

การเตรียมอัลจินต/คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสไฮโดรเจลโดยใช้กลูตารัลดีไฮด์และคอปเปอร์ซัลเฟตเป็น
สารเชื่อมขวาง



นางสาววัชรีย์ ศรีทวีสินทรัพย์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2558
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PREPARATION OF ALGINATE/CARBOXYMETHYL CELLULOSE HYDROGEL USING GLUTAR
ALDEHYDE AND COPPER SULPHATE AS CROSSLINKING AGENTS

Miss Watcharee Sritweesinsub



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Petrochemistry and Polymer Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2015

Copyright of Chulalongkorn University

วัชร ศรีทวีสินทรัพย์ : การเตรียมอัลจินต/คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสไฮโดรเจลโดยใช้กลูตารัลดีไฮด์และคอปเปอร์ซัลเฟตเป็นสารเชื่อมขวาง (PREPARATION OF ALGINATE/CARBOXYMETHYL CELLULOSE HYDROGEL USING GLUTARALDEHYDE AND COPPER SULPHATE AS CROSSLINKING AGENTS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. สิริรัตน์ จารุจินดา, 115 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมฟิล์มไฮโดรเจลจากอัลจินต (Alginate) กับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส(CMC) ที่มีการเชื่อมขวางสองระบบคือ การเชื่อมขวางทางเคมีด้วยกลูตารัลดีไฮด์และการเชื่อมขวางแบบประจุด้วยคอปเปอร์ไอออน (Cu^{2+}) โดยใช้อัตราส่วนระหว่าง Alginate:CMC เท่ากับ 10:0, 8:2, 6:4, 4:6, 2:8 และ 0:10 โดยน้ำหนัก วิธีการเชื่อมขวางฟิล์มในงานวิจัยนี้คือ เชื่อมขวางในขณะที่ขึ้นรูปฟิล์มด้วยกลูตารัลดีไฮด์ร้อยละ 5 โดยปริมาตร 0, 2 และ 5 โดยน้ำหนักและ/หรือ สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตปริมาณ 0, 2 มิลลิโมล และศึกษาผลของชนิดและปริมาณของสารเชื่อมขวางต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน การบวมตัวและของแข็งคงเหลือจากการละลายน้ำ ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่าฟิล์มที่เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์และคอปเปอร์ซัลเฟต มีความแข็งแรงสูงสุดลดต่ำลงเมื่อเทียบกับฟิล์มที่ไม่ใส่สารเชื่อมขวางเนื่องจากฟิล์มมีสมบัติแข็งเปราะ และมีค่า Young's Modulus ต่ำกว่า การศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารเชื่อมขวางลงในฟิล์มอัลจินต/คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ทำให้เสถียรภาพทางความร้อนเพิ่มสูงขึ้นผลการศึกษาพฤติกรรมการบวมตัว (Swelling behavior) ในน้ำกลั่น พบว่าฟิล์มที่เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์และคอปเปอร์ซัลเฟตมีความสามารถในการบวมตัวได้นานและเนื้อฟิล์มละลายออกมาน้อย ทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์ของแข็งคงเหลือสูง นอกจากนี้ยังทดสอบสัณฐานวิทยาของฟิล์มไฮโดรเจล พบว่าฟิล์มไฮโดรเจลมีรูพรุนที่หนาแน่นเพิ่มสูงขึ้นเมื่อทำการเชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์และคอปเปอร์ซัลเฟต

สาขาวิชา ปีเตอร์เคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

5672084523 : MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE

KEYWORDS:

WATCHAREE SRITWEESINSUB: PREPARATION OF ALGINATE/CARBOXYMETHYL CELLULOSE HYDROGEL USING GLUTARALDEHYDE AND COPPER SULPHATE AS CROSSLINKING AGENTS. ADVISOR: ASST. PROF. SIREERAT CHARUCHINDA, Ph.D., 115 pp.

This research studied the preparation of hydrogel films from Alginate and Carboxy Methyl Cellulose (CMC) crosslinked by chemical crosslinking (i.e. glutaraldehyde) and ionic crosslinking (i.e. Cu^{2+}). The weight ratios of Alginate to CMC were varied at 10:0, 8:2, 6:4, 4:6, 2:8 and 0:10. in the presence of glutaraldehyde at 0, 2, 5 and/or copper sulfate of 0 and 0.02 molar as crosslinking agents. The methods of crosslinking were applied during film forming. The hydrogel films were studied on mechanical properties (i.e., tensile strength, elongation at break and young modulus), thermal properties percentage of solid remains and swelling. The results on mechanical properties of the hydrogel films using a couple crosslinked system showed the brittle behavior, in which their tensile strengths decreased. Thermal properties were investigated by TGA After a couple crosslinking, the films showed increase stability. The swelling ratio of crosslink films with couple of agents. It showed greater on swelling time than that of crosslink alone. In addition the hydrogel films with the ratio of Alginate to CMC at 10:0 using a couple crosslinked system (A10C0-G5Cu2) gained the highest values of percentage of solid remains

Field of Study: Petrochemistry and
Polymer Science

Student's Signature

Advisor's Signature

Academic Year: 2015

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้อย่างสมบูรณ์เป็นเพราะได้รับคำแนะนำทางวิชาการ จากผู้ทรงคุณวุฒิด้านต่างๆ เป็นอย่างดี ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอขอบพระคุณคณาจารย์ และบุคคลผู้มีส่วนเกี่ยวข้อง ดังรายนามต่อไปนี้

1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิริรัตน์ จารุจินดา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ และแนะแนวทางในการดำเนินงาน รวมถึงการแก้ไขปัญหาในการทำวิจัย จนกระทั่งวิทยานิพนธ์เล่มนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

2. ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรธน์ ประศาสน์สารกิจ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อมรवारณ อินทศิริ และ รองศาสตราจารย์. ดร.นันทยา ยานูเมศ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาสละเวลามาให้คำปรึกษาและแนะนำ ตลอดจนตรวจสอบความถูกต้องในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

3. เจ้าหน้าที่ภาควิชาวัสดุศาสตร์ และภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนอุปกรณ์ เครื่องมือ และสถานที่ในการทำวิจัย

4. ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านสิ่งทอ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ภายใต้การดำเนินงานของภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัยบางส่วน

5. สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนทุนในการทำวิจัย

6. กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัย

ท้ายสุดนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รุ่นพี่ เพื่อน และน้องๆ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา และให้การสนับสนุนใน การทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี อีกทั้งอาจารย์ทุกท่านที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทความรู้ให้แก่ข้าพเจ้าจนสามารถสร้างสรรค์วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ.....	ฉ
บทที่1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่2 วารสารปริทรรศน์.....	3
2.1 ไฮโดรเจล (Hydrogels).....	3
2.1.1 ประเภทของไฮโดรเจล.....	3
2.1.1.1 ประเภทของไฮโดรเจลที่แบ่งตามสารตั้งต้นที่ใช้.....	3
2.1.1.2 ประเภทของไฮโดรเจลที่แบ่งตามลักษณะการสังเคราะห์.....	4
2.1.1.3 ประเภทของไฮโดรเจลที่แบ่งตามชนิดของการเชื่อมขวางของโครงสร้าง.....	6
2.1.1.4 ประเภทของไฮโดรเจลที่แบ่งตามขนาดรูพรุน.....	7
2.1.2 การบวมตัวและปัจจัยที่มีผลต่อการบวมตัวของไฮโดรเจล.....	7
2.1.3 การนำไปใช้งาน.....	8
2.1.3.1 Hydrogel dressing.....	9
2.1.3.2 การนำส่งยา (Drug delivery system).....	10

2.1.3.3 คอนแทคเลนส์หรือเลนส์สัมผัส.....	10
2.2 กัมธรรมชาติ (Natural gums).....	11
2.2.1 กัมจากสาหร่าย.....	12
2.2.1.1 อัลจีเนต (Alginate).....	12
2.2.1.1.1 สมบัติทางกายภาพ.....	12
2.2.1.1.2 สมบัติทางเคมี.....	13
2.2.1.2 อะการ์ (Agar).....	14
2.2.1.3 คาร์ราจีแนน (Carrageenan).....	16
2.2.2.4 เฟอเซลลาแรน (Furcellaran).....	18
2.2.2 กัมจากพืช (Botanical Sources).....	19
2.2.2.1 Plant Extrudate.....	19
2.2.2.1.1 กัมอะราบิก (Gum Arabic).....	19
2.2.2.1.2 กัมทรากาคานท์ (Gum tragacanth).....	20
2.2.2.1.3 กัมคารายา (Gum karaya).....	21
2.2.2.2 Plant Seed Gums.....	22
2.2.2.2.1 โลคัสبینกัม (Locust bean gum).....	22
2.2.2.2.2 กัวร์กัม (Guar gum).....	22
2.2.2.3 Plant Tissue Gums.....	23
2.2.2.3.1 เพคติน (Pectin).....	23
2.2.3 Microbial Gum.....	25
2.2.3.1 แซนแทนกัม (Xanthan gum).....	25
2.3 คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส.....	26
2.4 ระบบเชื่อมขวาง.....	27

2.4.1 การเชื่อมขวางทางเคมี.....	27
2.4.1.1 พอร์มัลดีไฮด์.....	27
2.4.1.2 กลูตารัลดีไฮด์.....	28
2.4.2 การเชื่อมขวางประจุแบบไดวาเลนต์.....	29
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	30
บทที่3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	32
3.1 ขอบเขตการทดลอง	32
3.2 วัสดุและสารเคมี.....	32
3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	33
3.4 วิธีการทดลอง.....	34
3.4.1 การเตรียมฟิล์มไฮโดรเจล.....	34
3.4.2 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติของฟิล์มไฮโดรเจล.....	37
3.4.2.1 การตรวจสอบการเปลี่ยนสีของฟิล์มไฮโดรเจลด้วยเครื่องวัดเฉดสี (Reflectance Spectrophotometer).....	37
3.4.2.2 การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของฟิล์มไฮโดรเจลด้วยเทคนิค FTIR.....	38
3.4.2.3 การหาค่าการบวมตัวของไฮโดรเจลในน้ำกลั่น	39
3.4.2.4 การหาปริมาณร้อยละของแข็งที่เหลือจากการละลายน้ำ (%solid content).....	39
3.4.2.5 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาของฟิล์มไฮโดรเจลด้วยเทคนิค SEM.....	40
3.4.2.6 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของฟิล์มไฮโดรเจลด้วยเทคนิค TGA.....	40
3.4.2.7 การทดสอบสมบัติเชิงกล	41
บทที่4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	44
4.1 ลักษณะทางกายภาพของไฮโดรเจล.....	44
4.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของไฮโดรเจลด้วย FTIR.....	49

4.3 พฤติกรรมการบวมตัว.....	52
4.4 ปริมาณร้อยละของของแข็งคงเหลือจากการละลายน้ำของไฮโดรเจล	55
4.5 สัณฐานวิทยา	57
4.6 เสถียรภาพทางความร้อนของไฮโดรเจลด้วยเทคนิค TGA.....	64
4.7 สมบัติเชิงกล.....	69
บทที่5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	76
5.1 สรุปผลการทดลอง	76
5.2 ข้อเสนอแนะ	77
รายการอ้างอิง	78
ภาคผนวก ก.....	84
ภาคผนวก ข.....	93
ภาคผนวก ค.....	97
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	115

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ลักษณะและสมบัติของคาร์ราจีแนนแต่ละชนิด	17
ตารางที่ 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่นำมาใช้ในการทดลอง.....	33
ตารางที่ 3.2 สูตรการเตรียมอัลจิเนต/คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วย สารละลาย กลูตารัลดีไฮด์และสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตในอัตราส่วนต่าง	35
ตารางที่ 4. 1 การเปลี่ยนแปลงสีของฟิล์มไฮโดรเจลทั้งก่อนและหลังเชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์และ คอปเปอร์ซัลเฟต 47	
ตารางที่ 4. 2 ปริมาณร้อยละของของแข็งคงเหลือจากการละลายน้ำ (% solid remain) ของอัล จิเนต/CMC ไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์และคอปเปอร์ซัลเฟตในอัตราส่วนต่างๆกัน (กลูตารัลดีไฮด์ความเข้มข้น ร้อยละ 2 และ 5 โดยน้ำหนักและคอปเปอร์ซัลเฟต 0.02 โมลลาร์).....	56
ตารางที่ 4. 3 สมบัติทางความร้อนของอัลจิเนต/CMC ไฮโดรเจล	68

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.2 ไฮโดรเจลแบบแผ่นฟิล์ม	4
รูปที่ 2.3 ไฮโดรเจลแบบโครงร่างตาข่าย	5
รูปที่ 2.4 ไฮโดรเจลแบบกราฟท์บนพื้นผิว	5
รูปที่ 2.5 ไฮโดรเจลแบบอินเตอร์เพเนตรตติงพอลิเมอร์เน็ตเวิร์ก	6
รูปที่ 2.6 Alginic acid	12
รูปที่ 2.7 โครงสร้างของอัลจิเนต (Alginate) ชนิดต่างๆ	13
รูปที่ 2.8 การเกิดเจลของ calcium alginate (Egg-box model)	14
รูปที่ 2.9 โครงสร้างของอะการ์	15
รูปที่ 2.10 กลไกการเกิดเจลของอะการ์	16
รูปที่ 2.11 ชนิดของ carrageenan	17
รูปที่ 2.12 กลไกการเกิดเจลของ Carrageenan	18
รูปที่ 2.13 โครงสร้างโมเลกุลของ Gum Arabic	20
รูปที่ 2.14 Partial structure of tragacanthic acid	21
รูปที่ 2.15 Structure of gum karaya (<i>Sterculiaurens</i>).....	21
รูปที่ 2.16 โครงสร้างของโลคัสบีนกันัม (Locust bean gum)	22
รูปที่ 2.17 โครงสร้างของกัวร์กันัม	23
รูปที่ 2.18 โครงสร้างของเพคติน	24
รูปที่ 2.19 โครงสร้างโมเลกุลของแซนแทนกันัม	26
รูปที่ 2.20 โครงสร้างของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส.....	26
รูปที่ 2.21 สูตรโครงสร้างของพอร์มัลดีไฮด์	27
รูปที่ 2.22 สูตรโครงสร้างกลูตารัลดีไฮด์	28

รูปที่ 2.23 สูตรโครงสร้างคอปเปอร์ซัลเฟต.....	29
รูปที่ 2.24 แบบจำลองการเกิดสารเชิงซ้อนระหว่างระหว่างแซนแทนกัมและ Divalent cation	30
รูปที่ 3.1 เครื่องวัดสี รุ่น Macbeth color-eye 7000 ของ บริษัท X-rite Incorporated.....	38
รูปที่ 3.2 เครื่อง FT-IR ของ Thermo Fisher Scientific รุ่น Nicolet 6700	38
รูปที่ 3.3 เครื่อง SEM ของ JEOL รุ่น JSM 5410 LV	40
รูปที่ 3.4 เครื่อง TGA ของ Mettler Toledo รุ่น TGA/SDTA851e	41
รูปที่ 3.5 เครื่อง Universal Tensile Testing Machine.....	42
รูปที่ 3.6 ชิ้นงานตัวอย่างรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	42
รูปที่ 4. 1 ภาพถ่ายของฟิล์มไฮโดรเจลทั้งก่อนและหลังเชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์.....	45
รูปที่ 4. 2 การเปลี่ยนแปลงสีของฟิล์มไฮโดรเจลทั้งก่อนและหลังเชื่อมขวางด้วยคอปเปอร์ซัลเฟต, กลูตารัลดีไฮด์และคอปเปอร์ซัลเฟต.....	46
รูปที่ 4.3 FTIR สเปกตรัมของไฮโดรเจล (ก) CMC (ข) อัลจิเนต/CMC ที่อัตราส่วน 2:8 (ค) อัลจิเนต/CMC ที่อัตราส่วน 8:2 (ง) อัลจิเนต.....	49
รูปที่ 4.4 FTIR สเปกตรัมของไฮโดรเจล (ก) CMC (ข) CMC ที่เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก (ค) CMC ที่เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก (ง) อัลจิเนต/CMC ที่เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก (จ) CMC ที่เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก.....	50
รูปที่ 4.5 FTIR สเปกตรัมของ (ก) อัลจิเนต (ข) อัลจิเนตที่ (ค) อัลจิเนต/CMC ที่อัตราส่วน 8:2 (ง) อัลจิเนต/CMC ที่อัตราส่วน 4:6 ที่เชื่อมขวางด้วยคอปเปอร์ซัลเฟต 0.02 โมลลาร์ ตามลำดับ	51
รูปที่ 4. 6 FTIR สเปกตรัมของ (ก) CMC (ข) อัลจิเนต/CMC ที่อัตราส่วน4:6 (ค) อัลจิเนต/CMC ที่อัตราส่วน 6:4 (ง) อัลจิเนต ตามลำดับที่เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และคอปเปอร์ซัลเฟต 0.02 โมลลาร์.....	52
รูปที่ 4. 7 พฤติกรรมการบวมตัวในน้ำกลั่นของอัลจิเนต/CMC ไฮโดรเจลที่ไม่ผ่านการเชื่อมขวางที่อุณหภูมิ 25°C.....	53

รูปที่ 4.8 พฤติกรรมการบวมตัวของอัลจิเนต/CMC ไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ในน้ำกลั่น 25°C.....	53
รูปที่ 4.9 พฤติกรรมการบวมตัวของอัลจิเนต/CMC ไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในน้ำกลั่น 25°C.....	54
รูปที่ 4.10 พฤติกรรมการบวมตัวของอัลจิเนต/CMC ไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยคอปเปอร์ซัลเฟต 0.02 โมลลาร์ ในน้ำกลั่น 25°C.....	54
รูปที่ 4.11 พฤติกรรมการบวมตัวของอัลจิเนต/CMC ไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ร่วมกับสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 0.02 โมลลาร์ ในน้ำกลั่น 25°C.....	55
รูปที่ 4. 12 ภาพ SEM ของอัลจิเนต/CMC ไฮโดรเจลที่มีอัตราส่วนของอัลจิเนต/CMC ที่แตกต่างกัน.....	58
รูปที่ 4.13 ภาพ SEM ของอัลจิเนต/CMC ไฮโดรเจลที่มีอัตราส่วนของอัลจิเนต/CMC ที่แตกต่างกันเชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก	59
รูปที่ 4.14 ภาพ SEM ของอัลจิเนต/CMC ไฮโดรเจลที่มีอัตราส่วนของอัลจิเนต/CMC ที่แตกต่างกันเชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก	60
รูปที่ 4.15 ภาพ SEM ของอัลจิเนต/CMC ไฮโดรเจลที่มีอัตราส่วนของอัลจิเนต/CMC ที่แตกต่างกันเชื่อมขวางด้วยคอปเปอร์ซัลเฟต 0.02 โมลลาร์.....	61
รูปที่ 4.16 ภาพ SEM ของอัลจิเนต/CMC ไฮโดรเจลที่มีอัตราส่วนของอัลจิเนต/CMC ที่แตกต่างกันเชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ร้อยละ 2 โดยน้ำหนักและคอปเปอร์ซัลเฟต 0.02 โมลลาร์.....	62
รูปที่ 4.17 ภาพ SEM ของอัลจิเนต/CMC ไฮโดรเจลที่มีอัตราส่วนของอัลจิเนต/CMC ที่แตกต่างกันเชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักและคอปเปอร์ซัลเฟต 0.02 โมลลาร์	63
รูปที่ 4.18 TGA เทอร์โมแกรมของอัลจิเนต/CMC ไฮโดรเจลที่อัตราส่วนต่างๆที่ไม่ผ่านการเชื่อมขวาง.....	64
รูปที่ 4.19 TGA เทอร์โมแกรมของอัลจิเนต/CMC ไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก	65
รูปที่ 4.20 TGA เทอร์โมแกรมของอัลจิเนต/CMC ไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก	65

รูปที่ 4.21 TGA เทอร์โมแกรมของอัลจินเนต/CMC ไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยคอปเปอร์ซัลเฟต 0.02 โมลลาร์	66
รูปที่ 4.22 TGA เทอร์โมแกรมของอัลจินเนต/CMC ไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ร่วมกับคอปเปอร์ซัลเฟต 0.02 โมลลาร์	67
รูปที่ 4.23 TGA เทอร์โมแกรมของอัลจินเนต/CMC ไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ร่วมกับคอปเปอร์ซัลเฟต 0.02 โมลลาร์.....	67
รูปที่ 4.24 ความทนแรงดึงของอัลจินเนต/CMC ไฮโดรเจลในอัตราส่วนต่างๆก่อนและหลังเชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ร้อยละ 2 และ 5 โดยน้ำหนัก.....	70
รูปที่ 4.25 ความทนแรงดึงของอัลจินเนต/CMC ไฮโดรเจลในอัตราส่วนผสมต่างๆก่อนและหลังเชื่อมขวางด้วยคอปเปอร์ซัลเฟตความเข้มข้น 0.02 โมลลาร์, กลูตารัลดีไฮด์ร้อยละ 2 และ 5 โดยปริมาตรร่วมกับคอปเปอร์ซัลเฟตความเข้มข้น 0.02 โมลลาร์.....	71
รูปที่ 4.26 การยืด ณ จุดขาดของอัลจินเนต/CMC ไฮโดรเจลในอัตราส่วนต่างๆก่อนและหลังเชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ร้อยละ 2 และ 5 โดยน้ำหนัก	72
รูปที่ 4.27 การยืด ณ จุดขาดของฟิล์มอัลจินเนต/คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสไฮโดรเจลในอัตราส่วนต่างๆก่อนและหลังเชื่อมขวางด้วยคอปเปอร์ซัลเฟตความเข้มข้น 0.02 โมลลาร์, กลูตารัลดีไฮด์ร้อยละ 2 และ 5 โดยน้ำหนักร่วมกับคอปเปอร์ซัลเฟตความเข้มข้น 0.02 โมลลาร์.....	73
รูปที่ 4.28 ยังสัมมูลัสของอัลจินเนต/CMC ไฮโดรเจลในอัตราส่วนต่างๆ ก่อนและหลังเชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ร้อยละ 2 และ 5 โดยน้ำหนัก.....	74
รูปที่ 4.29 ยังสัมมูลัสของอัลจินเนต/CMC ไฮโดรเจลในอัตราส่วนต่างๆ ก่อนและหลังเชื่อมขวางด้วยคอปเปอร์ซัลเฟตความเข้มข้น 0.02 โมลลาร์ กลูตารัลดีไฮด์ร้อยละ 2 และ 5 โดยน้ำหนัก ร่วมกับคอปเปอร์ซัลเฟตความเข้มข้น 0.02 โมลลาร์.....	75

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ไฮโดรเจลคือวัสดุพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเป็นร่างแหสามมิติ เมื่อสัมผัสน้ำหรือของเหลว วัสดุชนิดนี้จะมีสมบัติพิเศษในการดูดซับน้ำและกักเก็บน้ำไว้ในโครงสร้างได้ดี ไฮโดรเจลที่ดีจะไม่ละลายน้ำแต่จะบวมตัวและคงรูปร่างเดิมไว้เนื่องจากโครงสร้างของไฮโดรเจลมีส่วนประกอบของหมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำเช่น $-OH$, $-COOH$, $-NH_2$ เป็นต้น สามารถเตรียมได้จากทั้งผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีและผลิตภัณฑ์จากธรรมชาติ [1, 2] ปัจจุบันไฮโดรเจลถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในชีวิตประจำวันในรูปแบบของผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น ยาและเวชภัณฑ์ ชีววัสดุทางการแพทย์และวัสดุทางการเกษตร เป็นต้น [3, 4]

โดยทั่วไปไฮโดรเจลที่ใช้งานด้านอุตสาหกรรมส่วนมาก เตรียมจากพอลิเมอร์สังเคราะห์เช่นพอลิเมทาคริเลต พอลิอะคริเลต พอลิอะคริลาไมด์ [5, 6] ซึ่งมีข้อดีคือขึ้นรูปได้ง่าย ทนกรด ทนด่าง และทนต่อสภาพดินฟ้าอากาศและมีความแข็งแรงสูงเป็นต้น อีกทั้งยังมีราคาถูก จึงนิยมนำมาใช้อย่างแพร่หลาย แต่มีข้อเสียคือย่อยสลายยากเนื่องจากเตรียมจากสารตั้งต้นที่มาจากปิโตรเลียม ทำให้เกิดปริมาณขยะเพิ่มมากขึ้น จนกลายเป็นสาเหตุสำคัญที่ก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม ดังนั้นการนำพอลิเมอร์ธรรมชาติเช่น ไคโตซาน เจลาติน อัลจิเนต คาร์ราจีแนน [7-10] มาใช้เป็นสารตั้งต้นจะทำให้ได้ไฮโดรเจลที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ อย่างไรก็ตามไฮโดรเจลจากพอลิเมอร์ธรรมชาติยังมีข้อจำกัดด้านความแข็งแรงและการละลายน้ำที่รวดเร็วเกินไปไม่เหมาะสำหรับการนำไปใช้งาน ดังนั้นจึงต้องปรับปรุงสมบัติดังกล่าวให้เหมาะสมก่อนนำไปใช้ประโยชน์ มีงานวิจัยมากมายที่ได้ทำการปรับปรุงสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนของไฮโดรเจลด้วยการใช้สารเชื่อมขวางทางเคมีด้วยพันธะโควาเลนต์เช่น กลูตารัลดีไฮด์และบอแรกซ์ [11, 12] หรือการใช้สารเชื่อมขวางด้วยพันธะไอออนิกแบบไดวาเลนต์ เช่น Ca^{2+} , Cu^{2+} [13, 14] หรือแบบไตรวาเลนต์ เช่น Al^{3+} , Fe^{3+} [15, 16]

งานวิจัยนี้จึงสนใจเตรียมไฮโดรเจลจากพอลิเมอร์ธรรมชาติ 2 ชนิดคืออัลจิเนตและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสซึ่งเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและหาได้ง่ายที่อัตราส่วนแตกต่างกัน แล้วทำการเชื่อมขวางทางเคมี ด้วยพันธะโควาเลนต์โดยใช้กลูตารัลดีไฮด์ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาเชื่อมขวางได้ถึง 2 ตำแหน่งและเชื่อมขวางด้วยพันธะไอออนิกแบบไดวาเลนต์โดยใช้คอปเปอร์ซัลเฟต นอกจากนี้คอปเปอร์ซัลเฟตยังมีสมบัติฆ่าเชื้อแบคทีเรียที่ดีอีกด้วย จากนั้นนำมาขึ้นรูปเป็นฟิล์มด้วยวิธีเทแบบหล่อ

1.2 วัตถุประสงค์

1. เตรียมไฮโดรเจลผสมระหว่างอัลจินตและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน โดยใช้กลูตารัลดีไฮด์และคอปเปอร์ซัลเฟตเป็นสารเชื่อมขวางแล้วนำมาขึ้นรูปด้วยวิธีเทแบบหล่อ
2. ศึกษาผลของชนิดและปริมาณของสารเชื่อมขวางต่อสัณฐานวิทยา สมบัติทางกายภาพ พฤติกรรมการบวมน้ำ สมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของฟิล์มไฮโดรเจลที่ขึ้นรูปได้

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ขอบเขตของงานวิจัยคือ เตรียมฟิล์มไฮโดรเจลจากอัลจินตและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่มีการเชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์และ/หรือคอปเปอร์ซัลเฟตด้วยวิธีเทแบบหล่อ แล้วนำฟิล์มไฮโดรเจลที่เตรียมได้มาทดสอบสัณฐานวิทยา สมบัติทางกายภาพ พฤติกรรมการบวมน้ำ สมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถเตรียมฟิล์มไฮโดรเจลที่มีองค์ประกอบหลักจากพอลิเมอร์ธรรมชาติที่สามารถบวมตัวในน้ำได้นาน ทนการละลายน้ำ และมีเสถียรภาพทางความร้อนที่สูงขึ้นสำหรับนำไปประยุกต์เป็นวัสดุปิดแผล หรือวัสดุนำส่งยาได้ต่อไป

บทที่ 2 วารสารปริทรรศน์

2.1 ไฮโดรเจล (Hydrogels) [17]

ไฮโดรเจล (Hydrogels) มีชื่อเรียกอื่นๆ อีกหลายชื่อ เช่น Water gel, Water crystal, Gel crystal [12] ไฮโดรเจลเป็นพอลิเมอร์ที่มีลักษณะเป็นโครงร่างตาข่าย มีคุณลักษณะพิเศษคือเมื่ออยู่ในน้ำจะเกิดการบวมตัวและสามารถยึดน้ำเอาไว้ในโครงสร้างโดยยังคงรักษาสภาพโครงร่างตาข่ายสามมิติ สามารถเกิดการหดตัวได้เมื่อมีการสูญเสียโมเลกุลของน้ำออกไปแต่ไม่สามารถละลายในตัวทำละลายทุกชนิด โครงสร้างของไฮโดรเจลประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนที่สามารถเกิดอันตรกิริยากับโมเลกุลของน้ำหรือเรียกว่าส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic group) เช่น หมู่ -OH, -COOH, -CONH₂, -CONH- และ -SO₃H เป็นต้น และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic group) เช่น หมู่ -CH₂- และ -CH₃ ไฮโดรเจลถูกนำมาไปประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆ มากมายเช่นด้านการแพทย์นำไปการใช้เป็นแผ่นปิดแผลไฟไหม้ คอนแทคเลนส์และประยุกต์ใช้ในการนำส่งยา ด้านเกษตรกรรมใช้เป็นปุ๋ยโรยในดิน เพื่อเพิ่มความชุ่มชื้นสามารถนำมาใช้แทนดินในการเลี้ยงต้นไม้ประเภทไม้กระถาง และพุ่มต่าง

2.1.1 ประเภทของไฮโดรเจล

ไฮโดรเจลสามารถแบ่งออกได้หลายชนิดขึ้นอยู่กับกฎเกณฑ์ที่ใช้ดังนี้

2.1.1.1 ประเภทของไฮโดรเจลที่แบ่งตามสารตั้งต้นที่ใช้ [18]

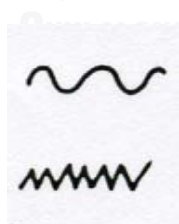
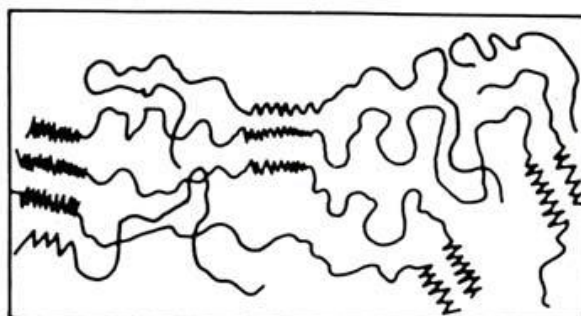
1) ไฮโดรเจลที่ใช้สารตั้งต้นเป็นมอนอเมอร์ ไฮโดรเจลชนิดนี้เป็นพอลิเมอร์ร่วมระหว่างมอนอเมอร์ที่ชอบน้ำ (Hydrophilic monomer) และมอนอเมอร์ที่มีหลายหมู่ฟังก์ชัน (Polyfunctional-comonomer) โครงสร้างร่างแหของไฮโดรเจลเกิดจากการเชื่อมขวางกันระหว่างหมู่ฟังก์ชันของแต่ละมอนอเมอร์ ตัวอย่างของมอนอเมอร์ที่ชอบน้ำที่นิยมใช้กันเช่น เมทาคริลิกแอซิด และเมทาคริลลาไมด์ เป็นต้น ตัวอย่างของไฮโดรเจลประเภทนี้ เช่น พอลิเมอร์ร่วมระหว่าง 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต ((2-hydroxyethyl)methacrylate (HEMA)) กับเอทิลีนไกลคอลบิสเมทาคริเลต (Ethylene glycol- bismethacrylate (EGDMA)) [17] ไฮโดรเจลที่ได้นำมาใช้เป็นคอนแทคเลนส์แบบนิ่ม การพอลิเมอไรซ์ของไวนิลมอนอเมอร์ส่วนใหญ่จะใช้ตัวริเริ่มแบบอนุมูลอิสระ เช่น เปอร์ออกไซด์หรือสารประกอบเอโซ เป็นต้น โดยที่ตัวริเริ่มจะแตกตัวให้อนุมูลอิสระเมื่อมีการให้ความร้อนหรืออาจใช้ตัวริเริ่มแบบรีดอกซ์ เช่น ammonium persulfate คู่กับ N, N-tetramethylethylenediamine (TEMED) [17] รวมถึงการใช้ระบบ photo initiator ด้วย

2) ไฮโดรเจลที่ใช้สารตั้งต้นเป็นพรีพอลิเมอร์ ไฮโดรเจลประเภทนี้เตรียมโดยการเชื่อมขวางพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำและมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำหรือโอลิโกเมอร์ตัวอย่างเช่น การเชื่อมขวาง α,ω -hydroxyl poly (ethylene glycol) ด้วย diisocyanate ซึ่งเป็นการเชื่อมขวางแบบไตรออลไฮโดรเจลที่ได้จัดเป็นพอลิยูรีเทนที่ชอบน้ำ

3) ไฮโดรเจลที่ใช้สารตั้งต้นเป็นพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำ ไฮโดรเจลประเภทนี้เกิดจากการเชื่อมขวางทางเคมีของพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำตัวอย่างเช่น การเชื่อมขวางโมเลกุลของโปรตีนด้วยฟอร์มาลดีไฮด์หรือกลูตารัลดีไฮด์ นอกจากนี้ไอออนิกพอลิเมอร์ยังสามารถเชื่อมขวางได้ด้วยการใช้ตัวเชื่อมขวางที่มีประจุเป็น 2+, 3+ เช่น การสังเคราะห์ไฮโดรเจลจากไซเตียมอัลจินัตด้วยตัวเชื่อมขวาง Ca^{2+} [18]

2.1.1.2 ประเภทของไฮโดรเจลที่แบ่งตามลักษณะการสังเคราะห์ [19]

1) ไฮโดรเจลแบบแผ่นฟิล์ม (Cast film) มักนำไปใช้เพื่อเคลือบพื้นผิวของวัสดุต่างๆ ไฮโดรเจลชนิดนี้มีโครงสร้างภายในที่ประกอบด้วยทั้งส่วนที่ชอบน้ำและไม่ชอบน้ำส่วนที่ไม่ชอบน้ำจะช่วยป้องกันไม่ให้พอลิเมอร์ละลายในตัวทำละลายต่างๆ ได้แสดงดังรูปที่ 2.1

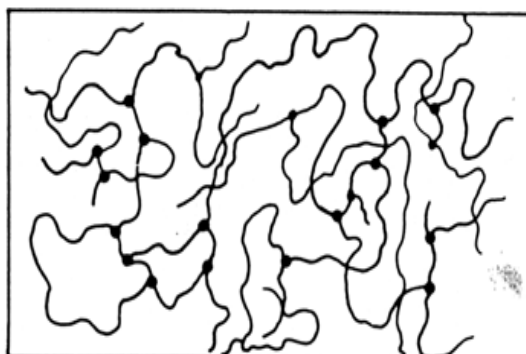


พอลิเมอร์ส่วนที่ชอบน้ำ

พอลิเมอร์ส่วนที่ไม่ชอบน้ำ

รูปที่ 2.1 ไฮโดรเจลแบบแผ่นฟิล์ม [18]

2) ไฮโดรเจลแบบโครงร่างตาข่าย (Crosslinked network) เตรียมจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันระหว่างสารละลายผสมของมอนอเมอร์ ตัวริเริ่มปฏิกิริยาและตัวเชื่อมต่อสายโซ่ (Crosslinking agent) หรือในบางกรณีอาจเติมตัวทำละลายลงไปด้วย โครงสร้างของไฮโดรเจลชนิดนี้แสดงดังรูปที่ 2.2

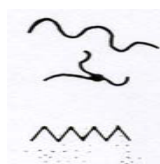
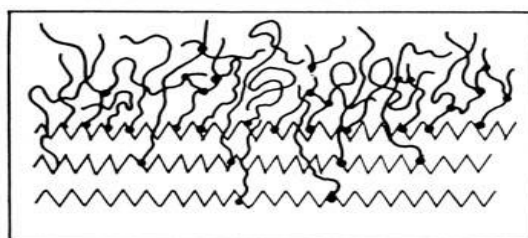


พอลิเมอร์

พอลิเมอร์ส่วนที่เกิดพันธะโควาเลนต์

รูปที่ 2.2 ไฮโดรเจลแบบโครงร่างตาข่าย [18]

3) ไฮโดรเจลแบบกราฟท์บนพื้นผิว (Surface grafted polymer) ทำได้โดยการให้ไฮโดรเจลเกิดพันธะบนพอลิเมอร์อื่นที่ไม่สามารถละลายน้ำเทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่สามารถปรับปรุงสมบัติของไฮโดรเจลให้ตรงกับความต้องการ เหมาะกับการประยุกต์ใช้งาน เช่น ปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้ดีขึ้นโดยทำให้เกิดพันธะกับพอลิเมอร์ที่มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าหรือการทำให้ไฮโดรเจลที่ละลายน้ำได้กลายเป็นไฮโดรเจลที่ไม่ละลายน้ำโดยเกิดพันธะกับพอลิเมอร์ที่ไม่สามารถละลายในน้ำเป็นต้น แสดงดังรูปที่ 2.3



พอลิเมอร์ส่วนที่ชอบน้ำ

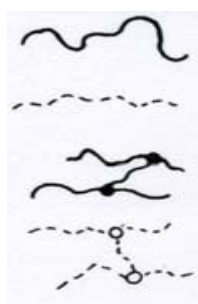
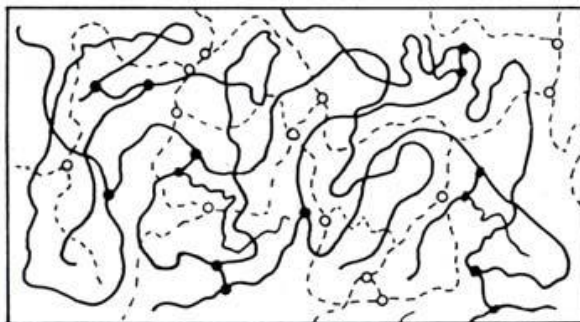
พอลิเมอร์ส่วนที่มีการเชื่อมต่อ

พอลิเมอร์ส่วนที่ไม่ชอบน้ำ

รูปที่ 2.3 ไฮโดรเจลแบบกราฟท์บนพื้นผิว [18]

4) ไฮโดรเจลแบบอินเตอร์เพเนตเรตติงพอลิเมอร์เน็ตเวิร์ก (Interpenetrating polymer network, IPN) เป็นไฮโดรเจลที่มีโครงร่างตาข่าย 2 ชนิดแทรกกันอยู่ไม่สามารถแยกออกจากกันได้ส่งผลให้โครงสร้างโดยรวมมีความแข็งแรงมากขึ้นหรือมีสมบัติอื่นที่ตรงกับความต้องการในการประยุกต์ใช้งานได้ดีขึ้นนอกจากนี้ยังมีไฮโดรเจลชนิดที่เป็นแบบกึ่งอินเตอร์เพเนตเรตติงพอลิเมอร์

เน็ตเวิร์ก (semi-IPN) คือไฮโดรเจลที่มีพอลิเมอร์โครงร่างตาข่ายกับพอลิเมอร์ที่ไม่มีโครงร่างตาข่ายสอดแทรกกันอยู่แสดงดังรูปที่ 2.4 ซึ่งทั้งสองเทคนิคเป็นการปรับปรุงสมบัติของไฮโดรเจลอีกทางหนึ่งเพื่อให้ตรงต่อการประยุกต์ใช้งานในแต่ละแบบ



พอลิเมอร์ชนิดที่ 1 (ส่วนที่ชอบน้ำ)

พอลิเมอร์ชนิดที่ 2 (ส่วนที่ไม่ชอบน้ำ)

พอลิเมอร์ชนิดที่ 1 (ส่วนที่เกิดการเชื่อมต่อ)

พอลิเมอร์ชนิดที่ 2 (ส่วนที่เกิดการเชื่อมต่อ)

รูปที่ 2.4 ไฮโดรเจลแบบอินเตอร์เพเนตรตติงพอลิเมอร์เน็ตเวิร์ก [18]

2.1.1.3 ประเภทของไฮโดรเจลที่แบ่งตามชนิดของการเชื่อมขวางของโครงสร้าง

สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิดดังนี้ [20]

1) ไฮโดรเจลที่มีการเชื่อมขวางทางเคมี (Chemical hydrogel) มีการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ด้วยพันธะโควาเลนต์ซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรงมาก โดยในหนึ่งโมเลกุลของมอนอเมอร์ที่เกิดพันธะมักมีหมู่ฟังก์ชันอยู่หลายตำแหน่งที่สามารถเกิดการเชื่อมขวางได้ ไฮโดรเจลที่ได้จะไม่เกิดกระบวนการย้อนกลับทางความร้อนคือ ไม่สามารถทำให้หลอมได้อีก หากให้ความร้อนจนถึงจุดที่พันธะแตกออกจะเกิดการสลายตัวสมบัติจะเปลี่ยนไปจากเดิม ไฮโดรเจลชนิดนี้อาจเรียกได้อีกอย่างว่าไฮโดรเจลชนิดเทอร์โมเซตเนื่องจากไฮโดรเจลชนิดนี้มีความคงทน ไม่หลอมเหลว และไม่ละลายในตัวทำละลาย เช่น พอลิ(2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต) ที่มีการเชื่อมขวางด้วยเอทิลีนไกลคอลไดเมทาคริเลต [21] เป็นต้น

2) ไฮโดรเจลที่มีการเชื่อมขวางทางกายภาพ (Physical hydrogel) การเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์เกิดจากพันธะไฮโดรเจน แรงแวนเดอร์วาลส์ ซึ่งมีความแข็งแรงน้อยกว่าพันธะโควาเลนต์ ไฮโดรเจลชนิดนี้เกิดการผันกลับทางความร้อนได้จึงเรียกได้อีกอย่างว่าไฮโดรเจลชนิดเทอร์โมพลาสติก

สามารถหลอมได้เมื่อให้ความร้อนและแข็งตัวเมื่อเย็นลง ซึ่งการให้ความร้อนไม่ส่งผลกระทบต่อสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของไฮโดรเจล นอกจากนี้ไฮโดรเจลชนิดนี้ยังสามารถละลายได้ในตัวทำละลายบางชนิดทำให้ขึ้นรูปได้ง่ายรวมทั้งการผสมสารอื่นลงในเจล เช่น สารต้านจุลินทรีย์ ยา เป็นต้น ตัวอย่างของไฮโดรเจลชนิดนี้ เช่น พอลิ(อะคริลาไมด์-โค-เมทิลเมทาคริเลต-โค-ไวนิลเอมีน) (Poly(acrylamine-co-methylmetacrylate-co-vinylamine)) [22] เป็นต้น

2.1.1.4 ประเภทของไฮโดรเจลที่แบ่งตามขนาดรูพรุน

1) ไฮโดรเจลที่มีรูพรุนขนาดเล็ก (Microporous hydrogel) เป็นไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ในตัวทำละลายที่ดี โดยที่มอนอเมอร์ สารเชื่อมขวาง และพอลิเมอร์สามารถละลายในตัวทำละลายได้ เจลที่ได้มีลักษณะใส ไฮโดรเจลชนิดนี้อาจเรียกว่า ไฮโดรเจลแบบเนื้อเดียว (Homogeneous hydrogel) เช่น พอลิ (2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต) ที่เตรียมโดยมีอัตราส่วน HEMA : H₂O เท่ากับ 2:1 [21] เป็นต้น

2) ไฮโดรเจลที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ (Macroporous hydrogel) ในขั้นตอนการสังเคราะห์ไฮโดรเจลชนิดนี้พอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นจะไม่ละลายในตัวทำละลายที่ใช้สำหรับการพอลิเมอไรซ์แต่จะตกตะกอนแยกออกมาไฮโดรเจลที่ได้มีรูพรุนขนาดใหญ่ มีสีขาวขุ่น เรียกได้ว่าเป็นไฮโดรเจลแบบเนื้อผสม (Heterogeneous hydrogel) เช่น พอลิ (2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต) ที่เตรียมโดยมีอัตราส่วน HEMA : H₂O เท่ากับ 1.25:1 [21] เป็นต้น

2.1.2 การบวมตัวและปัจจัยที่มีผลต่อการบวมตัวของไฮโดรเจล [19]

สมบัติเฉพาะของไฮโดรเจลคือสามารถพองตัวแต่ไม่ละลายในน้ำเนื่องจากไฮโดรเจลประกอบด้วยทั้งส่วนที่ชอบน้ำและไม่ชอบน้ำเมื่อนำไฮโดรเจลไปแช่น้ำโมเลกุลของน้ำสามารถแพร่ผ่านและแทรกเข้าไปอยู่ในบริเวณที่ว่างหรือรูพรุนภายในโครงสร้างสามมิติของไฮโดรเจลนั้นได้เนื่องจากแรงดันออสโมติก (Osmotic pressure) โมเลกุลน้ำบางส่วนจะเกิดอันตรกิริยากับสายโซ่พอลิเมอร์แล้วผลักดันให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการขยายตัวหรือเกิดการพองตัวขึ้นซึ่งเป็นการปรับโครงสร้างของไฮโดรเจลให้เกิดสมดุลใหม่ไฮโดรเจลเมื่อขยายตัวเต็มที่จะไม่แยกขาดออกจากกันเนื่องจากภายในจะประกอบด้วยพอลิเมอร์ที่มีความยาวจำกัดและยึดกันด้วยพันธะโคเวเลนต์โดยมีตัวเชื่อมต่อสายโซ่ (Crosslinker) เป็นตัวช่วยยึดระหว่างสายพอลิเมอร์ไว้จากการเปลี่ยนแปลงของสายโซ่พอลิเมอร์เมื่อเกิดการพองตัว

ปัจจัยที่มีผลต่อการพองตัวของไฮโดรเจลมีดังนี้คือ [19]

1) แรงดันออสโมติกเนื่องจากปริมาณน้ำภายในและภายนอกไฮโดรเจลมีไม่เท่ากันจึงทำให้เกิดความแตกต่างของแรงดันออสโมติกดังนั้นน้ำจากภายนอกจึงแพร่เข้าไปในช่องว่างหรือรูพรุนของไฮโดรเจลนั้นถ้าแรงดันออสโมติกแตกต่างกันมากน้ำก็จะเคลื่อนที่เข้าไปในไฮโดรเจลมากขึ้น

2) แรงกระทำระหว่างโมเลกุลน้ำกับไฮโดรเจลถ้าพอลิเมอร์นั้นมีโครงสร้างทางเคมีที่เหมาะสมสามารถเกิดอันตรกิริยากับน้ำได้มาก เช่น เมื่อเกิดพันธะไฮโดรเจนขึ้นหรือแรงดึงดูดระหว่างขั้วจะทำให้เป็นการเหนี่ยวนำโมเลกุลน้ำแพร่เข้าสู่ไฮโดรเจลได้มาก

3) ช่องว่างระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ถ้าไฮโดรเจลมีช่องว่างหรือรูพรุนระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์มากน้ำก็จะแพร่เข้าไปได้มาก

4) ความยืดหยุ่นของสายโซ่พอลิเมอร์ถ้าสายโซ่มีความยืดหยุ่นที่ดีจะเป็นการลดแรงต้าน (Resistance force) ของการแพร่ของโมเลกุลน้ำเพื่อเข้าสู่สมดุลง่ายขึ้นทำให้โมเลกุลน้ำแพร่ผ่านเข้าสู่ไฮโดรเจลได้มาก

