รายงานการวิจัย

การกำจัดสีรีแอกทีฟด้วยเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ชนิดแลกเปลี่ยนไอออน

The Removal of Reactive Dyes by Ion Exchange Polymer Beads

นางสาวบุญศรี คู่สุขธรรม

โครงการวิจัยทุนสนับสนุนงานวิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
งบประมาณผลประโยชน์ ปี พ.ศ. 2551
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

บุญศรี คู่สุขธรรม

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการกำจัดสีรีแอกทีฟด้วยเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ชนิดแลกเปลี่ยนไอออน เม็ดลูกปัดพอลิเมอร์มี 2 ชนิด คือ เม็ดลูกปัดแอลจิเนต และเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกัน เม็ดลูกปัดแอลจิเนตเตรียมโดยใช้แคลเซียมคลอไรด์เป็นสารเชื่อมขวาง ส่วนเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกันเตรียมจากการทำปฏิกิริยาระหว่างแอลจิเนตและไดแอลลิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ โดยใช้โพแทสเซียมเพอร์ซัลเฟต เอ็น, เอ็น′-เมทิลีนบีสอะคริลาไมด์ และ เอ็น, เอ็น, เอ็น′, เอ็น′-เตตระเมทิลเอทิลีนไดเอมีน เป็นสารเริ่มปฏิกิริยา สารเชื่อมขวาง และสารเร่ง ตามลำดับ

ผลจากการศึกษาพบว่า เม็ดลูกปัดแอลจิเนตมีขนาดใกล้เคียงกับเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกัน เม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกันมีผิวเรียบและมีสมบัติการพองตัวดีกว่าเม็ดลูกปัดแอลจิเนต นอกจากนี้ การดูดซับสีรีแอกทีฟของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกันมากกว่าเม็ดลูกปัดแอลจิเนต ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสีรีแอกทีฟ คือ ชนิดของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ อุณหภูมิ ความเข้มข้นของสารละลายสีรีแอกทีฟ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมคลอไรด์

ABSTRACT

This research studied of the reactive dyes removal by ion exchange polymer bead. There were two type of polymer beads such as alginate bead and interpenetrating polymer network bead. Alginate bead was prepared by using calcium chloride as crosslinking agent. While interpenetrating polymer network bead was carried out by the reaction between alginate and diallyldimethylammonium chloride by using potassium persulfate, *N,N*′-methylenebisacrylamide, and *N, N, N*′, *N*′-tetramethylethylenediamine as initiator, crosslinker, and accelerator, respectively.

The result showed that alginate bead had the particle size similar to interpenetrating polymer network bead. It had smooth surface and swelling property better than alginate bead. In addition, its dyes absorption was more than alginate bead. Factor effecting the reactive dyes absorption were type of polymer beads, temperature reactive dyes concentration, sodium hydroxide, and sodium chloride.

สารบัญเรื่อง

	หน้า
บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	
สารบัญเรื่อง	
สารบัญตาราง	
สารบัญภาพประกอบ	
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ชนิดของวัสดุดูดซับ	4
2.2 ชนิดของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์	4
2.3 การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับแอลจิเนต	6
2.3.1 การเตรียมเม็ดลูกปัดของแอลจิเนต	6
2.3.2 การทำปฏิกิริยาระหว่างแอลจิเนตกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น	7
2.3.3 ประโยชน์ของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์	9
2.4 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange)	11
2.4.1 ชนิดของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน	11
2.4.2 โครงสร้างและส่วนประกอบของการแลกเปลี่ยนไอออน	12
2.4.3 การแลกเปลี่ยนไอออนในสารละลาย	13
2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดสีด้วยวัสดุดูดซับชนิดต่าง ๆ	14
2.6 ทฤษฎี สมมุติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย	19
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	21
3.1 สารเคมี	21
3.2 การเตรียมเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์	21
3.2.1 การเตรียมเม็ดลูกปัดแอลจิเนต	21
3.2.2 การเตรียมเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกันระหว่างแอลจิเนตและไดแอลลิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์	22

	หน้า
3.3 การตรวจสอบลักษณะเฉพาะของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์	23
3.3.1 การหาขนาดอนุภาคของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์	23
3.3.2 การตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์	23
3.4 การศึกษาสมบัติการพองตัวของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์	23
3.5 การหาระยะเวลาในการสัมผัสที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีรีแอกทีฟ	23
3.6 การศึกษาการดูดซับสีรีแอกทีฟด้วยเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์	24
3.7 การศึกษาไอโซเทิร์มดูดซับสีรีแอกทีฟด้วยเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์	25
3.8 อิทธิพลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อการดูดซับสีรีแอกทีฟของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์	26
3.9 อิทธิพลของโซเดียมคาร์บอเนตต่อการดูดซับสีรีแอกทีฟของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์	26
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	28
4.1 การเตรียมเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์	28
4.1.1 การเตรียมเม็ดลูกปัดแอลจิเนต	28
4.1.2 การเตรียมเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกัน	31
4.2 การตรวจสอบเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี	33
4.3 การตรวจสอบสมบัติของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ด้วยเทคนิคทางความร้อน	34
4.4 สมบัติการพองตัวของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์	37
4.5 ระยะเวลาในการสัมผัสที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีรีแอกทีฟ	38
4.6 การดูดซับสีรีแอกทีฟด้วยเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ	40
4.7 ไอโซเทิร์มของการดูดซับสีรีแอกทีฟ	42
4.8 อิทธิพลของสารชนิดต่าง ๆ ต่อการดูดซับสีรีแอกทีฟของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์	44
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย	47
เอกสารอ้างอิง	48
ภาคผนวก ก	50
ภาคผนวก ข	53
ภาคผนวก ค	55
ภาคผนวก ง	64
ภาคผนวก จ	67
ภาคผนวก ฉ	80

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	ชนิดของสีย้อมที่พบในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ	1
2.1	สมบัติของสารละลายแอลจิเนตและขนาดของเม็ดลูกปัดแอลจิเนตชนิดต่าง ๆ	7
2.2	ส่วนประกอบในการแลกเปลี่ยนไอออน	13
3.1	สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	21

สารบัญภาพประกอบ

ภาพประกอบที่		หน้า
2.1	การเตรียมพอ-เมทริกซ์	5
2.2	การเตรียมพอลิเมอร์โครงข่ายแบบเชื่อมโยงซึ่งกันและกัน	5
2.3	พอลิเมอร์แบบเม็ดชนิดคอร์-เชลล์กราฟท์	6
2.4	การเตรียมพอลิเมอร์โครงข่ายแบบเชื่อมโยงซึ่งกันและกัน	8
2.5	การดูดซับสีเบสิกของเม็ดแอลจิเนตที่มีผงถ่านกัมมันต์อยู่ภายใน	9
2.6	การดูดซับสีรีแอกทีฟด้วยเม็ดลูกปัดไคโทซานที่ค่าความเป็น-กรด-เบสเท่ากับ 3	10
2.7	การดูดซับโลหะหนักชนิดต่าง ๆ ด้วยเม็ดลูกปัดแอลจิเนต-ไคโทซานที่ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 3.5	11
2.8	โครงสร้างของไดไวนิลเบนซีน	12
2.9	โครงสร้างของไวนิลเบนซีน	12
2.10	โครงสร้างของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน	13
2.11	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการสัมผัสกับการลดลงของความเข้มข้นของสารละลายสีแอซิดที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ (ปริมาณถ่านกัมมันต์ = 1.7 กรัม ขนาดอนุภาค = 355-500 ไมครอน อัตราเร็วในการกวน = 500 รอบ/นาที)	15
2.12	อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการดูดซับสีแอซิดและสีไดเร็กท์ด้วยพอลิเอไมด์-อิพิคลอโรไฮดริน-เซลลูโลส	16
2.13	ขนาดอนุภาคของชานอ้อยที่ผ่านการปรับปรุงต่อการกำจัดสีรีแอกทีฟ	17
2.14	อิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายสีรีแอกทีฟที่มีต่อการดูดซับสีด้วยเม็ดลูกปัดไคโทซาน	18
4.1	การทำปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมไอออนกับแอลจิเนต	28
4.2	การกระจายขนาดอนุภาคของเม็ดลูกปัดแอลจิเนตสด	29
4.3	ลักษณะพื้นผิวของเม็ดลูกปัดแอลจิเนตแห้ง	30
4.4	การกระจายขนาดอนุภาคของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกัน	31
4.5	ลักษณะพื้นผิวของพอลิเมอร์โครงข่ายแบบเชื่อมโยงซึ่งกันและกัน	32
4.6	อินฟราเรดสเปกตรัมชนิดต่าง ๆ	33

สารบัญภาพประกอบ

		หน้า
4.7	เทอร์โมแกรมการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของพอลิไดแอลลิล-ไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ	34
4.8	เปรียบเทียบเทอร์โมแกรมการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของโซเดียมแอลจิเนตผงเม็ดลูกปัดแอลจิเนต และเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์-โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกันเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ	35
4.9	ร้อยละพองตัวของเม็ดลูกปัดแอลจิเนตและพอลิเมอร์-โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกัน	37
4.10	ระยะเวลาในการสัมผัสที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีรีแอกทีฟของเม็ดลูกปัดแอลจิเนตและเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกันที่อุณหภูมิ 80°C	38
4.11	ระยะเวลาในการสัมผัสที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีรีแอกทีฟของเม็ดลูกปัดแอลจิเนตและเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกันที่อุณหภูมิห้อง	39
4.12	เปรียบเทียบระยะเวลาในการสัมผัสที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีรีแอกทีฟของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกันชนิดเม็ดสดและแห้งที่อุณหภูมิ 80°C	39
4.13	ปริมาณสีรีแอกทีฟที่ถูกดูดซับด้วยเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 80°C	41
4.14	ปริมาณสีรีแอกทีฟที่ถูกดูดซับด้วยเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิห้อง	41
4.15	ไอโซเทิร์มของการดูดซับสีรีแอกทีฟชนิดสีแดง	43
4.16	ไอโซเทิร์มของการดูดซับสีรีแอกทีฟชนิดสีน้ำเงิน	43
4.17	ไอโซเทิร์มของการดูดซับสีรีแอกทีฟชนิดสีเหลือง	44
4.18	อิทธิพลของสารละลายต่าง ๆ ต่อการดูดซับสีรีแอทีฟด้วยเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์	45

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญ และที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

การป้องกันสิ่งแวดล้อมและการใช้ผลิตภัณฑ์ที่ช่วยลดการเกิดมลพิษมีความสำคัญเพิ่มมากขึ้นในอุตสาหกรรมสิ่งทอ การควบคุมโดยองค์กรของรัฐด้วยวิธีการต่าง ๆ ในปัจจุบันจึงมีความเข้มงวดมากขึ้น ตามลำดับ เช่น การออกกฎหมายที่เข้มงวด และการกระตุ้นภาคอุตสาหกรรมให้นำมาตรฐานต่าง ๆ มาปรับใช้ในองค์กร เพื่อให้บรรลุเป้าหมายในการรักษาสิ่งแวดล้อม

กระบวนการแบบเปียก (wet processing) ในอุตสาหกรรมสิ่งทอเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเตรียม การย้อม และการตกแต่งทางสิ่งทอ อุตสาหกรรมสิ่งทอจึงเป็นอุตสาหกรรมที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างมาก เนื่องจากก่อให้เกิดของเสียเป็นจำนวนมากจากการใช้น้ำในกระบวนการผลิต เวดิอานาทาน โจชิ และไพ (Vaidyanathan, Joshi and Pai. 1998: 9-16) รายงานว่าน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอประกอบด้วยสีย้อมในปริมาณ 10-50 มิลลิกรัม/ลิตร สีย้อมชนิดต่าง ๆ ที่พบในน้ำทิ้งแสดงดังในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 ชนิดของสีย้อมที่พบในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ

ชนิดของสีย้อม	ร้อยละของปริมาณสีย้อมที่เหลือในน้ำทิ้ง
สีวัต	5-20
สีรีแอกทีฟ	20-50
สีไดเร็กท์	5-20
สีดีสเพอร์ส	1-20
สีแอซิด	1-20
สีที่ประกอบด้วยโลหะเชิงซ้อน	2- 5
สีซัลเฟอร์	30-40

จากประเภทของสีย้อมทั้งหมดพบว่า สีรีแอกทีฟเป็นสีย้อมที่มีปริมาณการใช้มากในการย้อมผ้าฝ้าย เนื่องจากมีสีสดใสและมีความคงทนต่อการซักดี แต่อย่างไรก็ตาม สีรีแอกทีฟเป็นสีย้อมที่ก่อให้เกิดปัญหากับน้ำทิ้งในอุตสาหกรรมสิ่งทอ เนื่องจากสีรีแอกทีฟละลายน้ำได้ดีและไม่สามารถกำจัดโดยระบบชีวภาพแบบใช้ออกซิเจน (Nemerow. 1978: 92)

โดยทั่วไปการกำจัดสีในน้ำทิ้งจะใช้วิธีการจับก้อน (coagulation) ซึ่งมีการใช้ตัวตกตะกอน (flocculation) ที่เป็นพอลิเมอร์ชนิดประจุบวก (Krentz et al. 2006: 161-169; Sing, Pal and Mal. 2006: 227-234) ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์-แสงอัลตราไวโอเลต (El-Dein, Libra and Wiesmann. 2006: 1239-1245) วิธีการอื่น ๆ ที่ใช้ในการกำจัดสีในน้ำทิ้งได้แก่ การใช้ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) (Choy, Porter and McKay. 2004: 1181-1188;

Lee, Porter and McKay. 2003: 1281-1289) การใช้โอโซน (Hsu et al. 2001: 169-176; Sevimli and Sarikaya. 2002: 842-850) และวิธีทางเทคโนโลยีชีวภาพ (Apohan and Yesilada. 2005: 99-105; El-rahim. 2006: 318-328) แต่อย่างไรก็ตาม การใช้ถ่านกัมมันต์และโอโซนเป็นวิธีที่เสียค่าใช้จ่ายสูง ส่วนวิธีชีวภาพจะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีได้ดีเมื่อสภาวะต่างๆ มีความเหมาะสม

การกำจัดสีออกจากเครื่องย้อมโดยตรง โดยอาศัยการดูดซับสีย้อมด้วยเรซินในเครื่องย้อมภายหลังจากกระบวนการย้อมเป็นวิธีที่น่าสนใจ ซึ่งประหยัดค่าใช้จ่ายและลดปริมาณน้ำที่ต้องผ่านการบำบัด วิธีการดูดซับเป็นวิธีที่เหมาะสมเพื่อกำจัดสีในเครื่องย้อม วิธีการนี้จึงเป็นวิธีการใหม่ของการกำจัดสีย้อม ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงจะทำการศึกษาการกำจัดสีรีแอกทีฟด้วยเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ชนิดแลกเปลี่ยนไอออน ซึ่งมีความเป็นไปได้สูงในการกำจัดสีรีแอกทีฟเนื่องจากเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ที่ได้จากการเตรียมมีประจุบวกจึงจับกับสีรีแอกทีฟได้ดี

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

เพื่อกำจัดสีรีแอกทีฟในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ชนิดแลกเปลี่ยนไอออน

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

การวิจัยนี้ศึกษาการกำจัดสีรีแอกทีฟด้วยเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ชนิดแลกปลี่ยนไอออน โดยมีขอบเขตการวิจัย ดังนี้

1. ศึกษาการเตรียมเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกันจากการทำปฏิกิริยาระหว่างโซเดียมแอลจิเนต และไดแอลลิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ โดยเตรียมเม็ดลูกปัดชนิดสดและแห้ง

2. การตรวจสอบลักษณะเฉพาะของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ โดยตรวจสอบลักษณะต่าง ๆ ดังนี้

2.1 การหาขนาดอนุภาคของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โดยใช้เวอร์เนียร์แคลิฟเปอร์

2.2 การตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โดยใช้กล้อง-จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

3. ศึกษาสมบัติการพองตัวของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์

4. การหาระยะเวลาในการสัมผัสที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีรีแอกทีฟ โดยทำการศึกษาการดูดซับสีรีแอกทีฟที่อุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิ 80°C ด้วยเม็ดลูกปัดชนิดสดและแห้ง

5. ศึกษาการดูดซับสีรีแอกทีฟด้วยเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ชนิดสดและแห้ง โดยศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้

5.1 ศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายสีรีแอกทีฟ

5.2 ศึกษาอิทธิพลของเกลือโซเดียมคลอไรด์

5.3 ศึกษาอิทธิพลของเกลือโซเดียมคาร์บอเนต

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นวัสดุดูดซับชนิดใหม่ เพื่อดูดซับสีในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ ซึ่งสามารถนำไปสู่การผลิตเชิงพาณิชย์ได้

2. รู้เกี่ยวกับพฤติกรรมการดูดซับสีของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ ซึ่งเป็นประโยชน์ในการนำไปประยุกต์ใช้กับน้ำทิ้งในอุตสาหกรรมสิ่งทอ

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ชนิดของวัสดุดูดซับ (Gembicki, Oroskar and Johnson. 1991: 309)

การดูดซับโดยใช้วัสดุดูดซับ เป็นวิธีการที่มีประโยชน์และสามารถใช้ได้กับสารละลายที่เจือจาง ปริมาณสารที่ถูกดูดซับจะขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวของวัสดุดูดซับ ดังนั้น วัสดุดูดซับทางการค้าส่วนใหญ่จึงมีรูพรุนเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการดูดซับ ชนิดของวัสดุดูดซับที่สำคัญ มีดังนี้

1. คาร์บอน คาร์บอนมีพื้นที่ผิวที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นจึงใช้ดูดซับโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว เช่น สารไฮโดรคาร์บอน ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) ซึ่งมีการควบคุมขนาดของรูพรุนและนำมาใช้ประโยชน์ในการนำตัวทำละลายกลับมาใช้ใหม่ ใช้ในการกรองก๊าซและทำน้ำให้บริสุทธิ์

2. สารอนินทรีย์ วัสดุดูดซับประเภทสารอนินทรีย์ที่นิยมใช้ ได้แก่ อะลูมินา ซึ่งเป็นวัสดุที่มีพื้นที่ผิวแบบมีขั้ว ส่วนใหญ่ใช้ในการแยกสารด้วยวิธีโครมาโตกราฟี วัสดุดูดซับอื่น ๆ เช่น ซิลิกาเจล เคลย์ (clay) ซีโอไลต์ (zeolites)

3. พอลิเมอร์สังเคราะห์ พอลิเมอร์สังเคราะห์นิยมใช้เป็นวัสดุดูดซับแบบแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange) พอลิเมอร์แบบแลกเปลี่ยนไอออนชนิดประจุลบมักเป็นพอลิเมอร์ร่วม (copolymer) ระหว่างสไตรีน-ไดไวนิลเบนซีนทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟิวริก นอกจากนี้ อาจเป็นพอลิเมอร์ของอะคริลิกเอสเทอร์ ซึ่งใช้ในการบำบัดน้ำทิ้ง ส่วนพอลิเมอร์แบบแลกเปลี่ยนไอออนชนิดประจุบวกมักเป็นกลุ่มของอัลคิลแอมโมเนียม

2.2 ชนิดของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ (Reza. 1991: 181-197)

ชนิดของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ มีดังนี้

1. พอลิเมอร์สังเคราะห์ พอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ใช้เป็นวัสดุดูดซับ ส่วนใหญ่เป็นพอลิสไตรีนและพอลิอะคริลาไมด์ นอกจากนี้ อาจผลิตจากพอลิเมทาคริเลทและพอลิไวนิล-แอกอฮอล์ซึ่งมีปริมาณการใช้น้อย

2. พอลิแซ็กคาไรด์ พอลิแซ็กคาไรด์ที่นำมาเตรียมให้อยู่ในรูปแบบเม็ด เช่น อาการ์โรส เซลลูโลส และเด็กซ์แทรน (dextran)

3. สารอนินทรีย์ วัสดุดูดซับประเภทสารอนินทรีย์ที่นิยมใช้คือ ซิลิกาเจล ส่วนอะลูมินามีการใช้บ้างเล็กน้อย การควบคุมขนาดรูพรุนในเม็ดพอลิเมอร์ ทำให้นิยมนำมาใช้ในการแยกสารด้วยวิธีโครมาโทกราฟี

4. พอลิเมอร์เชิงประกอบ (composite polymer) พอลิเมอร์แบบเม็ดชนิดพอลิเมอร์เชิงประกอบเป็นพอลิเมอร์ที่มีพอลิเมอร์เป็นองค์ประกอบมากกว่า 1 ชนิด เพื่อให้ได้พอลิเมอร์ที่มีสมบัติตามต้องการ ชนิดของพอลิเมอร์เชิงประกอบ มีดังนี้

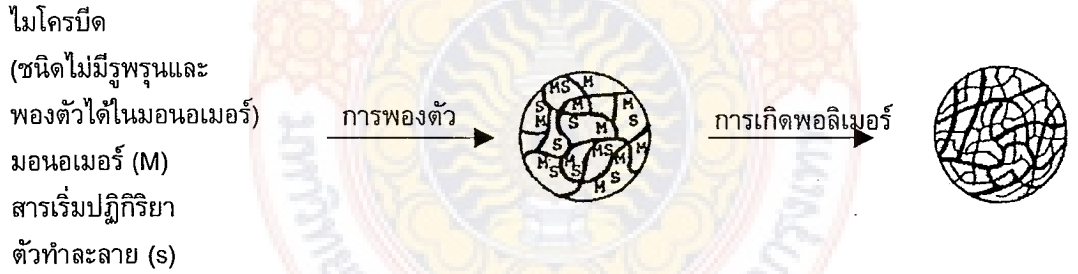
4.1 พอร์-เมทริกซ์ (pore - matrix)

พอลิเมอร์แบบเม็ดชนิดนี้เกิดจากการนำไมโครบีด (microbead) ที่มีรูพรุนและไม่พองตัวในมอนอเมอร์มาทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์ในตัวทำละลายที่เหมาะสม ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.1

ภาพประกอบที่ 2.1 การเตรียมพอ-เมทริกซ์

ตัวอย่างการเตรียมพอลิเมอร์ชนิดนี้ ได้แก่ การนำซิลิกาชนิดที่มีรูพรุน แช่ในสารละลายของตัวทำละลายอินทรีย์และมอนอเมอร์ที่ประกอบด้วยสารเชื่อมขวาง (cross-linker) และสารเริ่มปฏิกิริยา เมื่อเกิดปฏิกิริยาในภาวะที่เหมาะสมจะทำให้เกิดพอลิเมอร์ภายในรูพรุนของซิลิกา

