

อธิบดีมหาวิทยาลัย



การเตรียมน้ำตาลรีดิวซ์จากเซลลูโลสด้วย
กระบวนการพลาสมาวิภาคของเหลว
PREPARATION OF REDUCING SUGAR FROM CELLULOSE
BY SOLUTION PLASMA PROCESS

นายก้องภพ บุญวงศ์ รหัส 55361571
นายยอด ทองพิมพ์ รหัส 55361656
นางสาวมลชนก ยอดวิเศษ รหัส 55362691

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
วันที่ลงทะเบียน 27 ส.ค. 2561
เลขทะเบียน 1923823x
เลขเรียกหนังสือ

1923823

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ปีการศึกษา 2558

ร
ก 351ก
๒๕๖



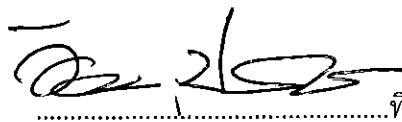
ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

ชื่อหัวข้อโครงการ การเตรียมน้ำตาลรีตีวซ์จากเซลลูโลสด้วยกระบวนการพลาสมาวิภาค
ของเหลว

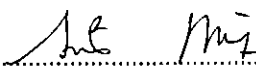
ผู้ดำเนินโครงการ นายก่อภพ บุญวงศ์ รหัส 55361571
นายยอด ทองพิมพ์ รหัส 55361656
นางสาวมลชนก ยอดวิเศษ รหัส 55362691

ที่ปรึกษาโครงการ ผศ.ดร.อิสราวุธ ประเสริฐสังข์
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี
ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหกรรม
ปีการศึกษา 2558

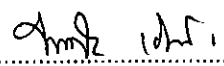
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ
การศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี


.....ที่ปรึกษาโครงการ

(ผศ.ดร.อิสราวุธ ประเสริฐสังข์)


.....กรรมการ

(รศ.ดร.สมร หิรัญประดิษฐ์กุล)


.....กรรมการ

(ดร.วัณชัย เขาวรัตน์)

ชื่อหัวข้อโครงการงาน การเตรียมน้ำตาลรีตีวซ์จากเซลลูโลสด้วยกระบวนการพลาสมาวิภูภาค
ของเหลว

ผู้ดำเนินโครงการงาน นายก้องภพ บุญวงศ์ รหัส 55361571
นายยอด ทองพิมพ์ รหัส 55361656
นางสาวมลชนก ยอดวิเศษ รหัส 55362691

ที่ปรึกษาโครงการงาน ผศ.ดร.อิสราวุธ ประเสริฐสังข์

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหกรรม

ปีการศึกษา 2558

บทคัดย่อ

ในปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ ได้ทำการศึกษาการประยุกต์ใช้กระบวนการพลาสมาวิภูภาค
ของเหลวในการย่อยสลายเซลลูโลสเพื่อเตรียมน้ำตาลรีตีวซ์ โดยใช้กรด 3 ชนิด คือ กรดซัลฟิวริก กรด
ไนตริก และกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้นของกรด 0.02 0.04 และ 0.08 โมลาร์ ความถี่ของเครื่อง
กำเนิดพลาสมา 15 22.5 และ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ เวลาที่ใช้ในการย่อยสลาย 0 ถึง 300 นาที และเติม
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในอัตราส่วน 1:0.05 1:0.075 1:0.1 และ 1:0.2 และวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาล
รีตีวซ์โดยวิธีการ Dinitrosalicylic Colorimetric Method (DNS) และวิเคราะห์ความเป็นผลึกของ
เซลลูโลสด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction (XRD) จากผลการทดลองพบว่า การย่อยสลายเซลลูโลสด้วย
พลาสมาวิภูภาคของเหลวจะช่วยเพิ่มร้อยละผลได้ของน้ำตาลรีตีวซ์ ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการ
ย่อยสลายเซลลูโลสด้วยพลาสมาวิภูภาคของเหลวคือการใช้กรดซัลฟิวริก ที่ความเข้มข้นกรด 0.08 โม-
ลาร์ และความถี่ของเครื่องกำเนิดพลาสมา 30 กิโลเฮิร์ตซ์ จะให้ร้อยละผลได้เท่ากับ 50 ถึง 55
เปอร์เซ็นต์ และในการเพิ่มไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้าไปในระบบพบว่าช่วยเพิ่มอัตราการย่อยสลาย
เซลลูโลส โดยอัตราส่วนของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมในสภาวะการย่อยสลายคืออัตราส่วน
1:0.075

Title PREPARATION OF REDUCING SUGAR FROM CELLULOSE
BY SOLUTION PLASMA PROCESS

Author Mr. Kongphop Boonwong ID No. 55361571
Mr. Yod Thongpim ID No. 55361656
Miss Monchanok Yodwiset ID No. 55362691

Advisor Asst. Prof. Dr. Isarawut Prasertsung

Major field Chemical Engineering

Department Industrial Engineering

Year 2558

Abstract

This research was studied an application of solution plasma process (SPP) for degradation of cellulose to prepare reducing sugar. The effect of degradation conditions on the % yield of reducing sugar were investigated. Various types of acids including sulfuric acid (H_2SO_4), Nitric acid (HNO_3), and Hydrochloric acid (HCl) with concentrations in the range of 0.02 to 0.08M were studied. The applied pulse frequency of bipolar power supply and plasma treatment time were varied at 15 to 30 kHz and 0 to 300 min, respectively. In addition, various mass ratio of cellulose to hydrogen peroxide were added. The amount of total reducing sugar produced by SPP was determined using Dinitrosalicylic Colorimetric Method (DNS) and the cellulose crystalline structure was analyzed by x-ray diffraction (XRD). The results shown that using 0.08M sulfuric acid at high applied pulse frequency provided the highest %yield of reducing sugar of 50 to 55%. Moreover the addition of hydrogen peroxide strongly promoted %yield of reducing sugar. The suitable ratio cellulose to hydrogen peroxide is 1:0.075.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความอนุเคราะห์และความช่วยเหลือเป็นอย่างดีของบุคคลหลายท่าน โดยเฉพาะ ผศ.ดร.อิศราวุธ ประเสริฐสังข์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่ได้ให้คำปรึกษา ให้ความรู้ คำแนะนำตรวจทาน คำแนะนำในการค้นคว้าข้อมูล เทคนิคการนำเสนอโครงการปากเปล่า แก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ และให้กำลังใจในการดำเนินงานด้วยความเอาใจใส่ทุกขั้นตอน ติดตามการดำเนินโครงการมาโดยตลอด เพื่อให้การเขียนโครงการปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ สมบูรณ์ที่สุด ขอขอบคุณคณะอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเคมีและภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนเรศวรทุกท่านที่ได้ให้วิชาความรู้เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้และขอขอบคุณเงินทุนสนับสนุนการวิจัยจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย จนทำให้ งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์

นอกจากนี้ขอขอบคุณผู้ดูแลห้องปฏิบัติการที่คอยให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้การสนับสนุนในทุกๆ ด้านและให้กำลังใจเสมอมา

คณะผู้ดำเนินโครงการวิศวกรรม

นายก้องภพ บุญวงศ์

นายยอด ทองพิมพ์

นางสาวมลชนก ยอดวิเศษ

พฤษภาคม 2559

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
ใบรับรองปริญญาโท.....	ก
บทคัดย่อ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตโครงการ.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 สถานที่ในการดำเนินโครงการ.....	4
1.6 ระยะเวลาในการดำเนินโครงการ.....	4
1.7 ขั้นตอนและแผนการดำเนินโครงการ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 เซลลูโลสและน้ำตาลรีดิวซ์.....	5
2.2 การย่อยสลายเซลลูโลส.....	9
2.3 กระบวนการพลาสมาวิภาคของเหลว (Solution Plasma Process).....	11
2.4 การวิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วยเทคนิค XRD.....	13
2.5 การวัดปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ด้วยเทคนิค DNS.....	14
2.6 แนวคิดของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	15
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	21
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี.....	21
3.2 วิธีการทดลอง.....	22
3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	23

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล	26
4.1 ผลของชนิดกรดต่อร้อยละผลได้ของน้ำตาลรีดิวซ์	26
4.2 ผลของความเข้มข้นกรดต่อร้อยละผลได้ของน้ำตาลรีดิวซ์	28
4.3 ผลของความถี่ของเครื่องกำเนิดพลาสมาต่อร้อยละผลได้ของน้ำตาลรีดิวซ์	29
4.4 ผลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีผลต่ออัตราการย่อยสลาย	32
4.5 ผลการทดสอบความเป็นผลึกด้วยเทคนิค XRD	35
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	39
5.1 สรุปผลการทดลอง	39
5.2 ข้อเสนอแนะ	39
เอกสารอ้างอิง	40
ภาคผนวก	45

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนและแผนการดำเนินโครงการ	4
ตารางที่ 2.1 องค์การของการพอลิเมอร์ไรเซชันและความเป็นผลึกของเส้นใยเซลลูโลส	6
ตารางที่ 4.1 ค่าคงที่อัตราการย่อยสลายเซลลูโลสและค่า R^2	35
ตารางที่ 4.2 แสดง CRYSTALLINE INDEX เมื่อทรีทด้วยความถี่ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ โดยความเข้มข้นกรดที่ต่างกัน	36
ตารางที่ 4.3 แสดง CRYSTALLINE INDEX เมื่อทรีทด้วยความเข้มข้น 0.08 โมลาร์ โดยความถี่ที่ต่างกัน	37
ตารางที่ 4.4 สภาวะในการทดลองและร้อยละผลได้ของการย่อยสลายเซลลูโลส เปรียบเทียบกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	38