5) ความหนาแน่นของการเชื่อมต่อระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ถ้ามีความหนาแน่นของการเชื่อมต่อมากจะเปรียบเสมือนกับการเพิ่มแรงต้านทานในการขยายตัวของไฮโดรเจลทำให้ความสามารถในการบวมตัวได้ลดลง ปริมาณน้ำร้อยละที่มีเป็นองค์ประกอบอยู่ในไฮโดรเจล (Water content, WC) สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.1) [19]

$$\% \text{ ปริมาณน้ำที่เป็นองค์ประกอบ} = \frac{\text{น้ำหนักของพอลิเมอร์ที่ดูดซับน้ำ} - \text{น้ำหนักของพอลิเมอร์ที่แห้ง}}{\text{น้ำหนักของพอลิเมอร์ที่ดูดซับน้ำ}} \times 100 \% \quad (2.1)$$

2.1.3 การนำไปใช้งาน

ไฮโดรเจล สามารถดูดซับน้ำและสารละลายไอออนได้ โดยสมบัติเชิงกลและรูปร่างไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งสมบัติดังกล่าวคล้ายคลึงกับอวัยวะบางอย่างในร่างกายคน เช่น กล้ามเนื้อ เอ็น ลำไส้เล็ก เป็นต้น นอกจากนี้ไฮโดรเจลยังมีสมบัติเข้ากันได้กับสารชีวภาพ เช่น เลือด น้ำเหลือง เนื้อเยื่อ จึงสามารถนำมาทำเลนส์สัมผัส วัสดุตกแต่งบาดแผลจากไฟไหม้ ตลอดจนใช้เคลือบวัตถุที่ต้องนำมาสัมผัสกับร่างกาย ใช้เคลือบอวัยวะเทียมที่ใช้ในร่างกาย

2.1.3.1 Hydrogel dressing

ผลที่เกิดจากอุบัติเหตุไฟไหม้หรือน้ำร้อนลวกนั้น มีความเสี่ยงสูงมากต่อการเกิดเชื้อโรคจากสิ่งแวดล้อมและการสูญเสียน้ำจากร่างกาย โดยทั่วไปแล้ว การรักษาพยาบาลแผลไฟไหม้ธรรมดาจนถึงแผลถลอกทำได้ด้วยวิธีปลูกถ่ายเนื้อเยื่อหรือการทำศัลยกรรมแต่งผิวเท่านั้น เพื่อช่วยแก้ปัญหาการสูญเสียผิวหนังและเร่งการรักษาบาดแผลให้เร็วยิ่งขึ้น โดยแผ่นผิวหนังที่ใช้อาจเป็นผิวหนังที่สมบูรณ์หรือผิวหนังที่ผ่านการเพาะเลี้ยงจากห้องปฏิบัติการเนื่องจากวิธีดังกล่าวมีข้อเสีย ผิวหนังเทียมจึงเป็นทางเลือกที่สำคัญอีกทางหนึ่งที่สามารถช่วยแก้ปัญหาโดย Hydrogel-dressing เป็นวัสดุที่มีแนวโน้มว่านำมาใช้เป็นผิวหนังเทียมปิดรักษาบาดแผลที่นิยมมากที่สุด วัสดุตกแต่งบาดแผลหรือหนังเทียมที่ใช้ชั้นสามารถแบ่งกลุ่มได้ดังนี้

กลุ่มธรรมดา (Conventional) ได้แก่ ผ้าก๊อซ (Gauze) ผ้าพันแผลที่อิมมัลด้วยซีมีนหรือน้ำมันซิลิโคน เป็นต้น

กลุ่มชีวภาพ (Biological) ได้แก่ ผิวหนังจากศพ ผิวหนังสัตว์ ฟองน้ำ และ collagen เป็นต้น

กลุ่มสังเคราะห์ (Synthesis) ได้มาจากพอลิเมอร์สังเคราะห์

วัสดุตกแต่งแผลที่ดีควรมีคุณสมบัติคือ น้ำหนักเบา มีความโปร่งใสยอมให้ก๊าซออกซิเจนแพร่ซึมเข้าไปถึงผิวหนังของบาดแผลได้ สามารถดูดซับของเหลวออกจากร่างกายได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีความยืดหยุ่นและความแข็งแรงเชิงกลสูง และใช้ง่าย สะดวก และเก็บรักษาง่าย

นอกจากนี้วัสดุตกแต่งบาดแผลต้องมีคุณสมบัติสำคัญเพิ่มเติม ได้แก่ การควบคุมความชื้นของบาดแผล วัสดุตกแต่งควรมีสมบัติในการควบคุมความชื้นของแผลให้เหมาะสม ไม่เปียกชุ่มเกินไป ด้วยน้ำเหลืองที่ออกจากแผลหรือปล่อยให้แผลแห้งจนเป็นสะเก็ด เพราะแผลที่เปียกชุ่มเกินไปจะทำให้เกิดสภาวะที่เหมาะสม สำหรับการเจริญเติบโตและขยายพันธุ์ของจุลชีพ แต่ถ้าแผลแห้งจนเป็นสะเก็ดก็จะขัดขวางการเคลื่อนที่ของเซลล์ผิวหนังที่พยายามจะเคลื่อนที่มาสमानแผลโดยกลไกธรรมชาติ ดังนั้นวัสดุที่จะนำมาใช้ปิดแผลจะต้องมีความสามารถในการดูดซับของเหลวได้ในอัตราเดียวกับการผลิตของเหลวจากแผล และสามารถให้น้ำระเหยออกจากแผลได้ ซึ่งสามารถรักษาระดับความชื้นของแผลไว้ได้ ความสามารถในการยึดติดกับแผล วัสดุที่ควรสามารถยึดเกาะกับแผลได้แบบสนิท แต่ไม่ควรแน่นเกินไปจนทำลายเนื้อเยื่อที่เกิดขึ้นใหม่เมื่อลอกวัสดุตกแต่งออกจากแผล

2.1.3.2 การนำส่งยา (Drug delivery system) [23]

ปัจจุบันมีความสนใจไฮโดรเจลในแง่การเป็นสารนำส่งยา หรือ Drug delivery system ด้วยคุณสมบัติการดูดซับของเหลวได้ดี จึงสามารถดูดซับยาเก็บไว้แล้วปลดปล่อยยาออกมาในปริมาณที่ต้องการได้

ศาสตราจารย์ ดร.Hibbing Hu ผู้เชี่ยวชาญสาขาฟิสิกส์แห่งมหาวิทยาลัย North Texas ได้ศึกษาและพัฒนาไฮโดรเจลเป็นสารนำส่งยาที่สามารถตอบสนองสภาวะต่างๆ ที่เปลี่ยนแปลงได้ เนื่องจากนาโนไฮโดรเจล สามารถดูดซับยาได้ในปริมาณมากและมีความเข้ากันได้ทางชีวภาพกับร่างกาย (Biocompatibility) และร่างกายสามารถย่อยสลายหรือกำจัดออกได้เอง

นาโนไฮโดรเจล (Nano hydrogel) คือ ไฮโดรเจลที่มีโครงสร้างขนาดรูพรุนขนาดน้อยกว่า 200 นาโนเมตร โดยขนาดรูพรุนของไฮโดรเจลมีผลต่อการปลดปล่อยยา และทำให้นาโนไฮโดรเจลมีความไวต่อสภาพแวดล้อมต่างๆ เช่น ค่าความเป็นกรดต่าง เป็นต้น บางชนิดสามารถร่อนจกรทั่งผ่านกระเพาะอาหารซึ่งมีความเป็นกรดสูง เมื่อไปยังลำไส้เล็กซึ่งมีความเป็นด่างเพิ่มขึ้นแล้วจึงทำการปล่อยยาออกมา

เพื่อป้องกันผลข้างเคียงที่ไม่พึงประสงค์จากการใช้ยา เช่น ทำให้เกิดการปวดท้อง หรือบางชนิดไวต่ออุณหภูมิ เช่น การฉีดนาโนไฮโดรเจลที่มียาเข้าสู่กระแสเลือด เมื่อร่างกายมีอุณหภูมิสูงขึ้นในกรณีที่เป็นไข้ นาโนไฮโดรเจลก็จะปลดปล่อยยาออกมา แต่เมื่ออุณหภูมิร่างกายต่ำลง นาโนไฮโดรเจลก็จะกักเก็บยาไว้ภายใน

2.1.3.3 คอนแทคเลนส์หรือเลนส์สัมผัส [24]

คอนแทคเลนส์เป็นแผ่นพลาสติกใสบางๆ ที่ผลิตขึ้นในรูปแผ่นกลมคล้ายกระทะ ทำให้มีความโค้งพอดีกับตา ตัวเลนส์ที่ใช้จะมีการหักเหของแสงเช่นเดียวกับเลนส์ที่ใช้กับแว่นตา

ชนิดของคอนแทคเลนส์

1. คอนแทคเลนส์ชนิดนิ่ม (Soft Contact Lenses) เป็นแผ่นพลาสติก นุ่ม ยืดหยุ่น และยอมให้ออกซิเจนผ่านได้ จึงทำให้รู้สึกสบายกว่าคอนแทคเลนส์ชนิดแข็ง ในปัจจุบันวัสดุที่นำมาใช้ผลิตคอนแทคเลนส์มีลักษณะเป็นซิลิโคนไฮโดรเจล (Silicone Hydrogels) เพื่อให้ดวงตาได้รับออกซิเจนมากขึ้นขณะที่ใส่

2. คอนแทคเลนส์ชนิดแข็งที่ก๊าซสามารถซึมผ่านได้ (Rigid Gas Permeable หรือ RGP Contact Lenses) สามารถใช้ได้ยาวนานกว่าและยากต่อการเกาะติดของคราบสกปรก อีกทั้งให้ภาพที่ชัดและละเอียดมากกว่า นอกจากนี้ยังมีราคาถูกกว่าเลนส์ชนิดนิ่ม แต่ไม่สะดวกสบายในการสวมใส่เท่ากับ

ชนิดนี้โดยเฉพาะในระยะเริ่มแรกของการสวมใส่คอนแทคเลนส์ชนิดแข็งอาจต้องใช้เวลาถึง 1-2 สัปดาห์เพื่อให้เกิดความคุ้นเคยในการสวมใส่

2.2 กัมธรรมชาติ (Natural gums) [25]

กัม เป็นพอลิเมอร์ประเภทคาร์โบไฮเดรต แห่่งที่พบในธรรมชาติมีทั้งส่วนต่างๆ ของพืชชนิดต่างๆ และจากจุลินทรีย์ นอกจากกัมจากธรรมชาติแล้วยังมีกัมที่ได้จากการสังเคราะห์ เช่น Methylcellulose อีกด้วย สารเหล่านี้มีความสามารถในการละลายน้ำสูง เนื่องจากมีสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) เมื่อสารเหล่านี้ละลายน้ำแล้ว จะก่อให้เกิดลักษณะชั้น เหนียว และเมื่อผ่านกระบวนการที่เหมาะสม ก็จะทำให้เกิดเจลได้

หน้าที่ของกัมในอาหาร

1. ใช้เป็นสารดูดซับน้ำ
2. ทำให้เกิดเจล
3. ใช้เป็นอิมัลซิไฟเออร์
4. ใช้เป็น encapsulation (ดักจับและรักษาสภาพ)
5. ใช้เป็นสารทดแทนไขมัน
6. ทำให้เกิดความเหนียวหนืด
7. ทำให้เกิดลักษณะแขวนลอย
8. ทำให้ฟองคงทน
9. ใช้เป็นสารช่วยผสม

กัมจากธรรมชาติมีที่มาจากหลายแหล่ง แบ่งตามแหล่งที่มาสามารถแยกได้เป็น 3 แหล่งใหญ่ๆ ดังนี้

1. กัมจากสาหร่ายทะเล (Algae Source) เช่น อะการ์ (Agar), อัลจิเนต (Alginate), คาร์ราจีแนน (Carrageenan)
2. กัมจากพืช (Botanical Source) ได้จากส่วนต่างๆของพืช เช่น
 - 2.1 Plant Extrudates เช่น กัมอาระบิก กัมคารายา
 - 2.2 เมล็ด (Seed Gums) จำพวกเมล็ดมะขาม เช่น กัวร์กัม (Guar gum), Lucust Bean Gum

2.3 เยื่อไม้ (Plant Tissue) เช่น Larch Gum, Pectin

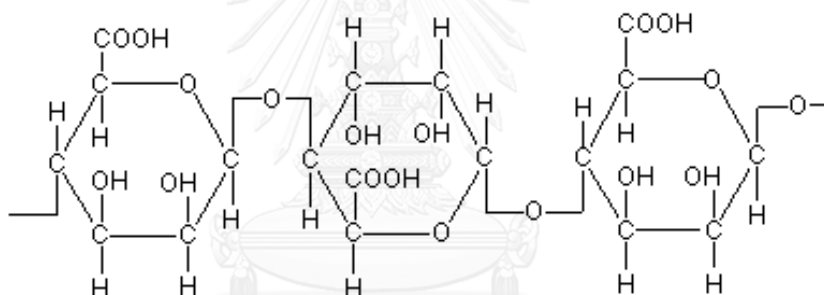
3. กัมจากสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก (Microbial Gums) เช่น แซนแทนกัม (Xanthan Gum)

2.2 1 กัมจากสาหร่าย

2.2.1.1 อัลจิเนต (Alginate) [26]

อัลจิเนตสกัดได้จากสาหร่ายสีน้ำตาล (Phaeophyceae ส่วนมากอยู่ใน *genus Laminaria*) สาหร่ายสีน้ำตาลนี้มีการนำไปใช้ประโยชน์ตั้งแต่ในสมัยโบราณ โดยชาวจีนและชาวโรมันจะใช้สาหร่ายสีน้ำตาลในการผลิตยาและเครื่องสำอางค์

อัลจิน (Algin) หรือกรดอัลจินิก (Alginic acid) ประกอบด้วยหน่วยซ้ำๆ ของ hexuronic acid 2 ชนิด คือ α -D-mannuronic acid (M) และ β -L-guluronic acid (G) โดยที่แต่ละหน่วยจะประกอบด้วยหมู่คาร์บอกซิลิก (Carboxylic) 1 หมู่แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 Alginic acid [26]

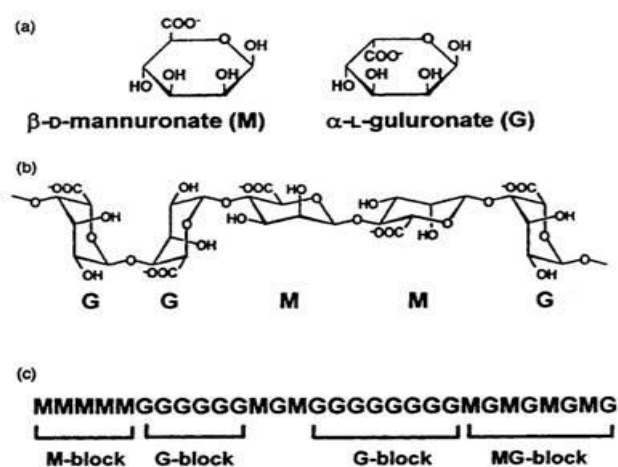
2.2.1.1.1 สมบัติทางกายภาพ

อัลจิเนตสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ High M และ High G ซึ่งสมบัติของอัลจิเนตจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ D-Mannuronate และ L-Guluronate ในสายโซ่โมเลกุลของ Alginic acid มอนอเมอร์ 2 ชนิดนี้จะต่อกันในลักษณะ 3 รูปแบบ โดยจะต่อกันเป็นช่วงๆ ช่วงละประมาณ 20 หน่วย ซึ่งจะส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่แตกต่างกันออกไปใน

โครงสร้างของอัลจิเนต (Alginate) ชนิดต่างๆ แสดงดังรูปที่ 2.6

- | | |
|----------------------------------|---------------|
| แบบที่ 1 ช่วงของ mannuronic acid | -M-M-M-M-M- |
| แบบที่ 2 ช่วงของ guluronic acid | -G-G-G-G-G- |
| แบบที่ 3 ช่วงของ M สลับกับ G | -M-G-M-G-M-G- |

นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของแคลเซียมไอออน หรือ polyvalent อื่นๆที่เข้าทำปฏิกิริยากับอัลจิเนต โดยที่อัลจิเนตชนิด High G จะให้เจลที่แข็งและเปราะกว่าชนิด High M ซึ่งจะให้เจลที่มีความแข็งแรงปานกลางถึงต่ำ แต่มีความยืดหยุ่นและคงตัวมากกว่า ส่วนความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนสูงๆจะทำให้เจลที่ได้มีความแข็งแรงขึ้น นอกจากนี้อัลจิเนตชนิด High G ยังมีความคงทนต่อความร้อนสูง ส่วนสมบัติอื่นๆของอัลจิเนตเจล ได้แก่ มีสมบัติเข้ากับร่างกายได้ดี สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ และไม่เป็นพิษ



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของอัลจิเนต (Alginate) ชนิดต่างๆ [26]

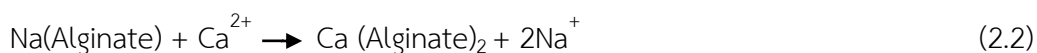
ความสามารถในการละลายและการอุ้มน้ำ (water holding capacity) ของอัลจิเนตขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ได้แก่ pH, น้ำหนักโมเลกุล, ความเข้มข้นของไอออนของตัวทำละลาย (ionic strength) และไอออนที่ปรากฏอยู่ในระบบ โดยทั่วไป อัลจิเนตสามารถดูดซับน้ำได้ดี และอาจใช้เป็นอิมัลซิไฟเออร์ที่ทำให้เกิดความหนืดเล็กน้อย

2.2.1.1.2 สมบัติทางเคมี

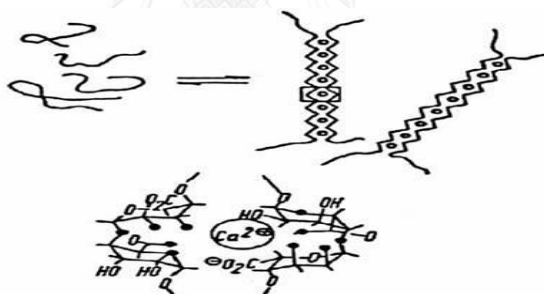
อัลจิินิกแอซิดไม่สามารถละลายได้ในน้ำ แต่เมื่ออยู่ในรูปของเกลือของโมโนวาเลนต์จะสามารถละลายน้ำได้ และสามารถเกิดปฏิกิริยาการเกิดเจล (gelation) กับพอลิวาเลนต์ แคทไอออน ยกเว้นแมกนีเซียม เช่น แคลเซียมไอออนสามารถเหนี่ยวนำให้อัลจิเนตเกิดปฏิกิริยา gelation ได้แม้ที่ความเข้มข้นสารละลายอัลจิเนตต่ำๆ (ร้อยละ 0.5-1.0) โดยเมื่อความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนต่ำจะทำให้สารละลายอัลจิเนตมีความหนืดเพิ่มขึ้น และเมื่อความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนสูงขึ้นจะทำให้สารละลายอัลจิเนตเกิดเป็นเจลได้

กลไกการเกิดปฏิกิริยา Gelation ของอัลจิเนต

เมื่อเติมแคลเซียมไอออนลงในสารละลายโซเดียมอัลจิเนตจะได้แคลเซียมอัลจิเนตที่ไม่ละลายน้ำ เนื่องจากเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างโซเดียมไอออน (Na^+) และแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) ดังสมการที่ 2.2



สมการที่ 2.1 แสดงการเกิดปฏิกิริยา ionic gelation โดยแคลเซียมไอออนเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางกับไอออน (ionic cross-linking) กับสายโซ่อัลจิเนต โดยแคลเซียมไอออนจะทำปฏิกิริยากับ guluronate residue (G-blocks) ก่อนที่จะทำปฏิกิริยากับ mannuronate residue (G-blocks) ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาจะใช้ 2 สายโซ่ของ G-blocks ซึ่งมีโครงสร้างโค้งงอและหยักเหลี่ยมในการทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไอออน โดยส่วนที่หยักลึกลงไปเป็นหลุมจะมีสมบัติของน้ำ (hydrophilic) และเป็นส่วนที่ใช่ทำปฏิกิริยา โดยแคลเซียมไอออนจะจับกับอะตอมของออกซิเจนในสายโซ่อัลจิเนต และทำให้สายโซ่อัลจิเนตถูกยึดเข้าด้วยกันอย่างแข็งแรง โดยมีแคลเซียมไอออนอยู่ตรงกลางระหว่างสายโซ่อัลจิเนต 2 สายทำหน้าที่ยึดพอลิเมอร์ 2 สายเข้าด้วยกันในลักษณะคล้ายไข่ไก่ที่เรียงอยู่ในหลุมของถาดลูกฟูก (egg-nest) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 คุณสมบัติที่ตีของอัลจิเนตคือ ทำให้เกิด Irreversible gel ในน้ำเย็นเมื่อมี Ca^{2+} รวมอยู่ด้วย



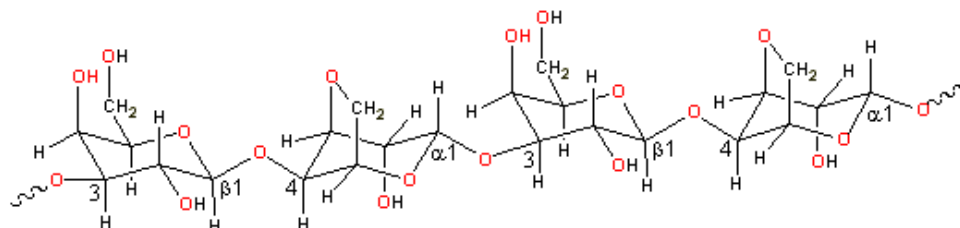
รูปที่ 2.7 การเกิดเจลของ calcium alginate (Egg-box model) [26]

อัลจิเนตถูกนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น ในอุตสาหกรรมอาหารใช้เป็นสารข้นหรือสารทำให้เกิดเจลในซูป เครื่องดื่ม ไอศกรีม และเยลลี่ ใช้เป็นสารข้นในการผลิตเครื่องสำอาง แคลเซียมอัลจิเนตใช้ทำเป็นแผ่นปิดแผลไฟไหม้ซึ่งจะช่วยให้แผลหายเร็วขึ้นและช่วยลดอาการบาดเจ็บได้ดีกว่าแผ่นปิดแผลแบบดั้งเดิมและช่วยดูดซับโมเลกุลที่เป็นพิษจากเลือด เอสเตอร์อัลจิเนตใช้เป็นสารลดแรงตึงผิวและอิมัลซิไฟเออร์

2.2.1.2 อะการ์ (Agar)

อะการ์ได้จากผนังเซลล์ของสาหร่ายสีแดง อะการ์จัดเป็นพอลิแซคคาไรด์ชนิดสายโซ่ตรง ประกอบไปด้วยหน่วยย่อยของน้ำตาลกาแลคโตส (Galactose) แสดงดังรูปที่ 2.8 ประเทศแรกที่พบคือ ญี่ปุ่น เมื่อประมาณปี ค.ศ. 1700 แต่เริ่มมีการนำมาใช้ประโยชน์เมื่อประมาณปี ค.ศ. 1900

ประเทศที่ผลิตอะการ์จากสาหร่าย ได้แก่ สเปน โมร็อกโก ชิลี สหรัฐอเมริกา ญี่ปุ่น ไต้หวัน เกาหลีใต้ และโปรตุเกส



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของอะการ์ [25]

อะการ์มีองค์ประกอบของพอลิแซคคาไรด์ 2 ประเภทหลัก คือ อะกาโรส (Agarose) และอะกาโรเปคติน (Agarpectin) ซึ่งทั้งอะกาโรสและอะกาโรเปคตินนี้เป็นพอลิแซคคาไรด์ที่มีโครงสร้างหลักเป็นหน่วยย่อยของน้ำตาลกาแลคโตส

อะกาโรส มีโครงสร้างเป็นพอลิเมอร์ร่วมระหว่าง 1,3 linked β -D-galactopyranose และ 1,4 linked 3,6-anhydro- α -L-galactopyranose เรียงสลับกันไปทีละตำแหน่ง 1,3 linked สายโซ่สามารถถูกตัดได้ด้วยกรด แต่ที่ตำแหน่ง 1,4 linked สายโซ่จะต้องตัดโดยใช้เอนไซม์

อะกาโรเปคติน เป็นพอลิแซคคาไรด์ซัลเฟต มีโครงสร้างทางเคมีคล้ายกับอะกาโรส คือ มีหน่วยซ้ำของ β -D-galactopyranose และมีโครงสร้างเหมือนอะกาโรส แต่ 3,6-anhydro- α -L-galactopyranose บางโมเลกุลถูกแทนที่ด้วยซัลเฟตประมาณ 5-8%

อะการ์ที่มีขายอยู่ในท้องตลาดจะอยู่ในรูปที่เป็นผง เกล็ด รวมทั้งเป็นแผ่น มีสีขาวขุ่นสามารถละลายได้ในน้ำเย็นและละลายได้ดีในน้ำเดือด อะการ์ยังสามารถเกิดเป็นเจลได้ด้วยเมื่อมีความเข้มข้นของเนื้ออะการ์มากกว่า 0.5% ที่อุณหภูมิ 30-40 °C และจะละลายเมื่อมีอุณหภูมิประมาณ 75-90 °C การเกิดเจลแบบนี้เรียกว่า physical gels โดยเมื่อโมเลกุลของอะกาโรสละลายอยู่ในน้ำจะมีลักษณะเป็นแรนดอมคอยล์ (random coil) แสดงดังรูปที่ 2.9 และเมื่ออุณหภูมิลดลงใกล้อุณหภูมิจึงเกิดเจลจะเกิดการจับกันของสายโซ่พอลิเมอร์เป็นแบบ B1 (Antisymmetric double helices) ได้โครงสร้างเป็นแบบ C, D (ส่วนบน) หรือ จับกันแบบ B2 (Symmetric double helices) ได้โครงสร้าง C, D (ส่วนล่าง) การที่จะเกิดเจลรูปแบบใดนั้นขึ้นอยู่กับความเร็วในการลดลงของอุณหภูมิ ถ้าอุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็วจะได้โครงสร้างเป็นแบบรูป B1 และ C, D (ส่วนบน) เจลที่ได้สามารถเกิดการผันกลับทางความร้อนได้ เรียกว่า เทอร์โมรีเวอซิเบิลเจล (Thermo-reversible gel) อะการ์สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลายอาทิเช่น ในอุตสาหกรรมอาหารใช้เป็นสารเพิ่มความข้นของซอสหรือน้ำซุบในอุตสาหกรรมกระดาษ (Paper Sizing) ในทางเภสัชศาสตร์ใช้ช่วยให้ตัวยาถูกปล่อยออกมาช้าลง

(Slow release ingredient) เพราะ อนุภาคไม่สามารถย่อยในร่างกายมนุษย์ได้เนื่องจากไม่มีเอนไซม์ที่ใช้ในการย่อยและใช้เป็น tissue culture media ในการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ



รูปที่ 2.9 กลไกการเกิดเจลของอะการ์ [25]

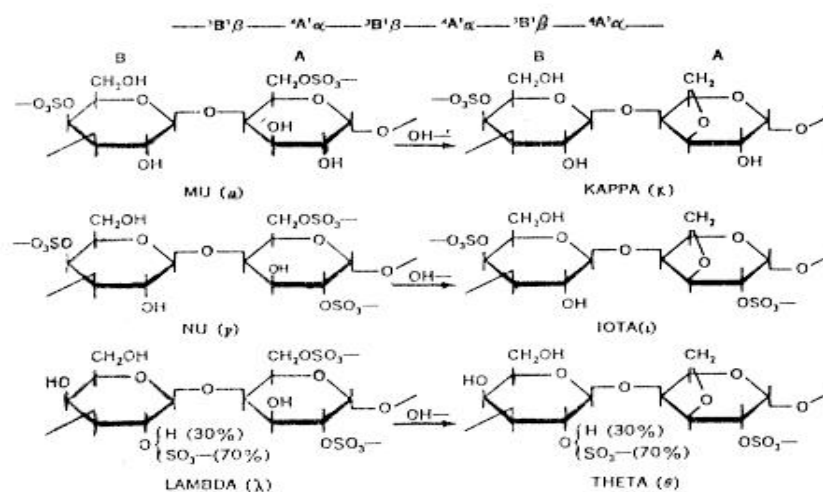
2.2.1.3 คาร์ราจีแนน (Carrageenan)

คาร์ราจีแนนสกัดจากสาหร่ายสีแดงเช่นเดียวกับอะการ์ แต่เป็นสาหร่ายสีแดงที่อยู่ใน genus *Gigartina*, *Chondrus*, *Eucheuma*, และ *Hyphea*

คาร์ราจีแนนเป็นพอลิเมอร์ของกาแลคโตสที่มีซัลเฟตประกอบอยู่ โครงสร้างของคาร์ราจีแนนมีหลายส่วน สายหลักของคาร์ราจีแนนประกอบด้วย D-galactose ต่อกันด้วยพันธะ L (1→3) สลับกับ α (1→4) คาร์ราจีแนนส่วนอื่น จะต่างจากสายหลักตรงที่จำนวนและตำแหน่งของหมู่ซัลเฟต และการปรากฏของ 3,6-anhydro bridge ซึ่งจะทำให้ส่วนนี้มีโครงสร้างคล้าย agarose แต่ต่างจาก agarose ตรงที่ agarose เป็น L-3,6-anhydro- α -galactopyranose และไม่มีหมู่ซัลเฟต ส่วนในคาร์ราจีแนน จะเป็น D-3,6-anhydro- α -galactopyranose

ประเภทของคาร์ราจีแนน ได้แก่ κ (kappa), ι (iota) และ λ (lambda) แสดงดัง รูปที่ 2.10 คาร์ราจีแนนประเภท κ -carrageenans และ ι -carrageenans ประกอบด้วย (1→3) β -D-galactose 4-sulfate และ (1→4) 3,6-anhydro-galactose โดยที่ ι -carrageenan จะมีหมู่ซัลเฟตมากกว่า κ -carrageenans 1 หมู่ต่อ 2 หน่วยซ้ำ κ -carrageenans ก่อให้เกิดเจลแข็งเปราะ ส่วนเจลจาก ι -carrageenans จะอ่อน และยืดหยุ่น λ -carrageenan นั้นจะไม่ทำให้เกิดเจล แต่จะจับกับโปรตีนได้ดีแสดงดังรูปที่ 2.11 เพราะฉะนั้นจึงนิยมใช้เป็น stabilizer ในผลิตภัณฑ์นม สมบัติของเจลจากคาร์ราจีแนนประเภทต่างๆ แสดงในตารางที่ 2.1

คาร์ราจีแนนใช้เป็นสารทำให้ข้น (ขึ้นอยู่กับ pH) สารทำให้เกิดเจลใส (ต้องมีเกลือบางชนิดอยู่ด้วย เช่น K^+ , Ca^{2+} , Ba^{2+}) หรือใช้ผสมกับกัมชนิดอื่น เช่น locust bean gum



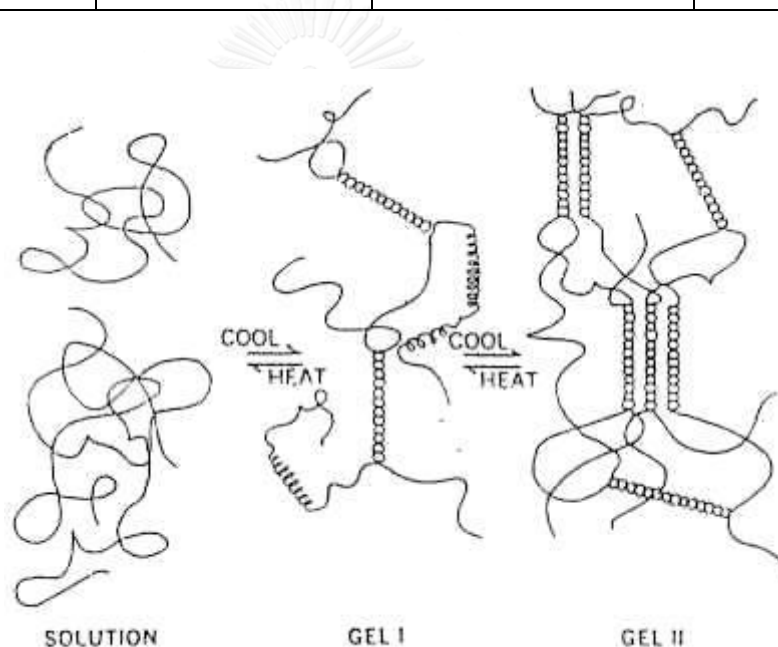
รูปที่ 2.10 ชนิดของ carrageenan [25]

ตารางที่ 2.1 ลักษณะและสมบัติของคาร์ราจีแนนแต่ละชนิด

Properties	Kappa	Iota	Lambda
Charge	1 charges [-] for 2 galactoses (strong gelling agent)	2 charges [-] for 2 galactoses (weak gelling agent)	3 charges [-] for 2 galactoses (no ability to gel)
การละลาย			
-ในน้ำที่ T = 80 °C	ละลายได้	ละลายได้	ละลายได้
-ในน้ำที่ T = 20 °C	Na ⁺ salt ละลายได้ K ⁺ , Ca ²⁺ , NH ₄ ⁺ salts บวมน้ำ	Na ⁺ salt ละลายได้ Ca ²⁺ salts บวมน้ำและกระจายตัวในน้ำ	ละลายได้
การเกิด Gel			
-Gel แข็งที่สุด	กับ K ⁺ ion	กับ Ca ⁺ ion	ไม่เกิด Gel
-Gel Texture	เปราะแตกได้	elastic	
-Syneresis	คายน้ำได้	ไม่คายน้ำ	Non-gelling
-Freeze/Thaw stability	ไม่คงตัว	คงตัว	

ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

Properties	Kappa	Iota	Lambda
Effect of cations	Gels most strongly with potassium ions	Gels most strongly with calcium ions	Non-gelling
Type of gel	Strong and brittle with syneresis	Elastic and cohesive without syneresis	Non-gelling
Synergistic effect with locust bean gum	High	High	None



รูปที่ 2.11 กลไกการเกิดเจลของ Carrageenan [25]

2.2.2.4 เฟอเซลลาแรน (Furcellaran)

เฟอเซลลาแรนหรือที่เรียกกันว่า Danish agar เป็นพอลิแซคคาไรด์ซัลเฟตชนิดหนึ่งที่สามารถสกัดได้จากสาหร่ายสีแดง (*Furcellaria fastigiata*) ซึ่งพบมากในประเทศเดนมาร์ก โครงสร้างประกอบด้วย D-galactose-2-sulfate, D-galactose-4-sulfate, D-galactose-4-sulfate ประมาณ 16-20% และ 3,6-anhydro-D-galactose-2-sulfate ประมาณ 30-33% ลักษณะโมเลกุลจะเป็นแบบมีกิ่งก้านแขนง (branch) ที่ตำแหน่ง C3 และ C6 เฟอเซลลาแรน มีโครงสร้างคล้ายคาร์ราจีแนนแต่แตกต่างกันที่ปริมาณซัลเฟตคือ furcellaran มี 1 sulfate group ต่อ 3-4

monomer ของ galactose ส่วนคาร์ราจีแนน ชนิด kappa มี 1 sulfate group ต่อ 2 monomer ของ galactose

เฟอเซลลาแรนสามารถนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหารได้หลายประเภท ได้แก่ นำมาเติมในน้ำนมสำหรับทำ pudding เพื่อทำให้เกิดเจลได้ดี สามารถนำไปใช้ทำแยมผิวส้ม (Marmalade) ได้ดีกว่า เพคตินเพราะเกิดเจลได้เร็วแม้จะมีปริมาณน้ำตาลต่ำกว่า 50-60% และยังใช้ปริมาณเฟอเซลลาแรนเพียง 0.2-0.5% เพื่อให้เกิดเจล และใช้เติมในเบียร์เพื่อตกตะกอนโปรตีนทำให้เบียร์ใสขึ้น

2.2.2 กัมจากพืช (Botanical Sources)

กัมประเภทนี้เป็นกัมที่ได้จากส่วนต่างๆ ของพืช แบ่งได้ดังนี้

Plant Extrudate เช่น Gum Arabic, Gum Karaya

Plant seed gums เช่น Guar Gum, Lucust Bean Gum

Plant Tissue Gum เช่น Pectin

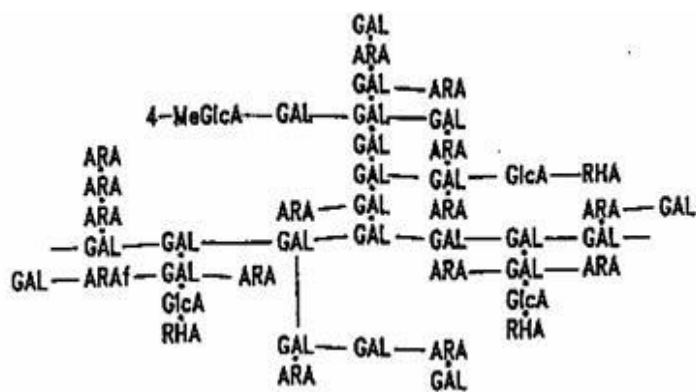
2.2.2.1 Plant Extrudate

2.2.2.1.1 กัมอะราบิก (Gum Arabic)

กัมอะราบิก (*Gum Arabic*) หรือกัมอะคาเซีย (*Gum Acacia*) ได้มาจากน้ำยางที่ไหลออกจากลำต้นของต้นไม้ชื่อ *Acacia Senegal* และ *Acacia seyal* กัมอะราบิกมีน้ำหนักโมเลกุลระหว่าง 25,000–75,000 โครงสร้างโมเลกุลของกัมอะราบิกเป็น heteropolysaccharide ที่มีโมเลกุลใหญ่และซับซ้อน ประกอบด้วยน้ำตาลและอนุพันธ์ของน้ำตาล 4 ชนิดคือ น้ำตาลกาแลคโตส (Galactose, 44%), แอราบินอส (Arabinose, 27%), แรมโนส (L-rhamnose, 13%), กรดกลูคูโรนิก (Glucuronic acid, 14.5%) นอกจากนี้โมเลกุลยังประกอบด้วย amino acid ได้แก่ hydroxyproline และ serine แสดงดังรูปที่ 2.12

กัมอะราบิกละลายได้ในน้ำและให้สารละลายใสที่มีสีตั้งแต่เหลืองอ่อนจนถึงน้ำตาลส้ม แต่กัมที่ได้จาก *Acacia Senegal* มีโครงสร้างที่เป็นกิ่งแขนงมากและโมเลกุลอัดกันแน่น จึงทำตัวสารละลายที่ข้นหนืดที่ความเข้มข้นสูง สามารถละลายได้ที่ความเข้มข้นสูงถึง 55% และสารละลายที่ได้มีความหนืดต่ำ จึงทำให้กัมอะราบิกมีสมบัติที่แตกต่างจากไฮโดรคอลลอยด์ชนิดอื่นซึ่งสามารถละลายได้สูงสุดเพียง 5% เท่านั้นเนื่องจากสารละลายที่ได้มีความหนืดสูง กัมอะราบิกถูกนำมาใช้มากที่สุดในกลุ่มของไฮโดรคอลลอยด์ที่ได้จากพืช เพราะละลายได้ดีในน้ำและทนต่อค่า pH

กัมอะราบิกมีราคาค่อนข้างแพง แต่มีประโยชน์ในการใช้เป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ สารเพิ่มเนื้อสัมผัส สารทำให้เกิดฟิล์ม สารหุ้มกลิ่น (Encapsulated flavours) ใช้ในการยับยั้งการตกผลึกน้ำตาล คุณภาพดีจะไม่มีสีและรสเมื่อละลายน้ำ ส่วนกัมอะราบิกที่มีคุณภาพต่ำนั้นจะมีกลิ่นไม่ดี สีเข้ม เนื่องจากมีแทนนินปนอยู่

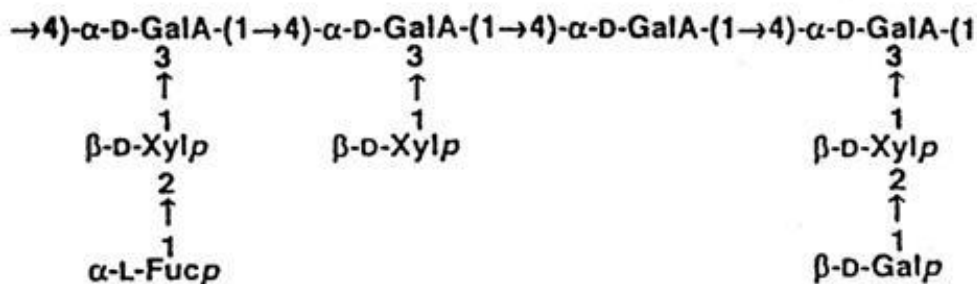


รูปที่ 2.12 โครงสร้างโมเลกุลของ Gum Arabic [25]

GAL = Galactose ARA = Arabinose
 GlcA = Glucuronic acid RHA = Rhamnose
 4-MeGlcA = 4-O-methylglucuronic acid

2.2.2.1.2 กัมทรากาคานท์ (Gum tragacanth)

น้ำยางชนิดนี้ได้จากพืชเขตร้อนแห่งในแถบเมดิเตอร์เรเนียนตะวันออก และเอเชียตะวันตกเฉียงใต้ พืชชนิดนี้อยู่ใน genus *Astragalus* ประเทศที่ผลิตกัมทรากาคานท์มาก คือ ประเทศอิหร่าน กัมทรากาคานท์เป็นพอลิเมอร์ของ galacturonic acid, galactose, arabinose และ xylose โครงสร้างโมเลกุลจะมีส่วนประกอบหลัก 2 ส่วน ส่วนแรกคือ bassorine (70%) ซึ่งเป็นส่วนที่เกิดการพองตัว แต่ไม่ละลายน้ำ ส่วนที่สองคือ tragacanth (30%) เป็นส่วนที่ละลายได้ในน้ำเย็นแสดงดังรูปที่ 2.13 เมื่อละลายน้ำจะให้ความหนืดสูง (ความหนืดขึ้นอยู่กับคุณภาพของกัม) ถ้าสารละลายมีความเข้มข้นสูงมาก จะได้สารเหนียวข้นคล้ายแป้งเปียก แต่ถ้าเจือจางโดยการเติมน้ำ จะได้สารละลายที่ จะแยกชั้นระหว่าง tragacanth (ด้านบน) กับ bassorine (ด้านล่าง) ภายใน 1-2 วัน สารละลายมีความเป็นกรด (pH 5-6) และมีความทนต่อกรด แม้กระทั่งที่ pH 2 กัมชนิดนี้มีราคาค่อนข้างแพง

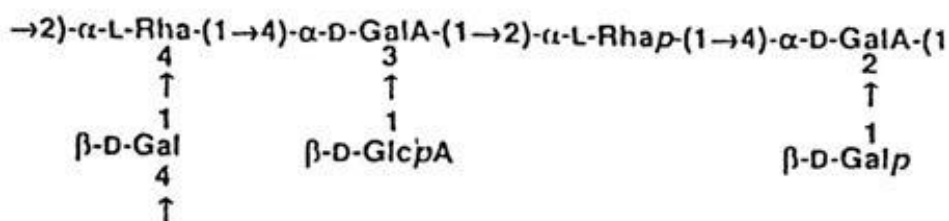


รูปที่ 2.13 Partial structure of tragacanthic acid [25]

2.2.2.1.3 กัมคารายา (Gum karaya)

เป็นน้ำยางที่ได้จากเปลือกไม้ของต้น *Sterculiaurens* ซึ่งพบในคาบสมุทรอินเดีย กัมชนิดนี้มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เป็นพอลิแซคคาไรด์ที่มีกิ่งก้าน ประกอบด้วย uronic acid 37% และหมู่ acetyl 8% และอยู่ในรูปของเกลือ Ca หรือ Mg มีโซ่ตรงกลางประกอบด้วย D-galactose, L-rhamnose, และ D-galacturonic acid มี side chain ประกอบไปด้วย D-glucuronic acid แสดงดังรูปที่ 2.14

กัมคารายาละลายน้ำได้ แต่จะละลายน้ำได้น้อยกว่ากัมจากพืชชั้นสูงชนิดอื่นๆ เมื่อถูกน้ำจะดูดซับน้ำและพองตัว ขยายขนาดขึ้นมากกว่าเดิมหลายเท่า ในสารละลายเจือจาง ความหนืดจะเพิ่มขึ้นในลักษณะเป็นเส้นตรงเมื่อความเข้มข้นเพิ่มจนถึง 0.5% ที่ความเข้มข้นมากกว่า 2–3% จะได้แบ่งเป็ยลักษณะคล้ายเจลที่ถูกทำให้แผ่กระจายออกได้ (Spreadable) การให้ความร้อนภายใต้ความดันจะทำให้ได้สารละลายเนื้อเดียว แม้กระทั่งที่ความเข้มข้นสูงถึง 18–20% แต่จะทำให้ความหนืดลดลงอย่างถาวร สารละลาย 1% จะมี pH 4.6 สารอิเล็กโทรไลต์ เช่น โซเดียม แคลเซียม หรืออะลูมิเนียมคลอไรด์ และสภาพกรดหรือด่างมากเกินไป จะทำให้ความหนืดลดลง กัมชนิดนี้ถูกนำมาใช้แทนกัมทรากาคานท์เพราะมีราคาถูก

รูปที่ 2.14 Structure of gum karaya (*Sterculiaurens*)

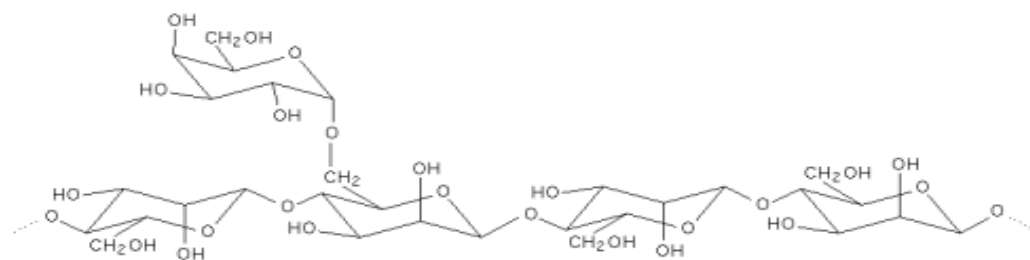
กัมคารายาเป็นสารเพิ่มความคงตัวให้กับ whipping cream และ meringues เนื่องจากมีสมบัติในการอุ้มน้ำที่ดี ใช้เป็น emulsifier ในผลิตภัณฑ์น้ำสลัดต่างๆ เช่น salad dressing และ French dressing นอกจากนี้ยังใช้ในผลิตภัณฑ์ไอศกรีม เช่น sherbets หรือ fruit ice จะช่วยป้องกันไม่ให้เกิดผลึกน้ำแข็งที่ใหญ่เกินไปและป้องกันการ

สูญเสียน้ำเนื่องจากเกิด syneresis ในผลิตภัณฑ์เนื้อมัด เช่น bologna จะใช้กัมคารายาเป็นตัวช่วยอุ้มน้ำ ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะเนื้อเนียน และยังใช้ในอุตสาหกรรมผลิต cheese spread ด้วยเพื่อให้เนยแข็งที่ได้มีความสามารถในการแผ่กระจาย (spreadability) ที่ดี นอกจากนี้ยังนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอื่นๆ เช่น อุตสาหกรรมยา ได้แก่ เป็น adhesive สำหรับ stoma seal หลังจากผ่าตัด หรือเป็น dental- fixatives อุตสาหกรรมกระดาษเช่น ใช้เป็นตัวผสม (binder) เพื่อให้ช่วยในการผสมของเส้นใยใน lightweight paper อุตสาหกรรมสิ่งทอเช่น ใช้เป็นสารเพิ่มความหนืด (thickener) ในสีย้อมผ้าพิมพ์

2.2.2.2 Plant Seed Gums

2.2.2.2.1 โลคัสบีนกัม (Locust bean gum)

โลคัสบีนกัมสกัดจากเอนโดสเปิร์มของเมล็ดของต้นคารอบ (*Ceratonia siliqua*) โครงสร้างโมเลกุลจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วงสลับกัน คือ ส่วนที่เป็นแมนโนสต่อกับส่วนที่เป็น galactomannan (D-mannose) กับ galactose ซึ่งแทรกอยู่ทุกๆ แมนโนส 4 หน่วย แสดงดังรูปที่ 2.15



