

การเตรียมแผ่นโปรงแสงจากเซลลูโลสแอโรเจล



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
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2560

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PREPARATION OF TRANSLUCENT SHEETS FROM CELLULOSE AEROGEL



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

Technology

Department of Materials Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2017

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การเตรียมแผ่นโปร่งแสงจากเซลลูโลสแอโรเจล

โดย

นางสาวสาวิตรี สิ้นธุ

สาขาวิชา

วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร. กาวี ศรีกุลกิจ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. ดวงดาว อัจฉรงค์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร. กาวี ศรีกุลกิจ)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สิริรัตน์ จารุจินดา)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร. ปิยะพร คามภิรภาพพันธ์)

CHULALONGKORN UNIVERSITY

5972138023 : MAJOR APPLIED POLYMER SCIENCE AND TEXTILE TECHNOLOGY

KEYWORDS: CELLULOSE AEROGEL / REFRACTIVE INDEX MATCHING POLYMER /
TRANSLUCENT CELLULOSE SHEET

SAWITREE SINTHU: PREPARATION OF TRANSLUCENT SHEETS FROM CELLULOSE
AEROGEL. ADVISOR: ASSOC. PROF. KAWEE SRIKULKIT, Ph.D., 85 pp.

In this work, translucent cellulose sheet was prepared from wet cellulose aerogel. The wet cellulose aerogel sheet was prepared via NaOH/urea dissolution system followed by multiple solvent exchanges. Firstly, water hyacinth cellulose solution was prepared and then cast into plastic mold. The casting solution was left standing to become solid hydrogel. Then, multiple solvent exchanges by water was carried out in order to remove NaOH and urea completely to obtain wet cellulose aerogel. Then, translucent cellulose sheet was successfully prepared by backfilling the nano/micro sized aerogel channel with a refractive index matching polymer. In this research, two types of polymethylmethacrylate emulsions (low T_g and high T_g) were employed. In all cases, translucent cellulose sheets exhibited 80-90 percent transparency. In contrast, cellulose aerogel exhibited relatively low percent transmittance only 8.24%. Then, the thermal conductivity was determined. In addition, the coefficient of thermal expansion (CTE) of the translucent sheet prepared from high T_g acrylic resin possessed a lower coefficient of thermal expansion than that prepared from low T_g commercial resin, indicating that high T_g acrylic resin was able to resist shape change. As a result, translucent cellulose sheet prepared from high T_g acrylic resin exhibited higher thermal resistancy than that prepared from low T_g acrylic resin.

Department: Materials Science Student's Signature

Field of Study: Applied Polymer Science Advisor's Signature
and Textile Technology

Academic Year: 2017

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้อย่างสมบูรณ์ เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์ทางด้านเงินทุน เครื่องมือ วัสดุ อุปกรณ์ สถานที่ในการทำงานวิจัย และความช่วยเหลือทางด้านวิชาการ จากคณะอาจารย์ และเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอขอบคุณคณะอาจารย์ และผู้สนับสนุนเงินทุน ดังรายนามต่อไปนี้

1. รองศาสตราจารย์ ดร. กาวี ศรีกุลกิจ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์) ที่คอยช่วยเหลือข้าพเจ้าทั้งในด้านของวิชาการ(ทฤษฎี) และภาคปฏิบัติ ให้แนวทางและวิธีแก้ไขตั้งแต่เริ่มทำงานวิจัย จนบรรลุวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้

2. รองศาสตราจารย์ ดร. ดวงดาว อัจจงค์ ที่สละเวลามาเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

3. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สิริรัตน์ จารุจินดา ที่สละเวลามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

4. รองศาสตราจารย์ ดร. ปิยะพร คามภีรภาพพันธ์ (ผู้ทรงคุณวุฒิจากภายนอก) ที่สละเวลามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

5. ศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีปิโตรเคมีและวัสดุ (ปิโตรแมท) เป็นผู้สนับสนุนเงินทุนในการทำงานวิจัย

นอกจากนี้ข้าพเจ้ายังขอขอบคุณ บิดา มารดา และเพื่อน ที่คอยให้กำลังใจ และความช่วยเหลือต่างๆ ในระหว่างทำงานวิจัย จนสามารถสร้างสรรค์วิทยานิพนธ์นี้ได้สำเร็จ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
สารบัญตาราง.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 วารสารปริทรรศน์.....	4
2.1 เซลลูโลส (cellulose).....	4
2.1.1 ผักตบชวา.....	4
2.1.1.1 ลักษณะของผักตบชวา.....	4
2.1.1.2 ประโยชน์ของผักตบชวา.....	6
2.1.1.3 ปัญหาที่เกิดจากผักตบชวา.....	6
2.1.1.4 ส่วนประกอบทางเคมีของผักตบชวา.....	7
2.1.2 องค์ประกอบของลิกโนเซลลูโลส.....	8
2.1.3 สมบัติของเซลลูโลส.....	9
2.1.3.1 ความหนืดของสารละลายเซลลูโลส.....	10
2.1.3.2 สมบัติการดูดซับ.....	10
2.2 สารละลายเซลลูโลส.....	10

2.2.1 การปรับสภาพวัตถุดิบ (pretreatment)	11
2.2.2 กลไกการละลายเซลล์ในในระบบ NaOH/Urea	13
2.3 แอโรเจล (Aerogel)	14
2.3.1 ประเภทของแอโรเจล	14
2.3.1.1 แอโรเจลที่เตรียมจากสารอินทรีย์	15
2.3.1.2 แอโรเจลที่เตรียมจากสารอนินทรีย์	16
2.4 วัสดุโปร่งแสง	16
2.4.1 วัสดุโปร่งแสงที่เตรียมจากสารอินทรีย์	16
2.4.2 วัสดุโปร่งแสงที่เตรียมจากสารอนินทรีย์	17
2.4.2.1 กระดาษเซลโลเฟน	17
2.4.2.2 फिल्मห่ออาหาร ผ้าปิดแผล และหลอดเลือดเทียมที่มีความโปร่งใส	17
2.4.2.3 Chip computer	18
2.5 อะคริลิก/แผ่นอะคริลิก	18
2.5.1 สมบัติทั่วไปของอะคริลิก	18
2.5.2 ประเภทของอะคริลิก	19
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	19
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	24
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานและแผนงานวิจัย	24
3.2 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	25
3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	26
3.4 ขั้นตอนการทดลอง	27
3.4.1 การสกัดเส้นใยเซลลูโลสบริสุทธิ์	27
3.4.2 เตรียมแผ่นเซลลูโลสแอโรเจลเปียก	27

3.4.3	เตรียมแผ่นเซลลูโลสแอโรเจลแห้ง.....	27
3.4.4	การสังเคราะห์อะคริลิกเรซิน.....	27
3.4.5	การเตรียมแผ่นเซลลูโลสโปร่งแสง.....	27
3.5	การทดสอบ.....	29
3.5.1	การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผักตบชวา.....	29
3.5.2	วิเคราะห์สัณฐานวิทยา.....	31
3.5.3	ทดสอบความสามารถในการส่องผ่านของแสง.....	31
3.5.4	ทดสอบสภาพการนำความร้อน.....	32
3.5.5	ทดสอบสมบัติการขยายตัวเมื่อได้รับความร้อน.....	33
3.5.6	ทดสอบการสลายตัวทางความร้อน.....	33
3.5.7	ทดสอบสมบัติเชิงกล.....	34
บทที่ 4	ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	35
4.1	ผลการสกัดเซลลูโลสจากผักตบชวา.....	35
4.2	ผลการสังเคราะห์อะคริลิกเรซิน.....	36
4.3	ผลการเตรียมเซลลูโลสแอโรเจล.....	39
4.3.1	ปัจจัยที่ส่งผลต่อขนาดรูพรุนของเซลลูโลสแอโรเจล.....	39
4.3.1.1	ผลของจำนวนรอบการทำวัฏจักรเยือกแข็ง/ละลาย (น้ำ).....	39
4.3.1.2	ผลของความหนาของแผ่นแอโรเจล.....	40
4.4	ผลการเตรียมเซลลูโลสโปร่งแสงจากเรซินทางการค้า.....	41
4.4.1	ลักษณะทางกายภาพ.....	41
4.4.2	สัณฐานวิทยาของแผ่นเซลลูโลสโปร่งแสง.....	42
4.4.3	สมบัติการส่องผ่านของแสง.....	43
4.4.4	สภาพการนำความร้อน.....	44

4.4.5	สมบัติการขยายตัวเมื่อได้รับความร้อน.....	45
4.4.6	สมบัติการสลายตัวทางความร้อน.....	46
4.4.7	สมบัติเชิงกล.....	48
4.4.7.1	ความทนแรงดึง (Tensile strength).....	48
4.4.7.2	มอดุลัสของยัง (Young's modulus).....	49
4.4.7.3	ความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด (Elongation at break).....	49
4.5	ผลการเตรียมเซลล์โพลีโพรพิลีนจากอะคริลิกเรซิน.....	50
4.5.1	ลักษณะทางกายภาพ.....	50
4.5.2	สัณฐานวิทยาของเซลล์โพลีโพรพิลีน.....	51
4.5.3	สมบัติการส่องผ่านของแสง.....	52
4.5.4	สภาพการนำความร้อน.....	53
4.5.5	สมบัติการขยายตัวเมื่อได้รับความร้อน.....	53
4.5.6	สมบัติการสลายตัวทางความร้อน.....	54
4.5.7	สมบัติเชิงกล.....	57
4.5.7.1	ความทนแรงดึง (Tensile strength).....	57
4.5.7.2	มอดุลัสของยัง (Young's modulus).....	57
4.5.7.3	ความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด (Elongation at break).....	58
บทที่ 5	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	60
5.1	สรุปผลการทดลอง.....	60
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	62
	รายการอ้างอิง.....	63
	ภาคผนวก.....	68
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	85

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 1.1 โครงสร้างโมเลกุลของเซลลูโลส.....	2
รูปที่ 1.2 โครงสร้างผนังเซลล์พืช.....	2
รูปที่ 2.1 ลำต้นของผักตบชวา.....	5
รูปที่ 2.2 ใบผักตบชวา.....	5
รูปที่ 2.3 ดอกผักตบชวา.....	5
รูปที่ 2.4 ผลผักตบชวา.....	6
รูปที่ 2.5 โครงสร้างทั่วไปของลิกโนเซลลูโลส.....	8
รูปที่ 2.6 ลักษณะการจัดเรียงตัวของโมเลกุลกลูโคสในเซลลูโลส.....	8
รูปที่ 2.7 โครงสร้างของเซลลูโลส.....	9
รูปที่ 2.8 โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลส.....	10
รูปที่ 2.9 กลไกการละลายของเซลลูโลส.....	13
รูปที่ 2.10 อัตราการเจริญเติบโตของตลาดแอร์เจล ในปี ค.ศ. 2010 – 2017.....	14
รูปที่ 2.11 ซิลิกาแอร์เจล.....	15
รูปที่ 2.12 คาร์บอนแอร์เจล.....	15
รูปที่ 2.13 เซลลูโลสแอร์เจล.....	16
รูปที่ 2.14 ตัวอย่างผนังบ้านที่ใช้วัสดุโปร่งแสงประเภทสารอนินทรีย์.....	17
รูปที่ 2.15 กระดาษเซลโลเฟน.....	17
รูปที่ 2.16 Chip Computer ที่ทำจากไม้.....	18
รูปที่ 3.1 การเตรียมแผ่นเซลลูโลสโปร่งแสง.....	28
รูปที่ 3.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด รุ่น JSM 6400 บริษัท JEOL.....	31
รูปที่ 3.3 เครื่อง Reflectance Spectrophotometer COLOR-EYE 7000.....	31
รูปที่ 3.4 เครื่องทดสอบการนำความร้อน.....	32

รูปที่ 3.5 เครื่องวัดการเปลี่ยนแปลงขนาดของวัสดุเมื่อได้รับความร้อน (TMA).....	33
รูปที่ 3.6 เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (TGA).....	33
รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบเนกประสงค์ บริษัท LLOYD รุ่น LF PLUS.....	34
รูปที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของผงเซลลูโลสจากผักตบชวา	35
รูปที่ 4.2 กลไกการเกิดปฏิกิริยาในขั้น initiator.....	37
รูปที่ 4.3 กลไกการเกิดปฏิกิริยาในขั้น propagation.....	38
รูปที่ 4.4 กลไกขั้นตอนการเกิด chain transferring ซึ่งจะได้ PMMA-g-PVA.....	38
รูปที่ 4.5 อะคริลิกเรซินที่สังเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ (ก) และ เรซินทางการค้า (ข)	38
รูปที่ 4.6 ลักษณะทางกายภาพของเซลลูโลสแอโรเจลแห้ง (ก) แอโรเจลเปียก (ข).....	39
รูปที่ 4.7 ภาพ SEM ของเซลลูโลสแอโรเจลที่มีจำนวนรอบวัฏจักรเยือกแข็ง/ละลายสลับกัน 1 รอบ (ก), 3 รอบ (ข), 5 รอบ (ค).....	40
รูปที่ 4.8 ภาพ SEM ของเซลลูโลสแอโรเจลที่มีความหนาต่างกัน 0.3 มม. (ก), 0.5 มม. (ข), 0.7 มม. (ค).....	40
รูปที่ 4.9 ลักษณะทางกายภาพของแผ่นเซลลูโลสโปร่งแสงที่เตรียมจากเรซินทางการค้า	41
รูปที่ 4.10 ภาพตัดขวางของแผ่นเซลลูโลสโปร่งแสงที่เตรียมจากแผ่นแอโรเจลที่มีความหนา 0.3 มม. (ก), 0.5 มม. (ข), 0.7 มม. (ค) ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่ กำลังขยาย 200 เท่า.....	42
รูปที่ 4.11 กราฟร้อยละการส่องผ่านของแสงของแผ่นเซลลูโลสแอโรเจล เรซินทางการค้าบริสุทธิ์ และแผ่นเซลลูโลสโปร่งแสง	43
รูปที่ 4.12 กราฟร้อยละการสลายตัวเมื่อได้รับความร้อนของเรซินทางการค้าบริสุทธิ์ แผ่นเซลลูโลสโปร่งแสง และเซลลูโลสบริสุทธิ์	47
รูปที่ 4.13 กราฟความทนแรงดึงของเรซินทางการค้าบริสุทธิ์และเซลลูโลสโปร่งแสง	48
รูปที่ 4.14 กราฟมอดุลัสของยังของเรซินทางการค้าบริสุทธิ์และเซลลูโลสโปร่งแสง	49
รูปที่ 4.15 กราฟความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด ของเรซินทางการค้าบริสุทธิ์และเซลลูโลสโปร่งแสง ..	50
รูปที่ 4.16 ลักษณะทางกายภาพของเซลลูโลสโปร่งแสงที่เตรียมจากอะคริลิกเรซิน	51

- รูปที่ 4.17 ภาพตัดขวางของเซลลูโลสโปร่งแสงที่เตรียมจากแผ่นแอโรเจล 0.3 มม. (ก), 0.5 มม. (ข), 0.7 มม. (ค) ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 200 เท่า 52
- รูปที่ 4.18 กราฟร้อยละการส่องผ่านของแสงของเซลลูโลสแอโรเจล อะคริลิกเรซินบริสุทธิ์ และเซลลูโลสโปร่งแสง 52
- รูปที่ 4.19 กราฟร้อยละการสลายตัวเมื่อได้รับความร้อนของเซลลูโลสบริสุทธิ์ อะคริลิกเรซินบริสุทธิ์ และเซลลูโลสโปร่งแสง..... 56
- รูปที่ 4.20 กราฟความทนแรงดึงของอะคริลิกเรซินบริสุทธิ์และเซลลูโลสโปร่งแสง 57
- รูปที่ 4.21 กราฟค่า Young's Modulus ของอะคริลิกเรซินบริสุทธิ์และเซลลูโลสโปร่งแสง 58
- รูปที่ 4.22 กราฟค่าการยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด ของอะคริลิกเรซินบริสุทธิ์และเซลลูโลสโปร่งแสง ... 59



สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1	องค์ประกอบในผักตบชวาแห้ง	7
ตารางที่ 3.1	วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	25
ตารางที่ 3.2	เครื่องมือที่นำมาใช้ในงานวิจัย	26
ตารางที่ 3.3	สูตรต่างๆของวัสดุเชิงประกอบของเซลลูโลสโปร่งแสง	28
ตารางที่ 4.1	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของผักตบชวาภายหลังการกำจัดลิกนินและฟอกขาว....	36
ตารางที่ 4.2	สภาพการนำความร้อนของเรซินทางการค้าบริสุทธิ์และแผ่นเซลลูโลสโปร่งแสง	44
ตารางที่ 4.3	ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของเรซินการค้าบริสุทธิ์และเซลลูโลส โปร่งแสง	45
ตารางที่ 4.4	อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของเซลลูโลสบริสุทธิ์ เรซินทางการค้าบริสุทธิ์ และแผ่นเซลลูโลสโปร่งแสง	47
ตารางที่ 4.5	ค่าการนำความร้อนของอะคริลิกเรซินบริสุทธิ์และเซลลูโลสโปร่งแสง	53
ตารางที่ 4.6	ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของอะคริลิกเรซินบริสุทธิ์และเซลลูโลส โปร่งแสง	54
ตารางที่ 4.7	อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของเซลลูโลสบริสุทธิ์ อะคริลิกเรซินบริสุทธิ์ และเซลลูโลสโปร่งแสง	56

บทที่ 1

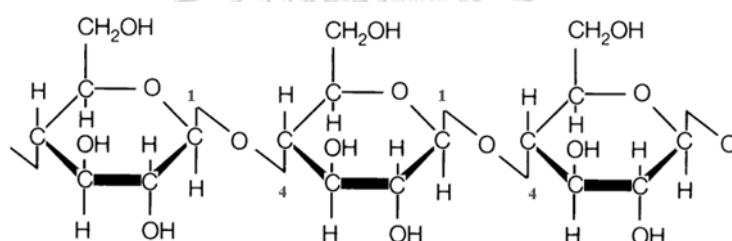
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

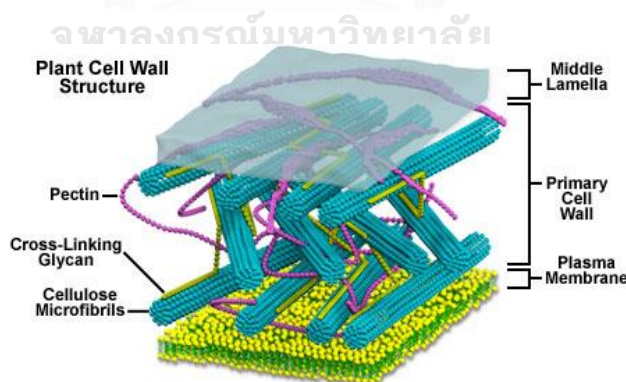
ปัจจุบันวัสดุโปร่งแสงที่มีสมบัติยืดหยุ่น โค้งงอได้ มีลักษณะคงรูปเมื่อโดนความร้อนหรือมีความสามารถในการนำความร้อนต่ำ กำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก โดยเซลลูโลสซึ่งเป็นวัสดุจากธรรมชาติที่สามารถที่จะนำมาผลิตเป็นวัสดุโปร่งแสงที่มีสมบัติที่ดีดังกล่าวได้ เพื่อใช้ทดแทนพลาสติกที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ทำให้รัฐบาลจำเป็นต้องสูญเสียงบประมาณจำนวนมากเพื่อกำจัดขยะเหล่านี้ ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานของแผ่นโปร่งแสงที่เตรียมจากเซลลูโลส เช่น กระจาดาชเซลโลเฟน พิล์มกระจกกรองแสง หน้าจอโทรศัพท์ OLED และ Chip computer ซึ่งเป็นตัวรับสัญญาณไวเลตในโทรศัพท์มือถือ หรือคอมพิวเตอร์ โดยการผลิตเซลลูโลสโปร่งแสงสามารถทำได้หลายวิธี เช่นการเตรียมจากแผ่นไม้เนื้อแข็งโดยผ่านขั้นตอนการกำจัดสิ่งสกปรกและลิกนินออกจากแผ่นไม้อย่างสมบูรณ์ จากนั้นนำแผ่นไม้ที่มีรูพรุนไปจุ่มอัดพอลิเมอร์ที่มีค่าดัชนีการหักเหใกล้เคียงกับเซลลูโลส เช่น polyvinyl pyrrolidone (PVP) โดยจุ่มแผ่นไม้ที่ผ่านการกำจัดสิ่งสกปรกแล้วลงใน PVP ภายใต้ความดัน 200 Pa เป็นเวลา 10 นาที แล้วนำไปวางบนเตาที่ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เพื่อให้ตัวทำละลายระเหยหมด จะได้แผ่นไม้โปร่งแสงออกมา และอีกวิธีหนึ่งคือเตรียมจากผงไม้ โดยนำผงไม้มากำจัดสิ่งสกปรกและลิกนินออกให้สมบูรณ์ จากนั้นนำผงไม้มาผสมน้ำและทำให้เป็นแผ่นด้วยการกรองผ่านแผ่นเมมเบรนก็ได้แผ่นผงไม้ จากนั้นจุ่มแผ่นผงไม้ในน้ำยาอะคริลิเกรซินภายใต้ความดัน -0.09 MPa เป็นเวลา 12 ชม. เพื่อให้ น้ำยาเข้าไปแทนที่อากาศในรูพรุนอย่างสมบูรณ์ แล้วทำการอบด้วยแสงยูวีเพื่อให้อะคริลิเกรซินเกิดการเซตตัว ก็จะได้แผ่นไม้โปร่งแสง (translucent wood) เช่นเดียวกัน ทั้งนี้สมบัติของไม้โปร่งแสงก็จะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับน้ำยาเรซินที่ใช้

จากการศึกษาพบว่าหลักการในการเตรียมแผ่นเซลลูโลสโปร่งแสงคือการแทนที่อากาศในรูพรุนด้วยพอลิเมอร์ที่มีค่าดัชนีการหักเหที่ใกล้เคียงกับเซลลูโลสลงในรูพรุนเพื่อให้แสงเดินทางเป็นเส้นตรงไม่เกิดการสะท้อนหรือหักเห โดยแอรเจลจัดเป็นวัสดุที่มีปริมาณรูพรุนสูง และมีความหนาแน่นต่ำ อีกทั้งการเตรียมแผ่นโปร่งแสงจากแอรเจลยังมีข้อดีคือไม่ต้องใช้เครื่องมือที่มีราคาแพง และชิ้นงานไม่เกิดการหดตัว ซึ่งลักษณะของแอรเจลคือมีโครงสร้างที่เป็นรูพรุนกึ่งโปร่งแสง ภายในประกอบไปด้วยอากาศมากถึง 50–99.5% หลักการเตรียมแอรเจลคือ ต้องทำการเตรียมไฮโดรเจลขึ้นมาก่อน จากนั้นกำจัดน้ำออกจากไฮโดรเจลด้วยวิธีการไล่งของเหลวออกโดยไม่ทำให้โครงสร้างของแอรเจลเกิดการยุบตัว ซึ่งสามารถทำได้สองวิธีใหญ่ๆ คือ เทคนิคการทำให้แห้งแบบแช่เยือกแข็ง (freeze drying) โดย

การทำให้น้ำแข็งระเหิดกลายเป็นไอภายใต้ระบบสุญญากาศ และเทคนิคการทำแห้งแบบวิกฤตยิ่งยวด (supercritical drying) โดยใช้อุณหภูมิและความดันที่สูงมากไปไล่น้ำให้ออกจากไฮโดรเจล โดยแอโรเจลสามารถเตรียมได้จากสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ แต่ในปัจจุบันแอโรเจลที่เตรียมจากสารอินทรีย์ กำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากเซลลูโลส (สารอินทรีย์) เป็นสารไบโอพอลิเมอร์ที่มีอยู่มากในธรรมชาติ อีกทั้งยังสามารถสร้างขึ้นใหม่ได้ สามารถย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางธรรมชาติ และมีราคาถูก โดยเซลลูโลสจัดเป็นสารประกอบคาร์โบไฮเดรต (carbohydrate) ประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharide) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง โดยมีโมเลกุลของกลูโคส ($C_6H_{10}O_5$)_n มาต่อกันเป็นสายยาวด้วยพันธะไกลโคไซด์ (glycosidic bond) ที่ตำแหน่งปีต้า-1,4 ลักษณะของเซลลูโลสคือ เป็นของแข็ง ที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส และไม่ละลายในน้ำ ซึ่งเซลลูโลสถือเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในผนังเซลล์พืช เช่น ไม้ ผักตบชวา ฝ้าย กัญชง และในพืชชนิดอื่นๆ นอกจากนี้เซลลูโลสยังพบได้ในผนังเซลล์ของราและสร้างจากแบคทีเรีย เช่น แบคทีเรีย *acetobacter xylinum* ในวุ้นมะพร้าว และมักอยู่ร่วมกับ เฮมิเซลลูโลส และเพกทินเซลลูโลส



รูปที่ 1.1 โครงสร้างโมเลกุลของเซลลูโลส [1]



รูปที่ 1.2 โครงสร้างผนังเซลล์พืช [2]

เนื่องจากเซลลูโลสมีความยาวของสายโซ่โมเลกุลสูง อีกทั้งยังมีพันธะที่แข็งแรงอย่างพันธะไฮโดรเจนที่เชื่อมทั้งภายในและระหว่างโมเลกุล ทำให้เซลลูโลสมีความแข็งแรงมากและค่อนข้างที่จะละลายในน้ำหรือในตัวทำละลายทั่วไปได้ยาก แต่ในปัจจุบันได้มีการค้นพบตัวทำละลายที่สามารถละลายเซลลูโลสได้ เช่น 1-allyl-3-methylimidazolium chloride (AmlmCl), Kymene, ลิเทียม

คลอไรด์/ไดเมทิลแอสเตตาไมด์ และอัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์/ยูเรีย ทำให้สามารถนำเซลลูโลสไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลายมากขึ้น โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ตัวทำละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ยูเรีย เนื่องจากเป็นสารเคมีที่หาได้ง่าย มีราคาถูก และไม่ต้องใช้เครื่องมือที่มีราคาแพง สามารถละลายเซลลูโลสได้ที่อุณหภูมิต่ำ และสนใจเซลลูโลสจากผักตบชวาทำเป็นเซลลูโลสแอรเจลเนื่องจากผักตบชวาถือเป็นวัสดุเหลือใช้จากธรรมชาติที่มีอยู่ปริมาณมากในแม่น้ำลำคลอง ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในด้านต่างๆ เช่น ขัดขวางการคมนาคมทางน้ำ เป็นแหล่งที่อยู่อาศัยของสัตว์มีพิษ เช่น งูหนู เป็นต้น จึงมีความสนใจที่จะนำวัชพืชเหล่านี้มาผลิตเป็นวัสดุที่มีมูลค่า จากการศึกษาพบว่าผักตบชวามีส่วนประกอบของลิกนินสูงทำให้ไม่สามารถที่จะนำมาละลายในตัวทำละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ยูเรียได้โดยตรง ต้องผ่านกระบวนการทำpretreatmentก่อน เพื่อกำจัดสิ่งสกปรก โดยเฉพาะลิกนินที่เป็นตัวห่อหุ้มเส้นใยเซลลูโลส เพื่อให้ตัวทำละลายสามารถเข้าไปละลายเซลลูโลสได้ง่ายขึ้น และปริมาณตัวทำละลายที่ใช้ก็จะน้อยลง จากนั้นนำมาเตรียมให้ได้เป็นเซลลูโลสแอรเจลและทำการแทนที่น้ำในรูพรุนด้วยอะคริลิเกรซิน

ในงานวิจัยเราสนใจเตรียมแผ่นโปร่งแสงจากเซลลูโลสแอรเจล และทำการศึกษาสมบัติในด้านต่างๆของแผ่นเซลลูโลสโปร่งแสงที่เตรียมจากแผ่นเซลลูโลสแอรเจลที่มีความหนาต่างกัน เช่น สมบัติทางแสง สมบัติการนำความร้อน สมบัติเชิงกล และสมบัติการขยายตัวเมื่อได้รับความร้อน นอกจากนี้ในงานวิจัยได้ทำการเปรียบเทียบสมบัติของแผ่นโปร่งแสงที่เตรียมได้จากเซลลูโลสแอรเจลโดยการแทนที่น้ำในรูพรุนด้วยอะคริลิเกรซินที่สังเคราะห์ในห้องปฏิบัติการกับเรซินทางการค้า

1.2 วัตถุประสงค์

1. เตรียมแผ่นโปร่งแสงจากเซลลูโลสแอรเจล
2. เปรียบเทียบสมบัติของแผ่นโปร่งแสงที่เตรียมได้จากเซลลูโลสแอรเจลโดยการแทนที่น้ำในรูพรุนด้วยอะคริลิเกรซินที่สังเคราะห์ในห้องปฏิบัติการกับเรซินทางการค้า เช่น สมบัติทางแสง สมบัติการนำความร้อน สมบัติเชิงกล และสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้แผ่นโปร่งแสงที่เตรียมจากเซลลูโลสแอรเจลที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ มีสภาพนำความร้อนต่ำ และมีสมบัติเชิงกลที่ดี

บทที่ 2

วารสารปริทรรศน์

2.1 เซลลูโลส (cellulose)

ปัจจุบันเซลลูโลสถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นในอุตสาหกรรมอาหาร เครื่องสำอาง กระดาษ สิ่งทอ และยา เป็นต้น แต่เนื่องจากประเทศไทยไม่มีแหล่งผลิตเซลลูโลสที่เพียงพอทำให้ต้องมีการนำเข้าเซลลูโลสจากต่างประเทศ และจากการรายงานพบว่าในปี พ.ศ.2544 ประเทศไทยมีการนำเข้าเซลลูโลสเป็นมูลค่าสูงถึง 861,000,000 บาท [3] ซึ่งในอนาคตอาจมีแนวโน้มสูงขึ้นอีก เป็นผลอันเนื่องมาจากการเติบโตและขยายตัวของภาคอุตสาหกรรม ซึ่งก่อให้เกิดผลกระทบหลายด้านโดยเฉพาะทางด้านเศรษฐกิจ มีผลทำให้ประเทศไทยต้องสูญเสียเงินเป็นจำนวนมากในการจัดซื้อวัตถุดิบเข้ามา ทำให้ต้นทุนการผลิตสินค้ามีราคาสูง ราคาสินค้าก็จะสูงไปด้วยส่งผลกระทบต่อผู้บริโภค ซึ่งจากผลกระทบดังกล่าวจึงเป็นสาเหตุที่ทำให้ผู้วิจัยสนใจที่จะสกัดเซลลูโลสจากพืชที่มีอยู่ในประเทศไทย โดยพืชที่สนใจจะนำมาสกัดเซลลูโลสคือ ผักตบชวา เนื่องจากผักตบชวาเป็นวัชพืชที่มีปริมาณมาก สามารถแพร่พันธุ์ได้รวดเร็ว [4-6] พบได้ตามแหล่งน้ำทั่วไป [7]

2.1.1 ผักตบชวา

ชื่อสามัญ water hyacinth, floating water hyacinth ชื่อวิทยาศาสตร์ Eichhornia crassipes (Mart.) Solms

2.1.1.1 ลักษณะของผักตบชวา

ลำต้นผักตบชวา ผักตบชวาจัดเป็นพืชน้ำล้มลุก มีลักษณะลำต้นที่สั้นประมาณ 3-90 เซนติเมตร และอวบน้ำ ผิวของลำต้นจะมีลักษณะเรียบสีเขียวอ่อนและเข้ม ก้านใบจะพองออกตรงช่องกลาง ภายในมีลักษณะเป็นรูพรุน จึงช่วยพยุงลำต้นให้ลอยน้ำได้ รากจะแตกออกจากลำต้น บริเวณข้อ รากมักมีสีม่วงดำ ซึ่งลำต้นของผักตบชวาส่วนใหญ่จะลอยอยู่บนผิวน้ำ แต่บางต้นอาจจะขึ้นอยู่ตามโคลนในที่น้ำตื้นซึ่งสามารถขึ้นบนบกได้ สมบัติ คือ ทนทานต่อความแห้งแล้งได้ดีพบได้ทั่วไปตามริมน้ำ แต่จะไม่ทนน้ำเค็ม ซึ่งผักตบชวาเป็นพืชที่ขยายพันธุ์ได้อย่างรวดเร็วอาจใช้การแยกกอหรือใช้ไหล [8, 9]