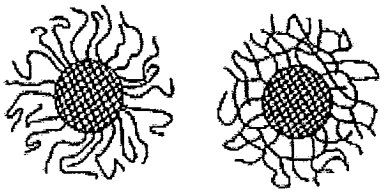
4.2 พอลิเมอร์โครงข่ายแบบเชื่อมโยงซึ่งกันและกัน (interpenetrating polymer networks) พอลิเมอร์แบบเม็ดชนิดนี้ประกอบด้วยพอลิเมอร์ 2 ชนิดซึ่งเกิดโครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกัน วิธีการผลิตแสดงดังในภาพประกอบที่ 2.2



ภาพประกอบที่ 2.2 การเตรียมพอลิเมอร์โครงข่ายแบบเชื่อมโยงซึ่งกันและกัน

4.3 คอร์ - เชลส์กราฟท์ (core-shell grafts)

พอลิเมอร์แบบเม็ดชนิดคอร์-เชลส์กราฟท์ ประกอบด้วยแกนกลางของเม็ดพอลิเมอร์ซึ่งมีลักษณะแข็ง และโซ่กราฟท์ที่ยืดหยุ่นได้ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.3



ภาพประกอบที่ 2.3 พอลิเมอร์แบบเม็ดชนิดคอร์-เชลล์กราฟท์

บริเวณแกนกลางของเม็ดอาจเป็นสารอนินทรีย์ เช่น ซิลิกาหรือพอลิเมอร์สังเคราะห์ จากนั้นทำให้เกิดโซ่กราฟท์บนผิวของเม็ดพอลิเมอร์

2.3 การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับแอลจิเนต

2.3.1 การเตรียมเม็ดลูกปัดของแอลจิเนต

การเตรียมอนุภาคของแอลจิเนต เตรียมโดยละลายแอลจิเนตในน้ำกลั่นจำนวน 100 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 22 °C ทำให้เย็น และหยดสารละลายแอลจิเนตลงในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 0.2 โมล/ลิตร ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 45 นาที อนุภาคที่ได้มีขนาด 2.69±0.09 มิลลิเมตร (La′zaro et al. 2003: 2118-2126)

โจโทห์ เมทสุชิมา และคิคูชิ (Gotoh, Matsushima and Kikuchi. 2004: 135-140) เตรียมเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โดยพ่นสารละลายแอลจิเนตที่มีความเข้มข้นร้อยละ 2 (โดยน้ำหนัก/น้ำหนัก) ลงในท่อที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.8 มิลิเมตร และผ่านลงไปในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 150 มิลลิโมล/ลิตร ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง พร้อมทั้งกวนอย่างสม่ำเสมอ หลังจากนั้นนำมาล้างด้วยน้ำกลั่นโดยอนุภาคที่เตรียมได้มีขนาด 504±96 ไมครอน และมีความหนาแน่น 1.051 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร^3

เม็ดลูกปัดแอลจิเนตถูกเตรียมโดยเตรียมสารละลายแอลจิเนตที่มีความเข้มข้นร้อยละ 2 (โดยน้ำหนัก/น้ำหนัก) โดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย จากนั้นหยดสารละลายแอลจิเนตลงในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 1 (โดยน้ำหนัก/น้ำหนัก) และคนเป็นเวลา 30 นาที โดยใช้อัตราส่วนโดยปริมาตรระหว่างสารละลายแอลจิเนตและสารละลายแคลเซียม-คลอไรด์เท่ากับ 1 : 50 ส่วนเม็ดลูกปัดแอลจิเนตที่มีสารชนิดอื่นอยู่ภายในเม็ดเตรียมโดยละลายแอลจิเนตในกลีเซอรอลที่มีความเข้มข้นร้อยละ 30 (โดยน้ำหนัก/น้ำหนัก) และเตรียมเป็นสารละลายที่มีความเข้มข้นร้อยละ 2 จากนั้นผสมไคทิน คาโอลิน หรือเบนโทไนต์ ลงในสารละลายของแอลจิเนตโดยให้มีความเข้มข้นร้อยละ 0.5 (โดยน้ำหนัก/น้ำหนัก) เม็ดลูกปัดแอลจิเนตชนิดต่าง ๆ มีขนาด 4.33-4.49 มิลลิเมตร สมบัติของสารละลายแอลจิเนตและขนาดของเม็ดลูกปัดแอลจิเนตชนิดต่าง ๆ แสดงดังในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติของสารละลายแอลจิเนตและขนาดของเม็ดลูกปัดแอลจิเนตชนิดต่าง ๆ (Zohar-Pere, Chet and Nussinovitch. 2004: 249-258)

ชนิดของสารละลายแอลจิเนต	ค่าแรงตึงผิว (มิลลินิวตัน/เมตร)	ค่าความหนาแน่นของสารละลาย (กิโลกรัม/ลบ.ซม^3)	ค่าความหนืด (ปาสคาล.วินาที)	ขนาดของเม็ดลูกปัด (มิลลิเมตร)
แอลจิเนตในน้ำกลั่น	56.0	997	0.104	4.35
แอลจิเนตในกลีเซอรอล	62.1	1069	0.287	4.41
แอลจิเนตในกลีเซอรอลและไคทิน	58.3	1075	0.350	4.34
แอลจิเนตในกลีเซอรอลและคาโอลิน	63.3	1077	0.310	4.33
แอลจิเนตในกลีเซอรอลและเบนโทไนต์	64.1	1078	0.360	4.49

2.3.2 การทำปฏิกิริยาระหว่างแอลจิเนตกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น

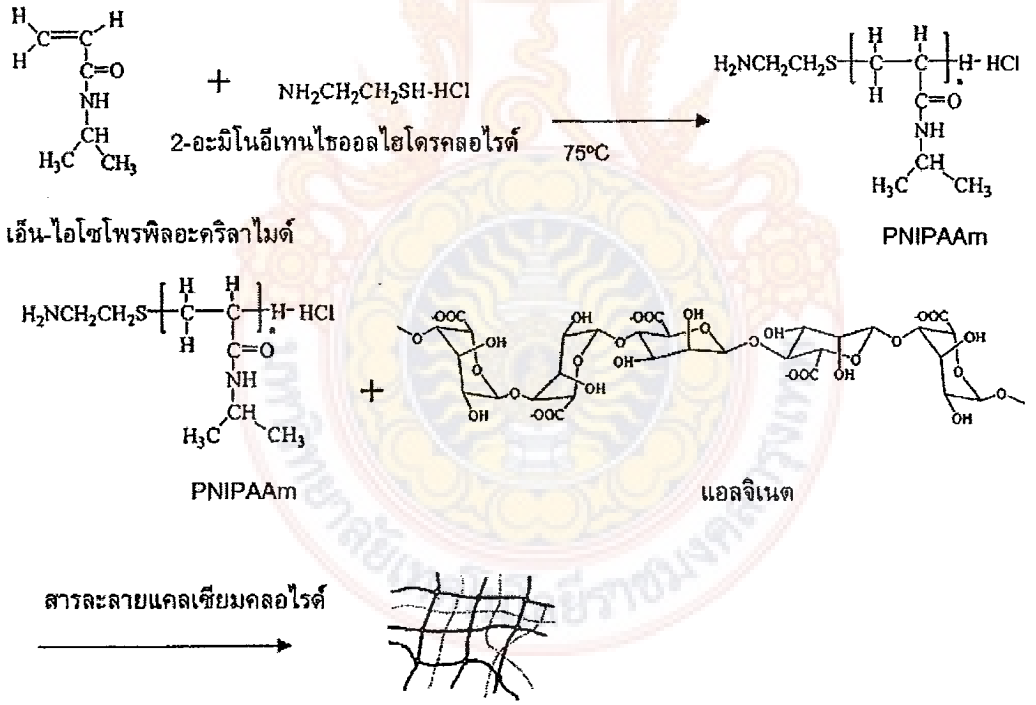
โจโทห์ เมทสุชิมา และคิคูชิ (Gotoh Matsushima and Kikuchi. 2004: 57-64) ศึกษาการเตรียมเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์จากการทำปฏิกิริยาระหว่างแอลจิเนตและไคโทซานโดยผสมสารละลายไคโทซานชนิดที่ละลายน้ำได้ลงในสารละลายแอลจิเนตที่มีความเข้มข้นร้อยละ 1.5 (โดยน้ำหนัก) ในอัตราส่วน 1 : 1 โดยปริมาตร จากนั้นกวนอย่างสม่ำเสมอเป็นเวลา 3 ชั่วโมง และพ่นสารละลายผ่านท่อที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.8 มิลลิเมตร ลงไปในสารละลายคิวปริกคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 0.15 โมล/ลิตร และตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง พร้อมทั้งกวนอย่างสม่ำเสมอ จากนั้นนำเม็ดลูกปัดแช่ลงในสารละลายกลูทารัลดีไฮด์ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 6 ชั่วโมง และนำมาล้างด้วยน้ำกลั่น เม็ดลูกปัดที่เตรียมได้มีขนาด 365 $\pm$ 107 ไมครอน การทำปฏิกิริยาระหว่างแอลจิเนตและไคโทซานจะเกิดพอลิอิเล็กโทรไลต์เชิงซ้อน เนื่องจากพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดมีประจุตรงกันข้ามกัน

จู และคณะ (Ju et al. 2002: 1128-1139) ศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์โครงข่ายแบบเชื่อมโยงซึ่งกันและกันประกอบด้วยแอลจิเนตร่วมกับพอลิ(เอ็น-ไอโซโพรพิลอะคริลาไมด์) (Poly(N-isopropylacrylamide); PNIPAAm) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีหมู่อะมิโนเป็นองค์ประกอบในขั้นแรกเตรียม PNIPAAm โดยนำ เอ็น-ไอโซโพรพิลอะคริลาไมด์ (9.7 x 10^{-2} โมล)

ทำปฏิกิริยากับ 2-อะมิโนอีเทนไธออลไฮโดรคลอไรด์ (2-aminoethanethiol hydrochloride : AESH) (485 x 10^{-3} โมล) และใช้ 2,2/-เอโซบิช(ไอโซบิวทิโร-ไนไตรส์) (5.5 x 10^{-5} โมล) เป็นสารเริ่มปฏิกิริยาโดยใช้ไดเมททิลฟอร์มาไมด์ (DMF) เป็นตัวทำละลาย ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 75°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง จากนั้นทำให้ตกตะกอนในไดเอทิลอีเทอร์และทำให้แห้ง

การเตรียมพอลิเมอร์โครงข่ายแบบเชื่อมโยงซึ่งกันและกัน เตรียมโดยผสมสารละลายแอลจิเนต (ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก) และสารละลาย PNIPAAm (ความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก) ในอัตราส่วนต่าง ๆ (80/20 50/50 และ 20/80) สารละลายพอลิเมอร์ที่ได้จากการผสมถูกเตรียมให้อยู่ในรูปแผ่นฟิล์ม จากนั้นตัดแผ่นฟิล์มที่แห้งขนาด 1 x 1 เซนติเมตร และจุ่มลงในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก จำนวน 10 มิลลิกรัม เป็นเวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นล้างด้วยน้ำและทำให้แห้ง ปฏิกิริยาการเตรียมเกิดขึ้นดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.4

จากการทำปฏิกิริยาพบว่า หมู่คาร์บอกซิลิกของแอลจิเนต เกิดพอลิอิเล็กโทรไลต์เชิงซ้อนกับหมู่อะมิโนของ PNIPAAm จากนั้นหมู่คาร์บอกซิลิกแอซิดของแอลจิเนตที่ไม่ได้เกิดปฏิกิริยากับ PNIPAAm จะเกิดการเชื่อมขวาง (crosslinked) กับ Ca^{2+} เกิดเป็นโครงข่ายของแอลจิเนต



พอลิเมอร์โครงข่ายแบบเชื่อมโยงซึ่งกันและกัน

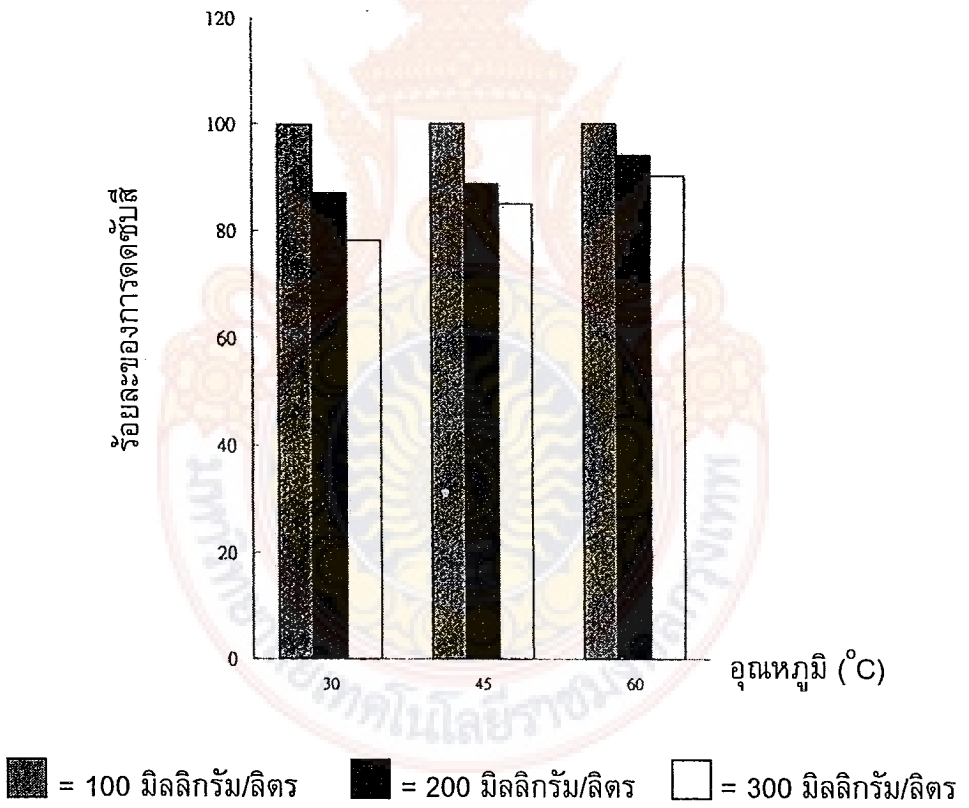
ภาพประกอบที่ 2.4 การเตรียมพอลิเมอร์โครงข่ายแบบเชื่อมโยงซึ่งกันและกัน

_____ = แอลจิเนต ..... = PNIPAAm

2.3.3 ประโยชน์ของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์

แอนนาดูไรและคณะ (Annadurai, Juang and Lee. 2002: 191-198) ศึกษาการดูดซับสีเบสิกของเม็ดแอลจิเนตที่มีผงถ่านกัมมันต์ (activated carbon) อยู่ภายในเม็ดของพอลิเมอร์ วิธีการเตรียมเม็ดแอลจิเนต โดยเตรียมละลายแอลจิเนตที่มีความเข้มข้นร้อยละ 2 (น้ำหนัก/ปริมาตร) ในน้ำและผสมผงถ่านกัมมันต์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 1 (น้ำหนัก/ปริมาตร) ลงในสารละลายแอลจิเนต จากนั้นเทสารละลายที่ได้ลงในบิวเรตต์ และหยดสารละลายแอลจิเนตลงในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 0.05 โมล/ลิตร และตั้งทิ้งไว้ ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาตามกำหนด นำเม็ดแอลจิเนตมาล้างด้วยน้ำกลั่นจากนั้นแช่เม็ดแอลจิเนตในน้ำกลั่น และเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4°C

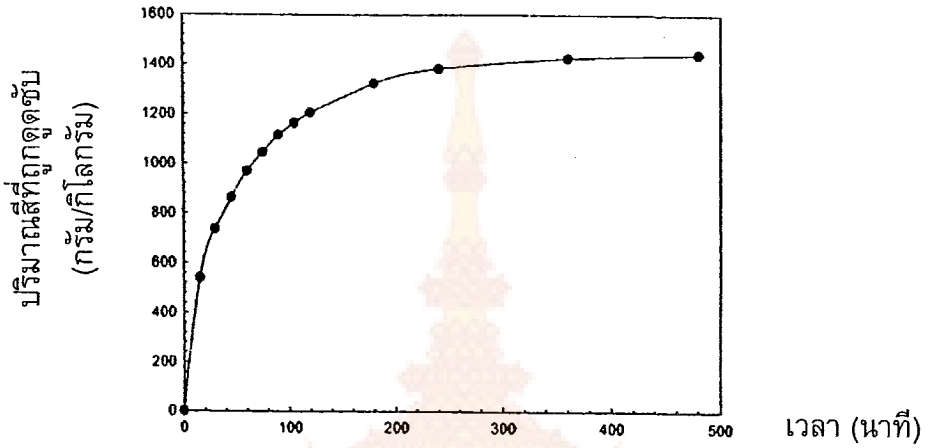
เม็ดแอลจิเนตที่เตรียมได้นำมาศึกษาการดูดซับสีเบสิก (Rhodamine 6G; C.I. 45160, Boric Red1) ที่มีความเข้มข้น 100 - 300 มิลลิกรัม/ลิตร ที่อุณหภูมิ 30-60°C ผลการศึกษาแสดงดังในภาพประกอบที่ 2.5



ภาพประกอบที่ 2.5 การดูดซับสีเบสิกของเม็ดแอลจิเนตที่มีผงถ่านกัมมันต์อยู่ภายใน

ผลจากการศึกษาพบว่า เม็ดแอลจิเนตดูดซับสีเบสิกได้ดี และการดูดซับสีเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 30°C เป็น 60°C แต่การดูดซับสีจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของสีเพิ่มขึ้น

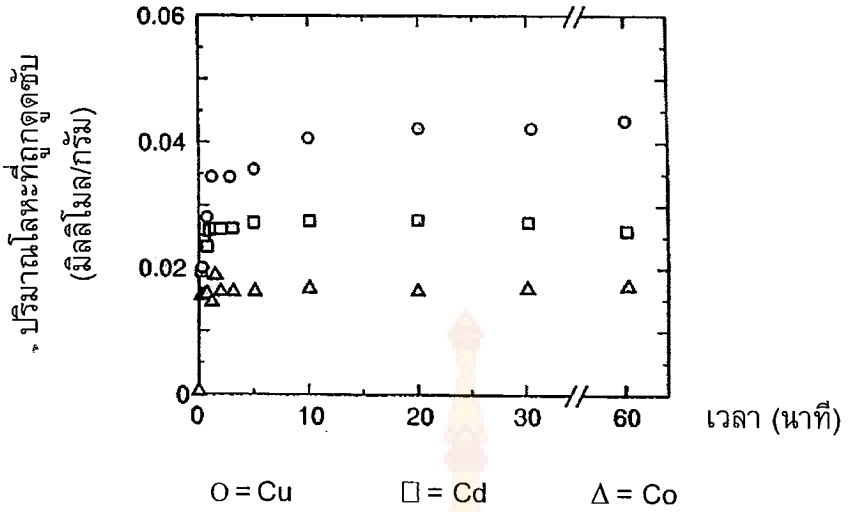
ชิอู และลี (Chiou and Li. 2003: 1095-1105) ศึกษาการดูดซับสีรีแอกทีฟ (reactive red 189) ด้วยเม็ดลูกปัดไคโทซานที่มีขนาด 2.3-2.5 มิลลิเมตร ผลการศึกษาแสดงดังในภาพประกอบที่ 2.6



ภาพประกอบที่ 2.6 การดูดซับสีรีแอกทีฟด้วยเม็ดลูกปัดไคโทซานที่ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 3

ผลจากการศึกษาพบว่า การดูดซับสีรีแอกทีฟเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับเพิ่มขึ้น และเข้าสู่สมดุล ของการดูดซับสีที่เวลา 380 นาที การดูดซับสีรีแอกทีฟด้วยเม็ดลูกปัดไคโทซานเกิดขึ้นเนื่องจากที่ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 3 หมู่ NH_3^+ ของไคโทซานจะเกิดการดึงดูดกับประจุลบของสีรีแอกทีฟได้ดี

เม็ดลูกปัดพอลิเมอร์มีการนำมาใช้ประโยชน์ในการดูดซับโลหะหนักที่มีอยู่ในน้ำทิ้ง โดยใช้เม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างแอลจิเนต-ไคโทซานในการดูดซับโลหะหนักชนิดต่าง ๆ ผลการศึกษาแสดงดังในภาพประกอบที่ 2.7



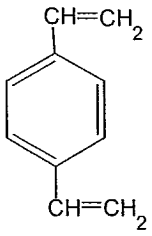
ภาพประกอบที่ 2.7 การดูดซับโลหะหนักชนิดต่าง ๆ ด้วยเม็ดลูกปัดแอลจิเนต-ไคโทซาน ที่ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 3.5

ผลจากการศึกษาพบว่า Cu (II) ถูกดูดซับได้ดีที่สุด รองลงมาคือ Cd (II) และ Co (II) ตามลำดับ การดูดซับโลหะหนักด้วยเม็ดลูกปัดแอลจิเนต-ไคโทซานเกิดขึ้นโดยการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างไฮโดรเจนไอออนของหมู่คาร์บอกซิลิกในแอลจิเนตกับไอออนของโลหะหนักชนิดต่าง ๆ ที่มีอยู่ในสารละลาย

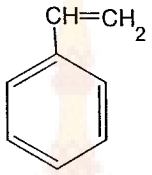
2.4 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange)

2.4.1 ชนิดของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

การแลกเปลี่ยนไอออน หมายถึง วัสดุของแข็งที่ไม่ละลายน้ำ ซึ่งทำหน้าที่แลกเปลี่ยนแคทไอออนหรือแอนไอออน (Russell. 1970: 1) เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange resin) เป็นพอลิเมอร์แบบเชื่อมขวาง (crosslinked polymer) ที่ไม่ละลายน้ำ ส่วนใหญ่เป็นไดไวนิล-เบนซีน และไวนิลเบนซีน ซึ่งได้แก่ สไตรีน โครงสร้างทางเคมีมีลักษณะ ดังนี้ (เฉลิมพล วนวงศ์ไทย ธวัชชัย แพซมัด และสมลักษณ์ คงเมือง. 2546: 47-53)



ภาพประกอบที่ 2.8 โครงสร้างของไดไวนิลเบนซีน



ภาพประกอบที่ 2.9 โครงสร้างของไวนิลเบนซีน

เรซินแลกเปลี่ยนไอออนแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ดังนี้

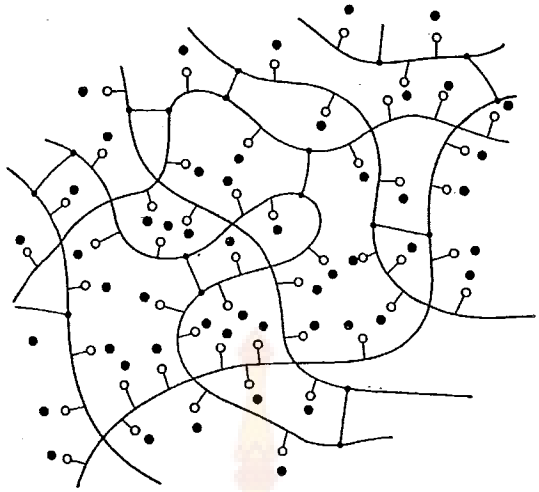
1. เรซินที่แลกเปลี่ยนประจุบวก (cation exchange resin) หมู่ที่ทำหน้าที่แลกเปลี่ยนไอออน ได้แก่ หมู่กรดซัลโฟนิก ($-SO_3H$) หมู่กรดคาร์บอกซิลิก (-COOH)

