plant02.html.
- [54] อัยย์แลป ดอทเอเซีย. 2018. **CEC : ความจุในการแลกเปลี่ยนแคตไอออน**. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.ilab.asia/print.aspx?content=00425>.
- [55] คชินท์ สายอินทวงศ์. 2561. **Montmorillonite (Smectite)**. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : http://www.thaiceramicsociety.com/rm_soil_montmorillonite.php.
- [56] บริษัท นาซาก์กรุ๊ป2008 จำกัด. 2561. **แรมมอนต์มอริลโลไนต์คืออะไร ?**. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://nazagroup2008.com/index.aspx?pid=b3313e64-027c-4b27-a1d1-1ac97b76da40&ctid=c2c051c4-038d-4f8e-ac61-11fb90f7d2e7>.
- [57] WIKIMEDIA COMMONS. 2018. **File:Montmorillonite-en.svg**. [online]. Available : <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Montmorillonite-en.svg>.
- [58] WIKIPEDIA The Free Encyclopedia. 2018. **Montmorillonite**. [online]. Available : <https://en.wikipedia.org/wiki/Montmorillonite>.
- [59] WIKIPEDIA The Free Encyclopedia. 2019. **Quaternary ammonium cation**. [online]. Available : https://en.wikipedia.org/wiki/Quaternary_ammonium_cation.
- [60] Gitipour, S. Bowers, M.T. and Bodocsi, A. 1997. "The use of modified bentonite for removal of aromatic organics from contaminated soil". *Journal of Colloid Interface Science*. 196(2) : 191-198.
- [61] Perdrillat, C.M. Karbowiak, T. Defeufort, F. Delmotte, L. Vaulot, C. and Champion, D. 2016. "Effect of hydration on molecular dynamics and structure in chitosan film". *Food Hydrocolloids*. 61(1) : 57-65.
- [62] Francisco, R. Valenzuela, D. and Persio, S.S. 2001. "Studies on the acid activation of Brazilian smectitic acid". *Química Nova*. 24(3).
- [63] วรินดา วราพันธ์. 2553. "การเตรียมและศึกษาสมบัติของไฮโดรเจลคอมโพสิตชนิดไคโต"

ซาน/อัลจินต-ถ่านกัมมันต์ที่มีสมบัติเป็นเจลสมานแผล.” *ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.*

- [64] Garg, S. and Garg, A. 2016. “Hydrogel: Classification, Properties, Preparation and Technical Features.” *Asian Journal of Biomaterial Research.* 2(6) : 163-170.
- [65] ประภัสสร จันทนารา, ประภาภรณ์ พันธุ์โพธิ์โรจน์ และพิชชาภา เดชวรรคณีย์. 2559. “การพัฒนาวัสดุปิดแผลไฮโดรเจลจากพอลิเมอร์ธรรมชาติที่มีส่วนผสมของไขมันชั้น.” *ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม) ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.*
- [66] นิดาลักษณ์ สิทธิพล. 2555. *กระสอบทรายนาโนหรือเอ็นแซค (N-SACK) ป้องกันน้ำท่วม.* [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://dpm.nida.ac.th/main/index.php/articles/food/itemlist/user/70%E0%B8%99%E0%B8%B4%E0%B8%94%E0%B8%B2%E0%B8%A5%E0%B8%B1%E0%B8%81%E0%B8%A9%E0%B8%93%E0%B9%8C%E0%B8%AA%E0%B8%B4%E0%B8%97%E0%B8%98%E0%B8%B4%E0%B8%9E%E0%B8%A5?start=18>.
- [67] วารุณี ตานันต์ และสายันต์ แสงสุวรรณ. 2557. “พอลิเมอร์ดูดซับน้ำได้มาก: การสังเคราะห์ การวิเคราะห์ และการประยุกต์ใช้.” *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.* 16(2) : 63-81.
- [68] ภัทราวุธ มนต์วิเศษ. 2558. *เอกสารการสอนวิชา ไบโอฟอลิเมอร์.* กรุงเทพฯ : สาขาวิชาเคมี คณะ วิทยาศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [69] มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี. 2553. บทที่ 2 เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : kb.psu.ac.th/psukb/bitstream/2010/9183/6/Chapter2.pdf.
- [70] Devi, N. Sarmah, M. Khatun B. and Maji, T.K. 2016. “Encapsulation of active ingredients in polysaccharide-protein complex coacervates.” *Advances in Colloid and Interface Science.* 1-10.
- [71] อุษา ภูคัสมาส. 2554. “เจลาติน ผลิตภัณฑ์”. *Food.* 41(1) : 58-64.
- [72] Silva, E.V.C. Pena, R.S. and Lourenço, L.F.H. 2016. “Gelatin extraction from Kumakuma (*Brachyplathystoma filamentosum*) skin using the limiting method. *African Journal of Agricultural Research.* 11(30) : 2678-2688.
- [73] Amiji, M. Shenoy, D. and Kommareddy, S. 2007. “Gelatin nanoparticles and their biofunctionalization”. *Nanotechnologies for the Life Sciences.* 1(1) : 330-352.