รูปที่ 2.1 ลำต้นของผักตบชวา [8]

ใบผักตบชวา ลักษณะเป็นใบเดี่ยวรูปไข่หรือเกือบกลมคล้ายใบโพธิ์สีเขียวสด แตกออกจากลำต้น โคนก้านใบจะอวบน้ำตรงกลางพองออกหุ้มกันไว้ ภายในเป็นช่องอากาศคล้ายกับฟองน้ำ ทำให้ช่วยพยุงลำต้นให้ลอยน้ำได้ ใบเป็นสีเขียวสด



รูปที่ 2.2 ใบผักตบชวา [8]

ดอกผักตบชวา จะออกดอกเป็นช่ออยู่กลางกอ ไม่มีก้านดอก ในหนึ่งช่อจะประกอบด้วยดอกขนาดเล็กประมาณ 3 - 25 ดอกมารวมกัน สีของดอกจะเป็นสีชมพูอมฟ้าหรือสีม่วงมีกลีบดอก 6 กลีบ กลีบบนสุดจะมีขนาดใหญ่กว่ากลีบอื่น ๆ เมื่อผักตบชวาโตเต็มที่ดอกมักจะบานพร้อมกันหมดทั้งช่อ โดยผักตบชวาจะออกดอกช่วงปลายฤดูหนาวถึงต้นฤดูร้อน และเนื่องจากช่อดอกของผักตบชวามีลักษณะคล้ายคลึงกับดอกไฮยาซินธ์ จึงเป็นที่มาของชื่อสามัญว่า water hyacinth



รูปที่ 2.3 ดอกผักตบชวา [8]

ผลผักตบชวา ผลของผักตบชวาจะมีลักษณะคล้ายกับแคปซูล รูปทรงกระบอก แบ่งออกเป็นพู 3 พู เมื่อผลแก่จะแตกออกกลางพู ภายในมีเมล็ดจำนวนมาก ลักษณะของเมล็ดจะเป็นเม็ดกลมขนาดเล็ก



รูปที่ 2.4 ผลผักตบชวา [8]

2.1.1.2 ประโยชน์ของผักตบชวา

1. สารอาหารในผักตบชวาจะประกอบด้วยโปรตีนประมาณ 14 – 20% ไขมัน 1 - 2.5% และเส้นใย 17-19% สามารถนำมาเป็นอาหารให้กับสัตว์ได้ เช่น วัว ควาย สุกร และไก่
2. สามารถช่วยบำบัดน้ำเสียได้โดยทำหน้าที่เป็นตัวกรองของแข็งหรือสารแขวนลอยต่าง ๆ ที่ลอยอยู่เหนือผิวน้ำ
3. ต้นผักตบชวาสามารถนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์จักสานได้ เช่น ก่องใส่กระดาษทิชชู ตะกร้า กระเป๋า แก้ว รองเท้า กระดาษจากผักตบชวา ฯลฯ
4. เป็นที่อยู่อาศัยของปลาและสัตว์น้ำ

2.1.1.3 ปัญหาที่เกิดจากผักตบชวา

นอกจากนี้การที่ผักตบชวามีปริมาณที่มากเกินไปก็จะส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศในหลายด้าน [10-12]

1. ด้านการชลประทาน – ปริมาณของผักตบชวาที่มากเกินไปจะไปขัดขวางทางระบายน้ำซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดอุทกภัย เนื่องจากระบายน้ำไม่ทัน
2. ด้านกสิกรรม – เมื่อผักตบชวามีปริมาณมากจะเกาะกลุ่มกันเป็นแพซึ่งจะเป็นที่อยู่อาศัยของสิ่งมีชีวิตต่างๆ เช่น งู หนู และสัตว์ต่างๆ เหล่านี้จะเป็นตัวสร้างความเสียหายให้กับพืชผลทางการเกษตร
3. ด้านการประมง - ปริมาณผักตบชวาที่มากเกินไปจะส่งผลให้แหล่งน้ำตื้นเขินและจะไปลดที่อยู่อาศัยของปลา และเมื่อผักตบชวาเกิดการเน่าเสียจะส่งผลให้แก๊สออกซิเจนในน้ำลดลง สิ่งมีชีวิตในน้ำก็จะตาย

4. ด้านการคมนาคมทางน้ำ – เมื่อฝกตบชวามีปริมาณที่เยอะจนเป็นแพจะไปกีดขวางการสัญจรทางน้ำทำให้การเดินเรือไม่สะดวก
5. ด้านการท่องเที่ยว – จะส่งผลให้ทัศนียภาพไม่สวยงาม และจะไปรบกวนกิจกรรมอื่นๆ เช่น การลงเรือท่องเที่ยว การว่ายน้ำ ตกปลา เป็นต้น
6. ด้านเศรษฐกิจและสังคม – ภาครัฐจะต้องสูญเสียงบประมาณโดยใช้เหตุในการกำจัดวัชพืชน้ำ
7. ด้านสาธารณสุข – แพของฝกตบชวาจะเป็นที่อยู่อาศัยของสิ่งมีชีวิตที่เป็นพาหะนำโรคหรือสัตว์มีพิษเช่น หนู แมลงสาบ กูพิษ เป็นต้น

2.1.1.4 ส่วนประกอบทางเคมีของฝกตบชวา

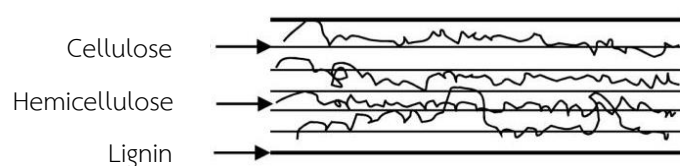
ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของต้นฝกตบชวาเพื่อหาปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนินและแร่ธาตุอื่นๆ โดยนำฝกตบชวา 100 กิโลกรัม มาตากแดดให้แห้ง เหลื่อน้ำหนักประมาณ 5 กิโลกรัม คิดเป็นน้ำหนักของกากแห้งเฉลี่ยร้อยละ 5 ของน้ำหนักทั้งหมด ได้ผลดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบในฝกตบชวาแห้ง

องค์ประกอบ	สัดส่วน (ร้อยละ)
ลิกนิน	12 – 13
เซลลูโลส	43 – 44
เพนเซน	14 -15
เถ้า	20 – 21
คาร์บอน	32 – 35
ไฮโดรเจน	5.4 – 5.8
ไนโตรเจน	2.8 – 3.5
โซเดียม	1.5 – 2.5
โพแทสเซียม	2.0 – 3.5

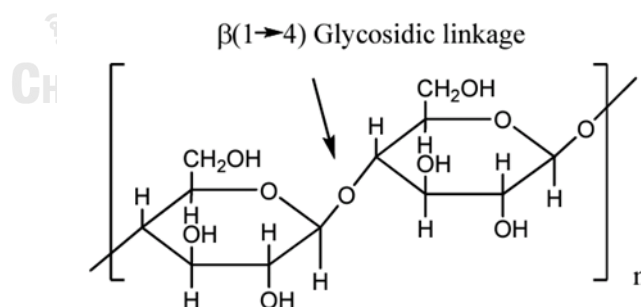
2.1.2 องค์ประกอบของลิกโนเซลลูโลส

ลิกโนเซลลูโลสจะประกอบไปด้วยส่วนที่เป็น เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน แสดงดังรูปที่ 2.5 โดยอัตราส่วนจะแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับชนิดของลิกโนเซลลูโลส โดยทั่วไปมักพบปริมาณ เซลลูโลส 40-60% เฮมิเซลลูโลส 20-30% และลิกนิน 15-30% [13, 14]



รูปที่ 2.5 โครงสร้างทั่วไปของลิกโนเซลลูโลส [14]

เซลลูโลสจัดเป็นสารประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ ชนิดโฮโมพอลิแซ็กคาไรด์ (Homopolysaccharide) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีสูตรโมเลกุล คือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ ประกอบไปด้วย โมเลกุลของกลูโคส 1,000-10,000 โมเลกุล มาเรียงต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ (Glycosidic bond) ที่ตำแหน่งปีต้า -1,4 ได้เป็นสายโซ่ยาวแบบlinear polymer มีพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลในโมเลกุลกลูโคส ทำให้เซลลูโลสมีความแข็งแรงสูง มีอุณหภูมิการหลอมตัวสูง และไม่สามารถละลายได้ในสารละลายอินทรีย์ทั่วไป ลักษณะการจัดเรียงตัวของโมเลกุลกลูโคสในเซลลูโลสจะแสดงดังรูปที่ 2.6



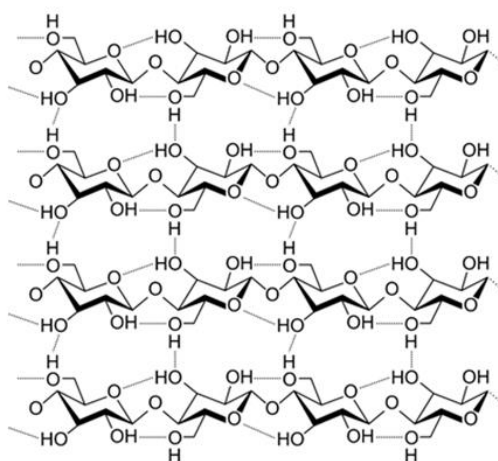
รูปที่ 2.6 ลักษณะการจัดเรียงตัวของโมเลกุลกลูโคสในเซลลูโลส [15]

เฮมิเซลลูโลสเป็นสารประกอบพอลิแซ็กคาไรด์ ที่ประกอบไปด้วยน้ำตาลหลายชนิดมาผสมกัน เชื่อมต่อกันเป็นโซ่กึ่ง ได้แก่ น้ำตาลเฮกโซส (กลูโคส, กาแลคโตส, แมนโนส) และ น้ำตาลเพนโตส (ไซโลส และ อะราบิโนส)

ลิกนินเป็นสารประกอบประเภทอะโรมาติกที่พบในส่วนผนังเซลล์ของพืช ทำหน้าที่ในการ ห่อหุ้มเส้นใยของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเข้าด้วยกันและเป็นส่วนป้องกันเซลลูโลสไม่ให้ถูกย่อย สลายได้ง่าย โครงสร้างของลิกนินจะมีลักษณะเป็นโครงสร้าง 3 มิติ ไม่แตกผลึก ประกอบด้วย สารประกอบอะโรมาติก 3 ชนิด คือ tran-p-coumaryl alcohol, trans-coniferyl alcohol และ trans-p-sinapyl alcohol

2.1.3 สมบัติของเซลลูโลส

โครงสร้างของเส้นใยเซลลูโลสจะประกอบไปด้วยสองส่วนคือส่วนที่เป็นผลึก (crystalline cellulose) และส่วนที่เป็นอสัณฐาน (amorphous cellulose) อีกทั้งระหว่างโมเลกุลยังมีการสร้าง พันธะที่แข็งแรงอย่างพันธะไฮโดรเจน ทำให้เส้นใยมีสมบัติไม่ละลายน้ำ แต่จะสามารถดูดซับน้ำไว้ได้ ในส่วนที่เป็น อสัณฐานทำให้เส้นใยเกิดการบวมตัว โดยความสามารถในการบวมตัวของเซลลูโลสจะ แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับสภาพชื้นของตัวทำละลาย โดยเซลลูโลสจะสามารถบวมตัวในสารละลาย ที่มีขั้วได้ดีกว่าสารละลายที่ไม่มีขั้ว กล่าวคือเซลลูโลสไม่สามารถละลายน้ำหรือในกรดอ่อนต่างอ่อนได้ แต่จะสามารถละลายได้ในกรดแก่และด่างแก่ สำหรับโครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลสแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของเซลลูโลส [16]

2.1.3.1 ความหนืดของสารละลายเซลลูโลส

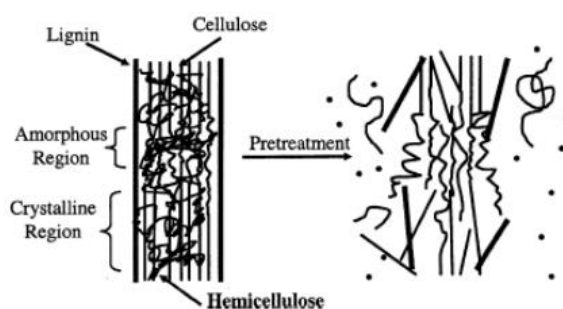
ความหนืดของสารละลายเซลลูโลสจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของเซลลูโลส ถ้าความเข้มข้นของเซลลูโลสมากจะส่งผลให้สารละลายมีความหนืดเพิ่มขึ้น และจะส่งผลต่อสมบัติในด้านต่างๆ ของเซลลูโลสด้วย [17]

2.1.3.2 สมบัติการดูดซับ

เซลลูโลสส่วนใหญ่จะมีการดูดซับไอน้ำหรือการคายไอน้ำหรือของเหลวอื่นๆ ในบรรยากาศรอบตัวจนกระทั่งถึงจุดสมดุล โดยสมดุลของความชื้นของเซลลูโลสจะแปรเปลี่ยนไปตามความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศนั้นๆ และปริมาณความชื้นของเซลลูโลสจะส่งผลต่อคุณสมบัติทางด้านกายภาพ เช่น เมื่อความชื้นสูงขึ้น ค่า tensile strength จะมีค่าเพิ่มขึ้น [17]

2.2 สารละลายเซลลูโลส

เมื่อมีการนำวัสดุเหลือทิ้งทางชีวภาพหรือที่เรียกว่าลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulose) ที่มีเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินเป็นองค์ประกอบ มาเตรียมให้อยู่ในรูปสารละลายจำเป็นต้องมีขั้นตอนการปรับสภาพก่อน เพื่อทำลายโครงสร้างของลิกนินและเฮมิเซลลูโลสที่ห่อหุ้มเซลลูโลสไว้ เพิ่มความเป็นรูพรุนของวัสดุและลดความเป็นผลึกของเซลลูโลส นอกจากนี้ยังส่งผลให้สารเคมีที่เราใช้ในการละลายเซลลูโลสสามารถเข้าถึงเซลลูโลสและทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น



รูปที่ 2.8 โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลส

[18]

2.2.1 การปรับสภาพวัตถุดิบ (pretreatment)

สามารถแบ่งได้เป็น 4 วิธีหลักๆ ซึ่งแต่ละวิธีมีวิธีย่อยลงไปอีกดังนี้ [18]

1. วิธีทางกายภาพ (physical pretreatment)

1.1 การใช้แรงทางกล (mechanical communiton) เช่น การบด ทบ โม่ มีผลทำให้วัตถุดิบมีขนาดเล็กลงเพิ่มพื้นที่ผิวให้กับวัสดุเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้น และลดการเกิดผลึก

1.2 การไพโรไลซิส (pyrolysis) เป็นการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงในการอบวัตถุดิบเพื่อกลายสภาพวัตถุดิบให้เป็นของแข็งหรือแก๊ส

1.3 การใช้ความร้อน (thermal heat treatment) ต้องมีการทำให้วัสดุมีขนาดเล็กลงก่อนจึงนำมาอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิมากกว่า 150-180 องศาเซลเซียส เพื่อเป็นการทำลายเนื้อเยื่อของเซลล์

2. วิธีทางชีวภาพ (biological pretreatment) ใช้จุลินทรีย์ในการปรับสภาพวัตถุดิบประเภทลิกโนเซลลูโลส ซึ่งข้อดีของการใช้จุลินทรีย์ในการปรับสภาพคือ ส่วนที่เป็นเซลลูโลสถูกย่อยน้อยมากเนื่องจากเซลลูโลสมีความต้านทานการถูกย่อยจากจุลินทรีย์ได้ดีกว่าเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน

3. วิธีทางเคมี (chemical pretreatment)

3.1 การทำปฏิกิริยากับโอโซน (ozonolysis) เป็นการใช้ออกซิเจนเป็นตัวออกซิเดชันทำให้เกิดการแตกตัวของลิกนินและเฮมิเซลลูโลส จุดเด่นของวิธีนี้คือสามารถเอาลิกนินออกได้อย่างมีประสิทธิภาพ และไม่มีสารพิษ แต่ผลเสียคือมีค่าใช้จ่ายสูง

3.2 การทำปฏิกิริยาโดยใช้ด่าง (alkali pretreatment) ต่างที่นิยมนำมาใช้ในการปรับสภาพคือ โซเดียมไฮดรอกไซด์และแอมโมเนียไฮดรอกไซด์ โดยวิธีการทำงานของด่างคือจะไปทำให้สายโซ่โมเลกุลเกิดการบวมตัว ลดความเป็นผลึกในโครงสร้างทำให้วัสดุมีความเป็นรูพรุนเพิ่มขึ้น เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวของวัสดุ ลดระดับความเป็นพอลิเมอร์ขนาดใหญ่ และสามารถทำลายโครงสร้างของลิกนินได้

3.3 การทำปฏิกิริยาโดยใช้กรด (acid pretreatment) วัตถุประสงค์ของการปรับสภาพด้วยกรดคือเพื่อให้ได้ปริมาณน้ำตาลที่สูงจากวัสดุชีวมวล โดยกรดที่นิยมนำมาใช้ในการปรับสภาพได้แก่ กรดซัลฟิวริก กรดไฮโดรคลอริก กรดไนตริก และ กรดฟอสฟอริก ซึ่งสามารถใช้ได้ทั้งกรดเข้มข้นและเจือจาง แต่การใช้กรดเจือจางเป็นวิธีที่นิยมและใช้กันแพร่หลายที่สุด

4. การปรับสภาพด้วยวิธีทางกายภาพร่วมกับทางเคมี (physicochemical pretreatment)

4.1 การระเบิดด้วยไอน้ำ (steam explosion) เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมในการปรับสภาพวัตถุดิบประเภทลิกโนเซลลูโลส สภาวะที่ใช้คือ อุณหภูมิช่วง 160-260 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดัน 0.69-4.82 เมกะปาสคาล หลักการของวิธีนี้คือ วัตถุดิบจะถูกผสมกับไอน้ำอัมมที่ความดันสูง แล้วทำการลดความดันอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้เกิดการแยกเซลลูโลสออกจากเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน

4.2 การระเบิดด้วยแอมโมเนีย (ammonia fiber explosion, AFEX) วิธีนี้จะไม่เหมาะสมกับพืชที่มีปริมาณลิกนินเยอะ แต่มีข้อดีคือสามารถนำแอมโมเนียกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยหลักการของวิธีนี้คือใช้แอมโมเนียเหลวที่อุณหภูมิระหว่าง 60-100 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดันระยะเวลาหนึ่ง แล้วทำการลดความดันลง

4.3 ความร้อนชื้น (liquid hot water) วิธีการนี้เป็นวิธีที่ต้องอาศัยความดันเพื่อควบคุมสถานะของน้ำ อุณหภูมิที่ใช้จะอยู่ระหว่าง 160-240 องศาเซลเซียส ใช้ pH ช่วง 4-7 เนื่องจากช่วงนี้จะทำให้เฮมิเซลลูโลสสามารถคงอยู่ในรูปของโอลิโกเมอร์ได้ (oligomeric form) ลดปัญหาการรวมตัวเป็นพอลิเมอร์

4.4 การย่อยเปียก (wet oxidation) วิธีนี้เป็นการใช้ออกซิเจนและอากาศเป็นตัวกลางในการทำปฏิกิริยา มักใช้ถังหมักชีวภาพในภาวะอุณหภูมิต่ำ ภายใต้แรงดันและเวลาสั้น (10-15 นาที)

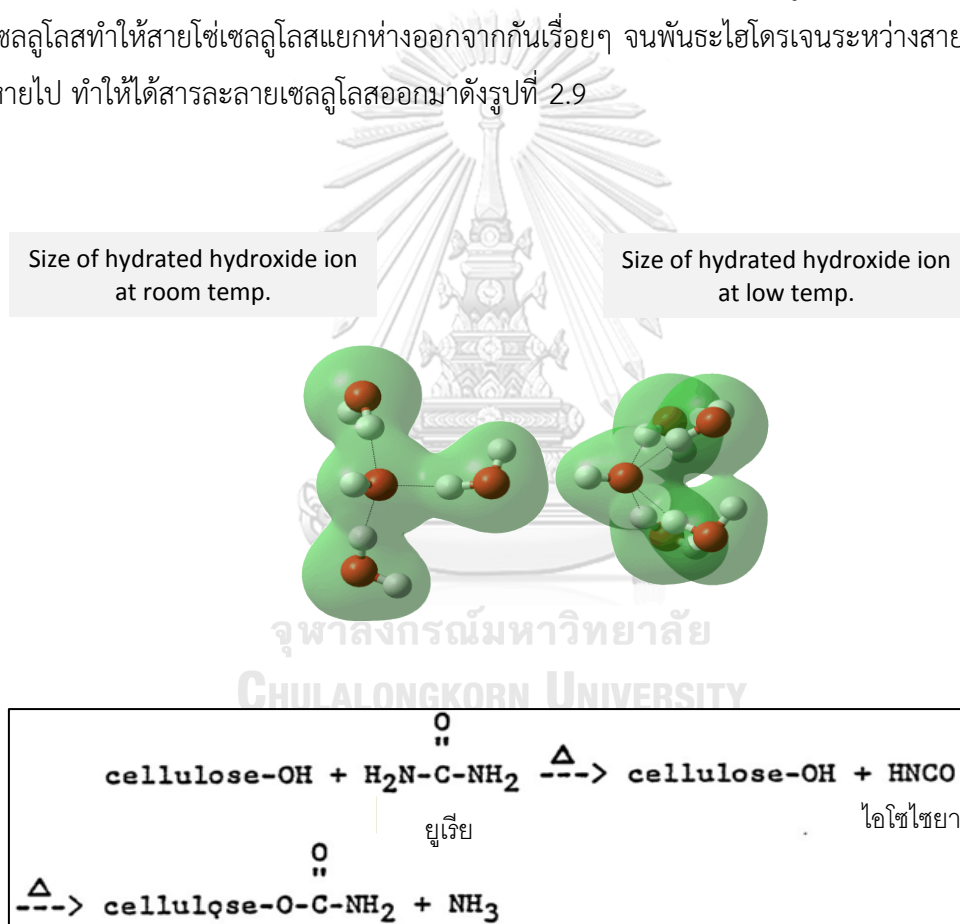
4.5 การปรับสภาพด้วยคลื่นไมโครเวฟ (microwave pretreatment) เป็นการปรับสภาพโดยใช้สองวิธีร่วมกันคือการใช้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ (วิธีทางกายภาพ) และใช้สารเคมีเจือจางในการช่วยสตุการให้คลื่นไมโครเวฟ (ทางเคมี) ซึ่งการใช้ต่างในการปรับสภาพด้วยคลื่นไมโครเวฟจะมีประสิทธิภาพมากกว่าการใช้กรด

4.6 การปรับสภาพด้วยคลื่นความถี่สูงอัลตราซาวด์ (ultrasonic pretreatment) วิธีการปรับสภาพด้วยคลื่นความถี่สูงอัลตราซาวด์เป็นวิธีที่ยังไม่แพร่หลาย แต่การปรับสภาพด้วยคลื่นความถี่สูงอัลตราซาวด์มีผลทำให้เอนไซม์เข้าทำปฏิกิริยากับพื้นที่ผิวของวัสดุได้มากขึ้นส่งผลให้การย่อยสลายมีประสิทธิภาพมากขึ้น

4.7 การระเบิดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂ explosion) สารเคมีที่ใช้คือคาร์บอนไดออกไซด์ จากกรดคาร์บอนิกมักใช้ร่วมกับตัวทำลายอินทรีย์ เช่น เอทานอล ข้อดีของวิธีนี้คือ ได้ผลผลิตต่ำกว่าการใช้ไอน้ำ หรือแอมโมเนีย แต่มีข้อดีคือไม่เกิดตัวขัดขวางการทำงานของเอนไซม์ในขั้นตอนไฮโดรไลซิสเหมือนวิธีการระเบิดโดยใช้ไอน้ำ

2.2.2 กลไกการละลายเซลลูโลสในระบบ NaOH/Urea

เริ่มแรก NaOH จะเกิดการแตกตัวได้เป็น Na^+ กับ OH^- จากนั้น OH^- ของ NaOH จะทำปฏิกิริยาไฮเดรตกับน้ำ 3 โมเลกุล (1ไฮเดรต = $\text{OH}^- + \text{H}_2\text{O}$ 3 โมเลกุล) โดยที่อุณหภูมิต่ำน้ำ (H_2O) จะทำมุม 120° กับ OH^- ทำให้ขนาดของโมเลกุลใหญ่จึงไม่สามารถแทรกเข้าไปในระหว่างสายโซ่ของเซลลูโลสได้ แต่ที่อุณหภูมิต่ำมน้ำที่น้ำกระทำกับ OH^- จะแคบลงจนมีลักษณะคล้ายตัววีทำให้ OH^- สามารถแทรกเข้าไปในระหว่างสายโซ่โมเลกุลของเซลลูโลสได้ และเกิดการสร้างพันธะไฮโดรเจนกับเซลลูโลสจึงไม่ละลายน้ำ แต่เกิดการบวมตัว จากนั้น urea hydrate (แตกตัวได้ไอโซไซยานตกับแอมโมเนีย) โดยไอโซไซยานตจะเข้าไปสร้างพันธะ carbamate กับเซลลูโลส urea ล้อมรอบสายโซ่เซลลูโลสทำให้สายโซ่เซลลูโลสแยกห่างออกจากกันเรื่อยๆ จนพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่เซลลูโลสหายไป ทำให้ได้สารละลายเซลลูโลสออกมาดังรูปที่ 2.9

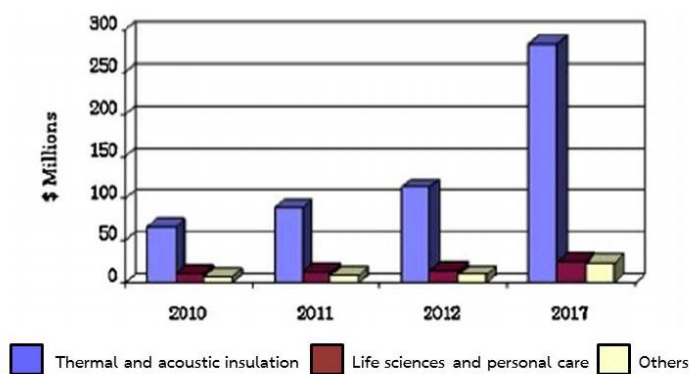


รูปที่ 2.9 กลไกการละลายของเซลลูโลส [19]

2.3 แอโรเจล (Aerogel)

แอโรเจล (aerogel) เป็นวัสดุของแข็งที่มีน้ำหนักเบา ค่อนข้างมีความโปร่งแสงแต่ไม่โปร่งใส และมีความเป็นฉนวนที่ดีมักถูกนำมาใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง เช่น ใช้เป็นฉนวนกันความร้อนและดูดซับเสียงในอาคารบ้านเรือน เนื่องจากโครงสร้างของแอโรเจลมีลักษณะเป็นรูพรุน ภายในมีอากาศ 90–99.8 % มีความหนาแน่น 0.05–0.1 g/cm³ และเนื่องจากแอโรเจลมีลักษณะคล้ายฟองน้ำเนื้อแข็ง จึงมีชื่อเรียกอื่นว่า frozen smoke, solid smoke หรือ blue smoke [20]

ปัจจุบันตลาดของแอโรเจลมีอัตราการเจริญเติบโตที่สูง และเป็นวัสดุที่กำลังได้รับความสนใจ ดูได้จากงานวิจัยของ BBC Research & Consulting ดังรูปที่ 2.10 พบว่าจากปี ค.ศ. 2012 ถึงปี ค.ศ. 2017 แอโรเจลถูกนำมาใช้ในงานก่อสร้างมากขึ้น เช่น ใช้เป็นฉนวนกันความร้อนและวัสดุดูดซับเสียงในอาคารบ้านเรือน



รูปที่ 2.10 อัตราการเจริญเติบโตของตลาดแอโรเจล ในปี ค.ศ. 2010 – 2017 [21]

2.3.1 ประเภทของแอโรเจล

จำแนกประเภทของแอโรเจลได้โดยใช้ส่วนประกอบของแอโรเจลเป็นหลัก แบ่งได้ 2 ประเภท คือ

1. แอโรเจลที่เตรียมจากสารอนินทรีย์ (inorganic aerogel)
2. แอโรเจลที่เตรียมจากสารอินทรีย์ (organic aerogel)

2.3.1.1 แอโรเจลที่เตรียมจากสารอนินทรีย์

1. ซิลิกาแอโรเจล (silica aerogels) [22]

ซิลิกาแอโรเจลเป็นของแข็งที่มีความหนาแน่นน้อยที่สุดในโลกดังรูปที่ 2.11 ซึ่งมีความหนาแน่นเพียง 1.9 mg/cm^3 และมีค่าการนำความร้อน (thermal conductivity) ที่ต่ำ ($0.003 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) ทำให้มีสมบัติการเป็นฉนวนความร้อนที่ดี



รูปที่ 2.11 ซิลิกาแอโรเจล [23]

2. คาร์บอนแอโรเจล (carbon aerogels) [24]

คาร์บอนแอโรเจลมีสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี ประกอบด้วยอนุภาคระดับนาโนเมตรที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) โครงสร้างมีความเป็นรูพรุนสูงกว่า ขนาดของรูพรุนเล็กกว่า 100 นาโนเมตร และมีพื้นที่ผิวสูง ($400 - 1000 \text{ m}^2/\text{g}$) คาร์บอนแอโรเจลสามารถเป็นตัวกักเก็บพลังงานได้ดีเนื่องจากคาร์บอนแอโรเจลมีสีดำ และมีค่า reflecting เพียง 0.3% ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 คาร์บอนแอโรเจล [25]

เมื่อนำคาร์บอนแอโรเจลผสมกับซิลิกาแอโรเจล จะกลายเป็นวัสดุที่เป็นฉนวนกันความร้อนที่ดีที่สุด เนื่องจากซิลิกาแอโรเจลเป็นตัวนำความร้อนที่ไม่ดี ส่วนคาร์บอนแอโรเจลสามารถแผ่รังสีได้ดี เพราะคาร์บอนสามารถดูดซับรังสีอินฟราเรดที่เกิดจากการถ่ายเทความร้อนได้

2.3.1.2 แอโรเจลที่เตรียมจากสารอินทรีย์

เซลลูโลสแอโรเจล (cellulose aerogel) [26] แสดงดังรูปที่ 2.13 เป็นวัสดุที่มีรูพรุน มีพื้นที่ผิวสูง มีความหนาแน่นต่ำ น้ำหนักเบา และสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดยวัสดุที่นำมาใช้ทำเซลลูโลสแอโรเจลมักเป็นวัสดุที่เหลือใช้จากทางเกษตร เช่น ฝ้าย ต้นกล้วย ผักตบชวา ไม้ หรือเป็นวัสดุที่สามารถนำมารีไซเคิลได้ เช่น กระดาษหนังสือพิมพ์ เป็นต้น ซึ่งข้อดีของการเตรียมแอโรเจลจากเซลลูโลส คือ วัสดุที่นำมาใช้ สามารถหาได้ง่าย ราคาถูก มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ มีความเป็นพิษต่ำ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม



รูปที่ 2.13 เซลลูโลสแอโรเจล [27]