2. เรซินที่แลกเปลี่ยนประจุลบ (anion exchange resin) หมู่ที่ทำหน้าที่แลกเปลี่ยนไอออน ได้แก่ หมู่ควอเทอร์นารีแอมโมเนียม ($-NR^+X^-$)

นอกจากนี้มีเรซินแลกเปลี่ยนไอออนบางชนิดที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ทั้งประจุบวกและประจุลบ

2.4.2 โครงสร้างและส่วนประกอบของการแลกเปลี่ยนไอออน (Russell. 1970: 3)

เรซินแลกเปลี่ยนไอออนมีสมบัติเป็นเจลที่ดูดความชื้น สามารถพองตัวหรือหดตัวได้เมื่อดูดความชื้นหรือคายความชื้น ตามลำดับ โครงสร้างของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนแสดงดังในภาพประกอบที่ 2.10



ภาพประกอบที่ 2.10 โครงสร้างของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

——— = โซ่พอลิเมอร์แบบเส้นตรง

———O = หมู่ไอออนที่อยู่กับที่ (fixed ionic groups)

●——● = พันธะเชื่อมขวางระหว่างโซ่

● = ไอออนตรงกันข้าม (counter ions)

วัสดุใด ๆ จะเป็นเรซินชนิดแลกเปลี่ยนแคทไอออนหรือแอนไอออนขึ้นอยู่กับไอออนตรงกันข้าม ซึ่งอาจเป็นแคทไอออนหรือแอนไอออน ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ส่วนประกอบในการแลกเปลี่ยนไอออน

ชนิดของการแลกเปลี่ยนไอออน	ชนิดของไอออนที่อยู่กับที่	ชนิดของไอออนตรงกันข้าม	โคไอออน
การแลกเปลี่ยนแคทไอออน	แอนไอออน (-)	แคทไอออน (+)	แอนไอออน (-)
การแลกเปลี่ยนแอนไอออน	แคทไอออน (+)	แอนไอออน (-)	แคทไอออน (+)

2.4.3 การแลกเปลี่ยนไอออนในสารละลาย (เฉลิมพล วนวงศ์ไทย ธวัชชัย แพชมัด และสมลักษณ์ คงเมือง. 2546: 47-53)

เมื่อเรซินแลกเปลี่ยนไอออนสัมผัสกับสารละลายที่มีไอออนอยู่ (สารละลายอิเล็กโทรไลต์) จะเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนขึ้น โดยรักษาความเป็นกลางทางประจุไฟฟ้า และเป็นไปตามปริมาณสารสัมพันธ์ (stoichiometry) ไอออนที่เกิดการแลกเปลี่ยนจะมีประจุตรงข้ามกับไอออนของเรซิน และสามารถเคลื่อนที่ออกมาจากเมทริกซ์ของเรซินโดยกระบวนการแพร่ หรือการเคลื่อนที่ภายใต้สนามไฟฟ้า สำหรับไอออนที่มีประจุเหมือนกับประจุของเรซิน เรียกว่า โคไอออน ซึ่งโดยปกติแล้วไม่มีผลต่อการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน

ตัวอย่างปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินแลกเปลี่ยนแคทไอออนและเรซินแลกเปลี่ยนแอนไอออนเกิดขึ้น ดังนี้

การแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินแลกเปลี่ยนแคทไอออน

เรซิน

การแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินแลกเปลี่ยนแอนไอออน

เรซิน

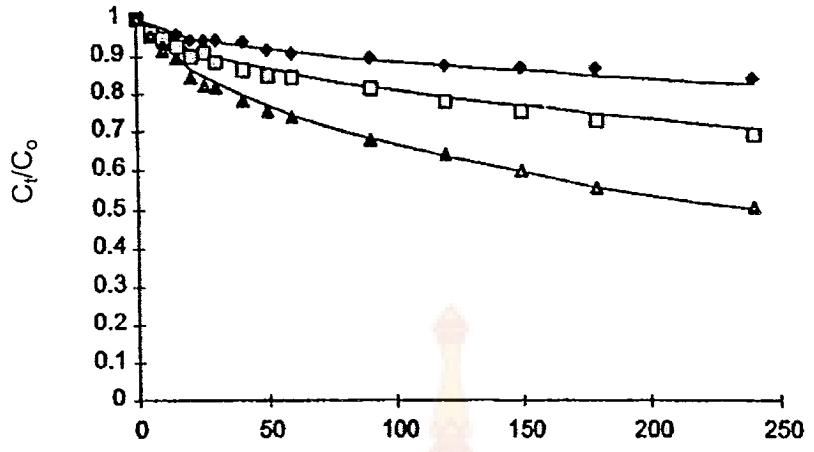
การแลกเปลี่ยนไอออนเหมือนกับการดูดซับ คือ ทั้งการแลกเปลี่ยนไอออนและการดูดซับ สารถูกดูดซับจะถูกดูดซับโดยวัสดุ คุณลักษณะที่แตกต่างของปรากฏการณ์ทั้งสองชนิดนี้ คือ ในการแลกเปลี่ยนไอออนทุก ๆ ไอออนซึ่งถูกกำจัดออกจากสารละลายจะถูกแทนที่ด้วยไอออนชนิดอื่นที่มีประจุเหมือนกัน เพื่อทำให้เกิดสมดุลของประจุ ในกระบวนการดูดซับตัวถูกละลาย (ซึ่งเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ หรือไม่ใช้สารละลายอิเล็ก- โทรไลต์) จะถูกดูดซับโดยปราศจากการแทนที่ด้วยอนุภาคอื่น ๆ

2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดสีด้วยวัสดุดูดซับชนิดต่าง ๆ

1. อิทธิพลของเวลา

เฮิมด์ และราม (Ahmed and Ram. 1992: 79-86) ศึกษาการกำจัดสีเบสิกจากน้ำทิ้งโดยใช้ซิลิกาเป็นวัสดุดูดซับ ผลจากการศึกษาพบว่า เมื่อระยะเวลาในการดูดซับเพิ่มขึ้น การกำจัดสีจะเพิ่มขึ้น และเข้าสู่สมดุลย์ของการดูดซับในเวลา 30-40 นาที นอกจากนี้ การดูดซับสีจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายสี

วอลเลอร์ และเวียเทอเลย์ (Walken and Weatherley. 1997: 1895-1899) ศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับสีแอซิดโดยใช้ถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุดูดซับ ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการสัมผัส (contact time) กับการลดลงของความเข้มข้นของสารละลายสี (C_t/C_o) แสดงดังในภาพประกอบที่ 2.11



C_o = ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสี

C_t = ความเข้มข้นของสารละลายสีที่เหลือที่เวลาใด ๆ

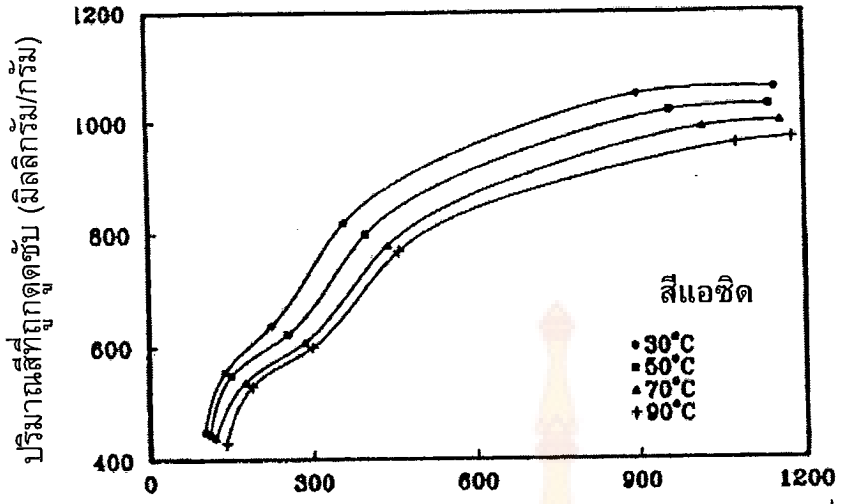
◆ 600 มิลลิกรัม/ลิตร □ 400 มิลลิกรัม/ลิตร Δ 200 มิลลิกรัม/ลิตร

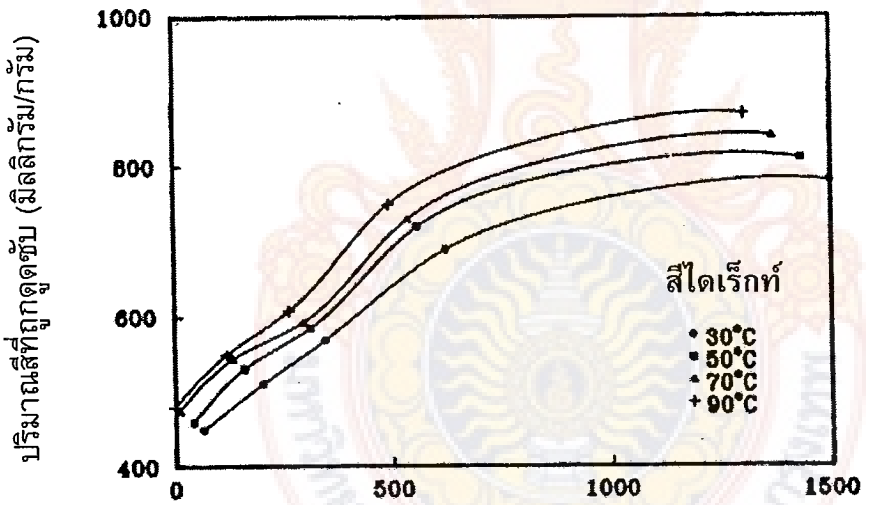
ภาพประกอบที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการสัมผัสกับการลดลงของความเข้มข้นของสารละลายสีแอซิดที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ (ปริมาณถ่านกัมมันต์ = 1.7 กรัม ขนาดอนุภาค = 355-500 ไมครอน อัตราเร็วในการกวน = 500 รอบ/นาที)

ผลจากการศึกษาพบว่า สารละลายสีมีความเข้มข้นลดลงเมื่อระยะเวลาในการสัมผัสระหว่างถ่านกัมมันต์กับสารละลายสีเพิ่มขึ้น

2. อิทธิพลของอุณหภูมิ (Hwang and Chen. 1993: 735-744)

อุณหภูมิของสารละลายมีผลต่อการดูดซับ 2 ประการ คือ อุณหภูมิมีผลต่ออัตราการแพร่ของสารถูกดูดซับในสารละลายไปยังวัสดุดูดซับ นอกจากนี้ อุณหภูมิมีผลต่อการละลายของสารถูกดูดซับและสมบัติการพองตัวของตัวดูดซับ อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการดูดซับสีแอซิด สีไดเร็กท์ด้วยพอลิเอไมด์-อิพิคลอโรไฮดริน-เซลลูโลส แสดงดังในภาพประกอบที่ 2.12



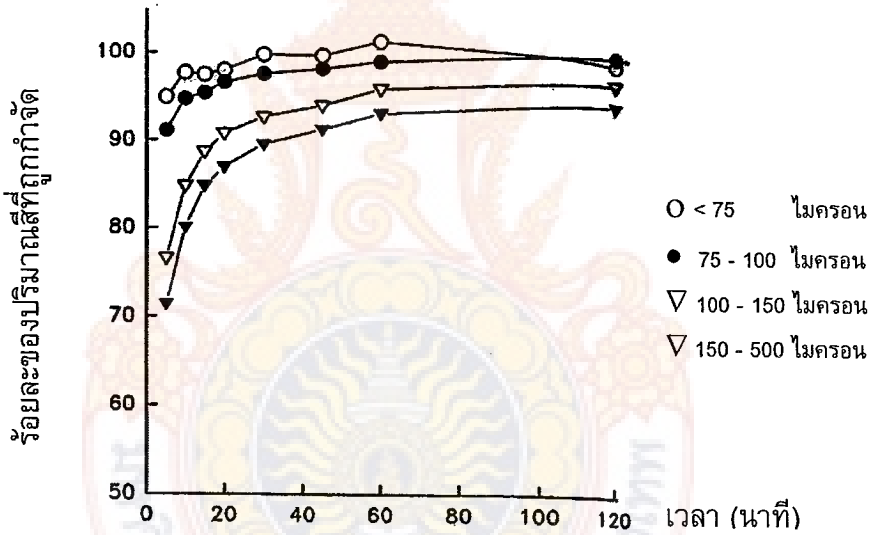


ภาพประกอบที่ 2.12 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการดูดซับสีแอซิดและสีไดเร็กท์ด้วยพอลิเอไมด์-อิพิคลอโรไฮดริน-เซลลูโลส

ผลจากการศึกษาพบว่า การดูดซับสีแอซิดลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดการคายความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อมในระหว่างกระบวนการดูดซับ ส่วนการดูดซับสีไดเร็กท์จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดการดูดความร้อนจากสิ่งแวดล้อมภายนอกในระหว่างกระบวนการดูดซับ นอกจากนี้ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทำให้การเคลื่อนที่ของโมเลกุลของสีเพิ่มขึ้น และช่วยเพิ่มอัตราการแพร่ของโมเลกุลของสีจากสารละลายไปยังวัสดุดูดซับ

3. อิทธิพลของขนาดอนุภาคของตัวดูดซับ

ลาสโซ (Laszlo. 1996: 13-17) ศึกษาการเตรียมเรซินสำหรับการแลกเปลี่ยนไอออนจากซานอ้อย เพื่อกำจัดสีรีแอกทีฟในน้ำทิ้ง การปรับปรุงซานอ้อยให้มีประจุบวกทำได้โดยนำซานอ้อยทำปฏิกิริยากับเอ็น-(3-คลอโร-2-ไฮดรอกซีโพรพิล)ไตรเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ (N-(3-chloro-2-hydroxypropyl) trimethylammmonium chloride) การกำจัดสีรีแอกทีฟด้วยซานอ้อยที่ผ่านการปรับปรุงแสดงดังในภาพประกอบที่ 2.13



ภาพประกอบที่ 2.13 ขนาดอนุภาคของซานอ้อยที่ผ่านการปรับปรุงต่อการกำจัดสีรีแอกทีฟ

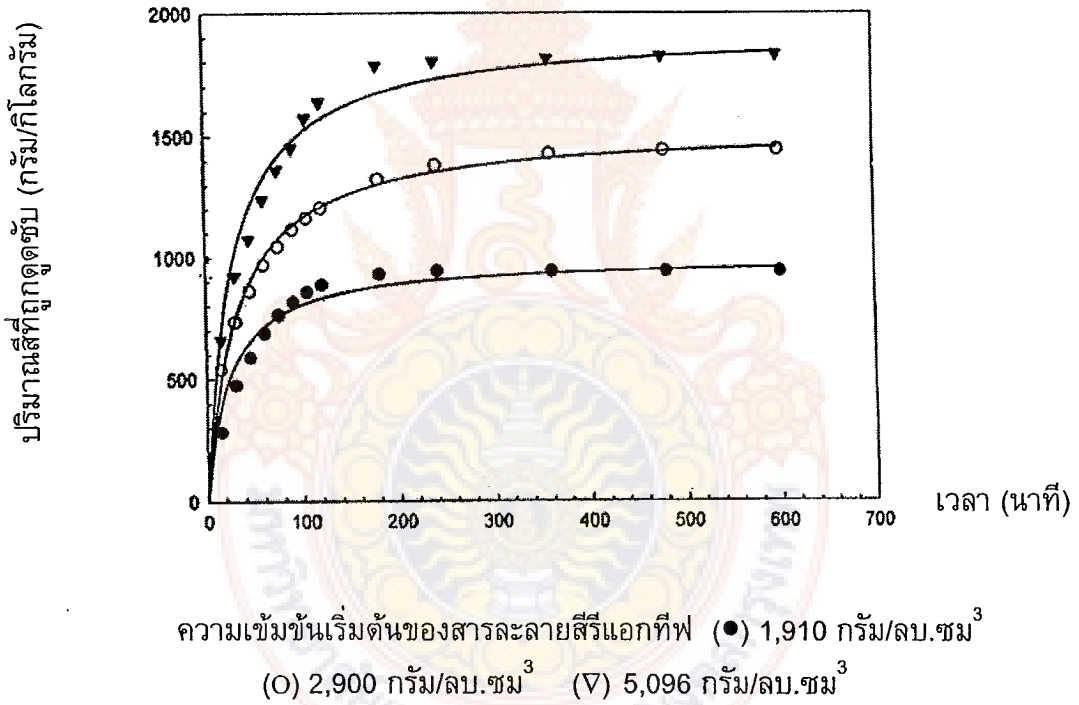
จากการศึกษาพบว่า อนุภาคของชานอ้อยที่มีขนาดเล็กกำจัดสีได้ดีกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ และการกำจัดสีเริ่มคงที่ที่เวลาประมาณ 60 นาที ในทุก ๆ ขนาดอนุภาคของชานอ้อย

4. ความมีขั้วของวัสดุดูดซับ (Alley. 2000: 126)

ความมีขั้วของวัสดุดูดซับมีผลต่อสมบัติการดูดซับ เช่น ถ่านกัมมันต์ จะดูดซับสารที่ไม่มีขั้วได้ดี เนื่องจากถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุดูดซับชนิดไม่มีขั้ว ความมีขั้วของวัสดุดูดซับมีผลต่อทั้งแรงดึงดูดทางฟิสิกส์และแรงดึงดูดทางเคมี เช่น แรงไดโพล-ไดโพล พันธะไฮโดรเจน ความมีขั้วจึงเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสำหรับวัสดุดูดซับบางชนิด

5. อิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายสี

ชิอู และลี (Chiou and Li. 2003: 1095-1105) ศึกษาการดูดซับสีรีแอกทีฟด้วยเม็ดลูกปัดไคโทซาน โดยศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายสีรีแอกทีฟ ผลการศึกษาแสดงดังในภาพประกอบที่ 2.14



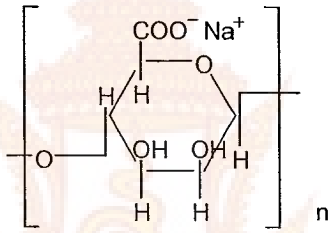
ภาพประกอบที่ 2.14 อิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายสีรีแอกทีฟที่มีต่อการดูดซับสีด้วยเม็ดลูกปัดไคโทซาน

ผลจากการศึกษาพบว่า เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสีรีแอกทีฟเพิ่มขึ้น การดูดซับสีบนเม็ดลูกปัดเพิ่มขึ้น ความจุของการดูดซับสีของสารละลายสีรีแอกทีฟที่มีความเข้มข้น 5096 และ 2900 กรัม/ลิตร มีค่าร้อยละ 93 และ 53 ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่าสารละลายสีรีแอกทีฟที่มีความเข้มข้น 1910 กรัม/ลิตร ดังนั้น ความเข้มข้นของสารละลายสีรีแอกทีฟจึงมีความสำคัญต่อการดูดซับด้วยเม็ดลูกปัดไคโทซาน

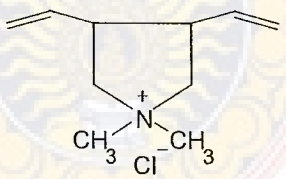
2.6 ทฤษฎี สมมุติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

โครงการวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์จากการทำปฏิกิริยาระหว่างโซเดียมแอลจิเนต ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติ และไดแอลลิวไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ ซึ่งเป็นแคทไอออนิกมอนอเมอร์ โครงสร้างทางเคมีมีลักษณะ ดังนี้

โครงสร้างทางเคมีของโซเดียมแอลจิเนต



โครงสร้างทางเคมีของไดแอลลิวไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์



หมู่คาร์บอกซิเลตไอออนของแอลจิเนตสามารถเกิดพอลิอิเล็กโทรไลต์เชิงซ้อนกับหมู่ $-NR_3^+Cl^-$ ของไดแอลลิวไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ โดยไดแอลลิวไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์จะถูกเชื่อมขวางด้วยเอ็น,เอ็น′-เมทิลีนบิสอะคริลาไมด์ ในขณะเดียวกันหมู่คาร์บอกซิเลตไอออนของแอลจิเนตที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยากับหมู่ $-NR_3^+$ ของไดแอลลิวไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์จะเกิดการเชื่อมขวางกับ Ca^{2+} เกิดเป็นโครงข่ายแอลจิเนต ดังนั้น เมื่อหยดสารละลายแอลจิเนตและไดแอลลิวไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ลงในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ ซึ่งสามารถคงรูปอยู่ได้เนื่องจากเม็ดลูกปัดมีลักษณะเป็นพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกัน เม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ที่ได้จะมีประจุ

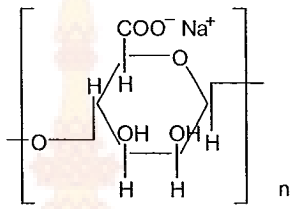
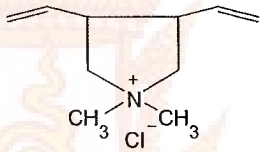
เป็นบวก เนื่องจากหมู่ $-NR_3^+Cl^-$ ในไดแอลลิวไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ ดังนั้นเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ที่ได้จากการเตรียมจึงสามารถดูดซับสีรีแอกทีฟที่มีประจุลบได้

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 สารเคมี

สารเคมีที่ใช้ในการทดลองมี ดังนี้

ตารางที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ชื่อสารเคมี	สูตรเคมี	บริษัทผู้ผลิต
แคลเซียมคลอไรด์	$CaCl_2$	Fluka
โซเดียมแอลจิเนต		V.P.C. Group
โพแทสเซียมเพอร์ซัลเฟต	$K_2S_2O_8$	Carlo Erba
ไดแอลลิลไดเมทิลแอมโมเนียม-คลอไรด์		Fluka
สีรีแอกทีฟชนิดสีแดง	C.I. Reactive Red 195 Monoazo	Modern Dyestuff & Pigment Co, Ltd
เอ็น,เอ็น′-เมทิลีนบีสอะคริลาไมด์ (MBAM)	$CH_2(NH\text{-}CO\text{-}CH{=}CH_2)_2$	Fluka
เอ็น, เอ็น, เอ็น′, เอ็น′-เตตระ-เมทิลเอทิลีนไดเอมีน (TMEDA)	$(CH_3)_2N\text{-}CH_2\text{-}CH_2\text{-}N(CH_3)_2$	Fluka