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส	5
รูปที่ 2.2 โครงสร้างอัญฐานและผนังของเซลลูโลส.....	6
รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของกลูโคส	7
รูปที่ 2.4 แสดงอัลฟาดีฟรักโทสซึ่งมีกลุ่ม HEMIKETAL และทำปฏิกิริยากับน้ำซึ่งจะไปทำลายสายโซ่ โดยพื้นฐานแล้วจะถูกแปลงเป็นสารประกอบที่มีหมู่แอลดีไฮด์.....	8
รูปที่ 2.5 กลไกการไฮโดรไลซิสเซลลูโลสด้วยกรด	11
รูปที่ 2.6 ไดอะแกรมของระบบพลาสติกมวลภาคของเหลว	12
รูปที่ 2.7 แบบจำลองของพลาสติกมวลภาคของเหลว	13
รูปที่ 2.8 ภาพแสดงลักษณะการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในโครงสร้างผลึก.....	13
รูปที่ 2.9 ตัวอย่าง X-RAY DIFFRACTION SPECTRA ที่แสดงวิธีการใช้จุดสูงสุดของเซลลูโลส	14
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	22
รูปที่ 3.2 การติดตั้งระบบพลาสติกมวลภาคของเหลว	23
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงร้อยละผลได้ที่น้ำตาลรีดิวซ์ที่มีชนิดของกรดและเวลาที่ใช้ใน การรีดิวซ์พลาสติกต่างกัน	27
รูปที่ 4.2 กลไกการไฮโดรไลซิสของเซลลูโลส	27
รูปที่ 4.3 แสดงกลไกการย่อยสลายโคโคซานด้วยหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล	28
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงร้อยละผลได้ที่เวลาต่างๆ โดยใช้ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก ที่ต่างกันด้วยความถี่ของเครื่องกำเนิดพลาสมา 15 กิโลเฮิร์ตซ์.....	29
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงร้อยละผลได้ที่เวลาต่างๆ โดยใช้ความถี่ที่ต่างกัน (A) ความเข้มข้นกรด 0.02 โมลาร์ (B) ความเข้มข้นกรด 0.04 โมลาร์ (C) ความเข้มข้นกรด 0.08 โมลาร์.....	31
รูปที่ 4.6 กลไกการย่อยสลายเมื่อไฮโดรเจนไอออนและหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (A) มีปริมาณเหมาะสมกัน (B) มีปริมาณไม่เหมาะสมกัน.....	32

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงร้อยละผลได้ที่เวลาต่างๆ ด้วยการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	33
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงผลการคำนวณอัตราการย่อยสลายโดยใช้ PSEUDO FIRST ORDER KINETICS	34
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงผลของการทดสอบตะกอนที่ความถี่ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ โดยใช้ ความเข้มข้นกรดที่ต่างกันด้วยเทคนิค XRD	35
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงผลของการทดสอบตะกอนที่ความเข้มข้น 0.08 โมลาร์ โดยใช้ ความถี่ที่ต่างกันด้วยเทคนิค XRD.....	37



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของประชากร อุตสาหกรรม การเกษตรและการขนส่ง ทำให้มีความต้องการพลังงานเพิ่มขึ้น แหล่งพลังงานหลักในปัจจุบันเป็นเชื้อเพลิงจากการทับถมของซากพืชซากสัตว์เป็นเวลานาน เช่น แก๊สธรรมชาติ น้ำมัน และถ่านหิน [1] เนื่องจากมีการใช้พลังงานเป็นจำนวนมากทำให้ขาดแคลนอีกทั้งยังปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ [2-3] ดังนั้นจึงมีการใช้พลังงานทดแทนซึ่งเป็นพลังงานชีวภาพ เช่น เอทานอล เอทานอลสามารถผลิตได้จากการสังเคราะห์จากกระบวนการปิโตรเลียมหรือกระบวนการแปรรูปวัสดุชีวภาพโดยใช้จุลินทรีย์ เช่น การหมัก ในปี ค.ศ.1995 การผลิตเอทานอลในโลกประมาณ 93 เพอร์เซ็นต์ ผลิตโดยวิธีการหมักและประมาณ 7 เพอร์เซ็นต์ ผลิตโดยวิธีการสังเคราะห์ [4] ในการผลิตเอทานอลโดยวิธีการหมักสามารถดำเนินการได้จากผลิตภัณฑ์ที่มีน้ำตาลและแป้งเป็นส่วนประกอบ เช่น อ้อย ข้าว มันสำปะหลัง ข้าวโพด เป็นต้น [5] อย่างไรก็ตามผลิตภัณฑ์ที่มีองค์ประกอบของน้ำตาลและแป้งมีความจำเป็นต้องใช้ในการบริโภคและมีราคาแพง เซลลูโลสจึงเป็นที่น่าสนใจเนื่องจากมีอยู่มากในธรรมชาติซึ่งมีส่วนประกอบของน้ำตาลกลูโคสเชื่อมต่อกันเป็นสายโซ่ยาวด้วยพันธะ β (1 \rightarrow 4) ดังนั้นเซลลูโลสจึงสามารถสลายตัวเป็นน้ำตาลกลูโคสซึ่งนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการกระบวนการหมักจนเกิดเป็นผลิตภัณฑ์เอทานอลได้ เพราะฉะนั้นการย่อยสลายเซลลูโลสสลายเพื่อเตรียมกลูโคสจึงได้รับความสนใจเป็นอย่างยิ่งจากนักวิจัย [6-8]

การไฮโดรไลซิสเซลลูโลสเพื่อย่อยสลายเป็นกลูโคสสามารถทำได้โดยหลายวิธีการ อาทิ วิธีการทางเคมีและการย่อยด้วยเอนไซม์ [9-12] วิธีการทางเคมีโดยการใช้กรดเป็นกระบวนการที่สามารถทำได้ง่าย การไฮโดรไลซิสด้วยกรดสามารถทำได้โดยใช้กรดเจือจางและกรดเข้มข้น [13-15] การไฮโดรไลซิสเซลลูโลสด้วยกรดเจือจางจะต้องใช้อุณหภูมิที่สูงและใช้เวลานาน [13] การไฮโดรไลซิสด้วยกรดเข้มข้นจะใช้อุณหภูมิที่ต่ำกว่าและใช้เวลาที่สั้นกว่า อย่างไรก็ตามการใช้กรดเข้มข้นจะชักนำให้เกิดการเสื่อมสภาพของผลิตภัณฑ์กลูโคสมากกว่าการใช้กรดเจือจาง [16] ข้อเสียของการไฮโดรไลซิสด้วยกรดคือทำให้เกิดสารเคมีที่เป็นของเสียและสารปนเปื้อน สำหรับวิธีการย่อยด้วยเอนไซม์สามารถย่อยสลายเป็นกลูโคสในปริมาณสูงทำให้เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพอย่างมากในการเตรียมน้ำตาลกลูโคส [17] อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ค่อนข้างซับซ้อนและยุ่งยากสำหรับการผลิตในปริมาณมากซึ่งต้องการวิธีการหลายขั้นตอน อาทิ ตั้งแต่การเตรียมวัตถุดิบ การเตรียมเอนไซม์ และการทำให้ผลิตภัณฑ์บริสุทธิ์ ยิ่งไปกว่านั้นปัญหาหลักของการใช้เอนไซม์ คือ ต้นทุนสูง [18]

พลาสมาวิทยุภาคของเหลวเป็นวิธีการใหม่ซึ่งมีการนำเสนอโดย Takai O., และคณะ [19] พลาสมาวิทยุภาคของเหลวเป็นวิธีการที่ใช้อย่างกว้างขวางในการสังเคราะห์วัสดุระดับนาโน การปรับสภาพพื้นผิววัสดุ การบำบัดน้ำ การฆ่าเชื้อโรค และการย่อยสลายสารอินทรีย์ [20] ซึ่งระบบพลาสมาสามารถผลิตอนุมูลว่องไวจำนวนมาก เช่น อนุมูลไฮดรอกซิลเรดิคัล ($\text{OH}\cdot$) อนุมูลไฮโดรเปอร์ออกไซด์เรดิคัล ($\text{HO}_2\cdot$) อิเล็กตรอนอิสระ (e^-) ซุปเปอร์ออกไซด์ไอออน (O_2^-) และออกซิเจนไอออน (O^-) ซึ่งเป็นสารที่ชักนำให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ [21] จากรายงานการวิจัยที่ผ่านมาซึ่งประยุกต์ใช้กระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลวในการย่อยสลายไคโตซานซึ่งเป็นพอลิเมอร์ชนิดพอลิแซ็กคาไรด์ พบว่าความหนืดและน้ำหนักโมเลกุลของไคโตซานที่ผ่านการทรีทด้วยพลาสมาลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ผ่านการทรีท เนื่องจากเกิดการย่อยสลายโดยอนุมูลว่องไวไฮดรอกซิลเรดิคัลที่ผลิตได้จากกระบวนการพลาสมา นอกจากนี้ยังพบว่าความเป็นผลึกของไคโตซานถูกทำลายเปลี่ยนเป็นโครงสร้างอสัณฐาน [22-23] Pornsunthorntawe O., และคณะ [24] ได้ศึกษาการสลายตัวของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไคโตซานและโลหะโดยประยุกต์ใช้กระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลวพบว่าสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไคโตซานและโลหะที่เป็น Cu^{2+} และ Fe^{2+} ส่งเสริมให้อัตราการสลายตัวของไคโตซานเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ข้อดีของกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลวคือสามารถดำเนินการภายใต้อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ ดังนั้นกระบวนการพลาสมาจึงเป็นที่น่าสนใจสำหรับการประยุกต์ใช้ในการย่อยสลายพอลิเมอร์ชนิดพอลิแซ็กคาไรด์และในระดับอุตสาหกรรม นอกจากนี้พลาสมาวิทยุภาคของเหลวไม่จำเป็นต้องใช้สารเคมีที่รุนแรงจึงทำให้ไม่จำเป็นต้องมีการกำจัดสารเคมีที่หลงเหลือออกไป

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะประยุกต์ใช้งานพลาสมาวิทยุภาคของเหลวในการย่อยสลายเซลลูโลสเพื่อเตรียมน้ำตาลรีดิวซ์ โดยตัวแปรที่ศึกษา คือ เวลาในการย่อยสลาย ชนิดของตัวทำละลาย ความเข้มข้นของตัวทำละลาย และพลังงานที่ใช้ในการผลิตพลาสมา ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาเซลลูโลสผ่านการย่อยสลายโดยกระบวนการพลาสมาจะถูกนำไปวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์โดยวิธีการ DNS และโครงสร้างผลึกโดยเทคนิค XRD น้ำตาลรีดิวซ์ที่เตรียมได้จะถูกนำไปใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตเอทานอล นอกจากนี้แล้วการย่อยสลายเซลลูโลสเป็นน้ำตาลรีดิวซ์โดยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลวเป็นทางเลือกใหม่ที่สามารถนำมาทดแทนวิธีการดั้งเดิมคือการใช้สารเคมีและเอนไซม์ที่มีราคาแพง

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการเตรียมน้ำตาลรีดิวซ์จากเซลลูโลสโดยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลว
- 1.2.2 เพื่อศึกษาผลของสภาวะของพลาสมาที่มีต่อการย่อยสลายเซลลูโลส
- 1.2.3 เพื่อศึกษากลไกและอัตราการย่อยสลายตัวของเซลลูโลส