2.4 วัสดุโปร่งแสง

วัสดุโปร่งแสง [28] คือ วัสดุที่แสงสามารถผ่านได้อย่างไม่เป็นระเบียบ เมื่อเรามองผ่านวัสดุโปร่งแสงจึงทำให้เห็นวัตถุอีกด้านหนึ่งไม่ชัดเจน เช่น กระจกฝ้า กระจกชุบน้ำมัน กระจกไขหรือกระจกลอกลาย และหมอก เป็นต้น วัสดุโปร่งแสงสามารถเตรียมได้ทั้งจากสารอนินทรีย์และสารอินทรีย์

2.4.1 วัสดุโปร่งแสงที่เตรียมจากสารอนินทรีย์

วัสดุที่นำมาใช้ทำวัสดุโปร่งแสงประเภทสารอนินทรีย์ เช่น โพลีคาร์บอเนต โพลีพรพิลีน ไฟเบอร์กลาส อะคริลิก กระจกฝ้า บล็อกแก้ว หรือคอนกรีตโปร่งแสง นิยมนำมาใช้ทำเป็นผนังของบ้านทั้งภายใน และภายนอก ซึ่งมีข้อดีคือ ยอมให้แสงส่องผ่านได้บางส่วน แต่ไม่สามารถมองเห็นได้ มีความแข็งแรง สามารถใช้ทดแทนการทำผนังก่ออิฐฉาบปูนได้ รูปที่ 2.14 แสดงรูปผนังบ้านที่มีความแข็งแรงทำจากวัสดุโปร่งแสง

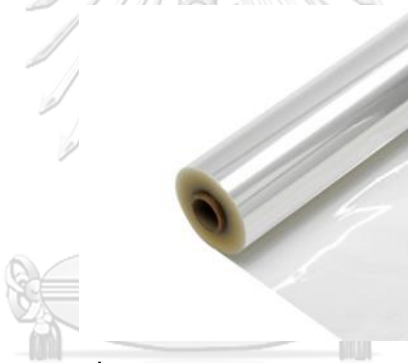


รูปที่ 2.14 ตัวอย่างผนังบ้านที่ใช้วัสดุโปร่งแสงประเภทสารอินทรีย์ [29]

2.4.2 วัสดุโปร่งแสงที่เตรียมจากสารอินทรีย์

2.4.2.1 กระจกเซลโลเฟน

กระจกเซลโลเฟนหรือกระจกแก้ว เป็นวัสดุโปร่งแสงที่ทำมาจากเซลลูโลสในไม้หรือจากเส้นใยพืชชนิดอื่น ๆ มีโครงสร้างทางเคมีเหมือนกระจก แต่รูปร่างลักษณะของเซลโลเฟนคล้ายกับพลาสติก ความชื้นสามารถผ่านได้มาก อากาศผ่านได้น้อย



รูปที่ 2.15 กระจกเซลโลเฟน [30]

2.4.2.2 फिल्मห่ออาหาร ผ้าปิดแผล และหลอดเลือดเทียมที่มีความโปร่งใส

ฟิล์มห่ออาหาร ผ้าปิดแผล และหลอดเลือดเทียมที่มีความโปร่งใส ทำจากเส้นใยของไบสับปะรด เนื่องจากเส้นใยสับปะรดเป็นเส้นใยที่มีความแข็งแรงสูงจึงถูกนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นใน การผลิตฟิล์มห่ออาหาร ผ้าปิดแผล และหลอดเลือดเทียม วิธีการสกัดเซลลูโลสต้องใช้กระบวนการระเบิดด้วยไอน้ำแรงดันสูง เพื่อทำลายพันธะไฮโดรเจนที่เชื่อมระหว่างเส้นใยเซลลูโลส ทำให้เส้นใยระดับนาโนเมตรแยกออกจากกัน ซึ่งสมบัติของวัสดุที่ได้จะมีความโปร่งแสง มีความแข็งแรงสูง น้ำหนักเบา ทนทานต่อสารเคมีได้ดี และสามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ

2.4.2.3 Chip computer

ปัจจุบันอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มักจะผลิตมาจากพลาสติก หรือวัสดุที่มีพิษ และไม่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ ก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม และรัฐบาลต้องสูญเสียงบประมาณจำนวนมากในการกำจัดขยะอิเล็กทรอนิกส์เหล่านี้ จากเหตุนี้เองทำให้มีนักวิจัยสนใจที่จะลดปริมาณขยะอิเล็กทรอนิกส์ จึงมีคิดค้นนำเอาเซลล์โลสนาโนไฟเบอร์มาใช้ทำ chip computer แทนการใช้โลหะผสมอย่าง gallium arsenide ซึ่งสมบัติของ chip computer ที่ได้จะมีความยืดหยุ่น แข็งแรง โปร่งแสง และสามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ แต่มีข้อเสียคือ วัสดุที่ทำจากไม้เมื่อโดนความชื้นหรืออากาศ จะส่งผลให้วัสดุเกิดการหดหรือขยายตัวสูง ทำให้ต้องมีการใช้กาวชนิดพิเศษเคลือบบางๆ ที่ผิวเพื่อให้ผิวของวัสดุเรียบและสามารถป้องกันความชื้นได้



รูปที่ 2.16 Chip Computer ที่ทำจากไม้ [31]

2.5 อะคริลิก/แผ่นอะคริลิก

อะคริลิก หรือ อะคริลิกเรซิน (Acrylic Resins) เป็นโคพอลิเมอร์ที่เตรียมได้จากกรดอะคริลิก และอนุพันธ์ของกรดอะคริลิก และเอสเทอร์ของกรดอะคริลิก มีสูตรโครงสร้าง คือ $\text{CH}_2=\text{CHR}$ สารตั้งต้นที่นำมาใช้ ได้แก่ Methyl Acrylate, Ethyl Acrylate และ Methyl Methacrylate ผลิตออกมาเป็นอะคริลิกโดยสารที่นิยมใช้มากที่สุดคือ (Polymethyl) methacrylate ,PMMA)

2.5.1 สมบัติทั่วไปของอะคริลิก

1. มีความโปร่งใสคล้ายกับกระจก
2. มีความทนทานต่อแรงกระแทกและแรงกด
3. ทนทานต่อสารเคมีหลายชนิดยกเว้นสารที่เป็นตัวทำละลายกรดและด่างแก่
4. มีจุดอ่อนตัวต่ำ ทนต่อความร้อนได้ดี และมีความเหนียว
5. มีความสามารถในการคงรูปดี และทนทานต่อการขีดข่วน
6. มีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า และฉนวนป้องกันความร้อนที่ดี

7. ไม่ดูดความชื้น

2.5.2 ประเภทของอะคริลิก

1. อะคริลิกของแข็ง เป็นเทอร์โมพลาสติกเรซินที่อยู่ในรูปของแข็งที่ถูกขึ้นรูปให้มีลักษณะเป็นแผ่นใส นิยมใช้ทำป้าย ชั้นโซว์ ตู้เลี้ยงปลา ถังขยะ ของเด็กเล่น กรอบรูป กล่อง เป็นต้น เช่น เมทิลเมทาคริเลต ($\text{CH}_2=\text{C}(\text{CH}_3)\text{COOCH}_3$), เอทิลเมทาคริเลต ($\text{CH}_2=\text{C}(\text{CH}_3)\text{COOC}_2\text{H}_5$), นอร์มอล-บิวทิลเมทาคริเลต ($\text{CH}_2=\text{C}(\text{CH}_3)\text{COO}-(n\text{-C}_4\text{H}_9)$)

2. อะคริลิกเหลว เป็นอะคริลิกที่อยู่ในรูปของสารละลาย สามารถผลิตได้จากกระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบสารละลาย มักใช้เป็นส่วนผสมของสี หรือสารเคลือบวัสดุ

3. อะคริลิกอิมัลชัน ใช้เป็นส่วนผสมของสีทาบ้าน มักผลิตในลักษณะของลาเท็กซ์

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันเซลลูโลสถูกนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์วัสดุโปร่งแสง เนื่องจากเซลลูโลสเป็นสารไบโอพอลิเมอร์ที่มีอยู่มากในธรรมชาติ [32] อีกทั้งยังสามารถสร้างขึ้นใหม่ได้ สามารถย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางธรรมชาติ และมีราคาถูก โดยหลักการเตรียมเซลลูโลสโปร่งแสงคือ ต้องเตรียมเซลลูโลสให้มีรูพรุนก่อนจากนั้นจึงเติมพอลิเมอร์ที่มีค่าดัชนีการหักเหที่ใกล้เคียงกับเซลลูโลสเข้าไปแทนที่อากาศในรูพรุน ซึ่งเซลลูโลสแอโรเจลจัดเป็นวัสดุรูพรุนที่มีน้ำหนักเบา และความหนาแน่นต่ำ อีกทั้งวิธีการเตรียมเซลลูโลสโปร่งแสงจากแอโรเจลมีข้อดีคือไม่ต้องใช้เครื่องมือราคาแพง และขั้นตอนไม่เกิดการหดตัว ทำให้เราสนใจที่จะเตรียมเซลลูโลสโปร่งแสงจากเซลลูโลสแอโรเจล และต้องการที่จะทำการศึกษาสมบัติของเซลลูโลสโปร่งแสงในหลากหลายด้าน เพื่อที่ในอนาคตจะสามารถพัฒนาต่อยอดให้ได้เป็นวัสดุที่สามารถนำไปใช้งานที่มีสมรรถนะที่สูงขึ้นและสมบัติเชิงกลดีขึ้นได้ จากการศึกษาพบว่าเซลลูโลสค่อนข้างที่จะละลายในน้ำหรือในตัวทำละลายทั่วไปได้ยาก เนื่องจากมีความยาวของสายโซ่โมเลกุลสูงและมีความเป็นผลึกสูง อีกทั้งยังมีพันธะไฮโดรเจนที่มีความแข็งแรงมากทั้งภายในและระหว่างโมเลกุล แต่ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการค้นพบตัวทำละลายที่สามารถละลายเซลลูโลสได้เช่น NMMO (N-methyl-morphine-N-oxide) [33], 1-allyl-3-methylimidazolium chloride (AmlimCl) [34], kymene crosslinker [35], sodium hydroxide/urea [21] โดยในงานวิจัยของเราได้เลือกใช้ตัวทำละลาย sodium hydroxide/urea ในการละลายเซลลูโลสเนื่องจากระบบนี้สามารถละลายเซลลูโลสที่มีความเป็นผลึกได้ที่อุณหภูมิต่ำ อีกทั้งยังมีราคาถูกและไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม

ตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาของ Nguyen และคณะ [21] ได้ทำการสังเคราะห์เซลลูโลสแอโรเจลจากกระดาษที่เหลือใช้ ด้วยวิธีการละลายในสารละลายไฮดรอกไซด์/ยูเรีย อัตราส่วน 1.9 wt%/10 wt% และคน 6 นาที เพื่อให้เซลลูโลสกระจายตัวในสารละลายได้ดี และนำไปวางในเครื่องทำความเย็นเป็นเวลา 24 ชม. จากนั้นนำออกมาตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเพื่อให้ละลายและเทสารละลายลงในแม่แบบที่มีความหนา 1 เซนติเมตรและมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 เซนติเมตร จากนั้นนำไปจุ่มในเอทานอลเพื่อให้เกิดการตกตะกอนและทำการแลกเปลี่ยนตัวทำละลายกับน้ำกลั่น เป็นเวลา 2 วัน และทำให้แห้งแบบแช่เยือกแข็ง (freeze dry) พบว่าได้แอโรเจลที่มีความหนาแน่นประมาณ 0.04 gm^{-3} จากนั้นวิเคราะห์โครงสร้างอสัณฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างที่มีลักษณะร่างแหแบบรูพรุน โดยมีขนาดรูพรุนอยู่ในช่วง $40\text{-}200 \mu\text{m}$ และเมื่อนำแอโรเจลไปทำการวิเคราะห์หาค่าการดูดซับน้ำและน้ำมัน พบว่าแอโรเจลที่ได้มีสมบัติในการดูดซับที่ค่อนข้างสูง สามารถดูดซับได้ 18 - 20 เท่าของน้ำหนักตัวมันเอง จากนั้นนำไปทดสอบค่าการนำความร้อนด้วยวิธี C-Therm TCi thermal conductivity analyzer พบว่าเซลลูโลสแอโรเจลที่ได้มีค่าการนำความร้อนเพียง 0.032 W/mK ซึ่งถือว่ามีความเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดี มีความใกล้เคียงกับแอโรเจลที่เตรียมได้จากสารอนินทรีย์อย่างซิลิกาที่มีค่าการนำความร้อนประมาณ 0.026 W/mK และนำไปทดสอบเพื่อหาค่าการสลายตัวทางความร้อนของเซลลูโลสแอโรเจลที่อุณหภูมิ $0 - 1000$ องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มขึ้นของความร้อน 5 องศาเซลเซียส/นาที ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน พบว่าที่อุณหภูมิ $25\text{-}230$ องศาเซลเซียส สูญเสียน้ำหนักไปประมาณ 23% เนื่องจากการระเหยของน้ำและยูเรีย และที่อุณหภูมิ $230 - 330$ องศาเซลเซียส สูญเสียน้ำหนักประมาณ 42 % เนื่องจากการสลายตัวของโครงสร้างเซลลูโลส และเมื่ออุณหภูมิถึง $550 - 630$ องศาเซลเซียส พบว่าตัวอย่างหลอมเหลวกลายเป็นหยดเล็กๆ เนื่องมาจากกระบวนการออกซิเดชันของแอโรเจล

จากการศึกษาของ Kwon และคณะ [36] ได้ศึกษาถึงปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อปริมาณรูพรุนของเซลลูโลสแอโรเจลที่เตรียมจากต้นทิวลิป โดยการนำต้นทิวลิปมาละลายในตัวทำละลายไฮดรอกไซด์ / ยูเรีย / น้ำกลั่น ในอัตราส่วน 7:12:81 w/w/w ที่อุณหภูมิ $-2, -4, -8$ และ -10 องศาเซลเซียส แล้วนำไปปั่นแยกเพื่อกำจัดฟองอากาศออกจากสารละลาย ทำให้ได้สารละลายไฮดรอกไซด์ 2 ชั้น จากนั้นนำสารละลายทั้งสองชั้นมาทำการแลกเปลี่ยนตัวทำละลายด้วยน้ำและกำจัดน้ำออกด้วยวิธีการทำให้แห้งแบบแช่เยือกแข็ง จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาปริมาณพื้นที่ผิวสัมผัสและปริมาณรูพรุนของแอโรเจลด้วยวิธีการดูดซับและคายแก๊สไนโตรเจน พบว่าแอโรเจลที่ได้จากสารละลายชั้นบนของสารละลายที่อุณหภูมิ $-2, -4, -8$ และ -10°C มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 205.2, 232.7, 246.2 และ $285.1 \text{ m}^2/\text{g}$ ตามลำดับ แต่ในสารละลายชั้นล่างที่อุณหภูมิ $-2, -4, -8$ และ -10 องศาเซลเซียส มีพื้นที่ผิว

เท่ากับ 154.8, 155.2, 184.8 และ 209.8 m²/g ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อปริมาณรูพรุนของเซลลูโลสแอโรเจลคือ อุณหภูมิที่ใช้ในการละลายเซลลูโลสยิ่งอุณหภูมิต่ำ ปริมาตรรูพรุนของแอโรเจลจะมากขึ้น

จากการศึกษาของ Li และคณะ [37] ได้ศึกษาวิธีการละลายเซลลูโลสเนื่องจากเซลลูโลสมีพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรงเชื่อมระหว่างสายโซ่โมเลกุลทำให้เซลลูโลสไม่สามารถละลายในตัวทำละลายทั่วไปได้ โดยในงานวิจัยนี้สามารถละลายเส้นใยเซลลูโลสจากเส้นใยฝ้าย 5 wt% ในตัวทำละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ / ยูเรีย / น้ำกลั่น ในอัตราส่วน 7:12:81 w/w ที่อุณหภูมิ -12.5 องศาเซลเซียส ได้สำเร็จ พร้อมทั้งอธิบายถึงกลไกการละลายเซลลูโลสที่อุณหภูมิต่ำ ขนาดของ OH⁻ จะเล็กจนสามารถเข้าไปอยู่ระหว่างสายโซ่โมเลกุลเซลลูโลสและสามารถแยก intermolecular H-bonding ออกจากกันได้และเมื่อเซลลูโลสเกิดการบวมตัวลำดับต่อไป ยูเรียที่มีขนาดโมเลกุลที่ใหญ่สามารถแทรกสอดเข้าไประหว่างสายโซ่โมเลกุลเซลลูโลสและทำลาย intermolecular H-bonding ของเซลลูโลสได้อย่างสิ้นเชิง ซึ่งยูเรียจะไปล้อมรอบโมเลกุลของเซลลูโลสและสร้างพันธะ H-bonding กับเซลลูโลส ขณะเดียวกันพันธะ H-bonding ระหว่างเซลลูโลสด้วยกันเองก็จะหายไป ได้เป็นสารละลายเซลลูโลส

จากการศึกษาของ Mingwei และคณะ [38] ได้เตรียมแผ่นไม้โปร่งแสงจากไม้ Bass wood โดยเริ่มจากการเตรียมแผ่นไม้ให้มีความหนา 1 มม. จากนั้นกำจัดสิ่งสกปรกและลิกนินที่มีอยู่มากถึง 30% ในเนื้อไม้ด้วยการต้มในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2.5 mol/L เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และนำไปฟอกขาวด้วย H₂O₂ เนื่องจากลิกนินจะเป็นตัวดูดซับแสงทำให้ไม่มีความทึบแสงจึงต้องมีการกำจัดลิกนินออกให้หมด จากนั้นนำแผ่นไม้ที่ผ่านการกำจัดลิกนินออกหมดแล้วจุ่มลงใน Polyvinylpyrrolidone (PVP) ที่มีค่าดัชนีการหักเห 1.53 ให้มีความสูงกว่าแผ่นไม้ 10 เท่า ภายใต้ความดัน 200 Pa เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำไปวางบนเตาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เพื่อให้ตัวทำละลายระเหยหมด จะได้แผ่นไม้โปร่งใสออกมา ยืนยันผลด้วยการตรวจดูสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่ารูของแผ่นไม้ถูกเติมเต็มด้วยพอลิเมอร์กลายเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาปริมาณการส่องผ่านของแสงด้วยเครื่อง uv-vis spectrometer ที่ความยาวคลื่น 400 - 600 นาโนเมตร พบว่าไม่มีค่าการส่องผ่านของแสงเกือบ 0% เนื่องจาก แสงส่วนใหญ่ถูกดูดซับโดยลิกนินและในทางตรงกันข้ามเซลลูโลสโปร่งแสง แสงสามารถส่องผ่านได้เกือบ 90%

จากการศึกษาของ Okahisa และคณะ [39] ได้ทำการเตรียมหน้าจอ OLED จากไม้ Douglas fir โดยเริ่มจากการนำไม้มาบดให้เป็นผงจากนั้นกำจัดลิกนินออกโดยใช้ acidified sodium chlorite จากนั้นนำมาขึ้นรูปให้ได้เป็นแผ่นไม้โดยการละลายผงไม้ลงในน้ำและเทผ่านแผ่นเมมเบรน จากนั้นจุ่ม

แผ่นไม้ลงในน้ำยาอะคริลิกเรซิน ภายใต้ความดัน -0.09 MPa เป็นเวลา 12 ชม. เพื่อให้หน้ายาเข้าไปแทนที่อากาศในรูพรุนอย่างสมบูรณ์ แล้วทำการอบด้วยแสงยูวีเพื่อให้อะคริลิกเรซินเกิดการเซตตัว ก็จะได้แผ่นไม้โปร่งแสง โดยในงานวิจัยนี้อะคริลิกเรซินที่ใช้มีสองตัวคือ ABPE และ TCDDMA มาผสมกันในอัตราส่วนที่ต่างกันดังนี้ pure ABPE10, 8A:1T, 4A:1T, 2A:1T, 1A:1T, 1A:2T, 1A:4T, 1A:8T, TCDDMA pure เพื่อหาอัตราส่วนของพอลิเมอร์ที่เหมาะสมที่สุดในการนำมาทำเป็นหน้าจอ OLED จากนั้นนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลโดยการทดสอบแรงดึงเปรียบเทียบระหว่างพอลิเมอร์บริสุทธิ์กับพอลิเมอร์ผสมเส้นใยพบว่าพอลิเมอร์บริสุทธิ์จะเกิดการแตกหักได้ง่าย แต่พอลิเมอร์ผสมเส้นใยเข้าไปเพียง 40% พบว่าวัสดุมีความเหนียวขึ้น อ่อนขึ้น เนื่องจากเส้นใยที่ใส่เข้าไปจะไปช่วยชะลอการเกิดรอยแตกร้าว หลังจากนั้นนำไปทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของพอลิเมอร์ที่ไม่ผสมเส้นใยจะมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวที่สูงแต่พอเสริมแรงด้วยเส้นใยพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวต่ำลงอย่างเห็นได้ชัดแสดงให้เห็นว่าเส้นใยที่ใส่เข้าไปจะไปขัดขวางการขยายตัวของพอลิเมอร์ ซึ่งการที่หน้าจอมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวต่ำ ก็จะมีข้อดีคือเมื่อเวลาหน้าจอได้รับความร้อนหน้าจอก็จะไม่เกิดการขยายตัวทางความร้อนสูง ภาพที่ได้ก็จะคมชัดซึ่งจากการทดสอบนี้พบว่าอัตราส่วนของเรซินที่เหมาะสมคือ 2A:1T (ABPE10:TCDDMA) ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (CTE) อยู่ที่ 21.3

จากการศึกษาของ Yaddanapudi และคณะ [40] มีความต้องการที่จะลดการใช้กระแสไฟฟ้าในอาคารบ้านเรือนโดยการหันมาใช้พลังงานจากธรรมชาติมากขึ้นด้วยการทำโครงสร้างอาคารให้มีความโปร่งแสง โดยในงานวิจัยได้ทำการพัฒนาไม้โปร่งแสง จากไม้ Beech wood ด้วยการกำจัดลิกนินออกอย่างสมบูรณ์ด้วย sodium chlorite 5wt% ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชม. จะได้แผ่นไม้ที่ปราศจากลิกนินจากนั้นจุ่มลงใน PMMA ในเครื่อง vacuum เพื่อไม่ให้เกิดฟองอากาศ จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชม. จะได้แผ่นไม้โปร่งแสงออกมา ยืนยันผลด้วยการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าแผ่นไม้ที่ผ่านการกำจัดสิ่งสกปรกจะเกิดรูพรุน และแทนที่อากาศในรูพรุนด้วย PMMA จะได้แผ่นไม้โปร่งแสง จากนั้นทำการทดสอบสมบัติได้แก่การวัดความสามารถในการส่องผ่านของแสง พบว่าที่ความยาวคลื่น 500 nm การส่องผ่านของแสงในไม้ Beech wood เกือบ 0% เนื่องจากแสงถูกดูดกลืนด้วยลิกนิน และในทางตรงกันข้ามไม้โปร่งแสง แสงสามารถส่องผ่านได้ 70% ที่ความหนา 0.1 mm และที่ความหนา 0.7mm แสงสามารถส่องผ่านได้ 15% เนื่องจากชั้นตัวอย่างมีความหนามากขึ้นส่งผลให้แสงต้องใช้ระยะทางในการส่องผ่านมากขึ้นทำให้แสงส่องผ่านได้น้อย จากนั้นทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยการทดสอบแรงดึง ระหว่างไม้ Beech wood ที่ผ่านการกำจัดลิกนิน (delignified wood) และ transparent wood พบว่า delignified wood มีค่า elastic modulus 2.1 GPa ขณะที่

transparent wood มีค่า elastic modulus 2.5 GPa ซึ่งสาเหตุที่ค่า elastic modulus ของ delignified wood ต่ำเนื่องจากขาดพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรงเชื่อมระหว่างผนังเซลล์

Yang และคณะ [41] ได้ทำการศึกษาสมบัติการส่องผ่านของออกซิเจน การทนแรงดึง และการส่องผ่านของแสงของเซลลูโลสที่มีสมบัติโปร่งแสงและยืดหยุ่นที่เตรียมได้จากสารละลายต่าง/ยูเรียเปรียบเทียบกับ แผ่นเซลลูเฟน, poly(vinylidene chloride), และ poly(vinyl alcohol) โดยนำเซลลูโลส 4 ชนิด ได้แก่ Filter paper pulp, microcrystalline cellulose powder, cotton linters pulp and softwood bleached kraft pulp ปริมาณ 5 wt% มาละลายในตัวทำละลาย NaOH / urea / H₂O อัตราส่วน 7:12:81 ที่อุณหภูมิ -12 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการคนเพื่อให้เซลลูโลสกระจายอยู่ในตัวทำละลาย 2 นาที ก็จะได้สารละลายเซลลูโลสที่หนืดและใส จากนั้นทำการเทลงแผ่นกระจกให้มีความหนา 0.5 มม. และจุ่มลงในอ่างตกตะกอนที่มีสภาวะแตกต่างกันได้แก่ H₂SO₄ 5wt% ที่อุณหภูมิ 0 – 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที H₂SO₄ 5 wt% ผสมกับ Na₂SO₄ 5 wt% ที่อุณหภูมิ 20% เป็นเวลา 5 นาที EtOH ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที, t-BuOH ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที และ acetone ที่อุณหภูมิ 0 - 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จะได้แผ่นที่เป็น hydrogel ออกมา และทำการล้างด้วยน้ำกลั่น จากนั้นนำไปวางบนแผ่น poly(methyl methacrylate) และติดด้วยเทปขาวเพื่อป้องกันการหดตัวของชิ้นงานและทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปอบไล่ความชื้นใน phosphorus pentoxide ที่อุณหภูมิห้อง และความชื้นสัมพัทธ์ 0% เป็นเวลา 3 วัน และนำไปทดสอบค่าการส่องผ่านของออกซิเจนพบว่าเซลลูโลสที่เตรียมจากสารละลาย NaOH/Urea ทุกตัวมีค่าการส่องผ่านของออกซิเจนอยู่ในช่วง 0.003 – 0.03 mL $\mu\text{m m}^{-2} \text{ day}^{-1} \text{ kPa}^{-1}$ ซึ่งต่ำกว่าเซลลูเฟนที่มีค่าการส่องผ่าน 0.048 mL $\mu\text{m m}^{-2} \text{ day}^{-1} \text{ kPa}^{-1}$ มีค่าการทนต่อแรงดึงเฉลี่ย 150 MPa และมีค่าการส่องผ่านของแสงอยู่ที่ 90%

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานและแผนงานวิจัย

- 3.1.1 ศึกษา ค้นคว้าทฤษฎี และสืบค้นข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 3.1.2 วางแผนการดำเนินงานวิจัย กำหนดขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย
- 3.1.3 จัดหาวัสดุ อุปกรณ์ สารเคมี และอุปกรณ์
- 3.1.4 ศึกษาและอบรมวิธีการใช้เครื่องมือทดสอบ
- 3.1.5 สกัดเซลล์โลส
- 3.1.6 สังเคราะห์อะคริลิกเรซิน
- 3.1.7 เตรียมเซลล์โลสแอรเจล
- 3.1.8 เตรียมแผ่นโปร่งแสงจากแอรเจลโดยการแทนที่น้ำในรูพรุนด้วยเรซินทางการค้าและอะคริลิกเรซิน
- 3.1.9 ทดสอบและวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างสัณฐานวิทยาของเซลล์โลสแอรเจลและเซลล์โลสโปร่งแสง
- 3.1.10 ทดสอบความสามารถในการส่องผ่านของแสง
- 3.1.11 ทดสอบสภาพการนำความร้อน
- 3.1.12 ทดสอบสมบัติการขยายตัวเมื่อได้รับความร้อน
- 3.1.13 ทดสอบสมบัติการสลายตัวทางความร้อน
- 3.1.14 ทดสอบสมบัติเชิงกล (ความทนต่อแรงดึง, โมดูลัสของยัง, ความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด)
- 3.1.15 วิเคราะห์ สรุปผล และจัดทำเล่มวิทยานิพนธ์

3.2 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย สรุปลงได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุ / สารเคมี	เกรด / บริษัทที่ผลิต
ลำต้นผักตบชวาที่ตากแห้งแล้ว	ตามหนองน้ำ แม่น้ำ ลำคลอง
น้ำยาฟอกขาว ตราไฮเตอร์	เกรดการค้า บริษัท คาโอ อินดัสเตรียล
โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) แบบเกล็ด	เกรดอุตสาหกรรม
ยูเรีย (CH ₄ N ₂ O)	เกรดอุตสาหกรรม ประเทศจีน
พอลิไวนิล แอลกอฮอล์ (PVA) MW 125,000 g/mol	เกรดอุตสาหกรรม บริษัท ชัยภูมิ บราเดอร์ส จำกัด
โพแทสเซียม เปอร์ซัลเฟต (K ₂ S ₂ O ₈) MW 270,33 g/mol	เกรด analytical บริษัท M&B
เมทิล เมทาคริเลต (MMA) 99.8% CH ₂ =C(CH ₃)COOCH ₃	เกรดอุตสาหกรรม บริษัท ไบรเทนโพลี เทรตติ้ง จำกัด
เรซินทางการค้า (acrylic binder)	บริษัท สตาร์เทค

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือที่นำมาใช้ในงานวิจัยสรุปได้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 เครื่องมือที่นำมาใช้ในงานวิจัย

ชื่อเครื่องมือ/อุปกรณ์	บริษัทผู้ผลิต/รุ่น
เครื่องบดละเอียด	FRITSCH
เครื่องบดหยาบ	MOMUNDA
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM)	JEOL / JSM-648OLV
เครื่องวัดการส่องผ่านของแสง	ยูเนี่ยน ทีเอสแอล / COLOR-EYE7000
เครื่องทดสอบเนกประสงค์	LLOYD / LF PLUS
เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (TGA)	METTLER TOLEDO / TGA/DSC ³⁺
เครื่องทดสอบสมบัติการขยายตัวเมื่อได้รับความร้อน (TMA)	METTLER TOLEDO
เครื่องทดสอบการนำความร้อน	-

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. อุปกรณ์เครื่องแก้ว (ปิเกตอร์ กระบอกตวง ขวดปริมาตร แท่งแก้ว)
2. เครื่องชั่งตวงน้ำหนักสองตำแหน่ง (Digital balance) Mettler Toledo รุ่น AB204-S/FACT
3. แม่แบบขึ้นรูปพลาสติก (กล่องพลาสติก 9 x 13 ตารางเซนติเมตร)
4. กระดาษวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง
5. เครื่องกวนสารละลายพร้อมให้ความร้อน (Hot plate stirrer)
6. เครื่องแช่เยือกแข็ง (Freezer)
7. ตู้อบ (Hot air oven) Memmert รุ่น UNB 400
8. เครื่องวัดความหนาของฟิล์ม (Thickness gage)

3.4 ขั้นตอนการทดลอง

3.4.1 การสกัดเส้นใยเซลลูโลสบริสุทธิ์

นำกากผักตบชวามาตัดใบทิ้งและนำไปตากแห้ง จากนั้นนำมาต้มในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 5 %wt เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เสร็จแล้วล้างด้วยน้ำเปล่าจนสะอาดปราศจากต่าง ทดสอบด้วยกระดาษลิตมัส จากนั้นนำไปแช่ในน้ำยาฟอกขาวไฮโปคลอไรท์ (น้ำยาฟอกขาวทางการค้า) เป็นเวลา 2 วัน และทำการล้างจนกระทั่งแน่ใจว่าได้เส้นใยสีขาวบริสุทธิ์ จากนั้นนำไปตากแดดให้แห้ง แล้วนำไปบดได้เป็นผงเซลลูโลส