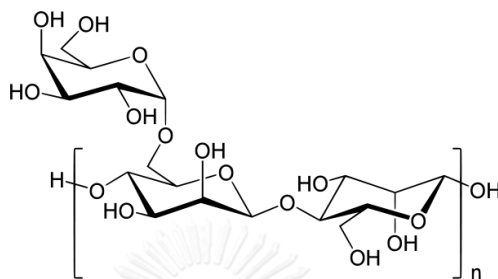
รูปที่ 2.15 โครงสร้างของโลคัสบีนกัม (Locust bean gum)

โมเลกุลของกัมชนิดนี้มีน้ำหนักโมเลกุล 30,000–330,000 โมเลกุลมีสภาพเป็นกลาง ดังนั้น pH และไอออนต่างๆ จะไม่มีผลกระทบต่อสมบัติของกัมชนิดนี้ โลคัสบีนกัมไม่ละลายในน้ำเย็น แต่จะเกิดการ hydration อย่างสมบูรณ์ถ้าให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 10 นาที สารละลายของกัมนี้จะเป็นสีขาวขุ่นและเหนียว

2.2.2.2.2 กัวร์กัม (Guar gum)

กัวร์กัมสกัดจากเอนโดสเปิร์มของเมล็ดจากต้น *Cyamopsis tetragonoloba* ซึ่งเป็นพืชตระกูลถั่วที่ปลูกมากในอินเดียและปากีสถาน กัมชนิดนี้ไม่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ (organic solvent) แต่ละลายได้ในน้ำเย็นและดูดน้ำได้ง่าย ทำให้เกิดสารละลายที่มีความหนืดสูง แม้จะมีความเข้มข้นของกัมต่ำ กัวร์กัมมีสมบัติเป็น non-gelling แต่กระจายตัวและอุ้มน้ำได้ดีในน้ำเย็น จึงใช้ทำหน้าที่หลักเป็นสารเพิ่มความหนืด เพิ่มความคงตัวและอุ้มน้ำสามารถเกิดอันตรกิริยา (interaction) กับแซนแทนกัม

ทำให้สารละลายมีความหนืดเพิ่มขึ้น ความหนืดของสารละลายกัวร์กัมขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ pH เวลา ความเข้มข้น และขนาดของอนุภาคกัวร์กัมเป็นอินทรีย์สารชนิดไม่แตกตัว (non-ionic) และทนต่อ pH ช่วงกว้างตั้งแต่ 4-10 ทำให้สามารถเติมอิเล็กโทรไลต์ได้เป็นจำนวนมาก แต่ถ้ามีความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์สูงกว่า 5% จะมีผลต่อการอุ้มน้ำและเกิดเจลกัวร์กัมมีความสามารถในการอุ้มน้ำได้สูงสุดที่ pH 7.5-9.0 โครงสร้างของกัวร์กัมแสดงดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 โครงสร้างของกัวร์กัม

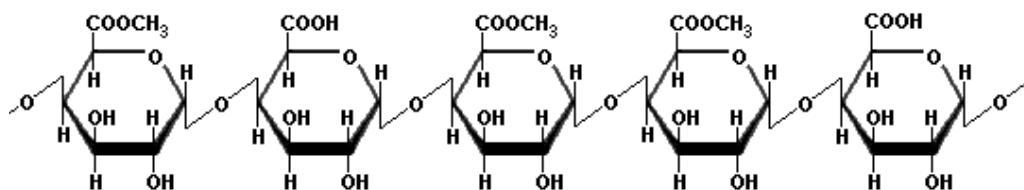
2.2.2.3 Plant Tissue Gums

กัมที่ได้จากเนื้อเยื่อพืชที่สำคัญคือ เพคติน (Pectin) สกัดได้จากผลไม้ตระกูลส้มและยังพบว่าเป็นส่วนประกอบในเนื้อผลไม้บางชนิด เช่น แอปเปิล ฝรั่ง เป็นต้น

2.2.2.3.1 เพคติน (Pectin)

เพคติน (Pectin) มีลักษณะเป็นผงสีขาวถึงน้ำตาลอ่อน น้ำหนักโมเลกุลสูง ได้จากการตัดสายโซ่ของ Protopectin ที่อยู่ที่ผนังเซลล์ของเนื้อเยื่อของต้นไม้ (Plant tissue) ประกอบด้วยกลุ่มของพอลิแซ็กคาไรด์ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็น Polygalacturonic acid ที่หมู่กรดบางส่วนถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของเมทิลเอสเทอร์ (Partially methylated) การสกัดแยกเพคตินเกิดขึ้นเมื่อปี ค.ศ.1825 โดย Henri Braconnot เมื่อผสมเพคตินกับน้ำจะได้สารละลายที่มีความหนืดและมีเสถียรภาพซึ่งจะเกิดเป็นเจลขึ้น

เพคตินเป็น Heteropolysaccharide ที่มีสายโซ่ตรงของ α -(1-4)-linked D-galacturonic acid (ประมาณ 65% โดยน้ำหนัก) แสดงดังรูปที่ 2.17 เป็นสายหลักที่เรียกว่า Smooth Regions และมีกิ่งแขนงหรือ Hair Regions เป็นอะราบิโนส กาแลคโตส หรือแรมโนส บางส่วนของหมู่คาร์บอกซิล (-COOH) ที่ D-galacturonic acid จะเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน (Esterification) กับหมู่เมทิล (-CH₃) เป็นเมทิลเอสเทอร์และมี Degree of Methylation (DM) แตกต่างกัน ซึ่ง DM คืออัตราส่วนของหมู่ methylated galacturonic acid ต่อหมู่ galacturonic acid ทั้งหมดที่มีอยู่ในโมเลกุลของเพคติน ดังนั้นวัตถุดิบแต่ละแหล่งจะได้เพคตินที่มีโครงสร้างต่างกันและซับซ้อนมากเพราะมีค่า DM ที่ต่างกันนั่นเอง



รูปที่ 2. 17 โครงสร้างของเพคติน [23]

ชนิดของเพคตินสามารถแบ่งออกตามค่า DM ได้เป็น 2 ชนิด คือ

เพคตินชนิดเมทอกซีต่ำ (Low methoxy pectin, LM) มีค่า DM น้อยกว่า 50% สามารถเกิดเจลโดยมีปริมาณของ Ca^{2+} สามารถละลายได้ที่ pH ช่วงกว้างตั้งแต่ 2.9-5.5 เจลที่ได้เป็นชนิดที่สามารถผันกลับได้ทางความร้อน (Thermoreversible) ลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลจะมีความอ่อนนุ่มและยืดหยุ่นมากกว่าเจลที่ได้จากเพคตินชนิด HM หรืออะการ์

เพคตินชนิดเมทอกซีสูง (High methoxy pectin, HM) มีค่า DM มากกว่า 50% ใช้กับอาหารที่มี pH 2.0-3.5 เพคตินชนิดนี้ยังแบ่งย่อยออกเป็นอีก 3 ชนิด ตามเวลาที่ใช้ในการเกิดเจล (Gelling time) คือ เกิดเจลได้ช้า (Slow set) ปานกลาง (Medium set) และรวดเร็ว (Rapid set) ซึ่งจะแตกต่างกันที่ค่า DM เช่น ชนิดที่เกิดเจลได้ช้าจะมีค่า DM ประมาณ 60% และชนิดที่เกิดเจลได้เร็วมีค่า DM ประมาณ 75%

เพคตินที่สกัดได้จากธรรมชาติจะเป็นชนิด HM ที่มีค่า DM สูงถึง 75% เมื่อนำมาทำให้เกิดปฏิกิริยา De-esterification จะได้เพคตินชนิด LM เพคตินทั้งชนิด LM และ HM จะมีสมบัติและการนำไปใช้ประโยชน์ที่แตกต่างกัน การนำเพคตินมาใช้ประโยชน์ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์และชนิดของผลิตภัณฑ์อาหาร เพคตินนิยมใช้ในอาหารประเภท Jam, Jelly, Bakery filling, fruit topping, เครื่องดื่ม และผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเนื้อคล้ายเยลลี่ เช่น การเติมเพคตินชนิด LM จำนวนเล็กน้อยลงในโยเกิร์ตจะช่วยให้ปรับปรุงลักษณะเนื้อของโยเกิร์ตให้ดีขึ้น สำหรับน้ำผลไม้เข้มข้นจะเติมเพคตินชนิด HM เพื่อช่วยเพิ่มความคงตัวให้กับอนุภาคของเนื้อผลไม้ ทำให้อนุภาคกระจายตัวแขวนลอยอยู่ได้โดยไม่ตกตะกอน ในน้ำผลไม้ผงสำเร็จรูปจะมีการเติมเพคตินชนิด HM ลงไปเพื่อให้เกิดความรู้สึกเหมือนน้ำผลไม้ธรรมชาติขณะดื่ม ในผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ เช่น แยมที่นำมาเติมในทาร์ตจะให้ลักษณะผิวเรียบเป็นเงาหลังจากอบแล้วและทนต่อการอบ

2.2.3 Microbial Gum

2.2.3.1 แขนแทนกัม (Xanthan gum)

แขนแทนกัมเป็นพอลิแซคคาไรด์ชนิดหนึ่งที่สามารถนำมาใช้เป็นสารเติมแต่งในอาหาร และเป็นสารที่ช่วยปรับปรุงสมบัติการไหลได้ เป็นกัมที่ได้จากการหมักด้วยน้ำตาลกลูโคสหรือซูโคส ด้วยเชื้อแบคทีเรียบริสุทธี คือ *Xanthomonas Campestris* หลังจากกระบวนการหมักแล้วจะนำมาตกตะกอนด้วยไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์แยกเอาแขนแทนกัมออกมาทำให้แห้งแล้วบดให้ละเอียด

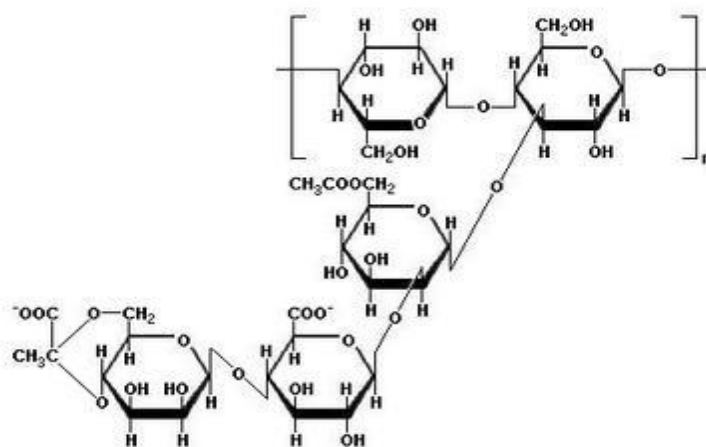
แขนแทนกัมเป็นเฮเทอโรพอลิแซ็กคาไรด์ (Heteropolysaccharide) ที่ประกอบด้วย glucose, mannose และ glucuronic acid ในอัตราส่วน 2.8:3:2 มีหมู่อะซิติลประมาณ 4.7% และกรดไพรูวิก (Pyruvic acid) ประมาณ 3% โครงสร้างทางเคมีของแขนแทนกัมนี้มีสายโซ่หลักเป็นกลูโคส ซึ่งเชื่อมต่อกันที่ตำแหน่ง 1,4 β -D-glucose โดยมีสายโซ่ข้างเคียงต่ออยู่ที่ตำแหน่งที่ 1,3 เป็นไตรแซคคาไรด์ที่ประกอบด้วย α -D-mannose ซึ่งมีหมู่อะซิติลในโครงสร้างที่ตำแหน่งที่ 6, β -D-glucuronic และ terminal β -D-mannose แสดงดังรูปที่ 2.18

แขนแทนกัมละลายได้ทั้งในน้ำเย็นและน้ำร้อน สารละลายของแขนแทนกัมที่มีสารที่มีสมบัตินำไฟฟ้า (Electrolyte) ผสมอยู่เล็กน้อยจะมีสมบัติในการรักษาเสถียรภาพทางความร้อน (Thermal Stability) ที่ดีมากและมีความหนืดคงที่ในช่วงอุณหภูมิ -18°C ถึง 80°C และความหนืดคงที่ในช่วง pH 1-11 นอกจากนั้นสารละลายแขนแทนกัมยังมีคุณสมบัติเป็นซูโดพลาสติก (Pseudoplastic) คือ ความหนืดของสารละลายจะลดลงเมื่อมีแรงเฉือนเพิ่มขึ้นซึ่งมีประโยชน์ต่อการใช้งานในอุตสาหกรรมอาหาร แขนแทนกัมนำไปใช้ประโยชน์ในหลากหลายอุตสาหกรรม โดยหลักๆ ทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความหนืด เพิ่มความคงตัว และทำให้อนุภาคแขวนลอยได้ดี เช่น

ในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น ช่วยให้อนุภาคต่างๆ แขวนลอยได้ดีและช่วยให้เกิดเป็นครีม ซึ่งส่วนใหญ่พบได้ในน้ำสลัดและซอส รวมทั้งไอศกรีม นอกจากนี้ยังนำไปใช้ในอาหารแช่แข็งและเครื่องดื่มด้วย

นำแขนแทนกัมไปใส่ในยาสีฟันเพื่อใช้เป็นตัวผสม (Binder) ช่วยให้ไม่เสียรูป

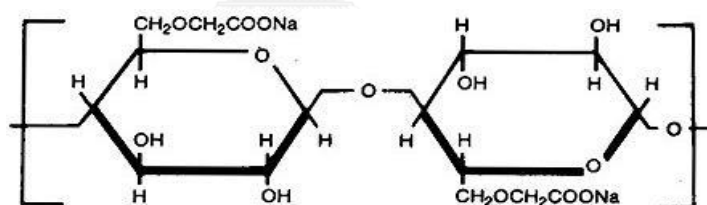
ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอางค์ การเติมแขนแทนกัมช่วยให้หยदन้ำมันสามารถคงตัวอยู่ในระบบอิมัลชันแบบน้ำมันในน้ำได้ ในอุตสาหกรรมขุดเจาะน้ำมัน ใช้แขนแทนกัมในปริมาณมากเพื่อใช้เป็น thicken drilling fluids ซึ่งช่วยให้น้ำของแข็งที่เจาะได้กลับขึ้นมาที่พื้นผิวได้ง่ายขึ้น ในงานก่อสร้าง ใช้แขนแทนกัมผสมกับคอนกรีตที่จะเทได้น้ำเพื่อให้คอนกรีตมีความหนืดสูงขึ้นและป้องกันการกัดเซาะ



รูปที่ 2.18 โครงสร้างโมเลกุลของแชนแทนกัม [22]

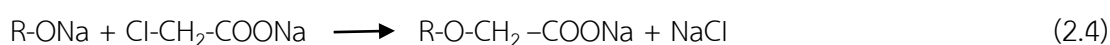
2.3 คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส [27]

คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสหรือซีเอ็มซี (carboxymethyl cellulose, CMC) คือพอลิเมอร์ ชนิดชอบน้ำ (hydrophilic) ที่เป็นคาร์โบไฮเดรตซึ่งเป็นอนุพันธ์ของเซลลูโลส เกิดจากการแปรหรือปรับปรุงคุณสมบัติของเซลลูโลสโดยการแทนที่โครงสร้างเดิมด้วยหมู่เมทิลและหมู่คาร์บอกซีเมทิล ซึ่งมีโครงสร้างโมเลกุลดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 โครงสร้างของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสได้จากการดัดแปลง (modify) โมเลกุลของเซลลูโลสโดยการควบคุมจำนวน sodium carboxymethyl groups ($\text{NaOOC-CH}_2\text{-}$) เข้าไปในโมเลกุลของเซลลูโลส เกือบโซเดียมของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสใช้ในทางการค้า โดยมีชื่อเรียกต่างๆ ไปว่า CMC หรือ คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ดังสมการที่ 2.3 และ 2.4



คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น ในอุตสาหกรรมยา สี กาว สิ่งทอ กระดาษ เซรามิก อาหารและยา เนื่องจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีลักษณะเป็น

ของแข็งสีขาวไม่มีกลิ่น ไม่มีรส ไม่เป็นอันตราย ไม่มีผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม คุณสมบัติในการดูดซับน้ำได้ดี ละลายน้ำได้ดี เป็นสารเพิ่มความหนืดที่ช่วยในการยึดเกาะ เป็นสารคงสภาพ และลดแรงตึงผิวของสารละลาย จึงได้มีการนำเอาคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมาใช้เป็นส่วนประกอบในสารซักฟอกด้วยใช้เป็นสารให้ความหนืดในไอศกรีม ใช้เป็นสารเคลือบผิวแคปซูลยาหรือเป็นสารก่อให้เกิดการเป็นเจลทางด้านเภสัชกรรม เป็นต้น

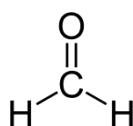
2.4 ระบบเชื่อมขวาง

2.4.1 การเชื่อมขวางทางเคมี [18]

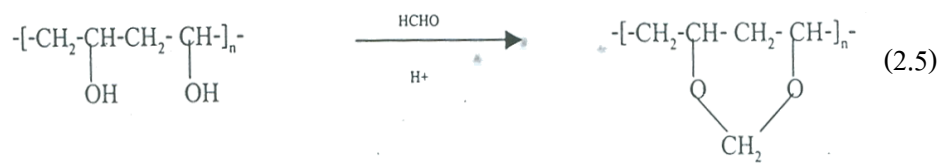
พอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีความสามารถในการละลายน้ำได้ จึงมีการปรับปรุงพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ให้อยู่ในสภาพที่ไม่ละลายน้ำ โดยเกิดปฏิกิริยาเคมีกับสารที่ก่อให้เกิดพันธะเชื่อมขวาง เช่น ฟอรั่มัลดีไฮด์ และกลูตารัลดีไฮด์ เป็นต้น การเชื่อมขวางที่เกิดขึ้นเป็นการเชื่อมขวางทางเคมีระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลกับกลูตารัลดีไฮด์

2.4.1.1 ฟอรั่มัลดีไฮด์ (Formaldehyde)

ปฏิกิริยาของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์กับฟอรั่มัลดีไฮด์แสดงดังรูปที่ 2.20 เกิดโดยหมู่ -OH ภายในสายโซ่ของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เข้าไปทำปฏิกิริยากับฟอรั่มัลดีไฮด์ ทำให้เกิดวง 1,3-dioxane ขึ้นภายในสายโซ่ ดังสมการที่ 2.5 ฟอรั่มัลดีไฮด์จะเข้าไปทำปฏิกิริยาได้เฉพาะส่วนที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous) ไม่สามารถเข้าไปในส่วนที่เป็นผลึกของพอลิเมอร์ โดยทั่วไปแล้วพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีสภาพเป็นของแข็งจะมีทั้งส่วนที่เป็นผลึกและไม่เป็นผลึก ถ้าส่วนที่เป็นผลึกมีปริมาณไม่มากพอ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์นั้นจะสามารถละลายน้ำได้ แต่ถ้านำพอลิไวนิลแอลกอฮอล์นี้มาผ่านการทำ Heat treatment ที่อุณหภูมิ 200°C ก่อนจะทำให้ความเป็นผลึกของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์มากขึ้น 50% ดังนั้นเมื่อนำพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ผ่านการทำ Heat treatment มาทำปฏิกิริยากับฟอรั่มัลดีไฮด์ ส่วนที่เป็นอสัณฐานเท่านั้นที่จะเกิดปฏิกิริยา ทำให้สามารถควบคุมเปอร์เซ็นต์การเกิดปฏิกิริยาระหว่างพอลิไวนิลแอลกอฮอล์กับฟอรั่มัลดีไฮด์ได้ตามความเป็นผลึกของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

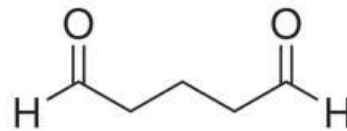


รูปที่ 2. 20 สูตรโครงสร้างของฟอรั่มัลดีไฮด์ [32]



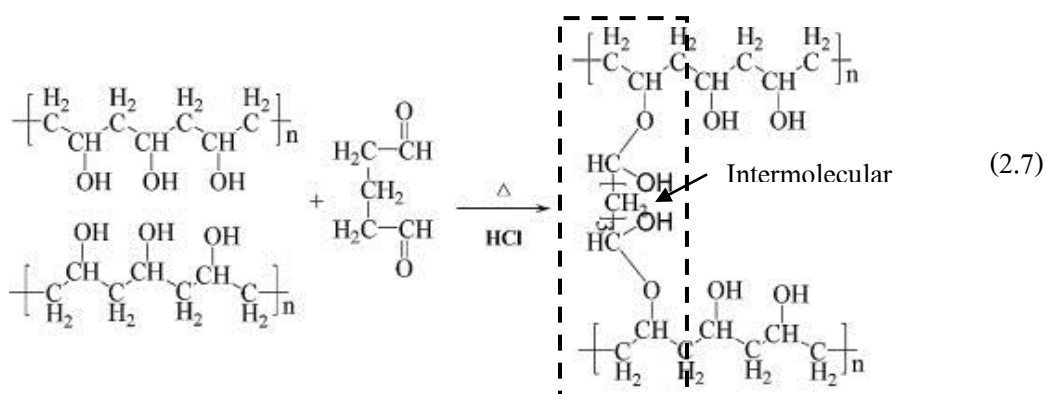
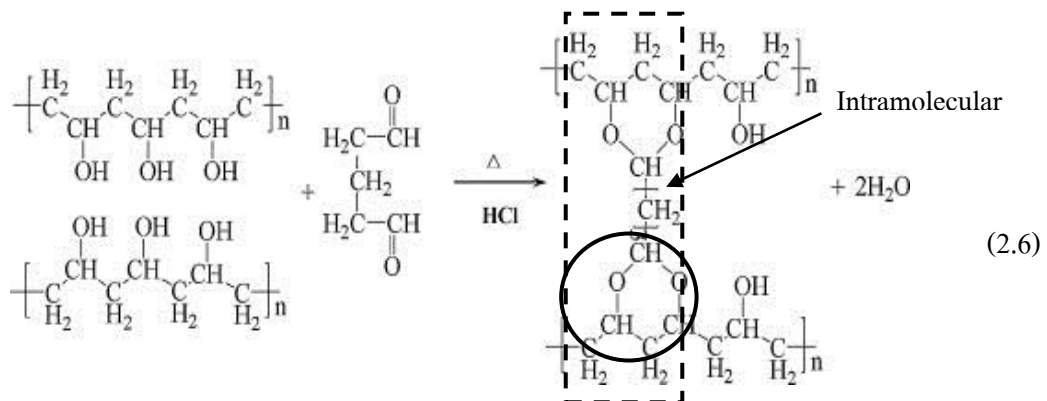
2.4.1.2 กลูตารัลดีไฮด์ (Glutaraldehyde)

กลูตารัลดีไฮด์สามารถใช้เป็นสารก่อให้เกิดพันธะเชื่อมขวางในพอลิเมอร์ เช่นคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC), เจลาติน (Gelatin), พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ก๊อซอล (Poly(vinyl alcohol) - PVA) เป็นต้น มีน้ำหนักโมเลกุล 100.12 กรัม/โมล ความหนาแน่นเท่ากับ 1.106 กรัม/มิลลิลิตร มีสูตรโครงสร้างดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 สูตรโครงสร้างกลูตารัลดีไฮด์ [18]

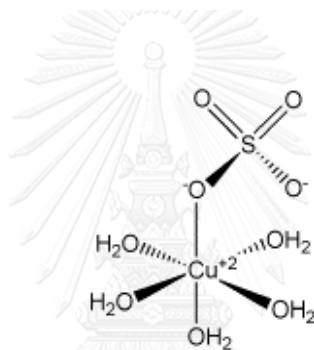
ปฏิกิริยาของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ก๊อซอลและกลูตารัลดีไฮด์จะเกิดทั้ง Intramolecular acetylation และ Intermolecular acetylation ดังสมการที่ 2.6 และ 2.7



อย่างไรก็ตามการใช้งานกลูตาธioneไฮโดรคาล์ฟถึงอันตรายต่อมนุษย์ด้วย เนื่องจากกลูตาธioneไฮโดรคาล์ฟสามารถดูดซึมเข้าสู่ร่างกายได้โดยการหายใจ การรับประทานและการสัมผัสทางผิวหนัง การสัมผัสสารนี้ทางผิวหนังบ่อยครั้งจะเป็นสาเหตุให้เกิด Allergic eczema และมีผลต่อระบบประสาท ความเข้มข้นต่ำสุดที่มนุษย์สามารถรับกลิ่นได้ คือ 0.04 ppm ที่ความเข้มข้น 0.3 ppm หรือ 1.05 mg/m³ จะทำให้เกิดระคายเคืองต่อผิวหนังและเยื่อหุ้ม [28]

2.4.2 การเชื่อมขวางประจุแบบไดวาเลนต์

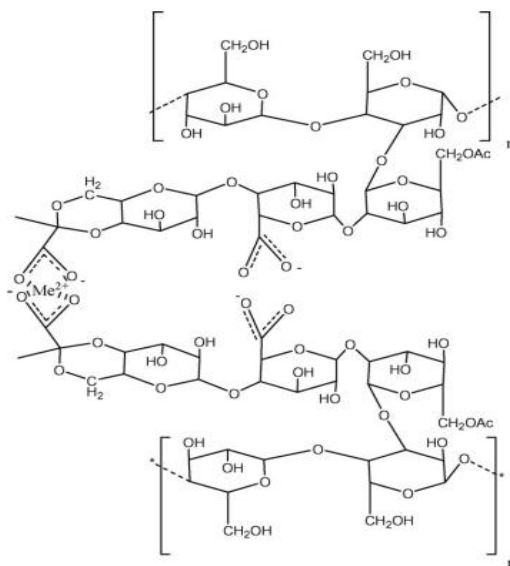
คอปเปอร์ซัลเฟตเพนตะไฮเดรต (Copper sulfate pentahydrate, CuSO₄·5H₂O) แสดงดังรูปที่ 2.22 สามารถใช้เป็นสารก่อพันธะเชื่อมขวางได้โดยเกิดการเชื่อมขวางขึ้นระหว่างหมู่คาร์บอกซิเลตกับคอปเปอร์ไอออน [29]



รูปที่ 2.22 สูตรโครงสร้างคอปเปอร์ซัลเฟต[30]

คอปเปอร์ซัลเฟตเป็นสารประกอบทองแดง มีสีฟ้า ใช้เป็นยาฆ่าเชื้อโรคและเชื้อราในแหล่งน้ำโดยไม่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ หากร่างกายไม่ได้รับทองแดงในปริมาณมากเกินไป ปริมาณต่ำสุดเมื่อได้รับทางปากที่ทำให้ถึงตายได้คือ 5-15 กรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักตัว [31] จากการศึกษาและวิจัยพบว่า ไอออนของทองแดงที่ปลดปล่อยออกมาในน้ำนั้นจะไปรบกวนระบบชีววิทยาของแบคทีเรีย โดยการไปทำลายเยื่อหุ้มเซลล์ และมีผลต่อการทำงานของเอนไซม์ภายในเซลล์ [32]

นอกจากนี้การเชื่อมขวางประจุแบบไดวาเลนต์ยังสามารถใช้แคลเซียมคลอไรด์ (Calcium chloride, CaCl₂) เป็นสารเชื่อมขวางได้เช่นกัน แคลเซียมคลอไรด์เป็นสารละลายที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่เป็นพิษ จึงนิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ซึ่ง D. Bergmann และคณะ [33] ได้เสนอแบบจำลองของการเกิดสารเชิงซ้อนระหว่างแชนแทนกัมและ Divalent cation เช่น Ca²⁺, Mg²⁺, Mn²⁺, Fe²⁺, Cu²⁺, Zn²⁺, Cd²⁺ และ Pb²⁺ โดยจะเกิดขึ้นที่หมู่คาร์บอกซิเลตของไพรูเวต (Pyruvate unit) ดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 แบบจำลองการเกิดสารเชิงซ้อนระหว่างระหว่างแซนแทนกัมและ Divalent cation [33]

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี 1999, Kabir และคณะ [34] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการวิเคราะห์ทางความร้อนของกัวร์กัมที่เชื่อมขวางด้วย กลูตารัลดีไฮด์ร้อยละ 5 โดยปริมาตร 25 โดยน้ำหนักในปริมาณที่แตกต่างกัน โดยใช้เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) ที่อุณหภูมิ 50-500 องศาเซลเซียสและ Thermo Gravimetric Analysis (TGA) ที่อุณหภูมิ 70-600 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศออกซิเจนพบว่า เมื่อปริมาณกลูตารัลดีไฮด์เพิ่มมากขึ้น จะทำให้กัวร์กัมมีอุณหภูมิการสลายตัวเพิ่มขึ้นและมีเสถียรภาพทางความร้อนสูงขึ้น

ในปี 2007, George และคณะ [35] ได้สังเคราะห์ไฮโดรเจลจากอัลจินเตและกัวร์กัมในอัตราส่วนที่แตกต่างกันโดยใช้กลูตารัลดีไฮด์ร้อยละ 5 โดยปริมาตร 0.25, 0.3, 0.4 และ 0.5 โดยน้ำหนักเป็นสารเชื่อมขวาง นำไฮโดรเจลที่เตรียมได้มาทำเป็นเม็ดโดยหยดสารละลายผสมของอัลจินเตและกัวร์กัมลงในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์เข้มข้น 0.5 โมลาร์ พบว่าอัตราส่วนของอัลจินเตต่อกัวร์กัมเท่ากับ 3:1 มีประสิทธิภาพการเชื่อมขวางสูงสุด หลังจากล้างเม็ดไฮโดรเจลและทำให้แห้งแล้วนำไปทดสอบการบวมตัวในสารละลายที่มี pH 1.2 และ 7.4 พบว่าไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์เข้มข้นร้อยละ 0.3 โดยน้ำหนักมีการบวมตัวที่ต่ำสุดทั้งที่ pH 1.2 และ 7.4

ในปี 2008, Mansur และคณะ [36] ได้เตรียมไฮโดรเจลจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีระดับการเกิด การไฮโดรไลซิส (DH) ที่แตกต่างกันโดยใช้กลูตารัลดีไฮด์เป็นสารเชื่อมขวาง จาก FTIR พบว่าเกิดการเชื่อมขวางที่หมู่อัลดีไฮด์ของกลูตารัลดีไฮด์กับหมู่ไฮดรอกซิลของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ความสามารถ

ในการบวมตัวของไฮโดรเจลจะลดลงเมื่อโครงสร้างภายในของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีการเชื่อมขวางมากขึ้น นอกจากนี้ไฮโดรเจลที่เตรียมได้มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลง pH จึงมีศักยภาพสำหรับการนำไปใช้เป็นพอลิเมอร์ในระบบนำส่งยา

ในปี 2011, Alves และคณะ [37] ได้สังเคราะห์ฟิล์มไฮโดรเจลจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และเจลาตินที่มีอัตราส่วนพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ต่อเจลาตินเท่ากับ 2:8 และ 5:5 โดยใช้กลูตารัลดีไฮด์ร้อยละ 5 โดยปริมาตร 50 โดยน้ำหนัก (เทียบกับน้ำหนักของพอลิเมอร์) พบว่าอัตราส่วนพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ต่อเจลาตินเท่ากับ 5:5 มีค่าความทนแรงดึงสูงสุดที่ 8.9 MPa ค่าการดึงยืด ณ จุดขาดสูงสุดที่ร้อยละ 272.7 และมีปริมาณของแข็งที่เหลือจากการละลายน้ำเท่ากับร้อยละ 71.4

ในปี 2013, Sarai และคณะ [38] ได้เตรียมไฮโดรเจลของอัลจินตและเจลาตินในอัตราส่วนที่แตกต่างกันโดยมีแคลเซียมไอออนและกลูตารัลดีไฮด์เป็นสารเชื่อมขวาง จากนั้นทดสอบสมบัติทางกายภาพโดยใช้ SEM FTIR และศึกษาการบวมตัวในสารละลายบัฟเฟอร์ที่มี pH ในช่วง 1-11 ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส จาก FTIR พบว่าไฮโดรเจลที่เตรียมได้เกิดการเชื่อมขวางของแคลเซียมไอออนกับหมู่คาร์บอกซิลของอัลจินต รวมทั้งเกิดการเชื่อมขวางของหมู่อัลดีไฮด์ของกลูตารัลดีไฮด์กับหมู่ไฮดรอกซิลของเจลาติน การเพิ่มอัตราส่วนของเจลาตินทำให้เกิดการเชื่อมขวางของหมู่อัลดีไฮด์ของกลูตารัลดีไฮด์กับหมู่ไฮดรอกซิลของเจลาตินเพิ่มมากขึ้น สำหรับผลการทดสอบสมบัติการบวมตัว สภาพการยุบหนืดและสมบัติทางความร้อน พบว่าไฮโดรเจลที่อัตราส่วนของอัลจินตและเจลาตินเท่ากับ 50:50 มีการบวมตัวและมีสมบัติยุบหนืดที่ดี ดังนั้นจึงสามารถนำไปใช้เป็นวัสดุปิดแผลที่ไม่มีพิษและสามารถกักเก็บความชื้นเอาไว้ได้ อีกทั้งยังมีความยืดหยุ่นและความแข็งแรงที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานด้านวัสดุปิดแผล

จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น การเตรียมฟิล์มไฮโดรเจลที่ได้จากพอลิเมอร์ทางธรรมชาติโดยใช้กลูตารัลดีไฮด์เป็นตัวเชื่อมขวาง เนื่องจากว่ากลูตารัลดีไฮด์มีความเป็นพิษถ้าใช้ในปริมาณที่มากจะส่งผลที่เป็นอันตรายต่อร่างกายมนุษย์และสิ่งแวดล้อม [17] ในงานวิจัยนี้จึงลดปริมาณของกลูตารัลดีไฮด์ลงและเพิ่มการเชื่อมขวางด้วยแรงทางประจุโดยใช้คอปเปอร์ซัลเฟตซึ่งมีสมบัติในการต้านเชื้อแบคทีเรียและช่วยเพิ่มความแข็งแรงและความทนทานต่อน้ำของฟิล์ม โดยศึกษาปริมาณของกลูตารัลดีไฮด์และคอปเปอร์ซัลเฟตซึ่งส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของฟิล์มโดยนำฟิล์มไปตรวจสอบความแข็งแรง เสถียรภาพทางความร้อน, ปริมาณของแข็งที่เหลือจากการละลายน้ำและการบวมตัวของฟิล์ม

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 ขอบเขตการทดลอง

งานวิจัยนี้แบ่งการทดลองเป็น 2 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 การเตรียมอัลจินต/คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสไฮโดรเจลในอัตราส่วนต่างๆโดยใส่สารเชื่อมขวางกลูตารัลดีไฮด์และคอปเปอร์ซัลเฟตที่ความเข้มข้นต่างๆ นำมาขึ้นรูปเป็นฟิล์มด้วยวิธีเทแบบหล่อ

ส่วนที่ 2 การตรวจสอบสัณฐานวิทยา สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกลด้านความทนแรงดึง และสมบัติทางความร้อนของไฮโดรเจลที่ขึ้นรูปได้

3.2 วัสดุและสารเคมี

1. โซเดียมอัลจินต (Sodium alginate : A) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท ออกัส เคมี จำกัด
2. คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Carboxyl methyl cellulose : CMC) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทออกัส เคมี จำกัด
3. กลูตารัลดีไฮด์ 25% W/V (Glutaraldehyde) เกรดวิเคราะห์ เพื่อทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมขวาง จากบริษัท Aldrich
4. คอปเปอร์ซัลเฟต ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) เกรดวิเคราะห์ เพื่อทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมขวาง จากบริษัท Aldrich
5. กรดไฮโดรคลอริก (HCl) เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจากบริษัท Fluka

3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

รายชื่ออุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่นำมาใช้ในการทดลอง

ชื่อเครื่องมือ / อุปกรณ์	รุ่น / ยี่ห้อ / ประเทศผู้ผลิต
1. เครื่องกวนสารแบบมีแผ่นให้ความร้อน (Magnetic Stirrer & Hot Plate)	MS300HS / Favorit [®] / South Korea
2. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)	JSM 5410 LV/JEOL., Ltd./Japan
3. เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer, FT-IR)	Nicolet 6700 / Thermo Fisher Scientific Inc. / United States
4. เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) (Thermogravimetric Analyzer, TGA)	TGA /SDTA851e / Mettler Toledo/Switzerland
5. เครื่องวัดเฉดสี (Reflectance Spectrophotometer)	Macbeth color-eye 7000(X-rite), Incorporated, United State
6. เครื่อง Universal Tensile Testing Machine (UTM)	Lloyd L500, Fareham / United Kingdom
7. งานเพาะเชื้อพลาสติก	Poland

3.4 วิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้เตรียมอัลจินต/คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสไฮโดรเจลในอัตราส่วนต่างๆจากนั้นเติมสารเชื่อมขวางกลูตารัลดีไฮด์และคอปเปอร์ซัลเฟตที่ความเข้มข้นต่างๆนำมาขึ้นรูปด้วยวิธีเทแบบหล่อแล้วศึกษาผลของชนิดและปริมาณของสารเชื่อมขวางต่อสัณฐานวิทยา สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกลด้านความทนแรงดึงและสมบัติทางความร้อนของฟิล์มไฮโดรเจลที่ขึ้นรูปได้

3.4.1 การเตรียมฟิล์มไฮโดรเจล

1. ชั่งอัลจินตและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสตามอัตราส่วนที่แสดงในตารางที่ 3.2 โดยมีน้ำหนักเนื้อสารรวม 2 กรัม
2. ละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสในน้ำกลั่นที่ร้อน 98 มิลลิลิตรพร้อมปั่นกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
3. เติมอัลจินตลงในสารละลายข้อ 2 แล้วปั่นกวนต่อเป็นเวลา 1 ชั่วโมงจนสารละลายผสมเป็นเนื้อเดียวกัน
4. เติมกลูตารัลดีไฮด์ร้อยละ 0, 2 หรือ 5 โดยน้ำหนัก ลงในสารละลายข้อ 3 ปริมาณ 10 มิลลิลิตร แล้วปั่นกวนต่ออีก 30 นาทีที่อุณหภูมิ 60 °C จากนั้นเติมสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตความเข้มข้น 0.02 โมลลาร์ 10 มิลลิลิตร แล้วปั่นกวนต่ออีก 30 นาทีที่อุณหภูมิ 60 °C
5. ขึ้นรูปให้เป็นฟิล์มโดยการเทสารละลายลงในจานเพาะเชื้อพลาสติกแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 40 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จนฟิล์มไฮโดรเจลแห้งสนิท

ตารางที่ 3.2 สูตรการเตรียมอัลจินต/คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยสารละลาย
กลูตารัลดีไฮด์และสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตในอัตราส่วนต่าง

Formula	Composition(gram)		Glutaraldehyde (%)W/W	CuSO ₄ (molar)
	Alginate	CMC		
A0C10	0	2.0	0	0
A2C8	0.4	1.6		
A4C6	0.8	1.2		
A6C4	1.2	0.8		
A8C2	1.6	0.4		
A10C0	2.0	0		
A0C10-G2	0	2.0	2	0
A2C8-G2	0.4	1.6		
A4C6-G2	0.8	1.2		
A6C4-G2	1.2	0.8		
A8C2-G2	1.6	0.4		
A10C0-G2	2.0	0		
A0C10-G5	0	2.0	5	0
A2C8-G5	0.4	1.6		
A4C6-G5	0.8	1.2		
A6C4-G5	1.2	0.8		
A8C2-G5	1.6	0.4		
A10C0-G5	2.0	0		
A0C10-Cu2	0	2.0	0	0.02
A2C8 -Cu2	0.4	1.6		
A4C6-Cu2	0.8	1.2		
A6C4-Cu2	1.2	0.8		
A8C2-Cu2	1.6	0.4		
A10C0-Cu2	2.0	0		

ตารางที่ 3.2 (ต่อ)

Formula	Composition(gram)		Glutaraldehyde (%)W/W	CuSO ₄ (molar)
	Alginate	CMC		
A0C10-G2Cu2	0	2.0	2	0.02
A2C8-G2Cu2	0.4	1.6		
A4C6-G2Cu2	0.8	1.2		
A6C4-G2Cu2	1.2	0.8		
A8C2-G2Cu2	1.6	0.4		
A10C0-G2Cu2	2.0	0.0		
A0C10-G5Cu2	0	2.0	5	0.02
A2C8-G5Cu2	0.4	1.6		
A4C6-G5Cu2	0.8	1.2		
A6C4-G5Cu2	1.2	0.8		
A8C2-G5Cu2	1.6	0.4		
A10C0-G5Cu2	2.0	0		

หมายเหตุ สัญลักษณ์ของสูตรไฮโดรเจลที่ใช้มีความหมายดังนี้

ตัวอย่างเช่น

สูตร A8C2 หมายถึง สูตรที่มีอัตราส่วนของอัลจินต 1.6 กรัม ต่อคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 0.4 กรัม หรืออัตราส่วนของผสมของอัลจินตต่อคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเท่ากับ 4:1

สูตร A8C2-G2 หมายถึง สูตรที่มีอัตราส่วนของอัลจินต 1.6 กรัม ต่อคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 0.4 กรัม เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก หรืออัตราส่วนของผสมของอัลจินตต่อคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเท่ากับ 4:1

สูตร A8C2-G5 หมายถึง สูตรที่มีอัตราส่วนของอัลจินต 1.6 กรัม ต่อคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 0.4 กรัม เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก หรืออัตราส่วนของผสมของอัลจินตต่อคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเท่ากับ 4:1

สูตร A8C2-Cu2 หมายถึง สูตรที่มีอัตราส่วนของอัลจินต 1.6 กรัม ต่อคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 0.4 กรัม เชื่อมขวางด้วยคอปเปอร์ซัลเฟต 0.02 โมลลาร์ หรืออัตราส่วนของผสมของอัลจินตต่อคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเท่ากับ 4:1

สูตร $A8C2-G2Cu2$ หมายถึง สูตรที่มีอัตราส่วนของอัลจินต 1.6 กรัม ต่อคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 0.4 กรัม เชื่อมขวางด้วยกลูตาไรต์ไฮดร็อกไซด์ 2 โดยน้ำหนัก และคอปเปอร์ซัลเฟต 0.02 โมลลาร์ หรืออัตราส่วนของผสมของอัลจินตต่อคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเท่ากับ 4:1

สูตร $A8C2-G5Cu2$ หมายถึง สูตรที่มีอัตราส่วนของอัลจินต 1.6 กรัม ต่อคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 0.4 กรัม เชื่อมขวางด้วยกลูตาไรต์ไฮดร็อกไซด์ 5 โดยน้ำหนัก และคอปเปอร์ซัลเฟต 0.02 โมลลาร์ หรืออัตราส่วนของผสมของอัลจินตต่อคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเท่ากับ 4:1

สำหรับไฮโดรเจลสูตรอื่นๆ ใช้สัญลักษณ์ในลักษณะเดียวกัน

3.4.2 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติของฟิล์มไฮโดรเจล

3.4.2.1 การตรวจสอบการเปลี่ยนสีของฟิล์มไฮโดรเจลด้วยเครื่องวัดเฉดสี (Reflectance Spectrophotometer)

การวัดการเปลี่ยนสีของฟิล์มไฮโดรเจลด้วยเครื่องวัดสีของ Macbeth color-eye 700 (X-Rite) แสดงดังรูปที่ 3.1 โดยใช้โหมดในการวัดดังนี้ (specular include, SPI) รวมแสง UV (UV include) illuminant D 65 และ 10° Standard observer โดยนำชิ้นงานตัวอย่างมาวัดสีทั้งหมด 3 ตำแหน่ง

โดยกำหนดให้ L^* เป็นค่าความสว่าง (Lightness) มีค่าอยู่ระหว่าง 0 – 100

แกน a^* ที่เป็น + สีจะเป็นไปในทิศทางสีแดง แกน a^* ที่เป็น - สีจะเป็นไปในทิศทางสีเขียว

แกน b^* ที่เป็น + สีจะเป็นไปในทิศทางสีเหลือง แกน b^* ที่เป็น - สีจะเป็นไปในทิศทางสีน้ำเงิน

ค่า H เท่ากับ 0 แสดงถึงความใส ค่า H เท่ากับ 100 แสดงถึงความขุ่น

ค่า Yellowness (YI) เท่ากับ 0 แสดงถึงความไม่เหลือง ค่า Yellowness (Yi) เท่ากับ 100 แสดงถึงความเหลือง



รูปที่ 3. 1 เครื่องวัดสี รุ่น Macbeth color-eye 7000 ของ บริษัท X-rite Incorporated

3.4.2.2 การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของฟิล์มไฮโดรเจลด้วยเทคนิค FTIR

การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของฟิล์มไฮโดรเจลด้วยเครื่อง FT-IR แสดงดังรูปที่ 3.2 โดยใช้โหมดการส่งผ่านตั้งแต่ความยาวคลื่นที่ $400\text{-}4000\text{ cm}^{-1}$ มีความละเอียด 4 cm^{-1} ใช้จำนวน 64 ครั้งในการสแกน



รูปที่ 3.2 เครื่อง FT-IR ของ Thermo Fisher Scientific รุ่น Nicolet 6700

3.4.2.3 การหาค่าการบวมตัวของไฮโดรเจลในน้ำกลั่น

การหาค่าการบวมตัวของไฮโดรเจลในน้ำกลั่นมีขั้นตอนดังนี้คือ ตัดฟิล์มไฮโดรเจลที่มีความหนา 60 ± 5 ไมครอน เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด $2 \times 2 \text{ cm}^2$ จำนวน 3 ชิ้นงาน ชั่งน้ำหนักฟิล์มไฮโดรเจล (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง) จากนั้นห่อด้วยตะแกรงลวด และชั่งน้ำหนักอีกครั้งเพื่อหาน้ำหนักของตะแกรงลวด นำตะแกรงลวดที่มีฟิล์มไฮโดรเจลอยู่ในแช่ลงในน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ภายในระยะเวลาต่างๆ จากนั้นนำตะแกรงลวดที่มีฟิล์มไฮโดรเจลอยู่ในขึ้นจากน้ำแล้วทำการชั่งน้ำรอบตะแกรงลวดก่อนนำไปชั่งน้ำหนัก (แต่ละสูตรทำการทดสอบซ้ำ 3 ชิ้นงาน)

หมายเหตุ กำหนดระยะเวลาแช่ฟิล์มไฮโดรเจลในน้ำกลั่นดังนี้

1. สูตรที่ไม่มีการเชื่อมขวางแช่ทุก 1 นาที เป็นเวลา 10 นาที
2. สูตรที่มีการเชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์หรือคอปเปอร์ไอออนแช่ทุก 1 นาที เป็นเวลา 10 นาที
3. สำหรับสูตรที่มีการเชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์และสารละลายคอปเปอร์ไอออนแช่ทุก 5 นาที เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นนำขึ้นมาที่เวลา 40, 50, 60, 120, 180, 240, 300, 360, 420, 480 นาที และทุกๆ เวลา 24 ชั่วโมง

คำนวณหาการบวมตัวคำนวณได้จากสมการที่ 3.1

$$\text{การบวมตัว (เท่า)} = \frac{\text{น้ำหนักของไฮโดรเจลที่บวมตัว} - \text{น้ำหนักของไฮโดรเจลแห้ง}}{\text{น้ำหนักของเจลแห้ง}} \quad (3.1)$$

3.4.2.4 การหาปริมาณร้อยละของแข็งที่เหลือจากการละลายน้ำ (%solid content)