3.2 การเตรียมเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์

3.2.1 การเตรียมเม็ดลูกปัดแอลจิเนต

วิธีการทดลอง

1. เตรียมสารละลายโซเดียมแอลจิเนตที่มีความเข้มข้นร้อยละ 6 จำนวน 20 มิลลิลิตร โดยละลายโซเดียมแอลจิเนตในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

2. เตรียมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$) ที่มีความเข้มข้น 0.3 โมล/ลิตร จากนั้นหยดสารละลายโซเดียมแอลจิเนตลงในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ แล้วตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาตามที่กำหนดนำเม็ดพอลิเมอร์ไปล้างด้วยน้ำกลั่นจำนวน 3 ครั้ง และแบ่งเม็ดลูกปัดออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

2.1 ส่วนที่หนึ่ง แช่เม็ดลูกปัดทิ้งไว้ในน้ำกลั่น (เม็ดลูกปัดสด)

2.2 ส่วนที่สอง นำเม็ดลูกปัดมาอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80°C (เม็ดลูกปัดแห้ง)

3.2.2 การเตรียมเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกันระหว่างแอลจิเนตและไดแอลลิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์

วิธีการทดลอง

1. เตรียมสารละลายโซเดียมแอลจิเนตที่มีความเข้มข้นร้อยละ 6 จำนวน 20 มิลลิลิตร โดยละลายโซเดียมแอลจิเนตในน้ำกลั่น ที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นละลายไดแอลลิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ และโพรแทสเซียมเพอร์ซัลเฟต ($K_2S_2O_8$) ในสารละลายโซเดียมแอลจิเนต คนจนได้สารละลายที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน หลังจากนั้น เทสารละลายลงในบิวเรตต์

2. ผสมไดแอลลิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ จำนวน 5 มิลลิลิตร (5.235 กรัม) และโพรแทสเซียมเพอร์ซัลเฟต ($K_2S_2O_8$) 0.1047 กรัม (ความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนักของมอนอเมอร์) และเอ็น,เอ็น′-เมทิลีนบีสอะคริลาไมด์ จำนวน 0.2094 กรัม (ความเข้มข้นร้อยละ 4 โดยน้ำหนักของมอนอเมอร์) ในสารละลายโซเดียมแอลจิเนตจำนวน 52.35 มิลลิลิตร คนจนได้สารละลายที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน หลังจากนั้นเทสารละลายลงในบิวเรตต์ (อัตราส่วนระหว่างแอลจิเนตและไดแอลลิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์เท่ากับ 3: 5 โดยน้ำหนัก)

3. เตรียมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$) ที่มีความเข้มข้น 0.3 โมล/ลิตร และผสม เอ็น, เอ็น, เอ็น′, เอ็น′-เตตระเมทิลเอทิลีนไดเอมีนลงในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ โดยใช้อัตราส่วนระหว่างสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และเอ็น, เอ็น, เอ็น′, เอ็น′-เตตระเมทิลเอทิลีนไดเอมีนเท่ากับ 20: 1 (โดยปริมาตร) จากนั้นหยดสารละลายโซเดียมแอลจิเนตที่มีไดแอลลิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์และสารอื่นๆละลายอยู่ลงในสารละลายแคลเซียม-คลอไรด์ โดยใช้อัตราส่วนระหว่างสารละลายแอลจิเนตและสารละลายแคลเซียมคลอไรด์เท่ากับ 1: 5 (โดยปริมาตร) หลังจากนั้นตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาตามที่กำหนดนำเม็ดพอลิเมอร์ไปล้างด้วยน้ำกลั่นจำนวน 3 ครั้ง และแบ่งเม็ดลูกปัดออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

3.1 ส่วนที่หนึ่ง แช่เม็ดลูกปัดทิ้งไว้ในน้ำกลั่น (เม็ดลูกปัดสด)

3.2 ส่วนที่สอง นำเม็ดลูกปัดมาอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80°C (เม็ดลูกปัดแห้ง)

3.3 การตรวจสอบลักษณะเฉพาะของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์

3.3.1 การหาขนาดอนุภาคของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์

วิธีการทดลอง

นำเม็ดลูกปัดสดมาซับน้ำด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 แล้ววัดหาขนาดของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โดยใช้เวอร์เนียร์แคลิฟเปอร์ ทำการทดลองซ้ำโดยสุ่มตัวอย่างเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์จำนวน 351 เม็ด

3.3.2 การตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์

วิธีการทดลอง

เม็ดลูกปัดของแอลจิเนต และเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกันในสภาวะแห้งถูกนำมาตรวจสอบลักษณะพื้นผิว โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน-แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM, XL 30 CP, Philips)

3.4 การศึกษาสมบัติการพองตัวของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์

วิธีการทดลอง

1. นำเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ที่ถูกทำให้แห้งในภาชนะทำแห้ง (desiccator) แช่ลงในน้ำกลั่นและตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จนเม็ดพอลิเมอร์เกิดการพองตัวโดยสมบูรณ์

2. นำเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์มาซับด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 จากนั้นชั่งน้ำหนักเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์และบันทึกผล

3. คำนวณร้อยละของการพองตัวของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ จากสูตร ดังนี้

$$\text{ร้อยละของการพองตัว} = [(W-W_o) / W_o] \times 100$$

W_o = น้ำหนักเริ่มต้นของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์

W = น้ำหนักของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ภายหลังการพองตัว

3.5 การหาระยะเวลาในการสัมผัสที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีรีแอกทีฟ

วิธีการทดลอง

1. เตรียมสารละลายสีรีแอกทีฟ (สีแดง) ที่มีความเข้มข้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร จำนวน 500 มิลลิลิตร

2. นำเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ (ชนิดสดและแห้ง) น้ำหนัก 1 กรัม ใส่ลงในหลอดทดลอง จากนั้นเติมสารละลายสีรีแอกทีฟที่มีความเข้มข้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร จำนวน 10 มิลลิลิตร ลงไป

ในหลอดทดลอง ปิดปากหลอดทดลอง โดยทำการศึกษาการดูดซับสีรีแอกทีฟที่อุณหภูมิ 80°C และอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10-180 นาที

3. ดูดสารละลายสีที่เหลือออกจากหลอดทดลอง และวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีที่ค่าความยาวคลื่นสูงสุด (λ_{max}) โดยใช้เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) และคำนวณอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของสีที่เหลือที่เวลาใด ๆ กับความเข้มข้นของสีเริ่มต้น (C_t/C_o)

C_o = ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีรีแอกทีฟ (มิลลิกรัม/ลิตร)

C_t = ความเข้มข้นของสารละลายสีรีแอกทีฟภายหลังจากถูกดูดซับด้วยเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ที่เวลาใด ๆ (มิลลิกรัม/ลิตร)

4. เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของสีที่เหลือที่เวลาใด ๆ กับความเข้มข้นของสีเริ่มต้น (C_t/C_o) และเวลาที่ใช้ในการดูดซับสีรีแอกทีฟเพื่อหาระยะเวลาที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีรีแอกทีฟด้วยเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ชนิดสดและแห้ง

3.6 การศึกษาการดูดซับสีรีแอกทีฟด้วยเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์

วิธีการทดลอง

1. เตรียมสารละลายสีรีแอกทีฟ (สีแดง) ที่มีความเข้มข้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร

2. นำเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ (ชนิดสดและแห้ง) น้ำหนัก 1 กรัม ใส่ลงในหลอดทดลอง จากนั้นเติมสารละลายสีรีแอกทีฟที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ จำนวน 20 มิลลิลิตร ลงไปในหลอดทดลอง ปิดปากหลอดทดลอง โดยทำการศึกษาการดูดซับสีรีแอกทีฟที่อุณหภูมิ 80°C และอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 180 นาที

3. ดูดสารละลายสีที่เหลือออกจากหลอดทดลอง และวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีที่ค่าความยาวคลื่นสูงสุด (λ_{max}) โดยใช้เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ และคำนวณหาปริมาณสีที่ถูกดูดซับด้วยเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ จากสูตร ดังนี้

$qe = [(C_o-C_e)V] / W$

qe = จำนวนมิลลิกรัมของสีรีแอกทีฟที่ถูกดูดซับด้วยเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ที่ภาวะสมดุล (มิลลิกรัม/กรัม)

C_o = ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีรีแอกทีฟ (มิลลิกรัม/ลิตร)

C_e = ความเข้มข้นของสารละลายสีรีแอกทีฟ ภายหลังจากถูกดูดซับด้วยเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ (มิลลิกรัม/ลิตร)

V = ปริมาตรของสารละลายสีรีแอกทีฟ (ลิตร)

W = น้ำหนักของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ (กรัม)

3.7 การศึกษาไอโซเทิร์มดูดซับสีรีแอกทีฟด้วยเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์

วิธีการทดลอง

1. เตรียมสารละลายสีรีแอกทีฟ (สีแดง สีน้ำเงิน และสีเหลือง) ที่มีความเข้มข้น 10-130 มิลลิกรัม/ลิตร จำนวน 500 มิลลิลิตร

2. นำเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ (ชนิดสด) น้ำหนัก 1 กรัม ใส่ลงในหลอดทดลอง จากนั้นเติมสารละลายสีรีแอกทีฟที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ จำนวน 10 มิลลิลิตร ลงไปในหลอดทดลอง ปิดปากหลอดทดลอง โดยทำการศึกษาการดูดซับสีรีแอกทีฟที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 180 นาที

3. ดูดสารละลายสีที่เหลือออกจากหลอดทดลอง และวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีที่ค่าความยาวคลื่นสูงสุด (λ_{max}) โดยใช้เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ และคำนวณหาปริมาณสีที่ถูกดูดซับด้วยเม็ดพอลิเมอร์ จากสูตร ดังนี้ (Mohamed et al. 2000: 172)

$qe = [(C_o-C_e)V] / W$

qe = จำนวนมิลลิกรัมของสีรีแอกทีฟที่ถูกดูดซับด้วยเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ที่ภาวะสมดุล (มิลลิกรัม/กรัม)

C_o = ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีรีแอกทีฟ (มิลลิกรัม/ลิตร)

C_e = ความเข้มข้นของสารละลายสีรีแอกทีฟ ภายหลังจากถูกดูดซับด้วยเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ (มิลลิกรัม/ลิตร)

V = ปริมาตรของสารละลายสีรีแอกทีฟ (ลิตร)

W = น้ำหนักของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ (กรัม)

3.8 อิทธิพลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อการดูดซับสีรีแอกทีฟของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์

วิธีการทดลอง

1. เตรียมสารละลายสีรีแอกทีฟ (สีแดง) ที่มีความเข้มข้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร จำนวน 10 มิลลิลิตร ผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่มีความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร จำนวน 10 มิลลิลิตร

2. นำเม็ดลูกปัดแอลจิเนตและพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกันน้ำหนัก 1 กรัม ใส่ลงในหลอดทดลอง จากนั้น เติมสารละลายสีรีแอกทีฟ (จากข้อ 1) จำนวน 20 มิลลิลิตร โดยทำการศึกษาการดูดซับสีรีแอกทีฟที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 180 นาที

3. ดูดสารละลายสีที่เหลือออกจากหลอดทดลอง และวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีที่ค่าความยาวคลื่นสูงสุด (λ_{max}) โดยใช้เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ และคำนวณหาปริมาณสีที่ถูกดูดซับด้วยเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ จากสูตร ดังนี้

$$\%A = [(C_o - C_e) / C_o] \times 100$$

%A = ร้อยละของปริมาณสีรีแอกทีฟที่ถูกดูดซับด้วยเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ที่ภาวะสมดุล

C_o = ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีรีแอกทีฟ (มิลลิกรัม/ลิตร)

C_e = ความเข้มข้นของสารละลายสีรีแอกทีฟภายหลังจากถูกดูดซับด้วยเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ (มิลลิกรัม/ลิตร)

3.9 อิทธิพลของโซเดียมคาร์บอเนตต่อการดูดซับสีรีแอกทีฟของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์

วิธีการทดลอง

1. เตรียมสารละลายสีรีแอกทีฟ (สีแดง) ที่มีความเข้มข้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร จำนวน 10 มิลลิลิตร ผสมกับสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต ที่มีความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร จำนวน 10 มิลลิลิตร

2. นำเม็ดลูกปัดแอลจิเนตและพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกันน้ำหนัก 1 กรัม ใส่ลงในหลอดทดลอง จากนั้น เติมสารละลายสีรีแอกทีฟ (จากข้อ 1) จำนวน 20 มิลลิลิตร โดยทำการศึกษาการดูดซับสีรีแอกทีฟที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 180 นาที

3. ดูดสารละลายสีที่เหลือออกจากหลอดทดลอง และวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีที่ค่าความยาวคลื่นสูงสุด (λ_{max}) โดยใช้เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ และคำนวณหาปริมาณสีที่ถูกดูดซับด้วยเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ จากสูตร ดังนี้

$\%A = [(C_o-C_e) / C_o] \times 100$

%A = ร้อยละของปริมาณสีรีแอกทีฟที่ถูกดูดซับด้วยเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ที่ภาวะสมดุล

C_o = ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีรีแอกทีฟ (มิลลิกรัม/ลิตร)

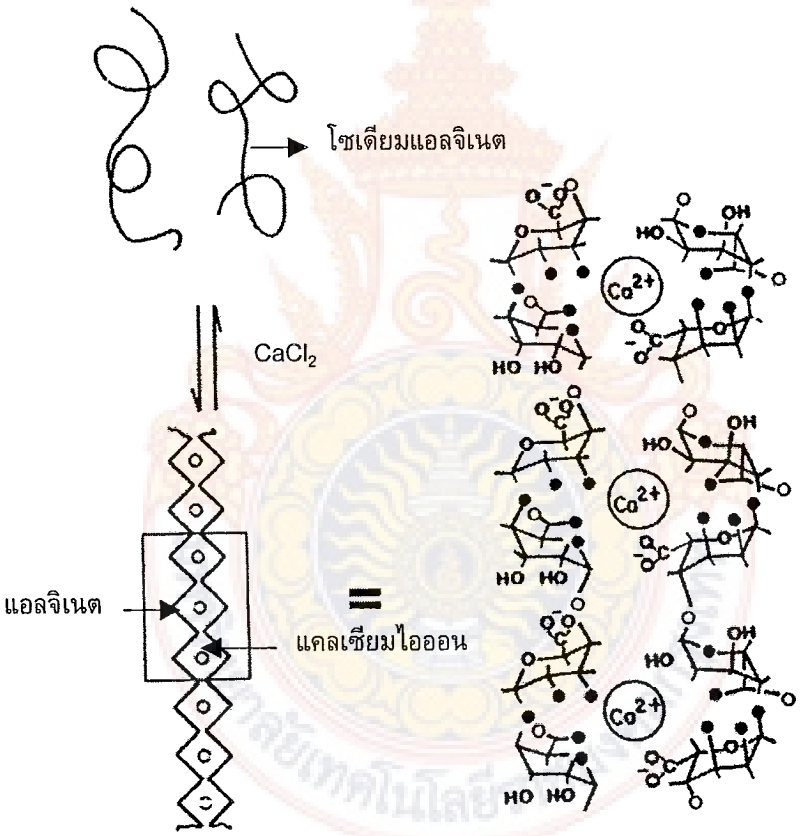
C_e = ความเข้มข้นของสารละลายสีรีแอกทีฟภายหลังจากถูกดูดซับด้วยเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ (มิลลิกรัม/ลิตร)

บทที่ 4
ผลการวิจัยและการอภิปราย

4.1 การเตรียมเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์

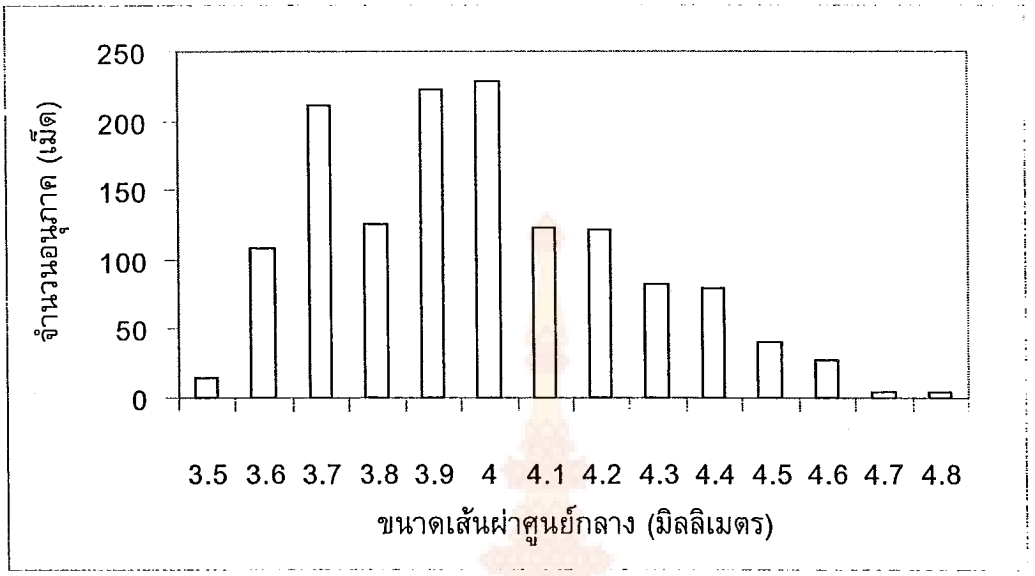
4.1.1 การเตรียมเม็ดลูกปัดแอลจิเนต

การเตรียมเม็ดลูกปัดแอลจิเนต เตรียมโดยนำสารละลายโซเดียมแอลจิเนตที่มีความเข้มข้นร้อยละ 6 (น้ำหนัก/ปริมาตร) หยดลงในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 0.3 โมล/ลิตร สารละลายโซเดียมแอลจิเนตจะปรากฏเป็นเม็ดเจลทันทีเมื่อสารละลายโซเดียมแอลจิเนตทำปฏิกิริยากับสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ เนื่องจากเกิดการทำปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมไอออนกับโซ่พอลิเมอร์ของแอลจิเนต ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.1



ภาพประกอบที่ 4.1 การทำปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมไอออนกับแอลจิเนต (Salomone. 1996: 151)

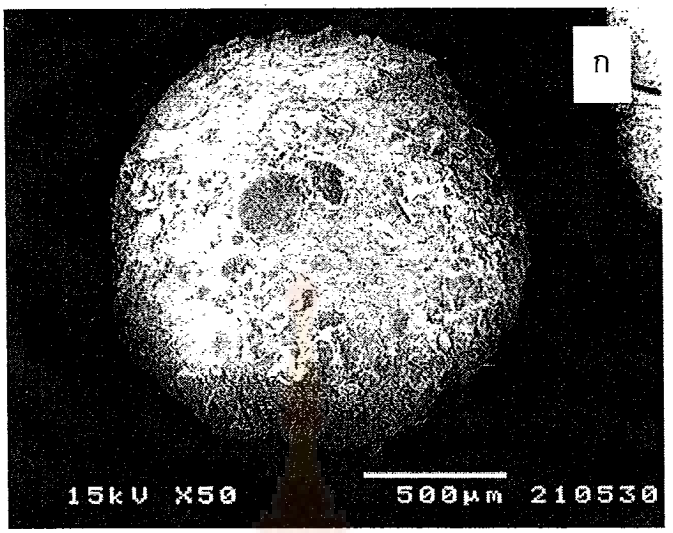
การกระจายขนาดอนุภาคของเม็ดลูกปัดแอลจิเนตสด (สภาวะเปียก) แสดงดังในภาพประกอบที่ 4.2 และภาคผนวก ก

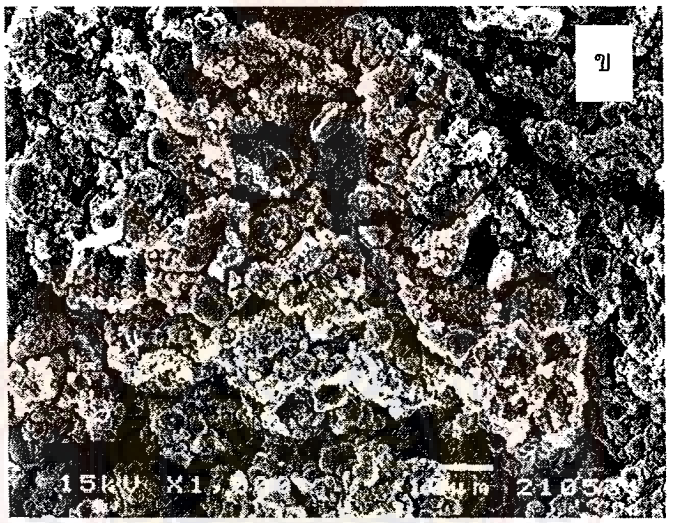


ภาพประกอบที่ 4.2 การกระจายขนาดอนุภาคของเม็ดลูกปัดแอลจิเนตสด

ผลจากการศึกษาพบว่าเม็ดลูกปัดแอลจิเนตมีการกระจายขนาดอนุภาคระหว่าง 3.5-4.8 มิลลิเมตร และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 3.97 มิลลิเมตร

เม็ดลูกปัดแอลจิเนตสดในสภาวะเปียกจะมีสีเหลืองค่อนข้างขาว ยืดหยุ่นได้และมีรูปร่างค่อนข้างกลม จากการสังเกตด้วยตาเปล่าผิวของเม็ดลูกปัดแอลจิเนตจะเรียบ แต่ภายหลังจากทำให้เม็ดลูกปัดแอลจิเนตแห้ง ขนาดอนุภาคของเม็ดลูกปัดแอลจิเนตมีขนาดประมาณ 1.5 มิลลิเมตร เมื่อตรวจสอบลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ผลการศึกษาแสดงดังในภาพประกอบที่ 4.3 ผลจากการศึกษาพบว่า พื้นผิวของเม็ดลูกปัด-แอลจิเนตในสภาวะแห้งมีลักษณะขรุขระ และมีร่องลึกบริเวณผิว