1.3 ขอบเขตโครงการ

- 1.3.1 ติดตั้งเครื่องกำเนิดพลาสมาวิทยุภาคของเหลว
- 1.3.2 เตรียมสารละลายเซลลูโลสน้ำหนัก 1 กรัม ในสารละลายกรด 100 มิลลิลิตร และนำไปย่อยสลายด้วยกระบวนการพลาสมา โดยมีตัวแปรที่ศึกษา ดังนี้
 - 1.3.2.1 ชนิดของสารละลายกรด คือ กรดซัลฟิวริก กรดไนตริก และกรดไฮโดรคลอริก
 - 1.3.2.2 ความเข้มข้นของสารละลายกรด คือ 0.02 0.04 และ 0.08 โมลาร์
 - 1.3.2.3 พลังงานของพลาสมาโดยปรับความถี่ของเครื่องกำเนิดพลาสมา คือ 15 22.5 และ 30 กิโลเฮิร์ตซ์
 - 1.3.2.4 อัตราส่วนเซลลูโลสต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยมวล คือ 1:0.05 1:0.075 1:0.1 และ 1:0.2
 - 1.3.2.5 เวลาที่ใช้ในการย่อยสลาย 0 ถึง 300 นาที
- 1.3.3 วิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลที่ได้หลังจากการย่อยสลายเซลลูโลสด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลว
 - 1.3.3.1 ตรวจวัดปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ด้วยเทคนิค DNS
 - 1.3.3.2 ตรวจวัดความเป็นผลึกด้วยเทคนิค XRD
- 1.3.4 ศึกษาากลไกและอัตราการย่อยสลายตัวของเซลลูโลส

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 กระบวนการเตรียมน้ำตาลรีดิวซ์แบบใหม่ที่พัฒนาได้สามารถนำไปทดแทนกระบวนการดั้งเดิม คือ กระบวนการทางเคมีและการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ที่มีต้นทุนสูง
- 1.4.2 น้ำตาลรีดิวซ์ได้จากกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลวสามารถไปผลิตเอทานอลซึ่งเป็นพลังงานทดแทนได้

1.5 สถานที่ในการดำเนินโครงการ

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

1.6 ระยะเวลาในการดำเนินโครงการ

เริ่มตั้งแต่ 14 กรกฎาคม 2558 ถึง 26 พฤษภาคม 2559

1.7 ขั้นตอนและแผนการดำเนินโครงการ

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนและแผนการดำเนินโครงการ

ลำดับ ที่	การดำเนิน โครงการ	ช่วงเวลา															
		ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.					
1.8.1	วางแผนการ ดำเนิน โครงการ	↔															
1.8.2	ศึกษา ค้นคว้า ข้อมูลใน การทำ โครงการ	↔	↔														
1.8.3	ทำการ ทดลอง		↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔					
1.8.4	วิเคราะห์ ผลการ ทดลอง										↔	↔					
1.8.6	สรุปผล การ ทดลอง													↔	↔		
1.8.7	ทำรูปเล่ม รายงาน													↔	↔	↔	

บทที่ 2

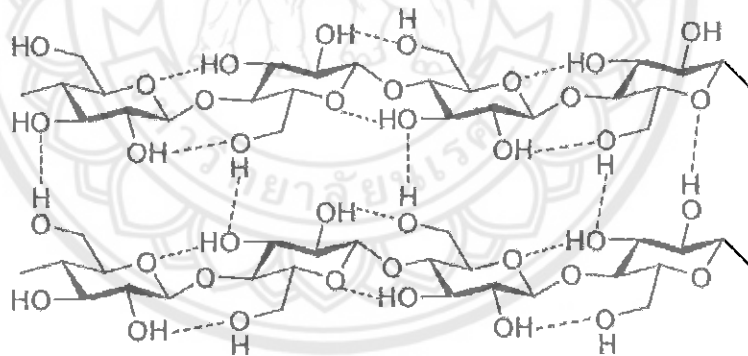
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เซลลูโลสและน้ำตาลรีดิวซ์

2.1.1 โครงสร้างของเซลลูโลสและน้ำตาลรีดิวซ์

เซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์ประเภทคาร์โบไฮเดรตโดยทั่วไปพบเป็นองค์ประกอบหลักของผนังเซลล์ของพืชทุกชนิดมากที่สุด ซึ่งทำหน้าที่ช่วยสร้างความแข็งแรงให้กับผนังเซลล์ของพืช และเซลลูโลสยังเป็นสารอินทรีย์ที่มีความอุดมสมบูรณ์ที่สุดในธรรมชาติ

เซลลูโลสเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ประกอบด้วยหน่วยของกลูโคส 2,000 – 4,000 หน่วย ที่แข็งแรง โดยหน่วยของกลูโคสทั้งหมดจะเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ β -1,4 ไกลโคซิดิก [25] ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ไม่ละลายในน้ำและละลายได้ยากในตัวทำละลายทั่วไป เนื่องจากมีโครงสร้างเป็นผลึกที่ซับซ้อนเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไฮโดรเจนและแรงแวนเดอร์วาลส์



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส [31]

เซลลูโลสที่ได้จากแหล่งที่มาและกรรมวิธีในการผลิตจะทำให้โครงสร้างการจัดเรียงตัวของโมเลกุลเป็นสายโซ่และคุณสมบัติแตกต่างกัน จึงแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ

โครงสร้างแบบผลึก

จะมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวของโมเลกุลเป็นสายโซ่แบบเป็นระเบียบจึงทำให้การย่อยสลายของโครงสร้างแบบผลึกจึงทำได้ยากกว่าโครงสร้างแบบอสัณฐาน ได้แก่ microcrystalline cellulose dissolving pulp และ cotton cellulose [26]

ตารางที่ 2.1 องศาของการพอลิเมอไรเซชันและความเป็นผลึกของเส้นใยเซลลูโลส

Fiber	Average Degree of Polymerization [27]	Average Crystallinity (%)
Cotton	9,000 - 15,000	73
Viscose rayon Regular	250 - 450	60
High tenacity	500 - 650	-
High-wet modulus	400 - 500	-
Wood pulp	600 - 1,500	35

โครงสร้างแบบอสัญฐาน

จะมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวของโมเลกุลเป็นสายโซ่ไม่มีความเป็นระเบียบ จึงทำให้สามารถย่อยสลายได้ง่าย เนื่องจากสารตั้งต้นสามารถแทรกเข้าไปทำปฏิกิริยาได้กับเซลลูโลสที่มีโครงสร้างแบบอสัญฐาน ดังแสดงในรูปที่ 2.2

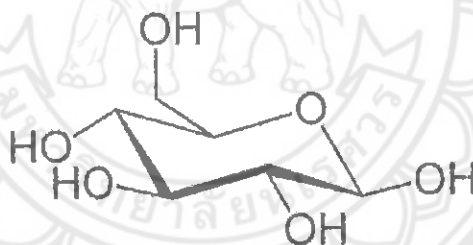


รูปที่ 2.2 โครงสร้างอสัญฐานและผลึกของเซลลูโลส [27]

ปัจจุบัน Microcrystalline cellulose ถูกนำมาใช้ในหลายด้านๆ ได้แก่ การปรุงยา เครื่องสำอาง และในอุตสาหกรรมเกี่ยวกับอาหาร เป็นต้น [28] ซึ่งผลิตมาจากแอลฟาเซลลูโลสที่ได้มาจากเยื่อไม้และฝ้าย โดยกระบวนการ Depolymerization จะได้ Microcrystalline cellulose นำไปทำแห้งก็จะได้เป็น Microcrystalline cellulose ที่มีลักษณะเป็นผงสีขาว ลักษณะโครงสร้างเป็นเซลลูโลสสายสั้นลง ซึ่งสามารถย่อยสลายกลายเป็นกลูโคสได้ โดยการย่อยสลายด้วยกรดหรือกระบวนการที่ใช้เอนไซม์ รูปแบบของ Microcrystalline cellulose ที่ผลิตขึ้นมาจำหน่ายมี 2 รูปแบบ คือ เซลลูโลสที่มีลักษณะเป็นผงละเอียดเหมือนแป้ง (Microcrystalline cellulose Powder) และเซลลูโลสที่มีลักษณะเป็นคอลลอยด์ (Microcrystalline cellulose Colloidal)

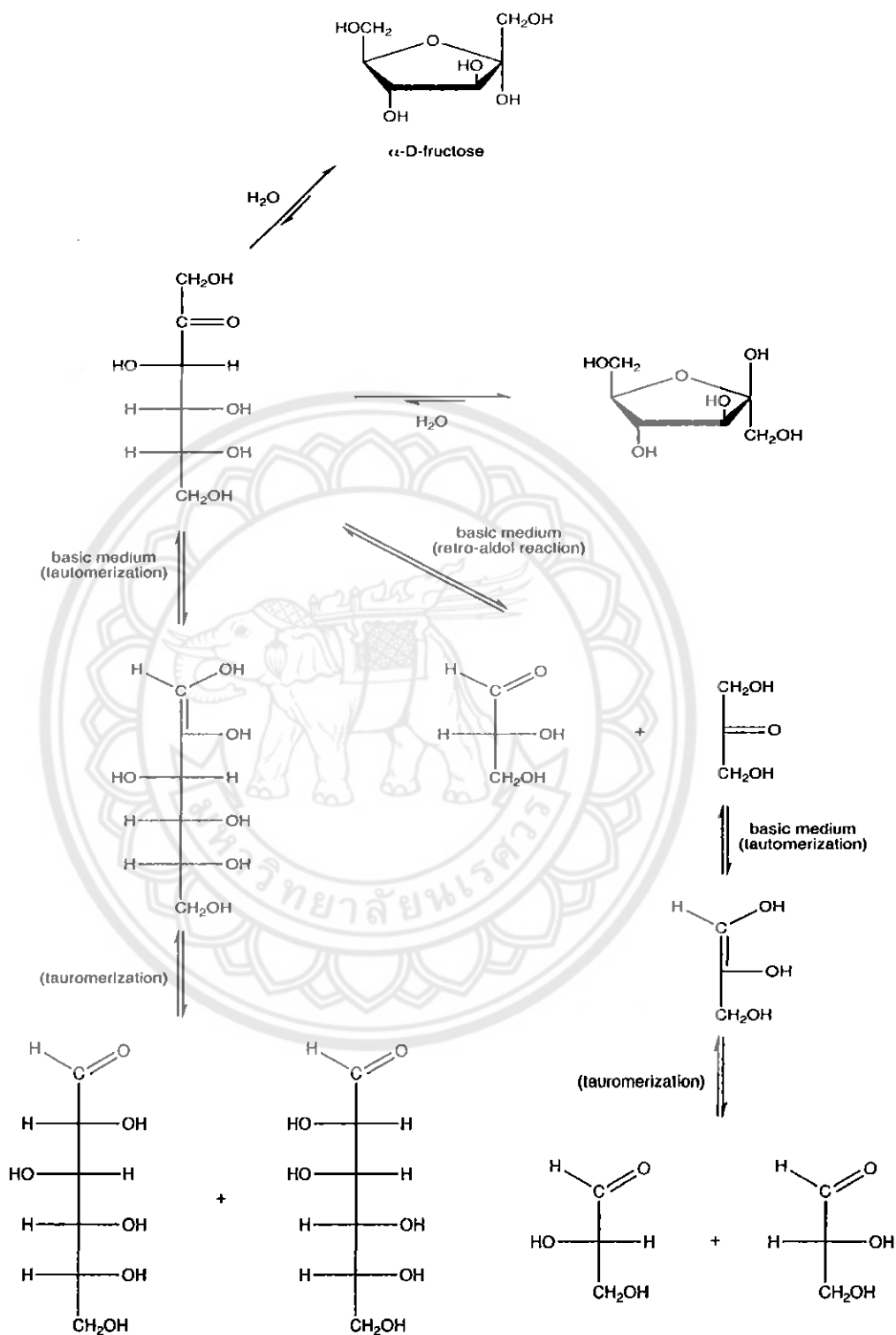
เซลลูโลสที่ได้จากการแบ่งตามความสามารถในการละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถแบ่งได้ 3 ชนิด คือ แอลฟา-เซลลูโลสเป็นเซลลูโลสที่ไม่สามารถละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 17.5 เปอร์เซ็นต์ เบต้า-เซลลูโลสเป็นเซลลูโลสที่สามารถละลายได้ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 17.5 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิห้องแต่สามารถตกตะกอนได้ง่ายในสารละลายที่มีสารละลายเป็นกรดและแกมมา-เซลลูโลสเป็นเซลลูโลสที่สามารถละลายได้ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 17.5 เปอร์เซ็นต์ และสารละลายกรดแต่สามารถตกตะกอนได้โดยใช้แอลกอฮอล์ [29]