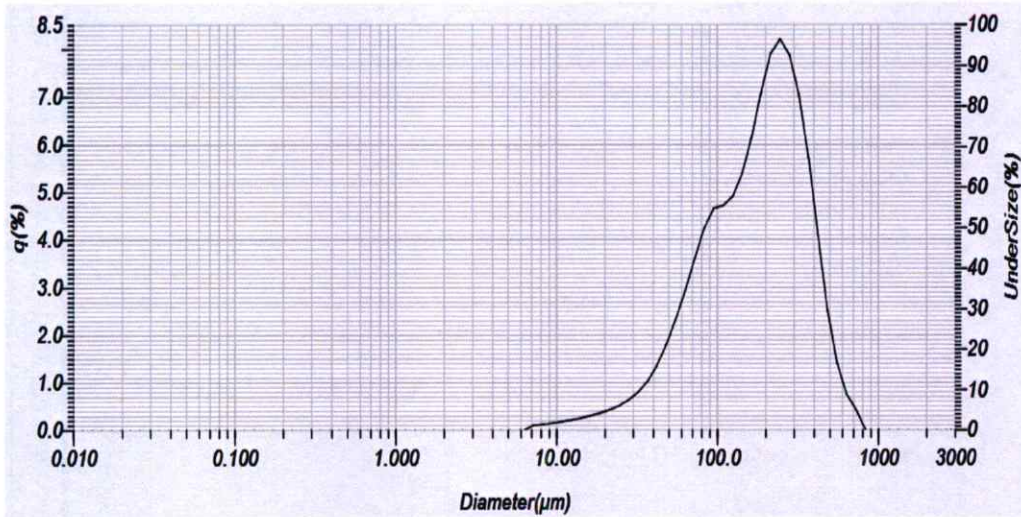
- [74] Dutta, P.K. Dutta, J. and Tripathi, V.S. 2004. "Chitin and Chitosan: Chemistry, properties, and applications." *Journal of Scientific & Industrial Research*. 63(1) : 20-31.
- [75] บริษัท โบนาฟิเดส มาร์เก็ตติ้ง จำกัด. 2561. **ไคติน-ไคโตซานคืออะไร มีประโยชน์อย่างไร**. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : www.bonafidesmarketing.com/articledetail.asp?id=4929.
- [76] Mahoney, C. McCullough M.B. Sankar, J. and Bhattarai. 2012. "Nanofibrous structure of chitosan for biomedical applications." *Nanomedicine & Biotherapeutic Discovery*. 2(1) : 1-9.
- [77] ขนิ ษฐา. 2550. **สี ย้อม**. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : http://www.tpa.or.th/writer/read_this_book_topic.php?bookID=370&pageid=3&read=true&count=true.
- [78] สำนักหอสมุดและศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2560. **ประมวลสารสนเทศพร้อมใช้ การย้อมสีทอด้วยสีธรรมชาติ**. กรุงเทพฯ
- [79] PubChem. 2018. **Methylene blue anhydrous**. [online]. Available : https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/methylene_blue?fbclid=IwAR1Brr134k3B8nfsZwu4dBr0ub8FU0ot_pfFKpfEu6o9J3RuKWy4I96jkzA#section=Top.
- [80] Tchobanoglous, G. 1978. **Wastewater Engineering Treatment Disposal Reuse**. 2nd ed. North Logan : Jenson Books Inc.
- [81] Rathna, G.V.N. Rao, D.V.M. and Chatterji, P.R. 1995. "Hydrogels of gelatin-sodium carboxymethyl cellulose: synthesis and swelling kinetics." *Journal of Macromolecule Science, Part A*. 33(9) : 1199-1207.
- [82] Slamet, R. and Erdawati, B. 2013. "Adsorption of congo red using chitosan Montmorillonite in batch and column method". *International Journal of Chemical & Petrochemical*. 3(2) : 13-24.
- [83] Hayeeye, F. Sattar, M. Chinpa, W. and Sirichote, O. 2016. "Kinetics and thermodynamics of Rhodamine B adsorption by gelatin/activated carbon composite beads". *Colloids and Surfaces A: Physiochemical and Engineering Aspects*.
- [84] Li, W. Ma, Q. Bai, Y. Xu, D. Wu, M. and Ma, H. 2018. "Facile fabrication of gelatin/bentonite composite beads for tunable removal of anionic and cationic dyes." *Chemical Engineering Research and Design*. 134(1) : 336-346.
- [85] Pal, P. Syed, S.S. and Banat, F. 2017. "Gelatin-Bentonite composite as reusable adsorbent for the removal of lead from aqueous solutions:

- Kinetic and equilibrium studies". *Journal of Water Process Engineering*. 1(1) : 40-50.
- [86] Pereira, F.A.R. Sousa, K.S. Cavalcanti, G.R.S. Franca, D.B. Queiroga, L.N.F. Santos, L.M.G. Fonseca, M.G. and Jaber, M. 2017. "Green biosorbents based on chitosan-montmorillonite beads for anionic dye removal." *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 5(4) : 3309-3318.
- [87] Nestic, A.R. Velickovic, S.J. and Antonovic, D.G. 2012. "Characterization of chitosan/Montmorillonite membranes as adsorbents for Bezactive Orange V-3R dye." *Journal of hazardous Materials*. 209-210(1) : 256-263.
- [88] Pereira, F.A.R. Sousa, K.S. Cavalcanti, G.R.S. Fonseca, M.G. Souza, A.G. and Alves, A.P.M. 2013. "Chitosan-montmorillonite biocomposites as an adsorbent for copper (II) cations from aqueous solutions." *International Journal of Biological Macromolecules*. 61(1) : 471-478.
- [89] Rathna, G.V.N. Rao, D.V.M. and Chatterji, P.R. 1995. "Hydrogels of gelatin-sodium carboxymethyl cellulose: synthesis and swelling kinetics." *Journal of Macromolecule Science, Part A*. 33(9) : 1199-1207.
- [90] Mongkhon Prawatborisut. 2559. "Preparation and properties of inclusion complexes between β -cyclodextrin-modified hydroxylalkyl acrylchitosans and methyl orange". Master of Science (Polymer Technology), Chemistry, Faculty of Science. King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.
- [91] Whang, T.J. Huang, H.Y. Hsieh, M.T. and Chen, J.J. 2009. "Laser-Induced Silver Nanoparticles on Titanium Oxide for Photocatalytic Degradation of Methylene Blue". *International Journal of Molecular Sciences*. 10(1) : 4707-4718.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาคโดยใช้หลักการ กระเจิงแสงของเลเซอร์