ภาพประกอบที่ 4.3 ลักษณะพื้นผิวของเม็ดลูกปัดแอลจิเนตแห้ง

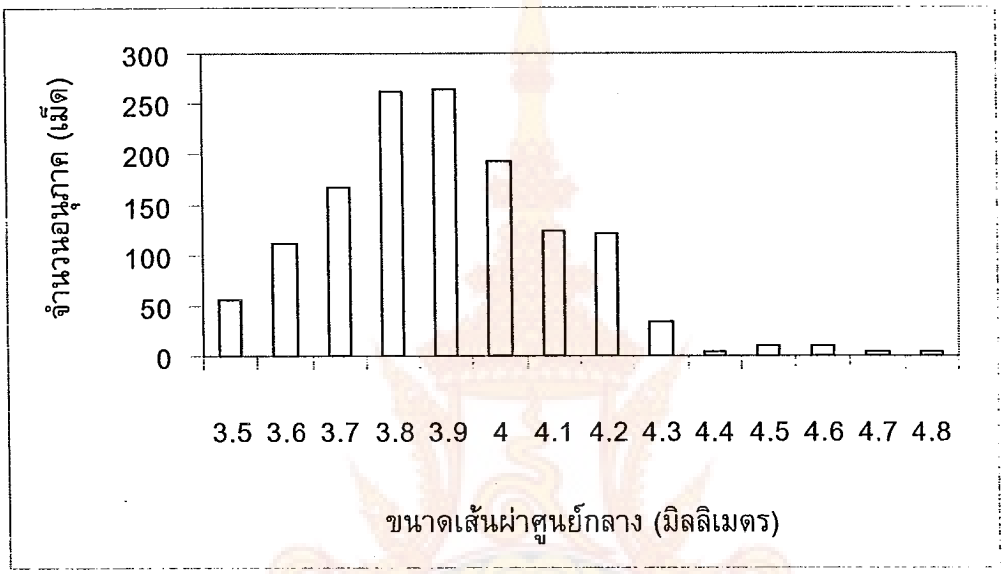
ก. กำลังขยาย 50 x

ข. กำลังขยาย 1000 x

4.1.2 การเตรียมเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกัน

เม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกัน สามารถเตรียมได้โดยผสมโซเดียมแอลจิเนตและไดแอลลิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์เข้าด้วยกัน จากนั้นหยดลงในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ โดยมีเอ็น, เอ็น′-เตตระเมทิลเอทิลีนไดเอมีนผสมอยู่ ซึ่งจะปรากฏเป็นเม็ดเจลทันทีที่ทำปฏิกิริยากับสารละลายแคลเซียมคลอไรด์

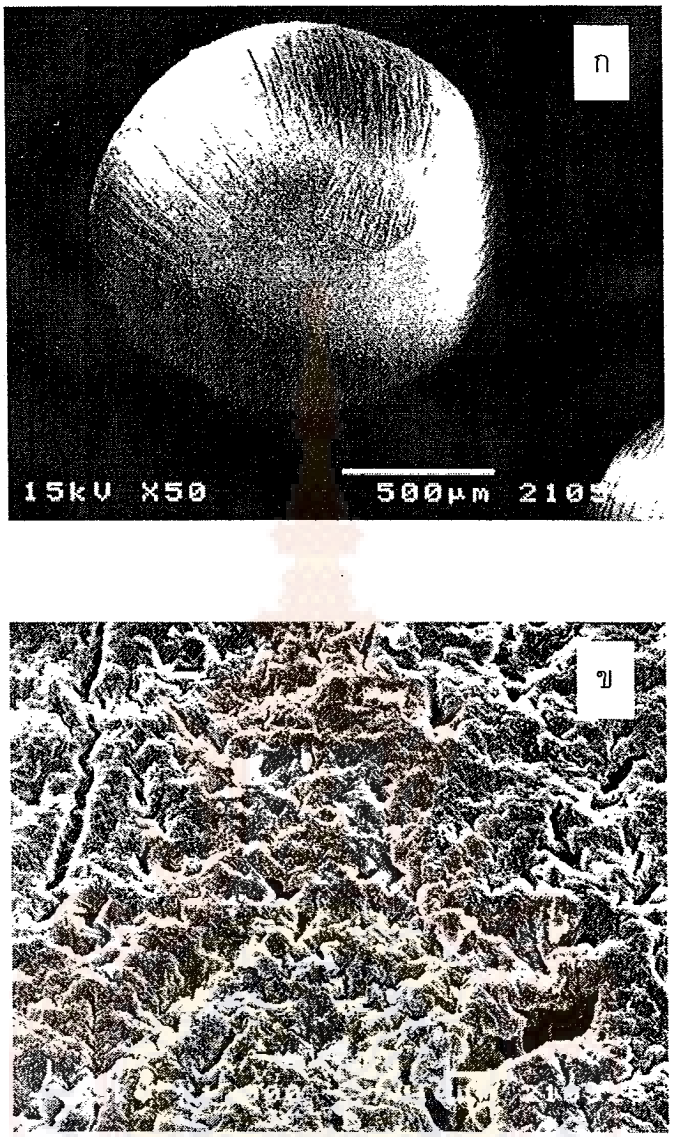
การกระจายขนาดอนุภาคของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกันแสดงดังในภาพประกอบที่ 4.4 และภาคผนวก ก



ภาพประกอบที่ 4.4 การกระจายขนาดอนุภาคของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยง-ซึ่งกันและกัน

ผลจากการศึกษาพบว่า เม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกันมีการกระจายขนาดอนุภาคระหว่าง 3.5-4.8 มิลลิเมตร และมีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 3.84 มิลลิเมตร

เม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกัน มีสีเหลือง ยืดหยุ่น และมีรูปร่างค่อนข้างกลม จากการสังเกตด้วยตาเปล่าผิวของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์จะเรียบ แต่ภายหลังจากทำให้เม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกันแห้ง เม็ดลูกปัดพอลิเมอร์มีขนาดประมาณ 1.5 มิลลิเมตร เมื่อตรวจสอบลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน-แบบส่องกราด ผลการศึกษาแสดงดังภาพในประกอบที่ 4.5 ผลจากการศึกษาพบว่า พื้นผิวของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกันในสภาวะแห้ง มีลักษณะเรียบกว่าพื้นผิวของเม็ดลูกปัดแอลจิเนต เนื่องจากเกิดการทำปฏิกิริยากันระหว่างแอจิเนตและไดแอลลิล-ไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์



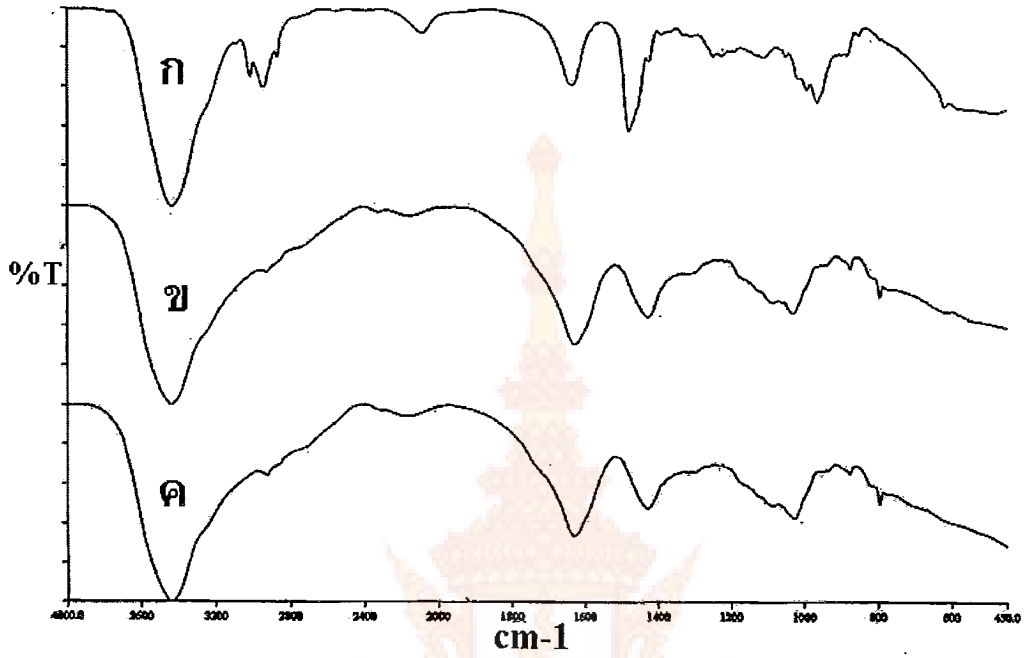
ภาพประกอบที่ 4.5 ลักษณะพื้นผิวของพอลิเมอร์โครงข่ายแบบเชื่อมโยงซึ่งกันและกัน

ก. กำลังขยาย 50 x

ข. กำลังขยาย 1000 x

4.2 การตรวจสอบเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

เม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกัน ถูกนำมาตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ผลการศึกษาแสดงดังในภาพประกอบที่ 4.6

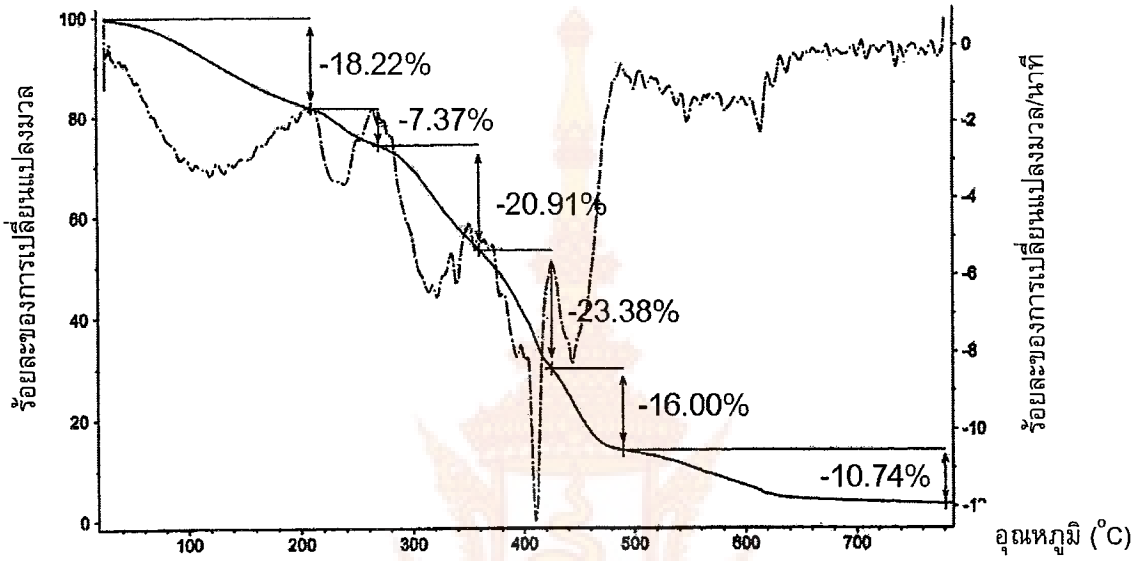


ภาพประกอบที่ 4.6 อินฟราเรดสเปกตรัมชนิดต่าง ๆ
ก. โซเดียมแอลจิเนต
ข. พอลิไดแอลลิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์
ค. เม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกัน

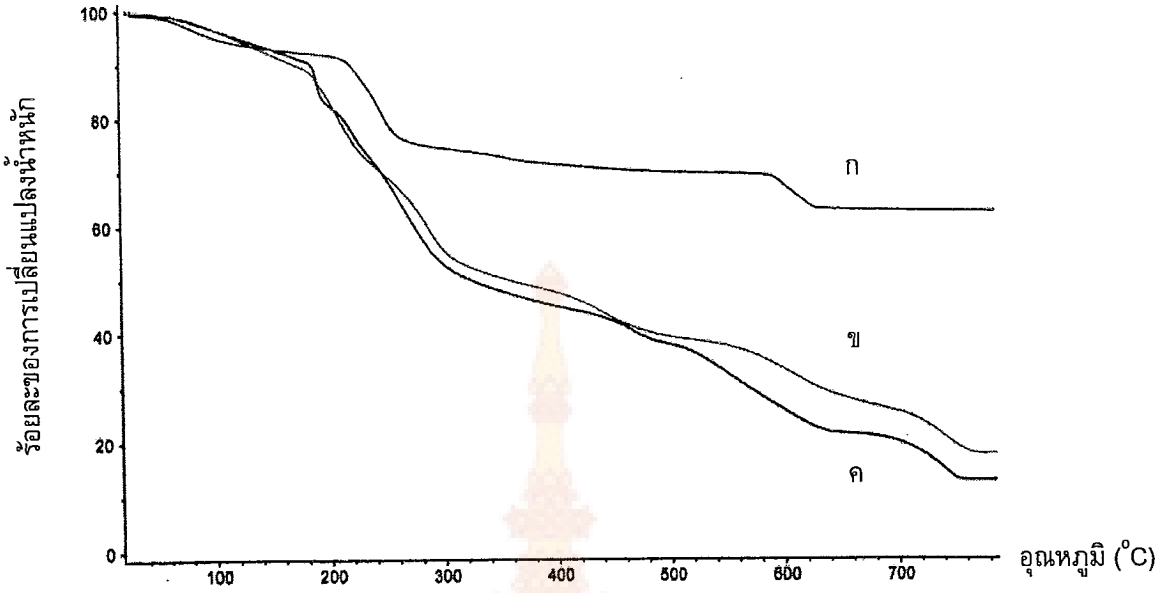
ผลจากการศึกษาพบว่า ในโซเดียมแอลจิเนตปรากฏสเปกตรัมของหมู่ $-COO^-$ ที่บริเวณ 1672 เซนติเมตร$^{-1}$ ส่วนอินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิไดแอลลิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ประกอบด้วยหมู่ $-CH_3$ ที่บริเวณ 1477 เซนติเมตร$^{-1}$ หมู่ $-CH_2$ ที่บริเวณ 2945 เซนติเมตร$^{-1}$ หมู่ C-N ที่บริเวณ 1105 เซนติเมตร$^{-1}$ และหมู่ควอเทอร์นารีแอมโมเนียมที่บริเวณ 961 เซนติเมตร$^{-1}$ ในเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกันพบว่า ปรากฏสเปกตรัมของไดแอลลิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ ซึ่งแสดงว่าไดแอลลิลไดเมทิล-แอมโมเนียมคลอไรด์เข้าทำปฏิกิริยากับแอลจิเนตในระหว่างการเตรียมเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกัน

4.3 การตรวจสอบสมบัติของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ด้วยเทคนิคทางความร้อน

พอลิไดแอลลิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ โซเดียมแอลจิเนตในรูปแบบผง เม็ดลูกปัดแอลจิเนต และเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกัน ถูกนำมาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิห้อง ถึง 800°C ผลการศึกษาแสดงดังในภาพประกอบที่ 4.7-4.8



ภาพประกอบที่ 4.7 เทอร์โมแกรมการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของพอลิไดแอลลิลไดเมทิล-แอมโมเนียมคลอไรด์เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ



ภาพประกอบที่ 4.8 เปรียบเทียบเทอร์โมแกรมการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของโซเดียมแอลจิเนตผงเม็ดลูกปัดแอลจิเนต และเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกันเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ

ก. โซเดียมแอลจิเนตผง

ข. เม็ดลูกปัดแอลจิเนต

ค. เม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกัน

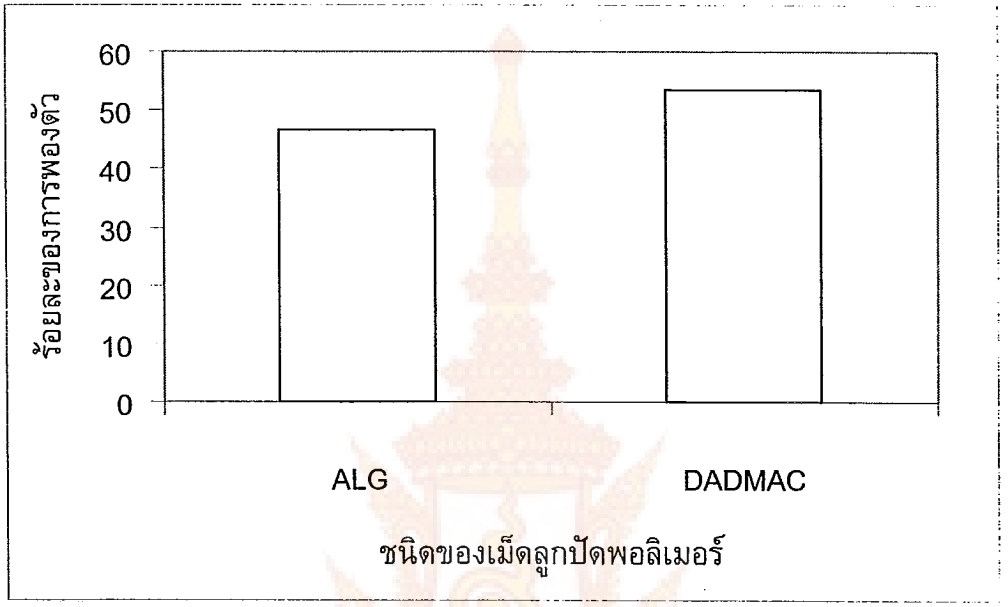
เทอร์โมแกรมของพอลิไดแอลลิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์โฮโมพอลิเมอร์แสดงการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักหลายขั้นตอน โดยพอลิไดแอลลิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์เริ่มเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100°C (ภาพประกอบที่ 4.7)

โซเดียมแอลจิเนตในรูปแบบผง ซึ่งไม่ได้ผ่านการเชื่อมขวางด้วยแคลเซียมคลอไรด์เมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการสลายตัวทั้งหมดปริมาณร้อยละ 37.18 ซึ่งน้อยกว่าการสลายตัวของเม็ดลูกปัดแอลจิเนต (การสลายตัวมีปริมาณร้อยละ 82.54) การเชื่อมขวางโซเดียม-แอลจิเนตด้วย Ca^{2+} ทำให้เม็ดลูกปัดแอลจิเนตเกิดการสลายตัวด้วยความร้อนหลายขั้นตอน การเกิดการเชื่อมขวางจึงทำให้เม็ดลูกปัดแอลจิเนตไม่คงทนต่อความร้อน

เม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกัน ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยากันระหว่างโซเดียมแอลจิเนต และไดแอลลิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ พบว่าเม็ดลูกปัดเกิดการสลายตัวเมื่อได้รับความร้อนหลายขั้นตอน (การสลายตัวมีปริมาณร้อยละ 87.28) และมีการสลายตัวมากกว่าเม็ดลูกปัดแอลจิเนต เนื่องจากไดแอลลิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์มีความคงทนต่อความร้อนต่ำ (ดูภาพประกอบที่ 4.8) ผลการศึกษานี้แสดงว่าไดแอลลิล-ไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์เข้าทำปฏิกิริยากับโซเดียมแอลจิเนต เกิดเป็นเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกัน

4.4 สมบัติการพองตัวของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์

สมบัติการพองตัวของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ ศึกษาโดยการนำเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ในสภาวะแห้งแช่ลงในน้ำกลั่นและตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พฤติกรรมการพองตัวของเม็ดลูกปัดแอลจิเนตและพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกันระหว่างแอลจิเนตและไดแอลลิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ แสดงดังในภาพประกอบที่ 4.9



ภาพประกอบที่ 4.9 ร้อยละของการพองตัวของเม็ดลูกปัดแอลจิเนตและพอลิเมอร์โครงข่าย-เชื่อมโยงซึ่งกันและกัน

ALG = เม็ดลูกปัดแอลจิเนต

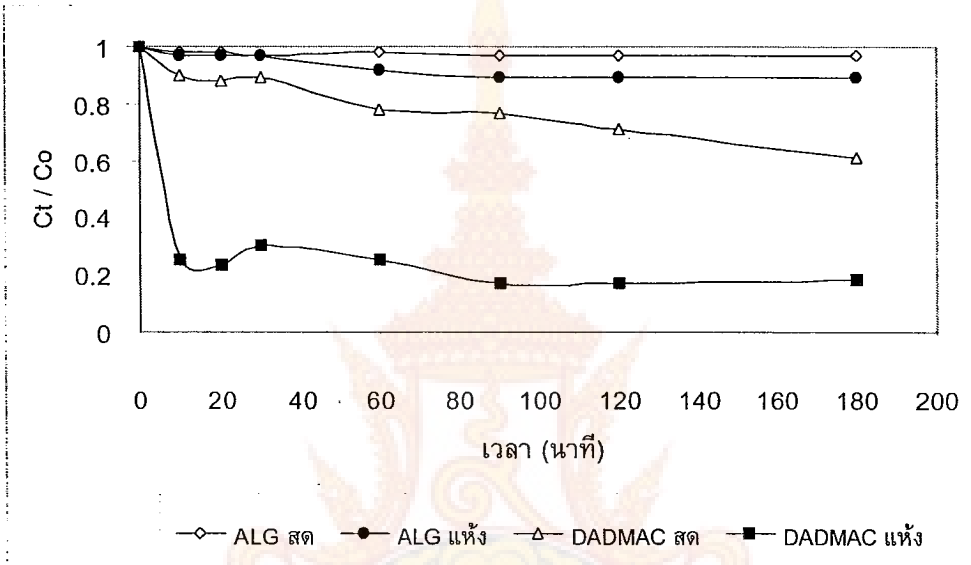
DADMAC = เม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกัน

ผลจากการศึกษาพบว่าเม็ดลูกปัดแอลจิเนตในสภาวะแห้งมีอัตราการพองตัวต่ำกว่าเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกัน เนื่องจากแอลจิเนตมีสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic property) ต่ำ แต่พอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกันจะเกิดการพองตัวได้ดี เนื่องจากพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันละกันเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างแอลจิเนตกับไดแอลลิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ และไดแอลลิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์มีหมู่ $-NR_3^+Cl^-$ ซึ่งเป็นหมู่ที่ชอบน้ำเป็นองค์ประกอบ จึงทำให้พอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกันเกิดการพองตัวดีกว่าเม็ดลูกปัดแอลจิเนต โดย คิม และคณะ (Kim et al. 2004: 2876-2880) ศึกษาการเตรียมไฮโดรเจล พบว่าพอลิไดแอลลิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ทำให้พอลิเมอร์

มีการพองตัวสูงเช่นกัน เนื่องจากพอลิไดแอลลิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์มีสมบัติชอบน้ำ ดังนั้น ไดแอลลิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์จึงมีผลต่อการพองตัวของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์

4.5 ระยะเวลาในการสัมผัสที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีรีแอกทีฟ

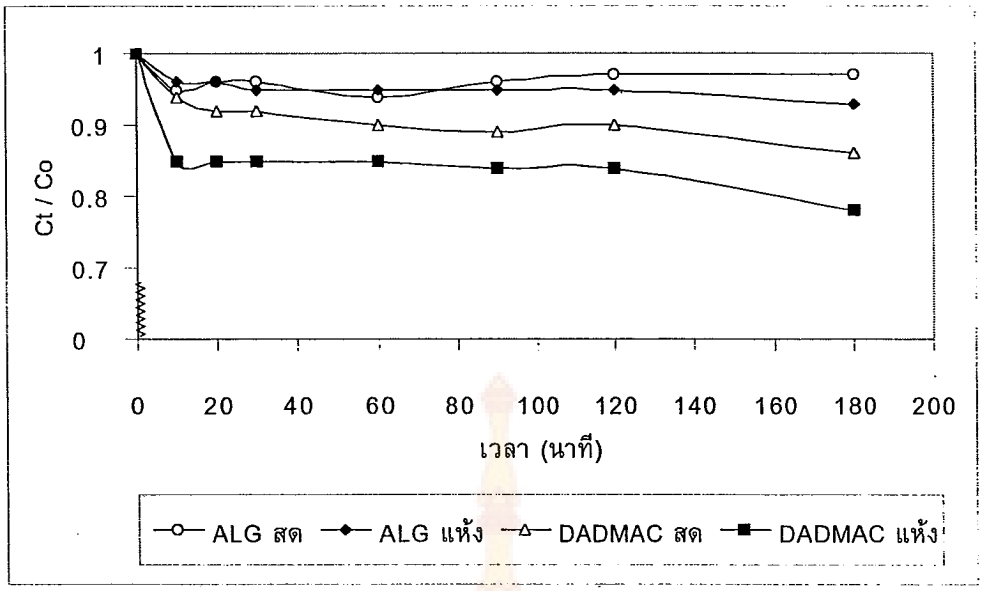
ระยะเวลาในการสัมผัสที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีรีแอกทีฟ ศึกษาโดยการนำเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ชนิดสดและแห้งจำนวน 1 กรัม แช่ลงในสารละลายสีรีแอคทีฟที่มีความเข้มข้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร โดยศึกษาการดูดซับสีรีแอกทีฟที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 10-120 นาที ผลการศึกษาแสดงดังในภาพประกอบที่ 4.10-4.12



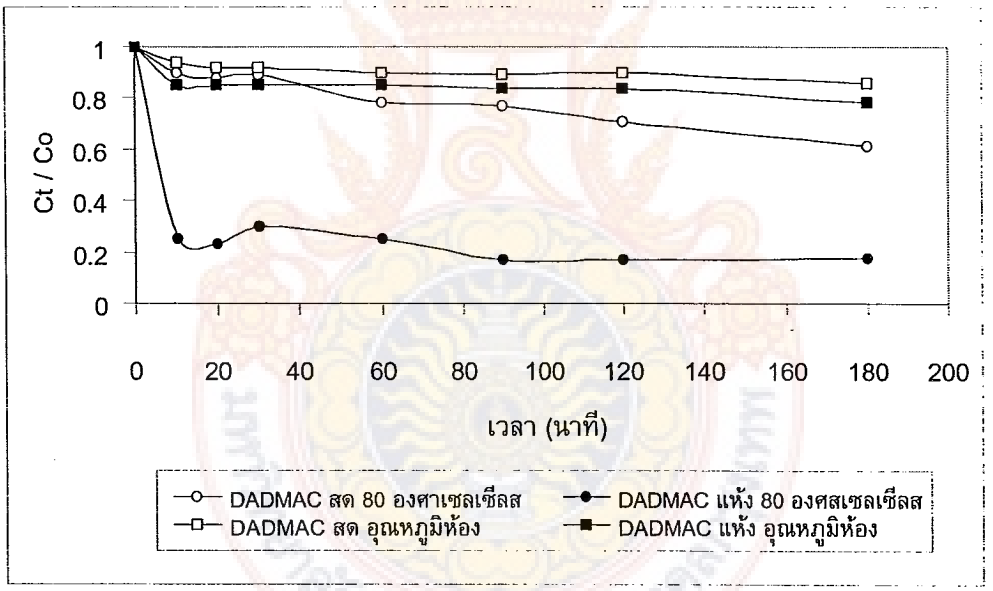
ภาพประกอบที่ 4.10 ระยะเวลาในการสัมผัสที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีรีแอกทีฟของเม็ดลูกปัดแอลจิเนตและเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกันที่อุณหภูมิ 80°C

AIG = เม็ดลูกปัดแอลจิเนต

DADMAC = เม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกัน



ภาพประกอบที่ 4.11 ระยะเวลาในการสัมผัสที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีรีแอกทีฟของเม็ดลูกปัดแอลจิเนตและเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกันที่อุณหภูมิห้อง



ภาพประกอบที่ 4.12 เปรียบเทียบระยะเวลาในการสัมผัสที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีรีแอกทีฟของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกันชนิดเม็ดสดและแห้งที่อุณหภูมิ 80°C

AIG = เม็ดลูกปัดแอลจิเนต

DADMAC = เม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกัน

ผลจากการศึกษาพบว่าเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ชนิดแห้งมีอัตราการดูดซับสีรีแอกทีฟดีกว่าเม็ดลูกปัดชนิดสด เนื่องจากเม็ดลูกปัดชนิดแห้งมีพื้นที่ผิวในการดูดซับสีรีแอกทีฟมากกว่าเม็ดลูกปัดชนิดสด ซึ่งผลการวิจัยนี้แตกต่างจากการศึกษาของ ชิอู และ ลี (Chiou and Li. 2003: 1102) ที่พบว่าอัตราการดูดซับสีรีแอกทีฟของเม็ดไคโตซานสด (สภาวะเปียก) เร็วกว่าเม็ดไคโตซานแห้ง เนื่องจากเม็ดไคโตซานแห้งต้องใช้เวลาในการพองตัวก่อนที่การดูดซับสีรีแอกทีฟจะเกิดขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม การดูดซับสีรีแอกทีฟของเม็ดไคโตซานสดและแห้งมีค่าใกล้เคียงกันที่เวลา 48 ชั่วโมง

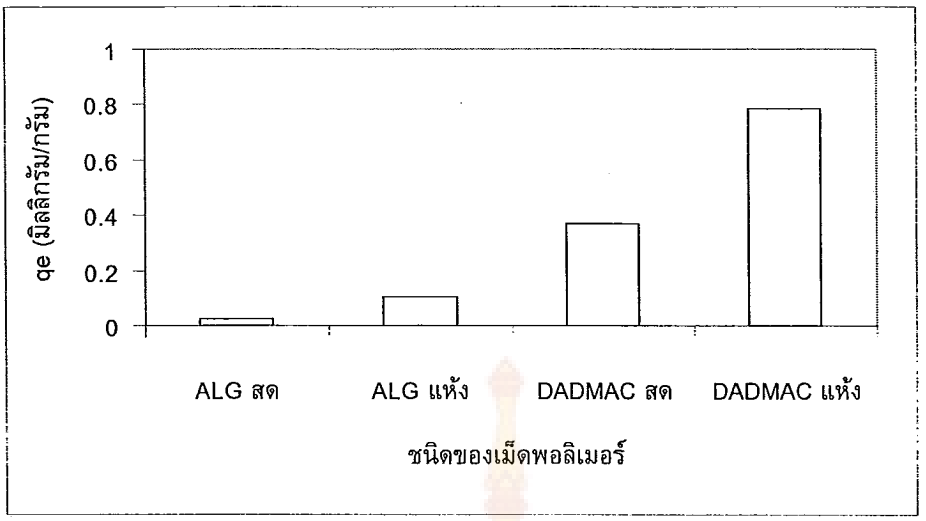
เมื่อเปรียบเทียบอัตราการดูดซับสีรีแอกทีฟของเม็ดลูกปัดแอลจิเนตกับเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกัน (ภาพประกอบที่ 4.10) พบว่าเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์-โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกันมีอัตราการดูดซับสีรีแอกทีฟดีกว่าเม็ดลูกปัดแอลจิเนต เนื่องจากเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันละกันประกอบด้วยไดแอลลิลไดเมทิลแอมโมเนียม-คลอไรด์ ซึ่งมีหมู่ $-NR_3^+Cl^-$ เป็นองค์ประกอบ จึงดูดซับสีรีแอกทีฟที่มีประจุลบได้ดี (Zemaitaitience, Ziobaite and Klimaviciute. 2003: 37-47)

อัตราการดูดซับสีรีแอกทีฟของเม็ดลูกปัดที่อุณหภูมิสูง (อุณหภูมิ 80°C) ดีกว่าที่อุณหภูมิห้อง (ดูภาพประกอบที่ 4.12) เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงโมเลกุลของสีมีพลังงานจลน์มากขึ้น จึงถูกดูดซับด้วยเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ได้ดี โดยมีการศึกษาพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิทำให้การดูดซับสีเพิ่มขึ้น ซึ่งเกี่ยวข้องกับกระบวนการทางจลน์ศาสตร์ (Sun and Shi. 1998: 1324-1328; Chiou and Li. 2003: 1100)

นอกจากนี้ จากการวิจัยนี้พบว่า เม็ดลูกปัดแอลจิเนตเข้าสู่สมดุลของการดูดซับสีรีแอกทีฟที่เวลา 60 นาที ส่วนเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกันเข้าสู่สมดุลของการดูดซับสีรีแอกทีฟที่เวลา 180 นาที ดังนั้น ในการศึกษาไอโซเทิร์มของการดูดซับสีรีแอกทีฟของเม็ดลูกปัดแอลจิเนตจึงทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 60 นาที ส่วนเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกันทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 180 นาที

4.6 การดูดซับสีรีแอกทีฟด้วยเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ

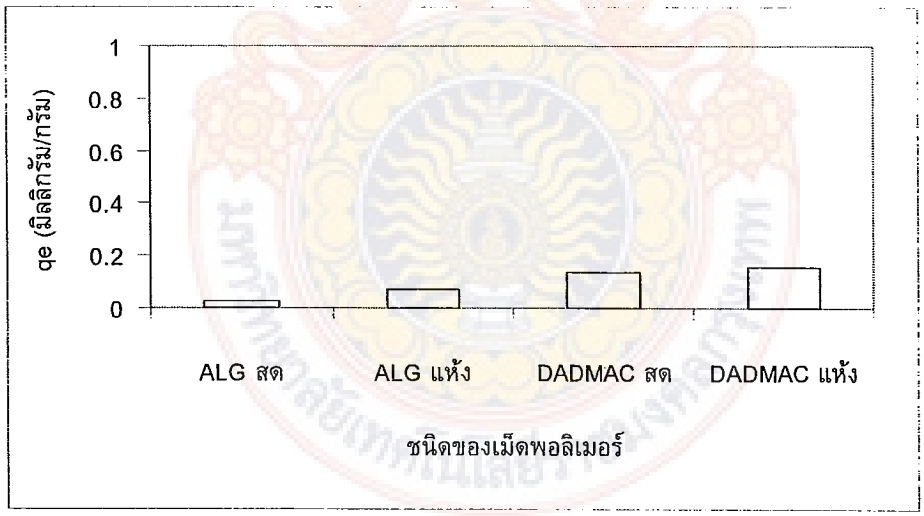
การดูดซับสีรีแอกทีฟด้วยเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ ศึกษาโดยแช่เม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ จำนวน 1 กรัม ในสารละลายสีรีแอกทีฟที่มีความเข้มข้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร โดยศึกษาที่อุณหภูมิ 80°C และที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 180 นาที ผลการศึกษาแสดงดังในภาพประกอบที่ 4.13-4.14



ภาพประกอบที่ 4.13 ปริมาณสีรีแอกทีฟที่ถูกดูดซับด้วยเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 80°C

AIG = เม็ดลูกปัดแอลจิเนต

DADMAC = เม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกัน



ภาพประกอบที่ 4.14 ปริมาณสีรีแอกทีฟที่ถูกดูดซับด้วยเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิห้อง

AIG = เม็ดลูกปัดแอลจิเนต

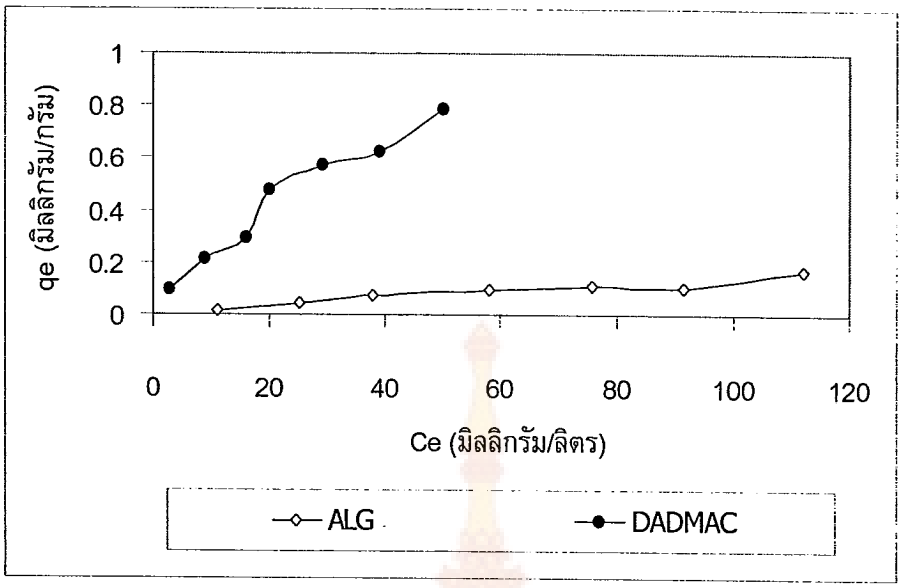
DADMAC = เม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกัน

ผลจากการศึกษาพบว่า เม็ดลูกปัดแอลจิเนตแห้งดูดซับสีรีแอกทีฟดีกว่าเม็ดลูกปัดแอลจิเนตสด เนื่องจากเมื่อเปรียบเทียบปริมาณน้ำหนักที่เท่ากันของเม็ดลูกปัดแอลจิเนต เม็ดลูกปัดแอลจิเนตแห้งมีพื้นที่ผิวรวมทั้งจำนวนเม็ดลูกปัดที่ดูดซับสีรีแอกทีฟมากกว่าเม็ดลูกปัดสด การดูดซับสีรีแอกทีฟด้วยเม็ดลูกปัดแอลจิเนตเป็นการดูดซับด้วยแรงทางฟิสิกส์ เนื่องจากแอลจิเนตมีประจุลบเช่นเดียวกับสีรีแอกทีฟ

การดูดซับสีรีแอกทีฟด้วยเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกันพบว่า เม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกันชนิดแห้งดูดซับสีรีแอกทีฟดีกว่าชนิดสด เนื่องจากเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกันชนิดแห้งมีพื้นที่ผิวในการดูดซับสีรีแอกทีฟมากกว่าชนิดสดเช่นเดียวกับเม็ดลูกปัดแอลจิเนต การดูดซับสีรีแอกทีฟด้วยเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกัน เกิดจากแรงดึงดูดทางฟิสิกส์ของแอลจิเนตที่เป็นองค์ประกอบในเม็ดลูกปัด และอันตรกิริยาไฟฟ้าสถิต (electrostatic interaction) ระหว่างหมู่ $-NR_3^+Cl^-$ ของไดแอลลิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ในเม็ดลูกปัดกับหมู่ $-SO_3^-$ ของสีรีแอกทีฟ (Zemaitaitience, Ziobaite and Klimaviciute. 2003: 37-47) โดยแรงดึงดูดจากอันตรกิริยาไฟฟ้าสถิตมีอิทธิพลต่อการดูดซับสีรีแอกทีฟมากกว่าแรงดึงดูดทางฟิสิกส์ การดูดซับสีรีแอกทีฟด้วยเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกัน จึงมีปริมาณมากกว่าเม็ดลูกปัดแอลจิเนต นอกจากนี้ การดูดซับสีรีแอกทีฟด้วยเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 80°C มีปริมาณมากกว่าที่อุณหภูมิห้อง ดังนั้น การดูดซับสีรีแอกทีฟด้วยเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ จึงขึ้นอยู่กับชนิดของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์และอุณหภูมิ

4.7 ไอโซเทิร์มของการดูดซับสีรีแอกทีฟ

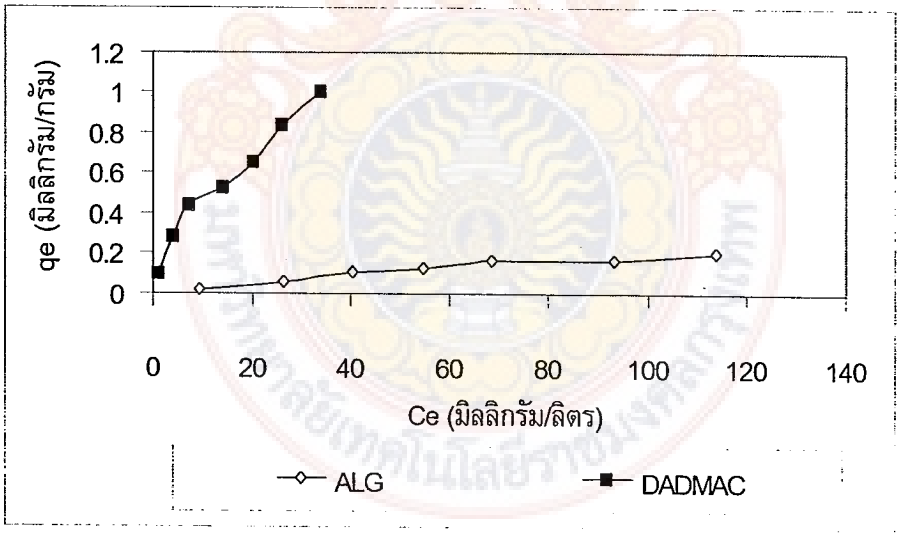
ไอโซเทิร์มของการดูดซับสีรีแอกทีฟ (Mohamed et al. 2000: 172) ศึกษาโดยแช่เม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ ในสารละลายสีรีแอกทีฟที่มีความเข้มข้น 10-130 มิลลิกรัม/ลิตร ที่อุณหภูมิ 80°C ผลการศึกษา แสดงดังในภาพประกอบที่ 4.15-4.17



ภาพประกอบที่ 4.15 ไอโซเทิร์มของการดูดซับสีรีแอกทีฟชนิดสีแดง

ALG = เม็ดลูกปัดแอลจิเนต

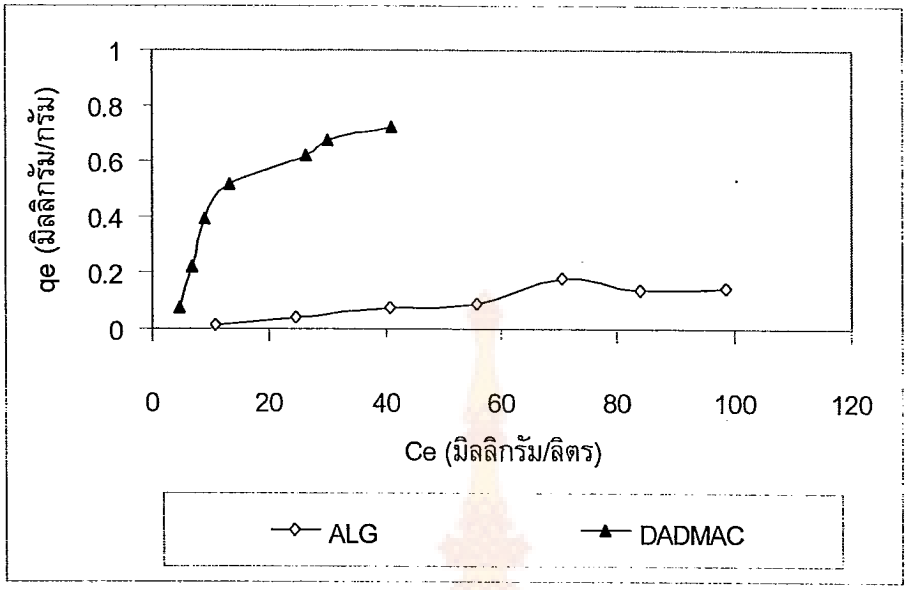
DADMAC = เม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกัน



ภาพประกอบที่ 4.16 ไอโซเทิร์มของการดูดซับสีรีแอกทีฟชนิดสีน้ำเงิน

ALG = เม็ดลูกปัดแอลจิเนต

DADMAC = เม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกัน

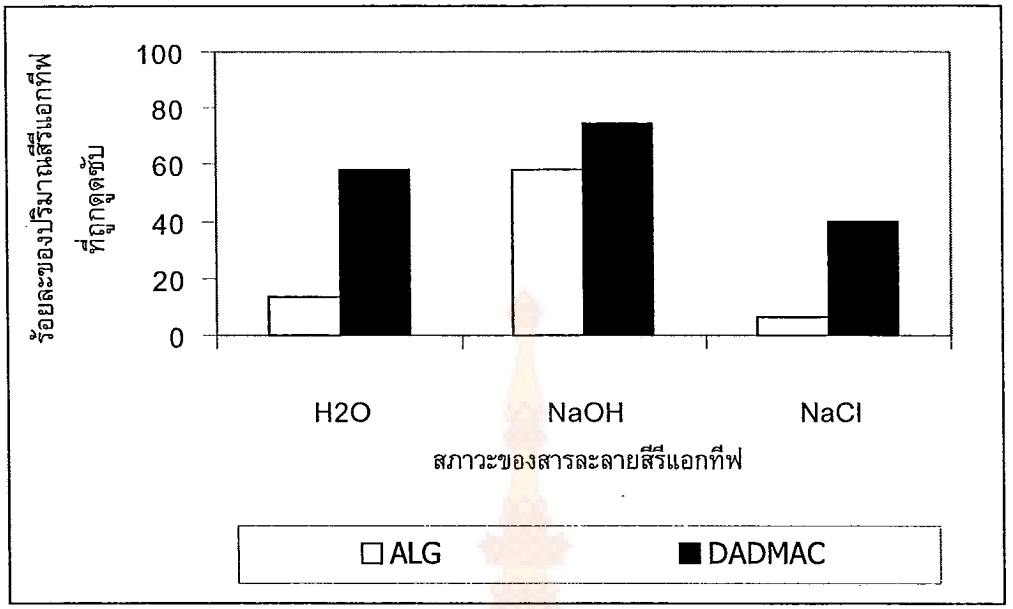


ภาพประกอบที่ 4.17 ไอโซเทิร์มของการดูดซับสีรีแอกทีฟชนิดสีเหลือง
ALG = เม็ดลูกปัดแอลจิเนต
DADMAC = เม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกัน

ผลจากการศึกษาพบว่า เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสีรีแอกทีฟเพิ่มขึ้น การดูดซับสีรีแอกทีฟของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ เพิ่มขึ้น เนื่องจากจำนวนโมเลกุลของสีรีแอกทีฟที่จะถูกดูดซับมีปริมาณเพิ่มขึ้น โดยผลการวิจัยนี้สอดคล้องกับการวิจัยของ ชิอู และ ลี (Chiou and Li. 2003: 1099) นอกจากนี้ การดูดซับสีรีแอกทีฟของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่าย-เชื่อมโยงซึ่งกันและกันดีกว่าเม็ดลูกปัดแอลจิเนต ดังนั้น ความเข้มข้นของสารละลายสีรีแอกทีฟจึงมีผลต่อการดูดซับสีของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ

4.8 อิทธิพลของสารชนิดต่าง ๆ ต่อการดูดซับสีรีแอกทีฟของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์

อิทธิพลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ และเกลือโซเดียมคลอไรด์ต่อการดูดซับสีรีแอกทีฟของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ ศึกษาโดยแช่เม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ในสารละลายสีรีแอกทีฟที่สภาวะต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 80°C ผลการศึกษาแสดงดังในภาพประกอบที่ 4.18



ภาพประกอบที่ 4.18 อิทธิพลของสารละลายต่าง ๆ ต่อการดูดซับสีรีแอทีฟด้วยเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์

ALG = เม็ดลูกปัดแอลจิเนต

DADMAC = เม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกัน

ผลจากการศึกษาพบว่า เม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกันดูดซับสีรีแอกทีฟในสภาวะต่าง ๆ ดีกว่าเม็ดลูกปัดแอลจิเนต เนื่องจากเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์มีประจุเป็นบวก จึงดูดซับสีรีแอกทีฟที่มีประจุลบได้ดี แต่อย่างไรก็ตาม เม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดดูดซับสีรีแอกทีฟได้ดีเมื่ออยู่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์เมื่อละลายน้ำจะแตกตัวให้ Na^+ และ OH^- Na^+ ที่มีอยู่ในสารละลายจะทำปฏิกิริยากับ COO^- จึงทำให้เม็ดลูกปัดแอลจิเนตดูดซับสีรีแอกทีฟได้ดี นอกจากนี้ โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นเบสแก่จึงเร่งการแตกตัวของสีรีแอกทีฟในน้ำ ทำให้หมู่ $-SO_3^-$ ของสีรีแอกทีฟเข้าทำปฏิกิริยากับประจุบวกของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกันได้ดี การดูดซับสีรีแอกทีฟของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์จึงเพิ่มขึ้น

การดูดซับสีรีแอกทีฟของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ลดลงเมื่อมีการเติมเกลือโซเดียมคลอไรด์ลงในสารละลายสีรีแอทีฟ เกลือโซเดียมคลอไรด์เมื่ออยู่ในสารละลายจะแตกตัวให้ Na^+ และ Cl^- ไอออนต่าง ๆ ที่มีอยู่ในสารละลายจะลดอันตรกิริยา (interaction) ของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์กับสีรีแอกทีฟ (Laszlo. 1995: 26; Chiou and Li. 2003: 1095-1105; Zemaitaitience, Ziobaite and Klimaviciute. 2003: 37-47) การดูดซับสีรีแอกทีฟของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์จึงลด

ลง ดังนั้น โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมคลอไรด์ จึงมีผลต่อการดูดซับสีรีแอกทีฟของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาการกำจัดสีรีแอกทีฟด้วยเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ชนิดแลกเปลี่ยนไอออน สามารถสรุปผลการวิจัยได้ ดังนี้

1. การเตรียมเม็ดลูกปัดแอลจิเนต เตรียมจากสารละลายแอลจิเนตที่มีความเข้มข้นร้อยละ 6 และเม็ดลูกปัดแอลจิเนตมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 3.97 มิลลิเมตร

2. การเตรียมเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกัน เตรียมจากสารละลายแอลจิเนตและไดแอลลิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ และเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกันมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 3.84 มิลลิเมตร

3. การตรวจสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกันมีผิวเรียบกว่าเม็ดลูกปัดแอลจิเนต

4. การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ ตรวจสอบโดยใช้เทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี และการเปลี่ยนแปลงของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์เมื่อได้รับความร้อน

5. เม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกันในสภาวะแห้งมีอัตราการพองตัวดีกว่าเม็ดลูกปัดแอลจิเนต

6. การดูดซับสีรีแอกทีฟของเม็ดลูกปัดแอลจิเนตที่อุณหภูมิ 80°C และอุณหภูมิห้องเข้าสู่สมดุลของการดูดซับสีที่เวลา 60 นาที ส่วนการดูดซับสีรีแอกทีฟของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกัน เข้าสู่สมดุลของการดูดซับสีที่เวลา 180 นาที

7. เม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกันดูดซับสีรีแอกทีฟดีกว่าเม็ดลูกปัดแอลจิเนต

8. ปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการดูดซับสีรีแอกทีฟของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ คือ ชนิดของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ อุณหภูมิ ความเข้มข้นของสารละลายสีรีแอกทีฟ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมคลอไรด์

ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาการดูดซับสีชนิดอื่น ๆ ด้วยเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ เช่น สีแอซิด สีไดเร็กซ์ สีแวต เป็นต้น

2. ศึกษาการดูดซับสีด้วยเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ที่ค่าความเป็นกรด-เบสต่าง ๆ กัน

3. นำน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมสิ่งทอมาทำการทดลอง เพื่อพัฒนาการดูดซับสีของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ให้สามารถประยุกต์ใช้ได้จริงในอุตสาหกรรมสิ่งทอ

บรรณานุกรม

เฉลิมพล วนวงศ์ไทย ธวัชชัย แพชมัดและ สมลักษณ์ คงเมือง. "เรซินแลกเปลี่ยนไอออนกับประโยชน์ทางเภสัชกรรม" **ฟาร์มาไทม์.** 1, 3 (มีนาคม 2546): 47-53.

Ahmed, M.N. and Ram, R.N. "Removal of Basic Dye from Waste-Water Using Silica as Adsorbent" **Environmental Pollution.** 77,2 (1992): 79-86.

Alley, E.R. **Water Quality Control Handbook.** New York: McGraw-Hill, 2000.

Annadurai, G., Juarg, Ruey-Shin, J. and Lee, Duu-Jong "Factorial Design Analysis for Adsorption of Dye on Activated Carbon Beads Incorporated with Calcium Alginates" **Advances in Environmental Research**. 6,2 (2002): 191-198.

Chiou, M.S. and Li, H.Y. "Adsorption Behavior of Reactive Dye in Aqueous Solution on Chemical Cross-Linked Chitosan Beads" **Chemosphere.** 50,3 (2003): 1095-1105.

Gembicki,S.A.; Oroskar, A.R. and Johnson, J.A. "Adsorption: Lipid seperation" in **Encyclopedia of Chemical Technology.** p 309. Kroschwitz, J.I. ed. New York: Wiley, 1991.

Gotoh. T., Matsushima, K. and Kikuchi, Ken-Ichi. "Adsorption of Cu and Mn on Covalently Cross-Linked Alginate Gel Beads" **Chemosphere.** 55, 1 (2004): 57-64.

_____. "Preparation of Alginate-Chitosan Hybrid Gel Beads and Adsorption of Divalent Metal Ions" **Chemosphere.** 55, 1 (2004): 135-140.

Hwang, M.C. and Chen, K.M. "The Removal of Color from Effuents Using Polyamide-Epichlorohydrin-Cellulose Polymer. III Use in Anionic Dye Removal in a Batch Process" **Journal of Applies polymer Science.** 50, 6 (1993): 735-744.

Ju, H.K. et al. "pH/Temperature-Responsive Semi IPN Hydrogels Composed of Alginate and Poly (N-isoprppylacrylamide)" **Journal of Applied polymer Science.** 83, 5 (2002): 1128-1139.

Kim, S.J. et al. "Swelling Characterization of the Semiinterpenetrating Polymer Network Hydrogels Composed of Chitosan and Poly(diallydimethylammonium chloride)" **Journal of Applied polymer Science.** 91, 5 (2004): 2876-2880.

Laszlo, J.A. "Electrolyte Effects on Hydrolyzed Reactive Dye Binding to Quaternized Cellulose" **Textile Chemist and Colourist.** 28, 44 (1995): 26.

_____. "Preparing on Ion Exchange Resin from Sugarcane Bagasse to Remove Reactive Dye from Waste Water" **Textile Chemist and Colourist.** 28, 5 (1996): 13-17.

La´zaro et. el. "Heavy Metal Biosorption by Gellan Gum Gel Beads" **Water Research.** 37, 5 (2003): 2118-2126.

Mohamed, H. et al. "Immobilization Residual Dye onto Ion-Exchange Cellulosic Materials" **Journal of Applied polymer Science.** 77, 1 (2000): 172.

Reza, A. "Review Beaded Polymer Supports and Crels I. Manufacturing Techniques" **Journal Chromatography.** 586, 3 (1991): 181-197.

Russell, P. **An Introduction to Ion Exchange.** Great Britain : Heyden & Son, 1970.

Sun, G. and Shi, W. "Sunflower Stalks as Adsorbents for the Removal of Metal Ions from Wastewater" **Industrial Engineering Cmemical Research.** 37, 3 (1998): 1324-1328.

Walken, G.M. and Weatherley, L.R. "Kinetics of Acid Dye Adsorption" **Water Research.** 33, 8 (1997): 1895-1899.

Zemaitaitience, R.J., Zliobaite, E. and Klimaviciute, R. "The Role of Anionic Substances in Removal of Textile Dyes from Solutions Using Cationic Flocculant" **Colloids and Surfaces A : Physicochemical Engineering Aspects.** 214, (2003): 37-47.

ภาคผนวก ก
การหาขนาดอนุภาคของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์

1. การหาขนาดอนุภาคของเม็ดลูกปัดแอลจิเนต

ตารางที่ 1 ขนาดอนุภาคของเม็ดลูกปัดแอลจิเนต

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเม็ดลูกปัดแอลจิเนต (มิลลิเมตร) (f)	จำนวนอนุภาค (เม็ด) (x_i)	ผลคูณ (fx_i)
3.5	4	14.0
3.6	30	108.0
3.7	57	210.9
3.8	33	125.4
3.9	57	222.3
4.0	57	228.0
4.1	30	123.0
4.2	29	121.8
4.3	19	81.7
4.4	18	79.2
4.5	9	40.5
4.6	6	27.6
4.7	1	4.7
4.8	1	4.8
	N = 351	**$\sum fx_i$ = 1391.9**

อนุภาคมีขนาดเฉลี่ย = 3.97 มิลลิเมตร

2. การหาขนาดอนุภาคของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกัน

ตารางที่ 2 ขนาดอนุภาคของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกัน

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเม็ดลูกปัดแอลจิเนต (มิลลิเมตร) (f)	จำนวนอนุภาค (เม็ด) (x_i)	ผลคูณ (fx_i)
3.5	16	56.0
3.6	31	111.6
3.7	45	166.5
3.8	69	262.2
3.9	68	265.2
4.0	48	192.0
4.1	30	123.0
4.2	29	121.8
4.3	8	34.4
4.4	1	4.4
4.5	2	9.0
4.6	2	9.2
4.7	1	4.7
4.8	1	4.8
	N = 351	**$\sum fx_i$ = 1364.8**

อนุภาคมีขนาดเฉลี่ย = 3.89 มิลลิเมตร

ภาคผนวก ข
การพองตัวของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์

1. การพองตัวของเม็ดลูกปัดแอลจิเนต

ตารางที่ 1 การพองตัวของเม็ดลูกปัดแอลจิเนต

สภาวะของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์	น้ำหนักของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ (กรัม)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
ก่อนการพองตัว	0.50	0.50	0.50	
หลังการพองตัว	0.70	0.80	0.70	
ร้อยละของการพองตัว	40.00	60.00	40.00	
ค่าเฉลี่ยร้อยละของการพองตัว				46.67

2. การการพองตัวของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกัน

ตารางที่ 2 การพองตัวของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกัน

สภาวะของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์	น้ำหนักของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ (กรัม)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
ก่อนการพองตัว	0.50	0.50	0.50	
หลังการพองตัว	0.80	0.80	0.70	
ร้อยละของการพองตัว	60.00	60.00	40.00	
ค่าเฉลี่ยร้อยละของการพองตัว				53.33

ภาคผนวก ค

การหาระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีรีแอกทีฟด้วยเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์

1. การหาระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีรีแอกทีฟด้วยเม็ดลูกปัดแอลจิเนต ที่อุณหภูมิ 80°C

1.1 การหาระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีรีแอกทีฟด้วยเม็ดลูกปัดแอลจิเนตชนิดสด

ตารางที่ 1 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีรีแอกทีฟ

ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีรีแอกทีฟ (มิลลิกรัม/ลิตร) (C_o)			
ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
47.47	47.47	47.47	47.47

ตารางที่ 2 ความเข้มข้นของสารละลายสีรีแอกทีฟที่เหลือภายหลังจากถูกดูดซับด้วยเม็ดลูกปัดแอลจิเนตชนิดสดที่เวลาต่าง ๆ

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของสารละลายสีรีแอกทีฟที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร) (C_t)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	47.47	47.47	47.47	47.47
10	46.41	46.46	46.41	46.43
20	46.31	46.31	46.26	46.29
30	46.21	46.16	46.21	46.19
60	46.52	46.67	46.46	46.55
90	46.01	46.21	46.11	46.11
120	46.26	46.11	46.11	46.16
180	46.26	46.11	46.11	46.16

ตารางที่ 3 อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของสารละลายสีรีแอกทีฟที่เหลือกับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีรีแอกทีฟ (C_t/C_o) เมื่อถูกดูดซับด้วยเม็ดลูกปัดแอลจิเนตชนิดสดที่เวลาต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 80°C

เวลา (นาที)	C_o (มิลลิกรัม/ลิตร)	C_t (มิลลิกรัม/ลิตร)	C_t/C_o
0	47.47	47.47	1.00
10	47.47	46.43	0.98
20	47.47	46.29	0.98
30	47.47	46.19	0.97
60	47.47	46.55	0.98
90	47.47	46.11	0.97
120	47.47	46.16	0.97
180	47.47	46.16	0.97

1.2 การหาระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีรีแอกทีฟด้วยเม็ดลูกปัดแอลจิเนตชนิดแห้ง

ตารางที่ 4 ความเข้มข้นของสารละลายสีรีแอกทีฟที่เหลือภายหลังจากถูกดูดซับด้วยเม็ดลูกปัดแอลจิเนตชนิดแห้งที่เวลาต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 80°C

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของสารละลายสีรีแอกทีฟที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร) (C_t)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	47.47	47.47	47.47	47.47
10	46.06	46.16	46.26	46.16
20	45.71	45.81	45.96	45.83
30	45.81	45.86	45.81	45.83
60	43.54	43.48	43.59	43.59
90	42.22	42.27	42.37	42.29
120	42.17	42.07	42.22	42.15
180	42.17	42.07	42.22	42.15

ตารางที่ 5 อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของสารละลายสีรีแอกทีฟที่เหลือกับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีรีแอกทีฟ (C_t/C_o) เมื่อถูกดูดซับด้วยเม็ดลูกปัดแอลจิเนตชนิดแห้งที่เวลาต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 80°C

เวลา (นาที)	C_o (มิลลิกรัม/ลิตร)	C_t (มิลลิกรัม/ลิตร)	C_t/C_o
0	47.47	47.47	1.00
10	47.47	46.16	0.97
20	47.47	45.83	0.97
30	47.47	45.83	0.97
60	47.47	43.59	0.92
90	47.47	42.29	0.89
120	47.47	42.15	0.89
180	47.47	42.15	0.89

2. การหาระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีรีแอกทีฟด้วยเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกันที่อุณหภูมิ 80°C

2.1 การหาระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีรีแอกทีฟด้วยเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกันชนิดสด

ตารางที่ 6 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีรีแอกทีฟ

ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีรีแอกทีฟ (มิลลิกรัม/ลิตร) (C_o)			
ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
47.47	47.47	47.47	47.47

ตารางที่ 7 ความเข้มข้นของสารละลายสีรีแอกทีฟที่เหลือภายหลังจากถูกดูดซับด้วยเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกันชนิดสดที่เวลาต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 80°C

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของสารละลายสีรีแอกทีฟที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร) (C_t)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	47.47	47.47	47.47	47.47
10	42.78	42.83	42.83	42.81
20	41.97	41.97	42.07	42.00
30	42.07	42.12	42.12	42.10
60	37.37	37.17	37.12	37.22
90	36.77	36.72	36.77	36.75
120	33.79	33.94	33.89	33.87
180	28.99	29.04	28.99	29.01

ตารางที่ 8 อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของสารละลายสีรีแอกทีฟที่เหลือกับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีรีแอกทีฟ (C_t/C_o) เมื่อถูกดูดซับด้วยเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่าย-เชื่อมโยงซึ่งกันและกันชนิดสดที่เวลาต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 80°C

เวลา (นาที)	C_o (มิลลิกรัม/ลิตร)	C_t (มิลลิกรัม/ลิตร)	C_t/C_o
0	47.47	47.47	1.00
10	47.47	42.81	0.90
20	47.47	42.00	0.88
30	47.47	42.10	0.89
60	47.47	37.22	0.78
90	47.47	36.75	0.77
120	47.47	33.87	0.71
180	47.47	29.01	0.61

2.2 การหาระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีรีแอกทีฟด้วยเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกันชนิดแห้ง

ตารางที่ 9 ความเข้มข้นของสารละลายสีรีแอกทีฟที่เหลือภายหลังจากถูกดูดซับด้วยเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกันชนิดแห้งที่เวลาต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 80°C

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของสารละลายสีรีแอกทีฟที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร) (C_t)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	47.47	47.47	47.47	47.47
10	11.67	11.82	11.87	11.79
20	10.66	10.71	10.71	10.69
30	14.39	14.44	14.39	14.41
60	12.02	12.17	12.07	12.09
90	8.23	7.88	8.18	8.10
120	8.23	7.88	8.18	8.10
180	8.33	8.18	8.18	8.23

ตารางที่ 10 อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของสารละลายสีรีแอกทีฟที่เหลือกับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีรีแอกทีฟ (C_t/C_o) เมื่อถูกดูดซับด้วยเม็ดลูกปัดแอลจิเนตชนิดแห้งที่เวลาต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 80°C

เวลา (นาที)	C_o (มิลลิกรัม/ลิตร)	C_t (มิลลิกรัม/ลิตร)	C_t/C_o
0	47.47	47.47	1.00
10	47.47	11.79	0.25
20	47.47	10.69	0.23
30	47.47	14.41	0.30
60	47.47	12.09	0.25
90	47.47	8.10	0.17
120	47.47	8.10	0.17
180	47.47	8.23	0.18

3. การหาระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีรีแอกทีฟด้วยเม็ดลูกปัดแอลจิเนตที่อุณหภูมิห้อง

3.1 การหาระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีรีแอกทีฟด้วยเม็ดลูกปัดแอลจิเนตชนิดสด

ตารางที่ 11 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีรีแอกทีฟ

ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีรีแอกทีฟ (มิลลิกรัม/ลิตร) (C_o)			
ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
47.47	47.47	47.47	47.47

ตารางที่ 12 ความเข้มข้นของสารละลายสีรีแอกทีฟที่เหลือภายหลังจากถูกดูดซับด้วยเม็ดลูกปัดแอลจิเนตชนิดสดที่เวลาต่าง ๆ ที่อุณหภูมิห้อง

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของสารละลายสีรีแอกทีฟที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร) (C_t)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	47.47	47.47	47.47	47.47
10	45.15	45.35	45.35	45.28
20	45.51	45.66	45.71	45.63
30	45.15	45.40	45.51	45.35
60	44.85	44.75	44.80	44.80
90	45.40	45.56	45.61	45.52
120	46.11	46.11	46.16	46.13
180	46.11	46.11	46.16	46.13

ตารางที่ 13 อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของสารละลายสีรีแอกทีฟที่เหลือกับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีรีแอกทีฟ (C_t/C_o) เมื่อถูกดูดซับด้วยเม็ดลูกปัดแอลจิเนตชนิดสดที่เวลาต่าง ๆ ที่อุณหภูมิห้อง

เวลา (นาที)	C_o (มิลลิกรัม/ลิตร)	C_t (มิลลิกรัม/ลิตร)	C_t/C_o
0	47.47	47.47	1.00
10	47.47	45.28	0.95
20	47.47	45.63	0.96
30	47.47	45.35	0.96
60	47.47	44.80	0.94
90	47.47	45.52	0.96
120	47.47	46.13	0.97
180	47.47	46.13	0.97

3.2 การหาระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีรีแอกทีฟด้วยเม็ดลูกปัดแอลจิเนตชนิดแห้ง

ตารางที่ 14 ความเข้มข้นของสารละลายสีรีแอกทีฟที่เหลือภายหลังจากถูกดูดซับด้วยเม็ดลูกปัดแอลจิเนตชนิดแห้งที่เวลาต่าง ๆ ที่อุณหภูมิห้อง

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของสารละลายสีรีแอกทีฟที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร) (C_t)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	47.47	47.47	47.47	47.47
10	45.76	45.86	45.76	45.79
20	45.56	45.51	45.51	45.53
30	45.10	45.20	45.05	45.12
60	45.25	45.20	45.25	45.23
90	45.05	45.05	45.05	45.05
120	45.20	45.25	45.15	45.20
180	43.94	43.99	43.99	43.97

ตารางที่ 15 อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของสารละลายสีรีแอกทีฟที่เหลือกับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีรีแอกทีฟ (C_t/C_o) เมื่อถูกดูดซับด้วยเม็ดลูกปัดแอลจิเนตชนิดแห้งที่เวลาต่าง ๆ ที่อุณหภูมิห้อง

เวลา (นาที)	C_o (มิลลิกรัม/ลิตร)	C_t (มิลลิกรัม/ลิตร)	C_t/C_o
0	47.47	47.47	1.00
10	47.47	45.79	0.96
20	47.47	45.53	0.96
30	47.47	45.12	0.95
60	47.47	45.23	0.95
90	47.47	45.05	0.95
120	47.47	45.20	0.95
180	47.47	43.97	0.93

4. การหาระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีรีแอกทีฟด้วยเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกันที่อุณหภูมิห้อง

4.1 การหาระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีรีแอกทีฟด้วยเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกันชนิดสด

ตารางที่ 16 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีรีแอกทีฟ

ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีรีแอกทีฟ (มิลลิกรัม/ลิตร) (C_o)			
ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
47.47	47.47	47.47	47.47

ตารางที่ 17 ความเข้มข้นของสารละลายสีรีแอกทีฟที่เหลือภายหลังจากถูกดูดซับด้วยเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกันชนิดสดที่เวลาต่าง ๆ ที่อุณหภูมิห้อง

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของสารละลายสีรีแอกทีฟที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร) (C_t)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	47.47	47.47	47.47	47.47
10	44.70	44.80	44.80	44.77
20	43.94	43.89	43.79	43.79
30	43.79	43.79	43.79	43.79
60	43.03	42.93	42.88	42.95
90	42.27	42.27	42.27	42.27
120	42.73	42.68	42.78	42.73
180	40.76	40.76	40.71	40.74