กลูโคสเป็นคาร์โบไฮเดรตประเภทมอนอแซ็กคาไรด์พบมากที่สุด ในธรรมชาติ ซึ่งกลูโคสโดยทั่วไปจะอยู่ในรูปของน้ำตาลรีดิวิซ หรือ ดีกลูโคส โดยเซลลูโลสและกลูโคสองค์ประกอบของพอลิเมอร์ประเภทคาร์โบไฮเดรตเหมือนกัน เซลลูโลสสามารถเปลี่ยนแปลงไปเป็นกลูโคสได้ โดยเกิดจากกระบวนการทางเคมี คือ การย่อยสลายเซลลูโลสที่เป็นโมเลกุลของกลูโคสที่เชื่อมต่อกันเป็นสายยาว ให้เหลือเพียงกลูโคสแค่เพียงโมเลกุลเดียว จะได้โครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของกลูโคส [31]

น้ำตาลรีดิวิซคือน้ำตาลทั้งหมดที่มีความสามารถในการทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวิซเนื่องจากมีกลุ่มแอลดีไฮด์อิสระหรือกลุ่มคีโตน มอนแซ็กคาไรด์ทั้งหมดคือน้ำตาลรีดิวิซกับไดแซ็กคาไรด์ โอลิโกแซ็กคาไรด์และพอลิแซ็กคาไรด์บางตัว มอนแซ็กคาไรด์สามารถแยกออกได้เป็น 2 กลุ่มคือ แอลโดส ซึ่งมีกลุ่มแอลดีไฮด์และคีโตน ที่มีกลุ่มคีโตน คีโตนต้อง Tautomerize เป็นแอลโดสก่อนจึงจะสามารถทำหน้าที่เป็นน้ำตาลรีดิวิซได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 มอนแซ็กคาไรด์ที่พบมากในอาหารที่บริโภคเช่น กาแล็กโทส กลูโคส และฟรักโทส ทั้งหมดนี้คือน้ำตาลรีดิวิซ [50]



รูปที่ 2.4 แสดงอัลฟาดีฟรักโทสซึ่งมีกลุ่ม Hemiketal และทำปฏิกิริยากับน้ำซึ่งจะไปทำลายสายโซ่ โดยพื้นฐานแล้วจะถูกแปลงเป็นสารประกอบที่มีหมู่แอลดีไฮด์ [51]

2.1.2 คุณสมบัติของเซลลูโลสและน้ำตาลรีดิวิซ์

เซลลูโลสเป็นคาร์โบไฮเดรต ประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ โดยมีสูตรเคมีทั่วไป คือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ เป็นองค์ประกอบหลักที่สำคัญที่สุด สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้และย่อยสลายได้ ไม่เป็นมลพิษต่อมนุษย์ สัตว์ และสิ่งแวดล้อม โดยเซลลูโลสและน้ำตาลรีดิวิซ์สามารถนำมาผลิตเป็นสารเคมีและเชื้อเพลิงเพื่อเป็นพลังงานทดแทนได้

2.1.3 ประโยชน์ของเซลลูโลส [30]

เซลลูโลสเป็นวัสดุที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้หลายด้าน เป็นวัสดุผสมในงานก่อสร้าง ยา อาหาร และผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง และสามารถนำมาดัดแปรทางเคมีเพื่อให้อยู่ในรูปของการนำไปใช้งานได้อย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรมที่แตกต่างกัน เช่น เซลลูโลสอะซิเตดใช้ในการเคลือบสีและทำเยื่อ เซลลูโลสไนเตรทใช้ในการทำเยื่อและระเบิด เซลลูโลสแซนเทตใช้ในการสิ่งทอ คาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลสใช้ในการเคลือบสี ทำสี กาว และอุตสาหกรรมเกี่ยวกับยา เมทิลเซลลูโลสใช้ในอุตสาหกรรมฟิล์มสิ่งทอ อาหาร และบุหรี่ยาสูบ เอทิลเซลลูโลสใช้ในอุตสาหกรรมเกี่ยวกับยา และไฮดรอกซีเอทิลเซลลูโลสใช้ในอุตสาหกรรมฟิล์ม สี และเครื่องสำอาง

2.2 การย่อยสลายเซลลูโลส

เซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์แบบเส้นตรงประกอบด้วยหน่วยย่อยที่เป็นกลูโคสจำนวนมากเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ β -1,4 กลูโคซิดิก [31] เนื่องจากภายในโมเลกุลประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมาก ทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจน ภายในโมเลกุลของเซลลูโลสจึงทำให้โครงสร้างภายในของเซลลูโลสแข็งแรงเป็นอย่างมาก จึงไม่สามารถละลายน้ำและละลายในสารอินทรีย์ทั่วไปได้ จึงเป็นปัญหาในการละลายเซลลูโลสและไฮโดรไลซิสเป็นกลูโคส สำหรับในไฮโดรไลซิสมิ 2 วิธี ที่ได้รับความสนใจและนำมาพิจารณาในการย่อยสลายเซลลูโลส คือ การย่อยสลายด้วยกรด และเอนไซม์

2.2.1 การไฮโดรไลซิสเซลลูโลสด้วยกรด

การย่อยสลายด้วยกรดโดยทั่วไปจะใช้กรดประเภทเอกพันธ์ เช่น กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) กรดไนตริก (HNO_3) กรดเปอร์คลอริก ($HClO_4$) กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) กรดไฮโดรคลอริก (HCl) กรดไฮโดรฟลูออริก (HF) และกรดฟอร์มิก (FA) โดยกรดเหล่านี้มีราคาที่เหมาะสมและเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดี แต่ในทางปฏิบัตินั้นสามารถควบคุมได้ยากเนื่องจากมีปัญหาเกี่ยวกับการกัดกร่อนของถังปฏิกรณ์ น้ำเสียจากการทรีทและนำกลับมารีไซเคิลได้ไม่ดี และต้องใช้อุณหภูมิสูงในการทำปฏิกิริยา

[31] โดยใช้อุณหภูมิมากกว่า 180 องศาเซลเซียส ซึ่งจะนำไปสู่การย่อยสลายน้ำตาลกลูโคส [32] กลไกการย่อยสลายเซลลูโลสด้วยกรดดังแสดงในรูปที่ 2.5 จะทำให้พันธะไกลโคซิดิกชนิด 1,4-ปีต้าของกลูโคส ในโครงสร้างเซลลูโลสแตกออกแล้วเกิดเป็นน้ำตาลกลูโคสหรือเป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลในลักษณะสายโซ่ที่สั้นลงแต่ยังคงมีโครงสร้างพื้นฐานเหมือนเดิม คือบริเวณปลายของสายโซ่เซลลูโลสจะเป็นหมู่แอลดีไฮด์ที่มีสมบัติเป็นตัวรีดิวซ์ (reducing agent) ที่เกิดปฏิกิริยากับกรดได้อย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดการสลายพันธะแบบสุ่ม ในการย่อยสลายเซลลูโลสด้วยกรดเจือจางขณะร้อนจะทำให้เซลลูโลสที่อยู่ในลักษณะที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ (hydrocellulose) กลายเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่ละลายน้ำได้ (soluble polysaccharide) จากนั้นจะถูกย่อยสลายต่อไปเป็นน้ำตาลกลูโคส จากรายงานการศึกษา และเปรียบเทียบประสิทธิภาพการย่อยเซลลูโลสด้วยกรดชนิดต่างๆ เป็นดังนี้ [46]

2.2.1.1 การย่อยเซลลูโลสด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น

การย่อยเซลลูโลสด้วยกรดซัลฟิวริกความเข้มข้นมากกว่า 70 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิห้อง จะทำให้โครงสร้างผลึกของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในธรรมชาติจะถูกย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์ แต่วิธีการนี้ทำได้ยากในทางการค้าเพราะกรดซัลฟิวริกเข้มข้นมีราคาสูงและจำเป็นต้องมีขั้นตอนของการหมักเวินใช้งาน [46]