3.4.2 เตรียมแผ่นเซลลูโลสแอโรเจลเปียก

วิธีการเตรียมแผ่นเซลลูโลสแอโรเจลเปียกเริ่มจากการเตรียมสารละลายผสมระหว่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 7 %wt ยูเรียที่ความเข้มข้น 12 %wt และน้ำ 81%wt จากนั้นนำผงเซลลูโลสที่ผ่านการกำจัดสิ่งสกปรกและลิกนินออกแล้ว (3.4.1) ไปละลายในสารละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์/ยูเรีย และทำการคนเพื่อให้เซลลูโลสกระจายตัวได้ดีในตัวทำละลายในตัวทำละลายที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จะได้เป็นสารละลายเหลวหนืด จากนั้นนำสารละลายเหลวหนืดที่ได้เทลงในแม่พิมพ์ และทำการตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2-3 วัน จนกว่าของเหลวหนืดจะเกิดการแข็งตัวเป็นเจล จากนั้นทำการแลกเปลี่ยนตัวทำละลายกับน้ำเพื่อกำจัดโซเดียมไฮดรอกไซด์กับยูเรียออกให้หมดจะได้แผ่นแอโรเจลเปียกออกมา

3.4.3 เตรียมแผ่นเซลลูโลสแอโรเจลแห้ง

วิธีการเตรียมแผ่นเซลลูโลสแอโรเจลแห้ง เริ่มจากการนำแผ่นแอโรเจลเปียกที่เตรียมได้จากข้อ 3.4.2 ไปฟรีซเป็นเวลา 1 ชม. เพื่อให้น้ำเกิดการแข็งตัวเป็นน้ำแข็ง จากนั้นตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเพื่อให้ น้ำแข็งละลาย (freeze/thaw) 1 รอบ จะได้แผ่นแอโรเจลแห้ง

3.4.4 การสังเคราะห์อะคริลิกเรซิน

ละลาย potassium persulphate 0.1 กรัม ใน polyvinyl alcohol ที่ความเข้มข้น 20 โมลาร์ ปริมาตร 100 มล. และทำการเติม methyl methacrylate ปริมาตร 10 มล. ลงไปใน polyvinyl alcohol จากนั้นทำการคนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดปฏิกิริยา free radical polymerization จะได้อะคริลิกเรซินที่มีลักษณะเป็นนํ้านมออกมา

3.4.5 การเตรียมแผ่นเซลลูโลสโปร่งแสง

นำอะคริลิกเรซินที่เตรียมได้จากข้อ 3.4.4 และเรซินทางการค้า (บริษัท สตาร์เทค) มาเทลงในแม่แบบที่มีเซลลูโลสแอโรเจลเปียกโดยเทให้ท่วม จากนั้นตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 6 วัน เพื่อให้

น้ำค่อยๆระเหยออกจากรูปทรง และอะคริลิกเรซิน/เรซินทางการค้า จะเข้าไปแทนที่น้ำในรูปทรง หลังจากนั้นเราจะได้แผ่นเซลลูโลสที่มีความโปร่งแสง



รูปที่ 3.1 การเตรียมแผ่นเซลลูโลสโปร่งแสง

ตารางที่ 3.3 สูตรต่างๆของวัสดุเชิงประกอบของเซลลูโลสโปร่งแสง

เซลลูโลสโปร่งแสงจากเรซินทางการค้า

ความหนา แผ่นแอโรเจล	ปริมาณสารละลายเซลลูโลส (มล.)	ปริมาณเรซินทางการค้า (มล.)
0.3 มม.	20	40
0.5 มม.	30	60
0.7 มม.	40	80

เซลลูโลสโปร่งแสงจากอะคริลิกเรซินที่สังเคราะห์

ความหนา แผ่นแอโรเจล	ปริมาณสารละลายเซลลูโลส (มล.)	ปริมาณอะคริลิกเรซิน (มล.)
0.3 มม.	20	40
0.5 มม.	30	60
0.7 มม.	40	80

3.5 การทดสอบ

3.5.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผักตบชวา

1. การหาปริมาณลิกนินตามมาตรฐาน (TAPPI T222)

นำผงเซลลูโลส 1 กรัม ใส่ลงในฟอยด์แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 ± 3 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นนำออกมาตั้งทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น และนำไปชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำผงเซลลูโลสที่ปราศจากความชื้นใส่ลงในบีกเกอร์ ขนาด 100 มิลลิลิตร และเติมกรดซัลฟิวริกที่มีความเข้มข้น 72% ปริมาตร 15 มิลลิลิตร ที่นำไปแช่ในอ่างน้ำแข็งจนมีอุณหภูมิต่ำกว่า 5 องศาเซลเซียส ใส่ลงในบีกเกอร์ที่มีผงเซลลูโลส จากนั้นนำบีกเกอร์ที่มีเซลลูโลสกระจายอยู่ในกรดซัลฟิวริกไปแช่ในอ่างน้ำแข็งที่มีอุณหภูมิ 2 ± 1 องศาเซลเซียส และใช้แท่งแก้วคนให้เซลลูโลสกระจายตัวอยู่ในกรดซัลฟิวริกอย่างสม่ำเสมอ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นเทผงเซลลูโลสจากบีกเกอร์ลงในขวดรูปกรวยขนาด 1,000 มิลลิลิตร โดยมีน้ำร้อนอยู่ในขวด ปริมาตร 560 มิลลิลิตร และปิดปากขวดด้วยฟอยด์ จากนั้นนำไปใส่ในหม้อหนึ่งเป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยทำการเขย่าทุกๆ 30 นาที เมื่อครบเวลาที่กำหนดให้นำสารละลายเทใส่ในบีกเกอร์ขนาด 1,000 มิลลิลิตร และปิดปากบีกเกอร์ด้วยกระจกนาฬิกา โดยทำการวางบีกเกอร์ให้มีลักษณะเอียงเพื่อให้สารละลายเกิดการตกตะกอนเป็นระยะเวลา 1 คืน จากนั้นค่อยๆ รินสารละลายส่วนที่ใสลงในบีกเกอร์ขนาด 1,000 มิลลิลิตรอีกใบหนึ่ง ส่วนสารละลายที่มีตะกอนส่วนที่เหลือให้ตั้งทิ้งไว้อีก 4 ชั่วโมง รอให้ตกตะกอนอีก จากนั้นเริ่มกรองด้วยสารละลายส่วนที่ใสก่อนด้วยถ้วยกรองเบอร์ 4 ที่ทราบน้ำหนักอบแห้งที่ละเอียดถึง 0.0001 กรัม หลังจากนั้นทำการกรองส่วนที่เป็นตะกอน และล้างด้วยน้ำกลั่นอีก 3 ครั้ง จากนั้นนำถ้วยกรองที่มีผงเซลลูโลสไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 ± 3 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น จากนั้นนำผงเซลลูโลสไปชั่งที่เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง และนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณลิกนินโดยใช้สูตร

$$\text{ปริมาณลิกนิน (\%)} = (L \times 100) / B$$

กำหนดให้ B = น้ำหนักอบแห้งของผงเซลลูโลส (กรัม)

L = น้ำหนักอบแห้งของลิกนิน (กรัม)

2. การหาปริมาณไฮโดรเซลลูโลส โดยวิธี Acid chlorite ด้วยวิธีของ Browing ใน Method of wood chemistry

ทำการชั่งผงเซลลูโลสแห้งที่ปราศจากสารแทรกปริมาณ 3 กรัม ใส่ลงในขวดก้นกลมขนาด 250 มิลลิลิตร จากนั้นเติมน้ำกลั่นปริมาตร 160 มิลลิลิตร และ กรดอะซิติกปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร

และโซเดียมคลอไรด์ 1.5 ± 0.1 กรัม ตามลำดับ นำไปตั้งในอ่างน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 70 - 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยทำการเขย่าขวดอย่างสม่ำเสมอ จากนั้นเติมกรดอะซิติกปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร และโซเดียมคลอไรด์ 1.5 กรัม ลงไปในขวดแล้วเขย่า ทำซ้ำขั้นตอนข้างต้นทุกชั่วโมงจนครบ 3 ชั่วโมง จากนั้นนำไปตั้งในอ่างน้ำเย็นให้อุณหภูมิลดลงเหลือประมาณ 10 องศาเซลเซียส แล้วนำมากรองด้วยถ้วยกรองเบอร์ 2 หลังจากนั้นล้างด้วยน้ำเย็นและอะซิโตนปริมาตร 50 มิลลิลิตร และนำถ้วยกรองที่มีผงเซลลูโลสไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 ± 3 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วทำการชั่งน้ำหนักผงเซลลูโลสด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง นำค่าที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณไฮโดรเซลลูโลส โดยใช้สูตร

$$\% \text{ ไฮโดรเซลลูโลส} = (H_o/B) \times 100$$

กำหนดให้ H_o = น้ำหนักแห้งของไฮโดรเซลลูโลสหลังการอบ (กรัม)

$$B = \text{น้ำหนักแห้งของผงเซลลูโลส (กรัม)}$$

3. การหาปริมาณแอลฟาเซลลูโลส (มาตรฐาน TAPPI T203)

ชั่งผงเซลลูโลสแห้งจากการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ไฮโดรเซลลูโลสมาประมาณ 1.5 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 400 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 17.5% ปริมาตร 75 มิลลิลิตร ลงไปในบีกเกอร์ และนำไปปรับอุณหภูมิของสารละลายให้อยู่ในช่วง 2.5 ± 0.2 องศาเซลเซียส และทำการคนจนผงเซลลูโลสกระจายอย่างสม่ำเสมอในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จากนั้นนำไปแช่ในอ่างน้ำแข็งและควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 2.5 ± 0.2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที แล้วเติมน้ำกลั่นปริมาตร 100 มิลลิลิตร และทิ้งไว้อีก 30 นาที จากนั้นกรองด้วยถ้วยกรองเบอร์ 2 หลังจากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นและกรดอะซิติกเข้มข้น 10% ปริมาตร 40 มิลลิลิตร แล้วนำไปอบด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 ± 3 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และนำไปตั้งทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้นแล้วทำการชั่งน้ำหนักบนเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง นำค่าที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณแอลฟาเซลลูโลส โดยใช้สูตร

$$\% \text{ แอลฟาเซลลูโลส} = (A_p/B) \times 100$$

เมื่อ A_p = น้ำหนักแห้งของแอลฟาเซลลูโลสหลังการอบ (กรัม)

$$B = \text{น้ำหนักแห้งของผงเซลลูโลส (กรัม)}$$

4. การหาปริมาณเฮมิเซลลูโลส

ปริมาณเฮมิเซลลูโลส = ปริมาณไฮโดรเซลลูโลส - ปริมาณแอลฟาเซลลูโลส

3.5.2 วิเคราะห์สัณฐานวิทยา

การตรวจสอบด้านสัณฐานวิทยาของแผ่นเซลลูโลสเอโรเจล และแผ่นโปร่งแสงที่ถูกเติมด้วยเรซิน ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ของบริษัท JEOL รุ่น JSM-6400 แสดงในรูปที่ 3.2 โดยตัดชิ้นงานขนาด 0.5 x 0.5 เซนติเมตร และนำไปอบเพื่อไล่ความชื้นก่อนนำชิ้นงานไปทดสอบที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นงานไปฉาบผิวด้วยทองคำ ด้วยเครื่อง sputter-coater ก่อนจะทำการตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



รูปที่ 3.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด รุ่น JSM 6400 บริษัท JEOL

3.5.3 ทดสอบความสามารถในการส่องผ่านของแสง

เตรียมตัวอย่างขนาด 9 x 13 ตารางเซนติเมตร เพื่อใช้วัดความสามารถในการส่องผ่านของแสง ด้วยเครื่อง Reflectance Spectrophotometer COLOR-EYE 7000 แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 เครื่อง Reflectance Spectrophotometer COLOR-EYE 7000

3.5.4 ทดสอบสภาพการนำความร้อน

เตรียมชิ้นงานให้มีขนาด เท่ากับ 9×13 ตารางเซนติเมตร และนำไปทดสอบสภาพการนำความร้อนด้วยเครื่อง Infrared Thermometer โดยวางแผ่นชิ้นงานไว้บนกล่องพลาสติกอะคริลิกที่มีเครื่องกำเนิดความร้อนอินฟราเรด (Infrared heater) อยู่ภายในกล่องที่ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส (250วัตต์) และใช้เครื่องอินฟราเรดยิงอุณหภูมิที่อยู่ด้านบนและด้านล่างของชิ้นทดสอบ [21] จากนั้นนำไปคำนวณค่าสภาพการนำความร้อน ตามสมการด้านล่าง

$$k = QL / A \Delta T$$

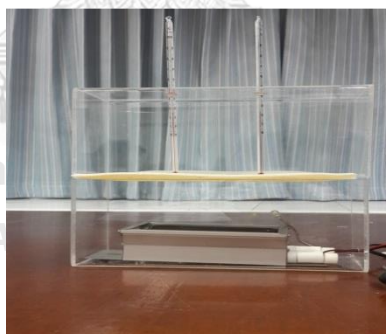
เมื่อ k คือ สภาพการนำความร้อน หน่วย วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน (W/m.K)

Q คือ ความร้อนที่ไหลจากเครื่องกำเนิดความร้อนผ่านชิ้นทดสอบหน่วย วัตต์ (W)

A คือ พื้นที่ที่ความร้อนไหลผ่าน (กว้าง \times ยาว) หน่วย ตารางเมตร (m^2)

L คือ ความหนาของชิ้นทดสอบ หน่วย เมตร (m)

ΔT คือ อุณหภูมิที่แตกต่างระหว่างผิววัสดุด้านบนและผิววัสดุด้านล่าง หน่วย องศาเคลวิน (K)



รูปที่ 3.4 เครื่องทดสอบการนำความร้อน

3.5.5 ทดสอบสมบัติการขยายตัวเมื่อได้รับความร้อน

การวิเคราะห์วัสดุโดยการวัดการเปลี่ยนแปลงขนาดของวัสดุเมื่อได้รับความร้อน ด้วยเครื่อง Thermomechanical Analysis (TMA) ของบริษัท METTLER TOLEDO แสดงดังรูปที่ 3.5 ภาวะที่ใช้ทดสอบคืออุณหภูมิเริ่มต้น 30 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิสุดท้ายคือ 150 องศาเซลเซียส ใช้อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 5 องศาเซลวิน/นาที [39]



รูปที่ 3.5 เครื่องวัดการเปลี่ยนแปลงขนาดของวัสดุเมื่อได้รับความร้อน (TMA)

3.5.6 ทดสอบการสลายตัวทางความร้อน

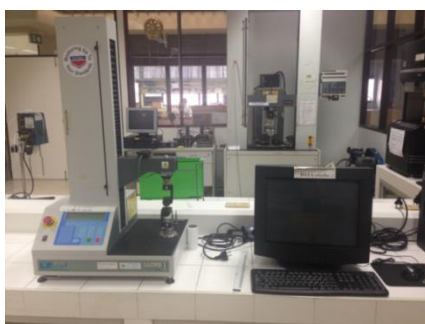
การวิเคราะห์เสถียรภาพทางด้านความร้อนของวัสดุดิบและชิ้นงานคอมพอสิตด้วยเครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (Thermogravimetric Analyzer, TGA) ของบริษัท Mettler Toledo รุ่น TGA/DSC3⁺ แสดงดังรูปที่ 3.6 โดยภาวะที่ใช้ทดสอบคืออุณหภูมิเริ่มต้น 50 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิสุดท้ายคือ 700 องศาเซลเซียส ใช้อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 10 องศาเซลวิน/นาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน [4, 42, 43]



รูปที่ 3.6 เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (TGA)

3.5.7 ทดสอบสมบัติเชิงกล

ทดสอบสมบัติเชิงกล ได้แก่การทดสอบความทนแรงดึง (Tensile strength) ย้่งมอดูลัส (Young's modulus) และความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด (Elongation at break) ของชิ้นงานด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine) ของบริษัท LLOYD รุ่น LF PLUS แสดงดังรูปที่ 3.7 โดยขนาดชิ้นงานในการทดสอบมีความกว้าง 4 มิลลิเมตร ความยาว 20 มิลลิเมตร ภาวะที่ใช้ในการทดสอบคือ ใช้ load cell ขนาด 50 นิวตัน ใช้อัตราเร็วในการดึง 10 มิลลิเมตรต่อนาที [39]



รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ บริษัท LLOYD รุ่น LF PLUS

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมแผ่นเซลลูโลสโปร่งแสงจากเซลลูโลสแอรโรเจล (เปียก) และทำการเปรียบเทียบสมบัติในด้านต่างๆ ของแผ่นเซลลูโลสโปร่งแสงที่แทนที่น้ำในรูพรุนด้วยเรซินทางการค้า และอะคริลิกเรซินที่สังเคราะห์เองในห้องปฏิบัติการ

4.1 ผลการสกัดเซลลูโลสจากผักตบชวา

ลักษณะทางกายภาพของผงเซลลูโลสที่ผ่านขั้นตอนการกำจัดลิกนินด้วยการต้มในสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ และผ่านการฟอกขาวด้วยสารไฮโปคลอไรท์ แสดงดังในรูปที่ 4.1 และองค์ประกอบทางเคมีของผักตบชวาแสดงไว้ในตารางที่ 4.1 พบว่าในผักตบชวาประกอบด้วยลิกนินร้อยละ 0.46 ปริมาณไฮโดรเซลลูโลสร้อยละ 84.36 ซึ่งจะแบ่งได้เป็นปริมาณแอลฟาเซลลูโลสร้อยละ 52.98 และปริมาณเฮมิเซลลูโลสร้อยละ 31.37 และส่วนที่เหลืออีกร้อยละ 15.18 คือสิ่งสกปรกจำพวกแป้ง ไขมัน และน้ำ



รูปที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของผงเซลลูโลสจากผักตบชวา

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของผักตบชวาภายหลังการกำจัดลิกนินและฟอกขาว

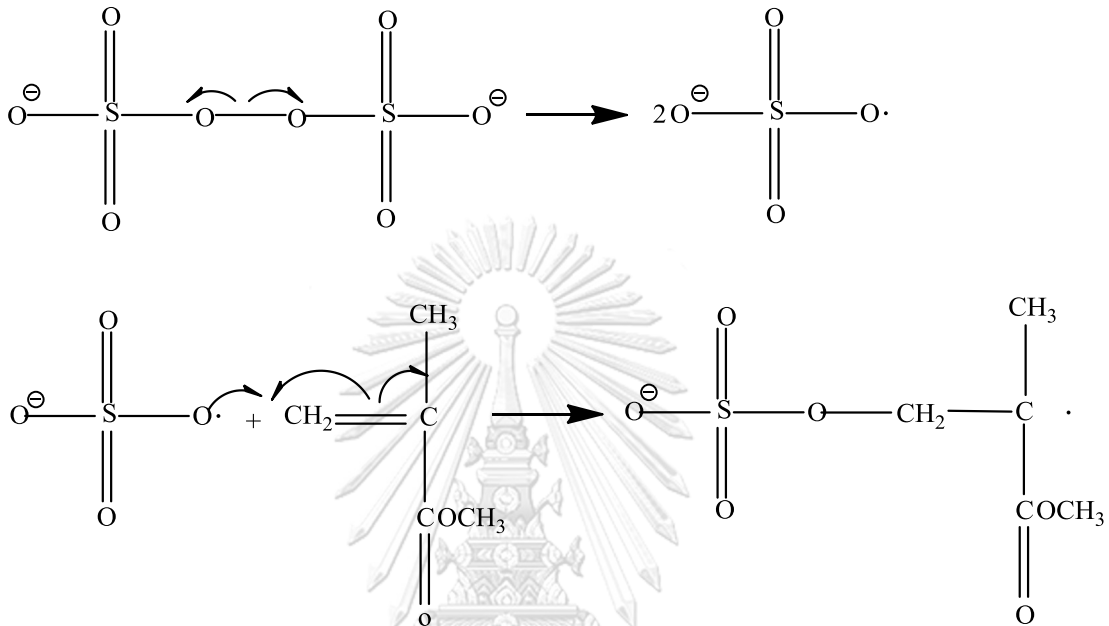
องค์ประกอบทางเคมี	สัดส่วน (ร้อยละ)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	มาตรฐาน
การละลายในแอลกอฮอล์ – เบนซิน	0.55	0.02	
การละลายในแอลกอฮอล์	1.69	0.18	TAPPI T264
การละลายในน้ำร้อน	7.75	0.225	TAPPI T264
สารแทรกรวม (1+2+3)	10	0.425	TAPPI T264
ปริมาณลิกนิน	0.46	0.06	TAPPI T222
ปริมาณโฮโลเซลลูโลส (Holocellulose)	84.36	0.035	Acid chlorite Method of Browning
ปริมาณแอลฟาเซลลูโลส (Alpha-cellulose)	52.98	0	TAPPI T203
ปริมาณเฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)	31.37	0.035	Holocellulose - Alphacellulose

4.2 ผลการสังเคราะห์อะคริลิกเรซิน

ผลการสังเคราะห์อะคริลิกเรซิน แบบ emulsion polymerization โดยใช้ polyvinyl alcohol ทำหน้าที่เป็น protective colloid เพื่อไม่ให้หยด MMA รวมตัวกัน ตัวเริ่มต้องเป็นชนิดละลายน้ำซึ่งในที่นี้เลือกใช้ potassium persulfate กลไกการเกิดปฏิกิริยาจะเป็นแบบ free radical polymerization โดยเริ่มต้นที่ผิวของหยด MMA โดยทำการสังเคราะห์เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ในขั้นตอน termination จะเกิดปฏิกิริยา chain transferring ที่สำคัญ โดย PMMA macroradical จะเข้าไปต่อกิ่งกับ PVA ที่ตำแหน่ง PVA-OH จึงส่งผลทำให้ได้ PMMA ในรูปของอิมัลชัน ดังรูปที่ 4.5 (ภาพ ก.) เปรียบเทียบกับเรซินทางการค้า (ภาพ ข.) พบว่าอะคริลิกเรซินที่สังเคราะห์ได้ในห้องปฏิบัติการมีลักษณะเป็นสีฟ้าใส มี solid content 6% แต่เรซินทางการค้ามีลักษณะเป็นสีขาวขุ่นเนื่องจากมี solid content (40%) สูงกว่า

ขั้นแรก initiator

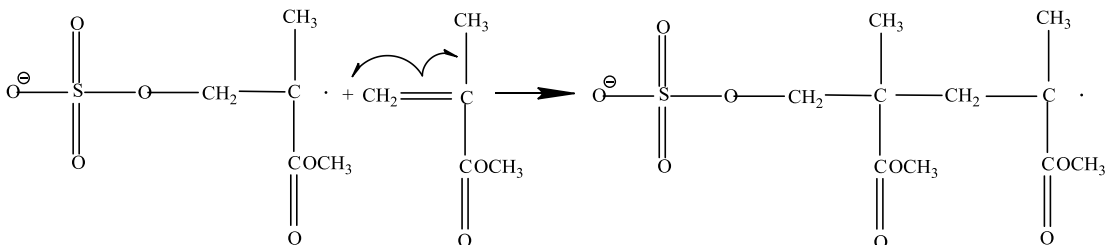
potassium persulphate (initiator) จะเกิดการแตกพันธะได้ 2 โมเลกุล ที่มีเรดิคัล initiator จะไปทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์ โดยเรดิคัลจะไปเหนี่ยวนำให้พันธะคู่ของมอนอเมอร์แตกออกได้เป็น active species ที่มีเรดิคัล ดังรูปที่ 4.2

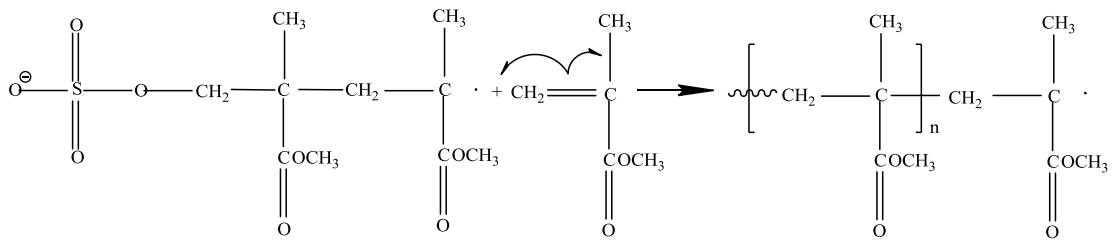


รูปที่ 4.2 กลไกการเกิดปฏิกิริยาในขั้น initiator

ขั้นสอง propagation จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

มอนอเมอร์ที่เป็น active species ที่มีเรดิคัล จะเข้าทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์ตัวต่อไป ทำให้ได้สายโซ่พอลิเมอร์ที่ยาวขึ้น ดังรูปที่ 4.3

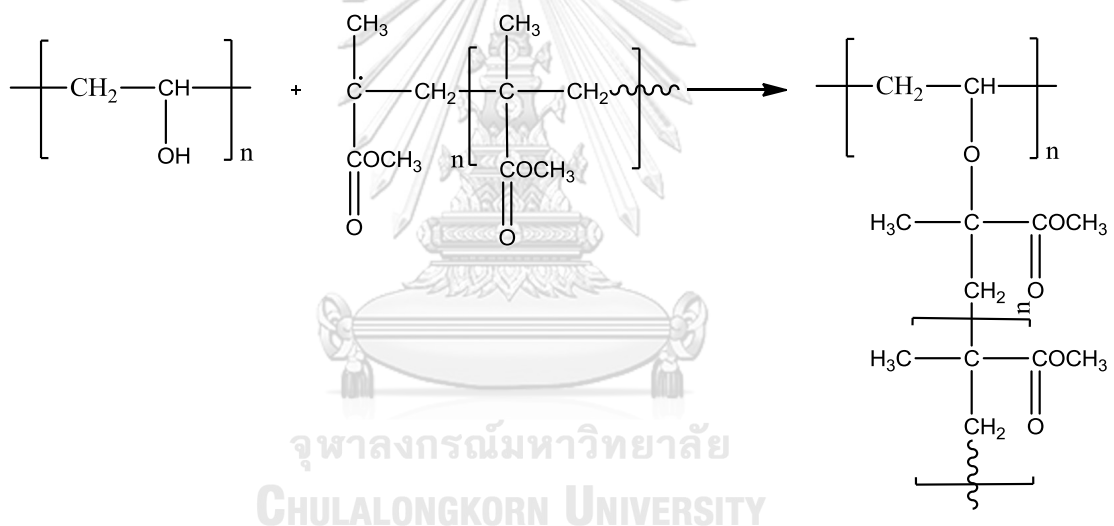




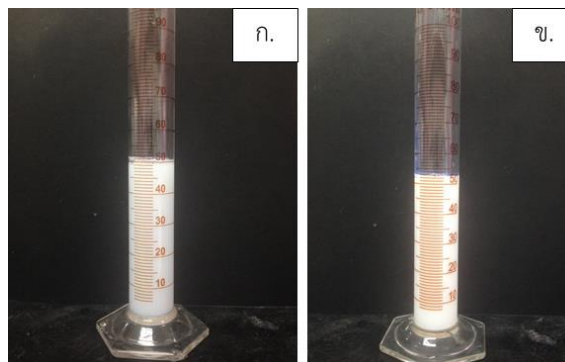
รูปที่ 4.3 กลไกการเกิดปฏิกิริยาในขั้น propagation

ขั้นสาม Termination

ขั้นจบปฏิกิริยาจะเกิดแบบ Chain tranfering โดย PMMA (polymethyl methacrylate) ที่เป็น active species จะมาต่อกิ่งกับ PVA (polyvinyl alcohol) ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 กลไกขั้นตอนการเกิด chain transferring ซึ่งจะได้ PMMA-g-PVA



รูปที่ 4.5 อะคริลิกเรซินที่สังเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ (ก) และ เรซินทางการค้า (ข)

4.3 ผลการเตรียมเซลลูโลสแอโรเจล

4.3.1 ปัจจัยที่ส่งผลต่อขนาดรูพรุนของเซลลูโลสแอโรเจล

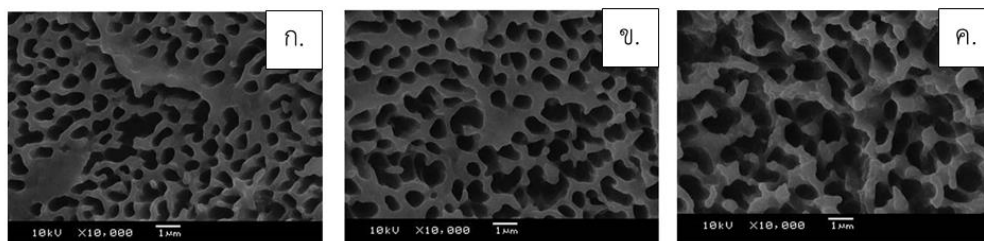
4.3.1.1 ผลของจำนวนรอบการทำวัฏจักรเยือกแข็ง/ละลาย (น้ำ)

จากรูปที่ 4.6 แสดงลักษณะทางกายภาพของเซลลูโลสแอโรเจลแห้ง (ภาพ ก.) และแอโรเจลเปียก (ภาพ ข.) และรูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นถึงภาพ SEM ของเซลลูโลสแอโรเจลแห้งที่เตรียมได้จากสารละลายเซลลูโลสที่ความเข้มข้น 5 %wt ที่มีจำนวนรอบที่แช่เยือกแข็ง/ละลายต่างกัน (ภาพ ก. 1 รอบ, ภาพ ข. 3 รอบ, ภาพ ค. 5 รอบ) และใช้เวลาในการแช่เยือกแข็งรอบละ 1 ชั่วโมง จากนั้นนำมาส่องที่กำลังขยาย 10,000 เท่า พบว่า เซลลูโลสแอโรเจลที่มีการแช่เยือกแข็ง/ละลาย สลับกัน 1 รอบ (ภาพ ก.) พบว่ามีรูพรุนขนาดเล็กแต่กระจายไม่ทั่วแผ่นแอโรเจลดังปรากฏอยู่ในรูป และเมื่อทำการเพิ่มจำนวนการแช่เยือกแข็ง/ละลาย สลับกัน 3 รอบ (ภาพ ข.) พบว่ารูพรุนที่ปรากฏอยู่ในภาพมีขนาดใหญ่ขึ้นและรูพรุนมีการกระจายตัวทั่วแผ่นแอโรเจล สุดท้ายเซลลูโลสแอโรเจลที่ทำการแช่เยือกแข็ง/ละลายสลับกัน 5 รอบ (ภาพ ค.) พบว่ารูพรุนที่ปรากฏอยู่ในรูปมีขนาดรูพรุนที่ติดๆกันจนก่อให้เกิดรูพรุนขนาดใหญ่กระจายอยู่ทั่วแผ่นแอโรเจล ซึ่งจากการทดลองนี้จะสรุปได้ว่าจำนวนรอบของการแช่เยือกแข็ง/ละลาย สลับกัน ที่มากขึ้นจะส่งผลให้รูพรุนภายในเซลลูโลสแอโรเจลมีขนาดใหญ่ ซึ่งมี 2 สาเหตุ คือ น้ำภายในรูพรุนของเซลลูโลสแอโรเจลเมื่ออยู่ใกล้กันแล้วนำไปแช่เยือกแข็ง น้ำจะเกิดการขยายตัวมาเจอกันทำให้เกิดรูพรุนที่มีลักษณะเป็นแอ่งขนาดใหญ่ ส่วนอีกกรณีหนึ่งคือการที่น้ำจากการละลายไม่ไหลออกมาจากเซลลูโลสแอโรเจล แต่ไหลไปรวมตัวกับผลึกน้ำแข็งที่ยังไม่ละลาย และเมื่อนำไปแช่เยือกแข็งอีกครั้งก็จะทำให้น้ำแข็งมีขนาดใหญ่ส่งผลให้เกิดรูพรุนขนาดใหญ่