การหาปริมาณร้อยละของแข็งที่เหลือจากการละลายน้ำ ของฟิล์มไฮโดรเจล มีขั้นตอนดังนี้ ตัดฟิล์มไฮโดรเจลเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด $2 \times 2 \text{ cm}^2$ จำนวน 3 ชิ้นงาน แล้วนำไปชั่งน้ำหนักฟิล์มไฮโดรเจลก่อนแช่ในน้ำกลั่น ห่อฟิล์มไฮโดรเจลด้วยตะแกรงลวดและชั่งน้ำหนักอีกครั้งเพื่อหาน้ำหนักของตะแกรงลวดแล้วจึงนำตะแกรงลวดที่มีฟิล์มไฮโดรเจลอยู่ในแช่ลงในน้ำกลั่นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำให้ฟิล์มไฮโดรเจลแห้งด้วยการนำตะแกรงลวดที่มีฟิล์มไฮโดรเจลอยู่ในไปอบที่อุณหภูมิ $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ จนฟิล์มแห้งสนิทโดยการดูจากน้ำหนักของฟิล์มที่คงที่ ชั่งน้ำหนักของฟิล์มไฮโดรเจลที่เหลือและคำนวณหาปริมาณร้อยละของแข็งที่เหลือตามสมการที่ 3.2

$$\text{ปริมาณร้อยละของของแข็งที่เหลือจากการละลายน้ำ (\%)} = \left[\frac{W_2 - W_1}{W_1} \right] \times 100 \quad (3.2)$$

W_1 หมายถึง น้ำหนักของไฮโดรเจลเริ่มต้น

W_2 หมายถึง น้ำหนักของไฮโดรเจลหลังนำไปแช่น้ำกลั่น 24 ชั่วโมงแล้วอบให้แห้ง

3.4.2.5 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาของฟิล์มไฮโดรเจลด้วยเทคนิค SEM

การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มไฮโดรเจลด้วยเครื่อง SEM โดยใช้กำลังขยาย 2000 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 3.3 โดยสารตัวอย่างจะถูกเคลือบทองด้วย sputter-coater ที่ศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์



รูปที่ 3.3 เครื่อง SEM ของ JEOL รุ่น JSM 5410 LV

3.4.2.6 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของฟิล์มไฮโดรเจลด้วยเทคนิค TGA

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของฟิล์มไฮโดรเจลด้วยเครื่อง TGA ของ Mettler Toledo รุ่น TGA/SDTA 851e แสดงดังรูปที่ 3.4 โดยใช้ภาวะการทดสอบที่มีอัตราการไหลของแก๊ส 10 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิในการวิเคราะห์ ตั้งแต่ 50 องศาเซลเซียส ถึง 600 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยเทอร์โมแกรมที่ได้แสดงน้ำหนักที่สูญหายไป (weight loss) เมื่อพอลิเมอร์ผสมได้รับความร้อน รวมทั้งปริมาณ (char residue) ที่เหลือ



รูปที่ 3.4 เครื่อง TGA ของ Mettler Toledo รุ่น TGA/SDTA851e

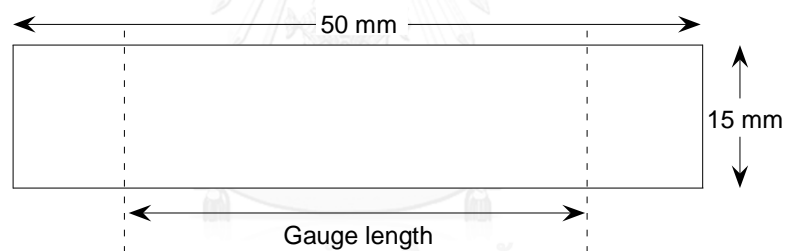
3.4.2.7 การทดสอบสมบัติเชิงกล

การทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มไฮโดรเจล ด้วยเครื่องทดสอบแรงกระสงค์ตามมาตรฐาน ASTM D-882 [39] ที่แสดงดังรูปที่ 3.5 มีขั้นตอนดังนี้คือก่อนการทดสอบฟิล์มไฮโดรเจลต้องผ่านการอบและเก็บไว้ในเดซิเคเตอร์ก่อน จากนั้นตัดชิ้นงานที่ใช้ทดสอบให้มีขนาดความกว้าง ความยาว และความหนาแสดงดังรูปที่ 3.6 นำชิ้นทดสอบไปวางบนที่จับชิ้นงาน ให้แรงดึงที่มีภาวะในการทดสอบ ดังนี้

ลักษณะชิ้นงานเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด	:	50×15 มม ²
อัตราเร็วในการดึง	:	50 มม/นาที
Load cell	:	100 นิวตัน
ความยาวระยะจับชิ้นงาน (Gauge length)	:	40 มม
จำนวนชิ้นงาน	:	5 ชิ้นงาน



รูปที่ 3.5 เครื่อง Universal Tensile Testing Machine



รูปที่ 3.6 ชิ้นงานตัวอย่างรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ค่าความทนแรงดึง ณ จุดขาด ค่ายังส์มอดุลัส และร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.3-3.5 ตามลำดับ

$$\text{ความทนแรงดึง ณ จุดขาด (Tensile strength at break)} = \frac{F}{A} \quad (3.3)$$

$$\text{ยังส์มอดุลัส (Young's modulus)} = \frac{\text{ความเค้น (Stress)}}{\text{ความเครียด (Strain)}} \quad (3.4)$$

$$\text{ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด (\%Elongation at break)} = \frac{l-l_0}{l_0} \times 100 \quad (3.5)$$

เมื่อ F = แรงดึงยึดชิ้นงาน ณ จุดขาด

A = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานตัวอย่าง (mm^2)

L = ระยะห่างระหว่างหัวจับชิ้นงานหลังทำการดึงชิ้นงานตัวอย่าง ณ จุดขาด

l_0 = ระยะห่างระหว่างหัวจับชิ้นงานก่อนดึงชิ้นงาน (Gauge length) เท่ากับ 40 มม

หมายเหตุ ค่ายังสัมพันธ์กับค่าความชันเริ่มต้น (ที่ 1 และ 2% การดึงยึด)



บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

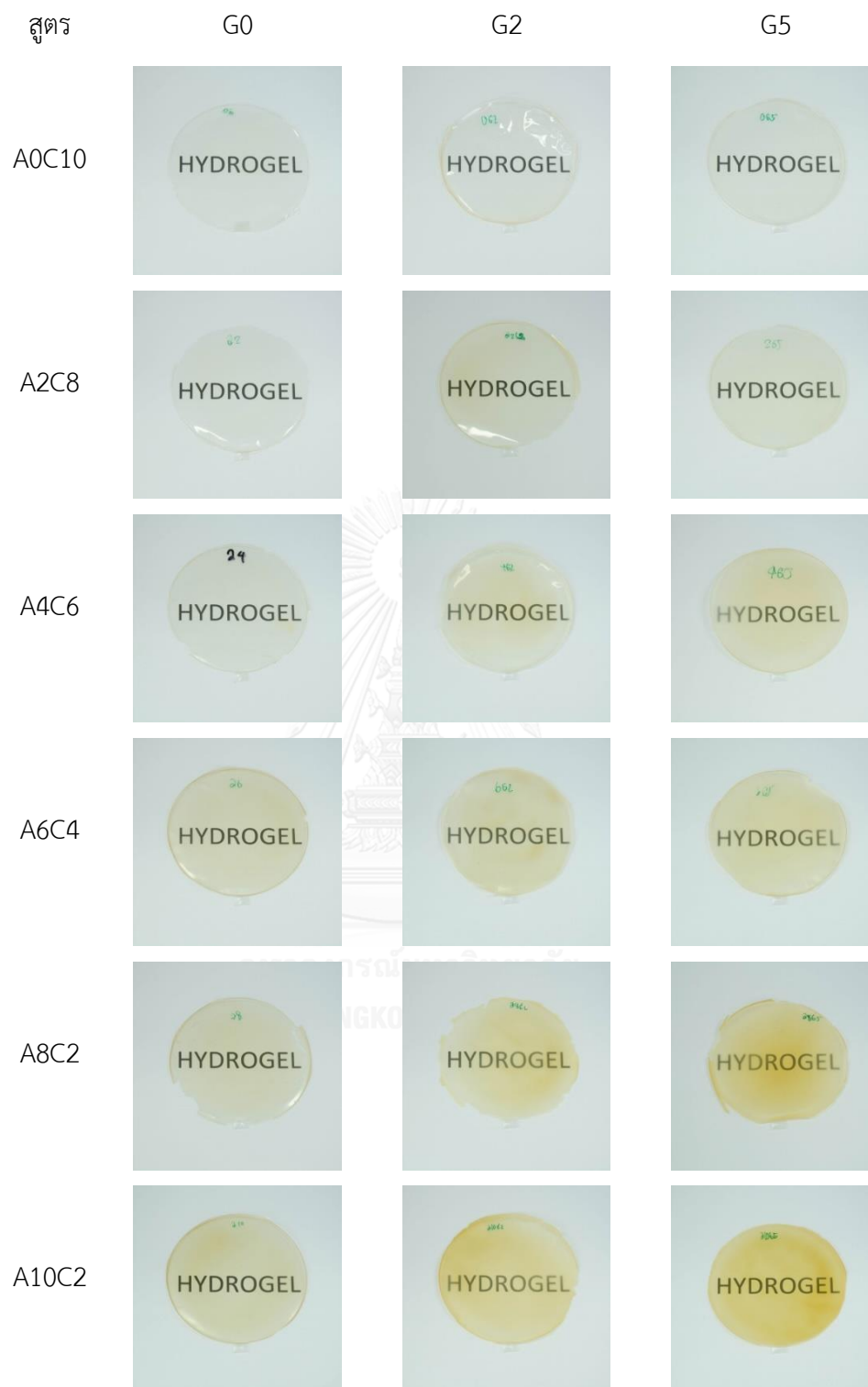
4.1 ลักษณะทางกายภาพของไฮโดรเจล

สี และความขุ่นของอัลจินต/CMC ไฮโดรเจลที่เตรียมได้แสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2 และตารางที่ 4.1 CMC ไฮโดรเจลที่เตรียมได้ มีความใสและความขุ่นมากกว่าอัลจินตไฮโดรเจล ยืนยันได้จากค่า b^* ค่า YI และค่า Haze ที่ต่ำกว่าของอัลจินตไฮโดรเจล แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของอัลจินตพบว่า ไฮโดรเจลผสมมีสีออกเหลืองและขุ่นมากขึ้น สอดคล้องกับค่า b^* ค่า YI และค่า Haze ที่เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากอัลจินตที่นำมาใช้เป็นสารตั้งต้นมีสีเหลืองเพราะไม่ได้ผ่านการฟอกสี นอกจากนี้เมื่อใส่สารเชื่อมขวางกลูตารัลดีไฮด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 และ 5 โดยน้ำหนัก ไฮโดรเจลมีสีเหลืองเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังขุ่นมากขึ้นอีกด้วยยืนยันได้จากค่า b^* ค่า YI และค่า Haze ที่สูงขึ้น และเมื่อเปลี่ยนสารเชื่อมขวางจากกลูตารัลดีไฮด์เป็นคอปเปอร์ซัลเฟต 0.02 โมลลาร์ พบว่าไฮโดรเจลมีสีออกเขียวปนฟ้าและขุ่น สอดคล้องกับค่า a^* ที่ลดลง และค่า Haze ที่เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตที่ใส่ลงไปเป็นของเหลวสีฟ้าใส

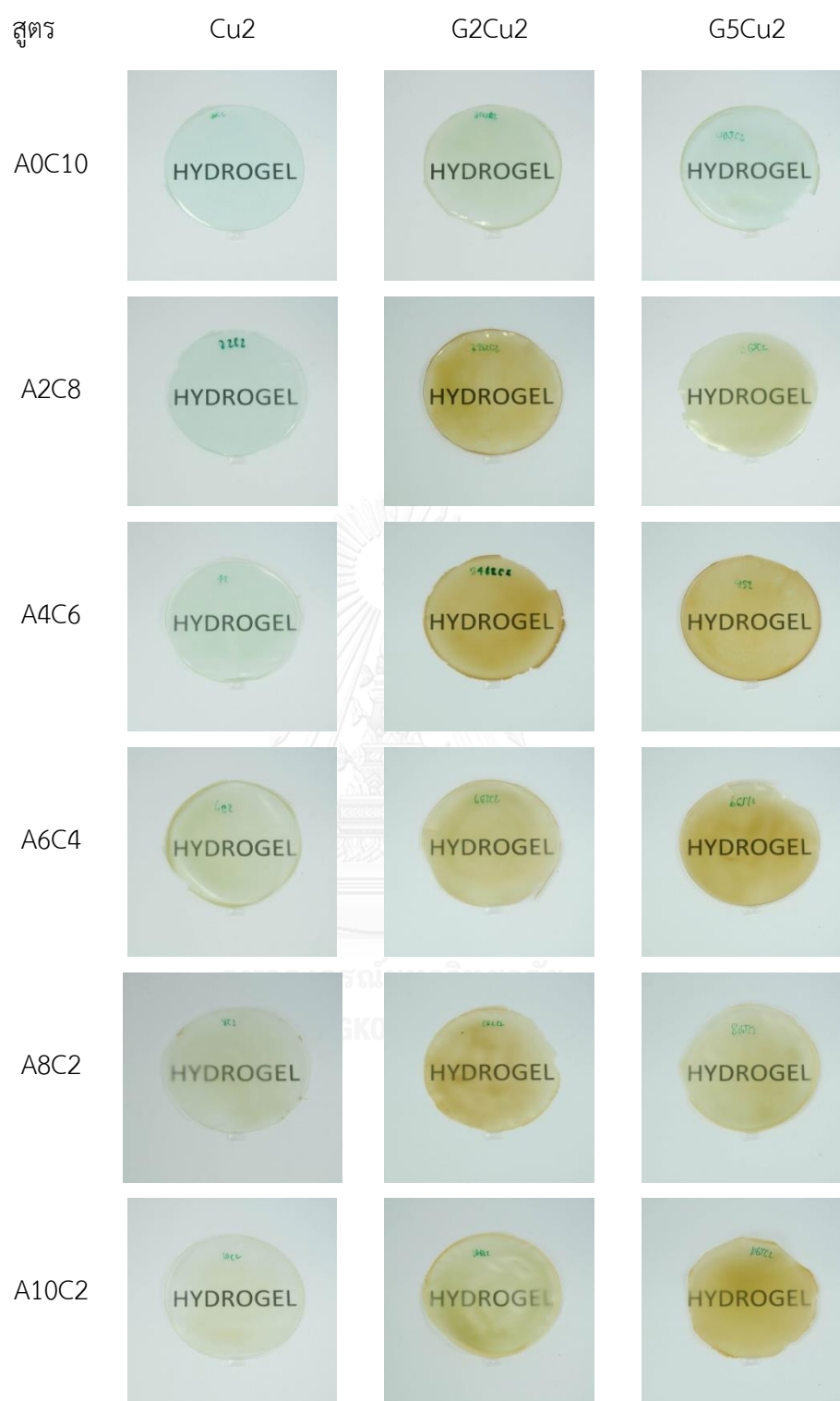
เมื่อมีการใส่สารเชื่อมขวางทั้งกลูตารัลดีไฮด์ร้อยละ 2 และ 5 โดยน้ำหนัก และคอปเปอร์ซัลเฟต 0.02 โมลลาร์ ลงในไฮโดรเจล พิล์มมีสีเหลืองปนเขียวอมฟ้าและขุ่นยืนยันจากค่า b^* ค่า YI และค่า Haze ที่เพิ่มสูงขึ้น คาดว่าเป็นผลมาจากการผสมกันของสีเหลืองจากการเติมกลูตารัลดีไฮด์และสีฟ้าจากคอปเปอร์ซัลเฟตสารที่ใส่เป็นสารเชื่อมขวาง

จากลักษณะทางกายภาพของไฮโดรเจลที่เตรียมได้ สรุปว่า CMC ไฮโดรเจลค่อนข้างใส และไม่มีสี ในขณะที่ไฮโดรเจลของพอลิเมอร์ผสมอัลจินต/CMC มีสีเหลืองและขุ่นขึ้นเล็กน้อย และจะขุ่นมากขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของอัลจินต ส่วนไฮโดรเจลของพอลิเมอร์ผสมอัลจินต/CMC หลังเชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์และคอปเปอร์ซัลเฟตพบว่าไฮโดรเจลที่ได้มีความขุ่นแต่ยังสามารถมองเห็นตัวหนังสือได้ฟิล์มได้ซึ่งเป็นผลของการเชื่อมขวางที่เกิดขึ้นภายในไฮโดรเจล

งานวิจัยนี้ได้มีการตรวจวัดสีและความขุ่นของฟิล์มไฮโดรเจลเพื่อดูความเปลี่ยนแปลงของฟิล์มเมื่อมีการใส่สารเชื่อมขวางลงไปสำหรับการใช้งานทางการแพทย์ เช่น วัสดุปิดแผลอาจต้องการฟิล์มที่มีความใส เพื่อให้ดูสะอาดและน่าใช้ ดังนั้นการวัดสีและความขุ่นของฟิล์มเป็นการทดสอบที่สำคัญเพื่อนำไปประยุกต์กับลักษณะของการทำงานที่ต้องการ



รูปที่ 4. 1 ภาพถ่ายของฟิล์มไฮโดรเจลทั้งก่อนและหลังเชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์



รูปที่ 4. 2 ภาพถ่ายของฟิล์มไฮโดรเจลทั้งก่อนและหลังเชื่อมขวางด้วยคอปเปอร์ซัลเฟต, กลูตารัลดีไฮด์และคอปเปอร์ซัลเฟต

ตารางที่ 4. 1 การเปลี่ยนแปลงสีของฟิล์มไฮโดรเจลทั้งก่อนและหลังเชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์และคอปเปอร์ซัลเฟต

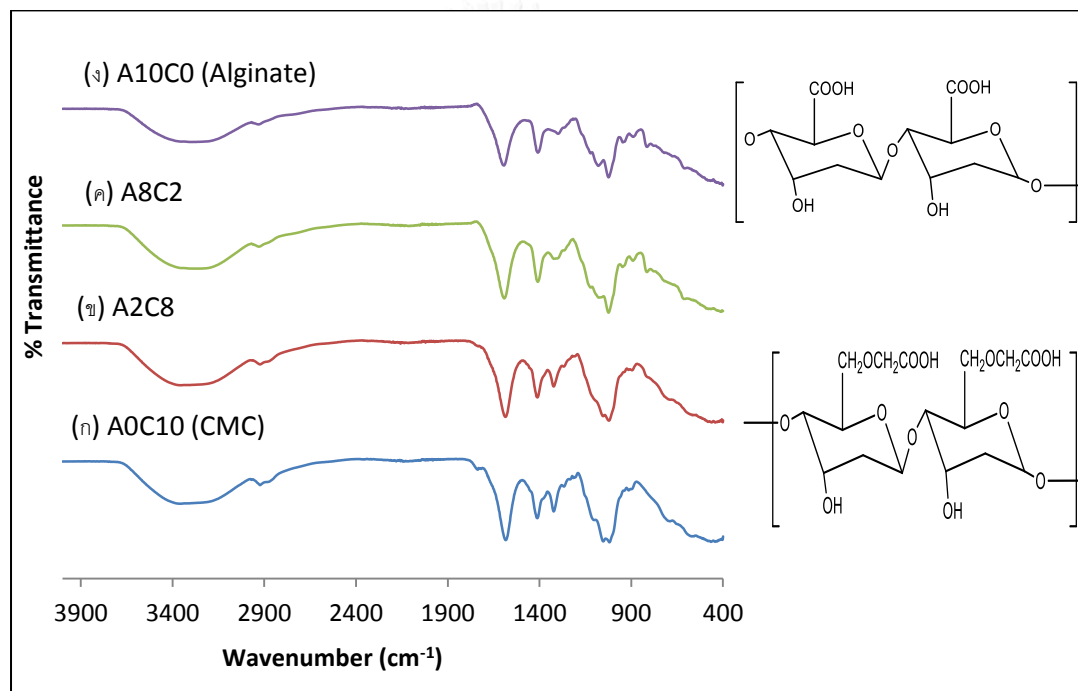
สูตร	ค่าเฉลี่ย Lab system			YI	HAZE
	L	a*	b*		
A0C10	100.26	0.29	-1.61	0	11.38
A2C8	100.28	0.03	0.03	0.07	14.87
A4C6	98.73	-0.16	1.56	2.79	24.82
A6C4	98.29	-0.62	4.50	7.80	32.72
A8C2	98.19	-0.93	7.17	12.31	39.76
A10C0	97.39	-1.30	8.37	14.21	39.50
A0C10-G2	99.77	0.35	-1.12	2.25	15.25
A2C8-G2	99.52	-0.16	2.60	4.41	24.18
A4C6-G2	98.02	-0.81	6.92	11.95	46.39
A6C4-G2	97.94	-1.14	7.12	11.95	64.53
A8C2-G2	97.17	-1.33	8.94	15.27	87.25
A10C0-G2	95.74	-1.47	13.32	38.29	96.70
A0C10-G5	100.82	0.21	-1.26	2.96	21.76
A2C8-G5	99.58	-0.39	1.76	3.05	37.25
A4C6-G5	99.15	-1.37	7.51	13.28	83.61
A6C4-G5	98.46	-1.74	9.12	15.02	87.11
A8C2-G5	95.38	-1.81	21.34	34.61	90.48
A10C0-G5	92.54	-2.62	24.41	40.79	95.04

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

สูตร	ค่าเฉลี่ย Lab system			YI	HAZE
	L	a*	b*		
A0C10-Cu2	99.28	-2.77	-2.55	0	9.53
A2C8-Cu2	99.57	-2.30	-1.68	0.11	40.95
A4C6-Cu2	97.49	-3.28	1.35	1.11	49.88
A6C4-Cu2	98.22	-1.64	3.72	4.83	49.76
A8C2-Cu2	98.74	-1.48	3.24	5.58	62.78
A10C0-Cu2	98.09	-2.21	6.45	10.11	97.20
A0C10-G2Cu2	97.11	-2.21	14.43	3.88	14.43
A2C8-G2Cu2	92.59	-0.38	43.64	18.73	43.64
A4C6-G2Cu2	92.21	-0.87	80.23	25.13	80.23
A6C4-G2Cu2	91.26	-0.11	71.87	35.91	71.87
A8C2-G2Cu2	91.62	-0.37	91.88	36.20	91.88
A10C0-G2Cu2	96.80	-2.18	93.53	38.29	93.53
A0C10-G5Cu2	97.64	-3.47	0.02	5.66	30.31
A2C8-G5Cu2	93.57	-2.53	7.70	24.74	39.44
A4C6-G5Cu2	92.54	-2.38	14.63	25.03	41.35
A6C4-G5Cu2	88.73	-1.56	21.36	26.12	69.15
A8C2-G5Cu2	93.50	-1.67	13.86	38.75	86.23
A10C0-G5Cu2	87.26	-0.89	26.56	46.61	94.35

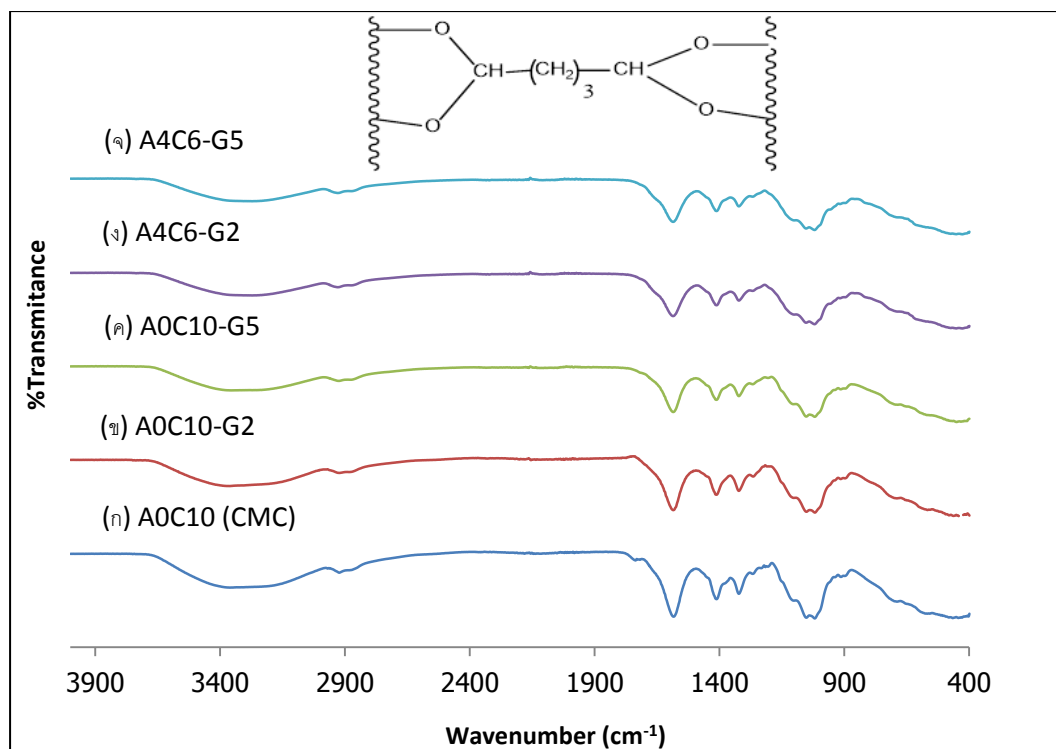
4.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของไฮโดรเจลด้วย FTIR

ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของอัลจิเนต/CMC ไฮโดรเจลด้วยเทคนิค FTIR แสดงดังรูปที่ 4.3- 4.5 สเปกตรัมของอัลจิเนตไฮโดรเจล (A10C0) ในรูปที่ 4.3 (ก) ปรากฏพีกที่ตำแหน่งเลขคลื่น 3380, 1581 และ 1013 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีกเอกลักษณ์ของหมู่ O-H, C=O และ C-O-C ตามลำดับ ในขณะที่สเปกตรัมของ CMC ไฮโดรเจล (A0C10) ในรูปที่ 4.3 (ง) ปรากฏพีกตำแหน่งเลขคลื่น 3340, 2836, 1576, 1315 และ 1012 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีกเอกลักษณ์ของหมู่ -O-H, $-\text{CH}_2$, $-\text{C}=\text{O}$, $-\text{C}-\text{H}$ และ C-O-C ตามลำดับ เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของอัลจิเนต และ CMC ในรูปที่ 4.3 (ข-ค) จะปรากฏพีกของทั้งอัลจิเนตและ CMC ขึ้นที่ตำแหน่งต่างของพอลิเมอร์ทั้งสอง เพื่อแสดงให้เห็นว่ามีทั้งอัลจิเนต และ CMC อยู่ในไฮโดรเจล



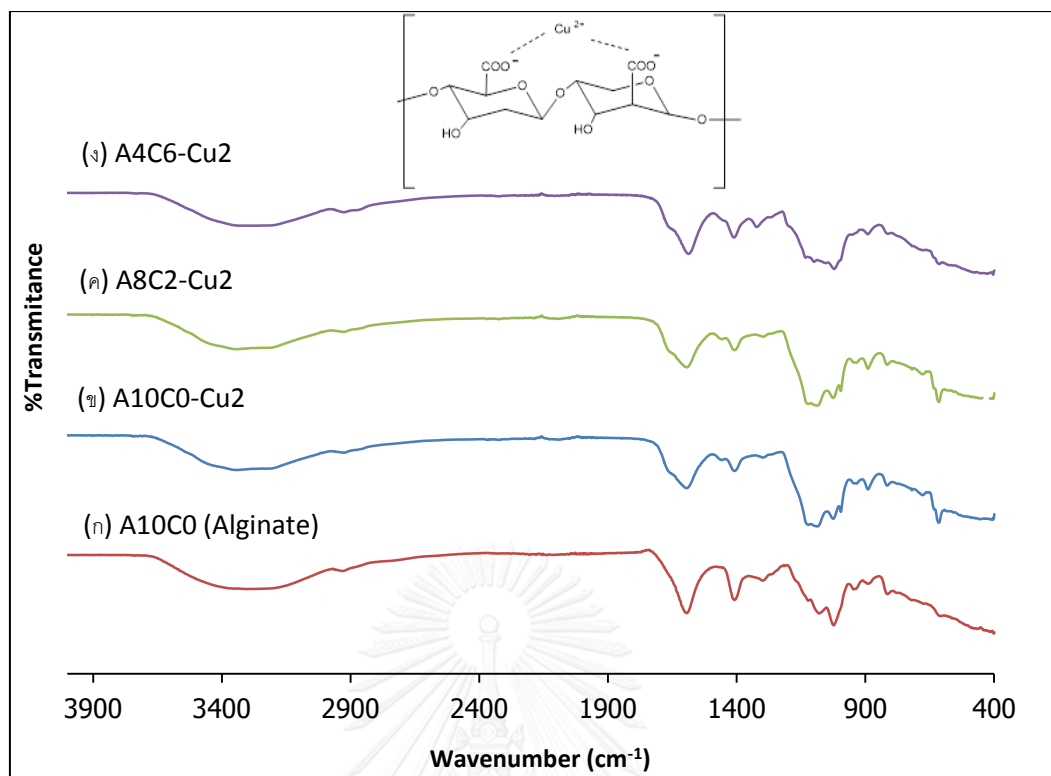
รูปที่ 4.3 FTIR สเปกตรัมของไฮโดรเจล (ก) CMC (ข) อัลจิเนต/CMC ที่อัตราส่วน 2:8 (ค) อัลจิเนต/CMC ที่อัตราส่วน 8:2 (ง) อัลจิเนต

รูปที่ 4.4 แสดง FTIR สเปกตรัมของไฮโดรเจลที่ผ่านการเชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ พบว่าสเปกตรัมมีการเปลี่ยนแปลงโดยปรากฏพีกของ $-\text{CH}_2$ stretching เป็นจำนวนสองพีกที่ 2892 cm^{-1} และ 2827 cm^{-1} และมีการเลื่อนตำแหน่งพีกของ C=O stretching แบบ symmetric และ asymmetric จาก 1576 cm^{-1} เป็น 1574 cm^{-1} และ 1402 cm^{-1} เป็น 1400 cm^{-1} ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับ CMC ไฮโดรเจลแสดงให้เห็นว่ามีกลูตารัลดีไฮด์ที่ใช้เป็นสารเชื่อมขวางอยู่ในไฮโดรเจล [35]



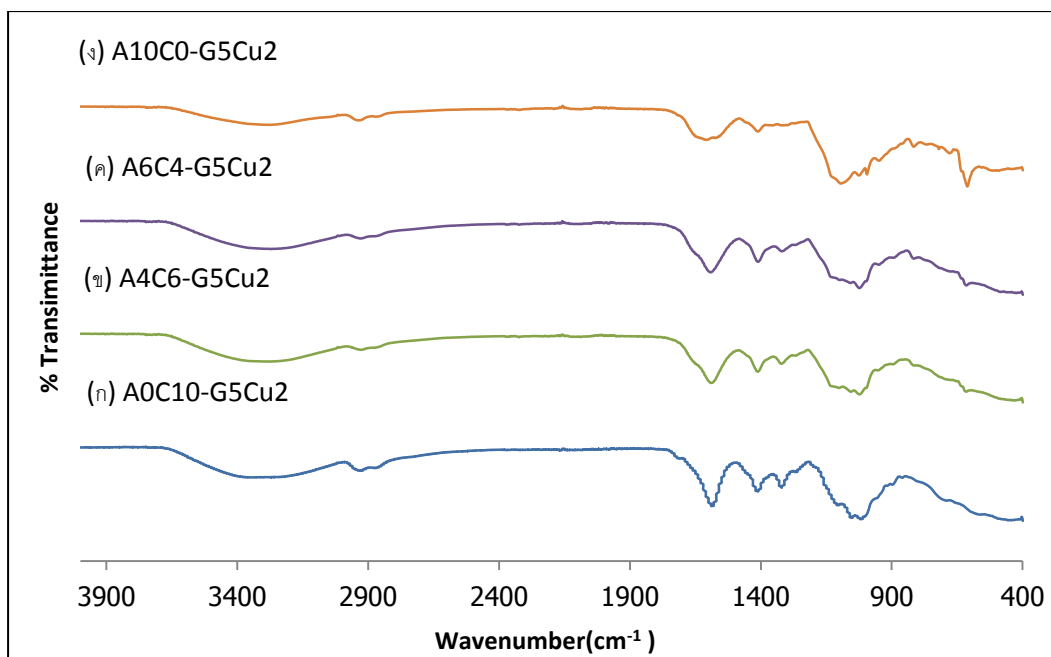
รูปที่ 4.4 FTIR สเปกตรัมของไฮโดรเจล (ก) CMC (ข) CMC ที่เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก (ค) CMC ที่เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก (ง) อัลจิเนต/CMC ที่เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก (จ) CMC ที่เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

สำหรับ FTIR สเปกตรัมของไฮโดรเจลที่ผ่านการเชื่อมขวางด้วยคอปเปอร์ซัลเฟต ที่แสดงดังรูปที่ 4.5 พบว่าเมื่อปริมาณอัลจิเนตสูงขึ้น มีการเปลี่ยนตำแหน่งพีคของ $\text{C}=\text{O}$ stretching แบบ symmetric และ asymmetric จาก 1585 cm^{-1} เป็น 1573 cm^{-1} และ 1396 cm^{-1} เป็น 1379 cm^{-1} ตามลำดับ และเกิดพีคของ $\text{C}-\text{H}$ stretching ที่ 1091 cm^{-1} แสดงให้เห็นว่ามีคอปเปอร์ไอออนที่ใช้เป็นสารเชื่อมขวางอยู่ในไฮโดรเจล [37]



รูปที่ 4.5 FTIR สเปกตรัมของ (ก) อัลจิเนต (ข) อัลจิเนตที่ (ค) อัลจิเนต/CMC ที่อัตราส่วน 8:2 (ง) อัลจิเนต/CMC ที่อัตราส่วน 4:6 ที่เชื่อมขวางด้วยคอปเปอร์ซัลเฟต 0.02 โมลลาร์ ตามลำดับ

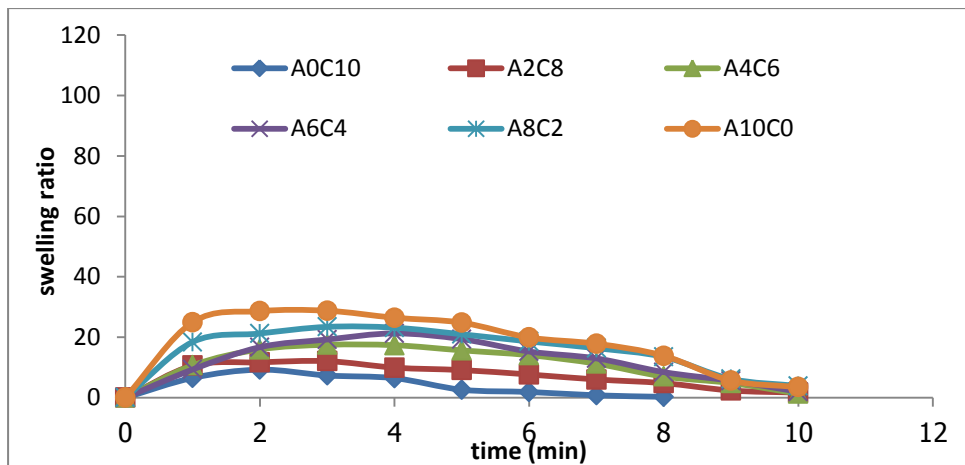
สำหรับ FTIR สเปกตรัมของไฮโดรเจลที่ผ่านการเชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ร่วมกับคอปเปอร์ซัลเฟต ที่แสดงดังรูปที่ 4.6 พบว่าเมื่อปริมาณอัลจิเนตสูงขึ้น มีการเปลี่ยนตำแหน่งพีคของ C=O stretching แบบ symmetric และ asymmetric จาก 1585 cm^{-1} เป็น 1573 cm^{-1} และ 1396 cm^{-1} เป็น 1379 cm^{-1} ตามลำดับ และเกิดพีคของ C-H stretching ที่ 1091 cm^{-1} เป็นการยืนยันการเกิดพันธะไอออนิกกับหมู่คาร์บอกซิลของอัลจิเนต และเมื่อปริมาณ CMC สูงขึ้นมีการเปลี่ยนแปลงโดยปรากฏพีคของ $-\text{CH}_2$ stretching เป็นจำนวนสองพีคที่ 2892 cm^{-1} และ 2827 cm^{-1} และมีการเลื่อนตำแหน่งพีคของ C=O stretching แบบ symmetric และ asymmetric จาก 1576 cm^{-1} เป็น 1574 cm^{-1} และ 1402 cm^{-1} เป็น 1400 cm^{-1} ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่ามีคอปเปอร์ไอออนและกลูตารัลดีไฮด์ที่ใช้เป็นสารเชื่อมขวางอยู่ในไฮโดรเจล



รูปที่ 4. 6 FTIR สเปกตรัมของ (ก) CMC (ข) อัลจิเนต/CMC ที่อัตราส่วน 4:6 (ค) อัลจิเนต/CMC ที่อัตราส่วน 6:4 (ง) อัลจิเนต ตามลำดับที่เชื่อมขวางด้วยกลูตาร์ลดีไฮด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และคอปเปอร์ซัลเฟต 0.02 โมลลาร์

4.3 พฤติกรรมการบวมตัว

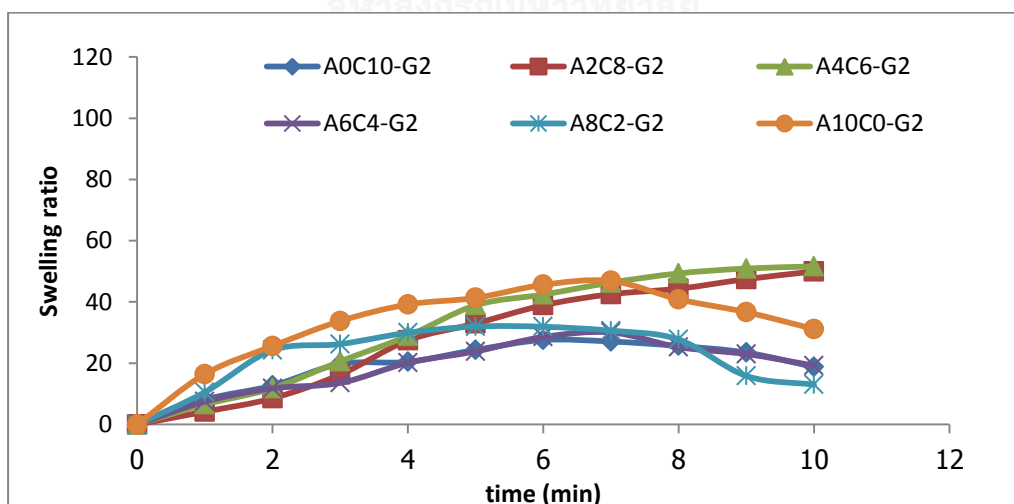
พฤติกรรมการบวมตัวในน้ำกลั่นของอัลจิเนต/CMC ไฮโดรเจลที่ไม่ผ่านการเชื่อมขวางที่อุณหภูมิ 25 °C ที่เวลาต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.7 พบว่าอัลจิเนต/CMC ไฮโดรเจลที่ไม่มีการเชื่อมขวางทุกสูตรมีค่าการบวมตัวสูงสุดเพียง 2- 4 นาทีจากนั้นไฮโดรเจลจะเริ่มเกิดการละลายน้ำออกมาบางส่วนโดยสูตรที่มีอัตราส่วนของอัลจิเนต/CMC สูง จะมีค่าการบวมตัวและเวลาในการบวมตัวสูงสุดมากกว่าสูตรที่มีอัตราส่วนของอัลจิเนต/CMC ต่ำ เนื่องจาก CMC มีความสามารถในการละลายน้ำได้ดีกว่าอัลจิเนต ทำให้เกิดการละลายของ CMC ออกมาก่อน แต่หลังจาก 4 นาที น้ำที่เพิ่มมากขึ้นภายในฟิล์มจะทำให้โมเลกุลของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดเกิดการละลายออก เนื่องจากน้ำเข้าไปแทรกระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ของทั้งอัลจิเนตและ CMC ทำให้พอลิเมอร์ทั้งสองละลายออกมา



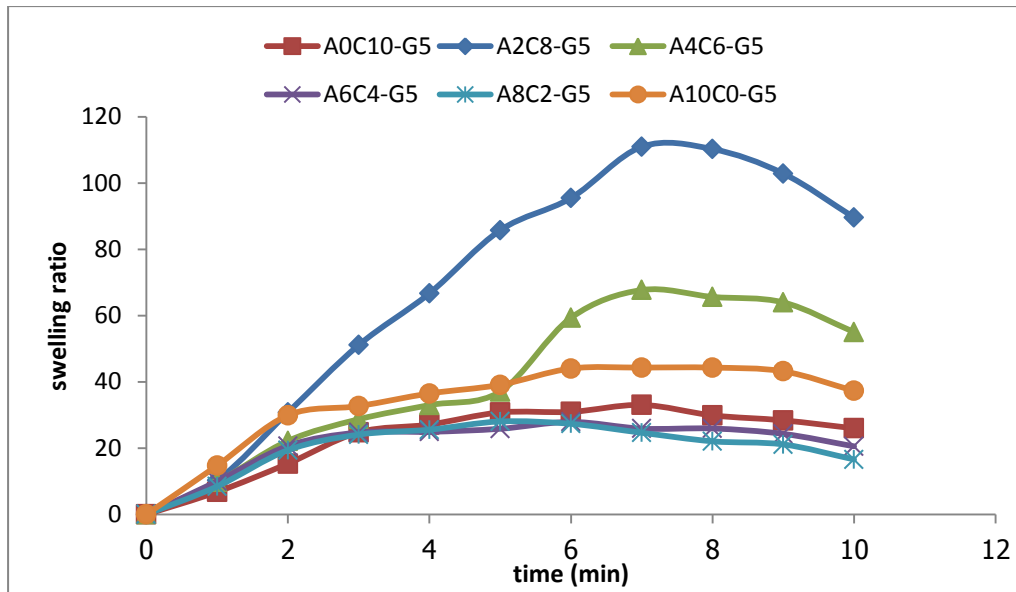
รูปที่ 4. 7 พฤติกรรมการบวมตัวในน้ำกลั่นของอัลจินต/CMC ไฮโดรเจลที่ไม่ผ่านการเชื่อมขวางที่อุณหภูมิ 25°C

4.3.1 ผลของการเชื่อมขวางทางเคมีด้วยกลูตารัลดีไฮด์

การบวมตัวของอัลจินต/CMC ไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ในน้ำกลั่นอุณหภูมิ 25°C ดังรูปที่ 4.8-4.9 พบว่ามีค่าการบวมตัวสูงสุดเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับฟิล์มที่ไม่มีการเชื่อมขวาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งไฮโดรเจลสูตรที่มีปริมาณ CMC สูง ในสูตร A2C8-G2 โดยมีค่าการบวมตัวสูงสุดเพิ่มขึ้นจาก 10 เท่าเป็น 50 เท่า แสดงให้เห็นว่าฟิล์มที่มีการเชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์สามารถต้านทานการละลายน้ำได้ดีขึ้น



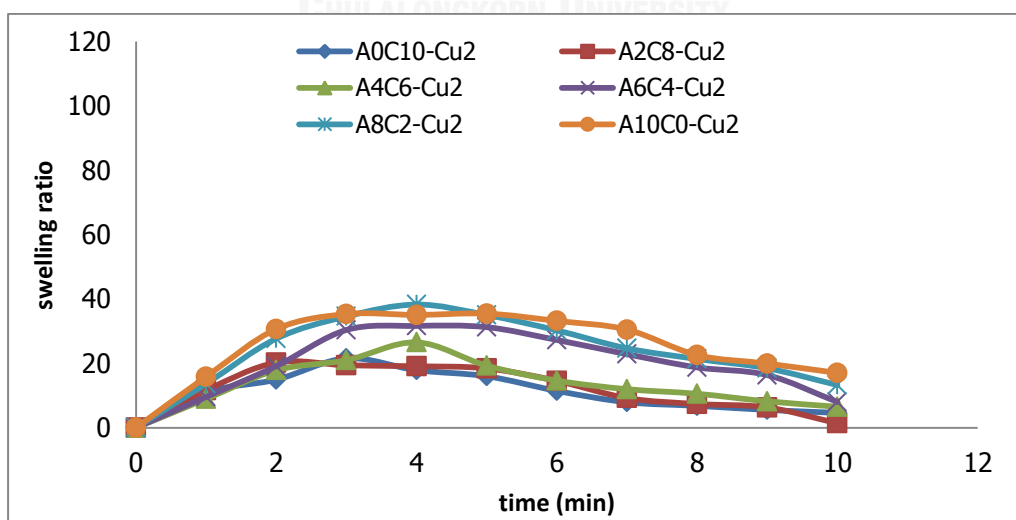
รูปที่ 4.8 พฤติกรรมการบวมตัวของอัลจินต/CMC ไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ในน้ำกลั่น 25°C



รูปที่ 4.9 พฤติกรรมการบวมตัวของอัลจินเนต/CMC ไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในน้ำกลั่น 25°C

4.3.2 ผลของการเชื่อมขวางทางประจุด้วยคอปเปอร์ซัลเฟต

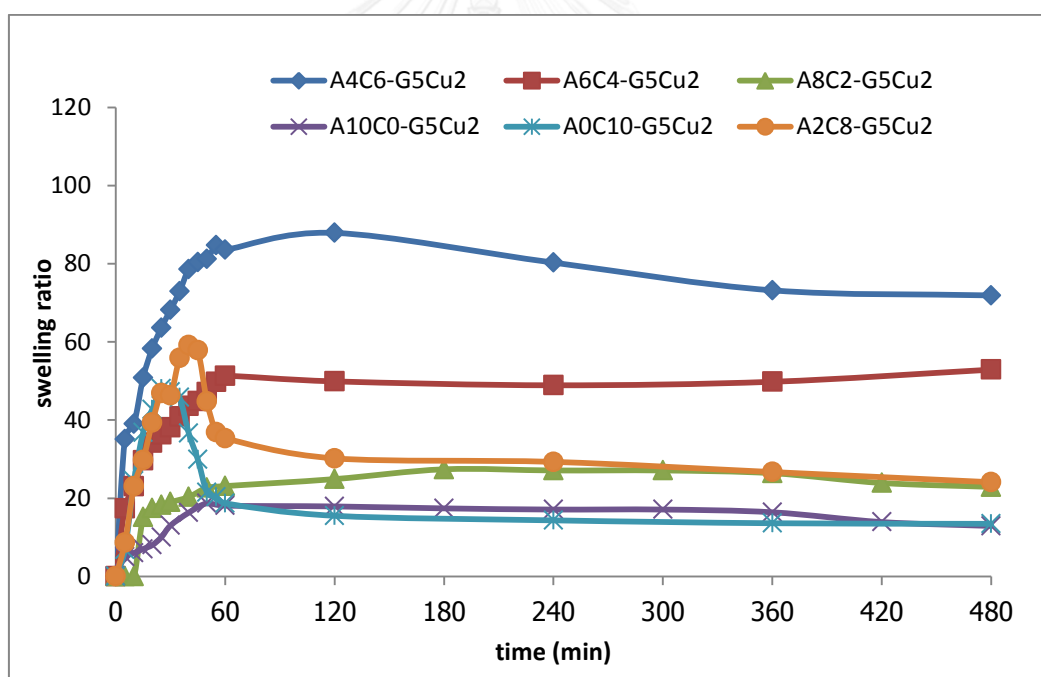
การบวมตัวของอัลจินเนต/CMC ไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางคอปเปอร์ซัลเฟตในน้ำกลั่นอุณหภูมิ 25°C แสดงดังรูปที่ 4.10 พบว่ามีค่าการบวมตัวสูงสุดสูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับฟิล์มที่ไม่มีการเชื่อมขวาง แสดงให้เห็นว่าฟิล์มที่มีการเชื่อมขวางด้วยคอปเปอร์ซัลเฟตสามารถต้านทานการละลายน้ำได้ดีขึ้น คาดว่าเป็นผลมาจากการเกิดแรงทางประจุระหว่างคอปเปอร์ไอออนกับหมู่คาร์บอกซิเลตของอัลจินเนตแบบไดวาเลนต์ได้จึงทำให้เกิดโครงร่างแหตาข่ายขึ้นภายในโครงสร้างของไฮโดรเจล