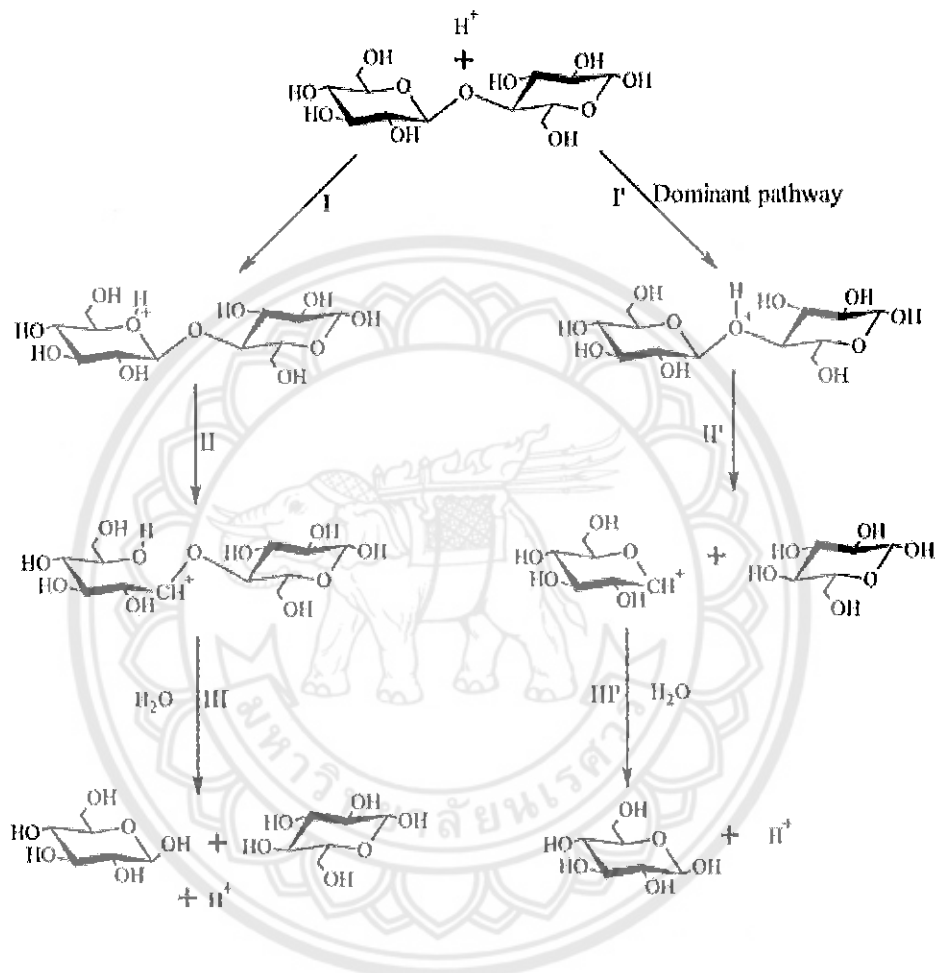
2.2.1.2 การย่อยเซลลูโลสด้วยกรดซัลฟิวริกเจือจาง

กรดซัลฟิวริกเจือจางนิยมนำมาใช้ในการย่อยสลายวัสดุกลุ่มลิกโนเซลลูโลส แต่มักมีข้อจำกัดคือผลผลิตน้ำตาลที่ได้มีปริมาณต่ำ แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มอุณหภูมิ ความดันและความเข้มข้นของกรดสามารถเพิ่มอัตราการย่อยสลายให้ได้ปริมาณกลูโคสเพิ่มขึ้นได้ ทั้งนี้ควรคำนึงถึงจุดที่เหมาะสมของความเข้มข้นของกรดและเวลาที่ใช้ในการย่อยสลายด้วย [46]

2.2.2 การไฮโดรไลซิสเซลลูโลสด้วยเอนไซม์ [31]

การย่อยสลายด้วยเอนไซม์ เป็นเทคโนโลยีทางเลือกที่มักจะใช้ในไฮโดรไลซิสเซลลูโลส โดยเอนไซม์ที่ใช้ชื่อว่า เซลลูเลส (cellulases) สามารถได้มาจาก *Trichoderma reesei* *Aspergillus niger* *Aspergillus nidulans* และ *Penicillium funiculosum* ซึ่งได้รับเลือกมากที่สุดและดีที่สุดสำหรับการไฮโดรไลซิสเซลลูโลสไปเป็นน้ำตาลกลูโคสที่อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาที่ต่ำ อย่างไรก็ตามการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์ของเซลลูโลสเป็นกระบวนการที่ช้า ซึ่งจะทำให้ใช้เวลานานเพื่อให้ได้ร้อยละผลได้ของน้ำตาลกลูโคสที่น่าพอใจ ก่อนการไฮโดรไลซิสของเซลลูโลสด้วยเอนไซม์ไปเป็นน้ำตาล

กลูโคสต้องมีการพรีทริทเพื่อนำเอาเซลลูเลสที่ไม่สามารถย่อยสลายได้หรือย่อยสลายได้ยากออก แต่ข้อเสียของการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์ คือ เซลลูเลสมีราคาแพงและอัตราการไฮโดรไลซิสสูงจะต้องเพิ่มปริมาณของเซลลูเลส



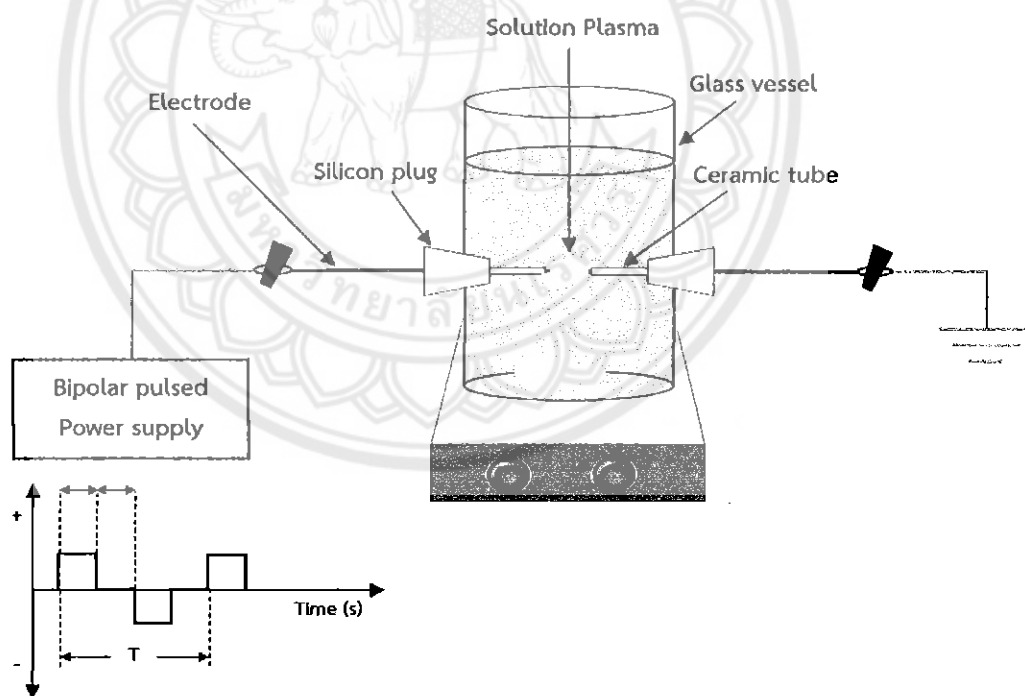
รูปที่ 2.5 กลไกการไฮโดรไลซิสเซลลูโลสด้วยกรด [49]

2.3 กระบวนการพลาสมาวิภาคของเหลว (Solution Plasma Process) [34]

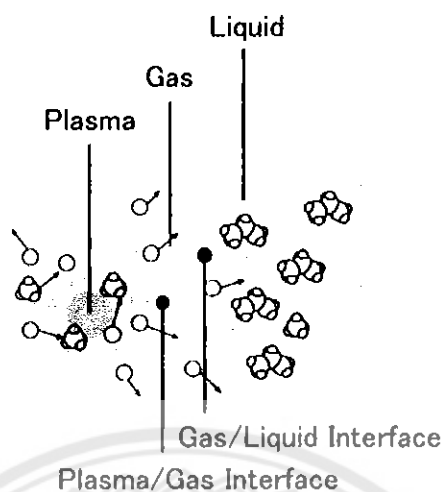
พลาสมาวิภาคของเหลวเป็นเทคโนโลยีใหม่ที่มีประสิทธิภาพและนำไปใช้อย่างแพร่หลาย เช่น การสังเคราะห์วัสดุคาร์บอนระดับนาโน การปรับปรุงพื้นผิวของพอลิเมอร์ การบำบัดน้ำเสีย และการย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ ซึ่งข้อดีของกระบวนการพลาสมาวิภาคของเหลวคือการผลิตอนุภาคที่มีความว่องไวโดยเฉพาะหมู่ไฮดรอกซิลเรดิคัล ($\text{OH}\cdot$) กระบวนการพลาสมาวิภาคของเหลวสามารถเกิดขึ้นภายใต้อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ และไม่ต้องใช้สารเคมีที่มีความรุนแรง ระบบของพลาสมาวิภาคของเหลวจะแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนแรกพาวเวอร์ซัพพลายแบบ Bipolar pulsed ทำหน้าที่จ่ายกระแสไฟฟ้าที่มีทิศทางไหลสลับขั้วบวกและลบไปยังส่วนที่สองคือ

ถึงปฏิกรณ์พลาสมาที่ทำจากแก้วทรงกระบอกทั้งสองด้านจะติดตั้งขั้วอิเล็กโทรดที่หุ้มด้วยเซรามิกเพื่อป้องกันความร้อนโดยอิเล็กโทรดทั้งสองข้างจะต้องมีระยะห่างประมาณ 0.2 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.6

หลักการทำงานของพลาสมาวิทยุภาคของเหลว คือ พาวเวอร์ซัพพลายแบบ Bipolar pulsed จะส่งกระแสไฟฟ้าผ่านขั้วอิเล็กโทรดที่ทำให้เกิดความต่างศักย์ขึ้นระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองข้างทำให้เกิดพลาสมาซึ่งเกิดจากการแตกตัวของแก๊สกลายเป็นอนุภาคที่มีประจุหรือไอออน พลาสมาที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นแสงสีขาวหรือม่วง พลาสมาจะกระตุ้นสารหรืออนุภาคทำให้เกิดหมู่วงไวที่สามารถเข้าทำปฏิกิริยาได้เร็วและถูกหมู่วงไวที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนตัวไปสู่พื้นที่ที่มีหมู่วงไว้น้อยกว่าเนื่องจากการถ่ายโอนมวล จากนั้นสารละลายจะแพร่เข้ามาในพลาสมาและถูกกระตุ้นให้แตกตัวเป็นกลายเป็นหมู่วงไวอย่างต่อเนื่อง ดังแสดงในรูปที่ 2.7 โดยการผลิตพลาสมาโดยแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ใช้จะขึ้นอยู่กับค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายภายในถึงปฏิกรณ์พลาสมา



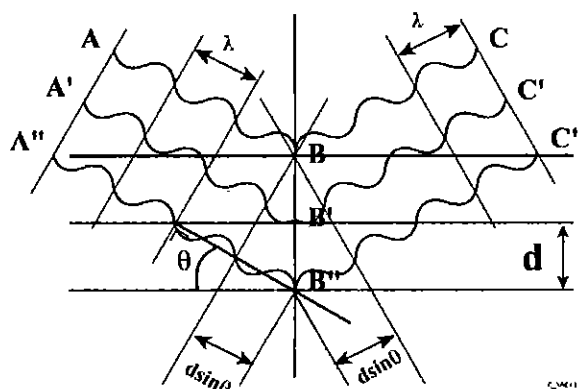
รูปที่ 2.6 ไดอะแกรมของระบบพลาสมาวิทยุภาคของเหลว [33]