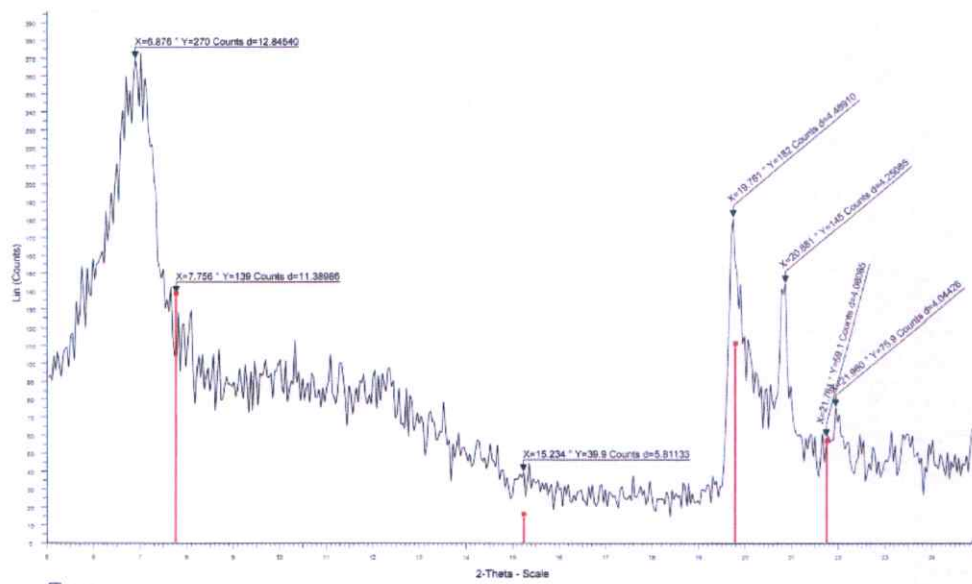


No.	Diameter(μm)	q(%)	UnderSize(%)	No.	Diameter(μm)	q(%)	UnderSize(%)	No.	Diameter(μm)	q(%)	UnderSize(%)	No.	Diameter(μm)	q(%)	UnderSize(%)
1	0.011	0.000	0.000	25	0.296	0.000	0.000	49	7.697	0.102	0.102	73	200.000	7.061	54.108
2	0.013	0.000	0.000	26	0.339	0.000	0.000	50	8.816	0.123	0.226	74	229.075	7.891	61.999
3	0.015	0.000	0.000	27	0.389	0.000	0.000	51	10.097	0.148	0.374	75	262.376	8.194	70.193
4	0.017	0.000	0.000	28	0.445	0.000	0.000	52	11.565	0.177	0.551	76	300.518	7.870	78.064
5	0.020	0.000	0.000	29	0.510	0.000	0.000	53	13.246	0.212	0.764	77	344.206	7.042	85.105
6	0.022	0.000	0.000	30	0.584	0.000	0.000	54	15.172	0.254	1.018	78	394.244	5.722	90.827
7	0.026	0.000	0.000	31	0.669	0.000	0.000	55	17.377	0.302	1.320	79	451.556	4.077	94.904
8	0.029	0.000	0.000	32	0.766	0.000	0.000	56	19.904	0.355	1.675	80	517.200	2.514	97.418
9	0.034	0.000	0.000	33	0.877	0.000	0.000	57	22.797	0.420	2.095	81	592.387	1.414	98.832
10	0.039	0.000	0.000	34	1.005	0.000	0.000	58	26.111	0.506	2.601	82	678.504	0.751	99.583
11	0.044	0.000	0.000	35	1.151	0.000	0.000	59	29.907	0.623	3.224	83	777.141	0.417	100.000
12	0.051	0.000	0.000	36	1.318	0.000	0.000	60	34.255	0.788	4.012	84	890.116	0.000	100.000
13	0.058	0.000	0.000	37	1.510	0.000	0.000	61	39.234	1.022	5.034	85	1019.515	0.000	100.000
14	0.067	0.000	0.000	38	1.729	0.000	0.000	62	44.938	1.355	6.389	86	1167.725	0.000	100.000
15	0.076	0.000	0.000	39	1.981	0.000	0.000	63	51.471	1.790	8.179	87	1337.481	0.000	100.000
16	0.087	0.000	0.000	40	2.269	0.000	0.000	64	58.953	2.325	10.504	88	1531.914	0.000	100.000
17	0.100	0.000	0.000	41	2.599	0.000	0.000	65	67.523	2.932	13.436	89	1754.613	0.000	100.000
18	0.115	0.000	0.000	42	2.976	0.000	0.000	66	77.339	3.602	17.038	90	2009.687	0.000	100.000
19	0.131	0.000	0.000	43	3.409	0.000	0.000	67	88.583	4.233	21.271	91	2301.841	0.000	100.000
20	0.150	0.000	0.000	44	3.905	0.000	0.000	68	101.460	4.648	25.919	92	2636.467	0.000	100.000
21	0.172	0.000	0.000	45	4.472	0.000	0.000	69	116.210	4.711	30.630	93	3000.000	0.000	100.000
22	0.197	0.000	0.000	46	5.122	0.000	0.000	70	133.103	4.901	35.532				
23	0.226	0.000	0.000	47	5.867	0.000	0.000	71	152.453	5.384	40.915				
24	0.259	0.000	0.000	48	6.720	0.000	0.000	72	174.616	6.131	47.046				