ตารางที่ 18 อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของสารละลายสีรีแอกทีฟที่เหลือกับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีรีแอกทีฟ (C_t/C_o) เมื่อถูกดูดซับด้วยเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่าย-เชื่อมโยงซึ่งกันและกันชนิดสดที่เวลาต่าง ๆ ที่อุณหภูมิห้อง

เวลา (นาที)	C_o (มิลลิกรัม/ลิตร)	C_t (มิลลิกรัม/ลิตร)	C_t/C_o
0	47.47	47.47	1.00
10	47.47	44.77	0.94
20	47.47	43.79	0.92
30	47.47	43.79	0.92
60	47.47	42.95	0.90
90	47.47	42.27	0.89
120	47.47	42.73	0.90
180	47.47	40.74	0.86

4.2 การหาระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีรีแอกทีฟด้วยเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกันชนิดแห้ง

ตารางที่ 19 ความเข้มข้นของสารละลายสีรีแอกทีฟที่เหลือภายหลังจากถูกดูดซับด้วยเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกันชนิดแห้งที่เวลาต่าง ๆ ที่อุณหภูมิห้อง

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของสารละลายสีรีแอกทีฟที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร) (C_t)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	47.47	47.47	47.47	47.47
10	40.05	40.30	40.51	40.29
20	40.30	40.35	40.51	40.39
30	40.56	40.56	40.61	40.58
60	40.51	40.51	40.51	40.51
90	39.90	40.00	39.90	39.93
120	39.90	40.00	39.90	39.93
180	36.67	36.82	36.87	36.79

ตารางที่ 20 อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของสารละลายสีรีแอกทีฟที่เหลือกับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีรีแอกทีฟ (C_t/C_o) เมื่อถูกดูดซับด้วยเม็ดลูกปัดแอลจิเนตชนิดแห้งที่เวลาต่าง ๆ ที่อุณหภูมิห้อง

เวลา (นาที)	C_o (มิลลิกรัม/ลิตร)	C_t (มิลลิกรัม/ลิตร)	C_t/C_o
0	47.47	47.47	1.00
10	47.47	40.29	0.85
20	47.47	40.39	0.85
30	47.47	40.58	0.85
60	47.47	40.51	0.85
90	47.47	39.93	0.84
120	47.47	39.93	0.84
180	47.47	36.79	0.78

ภาคผนวก ง
การดูดซับสีรีแอกทีฟของเม็ดลูดปัดสดและเม็ดลูกปัดแห้ง

1. การดูดซับสีรีแอกทีฟด้วยเม็ดลูกปัดที่อุณหภูมิ 80°C

ตารางที่ 1 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีรีแอกทีฟ

ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีรีแอกทีฟ (มิลลิกรัม/ลิตร) (C_o)			
ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
47.47	47.47	47.47	47.47

ตารางที่ 2 ความเข้มข้นของสารละลายสีรีแอกทีฟที่เหลือภายหลังจากถูกดูดซับด้วยเม็ดลูกปัดชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 80°C

ชนิดของเม็ดลูกปัด	ความเข้มข้นของสารละลายสีรีแอกทีฟที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร) (C_e)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
ALG สด	46.26	46.11	46.11	46.16
ALG แห้ง	42.17	42.07	42.22	42.15
DADMAC สด	28.99	29.04	28.99	29.01
DADMAC แห้ง	8.33	8.18	8.18	8.23

ALG สด = เม็ดลูกปัดแอลจิเนตชนิดสด

ALG แห้ง = เม็ดลูกปัดแอลจิเนตชนิดแห้ง

DADMAC สด = เม็ดลูกปัดโครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกันชนิดสด

DADMAC แห้ง = เม็ดลูกปัดโครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกันชนิดแห้ง

ตารางที่ 3 สมดุลการดูดซับสีรีแอกทีฟชนิดสีแดงภายหลังจากถูกดูดซับด้วยเม็ดลูกปัดชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 80°C

ชนิดของเม็ดลูกปัด	C_o (มิลลิกรัม/ลิตร)	C_e (มิลลิกรัม/ลิตร)	W (กรัม)	V (ลิตร)	qe (มิลลิกรัม/กรัม)
ALG สด	47.47	46.16	1.00	0.02	0.026
ALG แห้ง	47.47	42.15	1.00	0.02	0.106
DADMAC สด	47.47	29.01	1.00	0.02	0.369
DADMAC แห้ง	47.47	8.23	1.00	0.02	0.785

ALG สด = เม็ดลูกปัดแอลจิเนตชนิดสด

ALG แห้ง = เม็ดลูกปัดแอลจิเนตชนิดแห้ง

DADMAC สด = เม็ดลูกปัดโครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกันชนิดสด

DADMAC แห้ง = เม็ดลูกปัดโครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกันชนิดแห้ง

2. การดูดซับสีรีแอกทีฟด้วยเม็ดลูกปัดที่อุณหภูมิห้อง

ตารางที่ 4 ความเข้มข้นของสารละลายสีรีแอกทีฟที่เหลือภายหลังจากถูกดูดซับด้วยเม็ดลูกปัดชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิห้อง

ชนิดของเม็ดลูกปัด	ความเข้มข้นของสารละลายสีรีแอกทีฟที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร) (C_e)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
ALG สด	43.94	43.99	43.99	46.13
ALG แห้ง	46.11	46.11	46.16	43.97
DADMAC สด	40.76	40.76	40.71	40.74
DADMAC แห้ง	36.67	36.82	36.87	36.79

ALG สด = เม็ดลูกปัดแอลจิเนตชนิดสด

ALG แห้ง = เม็ดลูกปัดแอลจิเนตชนิดแห้ง

DADMAC สด = เม็ดลูกปัดโครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกันชนิดสด

DADMAC แห้ง = เม็ดลูกปัดโครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกันชนิดแห้ง

ตารางที่ 5 สมดุลการดูดซับสีรีแอกทีฟชนิดสีแดงภายหลังจากถูกดูดซับด้วยเม็ดลูกปัดชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิห้อง

ชนิดของเม็ดลูกปัด	C_o (มิลลิกรัม/ลิตร)	C_e (มิลลิกรัม/ลิตร)	W (กรัม)	V (ลิตร)	qe (มิลลิกรัม/กรัม)
ALG สด	47.47	46.13	1.00	0.02	0.027
ALG แห้ง	47.47	43.97	1.00	0.02	0.070
DADMAC สด	47.47	40.74	1.00	0.02	0.135
DADMAC แห้ง	47.47	36.79	1.00	0.02	0.154

ALG สด = เม็ดลูกปัดแอลจิเนตชนิดสด

ALG แห้ง = เม็ดลูกปัดแอลจิเนตชนิดแห้ง

DADMAC สด = เม็ดลูกปัดโครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกันชนิดสด

DADMAC แห้ง = เม็ดลูกปัดโครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกันชนิดแห้ง

ภาคผนวก จ
อิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายสีรีแอกทีฟ ต่อการดูดซับสีของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ชนิดสด

1. การดูดซับสีรีแอกทีฟของด้วยเม็ดลูกปัดแอลจิเนต

1.1 สารละลายสีรีแอกทีฟชนิดสีแดง

ตารางที่ 1 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีรีแอกทีฟชนิดสีแดง

ลำดับที่	ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีรีแอกทีฟ (มิลลิกรัม/ลิตร) (C_o)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
1	12.37	12.27	12.22	12.29
2	29.85	29.90	29.80	29.85
3	45.10	44.95	45.40	45.15
4	68.18	66.92	68.18	67.76
5	87.12	85.86	87.12	86.70
6	103.54	101.01	99.75	101.43
7	128.79	128.79	128.79	128.79

ตารางที่ 2 ความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลายสีรีแอกทีฟชนิดสีแดง (ความเข้มข้นที่เหลือของสารละลายสีรีแอกทีฟ) ภายหลังจากถูกดูดซับด้วยเม็ดลูกปัดแอลจิเนต

ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลายสีรีแอกทีฟ (มิลลิกรัม/ลิตร) (C_e)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
12.29	10.96	10.86	11.06	10.96
29.85	25.30	25.35	25.25	25.30
45.15	37.63	37.58	37.63	37.61
67.76	58.08	58.08	58.08	58.08
86.70	77.02	75.76	74.49	75.76
101.43	90.91	90.91	92.17	91.33
128.79	113.64	112.37	109.85	111.95

ตารางที่ 3 สมดุลการดูดซับสีรีแอกทีฟชนิดสีแดงภายหลังจากถูกดูดซับด้วยเม็ดลูกปัดแอลจิเนต

C_o (มิลลิกรัม/ลิตร)	C_e (มิลลิกรัม/ลิตร)	W (กรัม)	V (ลิตร)	qe (มิลลิกรัม/กรัม)
12.29	10.96	1.00	0.01	0.013
29.85	25.30	1.00	0.01	0.046
45.15	37.61	1.00	0.01	0.075
67.76	58.08	1.00	0.01	0.097
86.70	75.76	1.00	0.01	0.109
101.43	91.33	1.00	0.01	0.101
128.79	111.95	1.00	0.01	0.168

1.2 สารละลายสีรีแอกทีฟชนิดสีน้ำเงิน

ตารางที่ 4 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีรีแอกทีฟชนิดสีน้ำเงิน

ลำดับที่	ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีรีแอกทีฟ (มิลลิกรัม/ลิตร) (C_o)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
1	10.93	10.93	10.93	10.93
2	31.93	31.86	31.86	31.88
3	50.50	50.57	50.64	50.57
4	67.29	67.29	67.29	67.29
5	83.93	85.71	85.71	85.12
6	108.93	110.71	110.71	110.12
7	132.14	132.14	137.50	133.93

ตารางที่ 5 ความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลายสีรีแอกทีฟชนิดสีน้ำเงิน (ความเข้มข้นที่เหลือของสารละลายสีรีแอกทีฟ) ภายหลังจากถูกดูดซับด้วยเม็ดลูกปัดแอลจิเนต

ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลายสีรีแอกทีฟ (มิลลิกรัม/ลิตร) (C_e)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
10.93	9.14	9.00	9.43	9.19
31.88	25.86	26.07	26.21	26.05
50.57	40.07	39.93	40.14	40.05
67.29	54.57	54.79	54.79	54.72
85.12	68.57	68.50	68.50	68.52
110.12	96.07	94.64	94.64	93.45
133.93	114.29	114.29	112.50	113.69

ตารางที่ 6 สมดุลการดูดซับสีรีแอกทีฟชนิดสีน้ำเงินภายหลังจากถูกดูดซับด้วยเม็ดลูกปัดแอลจิเนต

C_o (มิลลิกรัม/ลิตร)	C_e (มิลลิกรัม/ลิตร)	W (กรัม)	V (ลิตร)	qe (มิลลิกรัม/กรัม)
10.93	9.19	1.00	0.01	0.017
31.88	26.05	1.00	0.01	0.058
50.57	40.05	1.00	0.01	0.105
67.29	54.72	1.00	0.01	0.126
85.12	68.52	1.00	0.01	0.166
110.12	93.45	1.00	0.01	0.167
133.93	113.69	1.00	0.01	0.202

1.3 สารละลายสีรีแอกทีฟชนิดสีเหลือง

ตารางที่ 7 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีรีแอกทีฟชนิดสีเหลือง

ลำดับที่	ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีรีแอกทีฟ (มิลลิกรัม/ลิตร) (C_o)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
1	11.83	12.06	12.37	12.09
2	28.40	28.63	28.70	28.58
3	48.09	48.17	48.40	48.22
4	63.82	65.11	65.27	64.73
5	87.75	87.75	89.75	88.42
6	95.50	99.25	99.25	98.00
7	110.75	114.50	114.50	113.25

ตารางที่ 8 ความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลายสีรีแอกทีฟชนิดสีเหลือง (ความเข้มข้นที่เหลือของสารละลายสีรีแอกทีฟ) ภายหลังจากถูกดูดซับด้วยเม็ดลูกปัดแอลจิเนต

ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลายสีรีแอกทีฟ (มิลลิกรัม/ลิตร) (C_e)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
12.09	10.84	10.61	10.92	10.79
28.58	23.97	24.35	24.73	24.35
48.22	40.69	40.53	40.84	40.69
64.73	55.80	55.42	55.65	55.62
88.42	70.53	70.46	70.53	70.51
98.00	83.97	83.97	83.97	83.97
113.25	97.33	99.24	99.24	98.60

ตารางที่ 9 สมดุลการดูดซับสีรีแอกทีฟชนิดสีเหลืองภายหลังจากถูกดูดซับด้วยเม็ดลูกปัดแอลจิเนต

C_o (มิลลิกรัม/ลิตร)	C_e (มิลลิกรัม/ลิตร)	W (กรัม)	V (ลิตร)	qe (มิลลิกรัม/กรัม)
12.09	10.79	1.00	0.01	0.013
28.58	24.35	1.00	0.01	0.042
48.22	40.69	1.00	0.01	0.075
64.73	55.62	1.00	0.01	0.091
88.42	70.51	1.00	0.01	0.179
98.00	83.97	1.00	0.01	0.140
113.25	98.60	1.00	0.01	0.147

2. การดูดซับสีรีแอกทีฟของด้วยเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกัน

2.1 สารละลายสีรีแอกทีฟชนิดสีแดง

ตารางที่ 10 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีรีแอกทีฟชนิดสีแดง

ลำดับที่	ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีรีแอกทีฟ (มิลลิกรัม/ลิตร) (C_o)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
1	12.37	12.27	12.22	12.29
2	29.85	29.90	29.80	29.85
3	45.10	44.95	45.40	45.15
4	68.18	66.92	68.18	67.76
5	87.12	85.86	87.12	86.70
6	103.54	101.01	99.75	101.43
7	128.79	128.79	128.79	128.79

ตารางที่ 11 ความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลายสีรีแอกทีฟชนิดสีแดง (ความเข้มข้นที่เหลือของสารละลายสีรีแอกทีฟ) ภายหลังจากถูกดูดซับด้วยเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกัน-และกัน

ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลายสีรีแอกทีฟ (มิลลิกรัม/ลิตร) (C_e)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
12.29	2.68	2.73	2.58	2.66
29.85	8.74	8.84	8.84	8.81
45.15	16.06	15.91	15.96	15.98
67.76	19.80	19.80	19.85	19.82
86.70	28.99	29.04	28.99	29.01
101.43	38.89	38.99	38.94	38.94
128.79	50.05	50.10	50.00	50.05

ตารางที่ 12 สมดุลการดูดซับสีรีแอกทีฟชนิดสีแดงภายหลังจากถูกดูดซับด้วยเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกัน

C_o (มิลลิกรัม/ลิตร)	C_e (มิลลิกรัม/ลิตร)	W (กรัม)	V (ลิตร)	qe (มิลลิกรัม/กรัม)
12.29	2.66	1.00	0.01	0.096
29.85	8.81	1.00	0.01	0.210
45.15	15.98	1.00	0.01	0.292
67.76	19.82	1.00	0.01	0.479
86.70	29.01	1.00	0.01	0.577
101.43	38.94	1.00	0.01	0.625
128.79	50.05	1.00	0.01	0.787

2.2 สารละลายสีรีแอกทีฟชนิดสีน้ำเงิน

ตารางที่ 13 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีรีแอกทีฟชนิดสีน้ำเงิน

ลำดับที่	ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีรีแอกทีฟ (มิลลิกรัม/ลิตร) (C_o)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
1	10.93	10.93	10.93	10.93
2	31.93	31.86	31.86	31.88
3	50.50	50.57	50.64	50.57
4	67.29	67.29	67.29	67.29
5	83.93	85.71	85.71	85.12
6	108.93	110.71	110.71	110.12
7	132.14	132.14	137.50	133.93

ตารางที่ 14 ความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลายสีรีแอกทีฟชนิดสีน้ำเงิน (ความเข้มข้นที่เหลือของสารละลายสีรีแอกทีฟ) ภายหลังจากถูกดูดซับด้วยเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยง-ซึ่งกันและกัน

ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลายสีรีแอกทีฟ (มิลลิกรัม/ลิตร) (C_e)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
10.93	1.21	1.14	1.36	1.24
31.88	4.00	3.71	3.86	3.86
50.57	6.93	7.14	7.14	7.07
67.29	13.93	14.14	14.43	14.17
85.12	20.29	19.86	19.86	20.00
110.12	26.21	25.79	25.71	25.90
133.93	34.21	33.71	33.64	33.85

ตารางที่ 15 สมดุลการดูดซับสีรีแอกทีฟชนิดสีน้ำเงินภายหลังจากถูกดูดซับด้วยเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกัน

C_o (มิลลิกรัม/ลิตร)	C_e (มิลลิกรัม/ลิตร)	W (กรัม)	V (ลิตร)	qe (มิลลิกรัม/กรัม)
10.93	1.24	1.00	0.01	0.097
31.88	3.86	1.00	0.01	0.280
50.57	7.07	1.00	0.01	0.435
67.29	14.17	1.00	0.01	0.531
85.12	20.00	1.00	0.01	0.651
110.12	25.90	1.00	0.01	0.842
133.93	33.85	1.00	0.01	1.001

1.3 สารละลายสีรีแอกทีฟชนิดสีเหลือง

ตารางที่ 16 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีรีแอกทีฟชนิดสีเหลือง

ลำดับที่	ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีรีแอกทีฟ (มิลลิกรัม/ลิตร) (C_o)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
1	11.83	12.06	12.37	12.09
2	28.40	28.63	28.70	28.58
3	48.09	48.17	48.40	48.22
4	63.82	65.11	65.27	64.73
5	87.75	87.75	89.75	88.42
6	95.50	99.25	99.25	98.00
7	110.75	114.50	114.50	113.25

ตารางที่ 17 ความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลายสีรีแอกทีฟชนิดสีเหลือง (ความเข้มข้นที่เหลือของสารละลายสีรีแอกทีฟ) ภายหลังจากถูกดูดซับด้วยเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกัน

ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลายสีรีแอกทีฟ (มิลลิกรัม/ลิตร) (C_e)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
12.09	4.66	4.58	4.73	4.66
28.58	6.49	6.56	6.72	6.59
48.22	8.85	8.85	9.01	8.90
64.73	13.13	13.21	13.28	13.21
88.42	25.95	26.26	26.34	26.18
98.00	29.92	30.00	30.31	30.08
113.25	40.92	41.07	41.15	41.05

ตารางที่ 18 สมดุลการดูดซับสีรีแอกทีฟซนิดสีเหลืองภายหลังจากถูกดูดซับด้วยเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกัน

C_o (มิลลิกรัม/ลิตร)	C_e (มิลลิกรัม/ลิตร)	W (กรัม)	V (ลิตร)	qe (มิลลิกรัม/กรัม)
12.09	4.66	1.00	0.01	0.074
28.58	6.59	1.00	0.01	0.220
48.22	8.90	1.00	0.01	0.393
64.73	13.21	1.00	0.01	0.515
88.42	26.18	1.00	0.01	0.622
98.00	30.08	1.00	0.01	0.679
113.25	41.05	1.00	0.01	0.722

ภาคผนวก ฉ

อิทธิพลของสารชนิดต่าง ๆ ต่อการดูดซับสีรีแอกทีฟของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์

1. การดูดซับสีรีแอกทีฟด้วยเม็ดลูกปัดแอลจิเนต

ตารางที่ 1 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีรีแอกทีฟ

สภาวะของสารละลายสีรีแอกทีฟ	ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีรีแอกทีฟ (มิลลิกรัม/ลิตร) (C_o)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
H_2O	54.29	54.29	54.29	54.29
NaOH	28.23	28.33	28.28	28.28
NaCl	45.86	45.76	45.61	45.74

ตารางที่ 2 ความเข้มข้นของสารละลายสีรีแอกทีฟที่เหลือภายหลังจากถูกดูดซับด้วยเม็ดลูกปัดแอลจิเนต

สภาวะของสารละลายสีรีแอกทีฟ	ความเข้มข้นที่เหลือของสารละลายสีรีแอกทีฟ (มิลลิกรัม/ลิตร) (C_e)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
H_2O	46.81	46.92	46.92	46.88
NaOH	11.72	11.97	11.62	11.77
NaCl	42.63	42.58	42.58	42.60

ตารางที่ 3 ปริมาณสีรีแอกทีฟที่ถูกดูดซับด้วยเม็ดลูกปัดแอลจิเนต

สภาวะของสารละลายสีรีแอกทีฟ	C_o (มิลลิกรัม/ลิตร)	C_e (มิลลิกรัม/ลิตร)	ร้อยละของปริมาณสีรีแอกทีฟที่ถูกดูดซับ
H_2O	54.29	46.88	13.65
NaOH	28.28	11.77	58.38
NaCl	45.74	42.60	6.86

2. การดูดซับสีรีแอกทีฟด้วยเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกัน

ตารางที่ 4 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีรีแอกทีฟ

สภาวะของสารละลายสีรีแอกทีฟ	ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีรีแอกทีฟ (มิลลิกรัม/ลิตร) (C_o)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
H_2O	54.29	54.29	54.29	54.29
NaOH	28.23	28.33	28.28	28.28
NaCl	45.86	45.76	45.61	45.74

ตารางที่ 5 ความเข้มข้นของสารละลายสีรีแอกทีฟที่เหลือภายหลังจากถูกดูดซับด้วยเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกัน

สภาวะของสารละลายสีรีแอกทีฟ	ความเข้มข้นที่เหลือของสารละลายสีรีแอกทีฟ (มิลลิกรัม/ลิตร) (C_e)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
H_2O	22.68	22.68	22.52	22.63
NaOH	7.12	7.07	7.32	7.17
NaCl	27.93	27.07	27.93	27.64

ตารางที่ 6 ปริมาณสีรีแอกทีฟที่ถูกดูดซับด้วยเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โครงข่ายเชื่อมโยงซึ่งกันและกัน

สภาวะของสารละลายสีรีแอกทีฟ	C_o (มิลลิกรัม/ลิตร)	C_e (มิลลิกรัม/ลิตร)	ร้อยละของปริมาณสีรีแอกทีฟที่ถูกดูดซับ
H_2O	54.29	22.63	58.32
NaOH	28.28	7.17	74.65
NaCl	45.74	27.64	39.57

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-นามสกุล นางสาวบุญศรี คู่สุขธรรม

วัน เดือน ปี เกิด 20 กรกฎาคม 2507

สถานที่เกิด กรุงเทพมหานคร

ประวัติการศึกษา

ปริญญาตรี	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปทุมวัน (2525-2528) การศึกษาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์-เคมี)
ปริญญาโท	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร (2528-2531) การศึกษามหาบัณฑิต (เคมี)
ปริญญาโท	มหาวิทยาลัยมหิดล (2536-2539) วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์)
ปริญญาเอก	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (2544-2547) วิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วัสดุศาสตร์)

ประวัติการทำงาน

2532-ปัจจุบัน
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมีสิ่งทอ
คณะอุตสาหกรรมสิ่งทอ