รูปที่ 4.10 พฤติกรรมการบวมตัวของอัลจินเนต/CMC ไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยคอปเปอร์ซัลเฟต 0.02 โมลลาร์ ในน้ำกลั่น 25°C

4.7.3 ผลของการเชื่อมขวางทางเคมีด้วยกลูตารัลดีไฮด์ร่วมกับการเชื่อมขวางทางประจุด้วยคอปเปอร์ซัลเฟต

การบวมตัวของอัลจิเนต/CMC ไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์และคอปเปอร์ซัลเฟตในน้ำกลั่นอุณหภูมิ 25°C แสดงดังรูปที่ 4.11 พบว่ามีค่าการบวมตัวและเวลาในการบวมตัวสูงสุดเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับฟิล์มที่ไม่มีการเชื่อมขวาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งไฮโดรเจลสูตรที่มีปริมาณ CMC สูง ในสูตร A4C6-G5Cu2 โดยมีค่าการบวมตัวสูงสุดประมาณ 90 เท่าและระยะเวลาในการบวมตัวนานถึง 480 นาที แสดงให้เห็นว่าฟิล์มที่มีการเชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ร่วมกับคอปเปอร์ไอออนสามารถต้านทานการละลายน้ำได้ดีขึ้น โดยการเชื่อมขวางเกิดขึ้นที่หมู่ไฮดรอกซิลของ CMC กับกลูตารัลดีไฮด์ร่วมกับการเกิดการเชื่อมขวางระหว่างหมู่คาร์บอกซิเลตของอัลจิเนตกับคอปเปอร์ไอออน เมื่อปริมาณอัลจิเนตมากขึ้นพบว่าค่าการบวมตัวสูงสุดลดลง เนื่องจากมีการเชื่อมขวางทางประจุระหว่างอัลจิเนตกับหมู่คาร์บอกซิเลตทำให้ภายในโครงสร้างของไฮโดรเจลหนาแน่นจึงส่งผลให้น้ำเข้าไปในโครงสร้างได้น้อย ค่าการบวมตัวจึงลดลง



รูปที่ 4.11 พฤติกรรมการบวมตัวของอัลจิเนต/CMC ไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ร่วมกับสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 0.02 โมลลาร์ ในน้ำกลั่น 25°C

4.4 ปริมาณร้อยละของของแข็งที่เหลือจากการบะลายน้ำของไฮโดรเจล

จากผลการทดสอบการหาปริมาณของแข็งที่เหลือจากการละลายน้ำ (% solid remain) ของอัลจิเนต/CMC ไฮโดรเจล โดยใช้ปริมาณสารเชื่อมขวางที่แตกต่างกันคือ กลูตารัลดีไฮด์ความ

เข้มข้นร้อยละ 2 และ 5 โดยน้ำหนัก และคอปเปอร์ซัลเฟตความเข้มข้น 0.02 โมลลาร์ % ของแข็งที่เหลือจากการละลายน้ำของอัลจินต/CMC ไฮโดรเจล ที่เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และคอปเปอร์ซัลเฟตความเข้มข้น 0.02 โมลลาร์ (G5Cu2) มีค่าสูงกว่าไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก และคอปเปอร์ซัลเฟตความเข้มข้น 0.02 โมลลาร์ และพบว่าเมื่ออัตราส่วนของอัลจินตเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ % solid remain เพิ่มขึ้น จึงคาดว่าโครงสร้างของอัลจินต/CMC ไฮโดรเจลเกิดการเชื่อมขวางระหว่างกลูตารัลดีไฮด์กับหมู่ไฮดรอกซิลของ CMC ร่วมกับการเกิดการเชื่อมขวางระหว่างคอปเปอร์ไอออนกับหมู่คาร์บอกซิลของอัลจินต ส่งผลให้ความสามารถในการต้านการละลายน้ำของไฮโดรเจลที่มีอัตราส่วนของอัลจินตสูง มีค่าของแข็งที่เหลือมากที่สุด ในสูตร A10C0-G5Cu2 เท่ากับ 21.8 % ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4. 2 ปริมาณร้อยละของของแข็งที่เหลือจากการละลายน้ำ (% solid remain) ของอัลจินต/CMC ไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์และคอปเปอร์ซัลเฟตในอัตราส่วนต่างๆกัน (กลูตารัลดีไฮด์ความเข้มข้น ร้อยละ 2 และ 5 โดยน้ำหนักและคอปเปอร์ซัลเฟต 0.02 โมลลาร์)

สูตรของไฮโดรเจล	% Solid remain	
	GA 2%W/W และ Cu 0.02 molar	GA 5%W/W และ Cu 0.02 molar
A0C10	0.0	1.9
A2C8	1.5	3.9
A4C6	4.0	11.0
A6C4	6.6	13.1
A8C2	11.0	15.9
A10C0	17.8	21.8

4.5 สัณฐานวิทยา

การตรวจสอบสัณฐานวิทยาของอัลจินต/CMC ไฮโดรเจลโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ที่กำลังขยาย 2000 เท่า ได้ใช้ชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบการดึงยึดไฮโดรเจลมาตรวจสอบเพื่อดูความเป็นเนื้อเดียวกันของไฮโดรเจลผสมรูปที่ 4.12 แสดงผลภาพถ่าย SEM ภาพตัดขวางของอัลจินตไฮโดรเจล และ CMC ไฮโดรเจล ที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันในขณะที่อัลจินต/CMC ไฮโดรเจลที่อัตราส่วนต่างๆ มีลักษณะผิวที่ขรุขระ ไม่มีความเป็นเนื้อเดียวกันแสดงถึงความไม่เข้ากันของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดโดยเฉพาะเมื่อปริมาณของอัลจินตและ CMC ผสมใกล้เคียงกัน

4.5.1 ผลของการเชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์

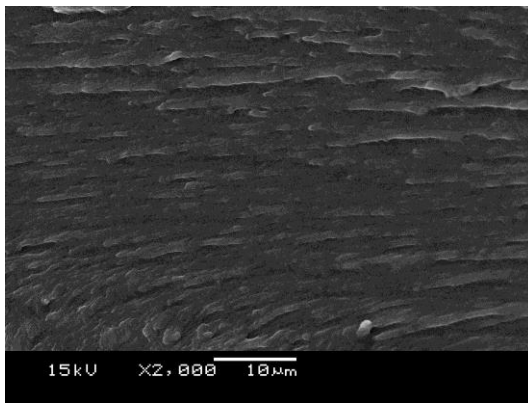
สัณฐานวิทยาของอัลจินต/CMC ไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยด้วยกลูตารัลดีไฮด์ร้อยละ 2 และ 5 โดยน้ำหนักแสดงดังรูปที่ 4.13 และ 4.14 พบว่าบริเวณที่มีการดึงขาดของอัลจินต/CMC ไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์มีผิวค่อนข้างขรุขระเพิ่มขึ้นและพบความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดเพิ่มมากขึ้น โครงสร้างของไฮโดรเจลเกิดรูพรุนขึ้นซึ่งคาดว่าเกิดการเชื่อมขวางทางระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลกับกลูตารัลดีไฮด์ โดยพบว่าเกิดรูพรุนเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณความเข้มข้นของกลูตารัลดีไฮด์เพิ่มสูงขึ้น [37]

4.5.2 ผลของการเชื่อมขวางด้วยคอปเปอร์ซัลเฟต

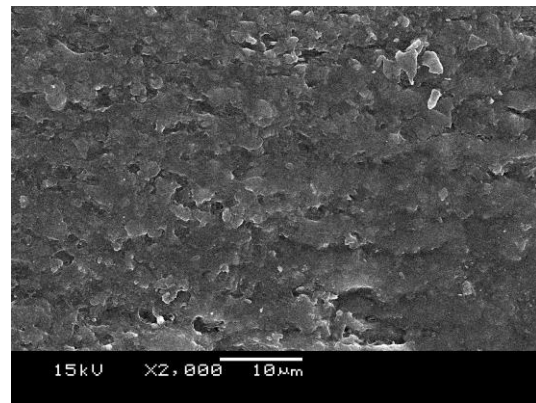
สัณฐานวิทยาของอัลจินต/CMC ไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยคอปเปอร์ซัลเฟต 0.02 โมลลาร์แสดงดังรูปที่ 4.15 พบว่าบริเวณที่มีการดึงขาดของอัลจินต/CMC ไฮโดรเจลมีผิวที่ขรุขระมากขึ้น นอกจากนี้ยังไม่พบการแยกเฟสระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสอง โครงสร้างของไฮโดรเจลเกิดรูพรุนเพิ่มมากขึ้น ซึ่งแสดงถึงเกิดการเชื่อมขวางภายในโครงสร้างของไฮโดรเจลมีมากขึ้น และพบว่าเมื่ออัตราส่วนของอัลจินตเพิ่มขึ้นทำให้มีปริมาตรของรูพรุนเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการเชื่อมขวางระหว่างหมู่คาร์บอกซิเลตของอัลจินตกับคอปเปอร์ไอออน [37]

4.5.3 ผลของการเชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ร่วมกับคอปเปอร์ซัลเฟต

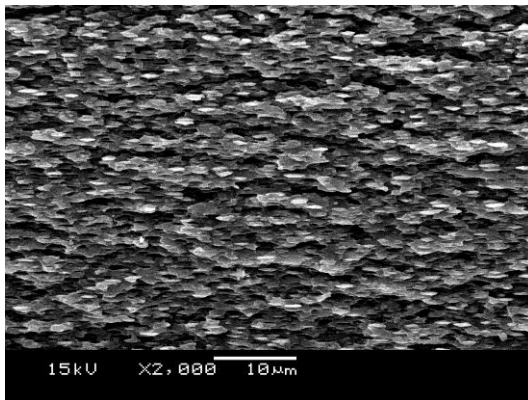
สัณฐานวิทยาของอัลจินต/CMC ไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยการเติมกลูตารัลดีไฮด์ร้อยละ 2 และ 5 โดยน้ำหนักร่วมกับคอปเปอร์ซัลเฟตความเข้มข้น 0.02 โมลลาร์ แสดงดังรูปที่ 4.16 และ 4.17 พบว่าบริเวณที่มีการดึงขาดของอัลจินต/CMC ไฮโดรเจลมีผิวขรุขระมากขึ้น และเกิดการเชื่อมขวางระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลกับกลูตารัลดีไฮด์ร่วมกับการเกิดการเชื่อมขวางระหว่างหมู่คาร์บอกซิเลตของอัลจินตกับคอปเปอร์ไอออน ภายในโครงสร้างของไฮโดรเจลอย่างหนาแน่นมากขึ้นจนทำให้รูพรุนมีขนาดเล็กลง



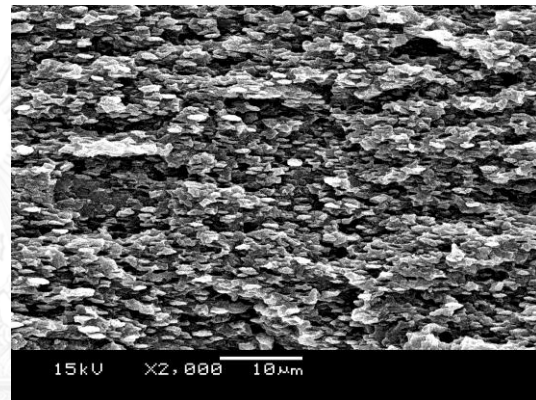
(1) A0C10



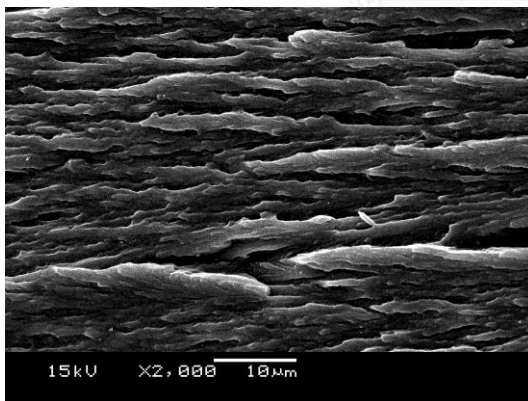
(2) A2C8



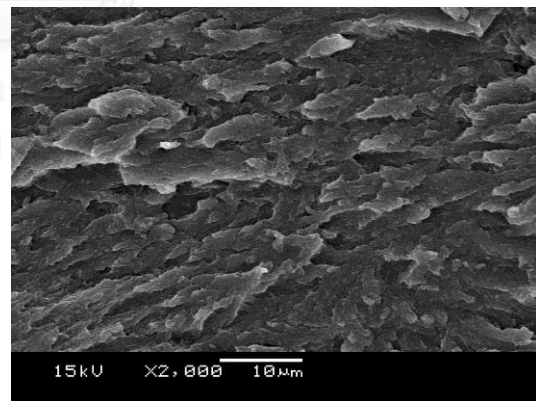
(3) A4C6



(4) A6C4

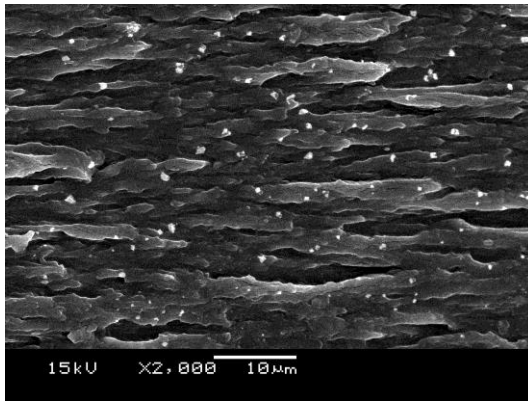


(5) A8C2

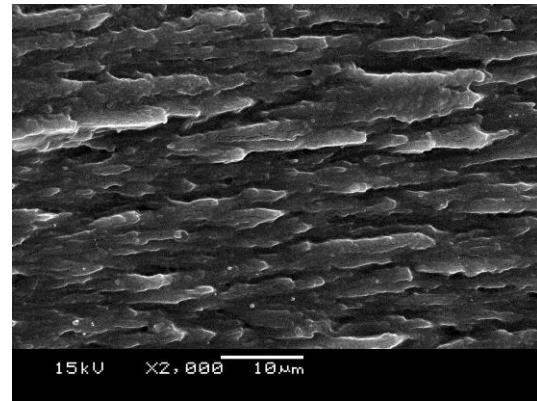


(6) A10C0

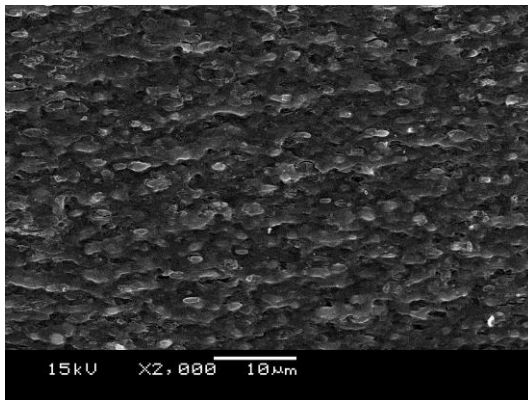
รูปที่ 4. 12 ภาพ SEM ของอัลจินต/CMC ไฮโดรเจลที่มีอัตราส่วนของอัลจินต/CMC ที่แตกต่างกัน



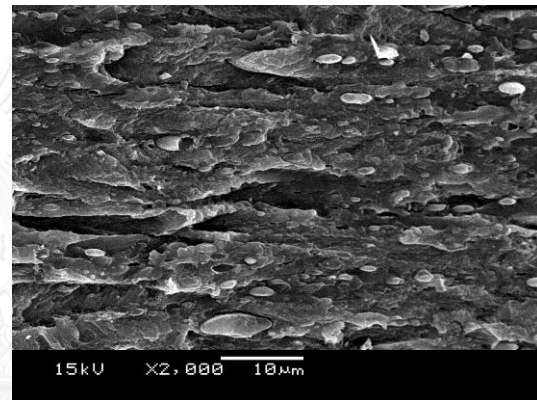
(7) A0C10-G2



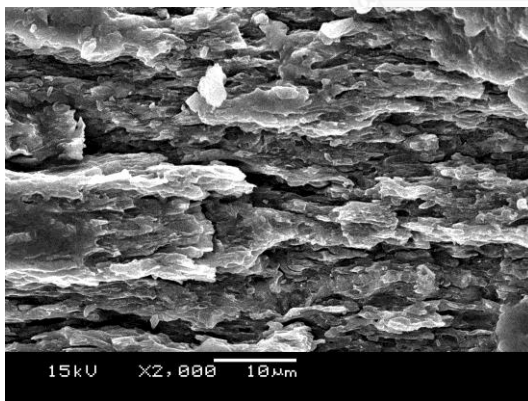
(8) A2C8-G2



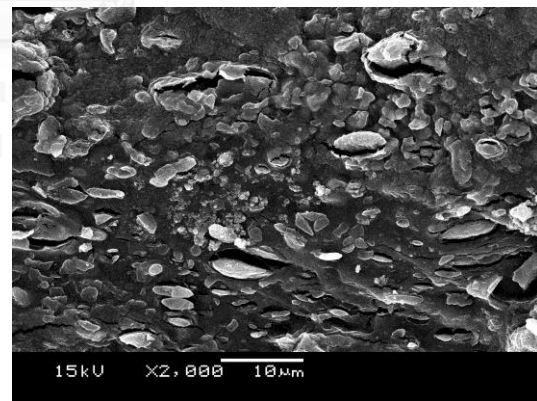
(9) A4C6-G2



(10) A6C4-G2

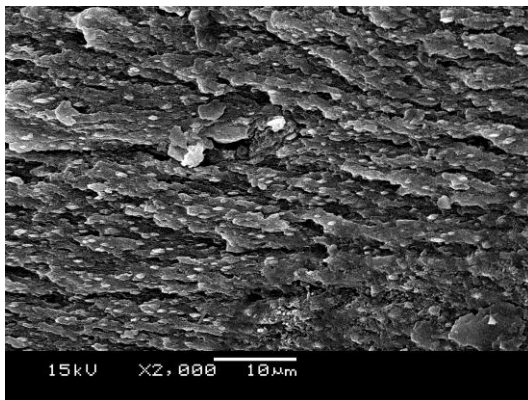


(11) A8C2-G2

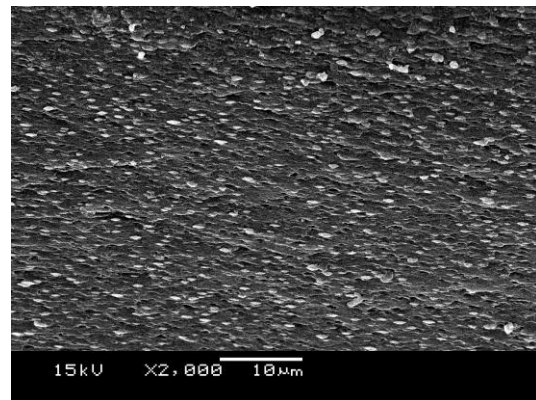


(12) A10C0-G2

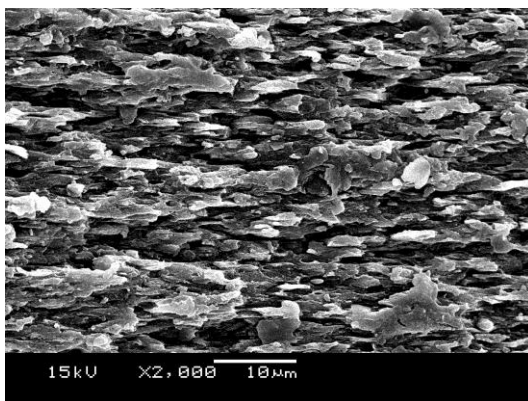
รูปที่ 4.13 ภาพ SEM ของอัลจินต/CMC ไฮโดรเจลที่มีอัตราส่วนของอัลจินต/CMC ที่แตกต่างกัน
เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก



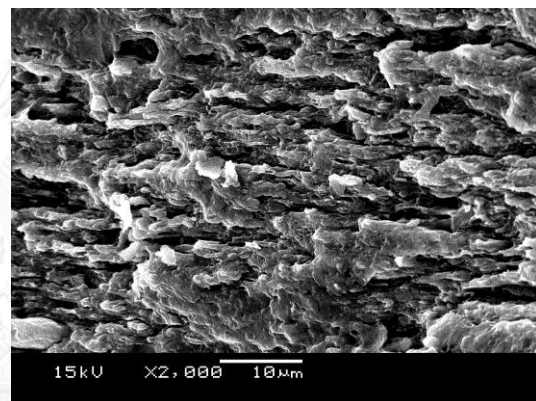
(13) A0C10-G5



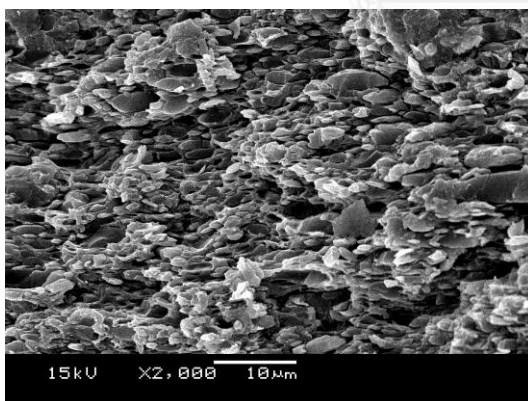
(14) A2C8-G5



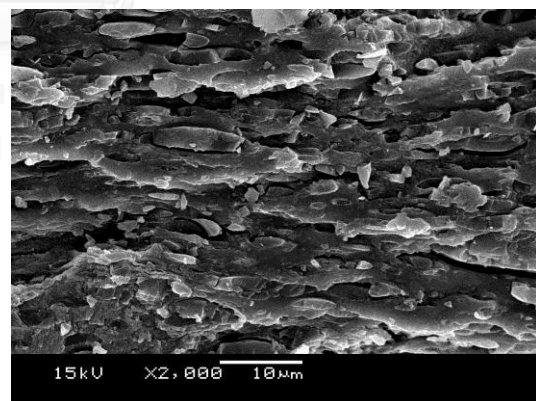
(15) A4C6-G5



(16) A6C4-G5

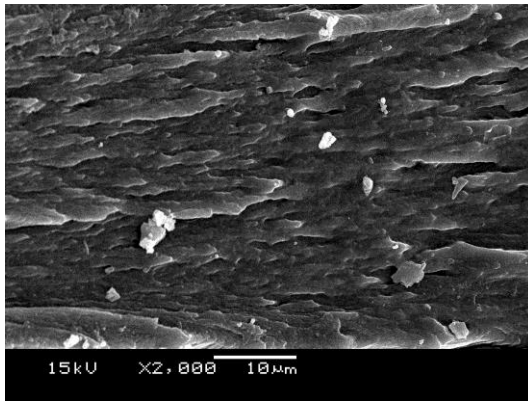


(17) A8C2-G5

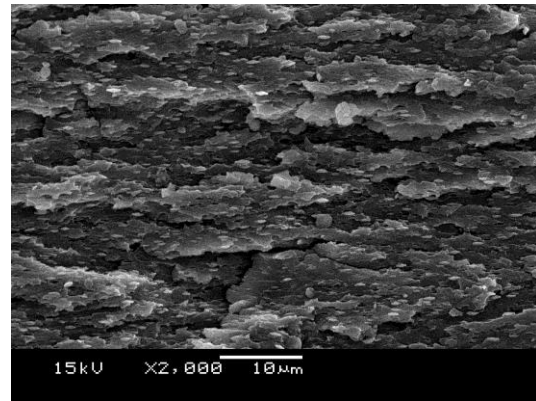


(18) A10C0-G5

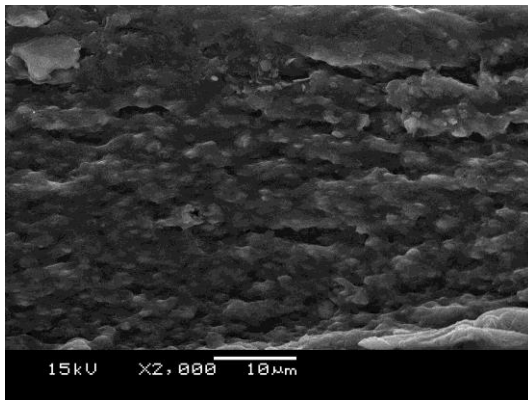
รูปที่ 4.14 ภาพ SEM ของอัลจินต/CMC ไฮโดรเจลที่มีอัตราส่วนของอัลจินต/CMC ที่แตกต่างกัน
เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก



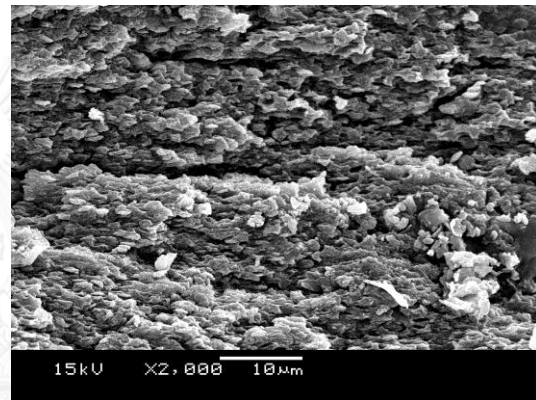
(19) A0C10-Cu2



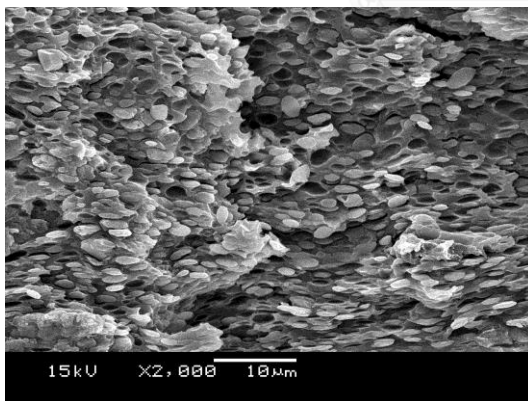
(20) A2C8-Cu2



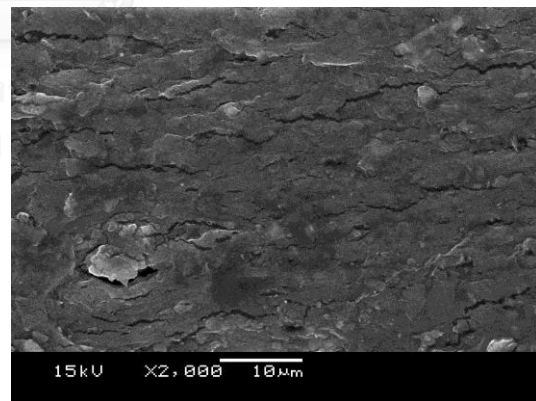
(21) A4C6-Cu2



(22) A6C4-Cu2

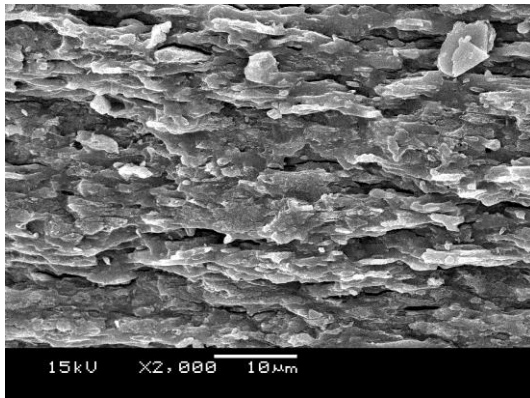


(23) A8C2-Cu2

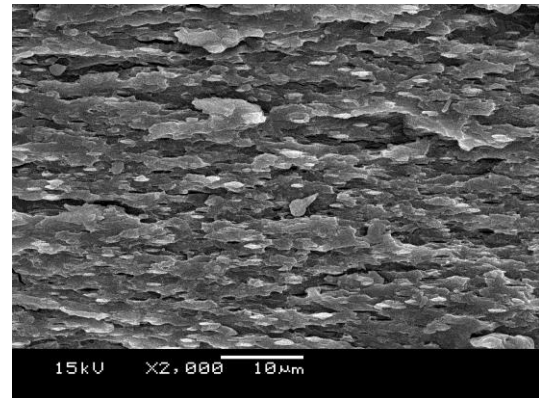


(24) A10C0-Cu2

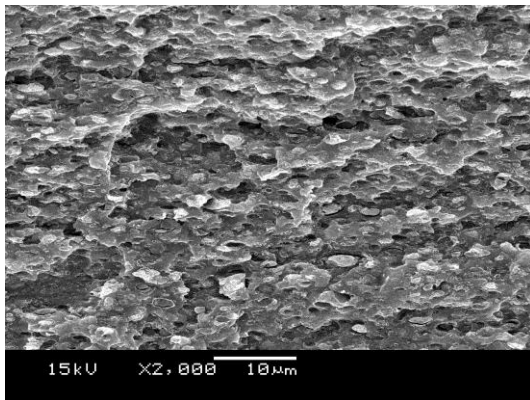
รูปที่ 4.15 ภาพ SEM ของอัลจินต/CMC ไฮโดรเจลที่มีอัตราส่วนของอัลจินต/CMC ที่แตกต่างกัน
เชื่อมขวางด้วยคอปเปอร์ซัลเฟต 0.02 โมลลาร์



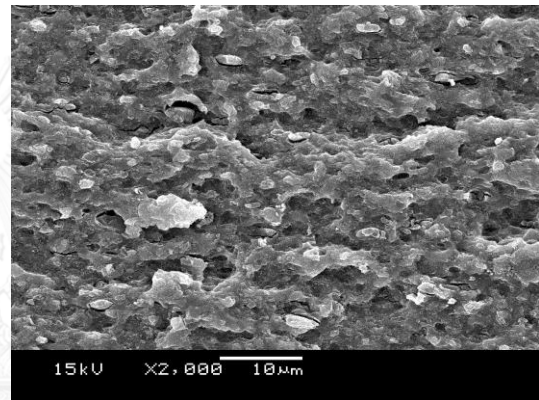
(25) A0C10-G2Cu2



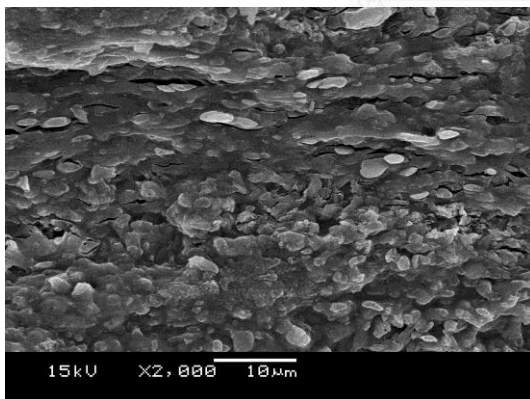
(26) A2C8-G2 Cu2



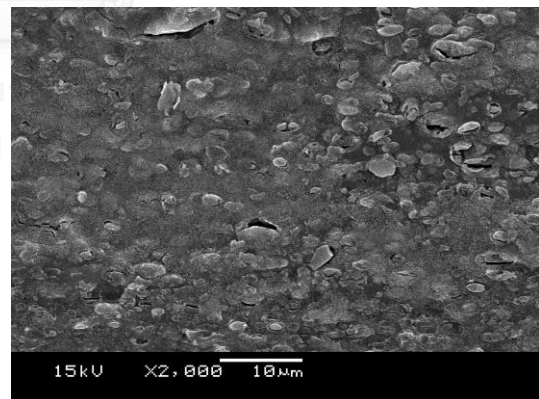
(27) A4C6-G2Cu2



(28) A6C4-G2Cu2

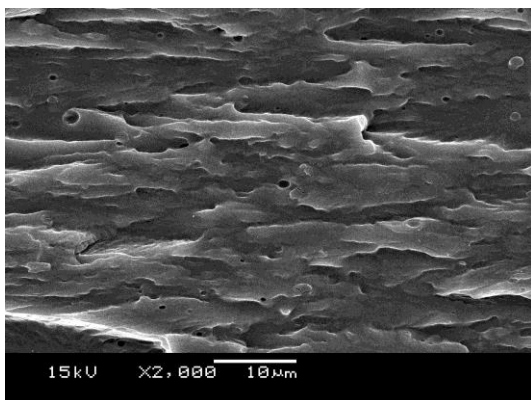


(29) A8C2-G2Cu2

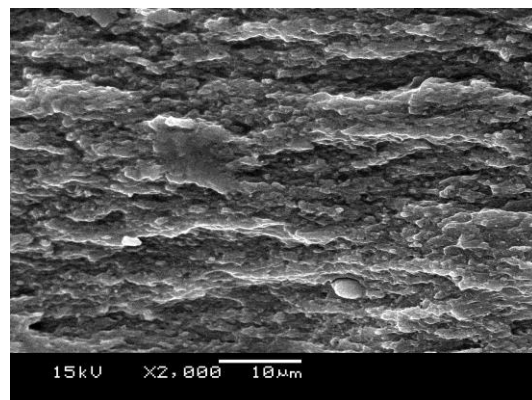


(30) A10C0-G2Cu2

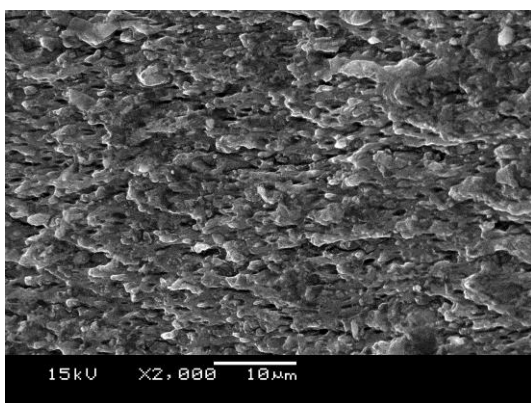
รูปที่ 4.16 ภาพ SEM ของอัลจินต/CMC ไฮโดรเจลที่มีอัตราส่วนของอัลจินต/CMC ที่แตกต่างกัน
เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ร้อยละ 2 โดยน้ำหนักและคอปเปอร์ซัลเฟต 0.02 โมลลาร์



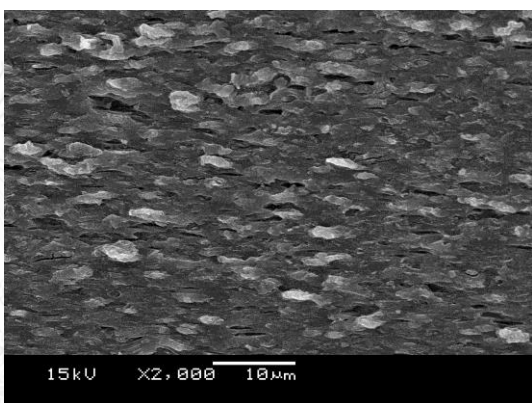
(31) A0C10-G5Cu2



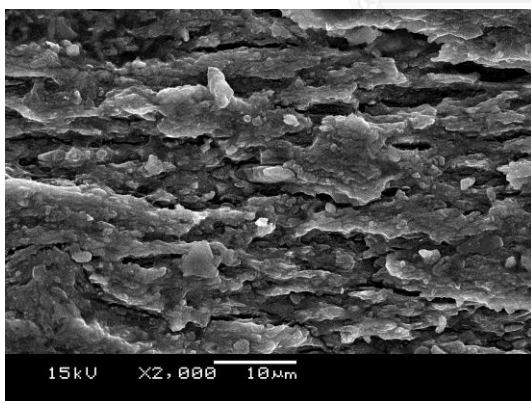
(32) A2C8-G5 Cu2



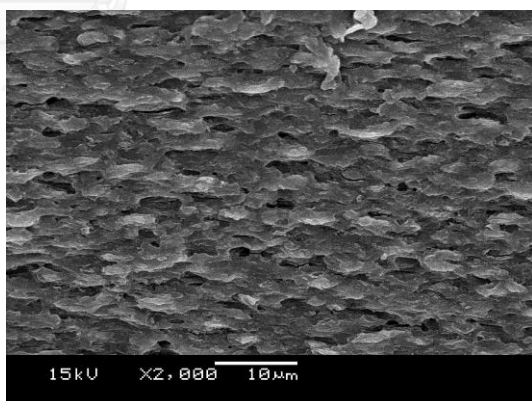
(33) A4C6-G5Cu2



(34) A6C4G5Cu2



(35) A8C2-G5Cu

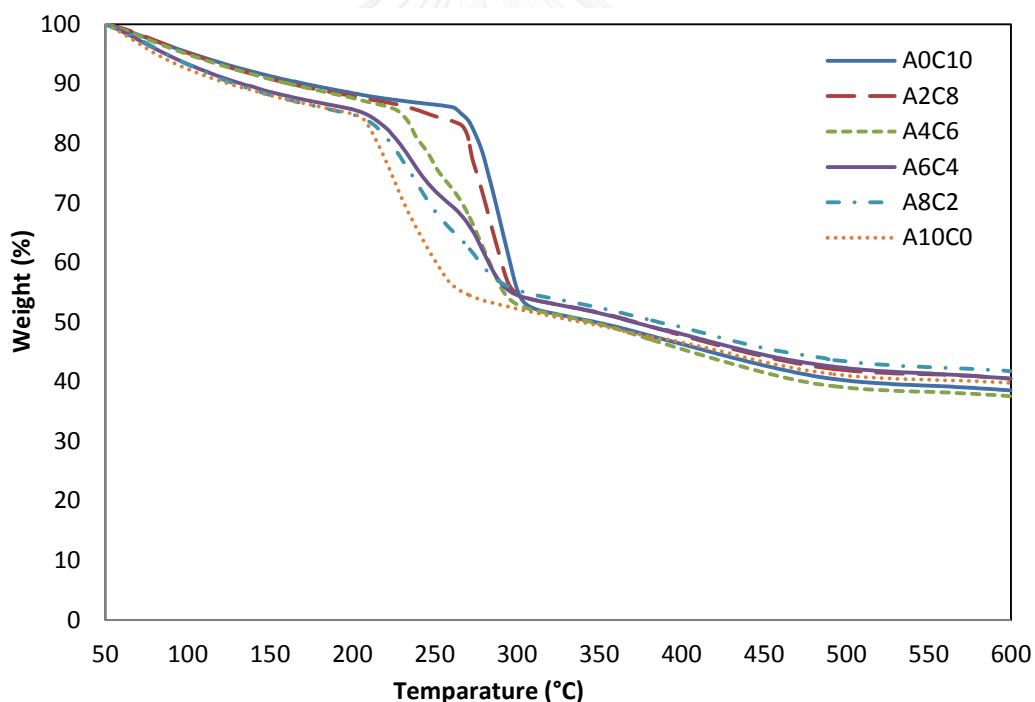


(36) A10C0-G5Cu2

รูปที่ 4.17 ภาพ SEM ของอัลจินต/CMC ไฮโดรเจลที่มีอัตราส่วนของอัลจินต/CMC ที่แตกต่างกัน เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักและคอปเปอร์ซัลเฟต 0.02 โมลลาร์

4.6 เสถียรภาพทางความร้อนของไฮโดรเจลด้วยเทคนิค TGA

เสถียรภาพทางความร้อนของอัลจินต/CMC ไฮโดรเจลในอัตราส่วนผสมต่างๆที่ไม่ผ่านการเชื่อมขวาง แสดงดังรูปที่ 4.18 และตารางที่ 4.3 พบว่าอัลจินต/CMC ไฮโดรเจลมีอุณหภูมิในการสลายตัว 3 ชั้น โดยชั้นแรกเป็นการระเหยน้ำในช่วงอุณหภูมิ 100-170 องศาเซลเซียส และการสลายตัวของหมู่คาร์บอกซิล หมู่ไฮดรอกซิลที่อุณหภูมิ 200-270 องศาเซลเซียสและมีการสลายตัวของอัลจินตและ CMC ในช่วงอุณหภูมิ 300-450 องศาเซลเซียส และในช่วงอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นช่วงของ Na_2CO_3 ซึ่งเป็นสารอนินทรีย์ที่สามารถทนอุณหภูมิได้สูง และพบว่า CMC ไฮโดรเจล (A0C10) มีเสถียรภาพทางความร้อนดีกว่าอัลจินตไฮโดรเจลดูได้จากอุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิสิ้นสุดการสลายตัวที่ต่ำที่สุดเท่ากับ 274.75 องศาเซลเซียสและ 309.81 องศา สำหรับไฮโดรเจลผสมระหว่างอัลจินตและ CMC ในอัตราส่วนผสมต่างๆที่ไม่ได้ผ่านการเชื่อมขวางพบว่ามีเสถียรภาพทางความร้อนอยู่ระหว่างอัลจินตไฮโดรเจลและ CMC ไฮโดรเจล

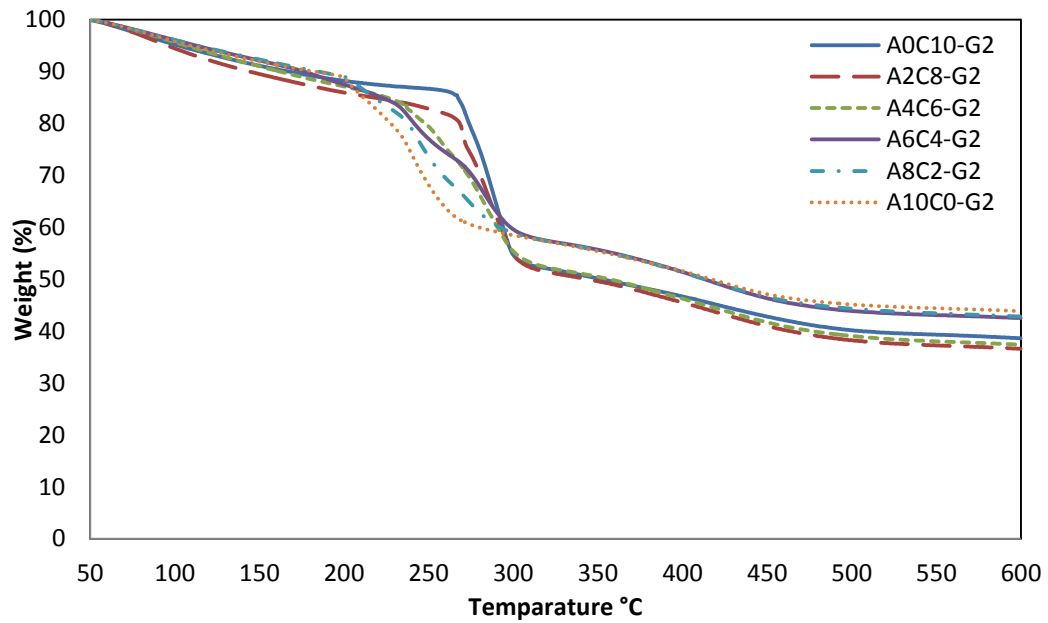


รูปที่ 4.18 TGA เทอร์โมแกรมของอัลจินต/CMC ไฮโดรเจลที่อัตราส่วนต่างๆที่ไม่ผ่านการเชื่อมขวาง

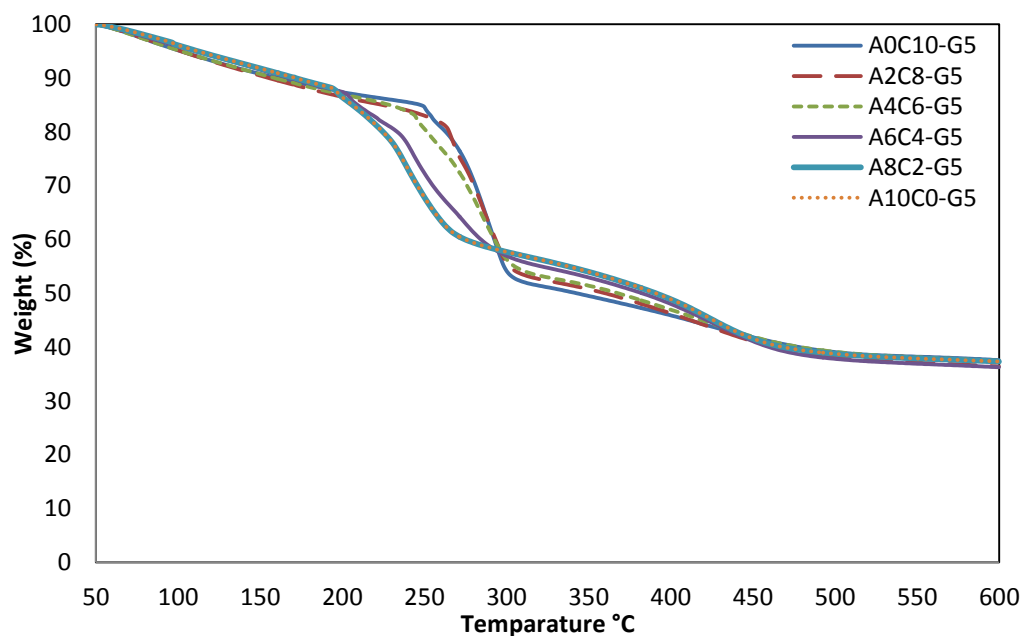
4.6.1 ผลของการใช้กลูตารัลดีไฮด์เป็นสารเชื่อมขวาง

เสถียรภาพทางความร้อนของอัลจินต/CMC ไฮโดรเจลในอัตราส่วนผสมต่างๆที่เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ร้อยละ 2 และ 5 โดยน้ำหนัก แสดงดังรูปที่ 4.19 และ 4.20 โดยพบว่าการใส่

กลูตารัลดีไฮด์เป็นสารเชื่อมขวางมีผลทำให้เสถียรภาพทางความร้อนเพิ่มสูงขึ้น โดยดูจากค่าอุณหภูมิการสลายตัวต่ำลงและปริมาณ char residue สูงขึ้นเล็กน้อย [41]

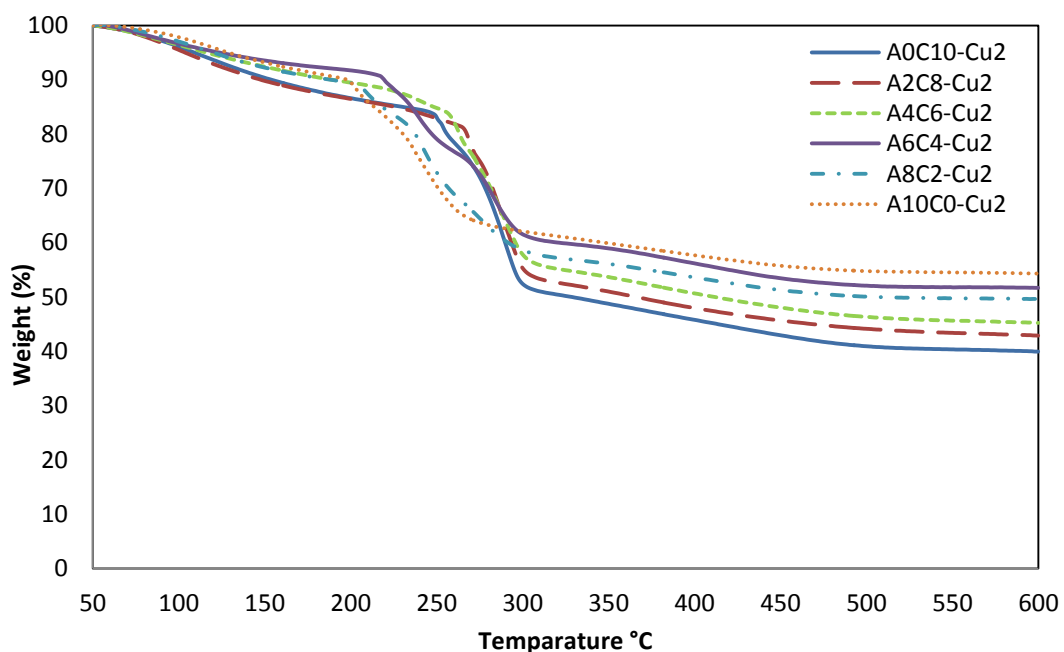


รูปที่ 4.19 TGA เทอร์โมแกรมของอัลจินต/CMC ไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก