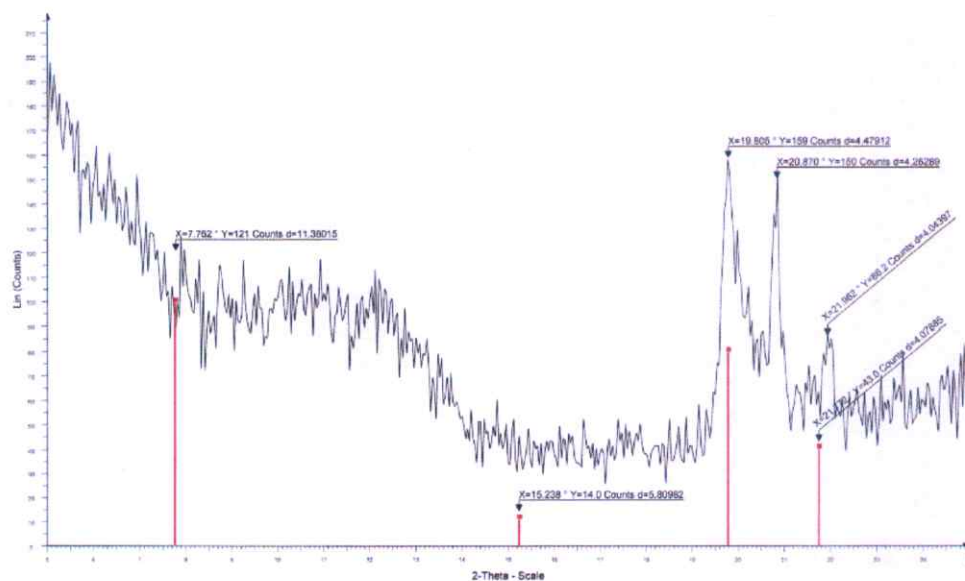
รูปที่ ก.1 การกระจายขนาดอนุภาคของมอนต์มอริลโลไนต์ตัดแปรด้วยโคโตซาน

ภาคผนวก ข

รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของการวิเคราะห์โครงสร้างผลึก ด้วยเทคนิค XRD



รูปที่ ข.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของมอนต์มอริลโลไนต์



รูปที่ ข.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของมอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปรด้วยโคโคซาน

ภาคผนวก ค

ขนาดของตัวอย่างไฮโดรเจลก่อน และหลังผ่านการเชื่อมโยงด้วยสารละลายกลูตารัลดีไฮด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิห้อง

ตารางที่ ค.1 ก่อนการเชื่อมโยงด้วยสารละลายกลูตารัลดีไฮด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

สูตร	ความกว้าง (cm)	ความยาว (cm)	ความหนา (cm)	ปริมาตร (cm ³)
M3G15	1.92 ± 0.02	1.93 ± 0.01	0.69 ± 0.01	2.53 ± 0.04
M5G15	1.96 ± 0.01	1.98 ± 0.01	0.69 ± 0.02	2.69 ± 0.06
M6G15	1.94 ± 0.03	1.95 ± 0.04	0.70 ± 0.05	2.67 ± 0.16
CS-M5G15	1.89 ± 0.03	1.91 ± 0.02	0.69 ± 0.03	2.46 ± 0.17

ตารางที่ ค.2 หลังผ่านการเชื่อมโยงด้วยสารละลายกลูตารัลดีไฮด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

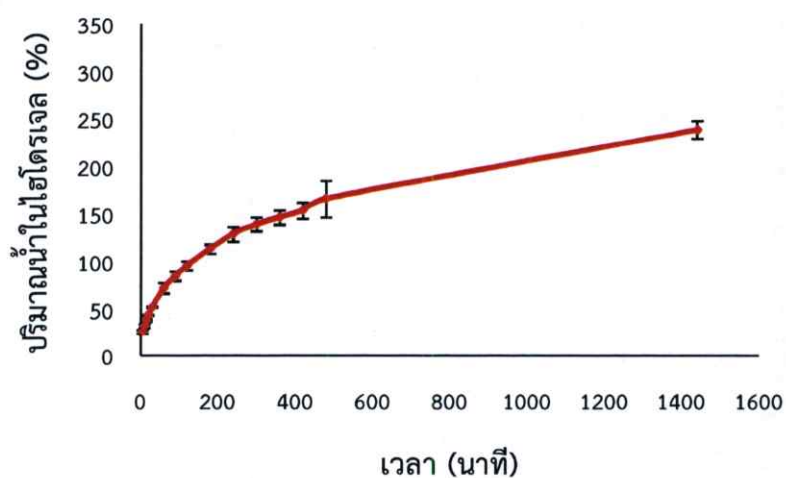
สูตร	ความกว้าง (cm)	ความยาว (cm)	ความหนา (cm)	ปริมาตร (cm ³)
M3G15	1.64 ± 0.05	1.66 ± 0.05	0.61 ± 0.03	1.04 ± 0.02
M5G15	1.84 ± 0.02	1.85 ± 0.02	0.61 ± 0.01	2.09 ± 0.04
M6G15	1.80 ± 0.03	1.81 ± 0.04	0.59 ± 0.04	1.99 ± 0.10
CS-M5G15	1.63 ± 0.04	1.64 ± 0.04	0.60 ± 0.04	1.56 ± 0.16