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



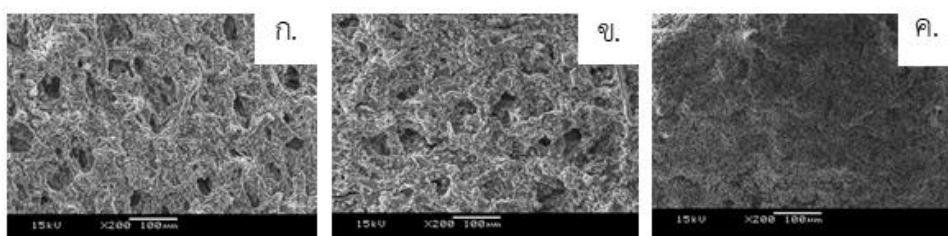
รูปที่ 4.6 ลักษณะทางกายภาพของเซลลูโลสแอโรเจลแห้ง (ก) แอโรเจลเปียก (ข)



รูปที่ 4.7 ภาพ SEM ของเซลลูโลสแอโรเจลที่มีจำนวนรอบวัฏจักรเยือกแข็ง/ละลายสลับกัน
1 รอบ (ก), 3 รอบ (ข), 5 รอบ (ค)

4.3.1.2 ผลของความหนาของแผ่นแอโรเจล

จากรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นถึงภาพ SEM ของเซลลูโลสแอโรเจลที่เตรียมได้จากสารละลายเซลลูโลสที่ความเข้มข้น 5 %wt และนำมาทำให้มีปริมาตรต่างกัน (ภาพ ก. 20 มล., ภาพ ข. 30 มล., ภาพ ค. 40 มล.) จากนั้นตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเพื่อให้แข็งตัว และทำการแลกเปลี่ยนตัวทำละลายกับน้ำได้เป็นแผ่นแอโรเจลเปียก จากนั้นตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเพื่อให้ น้ำค่อยๆระเหยแล้วนำไปอบไล่ความชื้นโดยใช้ซิลิกา และนำมาวัดความหนา พบว่าสารละลายเซลลูโลส 20 มล. ได้แผ่นแอโรเจลที่มีความหนาประมาณ 0.3 มม. สารละลายเซลลูโลส 30 มล. ได้แผ่นแอโรเจลที่มีความหนาประมาณ 0.5 มม. และสารละลายเซลลูโลส 40 มล. ได้แผ่นแอโรเจลที่มีความหนาประมาณ 0.7 มม. จากนั้นนำมาส่องภาคตัดขวางด้วย SEM ที่กำลังขยาย 200 เท่า พบว่า แผ่นเซลลูโลสแอโรเจลที่มีความหนา 0.3 มม. (ภาพ ก.) มีรูพรุนขนาดใหญ่กระจายทั่วแผ่น และเมื่อความหนาของแผ่นเซลลูโลสแอโรเจลเพิ่มขึ้นเป็น 0.5 มม. พบว่ารูพรุนมีขนาดเล็กลง สุดท้ายเซลลูโลสแอโรเจลที่มีความหนา 0.7 มม. พบว่ารูพรุนมีขนาดเล็กลงและมีปริมาณรูพรุนที่น้อยลง ซึ่งจากการทดลองนี้จะสรุปได้ว่าเมื่อความหนาของแผ่นแอโรเจลมากขึ้นจะส่งผลให้รูพรุนมีขนาดเล็กลงเนื่องจากความหนาแน่นของเส้นใยที่มากขึ้นจะไปบดบังรูพรุน



รูปที่ 4.8 ภาพ SEM ของเซลลูโลสแอโรเจลที่มีความหนาต่างกัน 0.3 มม. (ก), 0.5 มม. (ข), 0.7 มม.
(ค)

4.4 ผลการเตรียมเซลล์โลสโปรงแสงจากเรซินทางการค้า

4.4.1 ลักษณะทางกายภาพ

นำแผ่นแอโรเจลเปียก และแผ่นแอโรเจลแห้งที่มีความหนา 0.3 มม., 0.5 มม., และ 0.7 มม. มาเติมเรซินทางการค้าปริมาตร 40 มล., 60 มล., และ 80 มล. ตามลำดับ แล้วทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 6 วัน เพื่อให้เรซินทางการค้าเข้าไปอยู่ในรูพรุนอย่างสมบูรณ์ จะได้แผ่นเซลล์โลสโปรงแสง ออกมาดังรูปที่ 4.9 โดยในคอลัมน์ที่ 1 คือเรซินทางการค้าบริสุทธิ์ที่มีปริมาณเรซินทางการค้า 20 มล., 30 มล., และ 40 มล. ตามลำดับ ส่วนคอลัมน์ที่สองเป็นแผ่นโปรงแสงที่เตรียมจากการการแทนที่น้ำในรูพรุนของแผ่นแอโรเจลเปียกที่มีความหนา 0.3 มม., 0.5 มม., และ 0.7 มม. ด้วยเรซินทางการค้า 40 มล., 60 มล., และ 80 มล. ตามลำดับ พบว่ามีความโปรงแสงใกล้เคียงกับเรซินบริสุทธิ์ และคอลัมน์ที่ 3 เป็นการเตรียมแผ่นโปรงแสงจากแผ่นแอโรเจลแห้ง พบว่าเรซินไม่สามารถเข้าไปแทนที่อากาศในรูพรุนได้ทำให้วัสดุทึบแสง ซึ่งการเตรียมแผ่นโปรงแสงจากแอโรเจลแห้งที่มีอากาศแทรกในรูพรุนจะต้องทำภายใต้แรงดันหรือต้องใช้เครื่องมือในการดูดอากาศจึงจะทำให้เรซินเข้าไปอยู่ในรูพรุนได้ แต่เนื่องจากในห้องปฏิบัติการของเราไม่มีเครื่องดูดอากาศ เราจึงทำการเตรียมแผ่นโปรงแสงจากแผ่นแอโรเจลเปียกที่มีน้ำแทรกอยู่ในรูพรุนแทน เพราะเป็นวิธีที่ง่าย สะดวก และไม่ต้องใช้เครื่องมือที่มีราคาแพง และเมื่อความหนาของแผ่นโปรงแสงมากขึ้นจะทำให้แสงเกิดการหักเห หรือเกิดการกระเจิงภายในมากขึ้น วัสดุจึงดูขุ่นขึ้น

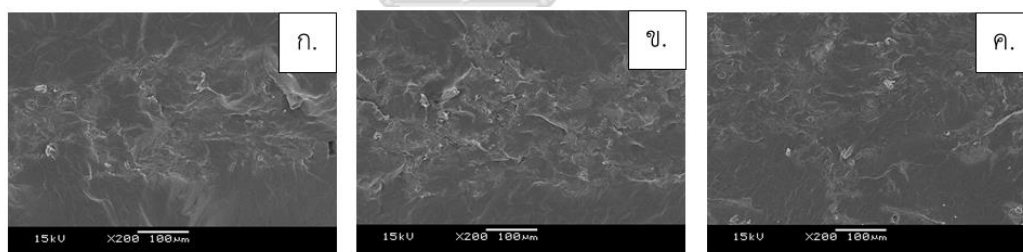
รูปที่ 4.9 ลักษณะทางกายภาพของแผ่นเซลล์โลสโปรงแสงที่เตรียมจากเรซินทางการค้า

แอโรเจล (มม.)	เรซินทางการค้าบริสุทธิ์	เซลล์โลสโปรงแสง	
		แอโรเจลเปียก	แอโรเจลแห้ง
0.3			
0.5			



4.4.2 สันฐานวิทยาของแผ่นเซลลูโลสโปร่งแสง

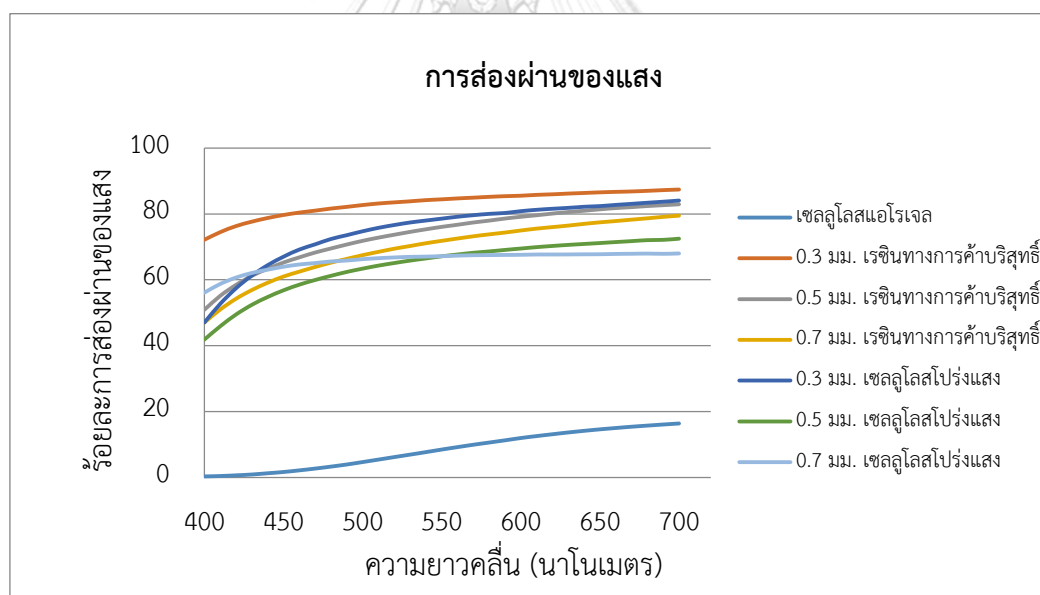
การเตรียมแผ่นเซลลูโลสโปร่งแสงโดยการเติมเรซินทางการค้าลงไปบนแผ่นแอโรเจลเปียกแล้วตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 6 วัน เพื่อให้ น้ำระเหยออกจนหมดแล้วเรซินทางการค้าจะเข้าไปแทนที่น้ำในรูพรุนอย่างสมบูรณ์ จะได้แผ่นเซลลูโลสโปร่งแสงออกมา ยืนยันผลด้วยสันฐานวิทยา ด้วยการส่องภาคตัดขวางของแผ่นเซลลูโลสโปร่งแสง ที่กำลังขยาย 200 เท่า ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าเรซินทางการค้าแทรกอยู่ระหว่างช่องว่างเซลลูโลสทำให้วัสดุกลายเป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้แสงเดินทางเป็นเส้นตรงไม่เกิดการหักเห ส่งผลให้วัสดุโปร่งแสง แต่เนื่องจากเรซินทางการค้ามีความสามารถในการคงรูปเมื่อได้รับความร้อนต่ำ และมีค่าเปอร์เซ็นต์ solid content สูงถึง 40 เปอร์เซ็นต์ ทำให้เมื่อเวลาได้รับความร้อนจากการอบ หรือจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ทำให้เรซินหลอมจนไปบดบังเส้นใยแสดงดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ภาพตัดขวางของแผ่นเซลลูโลสโปร่งแสงที่เตรียมจากแผ่นแอโรเจลที่มีความหนา 0.3 มม. (ก), 0.5 มม. (ข), 0.7 มม. (ค) ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 200 เท่า

4.4.3 สมบัติการส่องผ่านของแสง

จากผลการทดสอบร้อยละการส่องผ่านของแสงที่ความยาวคลื่น 400 – 700 นาโนเมตร แสดงดังรูปที่ 4.11 พบว่าเซลลูโลสแอรเจลแสงส่องผ่านร้อยละ 8.24 และแผ่นเซลลูโลสโปร่งแสงที่เตรียมจากแผ่นแอรเจลที่มีความหนา 0.3 มม. แทนที่น้ำในรูปพูนด้วยเรซินทางการค้าปริมาตร 40 มล. พบว่ามีการส่องผ่านของแสงร้อยละ 74.93 เรซินทางการค้าบริสุทธิ์มีการส่องผ่านของแสงร้อยละ 83.15 แผ่นเซลลูโลสโปร่งแสงที่เตรียมจากแผ่นแอรเจลที่มีความหนา 0.5 มม. แทนที่น้ำในรูปพูนด้วยเรซินทางการค้าปริมาตร 60 มล. พบว่ามีการส่องผ่านของแสงร้อยละ 64.23 เรซินทางการค้าบริสุทธิ์มีการส่องผ่านของแสงร้อยละ 73.48 และแผ่นเซลลูโลสโปร่งแสงที่เตรียมจากแผ่นแอรเจลที่มีความหนา 0.7 มม. แทนที่น้ำในรูปพูนด้วยเรซินทางการค้าปริมาตร 80 มล. มีการส่องผ่านของแสงร้อยละ 65.87 เรซินทางการค้าบริสุทธิ์มีการส่องผ่านของแสงร้อยละ 69.36 ซึ่งจากข้อมูลข้างต้นแสดงให้เห็นว่าแผ่นเซลลูโลสโปร่งแสงมีร้อยละการส่องผ่านของแสงใกล้เคียงกับเรซินทางการค้าบริสุทธิ์และยืนยันได้ว่าเรซินทางการค้าเข้าไปแทนที่น้ำในรูปพูนของแอรเจลอย่างสมบูรณ์ทำให้วัสดุกลายเป็นเนื้อเดียวกัน ส่งผลให้แสงเดินทางเป็นเส้นตรงไม่เกิดการหักเห วัสดุจึงโปร่งแสง



รูปที่ 4.11 กราฟร้อยละการส่องผ่านของแสงของแผ่นเซลลูโลสแอรเจล เรซินทางการค้าบริสุทธิ์ และแผ่นเซลลูโลสโปร่งแสง

4.4.4 สภาพการนำความร้อน

จากผลการทดสอบการหาค่าการนำความร้อนโดยการวัดปริมาณความร้อนที่ไหลจากแหล่งกำเนิดความร้อนผ่านชิ้นงานไปยังตัวตรวจจับความร้อนของเรซินทางการค้าบริสุทธิ์และแผ่นเซลลูโลสโปร่งแสงที่เตรียมจากแอโรเจลเปียก ได้ผลดังตารางที่ 4.2 พบว่าแผ่นเซลลูโลสโปร่งแสงที่เตรียมจากแผ่นแอโรเจลที่มีความหนา 0.3 มม. แทนที่น้ำในรูปพูนด้วยเรซินทางการค้าปริมาตร 40 มล. มีค่าการนำความร้อน 0.022 วัตต์/เมตร·เคลวิน เรซินทางการค้าบริสุทธิ์มีค่าการนำความร้อน 0.023 วัตต์/เมตร·เคลวิน แผ่นเซลลูโลสโปร่งแสงที่เตรียมจากแผ่นแอโรเจลที่มีความหนา 0.5 มม. แทนที่น้ำในรูปพูนด้วยเรซินทางการค้าปริมาตร 60 มล. มีค่าการนำความร้อน 0.037 วัตต์/เมตร·เคลวิน เรซินทางการค้าบริสุทธิ์มีค่าการนำความร้อน 0.037 วัตต์/เมตร·เคลวิน และแผ่นเซลลูโลสโปร่งแสงที่เตรียมจากแผ่นแอโรเจลที่มีความหนา 0.7 มม. แทนที่น้ำในรูปพูนด้วยเรซินทางการค้าปริมาตร 80 มล. มีค่าการนำความร้อน 0.051 วัตต์/เมตร·เคลวิน เรซินทางการค้าบริสุทธิ์มีค่าการนำความร้อน 0.053 วัตต์/เมตร·เคลวิน จากข้อมูลตรงนี้แสดงให้เห็นว่าเรซินทางการค้าบริสุทธิ์มีค่าการนำความร้อนที่ต่ำ แต่เมื่อเป็นชิ้นงานคอมโพสิตที่มีส่วนประกอบของเส้นใย พบว่าแผ่นเซลลูโลสโปร่งแสงมีแนวโน้มของค่าการนำความร้อนลดลง แต่ปริมาณเส้นใยเซลลูโลสที่ใส่อาจมีปริมาณน้อยเกินไป ทำให้ไม่เห็นความแตกต่างของค่าการนำความร้อนที่ชัดเจน

ตารางที่ 4.2 สภาพการนำความร้อนของเรซินทางการค้าบริสุทธิ์และแผ่นเซลลูโลสโปร่งแสง

แอโรเจล (มม.)	เรซินทางการค้าบริสุทธิ์ (วัตต์/เมตร·เคลวิน)	เซลลูโลสโปร่งแสง (วัตต์/เมตร·เคลวิน)
0.3	0.023	0.022
0.5	0.037	0.037
0.7	0.053	0.051

4.4.5 สมบัติการขยายตัวเมื่อได้รับความร้อน

จากผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนหรือค่าความแตกต่างของความยาวของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป 1 องศาเซลเซียส เทียบกับความยาวเริ่มต้นของเรซินทางการค้าบริสุทธิ์และเซลลูลอสโปร่งแสง ด้วยเครื่อง Thermomechanical analyser (TMA) ช่วงอุณหภูมิ 30 – 120 องศาเซลเซียส แสดงดังตารางที่ 4.3 พบว่าแผ่นเซลลูลอสโปร่งแสงที่เตรียมจากแผ่นแอโรเจลที่มีความหนา 0.3 มม. แทนที่น้ำในรูปพูนด้วยเรซินทางการค้าปริมาตร 40 มล. พบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน $46.14 \text{ ppm} \cdot \text{K}^{-1}$ เรซินทางการค้าบริสุทธิ์มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน $129.41 \text{ ppm} \cdot \text{K}^{-1}$ แผ่นเซลลูลอสโปร่งแสงที่เตรียมจากแผ่นแอโรเจลที่มีความหนา 0.5 มม. แทนที่น้ำในรูปพูนด้วยเรซินทางการค้าปริมาตร 60 มล. พบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน $19.64 \text{ ppm} \cdot \text{K}^{-1}$ เรซินทางการค้าบริสุทธิ์มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน $126.56 \text{ ppm} \cdot \text{K}^{-1}$ และแผ่นเซลลูลอสโปร่งแสงที่เตรียมจากแผ่นแอโรเจลที่มีความหนา 0.7 มม. แทนที่น้ำในรูปพูนด้วยเรซินทางการค้าปริมาตร 80 มล. มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน $-60.36 \text{ ppm} \cdot \text{K}^{-1}$ เรซินทางการค้าบริสุทธิ์มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน $181.37 \text{ ppm} \cdot \text{K}^{-1}$ จากข้อมูลข้างต้นสรุปได้ว่า เรซินทางการค้าบริสุทธิ์มีการขยายตัวสูงเมื่อความร้อนเพิ่มขึ้น ตรงข้ามกับแผ่นเซลลูลอสโปร่งแสงมีการขยายตัวต่ำเมื่อความร้อนเพิ่มขึ้น เนื่องจากเซลลูลอสโปร่งแสงมีส่วนประกอบของเส้นใย โดยเส้นใยจะไปขัดขวางทำให้เรซินมีการขยายตัวได้น้อยลง และเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยกับเรซินพบว่าจะมีช่องว่างระหว่างเซลลูลอสและเรซินมากทำให้วัสดุเกิดการหดตัว และจากข้อมูลข้างต้นพบว่าอุณหภูมิที่ใช้ทดสอบคือ 30-120 องศาเซลเซียส (α_2) ซึ่งเป็นอุณหภูมิการใช้งานพบว่าเรซินทางการค้ามีค่า T_g ที่ต่ำมาก โดยที่อุณหภูมิห้องมีลักษณะคล้ายยางทำให้มีการขยายตัวและหดตัวสูงเมื่อได้รับความร้อน จึงไม่เหมาะแก่การนำมาใช้ทำวัสดุที่ต้องการความคงรูป

ตารางที่ 4.3 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของเรซินการค้าบริสุทธิ์และเซลลูลอสโปร่งแสง

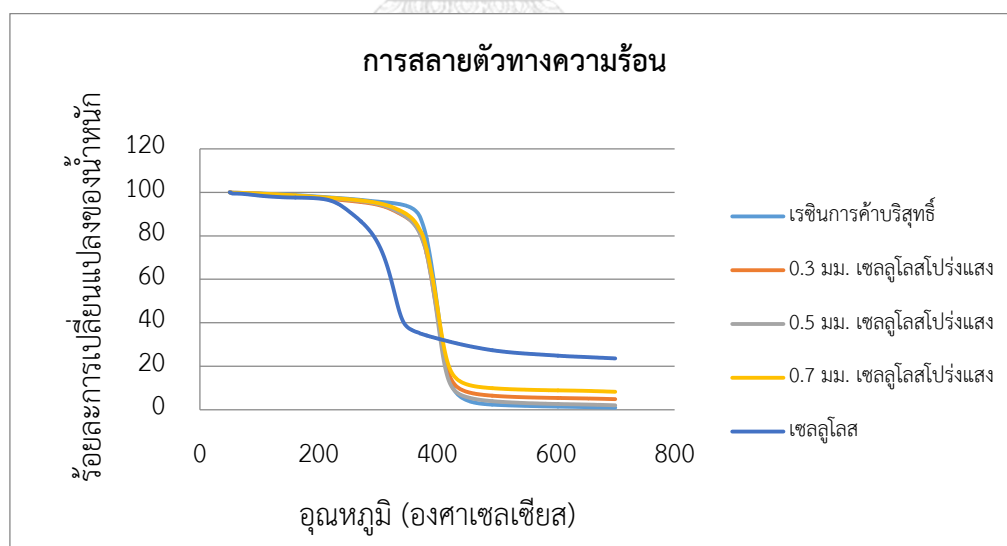
แอโรเจล (มม.)	เรซินทางการค้าบริสุทธิ์ ($\text{ppm} \cdot \text{K}^{-1}$)	เซลลูลอสโปร่งแสง ($\text{ppm} \cdot \text{K}^{-1}$)
0.3	129.41	46.14
0.5	126.56	19.64
0.7	181.37	-60.36

4.4.6 สมบัติการสลายตัวทางความร้อน

จากการศึกษาอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนด้วยเครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักภายใต้ความร้อน (TGA) โดยได้ทำการศึกษาอุณหภูมิที่สารเริ่มเกิดการสลายตัว (T_{onset}) อุณหภูมิที่สารสลายตัวได้มากที่สุด (peak) และอุณหภูมิสุดท้ายที่สารเกิดการสลายตัว (T_{endset}) ของเรซินทางการค้าบริสุทธิ์และเซลลูโลสโปร่งแสงที่เตรียมจากแผ่นแอรโรเจลที่มีความหนา 0.3 มม., 0.5 มม., และ 0.7 มม. ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.12 จากผลการทดลอง พบว่าเรซินทางการค้าบริสุทธิ์จะมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักสองช่วง ช่วงแรกจะเป็นอุณหภูมิที่เกิดการสลายตัวของน้ำ ซึ่งมีอุณหภูมิที่เริ่มต้นสลายตัวที่ 55.9 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่เกิดการสลายตัวสูงสุดคือ 60.5 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิที่เกิดการสลายตัวสุดท้ายคือ 82.1 องศาเซลเซียส การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักช่วงที่สอง อุณหภูมิที่เริ่มต้นสลายตัวคือ 366.4 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่สารสลายตัวได้มากที่สุดคือ 404.2 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิสุดท้ายที่เกิดการสลายตัว 433.3 องศาเซลเซียส สำหรับเซลลูโลสโปร่งแสงที่เตรียมจากแผ่นแอรโรเจลที่มีความหนา 0.3 มม. จะมีช่วงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิสองช่วงคือ ช่วงแรกจะเป็นการสลายตัวของน้ำซึ่งมีอุณหภูมิที่เริ่มต้นสลายตัวที่ 55.8 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่เกิดการสลายตัวสูงสุดคือ 60.5 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิที่เกิดการสลายตัวสุดท้ายคือ 80.7 องศาเซลเซียส การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักช่วงที่สองอุณหภูมิที่เริ่มต้นสลายตัวคือ 366.6 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่สารสลายตัวได้มากที่สุดคือ 405.1 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิสุดท้ายที่เกิดการสลายตัว 433.2 องศาเซลเซียส สำหรับเซลลูโลสโปร่งแสงที่เตรียมจากแผ่นแอรโรเจลที่มีความหนา 0.5 มม. จะมีช่วงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิสองช่วงคือ ช่วงแรกจะเป็นการสลายตัวของน้ำซึ่งมีอุณหภูมิที่เริ่มต้นสลายตัวที่ 55.9 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่เกิดการสลายตัวสูงสุดคือ 60.6 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิที่เกิดการสลายตัวสุดท้ายคือ 78.5 องศาเซลเซียส การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักช่วงที่สอง อุณหภูมิที่เริ่มต้นสลายตัวคือ 367.9 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่สารสลายตัวได้มากที่สุดคือ 403.9 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิสุดท้ายที่เกิดการสลายตัว 430.8 องศาเซลเซียส สำหรับเซลลูโลสโปร่งแสงที่เตรียมจากแผ่นแอรโรเจลที่มีความหนา 0.7 มิลลิเมตร จะมีช่วงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิสองช่วงคือ ช่วงแรกจะเป็นการสลายตัวของน้ำซึ่งมีอุณหภูมิที่เริ่มต้นสลายตัวที่ 55.9 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่สารเกิดการสลายตัวสูงสุดคือ 60.7 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิที่สารเกิดการสลายตัวสุดท้ายคือ 79.1 องศาเซลเซียส การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักช่วงที่สองอุณหภูมิที่เริ่มต้นสลายตัวคือ 368.2 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่สารสลายตัวได้มากที่สุดคือ 404.9 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิสุดท้ายที่เกิดการสลายตัว 433.6 องศาเซลเซียส จากข้อมูลข้างต้นแสดงให้เห็นว่า เนื่องจากเรซินทางการค้ามีเปอร์เซ็นต์ solid content ที่สูง (40%) ทำให้เห็นการสลายตัวของเรซินทางการค้าได้ชัดเจนกว่าการสลายตัวของเซลลูโลส

ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของเซลลูโลสบริสุทธิ์ เรซินทางการค้าบริสุทธิ์ และแผ่นเซลลูโลสโปร่งแสง

ตัวอย่าง	การสลายตัวครั้งที่ 1			การสลายตัวครั้งที่ 2		
	T _{onset}	peak	T _{endset}	T _{onset}	peak	T _{endset}
เซลลูโลส	62.7	88.1	89.1	302.3	339.3	364.8
เรซินทางการค้า	55.9	60.5	82.1	366.4	404.2	433.3
เซลลูโลสโปร่งแสง แอโรเจลหนา 0.3 มม.	55.8	60.5	80.7	366.6	405.1	433.2
เซลลูโลสโปร่งแสง แอโรเจลหนา 0.5 มม.	55.9	60.6	78.5	367.9	403.9	430.8
เซลลูโลสโปร่งแสง แอโรเจลหนา 0.7 มม.	55.9	60.7	79.1	368.2	404.9	433.6

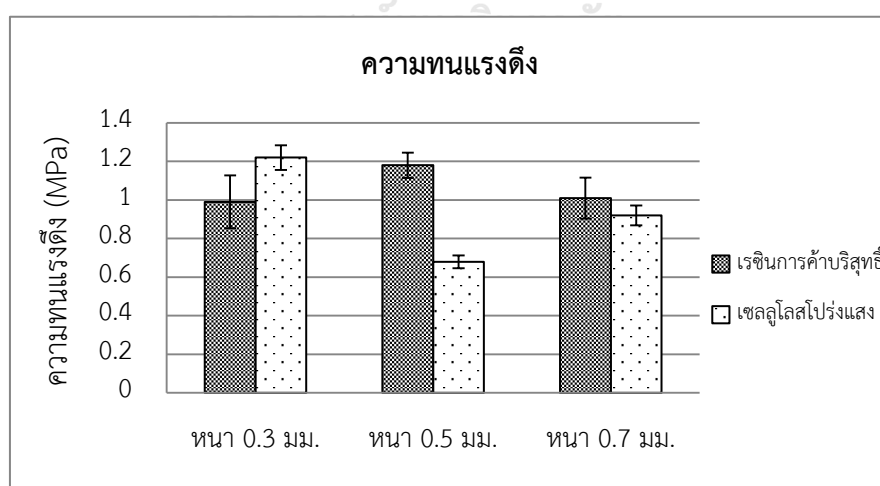


รูปที่ 4.12 กราฟร้อยละการสลายตัวเมื่อได้รับความร้อนของเรซินทางการค้าบริสุทธิ์ แผ่นเซลลูโลสโปร่งแสง และเซลลูโลสบริสุทธิ์

4.4.7 สมบัติเชิงกล

4.4.7.1 ความทนแรงดึง (Tensile strength)

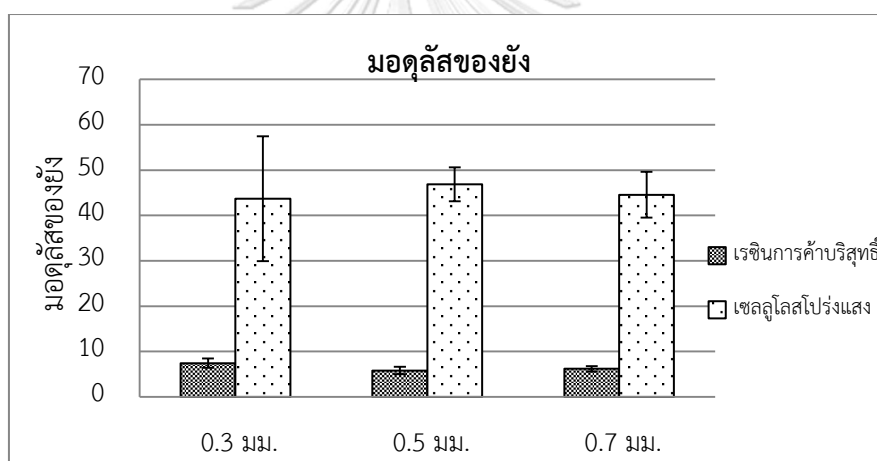
จากผลการทดสอบการทนแรงดึงของชิ้นงานเรซินทางการค้าบริสุทธิ์กับเซลลูโลสโปร่งแสงที่เตรียมจากแผ่นแอโรเจลที่มีความหนา 0.3 มม., 0.5 มม., 0.7 มม. และแทนที่น้ำในรูพรุนด้วยเรซินทางการค้า 40 มล., 60 มล., 80 มล. ตามลำดับ ได้ผลดังรูปที่ 4.13 พบว่าแผ่นเซลลูโลสโปร่งแสงที่เตรียมจากแผ่นแอโรเจลที่มีความหนา 0.3 มม. แทนที่น้ำในรูพรุนด้วยเรซินทางการค้าปริมาตร 40 มล. พบว่ามีความทนต่อแรงดึง 1.22 MPa เรซินทางการค้าบริสุทธิ์มีความทนต่อแรงดึง 0.99 MPa แผ่นเซลลูโลสโปร่งแสงที่เตรียมจากแผ่นแอโรเจลที่มีความหนา 0.5 มม. แทนที่น้ำในรูพรุนด้วยเรซินทางการค้าปริมาตร 60 มล. พบว่ามีความทนต่อแรงดึง 0.68 MPa เรซินทางการค้าบริสุทธิ์มีความทนต่อแรงดึง 1.17 MPa และแผ่นเซลลูโลสโปร่งแสงที่เตรียมจากแผ่นแอโรเจลที่มีความหนา 0.7 มม. แทนที่น้ำในรูพรุนด้วยเรซินทางการค้าปริมาตร 80 มล. พบว่ามีความทนต่อแรงดึง 0.91 MPa เรซินทางการค้ามีความทนต่อแรงดึง 1.00 MPa จากข้อมูลข้างต้นพบว่าสมบัติความทนแรงดึงของชิ้นงานเซลลูโลสโปร่งแสงที่เตรียมจากแผ่นแอโรเจลที่มีความหนา 0.3 มม. มีความทนแรงดึงสูงกว่าเรซินทางการค้าบริสุทธิ์ เนื่องจากเส้นใยที่สไล่งไปจะส่งผลให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงขึ้น มีความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปร่างมากขึ้น แต่แผ่นโปร่งแสงที่เตรียมจากแผ่นแอโรเจลที่มีความหนา 0.5 มม. กับ 0.7 มม. พบว่ามีความสามารถในการทนแรงดึงต่ำกว่าเรซินทางการค้าบริสุทธิ์ เนื่องจากบริเวณที่เกิดการขาด อาจเป็นบริเวณรอยต่อระหว่างเซลลูโลสกับเรซินซึ่งความสามารถในการยึดเกาะกันระหว่างเรซินกับเซลลูโลสอาจไม่ดีเท่ากับเรซินยึดเกาะกันเอง ทำให้เกิดการ defect