รูปที่ 2.7 แบบจำลองของพลาสมาวิภาคของเหลว [34]

2.4 การวิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วยเทคนิค XRD

เทคนิค XRD หรือ X-Ray Diffraction เป็นเทคนิควิเคราะห์ที่อาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ซึ่งเป็นรังสีที่มีพลังงานมากและอำนาจในการทะลวงสูงจะมีความยาวคลื่นอยู่ที่ 0.01 ถึง 10 นาโนเมตร รังสีเอ็กซ์จะถูกยิงไปกระทบตัวอย่างทำให้เกิดการเลี้ยวเบนที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับความเป็นผลึกของตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 2.8 จากนั้นตัวรับสัญญาณจะตรวจวัดรังสีที่เกิดจากการเลี้ยวเบนของตัวอย่างด้วยมุมต่างๆ และนำข้อมูลไปวิเคราะห์ได้ทั้งสารประกอบ และความเป็นผลึก แต่เทคนิค XRD นั้นมีข้อเสียคือไม่สามารถใช้กับชิ้นงานที่เป็นโครงสร้างอสัณฐานเพื่อหาปริมาณหรือองค์ประกอบได้เนื่องจากรังสีเอ็กซ์ที่ถูกยิงออกไปจะไม่เกิดการเลี้ยวเบนทำให้ตัวรับสัญญาณไม่สามารถตรวจวัดแสงเลี้ยวเบนได้



รูปที่ 2.8 ภาพแสดงลักษณะการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในโครงสร้างผลึก

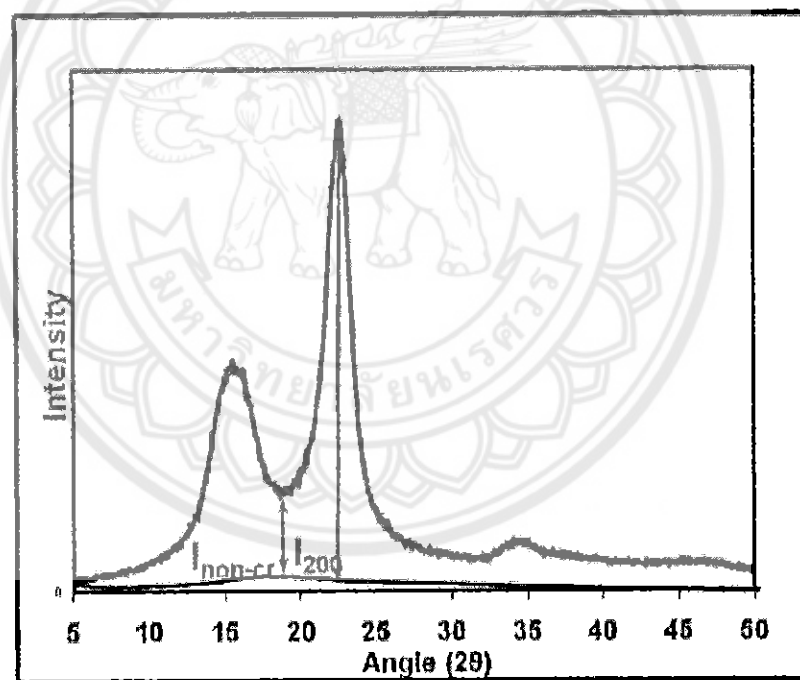
วิธีนี้ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางเพื่อใช้สำหรับการศึกษาความเป็นผลึกของเซลลูโลส ในวิธีการนี้ได้มีการคำนวณค่าความเป็นผลึกของเซลลูโลสจากอัตราส่วนระหว่างจุดสูงสุดของความเข้มแสงที่สะท้อนของความเข้มผลึกและความเข้มแสงที่แสดงความเป็นอสัณฐานตามสมการที่ 2.1

$$C = 100 \times \frac{I_{200} - I_{non-cr}}{I_{200}} [\%] \quad (2.1)$$

โดยที่ C คือ ค่าความเป็นผลึกในหน่วยเปอร์เซ็นต์ นิยามจาก Segal [52]

I_{200} คือ ค่าความเข้มแสงที่สะท้อนสูงสุดในตัวอย่างของ Miller indices 200 ที่ 2θ อยู่ระหว่าง 22 ถึง 24 องศา ดังแสดงในรูปที่

I_{non-cr} คือ ค่าความเข้มแสงที่สะท้อนของการเลี้ยวเบนของวัสดุที่ไม่เป็นผลึกที่มุม 2θ เท่ากับ 18 องศา ดังแสดงในรูปที่



รูปที่ 2.9 ตัวอย่าง X-ray diffraction spectra ที่แสดงวิธีการใช้จุดสูงสุดของเซลลูโลส [52]

2.5 การวัดปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ด้วยเทคนิค DNS [35]

การตรวจวัดน้ำตาลรีดิวซ์ด้วยเทคนิค DNS โดยใช้สาร Dinitrosalicylic acid Rochelle salt Phenol Sodium bisulfite และ Sodium hydroxide โดยที่สารต่างๆจะมีหน้าที่ต่างกัน Rochelle salt ทำหน้าที่ป้องกันออกซิเจนละลายเข้ากับสารรีเอเจนต์ Phenol ทำหน้าที่เพิ่มความเข้มของสีที่เกิดขึ้น Sodium bisulfite ทำหน้าที่รักษาเสถียรภาพของสีที่เกิดจาก Phenol ซึ่งในการทดลองจะมี

การสูญเสียน้ำตาลกลูโคสเนื่องจากถูกทำลายโดยกระบวนการออกซิเดชัน Modified reagent ที่มี ส่วนผสมของ Dinitrosalicylic acid 1 เปอร์เซ็นต์ Phenol 0.2 เปอร์เซ็นต์ Sodium bisulfite 0.5 เปอร์เซ็นต์ Sodium hydroxide 1 เปอร์เซ็นต์ ได้ถูกนำมาทดลองในการทดลอง Modified reagent จะต้องเพิ่ม Rochelle salt วันต่อวัน เพื่อไม่ให้ตัวอย่างเปลี่ยนสี และจะมีปัญหาเกี่ยวกับการออกซิเดชันกับซัลไฟต์ซึ่งสามารถแก้ปัญหาได้โดยการเพิ่มซัลไฟต์เข้าไปในรีเอเจนต์ และในการทดลองได้ทดลองปรับเปลี่ยนส่วนผสมของรีเอเจนต์ พบว่าความเข้มข้นของ Sulfite จะเพิ่มความเข้มของสี ได้มากที่สุดโดยไม่ทำลายน้ำตาลกลูโคสที่ 0.05 เปอร์เซ็นต์ Sodium hydroxide ทำหน้าที่เพิ่มความเข้มสีและทำลายน้ำตาลกลูโคสในเวลาเดียวกันที่ความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์ จะเพิ่มความเข้มสีมากที่สุดโดยไม่ทำลายน้ำตาลกลูโคส ความเข้มข้นของ Phenol ที่ 0.2 เปอร์เซ็นต์ จะเพิ่มความเข้มของสี ได้มากที่สุด และไม่มีผลต่อการทำลายน้ำตาลกลูโคส ความเข้มข้นของ Dinitrosalicylic acid ที่ 1 เปอร์เซ็นต์ จะเพิ่มความเข้มสีได้มากที่สุด และไม่มีผลต่อการทำลายน้ำตาลกลูโคสเช่นเดียวกับ phenol ในบางกรณี เพื่อความสะดวกสบาย เช่น การทดสอบเซลล์เลสเพื่อสร้างน้ำตาลกลูโคสใน carboxymethyl-cellulose-citrate จะใช้ Modified reagent ผสมกับ Rochelle salt 20 เปอร์เซ็นต์ เพื่อป้องกันรีเอเจนต์เกิดกระบวนการออกซิเดชัน โดยไม่ต้องเติม Rochelle salt หลังจากเกิดปฏิกิริยาแล้ว แต่ว่าหลังจากเกิดปฏิกิริยาแล้วสารตัวอย่างจะไม่สามารถเก็บไว้ได้เป็นเวลานาน ซึ่งต่างจากการเติม Rochelle salt หลังเกิดปฏิกิริยา

2.6 แนวคิดของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี ค.ศ. 2011 Fang Z., และคณะ [40] ได้ทำการศึกษาการเตรียมกลูโคสจากการไฮโดรไลซิส เซลลูโลสที่อุณหภูมิ 423 K ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาในรูปแบบอนุภาคนาโน hydrotalcite ที่ถูกสังเคราะห์ ด้วย $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ และ $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ โดยในการทดลองได้ทำการปรับสภาพเซลล์เลสด้วยความร้อนจากไมโครเวฟ จากนั้นนำไปไฮโดรไลซิสเซลล์เลสด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นเวลา 30 ชั่วโมง พบว่าได้ค่าร้อยละผลได้ของน้ำตาลกลูโคส 47.4 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 24 ชั่วโมง อุณหภูมิ 423 K จาก การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า อนุภาคนาโน hydrotalcite ที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการไฮโดรไลซิส ด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีประสิทธิภาพที่ดีและตัวเร่งปฏิกิริยามีความเสถียรสำหรับการไฮโดรไลซิส ทั้งนี้เนื่องจากหลังจากการปรับสภาพและไฮโดรไลซิสด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้เกิดแคลเซียมคาร์บอเนตที่ตกตะกอนในสารละลายจากการที่ไฮดรอกซิลไอออนแตกตัวเพิ่มขึ้นแทนที่คาร์บอเนต ไอออนในตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งไฮดรอกซิลไอออนจะส่งเสริมการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

ปี ค.ศ. 2012 Zhang F., และ Fang Z., [39] ได้ศึกษาการไฮโดรไลซิสเซลลูโลสให้เป็นน้ำตาลกลูโคส โดยใช้ CaFe_2O_4 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกสังเคราะห์ด้วย $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ และ $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ โดยในการทดลองได้นำไมโครเซลลูโลสมาปรับสภาพด้วย [AMIM]Cl (1-allyl-3-methylimidazolium chloride) และไฮโดรไลซิสในตัวเร่งปฏิกิริยา CaFe_2O_4 ด้วยปริมาณของเซลลูโลสที่ถูกปรับสภาพ 0.45 กรัม ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 กรัม และน้ำ 150 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 423 K เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการไฮโดรไลซิสไมโครเซลลูโลสและการไฮโดรไลซิสร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวที่ผ่านการปรับสภาพ พบว่าการไฮโดรไลซิสไมโครเซลลูโลสโดยปราศจากตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ทำให้เกิดกลูโคส สำหรับการไฮโดรไลซิสร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวที่ผ่านการปรับสภาพได้ค่าร้อยละผลได้เป็น 49.8 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่าการปรับสภาพเซลลูโลสด้วย [AMIM]Cl และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CaFe_2O_4 ในการไฮโดรไลซิสส่งเสริมทำให้ร้อยละผลได้ของน้ำตาลเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการปรับสภาพเซลลูโลสด้วย [AMIM]Cl และการบดเป็นส่วนช่วยในการส่งเสริมการทำลายผลึกของเซลลูโลสเพื่อทำให้น้ำและตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าถึงเซลลูโลสเพื่อทำปฏิกิริยาและสลายพันธะได้มากขึ้น