ภาคผนวก ง

ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำในไฮโดรเจลที่อุณหภูมิห้อง

ตารางที่ ง.1 ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำในไฮโดรเจลดูดซับสูตร M3G15 ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้อง

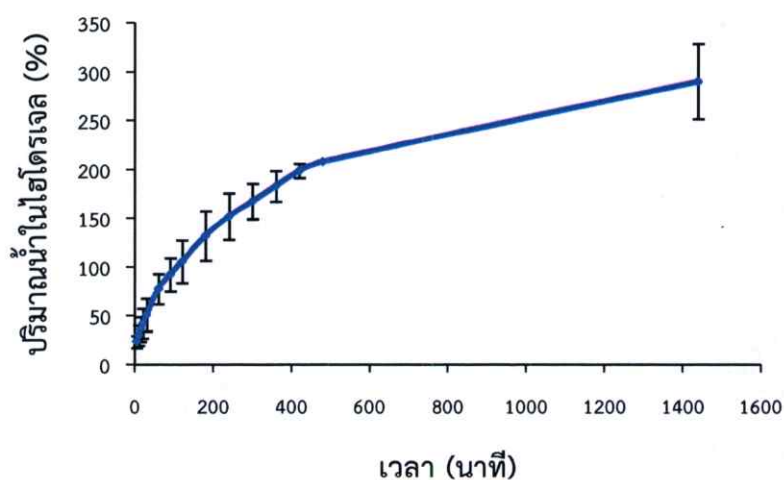
เวลา (นาที)	ปริมาณน้ำในไฮโดรเจล (เปอร์เซ็นต์)
5	25.73 ± 2.12
10	32.73 ± 2.14
15	39.06 ± 1.27
20	44.14 ± 0.42
30	52.26 ± 0.82
60	72.26 ± 5.50
90	85.02 ± 4.81
120	95.78 ± 4.72
180	113.56 ± 4.80
240	129.33 ± 7.76
300	139.53 ± 7.11
360	146.63 ± 7.49
420	153.88 ± 8.35
480	165.90 ± 18.94
1440	238.65 ± 9.53



รูปที่ ง.1 กราฟแสดงพฤติกรรมดูดซับน้ำในไฮโดรเจลสูตร M3G15 ที่อุณหภูมิห้อง

ตารางที่ ง.2 ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำในไฮโดรเจลดูดซับสูตร M5G15 ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้อง

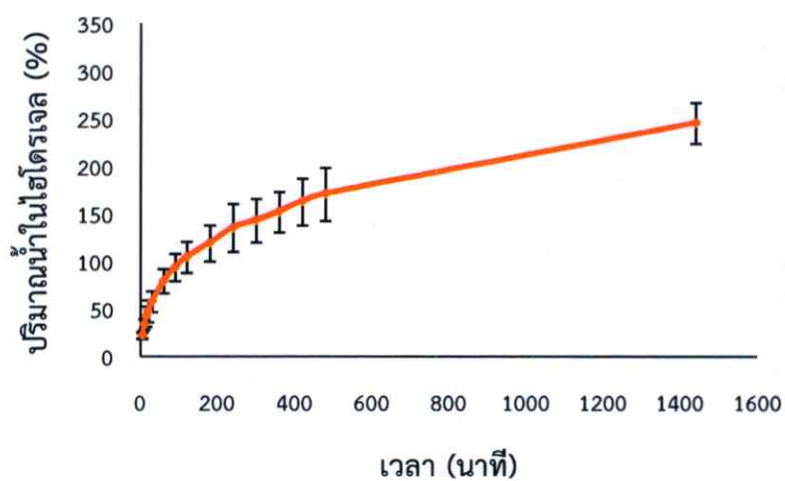
เวลา (นาที)	ปริมาณน้ำในไฮโดรเจล (เปอร์เซ็นต์)
5	23.61 ± 6.24
10	30.50 ± 10.47
15	36.57 ± 12.64
20	42.40 ± 15.52
30	51.37 ± 16.73
60	77.70 ± 15.15
90	92.39 ± 16.75
120	105.79 ± 21.94
180	132.16 ± 25.45
240	152.15 ± 23.72
300	167.58 ± 18.02
360	183.26 ± 15.74
420	198.84 ± 7.25
480	208.15 ± 0.27
1440	290.08 ± 38.52



รูปที่ ง.2 กราฟแสดงพฤติกรรมของการดูดซับน้ำในไฮโดรเจลสูตร M5G15 ที่อุณหภูมิห้อง

ตารางที่ ง.3 ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ปริมาณในไฮโดรเจลดูดซับสูตร M6G15 ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้อง