รูปที่ 4.13 กราฟความทนแรงดึงของเรซินทางการค้าบริสุทธิ์และเซลลูโลสโปร่งแสง

4.4.7.2 มอดุลัสของยัง (Young's modulus)

จากผลการวิเคราะห์มอดุลัสของยังหรือความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเรซินทางการค้าบริสุทธิ์กับเซลลูโลสโปร่งแสงที่เตรียมจากแผ่นแอโรเจลที่มีความหนา 0.3 มม., 0.5 มม., 0.7 มม. และแทนที่น้ำในรูพรุนด้วยเรซินทางการค้า 40 มล., 60 มล., 80 มล. ตามลำดับ ได้ผลดังรูปที่ 4.14 พบว่าค่ามอดุลัสของยังของแผ่นโปร่งแสงที่เตรียมจากแผ่นแอโรเจลหนา 0.3 มม. มีค่ามอดุลัสของยัง 43.71 MPa เรซินทางการค้าบริสุทธิ์มีค่ามอดุลัสของยัง 7.43 MPa แผ่นโปร่งแสงที่เตรียมจากแผ่นแอโรเจลหนาที่มีความหนา 0.5 มม. มีค่ามอดุลัสของยัง 46.87 MPa เรซินทางการค้าบริสุทธิ์มีค่ามอดุลัสของยัง 5.80 MPa และแผ่นโปร่งแสงที่เตรียมจากแผ่นแอโรเจลที่มีความหนา 0.7 มม. มีค่ามอดุลัสของยัง 44.56 MPa เรซินทางการค้าบริสุทธิ์มีค่ามอดุลัสของยัง 6.20 MPa จากข้อมูลข้างต้นสรุปได้ว่าเซลลูโลสโปร่งแสงมีค่ามอดุลัสสูงกว่าเรซินทางการค้าบริสุทธิ์อย่างชัดเจน เนื่องจากเซลลูโลสที่ใส่ลงไปมีผลทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ยากขึ้น

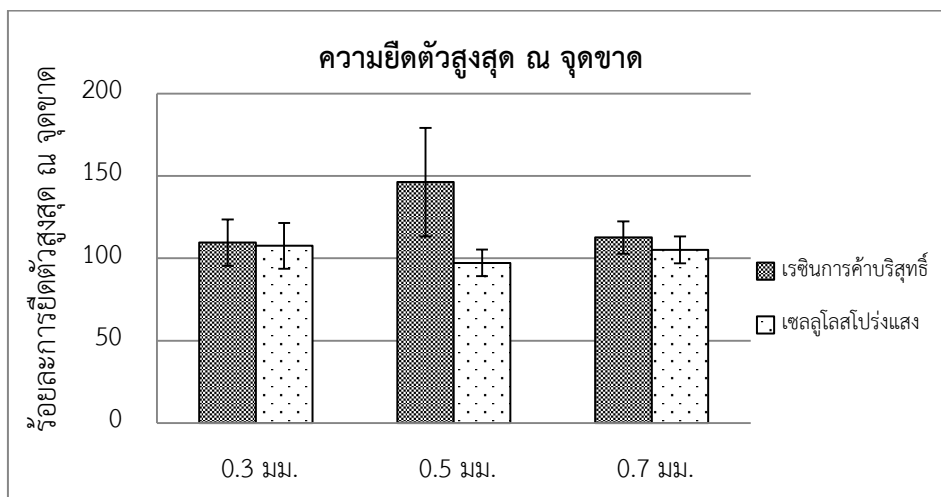


รูปที่ 4.14 กราฟมอดุลัสของยังของเรซินทางการค้าบริสุทธิ์และเซลลูโลสโปร่งแสง

4.4.7.3 ความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด (Elongation at break)

จากผลการวิเคราะห์ความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด ของชิ้นงานเรซินทางการค้าบริสุทธิ์และเซลลูโลสโปร่งแสงที่เตรียมจากแผ่นแอโรเจลที่มีความหนา 0.3 มม., 0.5 มม., 0.7 มม. และแทนที่น้ำในรูพรุนด้วยเรซินทางการค้า 40 มล., 60 มล., 80 มล. ตามลำดับ ได้ผลดังรูปที่ 4.15 พบว่าความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด ของแผ่นโปร่งแสงที่เตรียมจากแผ่นแอโรเจลที่มีความหนา 0.3 มม. มีค่าการยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด 107.55 MPa เรซินทางการค้าบริสุทธิ์มีค่าการยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด 109.49 MPa แผ่นโปร่งแสงที่เตรียมจากแผ่นแอโรเจลที่มีความหนา 0.5 มม. มีค่าการยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด 97.19 MPa เรซินทางการค้าบริสุทธิ์มีค่าการยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด 146.22 MPa และแผ่นโปร่งแสงที่เตรียมจากแผ่นแอโรเจลที่มีความหนา 0.7 มม. มีค่าการยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด 105.15 MPa เรซินทาง

การค้ำบริสุทธ์มีค่าการยึดตัวสูงสุด ณ จุดขาด 112.64 MPa จากข้อมูลข้างต้นสรุปได้ว่า เร
 ชินทางการค้ำบริสุทธ์มีค่าความยึดตัวสูงสุด ณ จุดขาด สูงกว่าเซลลูโลสโปร่งแสง แสดงให้เห็นว่า
 เซลลูโลสที่ใส่ลงไปส่งผลให้วัสดุเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ยากขึ้น



รูปที่ 4.15 กราฟความยึดตัวสูงสุด ณ จุดขาด ของเรชินทางการค้ำบริสุทธ์และเซลลูโลสโปร่งแสง










4.5 ผลการเตรียมเซลลูโลสโปร่งแสงจากอะคริลิกเรซิน

4.5.1 ลักษณะทางกายภาพ

นำแผ่นแอโรเจลเปียก และแผ่นแอโรเจลแห้งที่มีความหนา 0.3 มม., 0.5 มม., และ 0.7 มม. มาเติมอะคริลิกเรซินปริมาตร 40 มล., 60 มล., และ 80 มล. ตามลำดับ แล้วทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 6 วัน เพื่อให้อะคริลิกเรซินเข้าไปอยู่ในรูพรุนอย่างสมบูรณ์ จะได้แผ่นเซลลูโลสโปร่งแสงออกมา ดังรูปที่ 4.15 โดยในคอลัมน์ที่ 1 คืออะคริลิกเรซินที่มีปริมาณเรซินทางการค้ำ 20 มล., 30 มล., และ 40 มล. ตามลำดับ ส่วนคอลัมน์ที่ 2 เป็นแผ่นโปร่งแสงที่เตรียมจากการการแทนที่น้ำในรูพรุนของแผ่นแอโรเจลเปียกที่มีความหนา 0.3 มม., 0.5 มม., และ 0.7 มม. ด้วยอะคริลิกเรซิน 40 มล., 60 มล., และ 80 มล. ตามลำดับ พบว่ามีความโปร่งแสงใกล้เคียงกับอะคริลิกเรซินบริสุทธิ์ เนื่องจากอะคริลิกเรซินเข้าไปแทนที่น้ำในรูพรุนของเซลลูโลสแอโรเจลอย่างสมบูรณ์ ทำให้แสงเดินทางเป็นเส้นตรง ไม่เกิดการหักเห [38] วัสดุจึงโปร่งแสง และคอลัมน์ที่ 3 เป็นการเตรียมแผ่นโปร่งแสงจากแผ่นแอโรเจลแห้ง พบว่าเรซินไม่สามารถเข้าไปแทนที่อากาศในรูพรุนได้ทำให้วัสดุทึบแสง ซึ่งการเตรียมแผ่นโปร่งแสงจากแอโรเจลแห้งที่มีอากาศแทรกในรูพรุนจะต้องทำภายใต้แรงดันหรือต้องใช้เครื่องมือในการดูดอากาศจึงจะทำให้เรซินเข้าไปอยู่ในรูพรุนได้ แต่เนื่องจากในห้องปฏิบัติการของเราไม่มีเครื่องดูดอากาศ เราจึงทำการเตรียมแผ่นโปร่งแสงจากแผ่นแอโรเจลเปียกที่มีน้ำแทรกอยู่ในรูพรุนแทน เพราะ

เป็นวิธีที่ง่าย สะดวก และไม่ต้องใช้เครื่องมือที่มีราคาแพง และเมื่อความหนาของแผ่นโปรงแสงมากขึ้น ระยะทางที่แสงเดินทางก็จะมากขึ้นทำให้แสงเกิดการกระเจิงหรือหักเห [40]

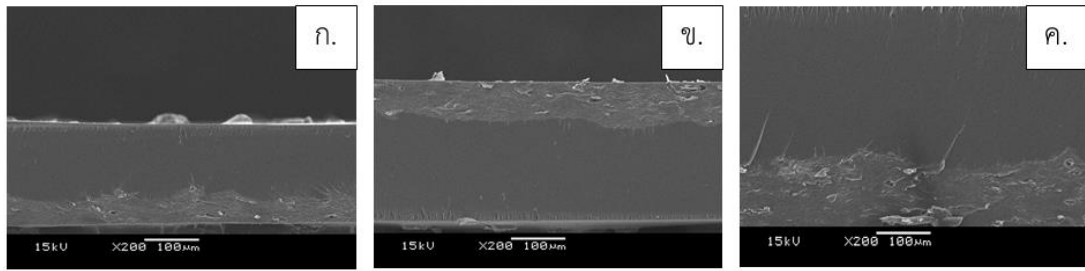
รูปที่ 4.16 ลักษณะทางกายภาพของเซลลูโลสโปรงแสงที่เตรียมจากอะคริลิกเรซิน

แอร์เจล (มม.)	อะคริลิกเรซินบริสุทธิ์	เซลลูโลสโปรงแสง	
		แอร์เจลเปียก	แอร์เจลแห้ง
0.3			
0.5			
0.7			

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.5.2 สัณฐานวิทยาของเซลลูโลสโปรงแสง

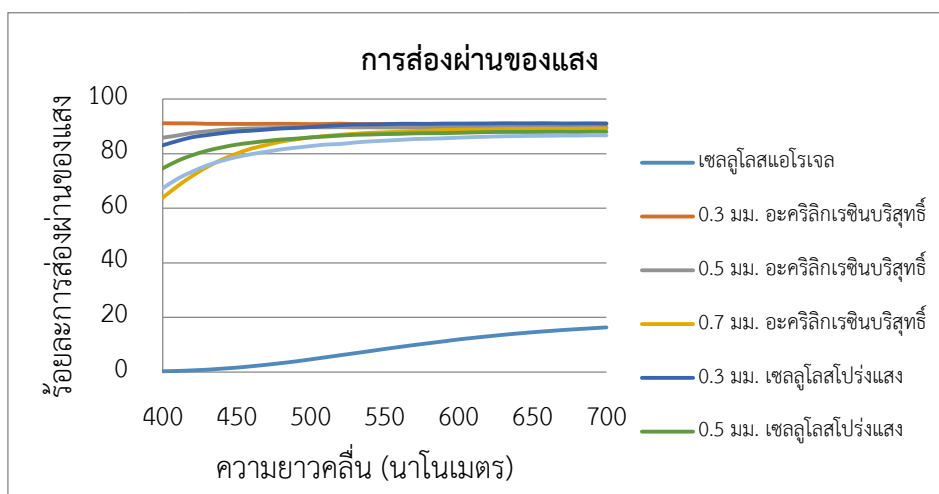
การเตรียมเซลลูโลสโปรงแสงโดยการเติมอะคริลิกเรซินลงไปบนแอร์เจลเปียก แล้วตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 6 วัน เพื่อให้น้ำระเหยออกจนหมดแล้วอะคริลิกเรซินจะเข้าไปแทนที่น้ำในรูพรุนอย่างสมบูรณ์ทำให้ได้แผ่นโปรงแสงออกมา ยืนยันผลด้วยการทดสอบการส่องภาคตัดขวางของแผ่นโปรงแสง ที่กำลังขยาย 200 เท่า ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าอะคริลิกเรซินแทรกอยู่ระหว่างช่องว่างของเซลลูโลสทำให้วัสดุกลายเป็นเนื้อเดียวกันและอะคริลิกเรซินส่วนที่เหลือจะไปเคลือบบนผิวของเซลลูโลสแอร์เจล และเนื่องจากอะคริลิกเรซินมีความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อได้รับความร้อนสูง ทำให้มองเห็นการแยกชั้นของเซลลูโลสแอร์เจลกับอะคริลิกเรซินอย่างชัดเจน ดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 ภาพตัดขวางของเซลลูโลสโปรงแสงที่เตรียมจากแผ่นแอโรเจล 0.3 มม. (ก), 0.5 มม. (ข), 0.7 มม. (ค) ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 200 เท่า

4.5.3 สมบัติการส่องผ่านของแสง

ผลการทดสอบค่าการส่องผ่านของแสงที่ความยาวคลื่น 400 – 700 นาโนเมตร แสดงดังรูปที่ 4.18 พบว่าเซลลูโลสแอโรเจลแสงส่องผ่านร้อยละ 8.24 เซลลูโลสโปรงแสงที่เตรียมจากแผ่นแอโรเจลที่มีความหนา 0.3 มม. แทนที่น้ำในรูพรุนด้วยอะคริลิกเรซิน 40 มล. มีการส่องผ่านของแสง ร้อยละ 89.71 อะคริลิกเรซินบริสุทธิ์มีการส่องผ่านของแสงร้อยละ 90.97 เซลลูโลสโปรงแสงที่เตรียมจากแผ่นแอโรเจลที่มีความหนา 0.5 มม. แทนที่น้ำในรูพรุนด้วยอะคริลิกเรซิน 60 มล. มีการส่องผ่านของแสงร้อยละ 85.65 อะคริลิกเรซินบริสุทธิ์มีการส่องผ่านของแสงร้อยละ 89.25 และเซลลูโลสโปรงแสงที่เตรียมจากแผ่นแอโรเจลที่มีความหนา 0.7 มม. แทนที่น้ำในรูพรุนด้วยอะคริลิกเรซิน 80 มล. มีการส่องผ่านของแสงร้อยละ 82.70 อะคริลิกเรซินบริสุทธิ์มีการส่องผ่านของแสงร้อยละ 84.75 เซลลูโลสโปรงแสง จากข้อมูลข้างต้นสรุปได้ว่า อะคริลิกเรซินบริสุทธิ์และเซลลูโลสโปรงแสงมีร้อยละการส่องผ่านของแสงใกล้เคียงกัน เนื่องจากอะคริลิกเรซินเข้าไปแทนที่น้ำในรูพรุนอย่างสมบูรณ์วัสดุจึงกลายเป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้แสงเดินทางเป็นเส้นตรง ไม่เกิดการหักเห วัสดุจึงโปร่งแสง



รูปที่ 4.18 กราฟร้อยละการส่องผ่านของแสงของเซลลูโลสแอโรเจล อะคริลิกเรซินบริสุทธิ์ และเซลลูโลสโปรงแสง

4.5.4 สภาพการนำความร้อน

จากผลการทดสอบการหาค่าสภาพการนำความร้อนโดยวัดปริมาณความร้อนจากแหล่งกำเนิดความร้อนผ่านตัวอย่างไปยังอุปกรณ์ตรวจจับความร้อนของอะคริลิกเรซินบริสุทธิ์และแผ่นโปร่งแสงที่เตรียมจากแผ่นแอโรเจลที่มีความหนา 0.3 มม., 0.5 มม., 0.7 มม. โดยแทนที่น้ำในรูปพูนด้วยอะคริลิกเรซิน 40 มล., 60 มล., 80 มล. ตามลำดับ ได้ผลดังตารางที่ 4.5 พบว่าแผ่นโปร่งแสงที่เตรียมจากแผ่นแอโรเจลที่มีความหนา 0.3 มม. มีค่าการนำความร้อน 0.022 วัตต์/เมตร·เคลวิน อะคริลิกเรซินบริสุทธิ์มีค่าการนำความร้อน 0.023 วัตต์/เมตร·เคลวิน แผ่นโปร่งแสงที่เตรียมจากแผ่นแอโรเจลที่มีความหนา 0.5 มิลลิเมตร มีค่าการนำความร้อน 0.037 วัตต์/เมตร·เคลวิน อะคริลิกเรซินบริสุทธิ์มีค่าการนำความร้อน 0.038 วัตต์/เมตร·เคลวิน และแผ่นโปร่งแสงที่เตรียมจากแผ่นแอโรเจลที่มีความหนา 0.7 มิลลิเมตร มีค่าการนำความร้อน 0.053 วัตต์/เมตร·เคลวิน อะคริลิกเรซินบริสุทธิ์มีค่าการนำความร้อน 0.054 วัตต์/เมตร·เคลวิน จากข้อมูลข้างต้นแสดงให้เห็นว่าอะคริลิกเรซินบริสุทธิ์มีค่าการนำความร้อนที่ต่ำ แต่เมื่อเป็นชิ้นงานคอมโพสิตที่มีส่วนประกอบของเซลลูโลส พบว่าเซลลูโลสโปร่งแสงมีค่าการนำความร้อนลดลงแต่ปริมาณเส้นใยที่ใส่อาจมีปริมาณที่น้อยเกินไปทำให้ค่าที่ได้มีความแตกต่างไม่ชัดเจน

ตารางที่ 4.5 ค่าการนำความร้อนของอะคริลิกเรซินบริสุทธิ์และเซลลูโลสโปร่งแสง

แอโรเจล (มม.)	อะคริลิกเรซินบริสุทธิ์ (วัตต์/เมตร·เคลวิน)	เซลลูโลสโปร่งแสง (วัตต์/เมตร·เคลวิน)
0.3	0.023	0.022
0.5	0.038	0.037
0.7	0.054	0.053

4.5.5 สมบัติการขยายตัวเมื่อได้รับความร้อน

จากผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนหรือค่าความแตกต่างของความยาวของชิ้นงานที่เปลี่ยนไปเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป 1 องศาเซลเซียส เทียบกับความยาวเริ่มต้น ของอะคริลิกเรซินบริสุทธิ์และเซลลูโลสโปร่งแสงที่เตรียมจากแผ่นแอโรเจลที่มีความหนา 0.3 มม., 0.5 มม., 0.7 มม. แทนที่น้ำในรูปพูนด้วยอะคริลิกเรซินปริมาตร 40 มล. 60 มล. และ 80 มล. ตามลำดับ จากนั้นนำมาวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน ด้วยเครื่อง

Thermomechanical analyser (TMA) ช่วงอุณหภูมิ 30 – 120 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิ ก่อน Tg (α_1) แสดงดังตารางที่ 4.6 พบว่าแผ่นเซลลูโลสโปร่งแสงที่เตรียมจากแผ่นแอโรเจลที่มีความหนา 0.3 มม. มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน $15.95 \text{ ppm} \cdot \text{K}^{-1}$ อะคริลิกเรซินบริสุทธิ์มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน $20.65 \text{ ppm} \cdot \text{K}^{-1}$ แผ่นเซลลูโลสโปร่งแสงที่เตรียมจากแอโรเจลที่มีความหนา 0.5 มม. มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน $11.10 \text{ ppm} \cdot \text{K}^{-1}$ อะคริลิกเรซินบริสุทธิ์มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน $67.20 \text{ ppm} \cdot \text{K}^{-1}$ และแผ่นเซลลูโลสโปร่งแสงที่เตรียมจากแอโรเจลที่มีความหนา 0.7 มม. มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน $-75.68 \text{ ppm} \cdot \text{K}^{-1}$ อะคริลิกเรซินบริสุทธิ์มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน $80.45 \text{ ppm} \cdot \text{K}^{-1}$ จากข้อมูลข้างต้นสรุปได้ว่า อะคริลิกเรซินบริสุทธิ์มีการขยายตัวสูงเมื่อความร้อนเพิ่มขึ้น ตรงข้ามกับแผ่นเซลลูโลสโปร่งแสงมีการขยายตัวต่ำเมื่อความร้อนเพิ่มขึ้น เนื่องจากเซลลูโลสโปร่งแสงเป็นชิ้นงานคอมพอสิตที่มีความแข็งแรง ทำให้เส้นใยจะไปขัดขวางการขยายตัวของเรซินส่งผลให้วัสดุขยายตัวได้ต่ำ แต่เมื่อปริมาณเส้นใยและเรซินเพิ่มขึ้นพบว่าชิ้นงานมีการหดตัวเนื่องจากมีช่องว่างระหว่างเรซินและเซลลูโลสมาก แต่เมื่อเปรียบเทียบกับเรซินทางการค้าพบว่าอะคริลิกเรซิน มีความสามารถในการคงรูปเมื่อได้รับความร้อนสูงกว่าเรซินทางการค้าอย่างชัดเจน

ตารางที่ 4.6 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของอะคริลิกเรซินบริสุทธิ์และเซลลูโลสโปร่งแสง

แผ่นแอโรเจล (มม.)	อะคริลิกเรซินบริสุทธิ์ ($\text{ppm} \cdot \text{K}^{-1}$)	เซลลูโลสโปร่งแสง ($\text{ppm} \cdot \text{K}^{-1}$)
0.3	20.65	15.95
0.5	67.20	11.10
0.7	80.45	-75.68

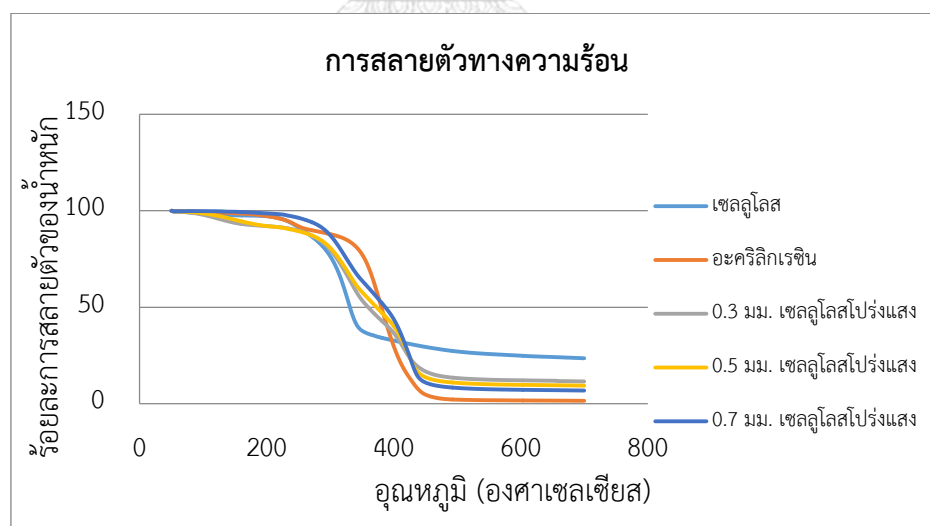
4.5.6 สมบัติการสลายตัวทางความร้อน

จากการศึกษาอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนด้วยเครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักภายใต้ความร้อน (TGA) โดยได้ทำการศึกษาอุณหภูมิที่สารเริ่มเกิดการสลายตัว (T_{onset}) อุณหภูมิที่สารสลายตัวมากที่สุด (peak) และอุณหภูมิสุดท้ายที่สารเกิดการสลายตัว (T_{endset}) ของอะคริลิกเรซินบริสุทธิ์ และเซลลูโลสโปร่งแสงที่เตรียมจากแผ่นแอโรเจลที่มีความหนา 0.3 มม., 0.5 มม., และ 0.7 มม. ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 4.7 จากผลการทดลองพบว่าเซลลูโลสโปร่งแสงที่เตรียมจากแผ่นแอ

โรเจลที่มีความหนา 0.3 มิลลิเมตร จะมีช่วงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิสองช่วงคือ ช่วงแรกอุณหภูมิที่สารเริ่มสลายตัวคือ 276.8 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่สารเกิดการสลายตัวสูงสุดคือ 331.3 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิสุดท้ายที่สารสลายตัวคือ 361.7 องศาเซลเซียส การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักช่วงที่สองอุณหภูมิที่สารเริ่มสลายตัวคือ 389.9 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่สารสลายตัวได้มากที่สุดคือ 418.9 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิสุดท้ายที่สารเกิดการสลายตัวคือ 445.4 องศาเซลเซียส สำหรับเซลลูโลสโปร่งแสงที่เตรียมจากแผ่นแอโรเจลที่มีความหนา 0.5 มิลลิเมตร จะมีช่วงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิสองช่วงคือ ช่วงแรกสารจะเริ่มสลายตัวที่ 280.9 องศาเซลเซียส ช่วงที่สารเกิดการสลายตัวสูงสุดคือ 328.3 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิสุดท้ายที่สารสลายตัวคือ 356.6 องศาเซลเซียส การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักช่วงที่สอง อุณหภูมิที่สารเริ่มสลายตัวคือ 392.8 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่สารสลายตัวได้มากที่สุดคือ 426.7 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิสุดท้ายที่เกิดการสลายตัว 445.8 องศาเซลเซียส เซลลูโลสโปร่งแสงที่เตรียมจากแผ่นแอโรเจลที่มีความหนา 0.7 มิลลิเมตร จะมีช่วงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิสองช่วง ช่วงแรกอุณหภูมิที่สารเริ่มสลายตัวคือ 281.8 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่สารเกิดการสลายตัวสูงสุดคือ 321.8 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิที่สารเกิดการสลายตัวสุดท้ายคือ 355.1 องศาเซลเซียส การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักช่วงที่สอง อุณหภูมิที่สารเริ่มสลายตัวคือ 391.1 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่สารสลายตัวสูงที่สุดคือ 428.4 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิสุดท้ายที่สารเกิดการสลายตัวคือ 447.2 องศาเซลเซียส จากข้อมูลข้างต้นสรุปได้ว่าช่วงอุณหภูมิ ที่ 30 – 200 องศาเซลเซียส เป็นช่วงการระเหยของน้ำ [4] และเซลลูโลสโปร่งแสงที่มีการสลายตัวสองช่วง โดยช่วงแรกจะเป็นการสลายตัวของเซลลูโลส (275 – 350 องศาเซลเซียส) [42] และช่วงที่สองจะเป็นการสลายตัวของอะคริลิกเรซินโดยอะคริลิกเรซินจะแบ่งการสลายตัวออกเป็นสองช่วง ช่วงแรกที่อุณหภูมิประมาณ 180 – 260 องศาเซลเซียส เป็นการสลายตัวของหมู่ห้อย และการสลายตัวช่วงที่สองที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสขึ้นไป เป็นการสลายตัวของโครงสร้างหลัก (back bone) [44, 45] นอกจากนี้ผลการทดสอบยังแสดงให้เห็นอีกว่าวัสดุโปร่งแสงที่เป็นคอมพอสิตจะมีอุณหภูมิการสลายตัวของอะคริลิกเรซินสูงกว่าอะคริลิกเรซินบริสุทธิ์ เนื่องจากเซลลูโลสที่ใส่ลงไปจะส่งผลให้อะคริลิกเรซินในวัสดุคอมพอสิตมีความแข็งแรงมากขึ้น ทำให้ที่อุณหภูมิต่างๆ โมเลกุลภายในไม่เกิดการเคลื่อนที่ทำให้ต้องใช้พลังงานความร้อนที่สูงขึ้นจนทำให้โมเลกุลภายในเกิดการเคลื่อนที่วัสดุจึงเกิดการสลายตัว และจากกราฟที่ 4.19 แสดงให้เห็นอีกว่าเซลลูโลสโปร่งแสงที่เตรียมจากแผ่นแอโรเจลที่มีความหนา 0.3 มม. ประกอบด้วย เซลลูโลส 35% อะคริลิกเรซิน 38% เซลลูโลสโปร่งแสงที่เตรียมจากแผ่นแอโรเจลที่มีความหนา 0.5 มม. ประกอบด้วยเซลลูโลส 33% อะคริลิกเรซิน 40% และเซลลูโลสโปร่งแสงที่เตรียมจากแผ่นแอโรเจลที่มีความหนา 0.7 มม. ประกอบด้วย เซลลูโลส 32% อะคริลิกเรซิน 43%

ตารางที่ 4.7 อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของเซลลูโลสบริสุทธิ์ อะคริลิกเรซินบริสุทธิ์ และเซลลูโลสโปร่งแสง

ตัวอย่าง	การสลายตัวครั้งที่ 1			การสลายตัวครั้งที่ 2		
	T _{onset} ^o	peak	T _{endset} ^o	T _{onset} ^o	peak	T _{endset} ^o
เซลลูโลส	302.3	339.3	364.8	-	-	-
อะคริลิกเรซิน	226.2	246.4	266.3	338.7	382.6	444.1
เซลลูโลสโปร่งแสง หนา 0.3 มม.	276.8	331.3	361.7	389.9	418.9	445.4
เซลลูโลสโปร่งแสง หนา 0.5 มม.	280.9	328.3	356.6	392.8	426.7	445.8
เซลลูโลสโปร่งแสง หนา 0.7 มม.	281.8	321.8	355.1	391.1	428.4	447.2

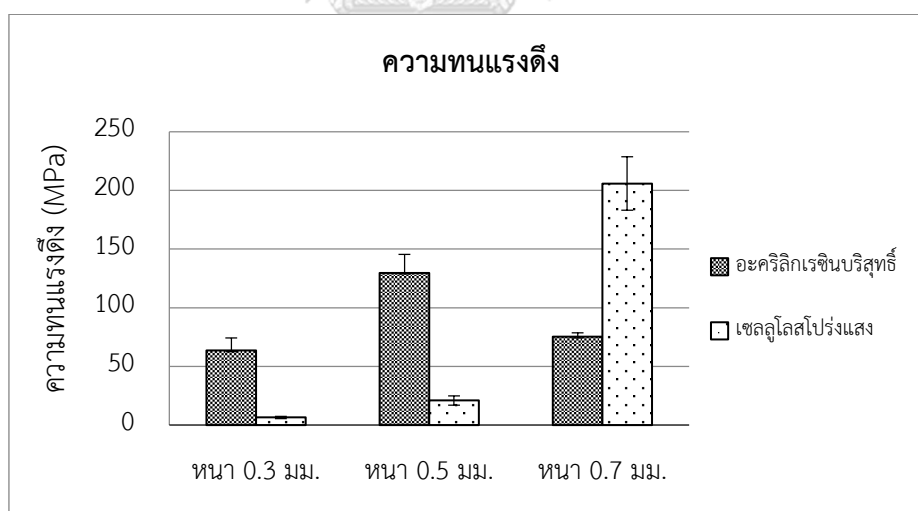


รูปที่ 4.19 กราฟร้อยละการสลายตัวเมื่อได้รับความร้อนของเซลลูโลสบริสุทธิ์ อะคริลิกเรซินบริสุทธิ์ และเซลลูโลสโปร่งแสง

4.5.7 สมบัติเชิงกล

4.5.7.1 ความทนแรงดึง (Tensile strength)