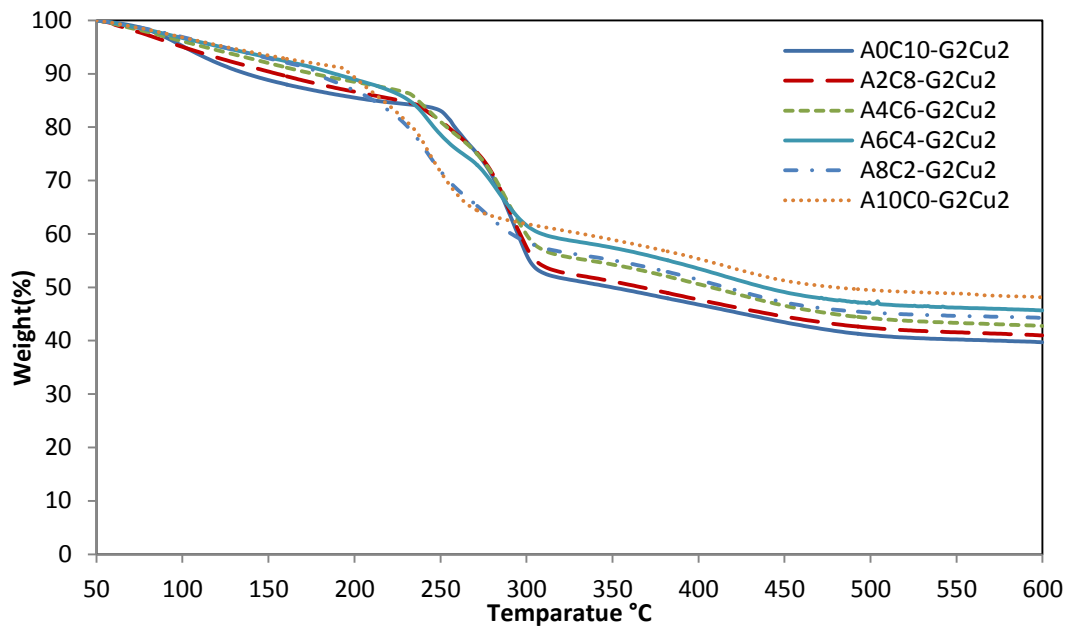


รูปที่ 4.20 TGA เทอร์โมแกรมของอัลจินต/CMC ไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

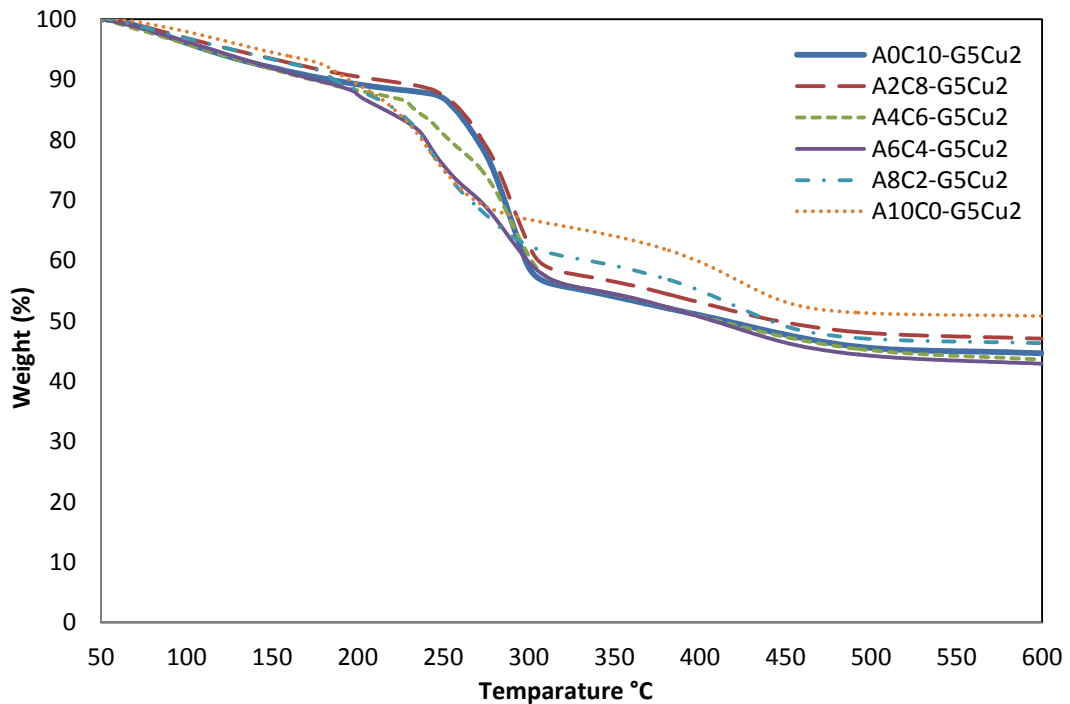
นอกจากนี้เสถียรภาพทางความร้อนของอัลจินेट/CMC ไฮโดรเจลในอัตราส่วนผสมต่างๆที่เชื่อมขวางด้วยคอปเปอร์ซัลเฟต หรือเชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ร่วมกับคอปเปอร์ซัลเฟต แสดงดังรูปที่ 4.21-4.23 ตามลำดับ พบว่ามีความสามารถในการทนการสลายตัวทางความร้อนได้ดีขึ้น โดยดูจากร้อยละของน้ำหนักที่หายไปและปริมาณ char residue ที่เหลือมีเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับอัลจินेट/CMC ไฮโดรเจลที่ไม่ผ่านการเชื่อมขวาง จึงคาดว่ากลูตารัลดีไฮด์และคอปเปอร์ซัลเฟตเป็นสารเชื่อมขวางร่วมกันทำให้โครงสร้างภายในไฮโดรเจลเกิดการเชื่อมขวางขึ้นทำให้ทนการสลายตัวทางความร้อนได้ดีขึ้น



รูปที่ 4.21 TGA เทอร์โมแกรมของอัลจินेट/CMC ไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยคอปเปอร์ซัลเฟต 0.02 โมลลาร์



รูปที่ 4.22 TGA เทอร์โมแกรมของอัลจินต/CMC ไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ร่วมกับคอปเปอร์ซัลเฟต 0.02 โมลลาร์



รูปที่ 4.23 TGA เทอร์โมแกรมของอัลจินต/CMC ไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ร่วมกับคอปเปอร์ซัลเฟต 0.02 โมลลาร์

ตารางที่ 4. 3 สมบัติทางความร้อนของอัลจินต/CMC ไฮโดรเจล

Formula	<i>Tonset</i> (°C)	<i>Tendset</i> (°C)	Char residue (%)
A0C10	274.75	309.81	38.54
A2C8	261.22	301.48	40.50
A4C6	246.74	309.11	37.57
A6C4	246.05	312.22	37.57
A8C2	218.94	298.83	41.77
A10C0	212.00	274.82	39.80
A0C10-G2	254.33	308.55	38.57
A2C8-G2	247.72	316.50	36.41
A4C6-G2	256.46	321.35	37.45
A6C4-G2	227.26	307.35	36.26
A8C2-G2	226.38	303.17	37.88
A10C0-G2	216.11	286.56	37.31
A0C10-G5	271.89	305.98	38.63
A2C8-G5	267.48	325.61	36.63
A4C6-G5	243.20	338.00	37.41
A6C4-G5	254.92	321.11	42.52
A8C2-G5	227.21	295.81	42.82
A10C0-G5	218.76	286.23	43.88
A0C10-Cu2	268.41	309.29	39.94
A2C8 -Cu2	256.01	305.35	42.87
A4C6- Cu2	255.78	305.35	42.87
A6C4 -Cu2	253.58	313.06	51.68
A8C2- Cu2	223.66	308.09	46.29
A10C0 -Cu2	217.39	274.69	54.31

ตารางที่ 4.3 (ต่อ)

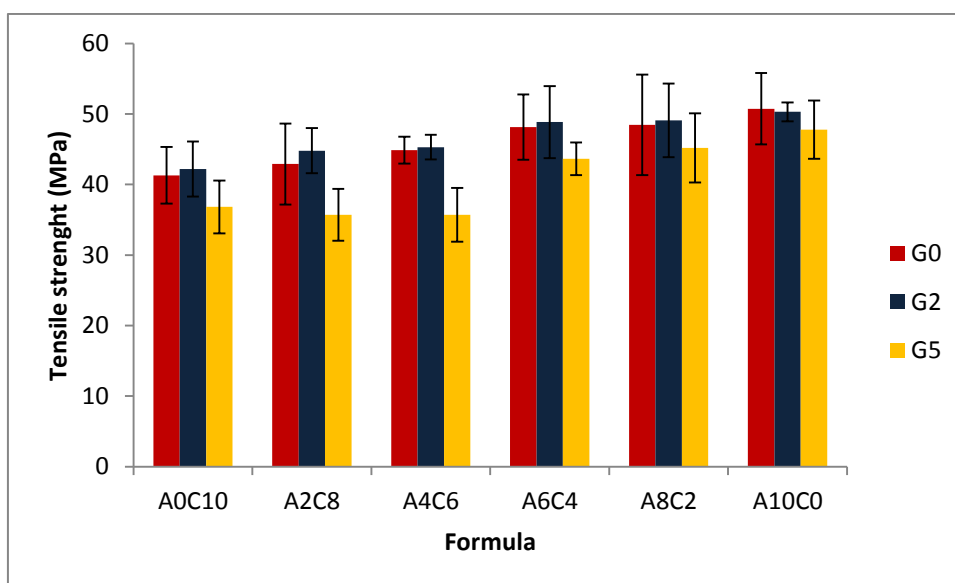
Formula	Tonset (°C)	Tendset (°C)	Char residue (%)
A0C10-G2Cu2	247.46	314.64	39.71
A2C8-G2Cu2	268.12	320.36	41.00
A4C6-G2 Cu2	261.05	317.22	42.75
A6C4-G2 Cu2	245.69	300.69	45.67
A8C2-G2 Cu2	216.84	306.73	44.28
A10C0-G2 Cu2	219.61	289.01	48.14
A0C10-G5 Cu2	268.78	317.78	44.62
A2C8-G5 Cu2	269.09	317.78	47.04
A4C6-G5 Cu2	262.00	317.56	43.54
A6C4-G5 Cu2	227.92	343.49	43.54
A8C2-G5 Cu2	223.66	308.09	46.29
A10C0-G5 Cu2	213.50	306.33	50.82

4.7 สมบัติเชิงกล

4.7.1 ความทนแรงดึง (Tensile strength)

4.7.1.1 ผลของการใช้กลูตารัลดีไฮด์เป็นสารเชื่อมขวาง

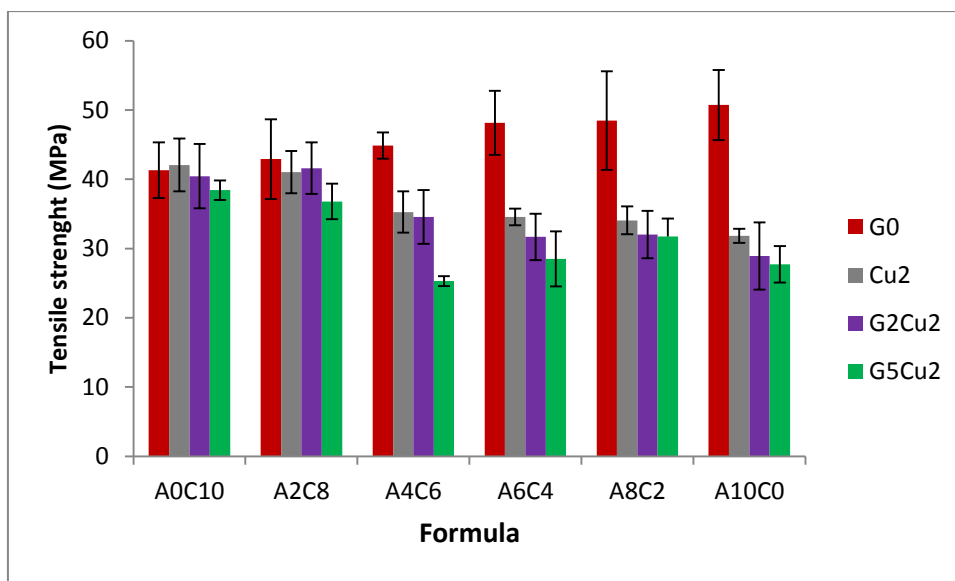
จากการศึกษาความทนแรงดึงของอัลจินต/CMC ไฮโดรเจลในอัตราส่วนผสมต่างๆและอัลจินต/CMC ไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์แสดงดังรูปที่ 4.24 พบว่าอัลจินต/CMC ไฮโดรเจลที่มีอัตราส่วน CMC สูงในสูตร (A0C10) มีค่าความทนแรงดึงต่ำที่สุดที่ 41.29 เมกะปาสคาล แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของอัลจินตทำให้ค่าความทนแรงดึงเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อยคือ 42.90, 44.86, 48.13, 48.35, 50.73 เมกะปาสคาล ตามลำดับ และเมื่อใส่สารเชื่อมขวางกลูตารัลดีไฮด์ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ลงไปทำให้อัลจินต/CMC ไฮโดรเจลมีค่าทนแรงดึงเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยอย่างไม่มีความสำคัญ อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของกลูตารัลดีไฮด์เท่ากับร้อยละ 5 โดยน้ำหนักกลับทำให้ค่าความทนแรงดึงลดลงทั้งนี้อาจเนื่องมาจากไฮโดรเจลเกิดการเชื่อมขวางมากขึ้น จึงส่งผลให้ฟิล์มมีสมบัติที่แข็งเปราะ



รูปที่ 4.24 ความทนแรงดึงของอัลจิเนต/CMC ไฮโดรเจลในอัตราส่วนต่างๆก่อนและหลังเชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ร้อยละ 2 และ 5 โดยน้ำหนัก

4.7.1.2 ผลของการใช้คอปเปอร์ซัลเฟต กลูตารัลดีไฮด์ร่วมกับคอปเปอร์ซัลเฟตเป็นสารเชื่อมขวาง

ความทนแรงดึงของอัลจิเนต/CMC ไฮโดรเจลในอัตราส่วนผสมต่างๆ อัลจิเนต/CMC ไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยคอปเปอร์ซัลเฟต ความเข้มข้น 0.02 โมลลาร์ และอัลจิเนต/CMC ไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ ความเข้มข้นร้อยละ 2, 5 โดยน้ำหนัก รวมคอปเปอร์ซัลเฟตความเข้มข้น 0.02 โมลลาร์ แสดงดังรูปที่ 4.25 พบว่า เมื่ออัลจิเนต/CMC ไฮโดรเจลถูกเชื่อมขวางด้วยคอปเปอร์ซัลเฟต ส่งผลให้ค่าความทนแรงดึงมีค่าลดลงและเมื่ออัตราส่วนของอัลจิเนตเพิ่มสูงขึ้นยิ่งส่งผลให้ค่าความทนแรงดึงลดลงอย่างมาก อาจเนื่องจากการเชื่อมขวางทางประจุขึ้นระหว่างหมู่คาร์บอกซิเลตของอัลจิเนตกับคอปเปอร์ไอออนด้วยพันธะไอออนิกภายในโครงสร้างของไฮโดรเจล ซึ่งพันธะไอออนิกเป็นพันธะที่มีความแข็งแรงสูงจึงทำให้การเคลื่อนที่ของสายโซ่ในโมเลกุลเกิดยากขึ้นส่งผลให้ฟิล์มมีสมบัติแข็งเปราะ นอกจากนี้เมื่อฟิล์มอัลจิเนต/CMC ไฮโดรเจลถูกเชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ร่วมกับคอปเปอร์ซัลเฟต ส่งผลให้ค่าความทนแรงดึงลดลงมากขึ้น อาจเนื่องจากการเชื่อมขวางด้วยพันธะโควาเลนต์ระหว่างกลูตารัลดีไฮด์กับหมู่ไฮดรอกซิลของ CMC และยังมีการเชื่อมขวางทางประจุระหว่างหมู่คาร์บอกซิเลตของอัลจิเนตกับคอปเปอร์ไอออนร่วมกันภายในโครงสร้างของไฮโดรเจลอีกด้วย จึงทำให้โครงสร้างของไฮโดรเจลมีการเชื่อมขวางที่มากขึ้น ส่งผลให้ไฮโดรเจลมีความแข็งเปราะ

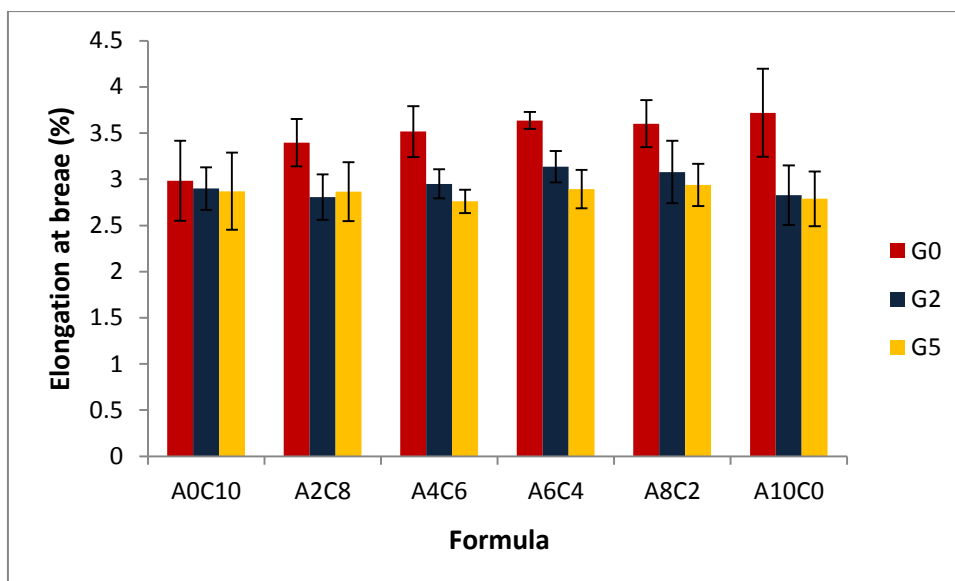


รูปที่ 4.25 ความทนแรงดึงของอัลจิเนต/CMC ไฮโดรเจลในอัตราส่วนผสมต่างๆก่อนและหลังเชื่อมขวางด้วยคอปเปอร์ซัลเฟตความเข้มข้น 0.02 โมลลาร์ กลูตารัลดีไฮด์ร้อยละ 2 และ 5 โดยน้ำหนัก ร่วมกับคอปเปอร์ซัลเฟตความเข้มข้น 0.02 โมลลาร์

4.7.2 การยึด ผน จุดขาด

4.7.2.1 ผลของการใช้กลูตารัลดีไฮด์เป็นสารเชื่อมขวาง

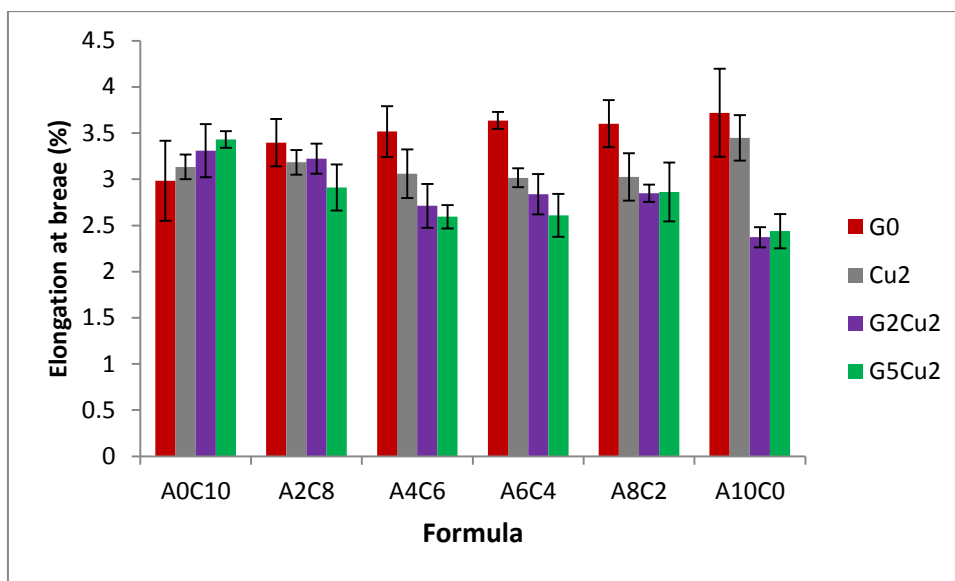
การยึด ผน จุดขาดของอัลจิเนต/CMC ไฮโดรเจลในอัตราส่วนผสมต่างๆก่อนและหลังเชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ร้อยละ 2 และ 5 โดยน้ำหนักแสดงดังรูปที่ 4.26 พบว่าอัลจิเนต/CMC ไฮโดรเจลที่ผ่านการเชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ร้อยละ 2 และ 5 โดยน้ำหนัก มีค่าการยึด ผน จุดขาดลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับอัลจิเนต/CMC ไฮโดรเจลที่ไม่ผ่านการเชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ เนื่องจากไฮโดรเจลเกิดการเชื่อมขวางภายในโครงสร้างเพิ่มมากขึ้นทำให้ฟิล์มมีสมบัติแข็งเปราะ ส่งผลให้ค่าการยึด ผน จุดขาดลดลง



รูปที่ 4.26 การยืด ณ จุดขาดของอัลจิเนต/CMC ไฮโดรเจลในอัตราส่วนต่างๆก่อนและหลังเชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ร้อยละ 2 และ 5 โดยน้ำหนัก

4.7.2.2 ผลของการใช้คอปเปอร์ซัลเฟต, และกลูตารัลดีไฮด์ร่วมกับคอปเปอร์ซัลเฟตเป็นสารเชื่อมขวาง

การยืด ณ จุดขาดของอัลจิเนต/CMC ไฮโดรเจลในอัตราส่วนต่างๆ ก่อนและหลังเชื่อมขวางด้วยคอปเปอร์ซัลเฟตความเข้มข้น 0.02 โมลลาร์ กลูตารัลดีไฮด์ร้อยละ 2 และ 5 โดยน้ำหนักและคอปเปอร์ซัลเฟตความเข้มข้น 0.02 โมลลาร์ แสดงในรูปที่ 4.27 พบว่าอัลจิเนต/CMC ไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยคอปเปอร์ซัลเฟต มีค่าการยืด ณ จุดขาดลดลง ในสูตร A0C10-Cu₂, A0C10-G₂Cu₂, A0C10-G₅Cu₂ และเมื่ออัตราส่วนของอัลจิเนตเพิ่มสูงขึ้นยิ่งทำให้ค่าการยืด ณ จุดขาดของไฮโดรเจลลดลงมากขึ้น เนื่องจากเกิดการเชื่อมขวางขึ้นระหว่างหมู่คาร์บอกซิเลตของอัลจิเนตกับคอปเปอร์ไอออนด้วยพันธะไอออนิกที่มีความแข็งแรงสูง ทำให้ไฮโดรเจลมีสมบัติแข็งเปราะ เช่นเดียวกับเมื่อเชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ร่วมกับคอปเปอร์ซัลเฟต ส่งผลให้ค่าการยืด ณ จุดขาดลดลงมากขึ้นไปอีก เพราะเกิดการเชื่อมขวางภายในโครงสร้างระหว่างกลูตารัลดีไฮด์กับหมู่ไฮดรอกซิลของ CMC และเกิดการเชื่อมขวางขึ้นระหว่างหมู่คาร์บอกซิเลตของอัลจิเนตกับคอปเปอร์ไอออนทำให้โครงสร้างไฮโดรเจลดังกล่าวเป็นโครงสร้างตาข่ายมากขึ้น ฟิล์มแข็งเปราะ

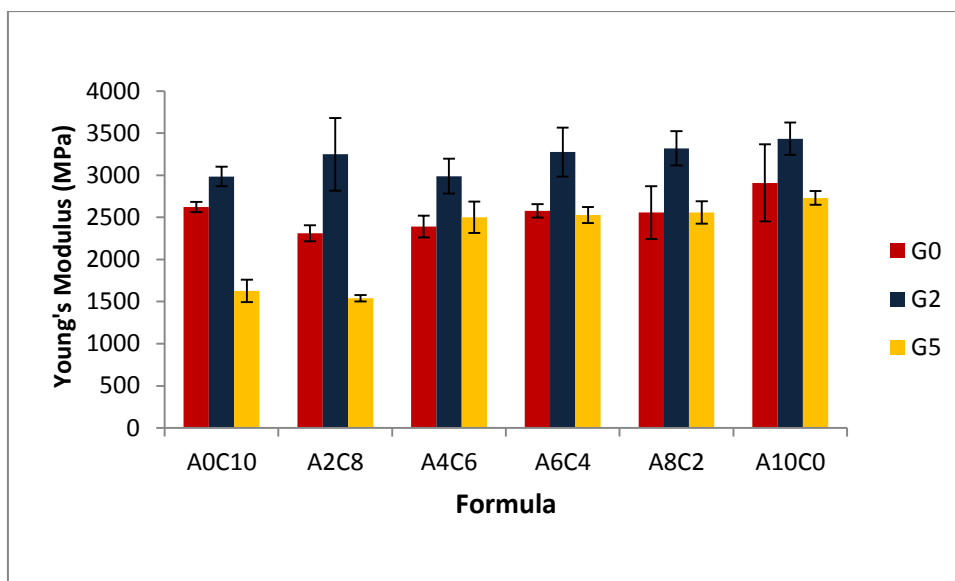


รูปที่ 4.27 การยืด ณ จุดขาดของฟิล์มอัลจินต/คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสไฮโดรเจลในอัตราส่วนต่างๆ ก่อนและหลังเชื่อมขวางด้วยคอปเปอร์ซัลเฟตความเข้มข้น 0.02 โมลลาร์, กลูตารัลดีไฮด์ร้อยละ 2 และ 5 โดยน้ำหนักร่วมกับคอปเปอร์ซัลเฟตความเข้มข้น 0.02 โมลลาร์

4.7.3 ยังสัมมอดูลัส

4.7.3.1 ผลของการใช้กลูตารัลดีไฮด์เป็นสารเชื่อมขวาง

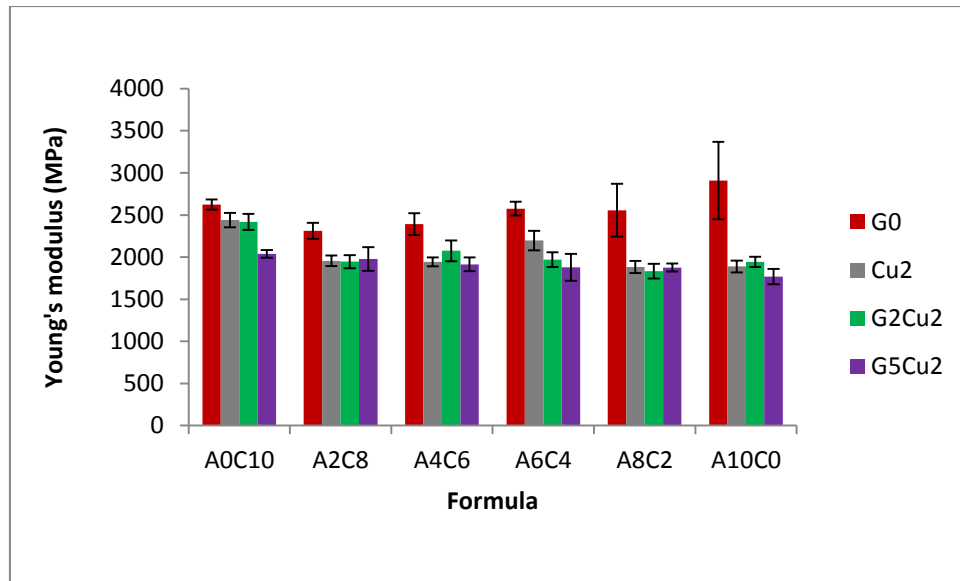
สมบัติเชิงกลของอัลจินต/CMC ไฮโดรเจลในอัตราส่วนต่างๆ ก่อนและหลังเชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ร้อยละ 2 และ 5 โดยน้ำหนัก แสดงดังรูปที่ 4.28 จากการทดลองพบว่าอัลจินต/CMC ไฮโดรเจลที่ผ่านการเชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก มีค่ายังสัมมอดูลัสเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับอัลจินต/CMC ไฮโดรเจลที่ไม่ผ่านการเชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกลูตารัลดีไฮด์เท่ากับความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักทำให้ค่ายังสัมมอดูลัสของลดลง



รูปที่ 4.28 ยังสัมมูลัสของอัลจินต/CMC ไฮโดรเจลในอัตราส่วนต่างๆ ก่อนและหลังเชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ร้อยละ 2 และ 5 โดยน้ำหนัก

4.7.3.2 ผลของการใช้คอปเปอร์ซัลเฟต, กลูตารัลดีไฮด์ร่วมกับคอปเปอร์ซัลเฟตเป็นสารเชื่อมขวาง

สมบัติเชิงกลของอัลจินต/CMC ไฮโดรเจลในอัตราส่วนต่างก่อนและหลังเชื่อมขวางด้วยคอปเปอร์ซัลเฟตความเข้มข้น 0.02 โมลลาร์, กลูตารัลดีไฮด์ร้อยละ 2 และ 5 โดยน้ำหนัก ร่วมกับคอปเปอร์ซัลเฟตความเข้มข้น 0.02 โมลลาร์แสดงรูปที่ 4.29 พบว่าอัลจินต/ CMC ไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยคอปเปอร์ซัลเฟต ทำให้มีค่ายังสัมมูลัสสูงขึ้นเล็กน้อยในสูตร A0C10-Cu₂, A0C10-G₂Cu₂, A0C10-G₅Cu₂ เมื่ออัตราส่วนของอัลจินตเพิ่มสูงขึ้นทำให้ไฮโดรเจลทำให้มีค่ายังสัมมูลัสลดลง



รูปที่ 4.29 ยังสัมมูล์ของอัลจินต/CMC ไฮโดรเจลในอัตราส่วนต่างๆ ก่อนและหลังเชื่อมขวางด้วย คอปเปอร์ซัลเฟตความเข้มข้น 0.02 โมลลาร์ กลูตารัลดีไฮด์ร้อยละ 2 และ 5 โดยน้ำหนักร่วมกับคอปเปอร์ซัลเฟตความเข้มข้น 0.02 โมลลาร์

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้เตรียมอัลจินต/CMC ไฮโดรเจล ที่เชื่อมขวางทางเคมีด้วยกลูตารัลดีไฮด์ร่วมกับเชื่อมขวางทางประจุด้วยสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต โดยศึกษาสมบัติทางกายภาพ วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน และตรวจสอบสัณฐานวิทยาของไฮโดรเจลที่เตรียมได้ ศึกษาพฤติกรรมการบวมตัวในน้ำกลั่นที่ 25°C หาปริมาณร้อยละของของแข็งที่เหลือจากการละลายน้ำ สมบัติทางความร้อนและสมบัติเชิงกลของอัลจินต/CMC ไฮโดรเจล สรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1.1 ลักษณะทางกายภาพของอัลจินต/CMC ไฮโดรเจลมีการเปลี่ยนแปลงสีของฟิล์มเมื่อมีการใส่สารเชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ คอปเปอร์ซัลเฟต และกลูตารัลดีไฮด์ร่วมกับคอปเปอร์ซัลเฟต

5.1.2. อัลจินต/CMC ไฮโดรเจลที่ใช้สารเชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ร่วมกับคอปเปอร์ซัลเฟตทำให้ไฮโดรเจลมีค่าการบวมตัว และระยะเวลาในการบวมตัวที่สูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสูตรที่มีอัตราส่วนของอัลจินต 1.6 กรัม ต่อคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 0.4 กรัม เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และคอปเปอร์ซัลเฟต 0.02 โมลลาร์ หรืออัตราส่วนของผสมของอัลจินตต่อคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเท่ากับ 4:1 มีค่าการบวมตัวสูงสุด

5.1.3 ปริมาณร้อยละของของแข็งที่เหลือของไฮโดรเจลจากการละลายน้ำพบว่าอัลจินต/CMC ไฮโดรเจลใช้สารเชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ร่วมกับคอปเปอร์ซัลเฟตและอัตราส่วนของอัลจินตสูงในสูตรที่มีอัตราส่วนของอัลจินต 2 กรัม ต่อคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 0 กรัม เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และคอปเปอร์ซัลเฟต 0.02 โมลลาร์ หรืออัตราส่วนของผสมของอัลจินตต่อคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเท่ากับ 4:1 มีค่าร้อยละของของแข็งที่เหลือมากที่สุดเท่ากับ 23.1% เมื่อแช่น้ำกลั่นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

5.1.4 อัลจินต/CMC ไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์และคอปเปอร์ซัลเฟตมีสมบัติเชิงกลที่ต่ำลง ทั้งนี้เนื่องจากเกิดการเชื่อมขวางอย่างหนาแน่นขึ้นภายในไฮโดรเจลส่งผลให้ฟิล์มมีสมบัติแข็งเปราะ

5.1.6 อัลจินต/CMC ไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์และคอปเปอร์ซัลเฟตช่วยปรับปรุงเสถียรภาพทางความร้อน

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ปรับปรุงสมบัติเชิงกลของฟิล์มอัลจินต/คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสไฮโดรเจลให้มีความแข็งแรงที่สูงขึ้น โดยการเปลี่ยนชนิดของสารเชื่อมขวาง

5.2.2 เปลี่ยนวิธีการขึ้นรูปไฮโดรเจลเพื่อนำไปใช้ให้เหมาะสมกับการใช้งาน



รายการอ้างอิง

- [1] Tang, Q., Huang, K., Qian, G., and Benicewicz, B.C. Phosphoric acid-imbibed three-dimensional polyacrylamide/poly(vinyl alcohol) hydrogel as a new class of high-temperature proton exchange membrane. Journal of Power Sources 229 (2013): 36-41.
- [2] Huq, T., et al. Nanocrystalline cellulose (NCC) reinforced alginate based biodegradable nanocomposite film. Carbohydrate Polymer 90(4) (2012): 1757-63.
- [3] Wilson, A.N. and Guiseppi-Elie, A. Targeting homeostasis in drug delivery using bioresponsive hydrogel microforms. International Journal of Pharmaceutics 461(1-2) (2014): 214-22.
- [4] Pourjavadi, A., Doulabi, M., Soleyman, R., Sharif, S., and Eghtesadi, S.A. Synthesis and characterization of a novel (salep phosphate)-based hydrogel as a carrier matrix for fertilizer release. Reactive and Functional Polymers 72(10) (2012): 667-672.
- [5] Nagashima, S., Ando, S., Tsukamoto, T., Ohshima, H., and Makino, K. Preparation of monodisperse poly (acrylamide-co-acrylic acid) hydrogel microspheres by a membrane emulsification technique and their size-dependent surface properties. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces 11(1) (1998): 47-56.
- [6] Tang, Q., Sun, X., Li, Q., Wu, J., and Lin, J. A simple route to interpenetrating network hydrogel with high mechanical strength. Journal of Colloid and Interface Science 339(1) (2009): 45-52.
- [7] Abreu, F.O.M.S., Bianchini, C., Forte, M.M.C., and Kist, T.B.L. Influence of the composition and preparation method on the morphology and swelling behavior of alginate–chitosan hydrogels. Carbohydrate Polymer 74(2) (2008): 283-289.

- [8] Xu, J.B., Bartley, J.P., and Johnson, R.A. Preparation and characterization of alginate–carrageenan hydrogel films crosslinked using a water-soluble carbodiimide (WSC). Journal of Membrane Science 218(1-2) (2003): 131-146.
- [9] Pereira, R., Carvalho, A., Vaz, D.C., Gil, M.H., Mendes, A., and Bartolo, P. Development of novel alginate based hydrogel films for wound healing applications. International Journal of Biological Macromolecules 52 (2013): 221-30.
- [10] Gaowa, A., et al. Combination of hybrid peptide with biodegradable gelatin hydrogel for controlled release and enhancement of anti-tumor activity in vivo. Journal of Controlled Release 176 (2014): 1-7.
- [11] Spoljaric, S., Salminen, A., Luong, N.D., and Seppälä, J. Stable, self-healing hydrogels from nanofibrillated cellulose, poly(vinyl alcohol) and borax via reversible crosslinking. European Polymer Journal 56 (2014): 105-117.
- [12] Jin, M., Ikeda, S., and Zhong, Q. Strengthening soy protein hydrogels filled with protein-coated montmorillonite nanoclay by glutaraldehyde crosslinking. LWT - Food Science and Technology 51(1) (2013): 23-29.
- [13] Nie, H., Liu, M., Zhan, F., and Guo, M. Factors on the preparation of carboxymethylcellulose hydrogel and its degradation behavior in soil. Carbohydrate Polymer 58(2) (2004): 185-189.
- [14] Lee, S.-T., Mi, F.-L., Shen, Y.-J., and Shyu, S.-S. Equilibrium and kinetic studies of copper (II) ion uptake by chitosan-tripolyphosphate chelating resin. Polymer 42(5) (2001): 1879-1892.
- [15] Santos, A., et al. Synthesis and characterization of iron-PVA hydrogel microspheres and their use in the arsenic (V) removal from aqueous solution. Chemical Engineering Journal 210 (2012): 432-443.
- [16] Maiti, S., Ranjit, S., Mondol, R., Ray, S., and Sa, B. Al³⁺ ion cross-linked and acetalated gellan hydrogel network beads for prolonged release of glipizide. Carbohydrate Polymer 85(1) (2011): 164-172.
- [17] ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ. มหัศจรรย์ไฮโดรเจล 2012. Available from: http://www.neutron.rmutphysics.com/science-news/index.php?option=com_content&task=view&id=1965

- [18] มาลินี ชัยศุภกิจสินธุ์. เคมีพอลิเมอร์. โครงการตำราสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง: คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2547.
- [19] Ratner, B. Biomedical applications of hydrogels: review and critical appraisal. Biocompatibility of Clinical Implant Materials. Flórida CRC (1981): 145-175.
- [20] Guent., J.-M. Introduction In Thermoreversible Gelation of Polymers and Biopolymer. 1992, Academic Press: London. 1-4.
- [21] Y. Liu, M.B.H.a.R.M. Characteristics of copolymerisations involving dimethacrylamide and swelling behavior of the copolymers in water. . Polymer 37 (1996): 5068-5075.
- [22] Yamamoto., M.V.S.a.Y. Hofmann degradation of acrylamind copolymer : Synthesis of amine function thermoplastic hydrogel. Journal of Applied Polymer Science 61 (1996): 351-358.
- [23] ผู้จัดการ. บทความวิทยาศาสตร์ออนไลน์. 2555.
- [24] สำนักคณะกรรมการอาหารและยา. เลนส์สัมผัส. 2551.
- [25] ภัทรารุช มนต์วิเศษ. เอกสารประกอบการสอนวิชาไบโอพอลิเมอร์. สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2553.
- [26] ดุษฎี อดุภาพ. Carbohydrate Technology 2554. Available from: <http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/chapter4.html>
- [27] ปิยพร ร่มแสง. CMC biopolymer. คณะอุตสาหกรรมและการเกษตร: มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [28] สมิง เก่าเจริญ. พิษภัยของ Glutaraldehyde ในโรงพยาบาล. ศูนย์พิษวิทยา คณะแพทยศาสตร์ โรงพยาบาลรามาริบัติ มหาวิทยาลัยมหิดล: จุลสารพิษวิทยา 2549.
- [29] Rowbotham, J.S., Dyer, P.W., Greenwell, H.C., Selby, D., and Theodorou, M.K. Copper(II)-mediated thermolysis of alginates: a model kinetic study on the influence of metal ions in the thermochemical processing of macroalgae. Interface Focus 3(1) (2013): 20120046.
- [30] America, P.A.N.N. Copper sulfate (pentahydrate). 2013.
- [31] Stanley, T.O. Food and Nutritional Toxicology, Universidad de Nedada. 2004, Estados Unidos: CRC Press.

- [32] Keevil, W. Antibacterial properties of copper and brass demonstrate potential to combat toxic E. coli O157 outbreaks in the food processing industry. in Centre for Applied Microbiology & Research, UK. In Symposium on Copper and Health, held in CEPAL, Santiago Chile, 2001.
- [33] Bergmann, D., Furth, G., and Mayer, C. Binding of bivalent cations by xanthan in aqueous solution. International journal of biological macromolecules 43(3) (2008): 245-251.
- [34] Irit Gliko-Kabir , A.P., Abraham Rubinstein. Characterization of crosslinked guar by thermal analysis Carbohydrate Research. 316 (1999): 6-13.
- [35] George, M. and Abraham, T. pH sensitive alginate–guar gum hydrogel for the controlled delivery of protein drugs. International Journal of Pharmaceutics 335(1) (2007): 123-129.
- [36] Mansur, H.S., Sadahira, C.M., Souza, A.N., and Mansur, A.A.P. FTIR spectroscopy characterization of poly (vinyl alcohol) hydrogel with different hydrolysis degree and chemically crosslinked with glutaraldehyde. Materials Science and Engineering: C 28(4) (2008): 539-548.
- [37] Alves, P.M.A., Carvalho, R.A., Moraes, I.C.F., Luciano, C.G., Bittante, A.M.Q.B., and Sobral, P.J.A. Development of films based on blends of gelatin and poly(vinyl alcohol) cross linked with glutaraldehyde. Food Hydrocolloids 25(7) (2011): 1751-1757.
- [38] Saarai, A., Kasparkova, V., Sedlacek, T., and Saha, P. On the development and characterisation of crosslinked sodium alginate/gelatine hydrogels. Journal of the mechanical behavior of biomedical materials 18 (2013): 152-66.
- [39] Testing, A.S.f. and Materials. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. in: ASTM, 1998.
- [40] Costa-Júnior, E.S., Barbosa-Stancioli, E.F., Mansur, A.A., Vasconcelos, W.L., and Mansur, H.S. Preparation and characterization of chitosan/poly (vinyl alcohol) chemically crosslinked blends for biomedical applications. Carbohydrate Polymer 76(3) (2009): 472-481.