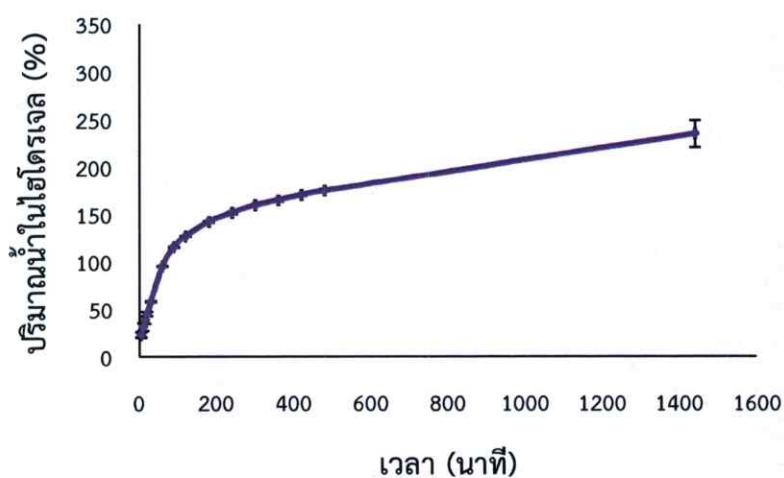
เวลา (นาที)	ปริมาณน้ำในไฮโดรเจล (เปอร์เซ็นต์)
5	21.87 ± 3.37
10	33.22 ± 5.92
15	41.76 ± 10.64
20	47.42 ± 11.57
30	57.27 ± 11.19
60	79.10 ± 12.63
90	93.72 ± 14.52
120	104.19 ± 16.33
180	119.23 ± 19.21
240	135.04 ± 25.19
300	142.97 ± 22.88
360	151.86 ± 21.20
420	162.59 ± 24.50
480	170.62 ± 28.01
1440	245.46 ± 21.55



รูปที่ ง.3 กราฟแสดงพฤติกรรมการดูดซับน้ำในไฮโดรเจลสูตร M6G15 ที่อุณหภูมิห้อง

ตารางที่ ง.4 ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำในไฮโดรเจลดูดซับสูตร CS-M5G15 ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้อง

เวลา (นาที)	ปริมาณน้ำในไฮโดรเจล (เปอร์เซ็นต์)
5	22.99 ± 2.91
10	31.21 ± 4.16
15	38.35 ± 4.04
20	44.92 ± 2.48
30	57.70 ± 0.59
60	95.29 ± 0.22
90	115.51 ± 0.35
120	126.63 ± 0.03
180	141.77 ± 0.42
240	151.29 ± 1.24
300	159.42 ± 0.43
360	164.60 ± 1.18
420	170.28 ± 0.91
480	175.08 ± 1.26
1440	234.38 ± 13.98



รูปที่ ง.4 กราฟแสดงพฤติกรรมดูดซับน้ำในไฮโดรเจลสูตร CS-M5G15 ที่อุณหภูมิห้อง

ภาคผนวก จ

ปริมาณของแข็งคงเหลือของไฮโดรเจลดูดซับในน้ำกลั่นที่

อุณหภูมิห้อง

ตารางที่ จ.1 ค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณของแข็งคงเหลือของไฮโดรเจลดูดซับในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

สูตร	1 ชั่วโมง		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
M3G15	92.80	96.04	96.70
M5G15	94.80	96.99	99.42
M6G15	92.81	96.60	97.18
CS-M5G15	95.03	95.66	95.79

ตารางที่ จ.2 ค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณของแข็งคงเหลือของไฮโดรเจลดูดซับในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

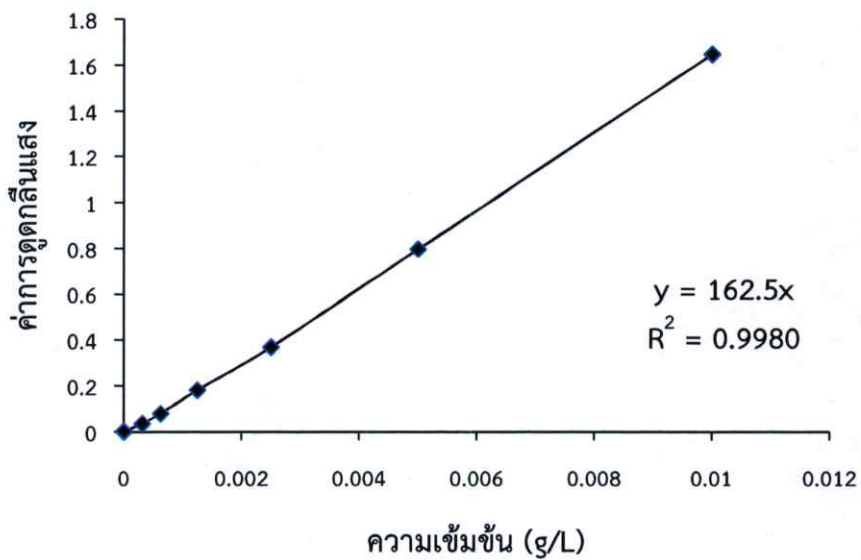
สูตร	24 ชั่วโมง		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
M3G15	93.84	94.77	94.77
M5G15	92.13	99.23	99.26
M6G15	93.43	94.48	95.41
CS-M5G15	93.66	92.97	92.36

ภาคผนวก ฉ

การสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายสีย้อมเบสิกลู 9

ตารางที่ ฉ.1 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อมเบสิกลู 9 ที่ $\lambda_{\max} = 668$ นาโนเมตร

ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมเบสิกลู 9 (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง
0	0
0.3125	0.0346
0.6250	0.0778
1.25	0.1806
2.50	0.3687
5	0.7961
10	1.6474



รูปที่ ฉ.1 กราฟมาตรฐานของสารละลายสีย้อมเบสิกลู 9

ภาคผนวก ข

การดูดซับสารละลายสีย้อมเบสิกลู 9 ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ที่เวลา 2 และ 24 ชั่วโมง ด้วยไฮโดรเจลดูดซับสูตร M3G15, M5G15, M6G15 และ CS-M5G15

1. ผลของความเข้มข้นมอนต์มอริลโลไนต์ที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อมเบสิกลู 9 ด้วยไฮโดรเจลดูดซับสูตร M3G15, M5G15, M6G15 และ CS-M5G15

การคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับสารละลายสีย้อมคำนวณได้จากสมการที่ ข.1

$$\text{เปอร์เซ็นต์การดูดซับ} = \frac{(\text{ความเข้มข้นเริ่มต้น} - \text{ความเข้มข้นที่เหลือ})}{\text{ความเข้มข้นเริ่มต้น}} \times 100 \quad (\text{ข.1})$$

เมื่อ ความเข้มข้นเริ่มต้นคือ ความเข้มข้นสารละลายสีย้อมก่อนการดูดซับ
ความเข้มข้นที่เหลือคือ ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมหลังการดูดซับ

ตารางที่ ข.1 ผลของการดูดซับสารละลายสีย้อมเบสิกลู 9 ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง ด้วยไฮโดรเจลดูดซับสูตร M3G15, M5G15, M6G15 และ CS-M5G15 ปริมาณ 0.5 กรัม

สูตร	การดูดซับ (เปอร์เซ็นต์)	
	2 ชั่วโมง	24 ชั่วโมง
M3G15	91	96
M5G15	97	98
M6G15	97	97
CS-M5G15	4	55

ตารางที่ ข.2 ผลของการดูดซับสารละลายสีย้อมเบสิบลู 9 ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง ด้วยไฮโดรเจลดูดซับสูตร M3G15, M5G15, M6G15 และ CS-M5G15 ปริมาณ 0.5 กรัม

สูตร	การดูดซับ (เปอร์เซ็นต์)	
	2 ชั่วโมง	24 ชั่วโมง
M3G15	58	88
M5G15	86	88
M6G15	90	90
CS-M5G15	4	31

ภาคผนวก ซ

การดูดซับสารละลายสีย้อมเบสิกบลู 9 ความเข้มข้น 10, 100, 500, 800 และ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ที่เวลา 2 และ 24 ชั่วโมง ด้วยไฮโดรเจลดูดซับสูตร M5G15

1. ผลจากความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเบสิกบลู 9 ที่มีต่อการดูดซับของ M5G15

การคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับสารละลายสีย้อมคำนวณได้จากสมการที่ ซ.1

$$\text{เปอร์เซ็นต์การดูดซับ} = \frac{(\text{ความเข้มข้นเริ่มต้น} - \text{ความเข้มข้นที่เหลือ})}{\text{ความเข้มข้นเริ่มต้น}} \times 100 \quad (\text{ซ.1})$$

เมื่อ ความเข้มข้นเริ่มต้นคือ ความเข้มข้นสารละลายสีย้อมก่อนการดูดซับ
ความเข้มข้นที่เหลือคือ ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมหลังการดูดซับ

ตารางที่ ซ.1 ผลของการดูดซับสารละลายสีย้อมเบสิกบลู 9 ที่ความเข้มข้น 10, 100, 500, 800 และ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ที่เวลา 24 ชั่วโมง ด้วย M5G15 ปริมาณ 0.5 กรัม

ความเข้มข้นเริ่มต้นของ สารละลายสีย้อม (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	ความเข้มข้นหลังการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	การดูดซับ (เปอร์เซ็นต์)
10	0.33	97
100	3.66	96
500	142.25	72
800	414.95	48
1000	635.57	36

2. ผลของระยะเวลาที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อมเบสิกบลู 9 ด้วย M5G15

ตารางที่ ข.2 ผลของการดูดซับสารละลายสีย้อมเบสิกบลู 9 ที่ความเข้มข้น 800 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ด้วย M5G15 ปริมาณ 0.5 กรัม

เวลา (นาที)	การดูดซับ (เปอร์เซ็นต์)	ความจุของการดูดซับ, q_t (มิลลิกรัมต่อกรัม)
5	12.11 ± 0.35	6.59 ± 0.02
10	13.62 ± 0.99	7.42 ± 0.72
30	18.22 ± 7.08	10.00 ± 4.22
45	15.28 ± 0.72	8.33 ± 0.66
60	18.75 ± 2.57	10.23 ± 1.74
90	18.32 ± 0.22	9.98 ± 0.39
120	23.52 ± 0.21	12.81 ± 0.52
180	36.12 ± 4.27	19.71 ± 2.98
240	36.52 ± 0.19	19.88 ± 0.70
300	38.68 ± 1.02	21.04 ± 0.46
360	43.01 ± 4.36	23.36 ± 1.68
420	46.21 ± 0.21	25.15 ± 0.88
480	49.20 ± 0.90	26.79 ± 1.26
540	55.16 ± 4.03	30.07 ± 3.07
600	60.19 ± 0.73	32.77 ± 1.38
660	61.36 ± 0.00	33.40 ± 1.07
720	63.01 ± 0.48	34.30 ± 1.07
780	63.82 ± 0.25	34.74 ± 1.06
1440	65.68 ± 0.26	35.75 ± 1.09
1680	67.49 ± 0.18	36.74 ± 1.22
1740	68.23 ± 0.86	37.14 ± 1.34
1800	70.85 ± 0.46	38.56 ± 1.23
1860	71.29 ± 0.35	38.81 ± 1.33
1920	73.00 ± 2.98	39.77 ± 2.86

ภาคผนวก ฅ

การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับสารละลายสีย้อมเบสิกลู

9 ด้วย M5G15

1. ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับสารละลายสีย้อมเบสิกลู 9 ด้วย M5G15