จากผลการทดสอบความทนแรงดึงของชิ้นงานอะคริลิกเรซินบริสุทธิ์กับเซลลูโลสโปร่งแสงที่เตรียมจากแผ่นแอโรเจลที่มีความหนา 0.3 มม., 0.5 มม., 0.7 มม. และแทนที่น้ำในรูปพูนด้วยอะคริลิกเรซินปริมาตร 40 มล., 60 มล., 80 มล. ตามลำดับ และทดสอบด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ ได้ผลดังรูปที่ 4.20 พบว่าแผ่นโปร่งแสงที่เตรียมจากเซลลูโลสแอโรเจลที่มีความหนา 0.3 มม. มีความทนต่อแรงดึง 6.5 MPa อะคริลิกเรซินบริสุทธิ์มีความทนต่อแรงดึง 63.52 MPa แผ่นโปร่งแสงที่เตรียมจากแอโรเจลที่มีความหนา 0.5 มม. มีความทนต่อแรงดึง 21 MPa อะคริลิกเรซินบริสุทธิ์มีความทนต่อแรงดึง 129.7 MPa และแผ่นโปร่งแสงที่เตรียมจากแอโรเจลที่มีความหนา 0.7 มม. มีความทนต่อแรงดึง 205.8 MPa อะคริลิกเรซินบริสุทธิ์มีความทนต่อแรงดึง 75.4 MPa จากข้อมูลข้างต้นสรุปได้ว่าที่ความหนา 0.7 มม. แผ่นโปร่งแสงที่มีส่วนประกอบของเส้นใยจะทำให้วัสดุมีความแข็งแรงขึ้นจึงมีความทนแรงดึงได้สูงกว่าอะคริลิกเรซินบริสุทธิ์ แต่ที่ความหนา 0.3 มม. กับ 0.5 มม. แผ่นโปร่งแสงมีความทนแรงดึงต่ำกว่าอะคริลิกเรซินบริสุทธิ์ เนื่องจากบริเวณที่เกิดการขาดอาจเป็นบริเวณรอยต่อของแอโรเจลกับอะคริลิกเรซิน ซึ่งแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะคริลิกเรซินกับแอโรเจลจะยึดกันไม่ดีเท่ากับอะคริลิกเรซินด้วยกันเองทำให้เกิดการ defect บริเวณรอยต่อนั้น

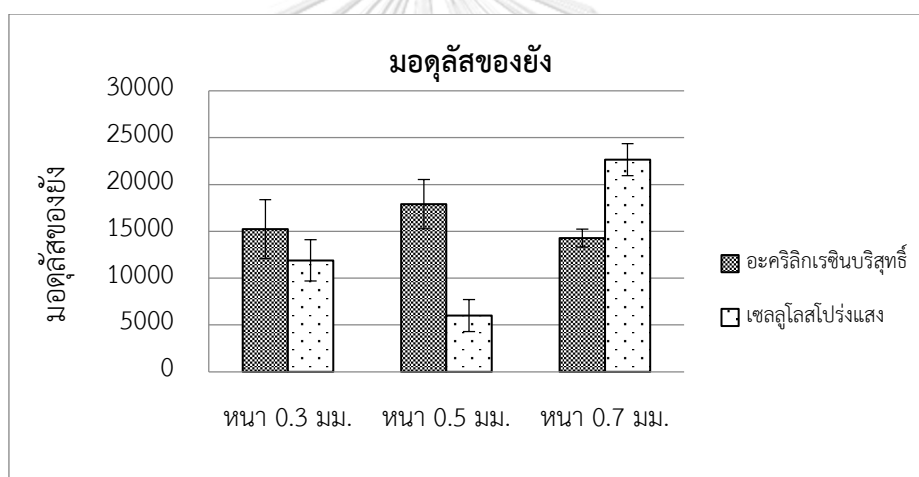


รูปที่ 4.20 กราฟความทนแรงดึงของอะคริลิกเรซินบริสุทธิ์และเซลลูโลสโปร่งแสง

4.5.7.2 มอดูลัสของยัง (Young's modulus)

จากผลการวิเคราะห์มอดูลัสของยังของอะคริลิกเรซินบริสุทธิ์กับเซลลูโลสโปร่งแสงที่เตรียมจากแผ่นแอโรเจลที่มีความหนา 0.3 มม., 0.5 มม., 0.7 มม. และแทนที่น้ำในรูปพูนด้วยอะคริลิกเรซินปริมาตร 40 มล., 60 มล. และ 80 มล. ตามลำดับ จากนั้นทดสอบด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์

ได้ผลดังรูปที่ 4.21 พบว่าค่ามอดูลัสของยังของแผ่นเซลลูโลสโปร่งแสงที่เตรียมจากแผ่นแอโรเจลที่มีความหนา 0.3 มม. มีค่ามอดูลัสของยัง 11904.4 MPa อะคริลิกเรซินบริสุทธิ์มีค่ามอดูลัสของยัง 15251 MPa แผ่นโปร่งแสงที่เตรียมจากแอโรเจลที่มีความหนา 0.5 มม. มีค่ามอดูลัสของยัง 6009.3 MPa อะคริลิกเรซินบริสุทธิ์มีค่ามอดูลัสของยัง 17911.7 MPa และแผ่นโปร่งแสงที่เตรียมจากแอโรเจลที่มีความหนา 0.7 มม. มีค่ามอดูลัสของยัง 22640.6 MPa อะคริลิกเรซินบริสุทธิ์มีค่ามอดูลัสของยัง 14278.4 MPa จากผลการทดลองข้างต้นสรุปได้ว่าที่ความหนา 0.7 มม. แผ่นโปร่งแสงที่มีส่วนประกอบของเส้นใยจะทำให้วัสดุมีความแข็งแรงขึ้นจึงมีความต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปร่างสูงกว่าอะคริลิกเรซินบริสุทธิ์ แต่ที่ความหนา 0.3 มม. กับ 0.5 มม. แผ่นโปร่งแสงมีความต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปร่างต่ำกว่าอะคริลิกเรซินบริสุทธิ์ เนื่องจากบริเวณที่เกิดการขาดอาจเป็นบริเวณรอยต่อของแอโรเจลกับอะคริลิกเรซิน ซึ่งแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะคริลิกเรซินกับแอโรเจลจะยึดกันไม่ดีเท่ากับอะคริลิกเรซินด้วยตัวเองทำให้เกิดการ defect บริเวณรอยต่อนั้น

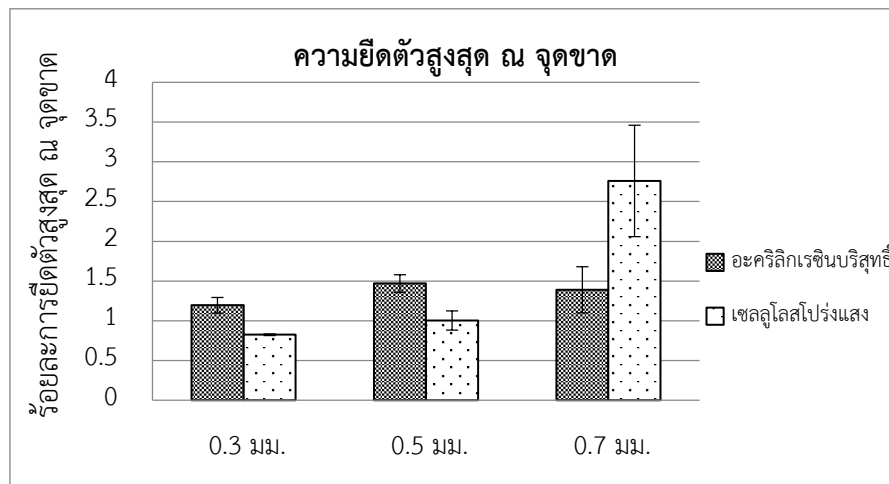


รูปที่ 4.21 กราฟค่า Young's Modulus ของอะคริลิกเรซินบริสุทธิ์และเซลลูโลสโปร่งแสง

4.5.7.3 ความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด (Elongation at break)

จากผลการวิเคราะห์ความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด ของชิ้นงานอะคริลิกเรซินบริสุทธิ์และเซลลูโลสโปร่งแสงที่เตรียมจากแผ่นแอโรเจลที่มีความหนา 0.3 มม., 0.5 มม., 0.7 มม. และแทนที่น้ำในรูปฟรอนด้วยอะคริลิกเรซินปริมาตร 40 มล., 60 มล., และ 80 มล. ตามลำดับ จากนั้นนำไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบเนกประสงค์ ได้ผลดังรูปที่ 4.22 พบว่าแผ่นโปร่งแสงที่เตรียมจากแอโรเจลที่มีความหนา 0.3 มม. มีค่าการยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด 0.8 MPa อะคริลิกเรซินบริสุทธิ์มีค่าการยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด 1.2 MPa แผ่นโปร่งแสงที่เตรียมจากแอโรเจลที่มีความหนา 0.5 มม. มีค่าการยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด 1.0 MPa อะคริลิกเรซินบริสุทธิ์มีค่าการยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด 1.5 MPa และแผ่นโปร่งแสงที่เตรียมจากแอโรเจลที่มีความหนา 0.7 มม. มีค่าการยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด 2.7 MPa

อะคริลิกเรซินบริสุทธิ์มีค่าการยึดตัวสูงสุด ณ จุดขาด 1.3 MPa จากข้อมูลข้างต้นสรุปได้ว่าแผ่นโปร่งแสงที่มีส่วนประกอบของแอโรเจลที่ความหนา 0.3 มม. กับ 0.5 มม. จะมีความสามารถในการยึดตัวต่ำกว่าอะคริลิกเรซินบริสุทธิ์ เนื่องจากบริเวณที่เกิดการขาดอาจเป็นบริเวณรอยต่อระหว่างแอโรเจลกับอะคริลิกเรซิน แต่ที่ความหนา 0.7 มม. พบว่าแผ่นโปร่งแสงมีความสามารถในการยึดตัวสูงสุด ณ จุดขาดสูงกว่าอะคริลิกเรซินบริสุทธิ์ เนื่องจากบริเวณที่เกิดการขาดของอะคริลิกเรซินบริสุทธิ์ อาจเป็นตำแหน่งที่มีฟองอากาศทำให้เกิด defect แต่ตำแหน่งที่เกิดการขาดของแผ่นโปร่งแสงอาจเป็นส่วนที่เรซินกับเซลล์โลสเข้ากันได้ดีทำให้มีความสามารถในการยึดตัวสูงสุด ณ จุดขาด ดีกว่านั่นเอง



รูปที่ 4.22 กราฟค่าการยึดตัวสูงสุด ณ จุดขาด ของอะคริลิกเรซินบริสุทธิ์และเซลล์โลสโปร่งแสง

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาวิธีการเตรียมเซลลูโลสโปร่งแสงจากแผ่นแอโรเจล โดยการแทนที่น้ำในรูพรุนด้วย อะคริลิกเรซินที่สังเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ และเรซินทางการค้า จากนั้นทำการศึกษาสมบัติทางด้าน ต่างๆ สรุปได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 ผลการสกัดเซลลูโลส

จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของผักตบชวา พบว่าผักตบชวามีปริมาณลิกนินที่สูงร้อยละ 12-14 และเมื่อนำมาทำการกำจัดสิ่งสกปรกและฟอกขาวด้วยการต้มในด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ และ แสงในสารฟอกขาว พบว่าเส้นใยผักตบชวาชวนขึ้นและปริมาณลิกนินลดลง เหลืออยู่ประมาณร้อยละ 0.46

5.1.2 ผลการสังเคราะห์อะคริลิกเรซิน

ผลการสังเคราะห์อะคริลิกเรซิน ด้วยการใส่ potassium persulphate (initiator) 0.1 g ละลายใน pva (20g/l) 100 ml แล้วเติม MMA 10 ml จากนั้นคนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็น เวลา 1 ชม. เพื่อให้เกิดปฏิกิริยา free radical polymerization พบว่าอะคริลิกเรซินที่เตรียมได้มี ลักษณะเป็นสารละลายหนืดสีฟ้าใสมีเปอร์เซ็นต์ solid content 6% เมื่อเปรียบเทียบกับเรซินทาง การค้าพบว่าเรซินทางการค้ามีสีขาวขุ่น (solid content 40%)

5.1.3 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อขนาดรูพรุนของแผ่นแอโรเจล

จากการศึกษาถึงปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อขนาดรูพรุนของแผ่นแอโรเจลพบว่า ปัจจัยแรกคือ จำนวนรอบการทำวัฏจักรแช่เยือกแข็ง/ละลาย(น้ำ) ยิ่งจำนวนการทำวัฏจักรแช่เยือกแข็ง/ละลาย มาก จะส่งผลให้รูพรุนมีขนาดใหญ่เนื่องจากน้ำแข็งที่ละลายแล้วอาจไหลไปรวมกับน้ำแข็งที่ยังไม่ละลาย และเมื่อนำไปทำการฟริชอีกรอบจะทำให้ก้อนน้ำแข็งมีขนาดใหญ่ขึ้นรูพรุนก็จะมีความใหญ่ขึ้นด้วย หรืออีกสาเหตุหนึ่งคือการที่นำแข็งที่ละลายแล้วไหลมารวมกันทำให้เป็นแอ่งน้ำขนาดใหญ่และเมื่อ นำไปฟริชจะทำให้ก้อนน้ำแข็งใหญ่ส่งผลให้รูพรุนมีขนาดใหญ่ ปัจจัยที่สอง คือ ความหนาของแผ่น แอโรเจล เมื่อแผ่นแอโรเจลมีความหนามากขึ้นจะส่งผลให้รูพรุนมีขนาดเล็กลงเนื่องจากเกิดการบดบัง ของเส้นใย

5.1.4 ผลการสังเคราะห์เซลล์โลสโปร่งแสง

จากการสังเคราะห์เซลล์โลสโปร่งแสงจากแอโรเจลเปียกโดยการแทนที่น้ำในรูพรุนด้วยเรซิน พบว่าเรซินเข้าไปแทนที่น้ำในรูพรุนอย่างสมบูรณ์ทำให้ได้แผ่นเซลล์โลสโปร่งแสงที่มีร้อยละการส่องผ่านของแสงใกล้เคียงกับเรซินบริสุทธิ์ แต่เมื่อทำการเตรียมแผ่นโปร่งแสงจากแอโรเจลแห้ง พบว่าเรซินไม่สามารถเข้าไปแทนที่อากาศได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งจะต้องทำภายใต้แรงดันหรือต้องมีเครื่องดูดอากาศ จึงจะสามารถทำให้เรซินเข้าไปแทนที่อากาศได้อย่างสมบูรณ์ แต่เนื่องจากในห้องปฏิบัติการของเราไม่มีเครื่องดูดอากาศ เราจึงทำการเตรียมแผ่นโปร่งแสงจากแอโรเจลเปียก เพราะเป็นวิธีที่ง่าย สะดวก และไม่ต้องใช้เครื่องมือที่มีราคาแพง และเมื่อความหนาของแผ่นเซลล์โลสโปร่งแสงมากขึ้น จะส่งผลให้แสงเกิดการกระเจิง หรือหักเหมากขึ้น วัสดุจึงดูขุ่นขึ้น

5.1.5 สมบัติการส่องผ่านของแสง

ผลการทดสอบการส่องผ่านของแสงที่ความยาวคลื่น 400 – 700 นาโนเมตร ยืนยันได้ว่าแผ่นโปร่งแสงที่เตรียมจากแอโรเจลเปียกโดยการแทนที่น้ำในรูพรุนด้วยเรซินพบว่ามีร้อยละการส่องผ่านของแสงใกล้เคียงกับเรซินบริสุทธิ์ เนื่องจากเรซินสามารถเข้าไปแทนที่น้ำในรูพรุนได้อย่างสมบูรณ์ ทำให้แสงไม่เกิดการหักเห วัสดุจึงโปร่งแสงนั่นเอง

5.1.6 สภาพการนำความร้อน

จากผลการทดสอบสภาพการนำความร้อนของแผ่นเซลล์โลสโปร่งแสงที่เตรียมจากการนำเรซินทางการค้า/อะคริลิกเรซินไปแทนที่น้ำในรูพรุน เปรียบเทียบกับเรซินบริสุทธิ์พบว่าแผ่นเซลล์โลสโปร่งแสงทั้งสองชนิดมีแนวโน้มของค่าการนำความร้อนที่ต่ำกว่าเรซินบริสุทธิ์ แต่เนื่องจากปริมาณเส้นใยที่ใส่ลงไปอาจมีปริมาณที่น้อยเกินไป ส่งผลให้ความแตกต่างของค่าการนำความร้อนไม่ชัดเจน

5.1.7 สมบัติการขยายตัวเมื่อได้รับความร้อน

จากผลการทดสอบสมบัติการขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนของเซลล์โลสโปร่งแสงที่เตรียมจากแอโรเจลโดยการแทนที่น้ำในรูพรุนด้วยเรซินทางการค้าและอะคริลิกเรซิน พบว่าเซลล์โลสโปร่งแสงทั้งสองชนิดมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนต่ำกว่าเรซินบริสุทธิ์ เนื่องจากชิ้นงานคอมพอสิตที่มีเส้นใยเป็นองค์ประกอบ เมื่อได้รับความร้อนเรซินจะเกิดการขยายตัวและไปติดกับโครงข่ายของเส้นใยทำให้เกิดการขยายตัวได้ต่ำ และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างเรซินทางการค้ากับอะคริลิกเรซินที่สังเคราะห์ในห้องปฏิบัติการพบว่าที่อุณหภูมิการใช้งานอะคริลิกเรซินมีความสามารถในการคงรูปได้ดีกว่าเรซินทางการค้า

5.1.8 สมบัติการสลายตัวทางความร้อน

จากผลการทดสอบสมบัติการสลายตัวทางความร้อนของแผ่นเซลลูโลสโปร่งแสงที่เตรียมจากเรซินทางการค้า พบว่ามีอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 400 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิการสลายตัวของเรซินทางการค้า เนื่องจากเรซินทางการค้ามีเปอร์เซ็นต์ solid content ที่สูงถึง 40 % ทำให้เห็นการสลายตัวของเซลลูโลสไม่ชัดเจน และเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นเซลลูโลสโปร่งแสงที่เตรียมจากอะคริลิกเรซิน พบว่ามี การสลายตัวสองช่วงอย่างชัดเจน โดยอุณหภูมิการสลายตัวช่วงแรกจะเป็นการสลายตัวของเซลลูโลส เนื่องจากเซลลูโลสจะเกิดการสลายตัวช่วงอุณหภูมิประมาณ 180 – 260 องศาเซลเซียส และช่วงที่สองที่อุณหภูมิสูงกว่า 300 องศาเซลเซียส จะเป็น การสลายตัวของสายโซ่หลักของพอลิเมอร์ ซึ่งจะพบว่าเส้นใยจะส่งผลให้อะคริลิกเรซินมีความ rigid มากขึ้น ทำให้ต้องใช้พลังงานความร้อนที่เพิ่มขึ้นเพื่อให้โมเลกุลภายในเกิดการเคลื่อนที่ที่อะคริลิก เรซินจึงเกิดการสลายตัว

5.1.9 สมบัติเชิงกล

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลด้านแรงดึง พบว่าแผ่นเซลลูโลสโปร่งแสงที่เตรียมจากอะคริลิกเรซินมีความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือมีค่า Tg สูงกว่าแผ่นโปร่งแสงที่เตรียมจากเรซินทางการค้า และเมื่อนำแผ่นโปร่งแสงที่เตรียมจากอะคริลิกเรซินมาเปรียบเทียบกับอะคริลิกเรซินบริสุทธิ์ พบว่าแผ่นโปร่งแสงที่เตรียมจากแผ่นแอโรเจลที่ความหนา 0.3 มม. และ 0.5 มม. มีความสามารถในการต้านทานแรงดึงต่ำกว่าอะคริลิกเรซินบริสุทธิ์ ทั้งนี้อธิบายได้ว่า จุดที่เกิด การขาด อาจเป็นรอยต่อของเรซินกับเซลลูโลส ซึ่งแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเรซินกับเซลลูโลสจะไม่ดีเท่ากับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเรซินด้วยกันเอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

5.2 ข้อเสนอแนะ

เตรียมแผ่นโปร่งแสงโดยใช้พอลิเมอร์ชนิดอื่นเข้าไปแทนที่น้ำในรูพรุนของแอโรเจล และทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ได้แก่ สมบัติทางความร้อน สมบัติการส่องผ่านของแสง และสมบัติเชิงกล

รายการอ้างอิง

- [1] Pornchaloem, P. Cellulose [Online]. Available from:
<http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0612/cellulose-%E0%B9%80%E0%B8%8B%E0%B8%A5%E0%B8%A5%E0%B8%B9%E0%B9%82%E0%B8%A5%E0%B8%AA> [27 May]
- [2] Davidson, M.W. Plant Cell Wall [Online]. 2015. Available from:
<http://micro.magnet.fsu.edu/cells/plants/cellwall.html> [30 May]
- [3] Suriyapunpong, D., Tunvichien, S., Managit, C., and Shuwisitkul, D. Isolation and characterization of cellulose from water hyacinth, sugar cane bagasse, and narrow leaf cattail. Faculty of Pharmacy Srinahkarinwirot University.
- [4] Nguyen Thi, B.T., Ong, L.K., Nguyen Thi, D.T., and Ju, Y.-H. Effect of subcritical water pretreatment on cellulose recovery of water hyacinth (*Eichhornia crassipe*). Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers 71 (2017): 55-61.
- [5] Okwadha, G.D.O. and Makomele, D.M. Evaluation of water hyacinth extract as an admixture in concrete production. Journal of Building Engineering 16 (2018): 129-133.
- [6] Villamagna, A.M. and Murphy, B.R. Ecological and socio-economic impacts of invasive water hyacinth (*Eichhornia crassipes*): a review. Freshwater Biology 55(2) (2010): 282-298.
- [7] Bayrakci, A.G. and Koçar, G. Second-generation bioethanol production from water hyacinth and duckweed in Izmir: A case study. Renewable and Sustainable Energy Reviews 30 (2014): 306-316.
- [8] Phromphat. ผักตบชวา สรรพคุณและประโยชน์ของผักตบชวา 15 ข้อ [Online]. 2017. Available from:
<https://medthai.com/%E0%B8%9C%E0%B8%B1%E0%B8%81%E0%B8%95%E0%B8%9A%E0%B8%8A%E0%B8%A7%E0%B8%B2/> [12 April]

- [9] Priya, P., Nikhitha, S.O., Anand, C., Dipin Nath, R.S., and Krishnakumar, B. Biomethanation of water hyacinth biomass. Bioresource Technology 255 (2018): 288-292.
- [10] Barua, V.B., Goud, V.V., and Kalamdhad, A.S. Microbial pretreatment of water hyacinth for enhanced hydrolysis followed by biogas production. Renewable Energy 126 (2018): 21-29.
- [11] Qin, H., Zhang, Z., Liu, M., Wang, Y., Wen, X., and Yan, S. Efficient assimilation of cyanobacterial nitrogen by water hyacinth. Bioresource Technology 241 (2017): 1197-1200.
- [12] Silapasit, S. The Utilization of Waterhyacinth for Protein Replacement in Giant Gourami Feed. Major : Appropriate technology for resource development Mahidol University, 2001.
- [13] Polprasert, S. Pretreatment of Lignocellulosic Materials for Ethanol Production. Department of Environmental Health Sciences, Faculty of Public Health Mahidol University, 2014.
- [14] Winuprasith, T. Nanocellulose: Food Application and Food Safety Aspects. Institute of Nutrition Mahidol University, 2017.
- [15] อภิสรา ชายเชื้อ. Carbohydrate [Online]. 2014. Available from: <http://biomolecule.myreadyweb.com/article/topic-42796.html> [25 May]
- [16] Wikipedia. Cellulose [Online]. 2015. Available from: <https://en.wikipedia.org/wiki/Cellulose> [20 May]
- [17] สิริมา ชินสาร. Extraction and Utilization of Dietary Fiber and Cellulose from Coconut Residue for Value Creation of Agricultural By-products and Mass Transfer Prediction Models during Frying Process. Faculty of Science Burapha University, 2014.
- [18] Pawongrat, R. Pretreatment processes for enhancing the efficiency of ethanol production from lignocellulosic agricultural wastes. Veridian E-Journal 2(1) (2007): 143-157.

- [19] Willberg-Keyriläinen, P., Hiltunen, J., and Ropponen, J. Production of cellulose carbamate using urea-based deep eutectic solvents. *Cellulose* 25(1) (2017): 195-204.
- [20] Aegerter, M.A., Leventis, N., and Koebel, M.M. *Aerogel Hand book*. Springer (2011): 239-251.
- [21] Nguyen, S.T., Feng, J., Ng, S.K., Wong, J.P.W., Tan, V.B.C., and Duong, H.M. Advanced thermal insulation and absorption properties of recycled cellulose aerogels. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 445 (2014): 128-134.
- [22] Rao, A.V., Bhagat, S.D., Hirashima, H., and Pajonk, G.M. Synthesis of flexible silica aerogels using methyltrimethoxysilane (MTMS) precursor. *Journal of Colloid and Interface Science* 300(1) (2006): 279-85.
- [23] สุพรรณม ขอดยิ่งยง. ซิลิกาแอโรเจล – วัสดุสำหรับอนาคต [Online]. 2014. Available from: <http://medicaldevices.oie.go.th/Article.aspx?aid=124> [20 April]
- [24] Pekala, R.W., Farmer, J.C., Alviso, C.T., Tran, T.D., and Mayer, S.T. Carbon aerogels for electrochemical applications. *Journal of Non-Crystalline Solids* 225 (1998): 74–80.
- [25] Post, H. Lightest Material On Earth: Carbon Aerogel Sets New Record [Online]. 2013. Available from: https://www.huffingtonpost.com/2013/04/02/lightest-material-earth-carbon-aerogel_n_2980978.html [1 April]
- [26] Cervin, N.T., Aulin, C., Larsson, P.T., and Wangberg, L. Ultra porous nanocellulose aerogels as separation medium for mixtures of oil/water liquids. *Cellulose* 19 (2012): 401–410.
- [27] Condliffe, J. Scientists Can Make Aerogel From Waste Paper [Online]. 2016. Available from: <https://gizmodo.com/scientists-can-make-aerogel-from-waste-paper-1758220500> [20 April]
- [28] Kruraviwan. ตัวกลางของแสง [Online]. 2011. Available from: <https://kruraviwan.wordpress.com/2011/10/06/ตัวกลางของแสง/> [20 May]

- [29] Architectes, B. Multi-Purpose Building with Undulating Roof [Online]. 2015. Available from: <http://www.designboom.com> [27 May]
- [30] Khimikov. Cellophane film [Online]. 2010. Available from: <http://technoclip.ru/en/cellophanefilm.htm> [10 June]
- [31] Orcutt, M. A Biodegradable Computer Chip That Performs Surprisingly Well [Online]. 2015. Available from: <http://micro.magnet.fsu.edu/cells/plants/cellwall.html> [30 May]
- [32] Barua, V.B. and Kalamdhad, A.S. Anaerobic biodegradability test of water hyacinth after microbial pretreatment to optimise the ideal F/M ratio. Fuel 217 (2018): 91-97.
- [33] Dogan, H. and Hilmioglu, N.D. Dissolution of cellulose with NMMO by microwave heating. Carbohydrate Polymers 75(1) (2009): 90-94.
- [34] Jin, C., Han, S., Li, J., and Sun, Q. Fabrication of cellulose-based aerogels from waste newspaper without any pretreatment and their use for absorbents. Carbohydrate Polymers 123 (2015): 150-156.
- [35] Feng, J., Nguyen, S.T., Fan, Z., and Duong, H.M. Advanced fabrication and oil absorption properties of super-hydrophobic recycled cellulose aerogels. Chemical Engineering Journal 270 (2015): 168-175.
- [36] Kwon, G.-J., Kim, D.-Y., Hwang, J.-H., and Kang, J.-H. Structural properties and adsorption capacity of holocellulose aerogels synthesized from an alkali hydroxide-urea solution. Journal of the Korean Physical Society 64(10) (2014): 1470-1473.
- [37] Li, R., Zhang, L., and Xu, M. Novel regenerated cellulose films prepared by coagulating with water: Structure and properties. Carbohydrate Polymers 87(1) (2012): 95-100.
- [38] Zhu, M., Li, T., Davis, C.S., Yao, Y., Dai, J., and Wang, Y. Transparent and haze wood composites for highly efficient broadband light management in solar cells. Nano Energy 26 (2016): 332-339.