- [41] Islam, A. and Yasin, T. Controlled delivery of drug from pH sensitive chitosan/poly (vinyl alcohol) blend. Carbohydrate Polymer 88(3) (2012): 1055-1060.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

ความทนแรงดึงของอัลจิเนต/CMC ไฮโดรเจล

ตาราง ก-1 ค่าความทนแรงดึงของอัลจิเนต/CMC ไฮโดรเจลที่ไม่ผ่านการเชื่อมขวาง

สูตร	ความแข็งแรงดึงสูงสุด (MPa) / ครั้งที่						ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	
A0C10	39.23	42.02	37.94	39.33	47.97	41.29	4.01
A2C8	39.52	35.00	43.49	47.7	48.81	42.90	5.74
A4C6	44.32	42.09	44.61	46.29	46.99	44.86	1.91
A6C4	45.74	44.42	49.4	45.42	55.7	48.13	4.62
A8C2	49.58	44.73	43.65	43.9	60.43	48.48	7.11
A10C0	53.59	50.68	56.27	50.35	42.77	50.73	5.05

ตาราง ก-2 ค่าความทนแรงดึงของอัลจิเนต/CMC ไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยกอลลูตารัลดีไฮด์เข้มข้นร้อยละ 2

สูตร	ความแข็งแรงดึงสูงสุด (MPa) / ครั้งที่						ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	
A0C10-G2	38.06	39.56	40.88	45.00	47.41	42.18	3.89
A2C8-G2	41.41	41.50	45.33	47.70	47.99	44.78	3.21
A4C6-G2	46.05	42.26	46.42	46.35	45.36	45.28	1.74
A6C4-G2	47.71	41.79	53.29	47.09	54.37	48.85	5.10
A8C2-G2	52.50	47.89	55.79	42.22	47.11	49.10	5.21
A10C0-G2	49.03	52.53	49.74	49.85	50.33	50.29	1.33

ตาราง ก-3 ค่าความทนแรงดึงของของอัลจินิต/CMC ไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์เข้มข้น ร้อยละ 5

สูตร	ความแข็งแรงดึงสูงสุด (MPa) / ครั้งที่						ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	
A0C10-G5	35.00	32.05	35.85	40.00	41.15	36.81	3.73
A2C8-G5	35.09	39.57	37.50	36.54	29.83	35.70	3.66
A4C6-G5	39.44	32.67	33.20	32.92	40.25	35.69	3.80
A6C4-G5	40.24	45.69	45.56	42.50	34.22	41.64	4.73
A8C2-G5	41.27	40.88	44.04	46.99	52.74	45.18	4.88
A10C0-G5	53.63	43.55	50.33	46.14	45.15	47.76	4.12

ตาราง ก-3 ค่าความทนแรงดึงของของอัลจินิต/CMC ไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยคอปเปอร์ซัลเฟตเข้มข้น 2 มิลลิโมล

สูตร	ความแข็งแรงดึงสูงสุด (MPa) / ครั้งที่						ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	
A0C10-Cu2	42.76	41.40	39.97	38.07	48.11	42.06	3.80
A2C8-Cu2	42.39	37.04	38.72	42.39	44.60	41.02	3.07
A4C6-Cu2	34.55	35.46	35.61	31.18	39.55	35.27	2.98
A6C4-Cu2	35.31	33.26	33.84	36.23	34.19	34.56	1.19
A8C2-Cu2	35.95	35.25	35.39	31.86	31.89	34.06	2.01
A10C0-Cu2	32.86	32.69	31.72	31.49	30.33	31.81	1.02

ตาราง ก-4 ค่าความทนแรงดึงของอัลจินต/CMC ไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์เข้มข้นร้อยละ 2 ร่วมกับคอปเปอร์ซัลเฟตเข้มข้น 2 มิลลิโมล

สูตร	ความแข็งแรงดึงสูงสุด (MPa) / ครั้งที่						ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	
A0C10-G2Cu2	36.49	37.00	41.46	39.33	47.97	40.45	4.64
A2C8-G2Cu2	43.79	37.3	42.86	45.89	38.16	41.60	3.71
A4C6-G2Cu2	35.00	34.83	34.24	39.84	28.86	34.54	3.89
A6C4-G2Cu2	30.21	31.39	34.78	35.04	26.98	31.68	3.36
A8C2-G2Cu2	30.90	32.21	34.40	35.71	26.88	32.02	3.42
A10C0-G2Cu2	25.21	25.51	26.29	31.22	36.40	28.92	4.83

ตาราง ก-5 ค่าความทนแรงดึงของอัลจินต/CMC ไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์เข้มข้นร้อยละ 5 ร่วมกับคอปเปอร์ซัลเฟตเข้มข้น 2 มิลลิโมล

สูตร	ความแข็งแรงดึงสูงสุด (MPa) / ครั้งที่						ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	
A0C10-G5Cu2	37.47	37.49	37.45	39.17	40.59	38.43	1.41
A2C8-G5Cu2	33.29	39.67	38.97	35.75	36.31	36.79	2.57
A4C6-G5Cu2	25.11	25.9	25.96	25.28	24.21	25.29	0.71
A6C4-G5Cu2	26.61	24.68	25.69	33.50	31.97	28.49	3.97
A8C2-G5Cu2	31.51	31.95	29.25	29.94	35.98	31.76	2.62
A10C0-G5Cu2	28.01	29.74	24.15	30.64	26.02	27.71	2.66

ตาราง ก-6 ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาดของอัลจินต/CMC ไฮโดรเจลที่ไม่ผ่านการเชื่อมขวาง

สูตร	เปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาด (เปอร์เซ็นต์) / ครั้งที่						ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	
A0C10	2.52	3.24	3.16	3.47	2.53	2.98	0.43
A2C8	3.46	3.58	3.13	3.68	3.13	3.39	0.25
A4C6	3.78	3.50	3.59	3.06	3.65	3.51	0.27
A6C4	3.66	3.71	3.59	3.50	3.72	3.63	0.09
A8C2	3.86	3.43	3.32	3.52	3.88	3.60	0.25
A10C0	4.30	3.70	4.09	3.25	3.26	3.72	0.47

ตาราง ก-7 ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาดของอัลจินต/CMC ไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์เข้มข้นร้อยละ 2

สูตร	เปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาด (เปอร์เซ็นต์) / ครั้งที่						ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	
A0C10-G2	2.96	2.69	3.27	2.75	2.63	2.86	0.26
A2C8-G2	2.57	3.21	2.65	2.68	2.62	2.74	0.26
A4C6-G2	2.80	2.84	3.17	2.88	3.06	2.95	0.15
A6C4-G2	3.06	2.92	3.22	3.37	3.11	3.13	0.16
A8C2-G2	3.18	2.74	2.70	3.42	3.35	3.07	0.3
A10C0-G2	2.86	3.32	2.88	2.49	2.59	2.82	0.32

ตาราง ก-8 ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาดของอัลจินต/CMC ไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยกลูตารัล ดีไฮด์เข้มข้นร้อยละ 5

สูตร	เปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาด (เปอร์เซ็นต์) / ครั้งที่						ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	
A0C10-G5	3.33	3.29	2.75	2.54	3.44	3.07	0.39
A2C8-G5	3.60	2.42	3.42	3.42	3.64	3.30	0.50
A4C6-G5	2.76	2.67	2.61	2.83	2.93	2.76	0.12
A6C4-G5	2.89	2.58	3.12	3.04	2.84	2.89	0.20
A8C2-G5	3.22	3.09	2.74	2.68	2.96	2.93	0.22
A10C0-G5	2.31	2.87	3.12	2.88	2.76	2.78	0.29

ตาราง ก-9 ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาดของอัลจินต/CMC ไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยคอปเปอร์ซัลเฟตเข้มข้น 0.02 โมล

สูตร	เปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาด (เปอร์เซ็นต์) / ครั้งที่						ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	
A0C10-Cu2	3.11	3.20	3.01	3.02	3.33	3.13	0.13
A2C8-Cu2	3.12	3.06	3.16	3.41	3.17	3.18	0.13
A4C6-Cu2	3.29	2.84	3.16	2.72	3.29	3.06	0.26
A6C4-Cu2	3.06	3.12	2.88	3.08	2.94	3.01	0.10
A8C2-Cu2	3.06	3.04	3.21	3.22	2.59	3.02	0.25
A10C0-Cu2	3.28	3.66	3.53	3.11	3.66	3.44	0.24

ตาราง ก-10 ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาดของของอัลจินต/CMC ไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์เข้มข้นร้อยละ 2 ร่วมกับคอปเปอร์ซัลเฟตเข้มข้น 0.02 โมล

สูตร	เปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาด (เปอร์เซ็นต์) / ครั้งที่						ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	
A0C10-G2Cu2	3.54	2.94	3.61	3.36	3.09	3.30	0.28
A2C8-G2Cu2	3.49	3.26	3.14	3.09	3.13	3.22	0.16
A4C6-G2Cu2	3.07	2.83	2.62	2.56	2.48	2.71	0.23
A6C4-G2Cu2	3.13	2.67	2.65	2.73	3.01	2.83	0.21
A8C2-G2Cu2	2.77	2.76	2.83	2.98	2.90	2.84	0.09
A10C0-G2Cu2	2.55	2.29	2.33	2.40	2.29	2.37	0.10

ตาราง ก-11 ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาดของอัลจินต/CMC ไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์เข้มข้นร้อยละ 5 ร่วมกับคอปเปอร์ซัลเฟตเข้มข้น 0.02 โมล

สูตร	เปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาด (เปอร์เซ็นต์) / ครั้งที่						ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	
A0C10-G5Cu2	3.77	3.61	3.85	3.49	3.73	3.69	0.14
A2C8-G5Cu2	3.01	2.80	2.89	3.26	2.59	2.91	0.24
A4C6-G5Cu2	2.57	2.44	2.59	2.58	2.79	2.59	0.12
A6C4-G5Cu2	2.58	2.32	2.81	2.87	2.46	2.60	0.23
A8C2-G5Cu2	2.63	2.74	2.70	3.42	2.82	2.86	0.31
A10C0-G5Cu2	2.24	2.47	2.29	2.48	2.71	2.43	0.18

ตาราง ก-13 ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของอัลจินเนต/CMC ที่ไม่ผ่านการเชื่อมขวาง

สูตร	มอดูลัสยืดหยุ่น (MPa) / ครั้งที่						ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	
A0C10	2670	2594	2580	2566	2705	2623	60
A2C8	2328	2433	2315	2315	2168	2311	94
A4C6	2466	2324	2195	2506	2461	2390	129
A6C4	2584	2529	2651	2465	2651	2576	80
A8C2	2682	3368	2800	3252	3288	2557	313
A10C0	2510	3413	2528	2699	3396	2909	458

ตาราง ก-14 ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของอัลจินเนต/CMC ไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์เข้มข้น
ร้อยละ 2

สูตร	มอดูลัสยืดหยุ่น (MPa) / ครั้งที่						ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	
A0C10-G2	3077	3078	3035	2926	2810	2985.	115
A2C8-G2	2927	2996	3071	3984	3264	3248	430
A4C6-G2	2872	2915	2866	2935	3359	2989	208
A6C4-G2	3244	3012	3484	3650	2984	3274	291
A8C2-G2	3206	3286	3085	3410	3612	3319	201
A10C0-G2	3529	3420	3104	3538	3571	3432	192

ตาราง ก-15 ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของอัลจิเนต/CMC ไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์เข้มข้น ร้อยละ 5

สูตร	มอดูลัสยืดหยุ่น (MPa) / ครั้งที่						ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	
A0C10-G5	1596	1706	1748	1675	1408	1626	134
A2C8-G5	1573	1581	1491	1541	1509	1539	39
A4C6-G5	2304	2301	2651	2684	2566	2501	186
A6C4-G5	2584	2529	2651	2465	2409	2527	95
A8C2-G5	2306	2483	2675	2549	2521	2557	133
A10C0-G5	2764	2781	2597	2708	2804	2730	82

ตาราง ก-16 ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของอัลจิเนต/CMC ไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยคอปเปอร์ซัลเฟตเข้มข้น 0.02 โมล

สูตร	มอดูลัสยืดหยุ่น (MPa) / ครั้งที่						ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	
A0C10-Cu2	2386	2433	2589	2379	2417	2440	85
A2C8-Cu2	1970	1975	1922	2041	1875	1956	62
A4C6-Cu2	1931	2024	1942	1945	1875	1943	53
A6C4-Cu2	1923	1997	1732	1779	1934	1873	112
A8C2-Cu2	1830	2033	2202	1982	1867	1982	147
A10C0-Cu2	1821	1914	1815	1778	1917	1849	62

ตาราง ก-17 ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของอัลจิเนต/CMC ไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์เข้มข้น ร้อยละ 2 ร่วมกับคอปเปอร์ซัลเฟตเข้มข้น 0.02 โมล

สูตร	มอดูลัสยืดหยุ่น (MPa) / ครั้งที่						ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	
A0C10-G2Cu2	2292	2240	2384	2123	2296	2418	95
A2C8-G2Cu2	2461	2473	2953	2964	2379	2646	287
A4C6-G2Cu2	2555	2557	2326	2311	2126	2375	183
A6C4-G2Cu2	2082	2746	2335	2607	2577	2469	262
A8C2-G2Cu2	2541	3104	2219	2365	2541	2557	335
A10C0-G2Cu2	2774	2517	2897	2767	2565	2704	158

ตาราง ก-18 ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของอัลจิเนต/CMC ไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์เข้มข้น ร้อยละ 5 ร่วมกับคอปเปอร์ซัลเฟตเข้มข้น 0.02 โมล

สูตร	มอดูลัสยืดหยุ่น (MPa) / ครั้งที่						ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	
A0C10-G5Cu2	2069	2060	2071	1960	2032	2038	46
A2C8-G5Cu2	1945	1852	2076	2168	1852	1978	140
A4C6-G5Cu2	1917	1958	1955	1890	2053	1954	61
A6C4-G5Cu2	1613	2010	1852	1981	1941	1879	160
A8C2-G5Cu2	2559	2651	2585	2467	2720	2596	95
A10C0-G5Cu2	3186	3087	3067	3119	2687	3029	196

ภาคผนวก ข

ตาราง ข-1 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแข็งคงเหลือหลังแช่น้ำกลั่น 24 ชั่วโมง

สูตร	24 ชั่วโมง			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
A0C10-G2Cu2	0	0	0	0
A2C8-G2Cu2	1.45	1.50	1.55	1.50
A4C6-G2Cu2	4.20	3.80	4.00	4.00
A6C4-G2Cu2	6.56	6.77	6.47	6.60
A8C2-G2Cu2	10.79	10.98	11.23	11.00
A10C0-G2Cu2	17.36	17.52	18.52	17.80
A0C10-G5Cu2	1.89	1.89	1.92	1.90
A2C8-G5Cu2	3.96	3.84	3.90	3.90
A4C6-G5Cu2	11.21	11.00	10.80	11.00
A6C4-G5Cu2	13.69	13.42	12.91	13.10
A8C2-G5Cu2	16.25	15.83	15.62	15.90
A10C0-G5Cu2	22.85	21.63	20.92	21.80

ตาราง ข-2 ค่าเฉลี่ยการบวมตัวของอัลจิเนต/CMC ไฮโดรเจลที่ ในน้ำกลั่น 25°C (เท่า)

เวลา (นาทื)	A0C10	A2C8	A4C6	A6C4	A8C2	A10C0
1	6.53	10.59	10.70	9.32	24.97	18.42
2	9.27	11.69	15.98	16.72	28.63	21.24
3	7.34	12.08	17.50	19.25	28.77	23.43
4	6.45	9.94	17.36	21.27	26.46	23.17
5	2.62	9.12	15.65	19.37	24.84	20.98
6	1.88	7.67	14.06	15.26	19.92	18.60
7	0.77	6.02	11.24	12.99	17.85	16.37
8	0.26	4.80	6.99	8.45	13.86	13.48
9	-0.78	2.36	4.83	5.58	5.66	6.20
10	-1.23	1.66	1.32	1.96	3.49	3.85

ตาราง ข-3 ค่าเฉลี่ยการบวมตัวของอัลจิเนต/CMC ไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ร้อยละ 2 โดยน้ำหนักในน้ำกลั่น 25°C (เท่า)

เวลา (นาทื)	A0C10- G2	A2C8- G2	A4C6- G2	A6C4- G2	A8C2- G2	A10C0 -G2
1	8.08	4.17	6.54	7.47	10.54	16.42
2	12.67	8.52	11.81	11.77	24.24	25.57
3	19.73	16.29	20.59	13.56	26.24	33.77
4	20.43	27.43	28.88	20.12	29.96	39.17
5	24.34	32.96	38.91	23.84	31.97	41.31
6	27.58	38.91	42.42	28.56	31.90	45.60
7	27.07	42.53	46.31	30.05	30.61	46.85
8	25.64	44.33	49.32	25.24	27.73	40.86
9	23.45	47.45	50.92	22.98	15.84	36.66
10	18.77	49.95	51.57	19.23	12.97	31.16

ตาราง ข-4 ค่าเฉลี่ยการบวมตัวของอัลจินต/CMC ไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักในน้ำกลั่น 25°C (เท่า)

เวลา (นาท)	A0C10- G5	A2C8- G5	A4C6- G5	A6C4- G5	A8C2- G5	A10C0 -G5
1	6.80	10.29	9.76	9.97	8.45	14.74
2	15.34	30.76	22.18	20.66	19.40	29.91
3	24.77	51.09	28.71	24.72	24.09	32.69
4	27.12	66.71	32.99	24.93	25.57	36.49
5	30.78	85.74	37.07	25.85	28.05	39.11
6	30.95	95.46	59.33	27.91	27.34	44.02
7	33.04	110.94	67.71	25.89	24.64	44.30
8	29.89	110.23	65.63	25.92	22.06	44.30
9	28.38	102.85	63.97	24.31	21.12	43.17
10	25.98	89.60	55.02	20.55	16.58	37.29

ตาราง ข-5 ค่าเฉลี่ยการบวมตัวของอัลจินต/CMC ไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยคอปเปอร์ซัลเฟต 0.02 โมลลาร์ ในน้ำกลั่น 25°C (เท่า)

เวลา (นาท)	A0C10- Cu2	A2C8- Cu2	A4C6- Cu2	A6C4- Cu2	A8C2- Cu2	A10C0- Cu2
1	10.99	11.64	8.96	9.58	13.67	15.86
2	14.95	20.25	17.87	19.15	27.70	30.65
3	21.55	19.41	21.00	30.39	34.59	35.33
4	17.89	19.11	26.53	31.64	38.28	35.07
5	16.01	18.45	19.29	31.26	35.04	35.46
6	11.46	14.58	14.65	27.28	30.26	33.20
7	7.93	9.22	11.99	22.86	24.67	30.49
8	6.82	7.38	10.55	18.75	21.37	22.58
9	5.54	6.31	8.21	16.36	18.48	19.94
10	4.64	1.39	6.53	8.02	13.27	17.04

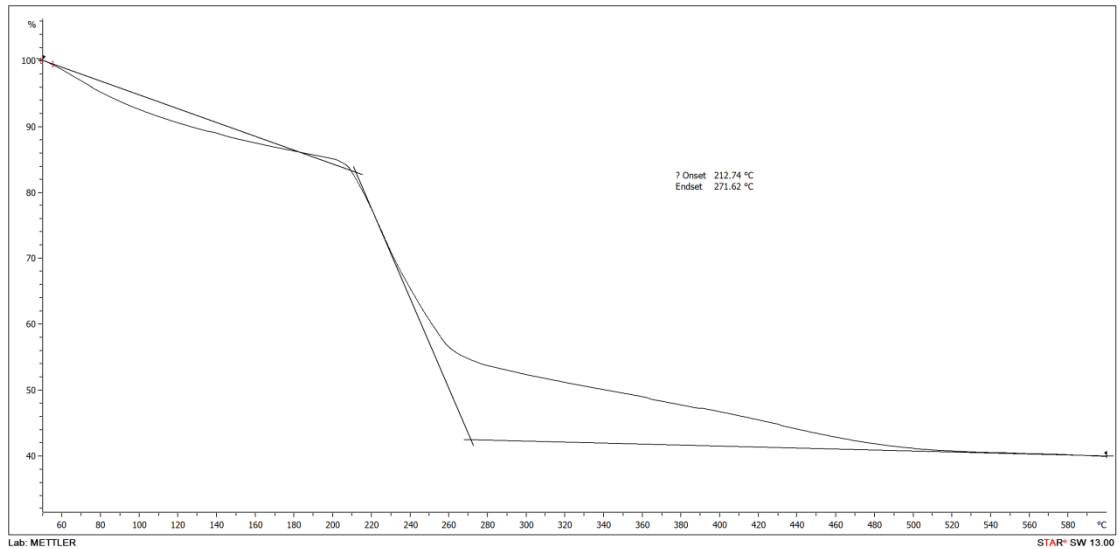
ตาราง ข-6 ค่าเฉลี่ยการบวมตัวของอัลจิเนต/CMC ไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์เข้มข้น
ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักร่วมกับคอปเปอร์ซัลเฟต 0.02 โมลลาร์ในน้ำกลั่น 25°C (เท่า)

เวลา (นาทื)	A0C10- G5Cu2	A2C8- G5Cu2	A4C6- G5Cu2	A6C4- G5Cu2	A8C2- G5Cu2	A10C0- G5Cu2
5	6.79	8.60	35.10	17.40	11.20	5.00
10	24.41	23.03	39.00	23.00	14.70	6.00
15	36.77	29.74	50.80	29.70	15.20	7.00
20	42.70	39.31	58.30	34.20	17.50	8.00
25	48.05	46.89	63.60	36.30	18.30	10.00
30	47.22	46.33	68.20	38.10	19.00	13.00
40	45.77	55.88	72.90	40.90	20.30	16.30
50	36.67	59.17	78.60	43.60	22.70	18.70
60	29.90	57.82	80.40	44.80	23.10	18.10
120	21.49	44.77	81.20	47.10	24.90	17.90
180	20.30	36.90	84.70	49.70	27.40	17.40
240	18.70	35.30	83.60	51.30	27.10	17.10
300	15.50	30.20	87.90	49.90	27.10	17.10
360	14.34	29.30	80.30	48.90	26.40	16.40
420	13.60	26.70	73.20	49.80	23.90	13.90
480	13.45	24.10	71.90	52.90	23.89	13.39

ภาคผนวก ค

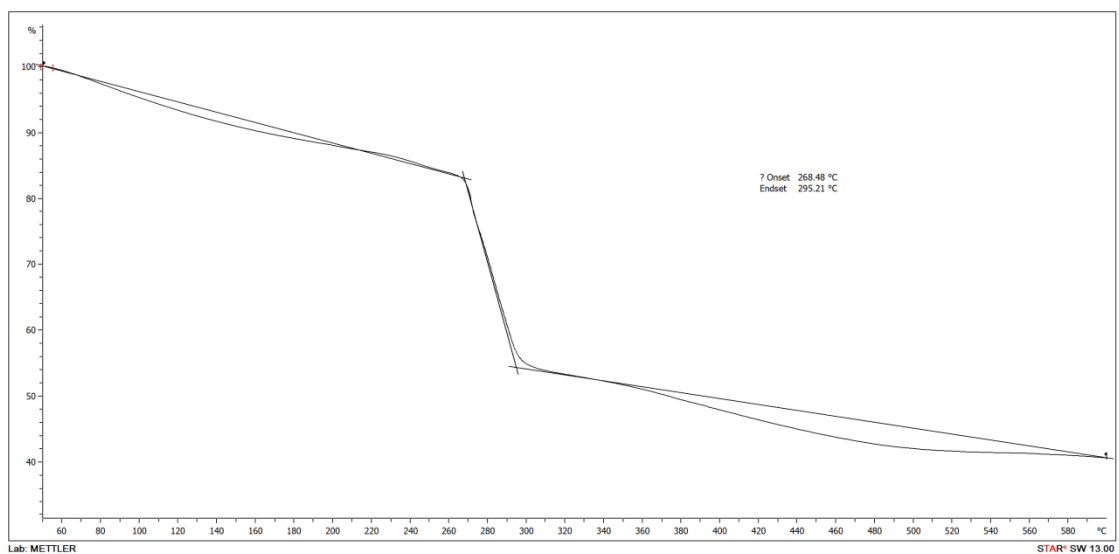
TGA Thermogram ของฟิล์มไฮโดรเจล

1. อัลจิเนตบริสุทธี (A10C0)



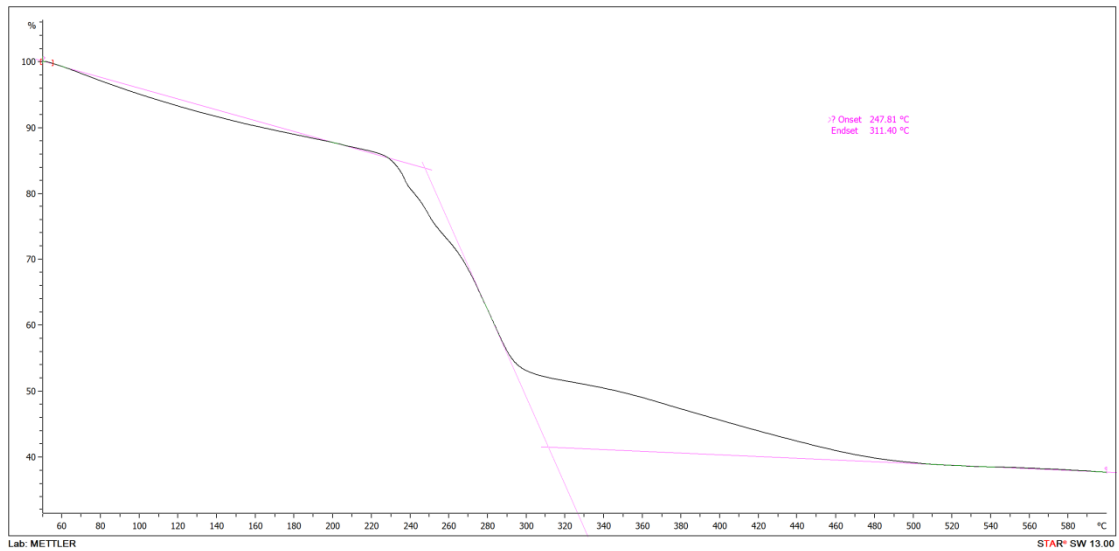
รูปภาพ ค-1 เทอร์โมแกรมของอัลจิเนตบริสุทธี

2. อัลจิเนต/CMC ในอัตราส่วน 2:8 (A2C8)



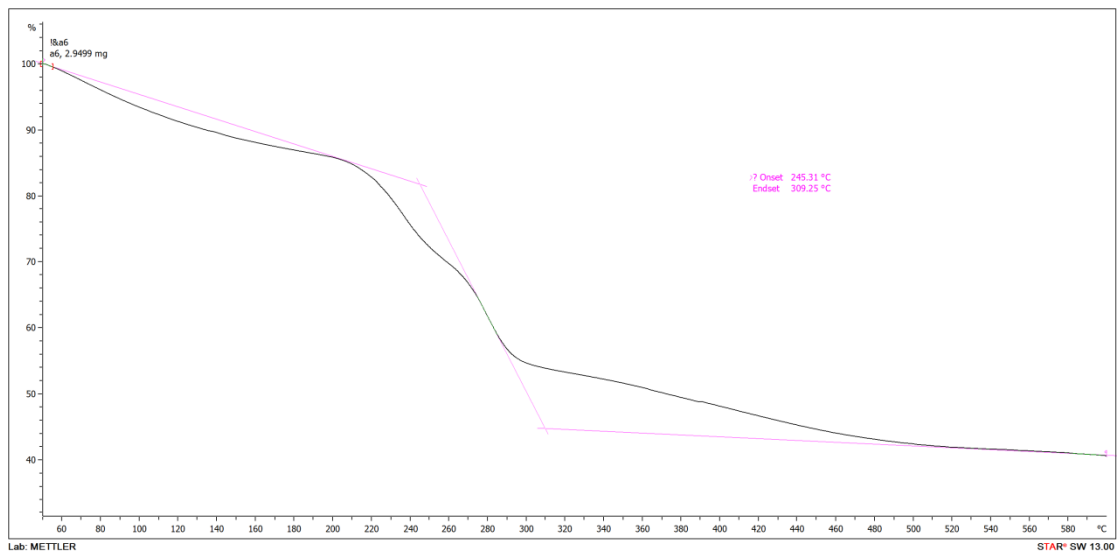
รูปภาพ ค-2 เทอร์โมแกรมของอัลจิเนต/ CMC ในอัตราส่วน 2:8 (A2C8)

3. อัลจิเนต/CMC ในอัตราส่วน 4:6 (A4C6)



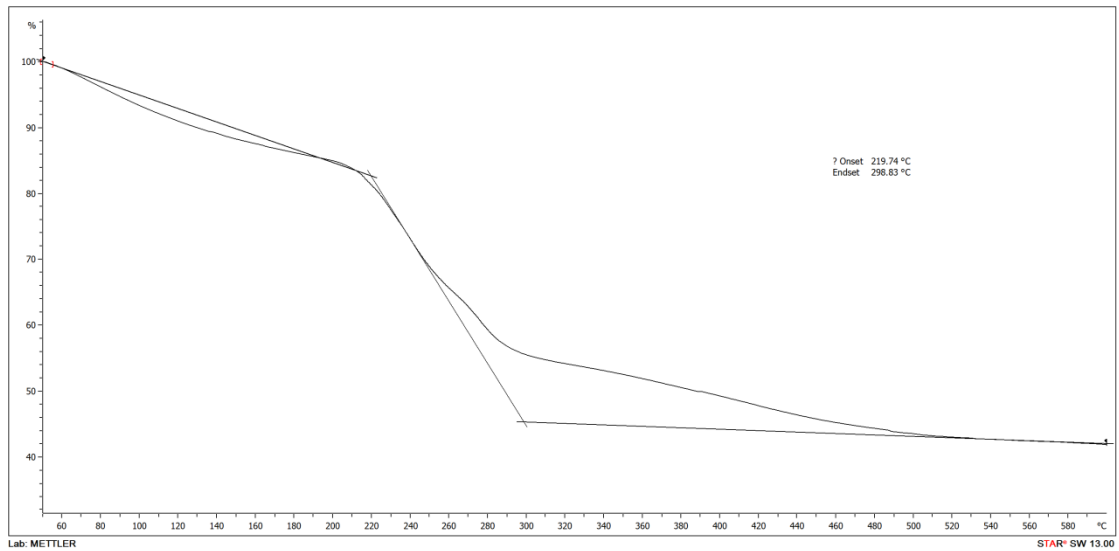
รูปภาพ ค-3 เทอร์โมแกรมอัลจิเนต/CMC ในอัตราส่วน 4:6 (A4C6)

4. อัลจิเนต/CMC ในอัตราส่วน 6:4 (A6C4)



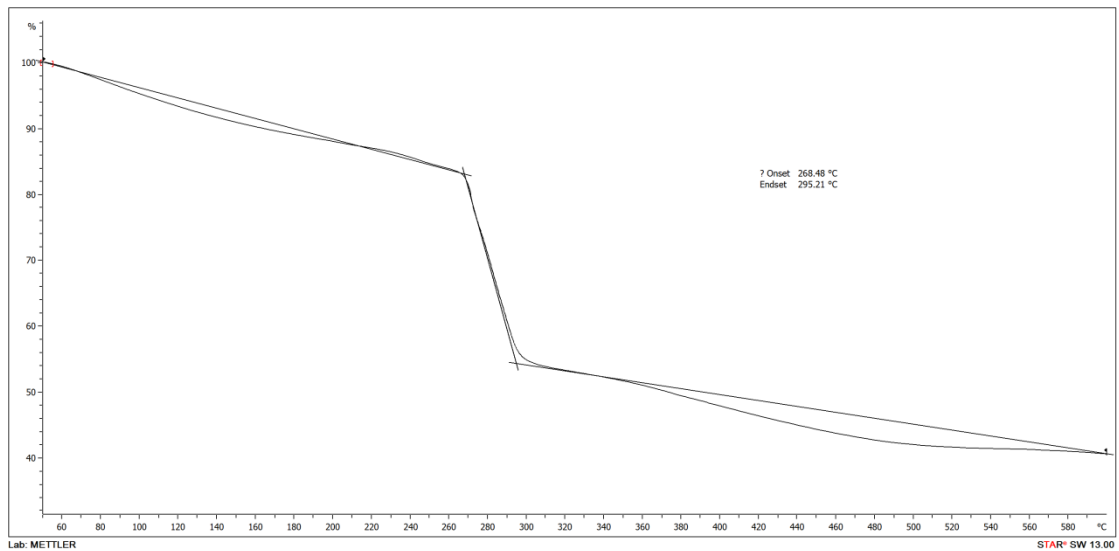
รูปภาพ ค-4 เทอร์โมแกรมอัลจิเนต/CMC ในอัตราส่วน 6:4 (A6C4)

5. อัลจิเนต/CMC ในอัตราส่วน 8:2 (A8C2)



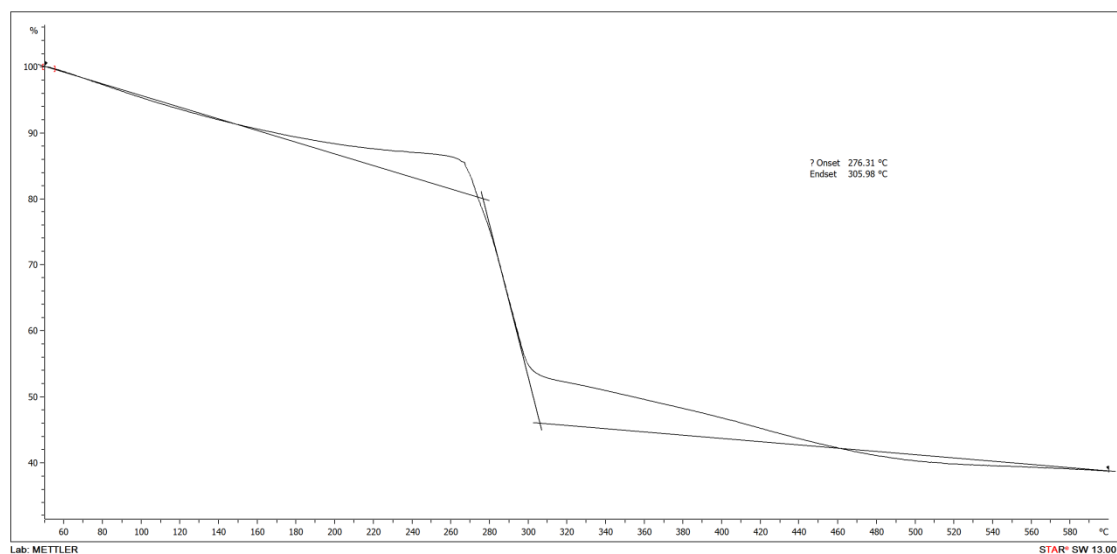
รูปภาพ ค-5 เทอร์โมแกรมของอัลจิเนต/CMC ในอัตราส่วน 8:2 (A8C2)

6. CMC (A0C10)



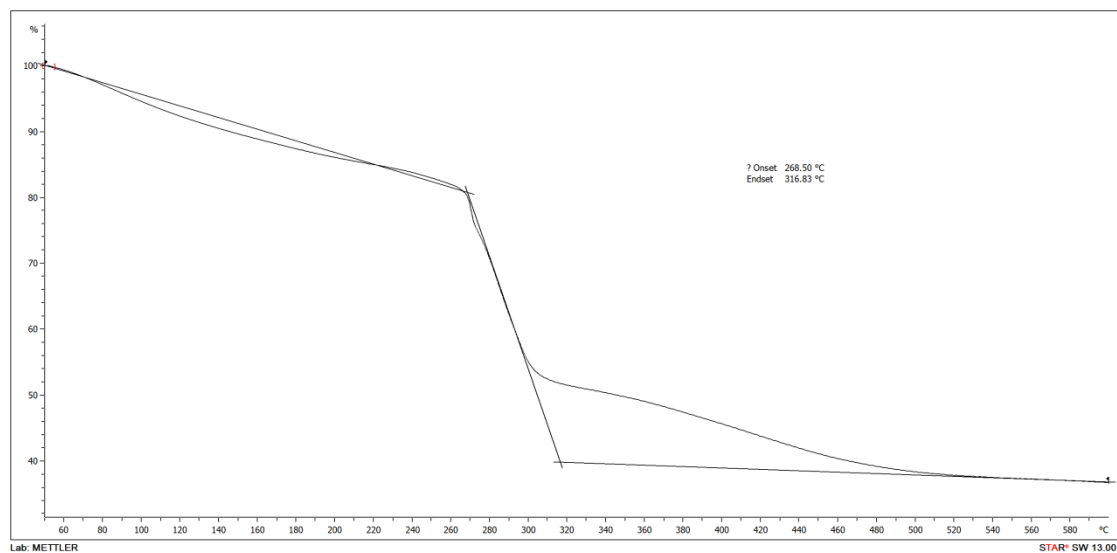
รูปภาพ ค-6 เทอร์โมแกรมของ CMC บริสุทธิ์

7. CMC เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์เข้มข้นร้อยละ 2 (A0C10-G2)



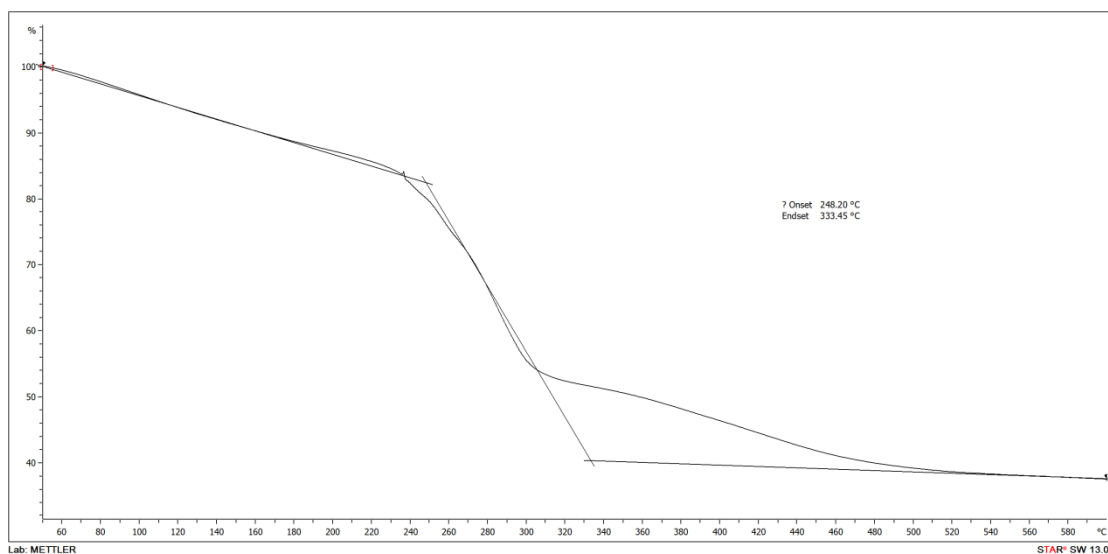
รูปภาพ ค-7 เทอร์โมแกรมของ CMC เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์เข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก (A0C10-G2)

8. อัลจินต/CMC ในอัตราส่วน 2:8 เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์เข้มข้นร้อยละ 2 (A2C8-G2)



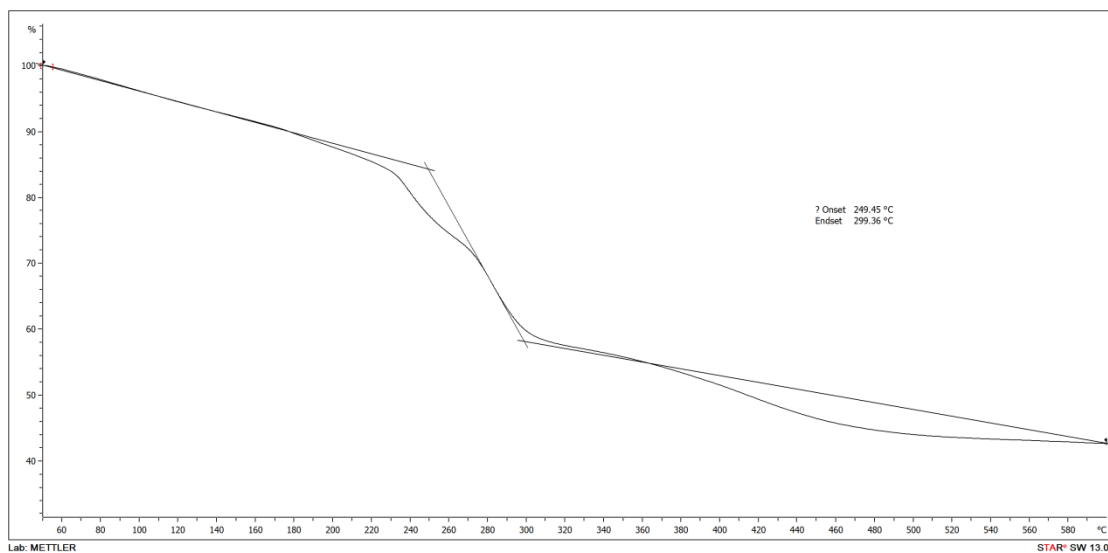
รูปภาพ ค-8 เทอร์โมแกรมอัลจินต/CMC ในอัตราส่วน 2:8 เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์เข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก (A2C8-G2)

9. อัลจิเนต/CMC ในอัตราส่วน 4:6 เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์เข้มข้นร้อยละ 2 (A4C6-G2)



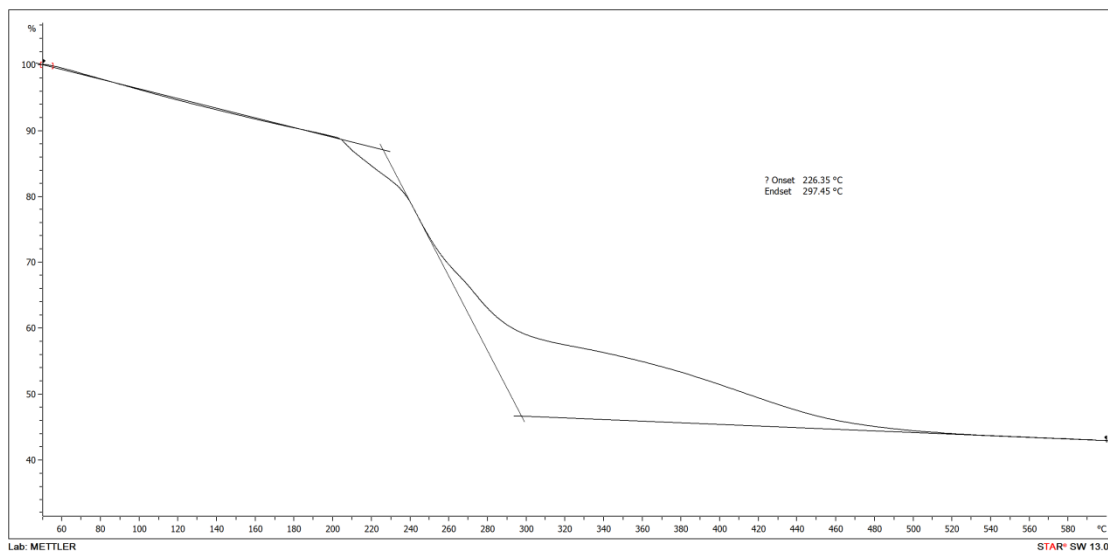
รูปภาพ ค-9 เทอร์โมแกรมของอัลจิเนต/CMC อัตราส่วน 4:6 เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์เข้มข้น ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก (A4C6-G2)

10. อัลจิเนต/CMC อัตราส่วน 6:4 เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์เข้มข้นร้อยละ 2 (A6C4-G2)



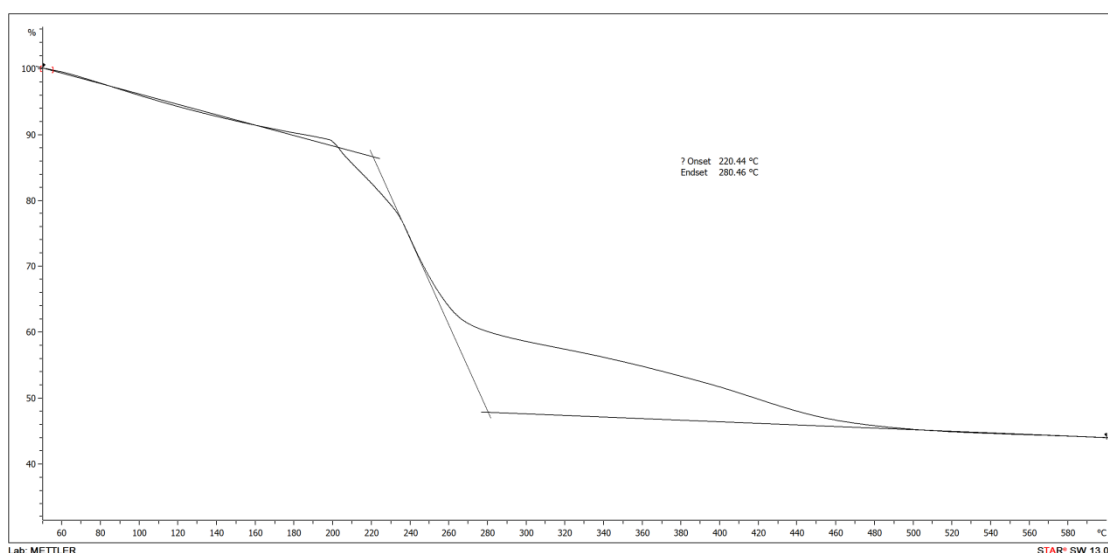
รูปภาพ ค-10 เทอร์โมแกรมของอัลจิเนต/CMC ในอัตราส่วน 6:4 เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์เข้มข้น ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก (A6C4-G2)

11. อัลจิเนต/CMC ในอัตราส่วน 8:2 เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์เข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก (A8C2-G2)



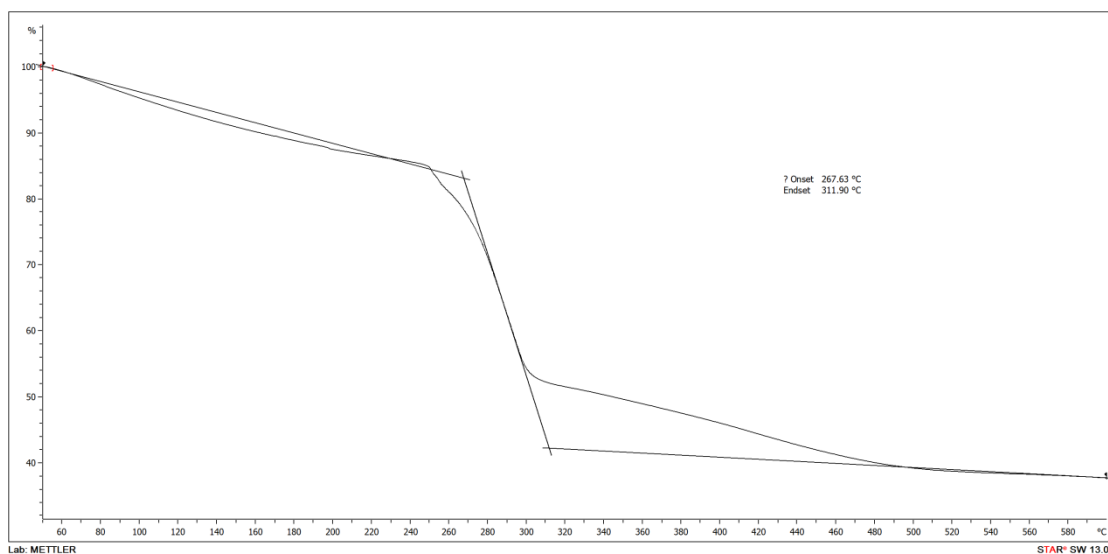
รูปภาพ ค-11 เทอร์โมแกรมของอัลจิเนต/CMC ในอัตราส่วน 8:2 เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์เข้มข้น ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก (A8C2-G2)

12. อัลจิเนตเชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์เข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก (A10C0-G2)



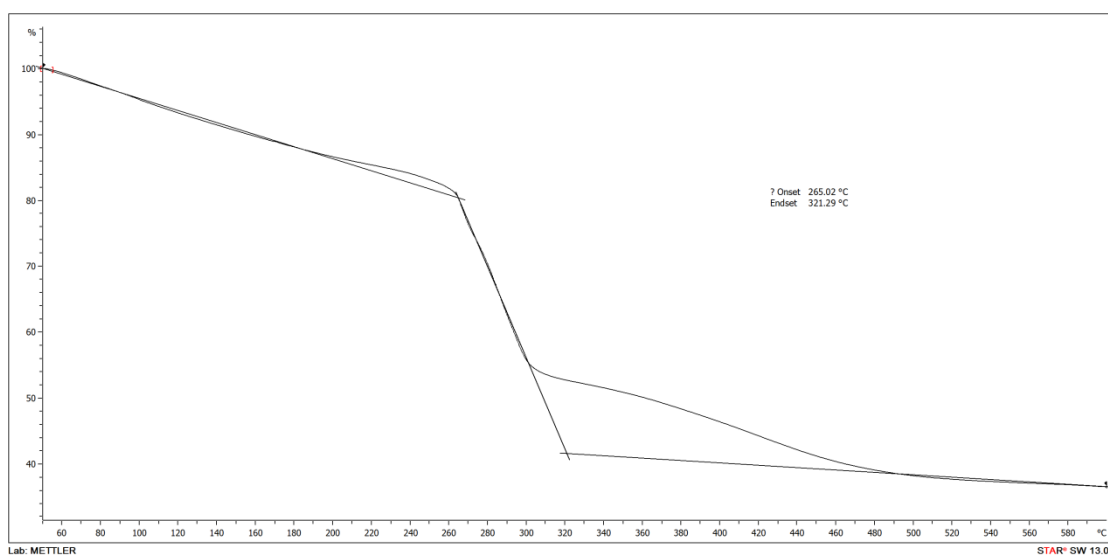
รูปภาพ ค-12 เทอร์โมแกรมของอัลจิเนตเชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์เข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก (A10C0-G2)

13. CMC เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก (A0C10-G5)



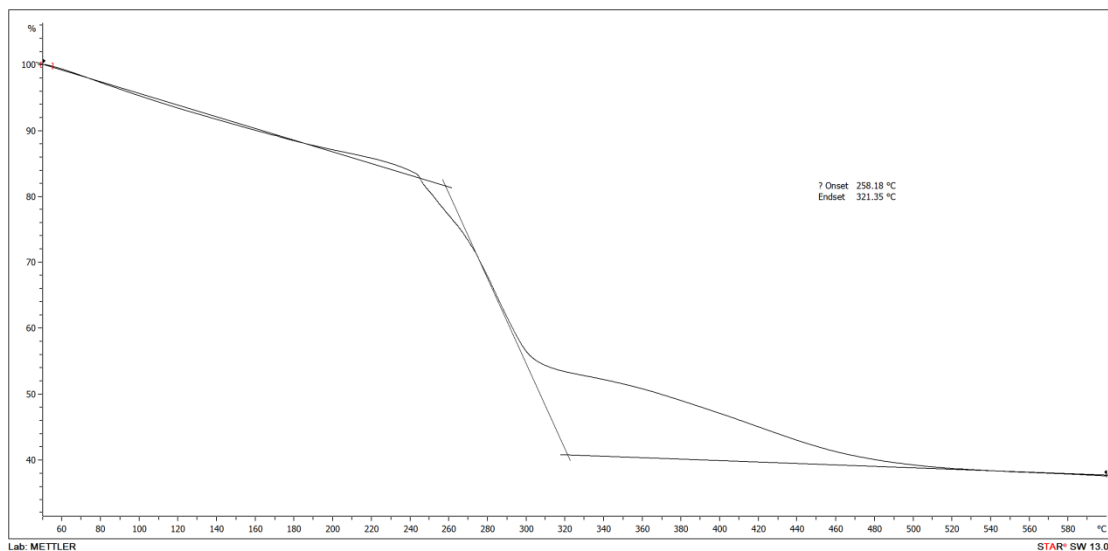
รูปภาพ ค-13 เทอร์โมแกรมของ CMC เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก (A0C10-G5)

14. อัลจิเนต/CMC ในอัตราส่วน 2:8 เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก (A2C8-G5)



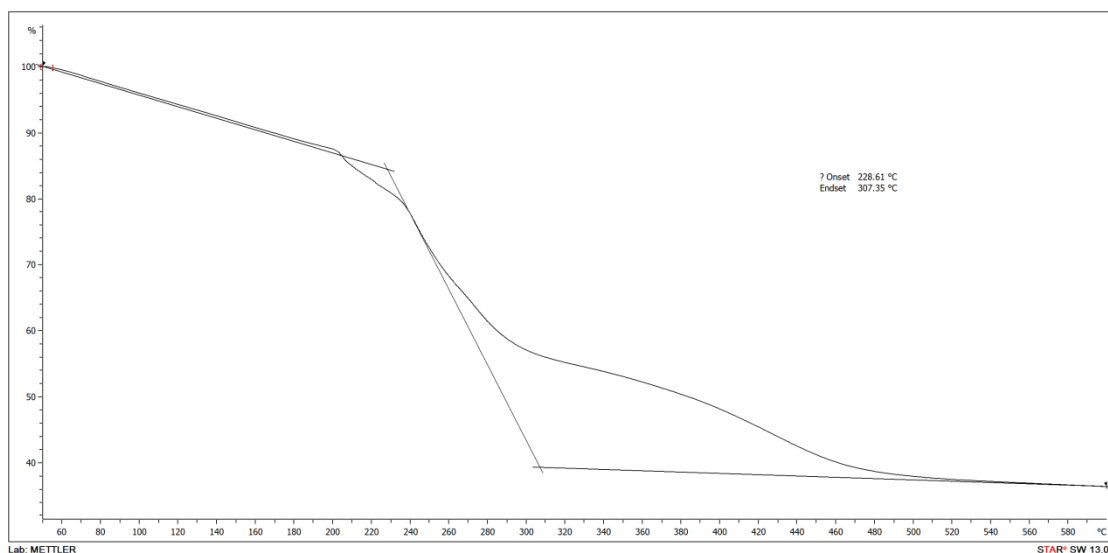
รูปภาพ ค-14 เทอร์โมแกรมของอัลจิเนต/ CMC ในอัตราส่วน 2:8 เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก (A2C8-G5)