ปี ค.ศ. 2012 Morales-de la Rosa S., และคณะ [38] ได้ทำการศึกษาการเตรียมกลูโคสจากการย่อยสลายเซลลูโลส โดยการนำเซลลูโลสละลายในสารละลายไอออนิก 1-butyl-3-methylimidazolium chloride ([BMIM]Cl) ที่อุณหภูมิ 408 K เป็นเวลา 15 นาที และทำการไฮโดรไลซิสด้วยกรดไฮโดรคลอริก ที่อุณหภูมิ 378 K เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นทำการวัดปริมาณน้ำตาลกลูโคสด้วย HPLC พบว่าได้ค่าร้อยละผลได้ของน้ำตาลกลูโคสเมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์อื่นที่ไม่ต้องการ 99.6 เปอร์เซ็นต์ จากการศึกษาที่แสดงให้เห็นว่าเซลลูโลสละลายในสารละลายไอออนิก [BMIM]Cl ก่อนนำไปไฮโดรไลซิสจะทำให้ได้ค่าร้อยละผลได้ของน้ำตาลกลูโคสเมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์อื่นที่ไม่ต้องการสูงโดยใช้เวลาเพียง 3 ชั่วโมง โดยประมาณ ทั้งนี้เนื่องจากการศึกษาพบว่าธรรมชาติของสารละลาย [BMIM]Cl สามารถส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้

ปี ค.ศ. 2013 Ni J., และคณะ [36] ได้ทำการศึกษาวิธีการผลิตกลูโคสจากเซลลูโลสแบบสองขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกเป็นการปรับสภาพเซลลูโลสเพื่อลดความเป็นผลึกโดยการนำ MCC (Microcrystalline cellulose) จำนวน 30 กรัม ละลายกรดฟอสฟอริกความเข้มข้น 85 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร 200 มิลลิลิตร เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จนกระทั่งเซลลูโลสละลายเป็นสารละลาย จากนั้นนำไปให้ความร้อนที่ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ถึง 4 ชั่วโมง และเติมเอธานอล ปริมาตร 600

มิลลิลิตร ให้เกิดตะกอนเซลลูโลสสีขาวและนำไปล้างกรดฟอสฟอริกออกด้วยน้ำกลั่นประมาณ 3 ครั้ง นำตัวอย่างที่ได้ไปกรองและอบด้วยสุญญากาศที่ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ตะกอนที่ได้จะเป็นผง เรียกว่า cellulose oligomer-X (X เป็นเวลาที่ทำการ Depolymerized ในกรดฟอสฟอริก ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส) และจากนั้นขั้นที่สองจะนำ oligomer-X จำนวน 5 กรัม ไปไฮโดรไลซิส ด้วยกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.04 โมลาร์ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากผลที่ได้พบว่าการไฮโดรไลซิสเซลลูโลสที่ไม่ผ่านการปรับสภาพจะได้ร้อยละผลได้ของน้ำตาลกลูโคส 13.7 เปอร์เซ็นต์ แต่สำหรับเซลลูโลสที่ผ่านการปรับสภาพก่อนนำไปไฮโดรไลซิส พบว่าได้ร้อยละผลได้ของน้ำตาลกลูโคสเพิ่มขึ้นเป็น 57.8 เปอร์เซ็นต์ จากการศึกษาชี้ให้เห็นว่าการปรับสภาพเซลลูโลสก่อนการไฮโดรไลซิสจะส่งผลต่อร้อยละผลได้ของน้ำตาลกลูโคส เนื่องจากการปรับสภาพจะเป็นการลดความเป็นผลึกและทำให้ความยาวของสายโซ่เซลลูโลสลดลง โดยการละลายในการกรดและนำไปตกตะกอนใหม่ซึ่งความเป็นผลึกและระดับการ Depolymerized ของเซลลูโลสมีผลต่อร้อยละผลได้ของน้ำตาลกลูโคสที่ได้จาก MCC

ปี ค.ศ.2013 Pornsunthorntawe O., และคณะ [24] ได้ทำการศึกษาการสลายตัวของสารประกอบเชิงซ้อนที่ประกอบด้วยโคโคซานและโลหะด้วยกระบวนการพลาสมาวิภาคของเหลว สารประกอบเชิงซ้อนของโคโคซานและโลหะจะสลายตัวภายใต้สภาวะที่เป็นกรดเจือจางด้วยกระบวนการพลาสมาโดยการเติมโลหะ Ag^{2+} Zn^{2+} Cu^{2+} และ Fe^{3+} ในสารละลายโคโคซานซึ่งมีอัตราส่วนเชิงโมลของโลหะต่อโคโคซานเท่ากับหนึ่งต่อแปด จากการทดลองพบว่าอัตราการสลายตัวจะขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่อยู่ในสารประกอบเชิงซ้อนโคโคซาน สารประกอบเชิงซ้อนโคโคซานที่ประกอบด้วย Cu^{2+} และ Fe^{3+} จะส่งเสริมอัตราการสลายตัวของโคโคซาน อย่างไรก็ตามสารประกอบเชิงซ้อนที่ประกอบด้วย Ag^{2+} และ Zn^{2+} ไม่ส่งเสริมอัตราการสลายตัวเมื่อเทียบกับสารละลายโคโคซานที่ไม่มีโลหะ นอกจากนี้ยังพบว่าโคโคซานที่ผ่านการย่อยสลายด้วยกระบวนการพลาสมาได้ผลิตภัณฑ์เป็นโคโคซานที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ โดยผลิตภัณฑ์ที่ละลายน้ำได้จะเป็นโคโคซานที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่ประกอบด้วยโคโคซานโอลิโกเมอร์ จากการเปรียบเทียบกับกระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยกรดเพียงอย่างเดียวพบว่ากระบวนการพลาสมาวิภาคของเหลวจะส่งเสริมประสิทธิภาพการสลายตัวของโคโคซานมากกว่า

ปี ค.ศ.2014 Lee H., และคณะ [41] ได้ศึกษาการย่อยสลายเซลลูโลสที่มีไอออนที่ละลายในน้ำให้เป็นน้ำตาลกลูโคส โดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดแบบต่างๆ เช่น H_3PO_3 H_2SO_4 $AC-SO_3H$

Amberlyst-15 และ Nafion-NR50 ทำการละลายเซลลูโลสกับ dimethylimidazolium methylphosphite กลายเป็นเซลลูโลสที่มีไอออน จากนั้นทำการสลายเซลลูโลสโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จะได้ร้อยละผลได้ของน้ำตาลกลูโคส 14.6 เปอร์เซ็นต์และทำการเพิ่มร้อยละผลได้ของเซลลูโลสโดยการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น sulfonated active carbon (AC-SO₃H) ทำการย่อยสลายที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 ชั่วโมง จะได้ร้อยละผลได้ของน้ำตาลกลูโคส 42.4 เปอร์เซ็นต์ และ 53.9 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าการสลายตัวของเซลลูโลสที่มีไอออน โดยที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีการปล่อยสารประกอบ dimethylimidazolium methylphosphite ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ ในขณะที่การเติมตัวเร่ง sulfonated active carbon จะได้ร้อยละผลได้ของน้ำตาลกลูโคสที่ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์เนื่องจากทำให้หมู่ฟอสเฟตถูกปล่อยออกมาอย่างรวดเร็วกว่า จากการศึกษาพบว่าเซลลูโลสที่มีไอออนแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็น sulfonated active carbon จะได้น้ำตาลกลูโคสมากกว่าแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่นๆ

ปี ค.ศ.2014 Hello K.M., และคณะ [42] ได้ทำการศึกษาการสลายตัวของเซลลูโลสโดยการใช้ Salicylaldehyde phenylhydrazone เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งในการทดลองได้ทำการเปลี่ยนรูปไปเป็นซัลฟาไฮดริลจากนั้นนำ PHMP มาทำปฏิกิริยากับซัลฟาไฮดริลจากรูปที่เป็นซัลฟาไฮดริลก็จะเป็น RHPHMP ที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา นำไปตรวจวัดด้วย BET จะได้พื้นที่ผิวเท่ากับ 194 ตารางเมตร นำไปวิเคราะห์ด้วย EDX จะพบไนโตรเจนประกอบอยู่ในโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยา และนำไปวิเคราะห์ด้วย FT-IR spectroscopy จะพบโครงสร้าง -NH และ C=N บนตัวเร่งปฏิกิริยา ประสิทธิภาพของ RHPHMP สำหรับการสลายเซลลูโลสทำให้ได้ร้อยละผลได้ของน้ำตาลกลูโคสสูงสุด 82 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ในเวลา 14 ชั่วโมง จากการศึกษาที่สรุปได้ว่าการสลายเซลลูโลสด้วย RHPHMP เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำให้ได้น้ำตาลกลูโคสมากขึ้น อีกทั้งตัวเร่งปฏิกิริยานี้สามารถเตรียมได้ง่าย มีความเสถียรระหว่างการย่อยสลายและสามารถใช้งานได้หลายครั้งไม่ทำให้ประสิทธิภาพลดลง

ในปี ค.ศ. 2014 Chimentao R.J., และคณะ [43] ได้ทำการศึกษาการไฮโดรไลซิสของเซลลูโลสที่ทำการพรีทรีทด้วยกรดเจือจางภายใต้ความร้อนที่รุนแรง ซึ่งในการทดลองจะทำการพรีทรีทโดยใช้กรด 2 ชนิด คือ กรดซัลฟิวริกและกรดออกซาลิก จากนั้นจะทำการไฮโดรไลซิสในเตาอบและไมโครเวฟ โดยจะทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการไฮโดรไลซิสของเซลลูโลสที่ทำการพรีทรีท