- [39] Okahisa, Y., Yoshida, A., Miyaguchi, S., and Yano, H. Optically transparent wood–cellulose nanocomposite as a base substrate for flexible organic light-emitting diode displays. Composites Science and Technology 69(11-12) (2009): 1958-1961.
- [40] Yaddanapudi, H.S., Hickerson, N., Saini, S., and Tiwari, A. Fabrication and characterization of transparent wood for next generation smart building applications. Vacuum 146 (2017): 649-654.
- [41] Yang, Q., Fukuzumi, H., Saito, T., Isogai, A., and Zhang, L. Transparent cellulose films with high gas barrier properties fabricated from aqueous alkali/urea solutions. Biomacromolecules 12(7) (2011): 2766-2771.
- [42] Chen, W.-H. and Kuo, P.-C. A study on torrefaction of various biomass materials and its impact on lignocellulosic structure simulated by a thermogravimetry. Energy 35(6) (2010): 2580-2586.
- [43] Harun, M.Y., Dayang Radiah, A.B., Zainal Abidin, Z., and Yunus, R. Effect of physical pretreatment on dilute acid hydrolysis of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*). Bioresource Technology 102(8) (2011): 5193-5199.
- [44] Abdelrazek, E.M., Hezma, A.M., El-khodary, A., and Elzayat, A.M. Spectroscopic studies and thermal properties of PCL/PMMA biopolymer blend. Egyptian Journal of Basic and Applied Sciences 3(1) (2016): 10-15.
- [45] Bee, S.-L., et al. Characterization of silylated modified clay nanoparticles and its functionality in PMMA. Composites Part B: Engineering 110 (2017): 83-95.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก
การส่องผ่านของแสง

ตาราง ก-1 ร้อยละการส่องผ่านของแสงของเรซินทางการค้า

ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	แอมโวลต์	เรซินทางการค้า					
		เรซินทางการค้าบริสุทธิ์			เซลลูโลสโปร่งแสง		
		0.3 มม.	0.5 มม.	0.7 มม.	0.3 มม.	0.5 มม.	0.7 มม.
400	0.29	72.17	50.9	47.03	47.04	41.86	56.11
410	0.41	74.46	55.13	50.97	52.69	45.88	58.74
420	0.62	76.31	58.45	54.24	57.43	49.46	60.68
430	0.87	77.65	61.2	56.89	61.3	52.4	62.07
440	1.25	78.76	63.34	59.1	64.44	54.78	63.07
450	1.63	79.68	65.24	60.99	67.01	56.81	63.96
460	2.13	80.41	66.81	62.47	69.18	58.52	64.65
470	2.67	81	68.28	63.89	70.77	59.94	65.08
480	3.27	81.63	69.51	65.21	72.39	61.21	65.57
490	3.91	82.14	70.71	66.35	73.55	62.38	65.85
500	4.65	82.69	71.83	67.48	74.73	63.39	66.26
510	5.4	83.17	72.8	68.48	75.77	64.3	66.56
520	6.16	83.51	73.68	69.44	76.63	65.09	66.78
530	6.91	83.83	74.54	70.26	77.4	65.83	66.96
540	7.67	84.19	75.33	71.1	77.99	66.48	67.04
550	8.45	84.43	76.07	71.83	78.57	67.13	67.18
560	9.19	84.71	76.71	72.53	79.14	67.68	67.33

570	9.91	84.94	77.4	73.21	79.62	68.21	67.46
580	10.58	85.19	77.97	73.8	80.02	68.61	67.5
590	11.25	85.39	78.6	74.35	80.29	69.07	67.54
600	11.95	85.53	79.13	74.97	80.84	69.49	67.58
610	12.54	85.79	79.6	75.54	81.25	69.92	67.68
620	13.1	85.96	80.11	76	81.57	70.27	67.68
630	13.64	86.18	80.57	76.46	81.84	70.6	67.7
640	14.13	86.36	80.97	76.99	82.17	70.88	67.74
650	14.59	86.56	81.4	77.45	82.38	71.16	67.76
660	14.99	86.7	81.78	77.84	82.74	71.46	67.85
670	15.38	86.82	82.06	78.26	83.06	71.74	67.9
680	15.72	87.01	82.39	78.67	83.4	72.04	67.96
690	16.05	87.23	82.65	79.11	83.71	72.13	67.88
700	16.36	87.41	82.92	79.47	84.06	72.48	68
เฉลี่ย	8.24	83.15	73.48	69.36	74.93	64.23	65.87

ตาราง ก-2 ร้อยละการส่องผ่านของแสงของอะคริลิกเรซิน

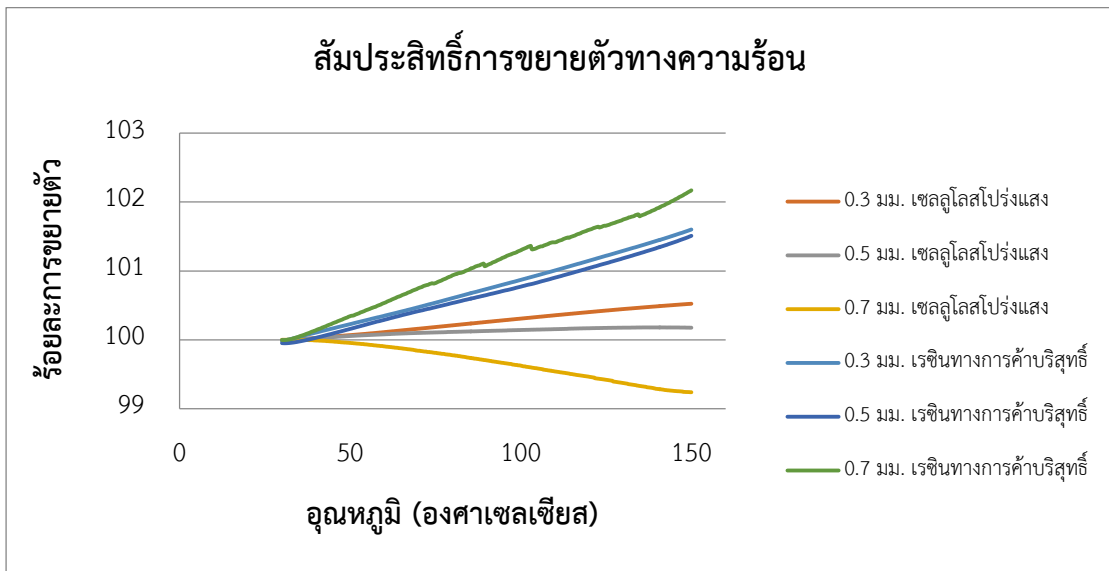
ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	แอมโวลต์	อะคริลิกเรซิน					
		อะคริลิกเรซินบริสุทธิ์			เซลลูลอสโปร่งแสง		
		0.3 มม.	0.5 มม.	0.7 มม.	0.3 มม.	0.5 มม.	0.7 มม.
400	0.29	91.19	85.9	63.92	83.1	74.65	67.38
410	0.41	91.14	86.7	68.13	84.69	77.39	70.83
420	0.62	91.13	87.63	71.88	86.06	79.48	73.46
430	0.87	90.97	88.21	75.15	86.84	81.12	75.72
440	1.25	90.96	88.71	77.85	87.54	82.33	77.42
450	1.63	90.92	89.04	80.06	88.13	83.36	78.79
460	2.13	90.93	89.29	81.89	88.46	84.05	79.86
470	2.67	90.95	89.36	83.19	88.85	84.67	80.72
480	3.27	90.98	89.55	84.42	89.25	85.21	81.59
490	3.91	90.93	89.61	85.26	89.47	85.54	82.22
500	4.65	90.87	89.71	85.99	89.78	85.99	82.8
510	5.4	90.89	89.68	86.49	90.13	86.32	83.36
520	6.16	91.04	89.74	86.94	90.47	86.65	83.58
530	6.91	90.88	89.66	87.31	90.71	86.93	84.13
540	7.67	90.88	89.69	87.67	90.74	87.05	84.52
550	8.45	90.93	89.63	87.85	90.83	87.21	84.79
560	9.19	90.96	89.65	88.14	90.96	87.29	85.07
570	9.91	90.96	89.64	88.32	90.97	87.47	85.37
580	10.58	90.93	89.62	88.51	90.96	87.53	85.52

590	11.25	90.99	89.62	88.71	91.02	87.57	85.67
600	11.95	90.97	89.63	88.85	91.04	87.68	85.9
610	12.54	90.89	89.65	88.85	91.09	87.81	86.09
620	13.1	90.97	89.66	88.94	91.08	87.93	86.25
630	13.64	90.92	89.66	89.05	91.18	87.99	86.41
640	14.13	90.94	89.66	89.08	91.15	87.99	86.47
650	14.59	90.9	89.66	89.11	91.16	88	86.56
660	14.99	90.9	89.67	89.13	91.19	88.04	86.58
670	15.38	90.99	89.63	89.11	91.07	88.05	86.66
680	15.72	91.07	89.63	89.14	91.04	87.99	86.65
690	16.05	91.02	89.72	89.22	91.11	88.08	86.78
700	16.36	91.13	89.71	89.28	90.99	88.07	86.74
เฉลี่ย	8.24	90.97	89.25	84.75	89.71	85.65	82.70

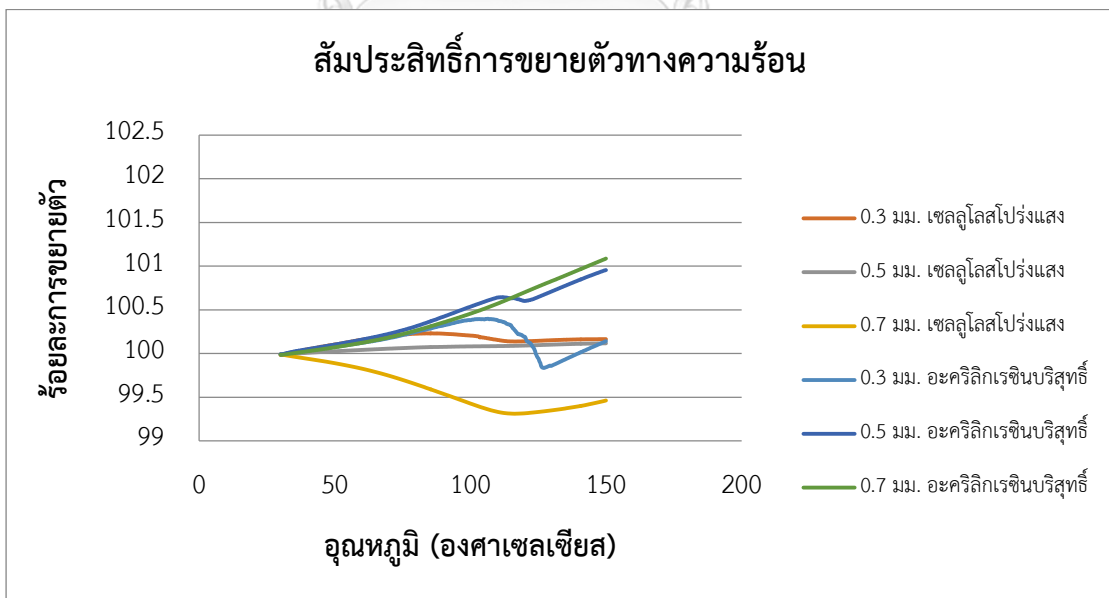
ภาคผนวก ข

เปอร์เซ็นต์การขยายตัวทางความร้อน

กราฟ ข-1 ร้อยละการขยายตัวทางความร้อนของเรซินทางการค้า



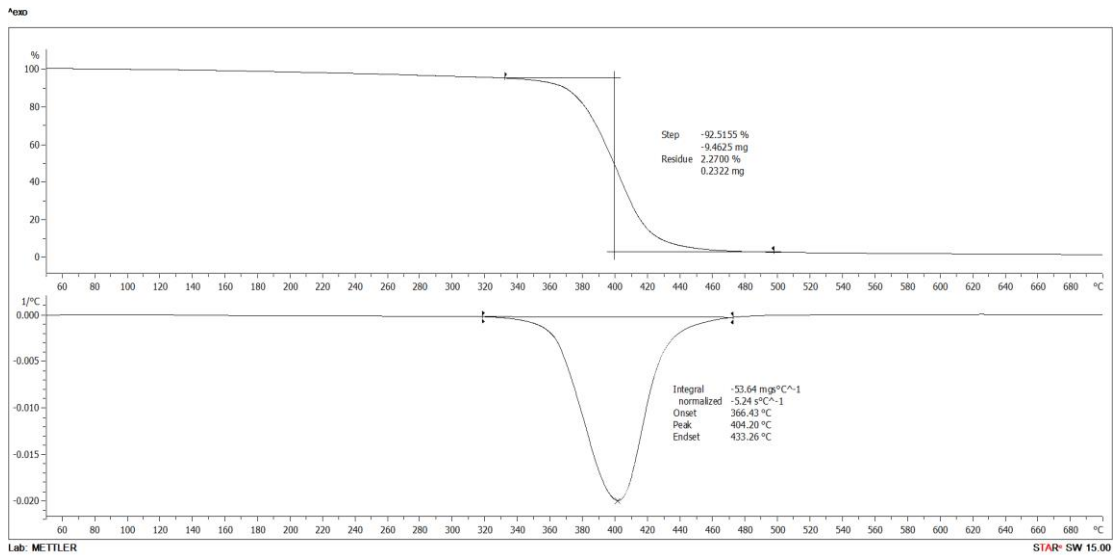
กราฟ ข-2 ร้อยละการขยายตัวทางความร้อนของอะคริลิกเรซิน



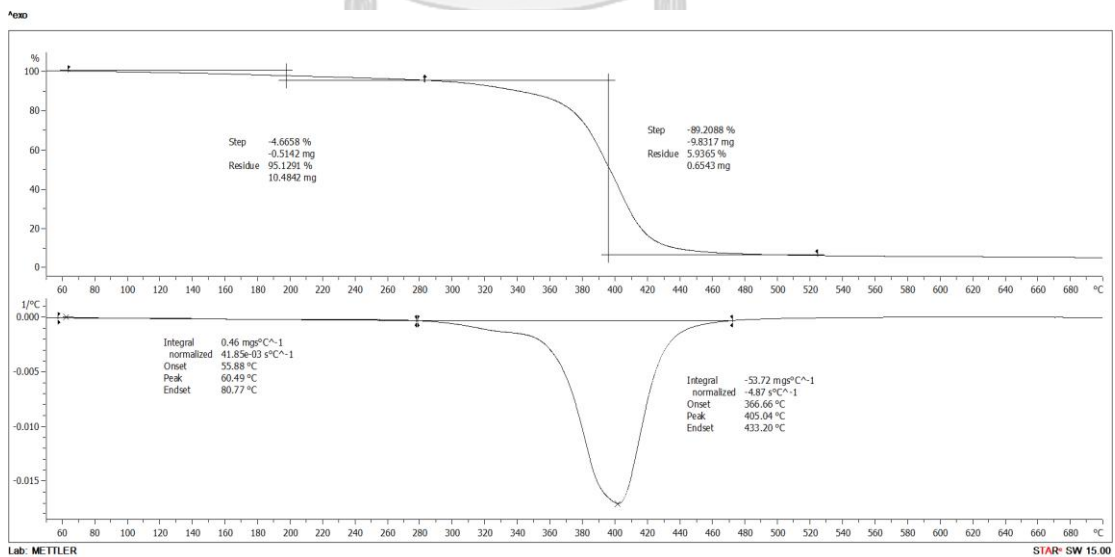
ภาคผนวก ค

สมบัติการสลายตัวทางความร้อน

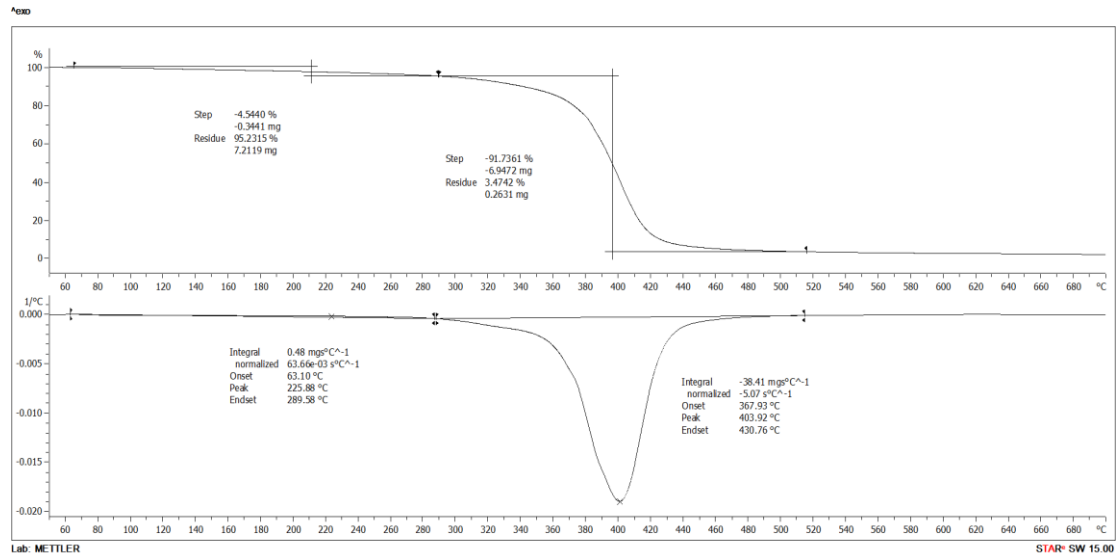
กราฟ ค-1 การสลายตัวทางความร้อนของเรซินทางการค้าบริสุทธิ์



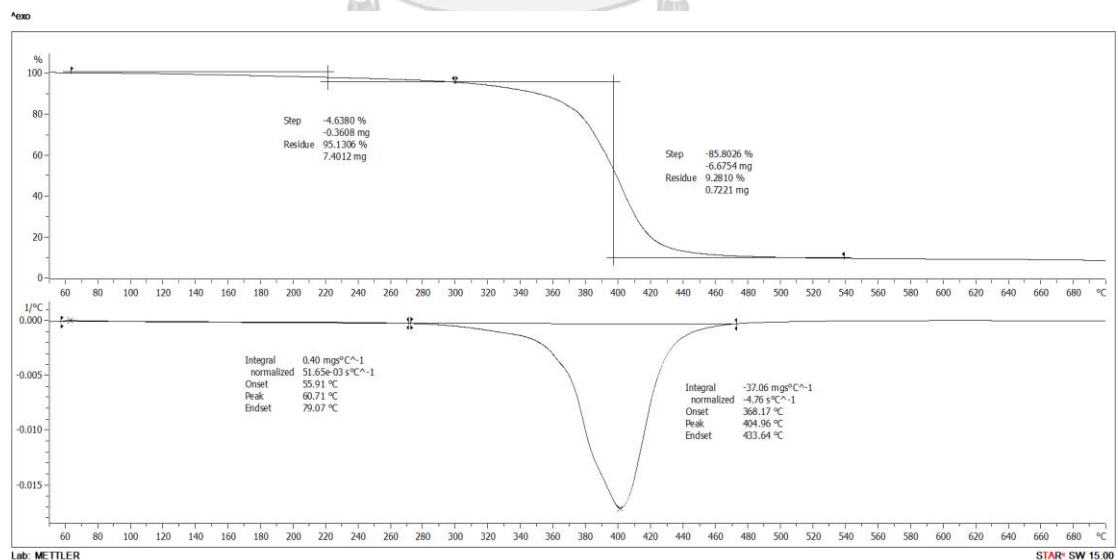
กราฟ ค-2 การสลายตัวทางความร้อนของเซลลูโลสโปร่งแสงความหนา 0.3 มม. ที่เตรียมจากเรซินทางการค้า



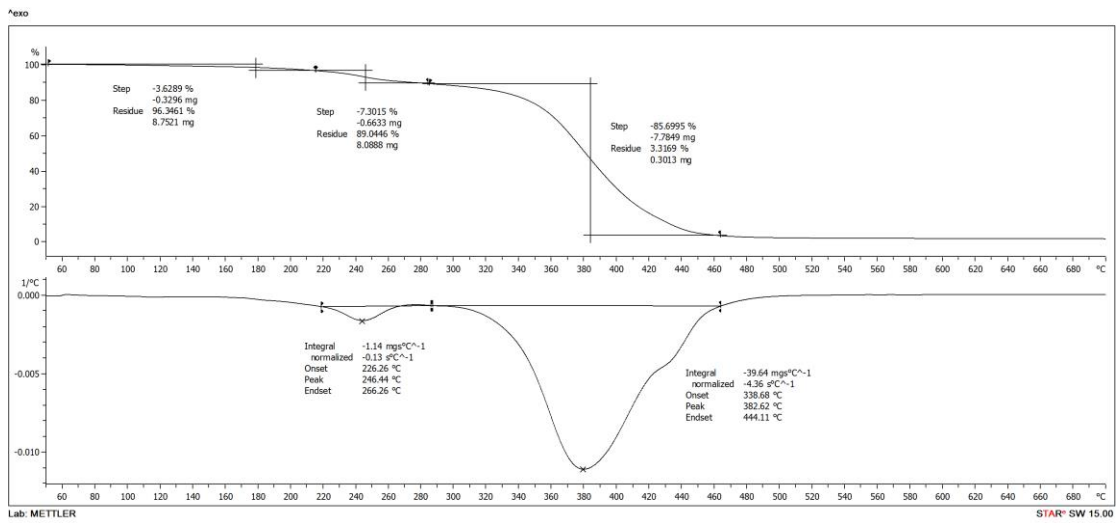
กราฟ ค-3 การสลายตัวทางความร้อนของเซลลูโลสโปร่งแสงความหนา 0.5 มม. ที่เตรียมจาก เรซินทางการค้า



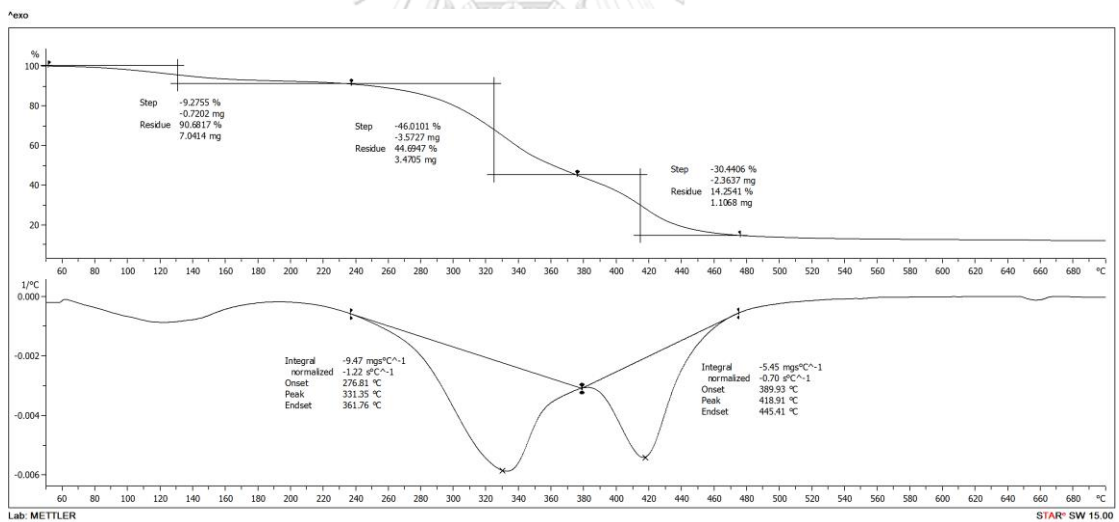
กราฟ ค-4 การสลายตัวทางความร้อนของเซลลูโลสโปร่งแสงความหนา 0.7 มม. ที่เตรียมจาก เรซินทางการค้า



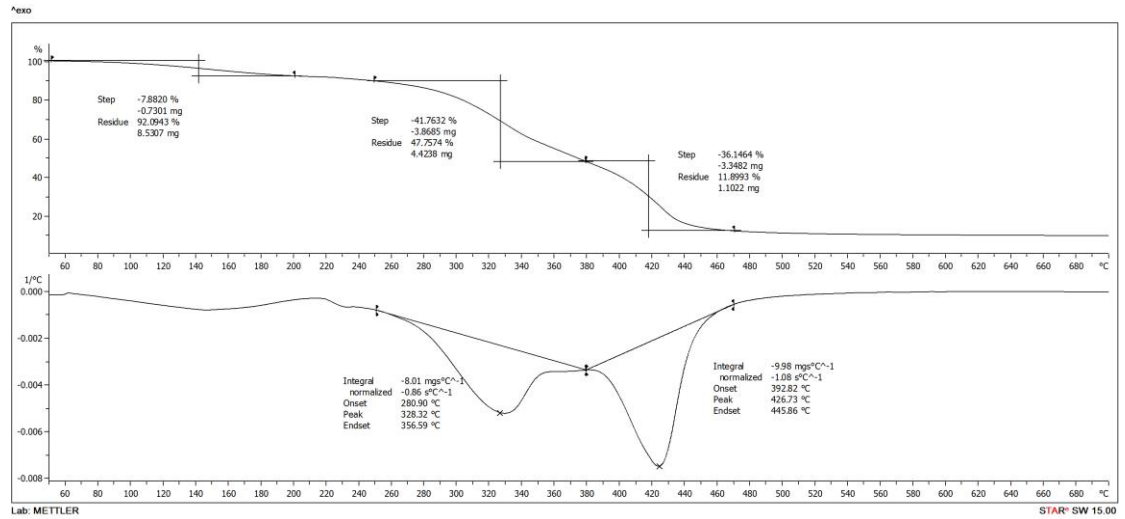
กราฟ ค-5 การสลายตัวทางความร้อนของอะคริลิกเรซินบริสุทธิ์



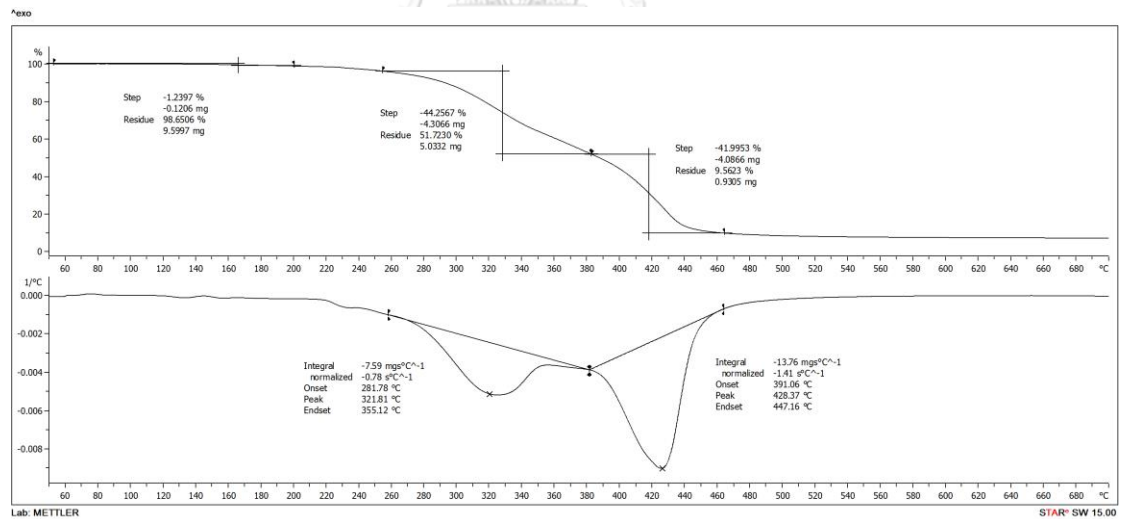
กราฟ ค-6 การสลายตัวทางความร้อนของเซลลูโลสโปร่งแสงความหนา 0.3 มม. ที่เตรียมจากอะคริลิกเรซิน



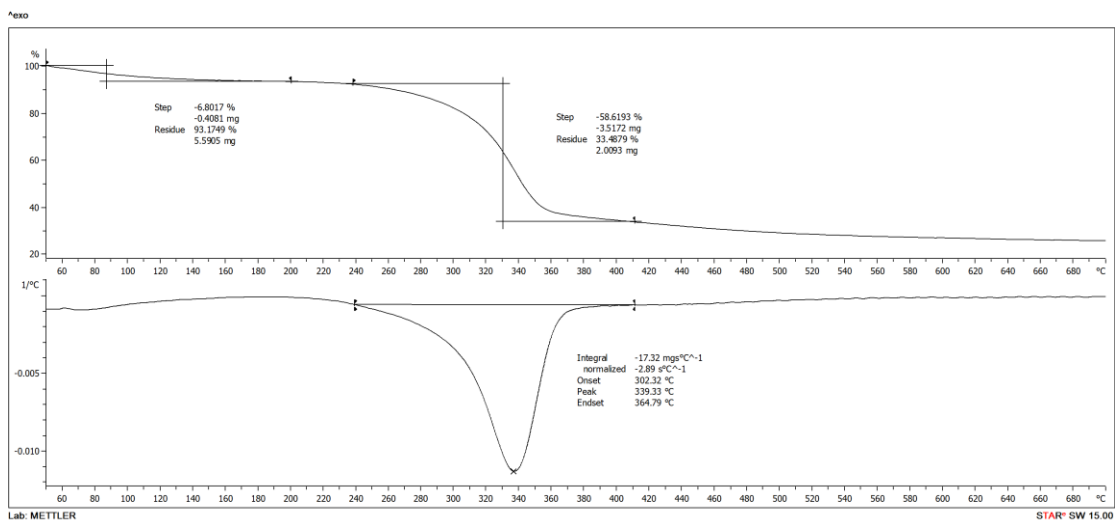
กราฟ ค-7 การสลายตัวทางความร้อนของเซลลูโลสโปร่งแสงความหนา 0.5 มม. ที่เตรียมจาก อะคริลิกเรซิน



กราฟ ค-8 การสลายตัวทางความร้อนของเซลลูโลสโปร่งแสงความหนา 0.7 มม. ที่เตรียมจาก อะคริลิกเรซิน



กราฟ ค-9 การสลายตัวทางความร้อนของเซลลูโลสบริสุทธิ์



ภาคผนวก ง

สมบัติเชิงกล

ตาราง ง-1 สมบัติเชิงกลของเรซินทางการค้าบริสุทธิ์ หนา 0.3 มม

ครั้งที่	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)
1	1.098	8.783	91.299
2	0.937	7.043	115.936
3	1.154	5.978	117.602
4	0.804	7.971	113.158
เฉลี่ย	0.998	7.443	109.498
S.D.	0.137	1.046	14.093

ตาราง ง-2 สมบัติเชิงกลของเรซินทางการค้าบริสุทธิ์ หนา 0.5 มม

ครั้งที่	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)
1	1.284	6.989	113.474
2	1.107	5.546	195.291
3	1.181	5.961	157.124
4	1.146	4.723	119.001
เฉลี่ย	1.179	5.804	146.222
S.D.	0.065	0.816	32.939

ตาราง ง-3 สมบัติเชิงกลของเรซินทางการค้าบริสุทธิ์ หนา 0.7 มม

ครั้งที่	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)
1	1.09	5.41	113.25
2	0.94	6.29	104.40
3	1.13	6.58	104.42
4	0.87	6.54	128.52
เฉลี่ย	1.01	6.21	112.65
S.D.	0.11	0.60	9.85

ตาราง ง-4 สมบัติเชิงกลของเซลลูลอสโปร่งแสงที่เตรียมจากเรซินทางการค้าบริสุทธิ์ หนา 0.3 มม

ครั้งที่	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)
1	1.27	72.88	103.44
2	1.11	46.65	88.17
3	1.27	44.86	112.30
4	1.23	36	126.30
เฉลี่ย	1.22	43.72	107.55
S.D.	0.06	13.75	13.84

ตาราง ง-5 สมบัติเชิงกลของเซลลูโลสโปร่งแสงที่เตรียมจากเรซินทางการค้าบริสุทธิ์ หนา 0.5 มม

ครั้งที่	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)
1	0.66	45.38	109.40
2	0.67	49.59	97.84
3	0.74	39.69	94.37
4	0.66	41.71	87.17
เฉลี่ย	0.68	46.87	97.19
S.D.	0.03	3.77	8.03

ตาราง ง-6 สมบัติเชิงกลของเซลลูโลสโปร่งแสงที่เตรียมจากเรซินทางการค้าบริสุทธิ์ หนา 0.7 มม

ครั้งที่	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)
1	0.99	46.68	98.74
2	0.92	46.11	96.66
3	0.93	38.95	108.12
4	0.84	34.65	117.11
เฉลี่ย	0.92	44.57	105.16
S.D.	0.05	5.03	8.14

ตาราง ง-7 สมบัติเชิงกลของอะคริลิกเรซินบริสุทธิ์ หน้า 0.3 มม

ครั้งที่	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)
1	47.12	10190.50	1.37
2	73.42	17498.90	1.13
3	61.09	15091.50	1.15
4	72.44	18223.20	1.13
เฉลี่ย	63.52	15251	1.19
S.D.	10.63	3143.29	0.10

ตาราง ง-8 สมบัติเชิงกลของอะคริลิกเรซินบริสุทธิ์ หน้า 0.5 มม

ครั้งที่	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)
1	103.73	20263	1.57
2	130.59	18931.20	1.37
3	142.76	19009.70	1.34
4	141.94	13442.70	1.59
เฉลี่ย	129.75	17911.70	1.47
S.D.	15.77	2633.69	0.12

ตาราง ง-9 สมบัติเชิงกลของอะคริลิกเรซินบริสุทธิ์ หน้า 0.7 มม

ครั้งที่	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)
1	72.87	14705	1.19
2	77.17	15612.1	1.89
3	79.61	13693	1.31
4	71.79	13103.50	1.17
เฉลี่ย	75.36	14278.40	1.39
S.D.	3.17	959.66	0.29

ตาราง ง-10 สมบัติเชิงกลของเซลลูโลสโปร่งแสงที่เตรียมจากอะคริลิกเรซินบริสุทธิ์ หน้า 0.3 มม

ครั้งที่	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)
1	6.52	12335.40	0.84
2	8.87	10548.20	0.83
3	6.68	15264.40	0.80
4	6.25	9469.48	0.84
เฉลี่ย	6.52	11904.40	0.82
S.D.	1.04	2193.37	0.01

ตาราง ง-11 สมบัติเชิงกลของเซลลูลอสไปร่งแสงที่เตรียมจากอะคริลิกเรซินบริสุทธิ์ หนา 0.5 มม

ครั้งที่	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)
1	21.00	4638.74	0.98
2	10.32	8842.21	1.18
3	15.98	5857.60	1.03
4	12.73	4698.66	0.81
เฉลี่ย	21.00	6009.30	1.00
S.D.	3.99	1706.21	0.13

ตาราง ง-12 สมบัติเชิงกลของเซลลูลอสไปร่งแสงที่เตรียมจากอะคริลิกเรซินบริสุทธิ์ หนา 0.7 มม

ครั้งที่	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)
1	205.88	23967.10	2.41
2	260.30	24210.20	1.77
3	260.42	22473.50	3.39
4	254.39	19911.60	3.47
เฉลี่ย	205.88	22640.60	2.76
S.D.	22.85	1710.17	0.71

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาว สาวิตรี สีนธู เกิดเมื่อวันที่ 17 กันยายน พ.ศ. 2536 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี จากหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งทอ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ในปี พ.ศ. 2558 หลังจากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2559

การเสนอผลงานวิจัย มีดังนี้ นำเสนอผลงานแบบโปสเตอร์ในหัวข้อ Preparation of Transparent Cellulose/PMMA Composite Sheet from Cellulose Aerogel จัดขึ้นโดยงาน The Third International Conference on Applied Engineering, Materials and Mechanics (3 rd ICAEMM 2018) ระหว่างวันที่ 20 – 22 เมษายน พ.ศ. 2561 ณ เมือง โอกินาวา ประเทศญี่ปุ่น