ตารางที่ ฅ.1 พารามิเตอร์แบบจำลองจลนพลศาสตร์ Pseudo-first order ในการดูดซับสารละลายสีย้อมเบสิกลู 9 ความเข้มข้นเริ่มต้น 800 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง ด้วย M5G15 ปริมาณ 0.5 กรัม

เวลา (นาที)	q_t	$q_e - q_t$	$\log (q_e - q_t)$
5	6.59 ± 0.02	22.11	1.27
10	7.42 ± 0.72	21.27	1.25
30	10.00 ± 4.22	18.70	1.19
45	8.33 ± 0.66	20.38	1.23
60	10.23 ± 1.74	18.46	1.18
90	9.98 ± 0.39	18.72	1.19
120	12.81 ± 0.52	15.89	1.10
180	19.71 ± 2.98	8.99	0.75
240	19.88 ± 0.70	8.82	0.74
300	21.04 ± 0.46	7.65	0.64
360	23.36 ± 1.68	5.33	0.30
420	25.15 ± 0.88	3.54	-0.65
480	26.79 ± 1.26	1.91	N/A
540	30.07 ± 3.07	-1.37	N/A
600	32.77 ± 1.38	-4.07	N/A
660	33.40 ± 1.07	-4.71	N/A
720	34.30 ± 1.07	-5.60	N/A
780	34.74 ± 1.06	-6.04	N/A
1440	35.75 ± 1.09	-7.06	N/A
1680	36.74 ± 1.22	-8.04	N/A
1740	37.14 ± 1.34	-8.45	N/A
1800	38.56 ± 1.23	-9.87	N/A
1860	38.81 ± 1.33	-10.11	N/A
1920	39.77 ± 2.86	-11.07	N/A

ตารางที่ ๓.๒ พารามิเตอร์แบบจำลองจลนพลศาสตร์ Pseudo-second order ในการดูดซับสารละลายสีย้อมเบสิกบลู 9 ความเข้มข้นเริ่มต้น 800 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง ด้วย M5G15 ปริมาณ 0.5 กรัม

เวลา (นาที)	q_t	t/q_t
5	6.59 ± 0.02	0.76
10	7.42 ± 0.72	1.35
30	10.00 ± 4.22	3.00
45	8.33 ± 0.66	5.40
60	10.23 ± 1.74	5.86
90	9.98 ± 0.39	9.02
120	12.81 ± 0.52	9.37
180	19.71 ± 2.98	9.13
240	19.88 ± 0.70	12.07
300	21.04 ± 0.46	14.26
360	23.36 ± 1.68	15.41
420	25.15 ± 0.88	16.70
480	26.79 ± 1.26	17.92
540	30.07 ± 3.07	17.96
600	32.77 ± 1.38	18.31
660	33.40 ± 1.07	19.76
720	33.74 ± 1.06	21.00
780	34.30 ± 1.07	22.45
1440	34.74 ± 1.06	40.28
1680	35.75 ± 1.09	45.73
1740	36.74 ± 1.22	46.85
1800	37.14 ± 1.34	46.68
1860	38.81 ± 1.33	47.93
1920	39.77 ± 2.86	48.28

ภาคผนวก ญ
การศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับสารละลายสีย้อมเบสิกบลู
9 ด้วย M5G15

ตารางที่ ญ.1 พารามิเตอร์ของสมการไอโซเทอมแลงเมียร์ในการดูดซับสารละลายสีย้อมเบสิกบลู 9 ด้วย M5G15

C_0 (มิลลิกรัมต่อลิตร)	C_e (มิลลิกรัมต่อลิตร)	q_e (มิลลิกรัมต่อกรัม)	C_e/q_e (กรัมต่อลิตร)
10	0.33	0.53	0.63
100	3.66	5.26	0.70
500	142.25	19.48	7.30
800	414.95	20.45	20.29
1000	635.57	20.23	31.42

ตารางที่ ญ.2 พารามิเตอร์ของสมการไอโซเทอมฟรุนดิชในการดูดซับสารละลายสีย้อมเบสิกบลู 9 ด้วย M5G15

C_0 (มิลลิกรัมต่อลิตร)	C_e (มิลลิกรัมต่อลิตร)	q_e (มิลลิกรัมต่อกรัม)	$\log C_e$	$\log q_e$
10	0.33	0.53	-0.48	-0.28
100	3.66	5.26	0.56	0.72
500	142.25	19.48	2.15	1.29
800	414.95	20.45	2.62	1.31
1000	635.57	20.23	2.80	1.31

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวพิชชาภา เดชวรรคณีย์
วัน เดือน ปีเกิด	24 ธันวาคม พ.ศ. 2536
ที่อยู่ปัจจุบัน	300/65 หมู่บ้าน Premium place ถนนนวมินทร์ แขวงนวมินทร์ เขต บึงกุ่ม กรุงเทพมหานคร 10240
ประวัติการศึกษา	ปี 2559 วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม เกรตเฉลี่ย 3.25 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนอุดหนุนการศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษาของคณะวิทยาศาสตร์ สถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผลงานทางวิชาการ	Pitchapa Deatvakkanee and Pathavuth Monvisade. “Development of Gelatin/Montmorillonite Hydrogel Absorbent for Dye Removal.” The Proceeding of The International Polymer Conference of Thailand (PCT-9). During June 13 th - 14 th , 2019 at Amari Watergate Hotel, Bangkok, Thailand. 157-162.
รางวัลที่ได้รับ	The Best Poster Award, The International Polymer Conference of Thailand (PCT-9), During June 13 th -14 th , 2019 at Amari Watergate Hotel, Bangkok, Thailand.