15. อัลจิเนต/ CMC ในอัตราส่วน 4:6 เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮต์เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก (A4C6-G5)



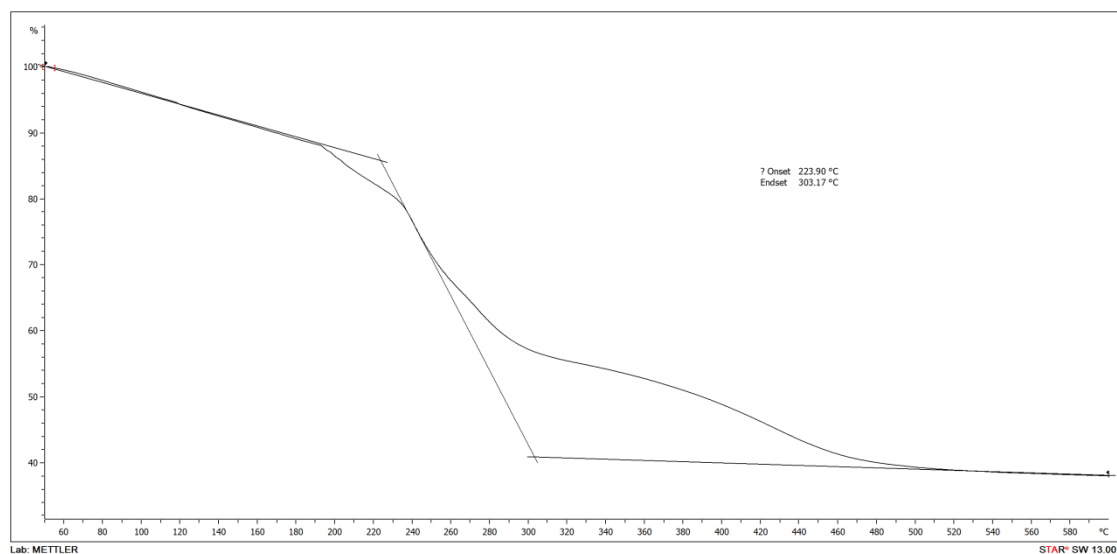
รูปภาพ ค-15 เทอร์โมแกรมของอัลจิเนต/ CMC ในอัตราส่วน 4:6 เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮต์เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก (A4C6-G5)

16. อัลจิเนต/ CMC ในอัตราส่วน 6:4 เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮต์เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก (A6C4-G5)



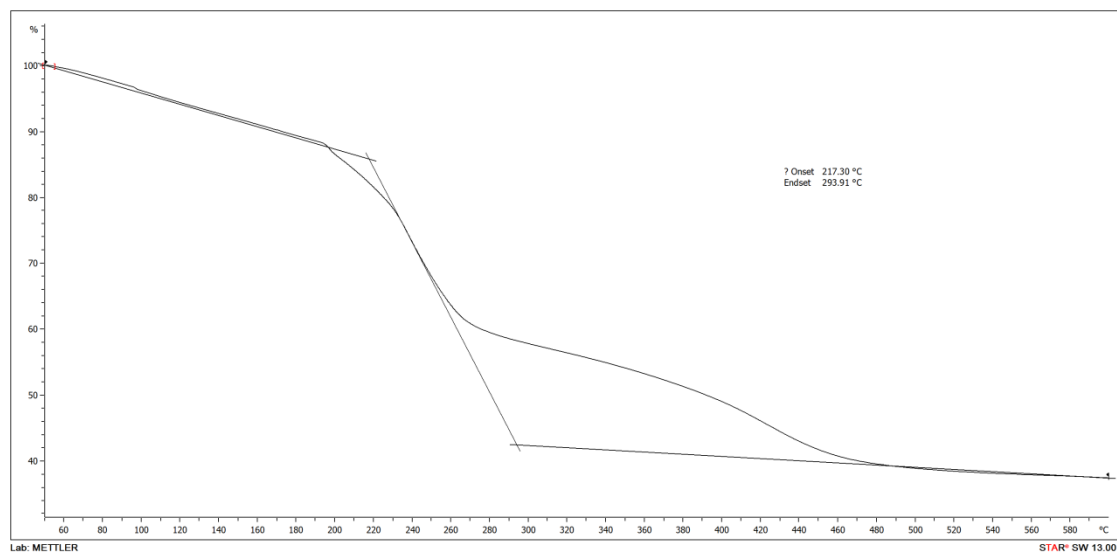
รูปภาพ ค-16 เทอร์โมแกรมของอัลจิเนต/ CMC ในอัตราส่วน 6:4 เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮต์เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก (A6C4-G5)

17. อัลจิเนต/ CMC ในอัตราส่วน 8:2 เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์เข้มข้นร้อยละ 5 (A8C2-G5)



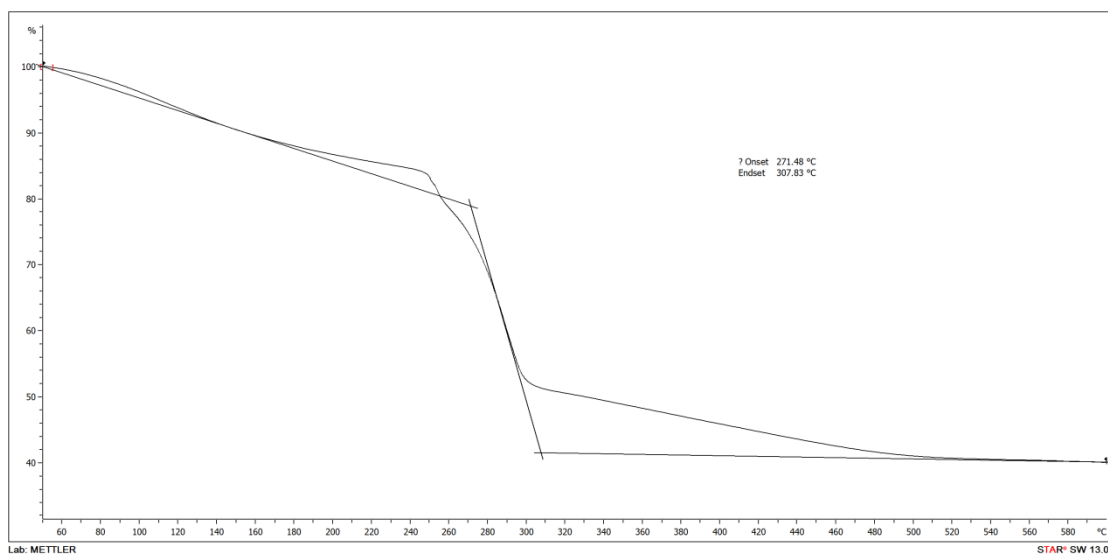
รูปภาพ ค-17 เทอร์โมแกรมของอัลจิเนต/ CMC ในอัตราส่วน 8:2 เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์เข้มข้นร้อยละ 5 (A8C2-G5)

18. อัลจิเนตเชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก (A10C0-G5)



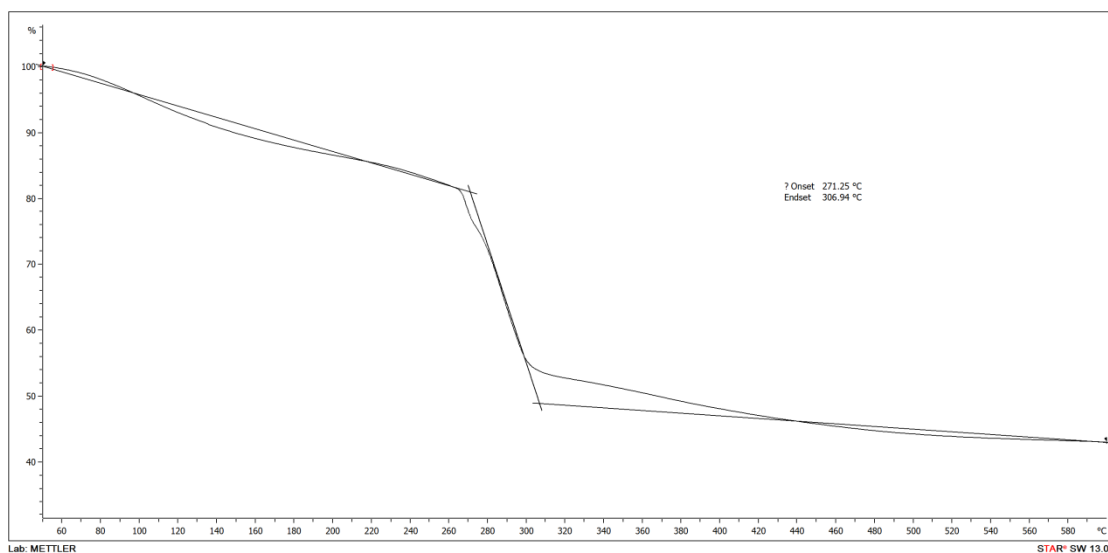
รูปภาพ ค-18 เทอร์โมแกรมของอัลจิเนตเชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก (A10C0-G5)

19. CMC เชื่อมขวางด้วยคอปเปอร์ซัลเฟต 0.02 โมลลาร์ (A0C10-Cu2)



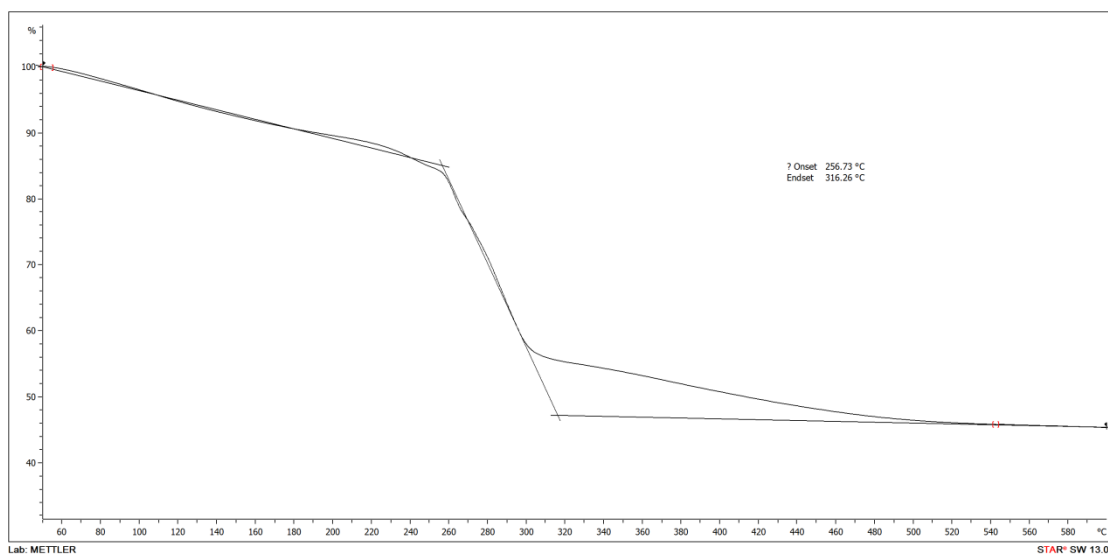
รูปภาพ ค-19 เทอร์โมแกรมของ CMC เชื่อมขวางด้วยคอปเปอร์ซัลเฟต 0.02 โมลลาร์ (A0C10-Cu2)

20. อัลจิเนต/ CMC ในอัตราส่วน 2:8 เชื่อมขวางด้วยคอปเปอร์ซัลเฟต 0.02 โมลลาร์ (A2C8-Cu2)



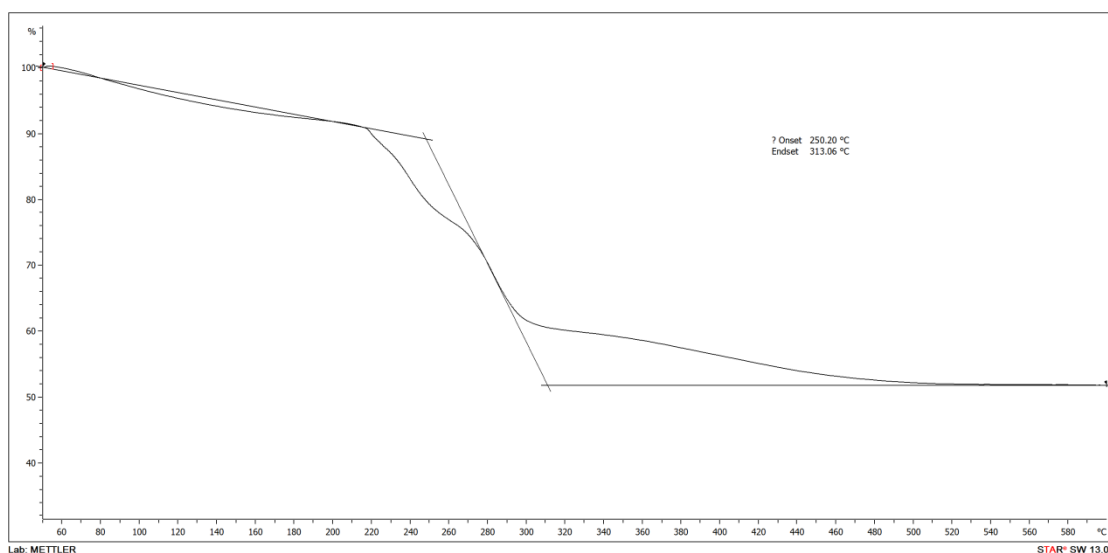
รูปภาพ ค-20 เทอร์โมแกรมของอัลจิเนต/ CMC ในอัตราส่วน 2:8 เชื่อมขวางด้วยคอปเปอร์ซัลเฟต 0.02 โมลลาร์ (A2C8-Cu2)

21. อัลจิเนต/ CMC ในอัตราส่วน 4:6 เชื่อมขวางด้วยคอปเปอร์ซัลเฟต 0.02 โมลลาร์ (A4C6-Cu2)



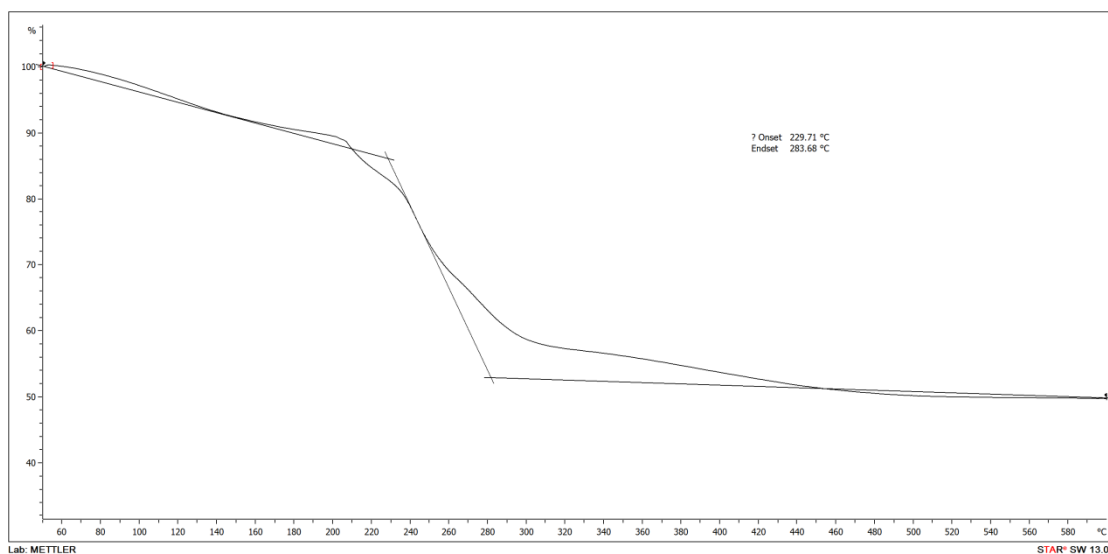
รูปภาพ ค-21 เทอร์โมแกรมของอัลจิเนต/คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสในอัตราส่วน 4:6 เชื่อมขวางด้วยคอปเปอร์ซัลเฟต 0.02 โมลลาร์ (A4C6-Cu2)

22. อัลจิเนต/ CMC ในอัตราส่วน 6:4 เชื่อมขวางด้วยคอปเปอร์ซัลเฟต 0.02 โมลลาร์ (A6C4-Cu2)



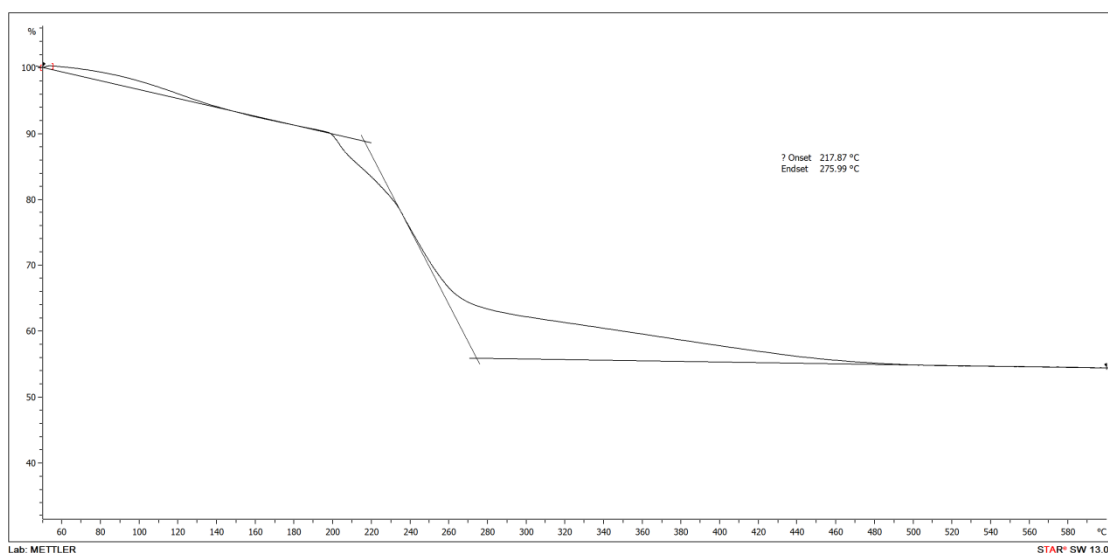
รูปภาพ ค-22 เทอร์โมแกรมของอัลจิเนต/ CMC ในอัตราส่วน 6:4 เชื่อมขวางด้วยคอปเปอร์ซัลเฟต 0.02 โมลลาร์ (A6C4-Cu2)

23. อัลจิเนต/ CMC ในอัตราส่วน 8:2 เชื่อมขวางด้วยคอปเปอร์ซัลเฟต 0.02 โมลลาร์ (A8C2-Cu2)



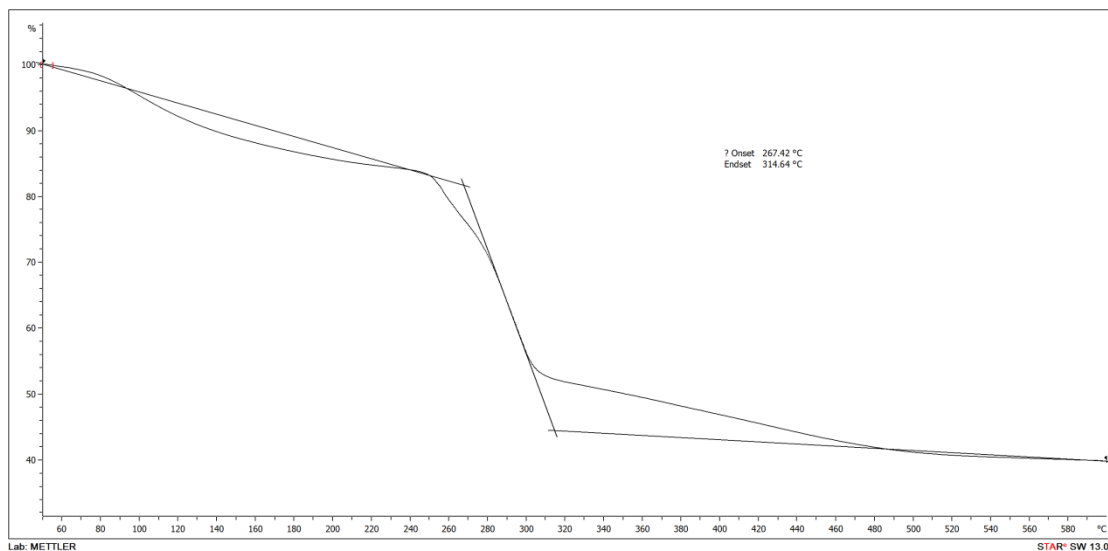
รูปภาพ ค-23 เทอร์โมแกรมของอัลจิเนต/ CMC ในอัตราส่วน 8:2 เชื่อมขวางด้วยคอปเปอร์ซัลเฟต 0.02 โมลลาร์ (A8C2-Cu2)

24. อัลจิเนตเชื่อมขวางด้วยคอปเปอร์ซัลเฟต 0.02 โมลลาร์ (A10C0-Cu2)



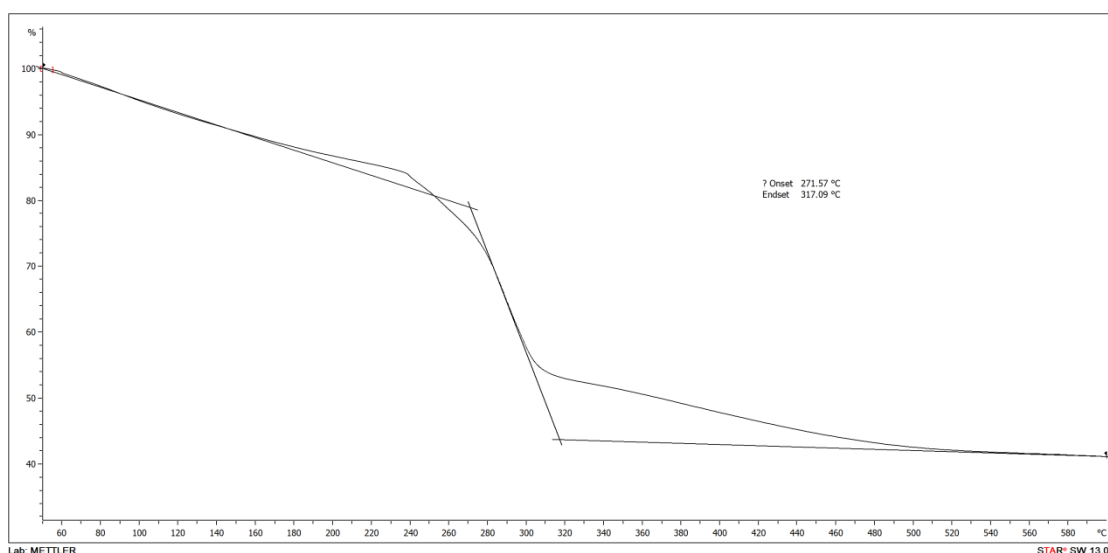
รูปภาพ ค-24 เทอร์โมแกรมของอัลจิเนตเชื่อมขวางด้วยคอปเปอร์ซัลเฟต 0.02 โมลลาร์ (A10C0-Cu2)

25. CMC เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์เข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนักร่วมกับคอปเปอร์ซัลเฟต 0.02 โมลลาร์ (A0C10-G2Cu2)



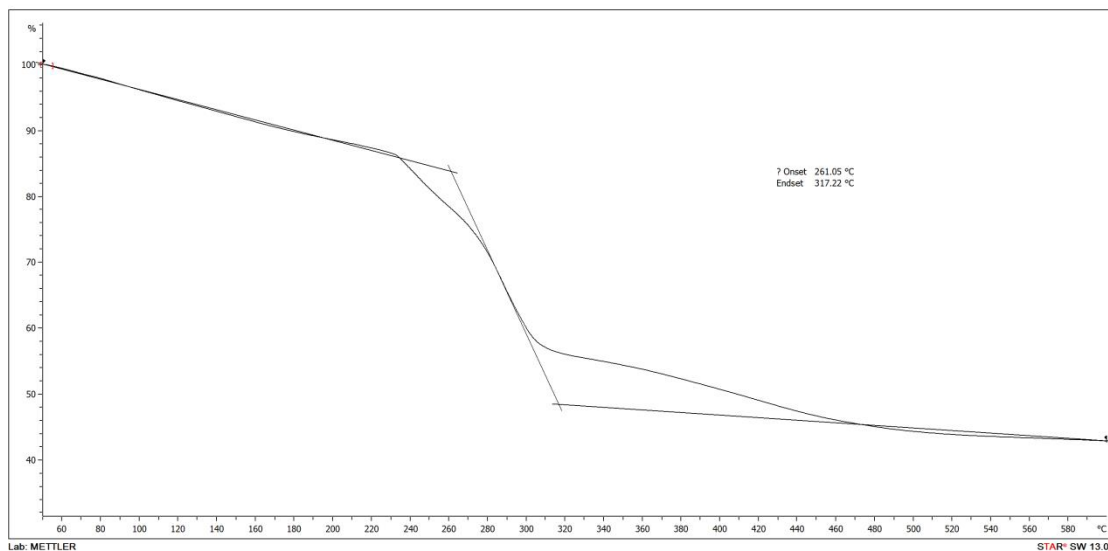
รูปภาพ ค-25 เทอร์โมแกรมของ CMC เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์เข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ร่วมกับ คอปเปอร์ซัลเฟต 2 มิลลิโมล (A0C10-G2Cu2)

26. อัลจินेट/ CMC ในอัตราส่วน 2:8 เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์เข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ร่วมกับคอปเปอร์ซัลเฟต 0.02 โมลลาร์ (A2C8-G2Cu2)



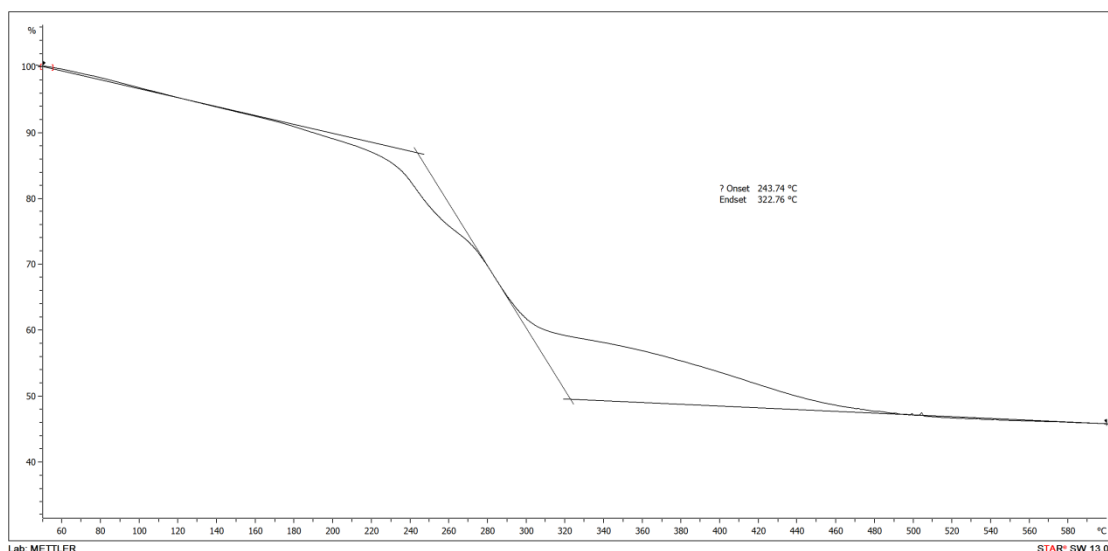
รูปภาพ ค-26 เทอร์โมแกรมของอัลจินेट/ CMC ในอัตราส่วน 2:8 เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์เข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนักร่วมกับคอปเปอร์ซัลเฟต 0.02 โมลลาร์ (A2C8-G2Cu2)

27. อัลจิเนต/ CMC ในอัตราส่วน 4:6 เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์เข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ร่วมกับคอปเปอร์ซัลเฟต 0.02 โมลลาร์ (A4C6-G2Cu2)



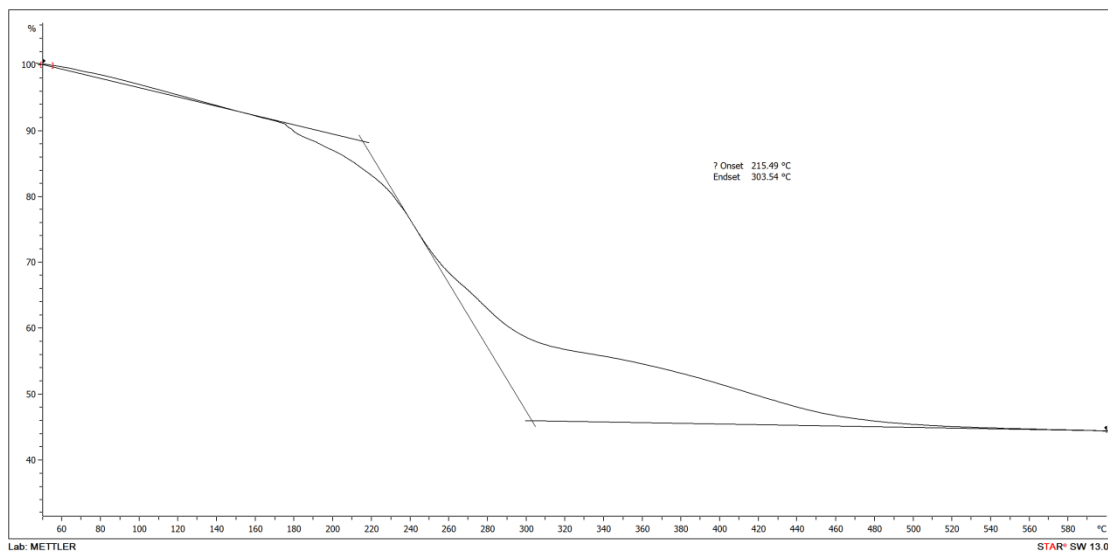
รูปภาพ ค-27 เทอร์โมแกรมของอัลจิเนต/ CMC ในอัตราส่วน 4:6 เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์เข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ร่วมกับคอปเปอร์ซัลเฟต 0.02 โมลลาร์ (A4C6-G2Cu2)

28. อัลจิเนต/ CMC ในอัตราส่วน 6:4 เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์เข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ร่วมกับคอปเปอร์ซัลเฟต 0.02 โมล (A6C4-G2Cu2)



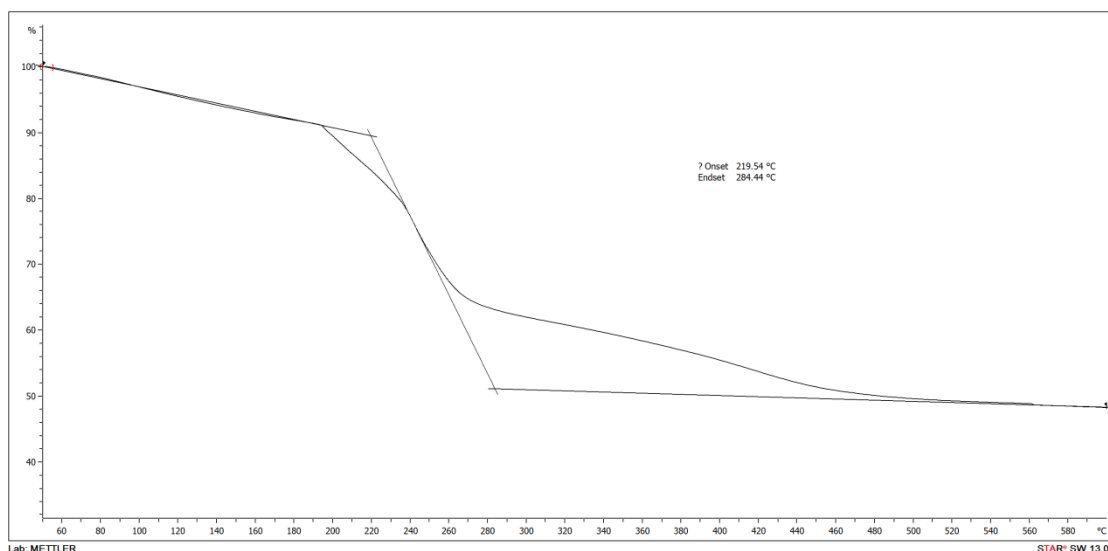
รูปภาพ ค-28 เทอร์โมแกรมของอัลจิเนต/ CMC ในอัตราส่วน 6:4 เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์เข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ร่วมกับคอปเปอร์ซัลเฟต 0.02 โมลลาร์ (A6C4-G2Cu2)

29. อัลจิเนต/ CMC ในอัตราส่วน 8:2 เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์เข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ร่วมกับคอปเปอร์ซัลเฟต 0.02 โมลลาร์ (A8C2-G2Cu2)



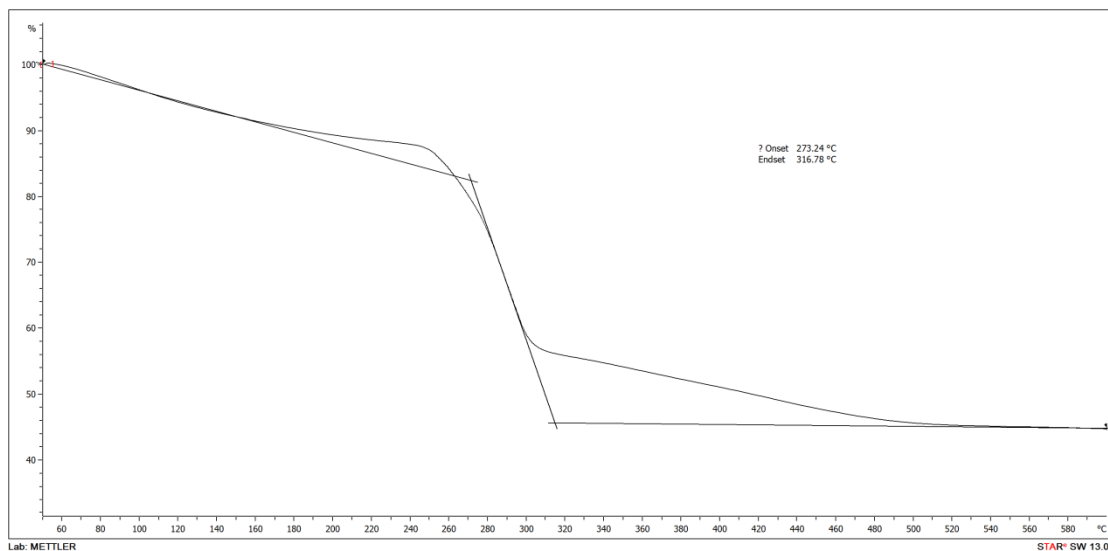
รูปภาพ ค-29 เทอร์โมแกรมของอัลจิเนต/ CMC อัตราส่วน 8:2 เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์เข้มข้น ร้อยละ 2 ร่วมกับคอปเปอร์ซัลเฟต 0.02 โมลลาร์ (A8C2-G2Cu2)

30. อัลจิเนตเชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์เข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ร่วมกับคอปเปอร์ซัลเฟต 0.02 โมล (A10C0-G2Cu2)



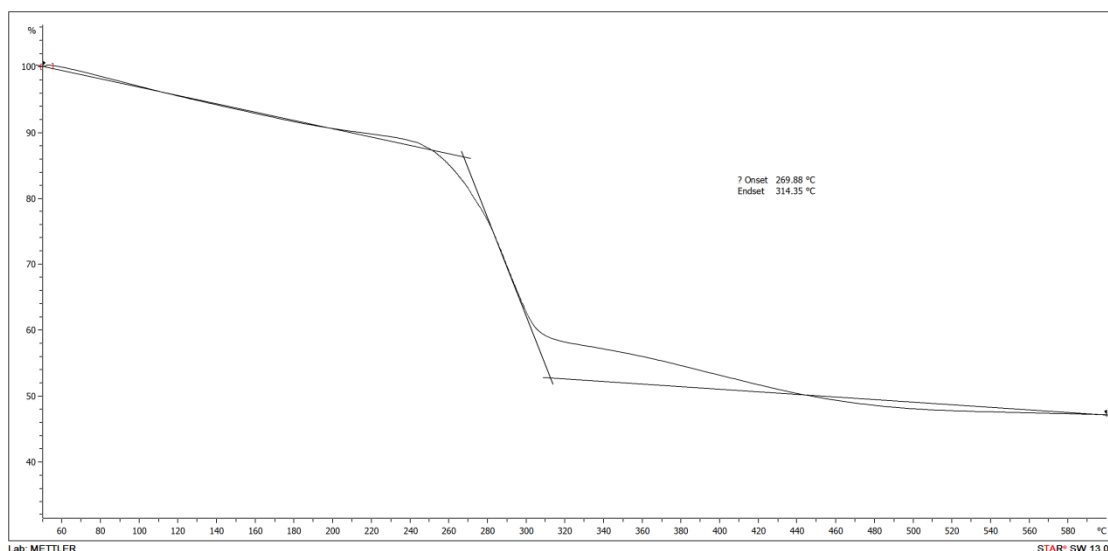
รูปภาพ ค-30 เทอร์โมแกรมของอัลจิเนตเชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์เข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ร่วมกับคอปเปอร์ซัลเฟต 0.02 โมลลาร์ (A10C0-G2Cu2)

31. CMC เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักร่วมกับคอปเปอร์ซัลเฟต 0.02 โมลลาร์ (A0C10-G5Cu2)



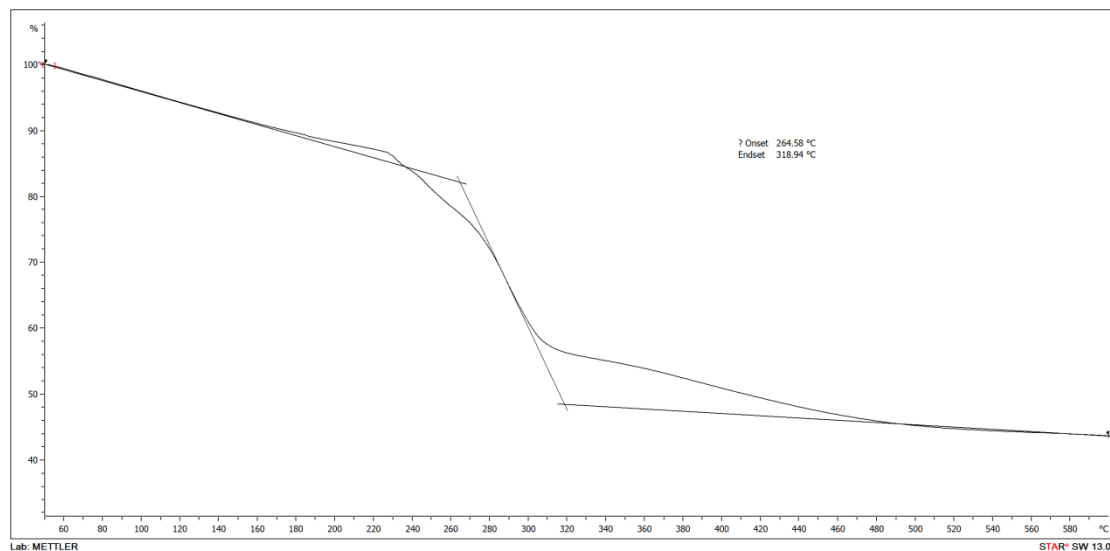
รูปภาพ ค-31 เทอร์โมแกรมของ CMC เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ร่วมกับคอปเปอร์ซัลเฟต 0.02 โมลลาร์ (A0C10-G5Cu2)

32. อัลจิเนต/ CMC ในอัตราส่วน 2:8 เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ร่วมกับคอปเปอร์ซัลเฟต 0.02 โมลลาร์ (A2C8-G5Cu2)



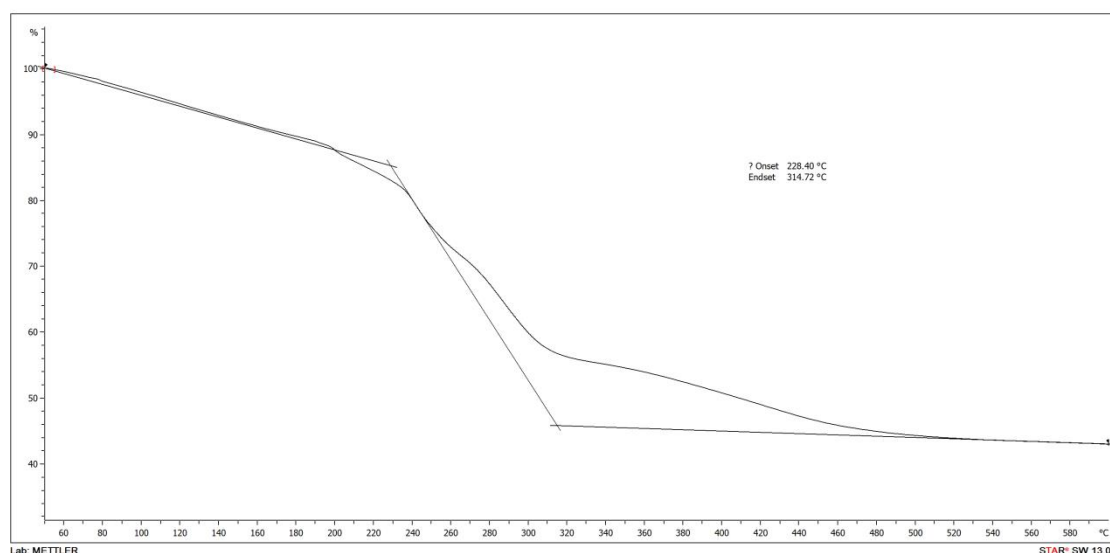
รูปภาพ ค-32 เทอร์โมแกรมของอัลจิเนต/ CMC ในอัตราส่วน 2:8 เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ร่วมกับคอปเปอร์ซัลเฟต 0.02 โมลลาร์ (A2C8-G5Cu2)

33. อัลจิเนต/ CMC ในอัตราส่วน 4:6 เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ร่วมกับคอปเปอร์ซัลเฟต 0.02 โมลลาร์ (A4C6-G5Cu2)



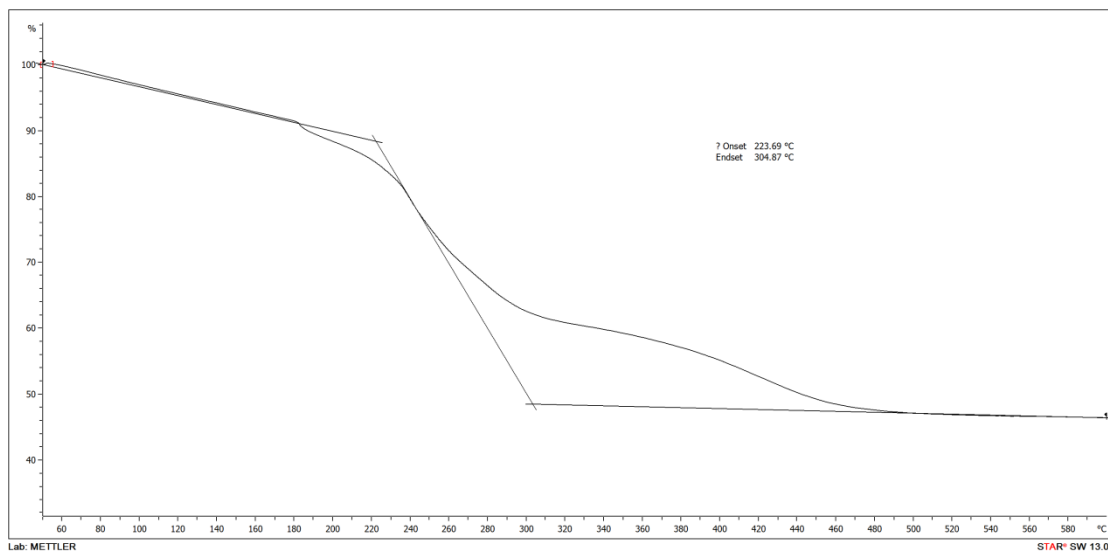
รูปภาพ ค-33 เทอร์โมแกรมของอัลจิเนต/ CMC ในอัตราส่วน 4:6 เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ร่วมกับคอปเปอร์ซัลเฟต 0.02 โมลลาร์ (A4C6-G5Cu2)

34. อัลจิเนต/ CMC ในอัตราส่วน 6:4 เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ร่วมกับคอปเปอร์ซัลเฟต 0.02 โมลลาร์ (A6C4-G5Cu2)



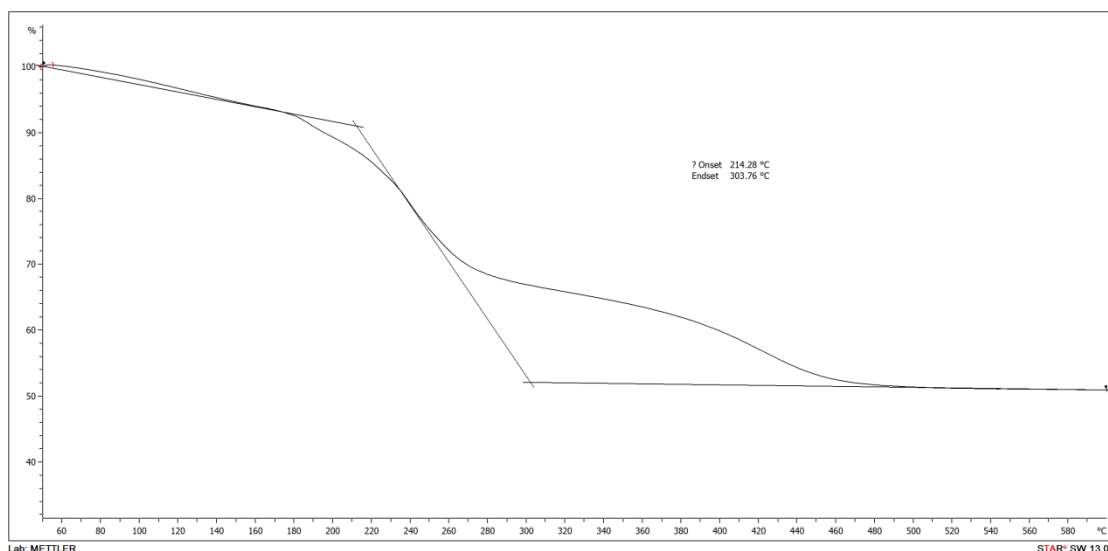
รูปภาพ ค-34 เทอร์โมแกรมของอัลจิเนต/ CMC ในอัตราส่วน 6:4 เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ร่วมกับคอปเปอร์ซัลเฟต 0.02 โมลลาร์ (A6C4-G5Cu2)

35. อัลจิเนต/ CMC ในอัตราส่วน 8:2 เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ร่วมกับคอปเปอร์ซัลเฟต 0.02 โมลลาร์ (A8C2-G5Cu2)



รูปภาพ ค-35 เทอร์โมแกรมของอัลจิเนต/ CMC ในอัตราส่วน 8:2 เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ร่วมกับคอปเปอร์ซัลเฟต 0.02 โมลลาร์ (A8C2-G5Cu2)

36. อัลจิเนตเชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ร่วมกับคอปเปอร์ซัลเฟต 0.02 โมลลาร์ (A10C0-G5Cu2)



รูปภาพ ค-36 เทอร์โมแกรมของอัลจิเนตเชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ร่วมกับคอปเปอร์ซัลเฟต 0.02 โมลลาร์ (A10C0-G5Cu2)

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาววัชรีย์ ศรีทวีสินทรัพย์ เกิดเมื่อวันที่ 30 ธันวาคม พ.ศ. 2533 สำเร็จการศึกษา
ระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม จากคณะวิทยาศาสตร์ สถาบัน
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2555 หลังจากนั้นจึงเข้าศึกษาต่อ
ในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2556 และสำเร็จการศึกษาในภาคต้นปีการศึกษา 2558