ด้วยกรดเจือจาง 2 ชนิดนี้และการไฮโดรไลซิสในเตาอบและไมโครเวฟ พบว่าร้อยละผลได้ของกลูโคส เมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการของการไฮโดรไลซิสของเซลลูโลสที่ทำการทรีทด้วยกรดซัลฟิวริกมีค่าสูงกว่าการไฮโดรไลซิสของเซลลูโลสที่ทำการพรีทรีทด้วยกรดออกซาลิก เนื่องจากกรดซัลฟิวริกจะไปทำลายโครงสร้างความเป็นผลึกของเซลลูโลส ในขณะที่กรดออกซาลิกไปทำลายโครงสร้างออสัณฐานของเซลลูโลสและโครงสร้างที่เป็นผลึกไม่ได้ถูกทำลายเลยและการไฮโดรไลซิสของเซลลูโลสที่ถูกกระตุ้นด้วยความร้อนจากไมโครเวฟจะทำได้ดีกว่าเตาอบ ซึ่งจะเห็นว่าการไฮโดรไลซิสของเซลลูโลสที่ทำการทรีทด้วยกรดซัลฟิวริก 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ไฮโดรไลซิสในไมโครเวฟจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีองค์ประกอบของคาร์บอนประมาณ 900 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ในขณะที่ไฮโดรไลซิสในเตาอบจะได้ค่าผลิตภัณฑ์ที่มีองค์ประกอบของคาร์บอนรวมประมาณ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากความร้อนของไมโครเวฟช่วยทำให้ประสิทธิภาพในการสัมผัสกันระหว่างกรดกับสารตั้งต้นที่เป็นของแข็งจึงทำให้ได้ร้อยละผลได้ของน้ำตาลกลูโคสเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการไฮโดรไลซิสที่ทำการพรีทรีทด้วยกรดซัลฟิวริกและทำการไฮโดรไลซิสในไมโครเวฟมีประสิทธิภาพในการทำลายโครงสร้างความเป็นผลึกของเซลลูโลสได้ดีกว่า โดยมีปัจจัยที่ส่งผลต่อปฏิกิริยา คือ ชนิดของกรด อุณหภูมิ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา และการใช้เตาอบและไมโครเวฟระหว่างกระบวนการไฮโดรไลซิส

ปี ค.ศ.2015 Li X., และคณะ [32] ได้ศึกษาการปรับสภาพเซลลูโลสเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายเซลลูโลสให้เป็นน้ำตาลกลูโคส โดยในการทดลองได้ละลายเซลลูโลส จนได้สารละลายเข้มข้น 50 กรัมต่อลิตร ในโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 5.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เติมกรดไฮโดรคลอริก 0.06 โมลาร์ เพื่อให้สารละลายอยู่ในรูปของเซลลูโลสไฮโดร-เจล ทดลองภายใต้การฉายรังสีไมโครเวฟที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที พบว่าสารละลายเซลลูโลสไฮโดรเจลในกระบวนการไฮโดรไลซิสภายใต้รังสีไมโครเวฟจะทำให้ไฮโดรเจนไอออนและคลอไรด์ไอออนกระจายตัวได้ง่ายขึ้น รวมทั้งคลอไรด์ไอออนสามารถไปทำลายพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรงของเซลลูโลสได้จึงส่งเสริมอัตราการสลายตัวของเซลลูโลสได้ร้อยละผลได้ของน้ำตาลกลูโคส 29.1 จากการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า การปรับสภาพเซลลูโลสโดยการละลายด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และเติมกรดไฮโดรคลอริกจะส่งเสริมประสิทธิภาพการสลายตัวของเซลลูโลส

ปี ค.ศ. 2015 Sun B., และคณะ [37] ได้ทำการศึกษาการเพิ่มผลผลิตของกลูโคสด้วยการไฮโดรไลซิสเซลลูโลสด้วยรังสีไมโครเวฟโดยใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวช่วยในการไฮโดรไลซิส ทำการเตรียมสารละลายเซลลูโลสด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และล้างด้วยน้ำกลั่นในปริมาณมากจนค่า pH

เป็นกลาง จากนั้นเก็บตัวอย่างไว้ในที่ที่เปียกจนกว่าจะถูกนำมาใช้ นำส่วนที่ต้องการใช้งานมาไว้ในที่ที่แห้งและอยู่ในอุณหภูมิห้อง จากนั้นนำกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้นต่างๆ และเซลลูโลสเจลหรือผงเซลลูโลส ใส่ในขวดปริมาตร 50 มิลลิลิตร ความเข้มข้น 11.8 กรัมต่อลิตร และให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ ให้ความร้อนอยู่ที่ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำตัวอย่างที่ได้ไปผ่านการกรองและนำไปตรวจวัดร้อยละผลได้ของกลูโคส และนำมาเปรียบเทียบกับเซลลูโลสที่ใช้เพียงรังสีไมโครเวฟในการไฮโดรไลซิส พบว่าเซลลูโลสเจลหรือเซลลูโลสมีร้อยละผลได้ของน้ำตาลกลูโคสประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ สำหรับเซลลูโลสไฮโดรเจลมีร้อยละผลได้ของน้ำตาลกลูโคส 44.7 เปอร์เซ็นต์ จากการศึกษาี้แสดงให้เห็นว่าการใช้กรดในการช่วยไฮโดรไลซิสส่งเสริมทำให้ค่าร้อยละผลได้ของกลูโคสมีค่าเพิ่มขึ้น



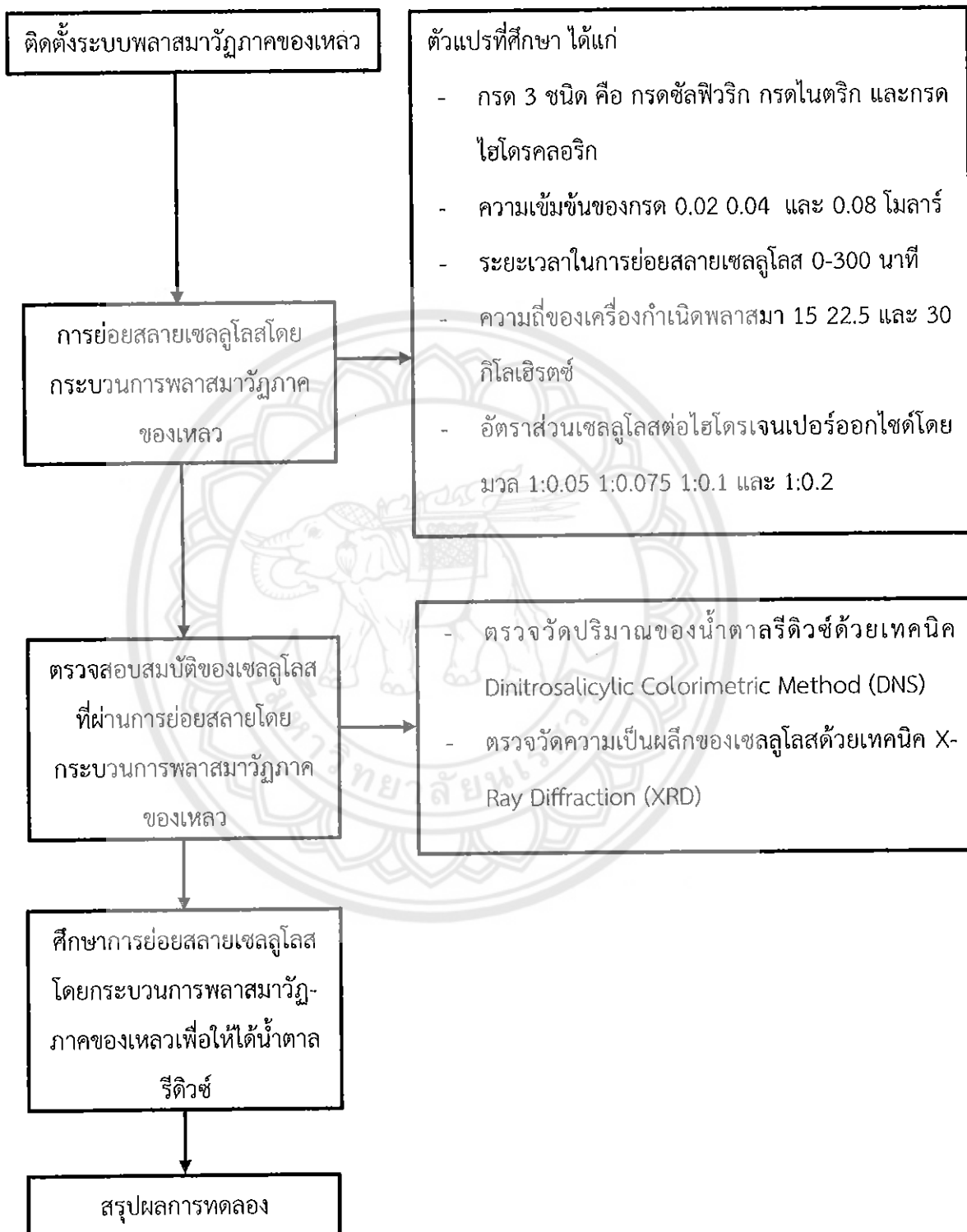
บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

- 3.1.1 เครื่องปั่นกวน (Magnetic stirrer)
- 3.1.2 เครื่องกำเนิดพลาสมาวิทยุภาคของเหลว (PEKURIS, Japan)
- 3.1.3 Reactor 100 มิลลิลิตร (ปิกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร เจาะรูทั้ง 2 ด้าน)
- 3.1.4 ขั้วอิเล็กโทรดเหล็ก
- 3.1.5 เครื่องขังสาร 4 ตำแหน่ง
- 3.1.6 เครื่อง XRD (Shimadzu Lab XRD-6000 diffractometer)
- 3.1.7 เครื่อง UV-VIS (HELIOS OMEGA, Thermo Scientific, Thailand)
- 3.1.8 ขวดปรับปริมาตร 100 มิลลิลิตร
- 3.1.9 หลอดทดลอง
- 3.1.10 ไมโครปิเปตขนาด 1-10 ไมโครลิตร (Eppendorf, Germany)
- 3.1.11 ไมโครปิเปตขนาด 100-1,000 ไมโครลิตร (Eppendorf, Germany)
- 3.1.12 ข้อนตักสาร
- 3.1.13 ปิกเกอร์ขนาด 100 และ 250 มิลลิลิตร
- 3.1.14 Cellulose powder (HIMEDIA, India)
- 3.1.15 กรดซัลฟิวริก (RCI Labscan, Thailand)
- 3.1.16 กรดไนตริก (RCI Labscan, Thailand)
- 3.1.17 กรดไฮโดรคลอริก (RCI Labscan, Thailand)
- 3.1.18 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (RCI Labscan, Thailand)
- 3.1.19 โซเดียมโพแทสเซียมทาร์เทรต (Ajex Finechem, New Zealand)
- 3.1.20 3,5-dinitrosalicylic acid (SIGMA-ALDRICH, USA)
- 3.1.21 โซเดียมซัลเฟต แอนไฮไดรรัส (Fisher Chemical, UK)
- 3.1.22 ฟีนอล (Merck KGaA, Germany)
- 3.1.23 น้ำกลั่น

3.2 วิธีการทดลอง



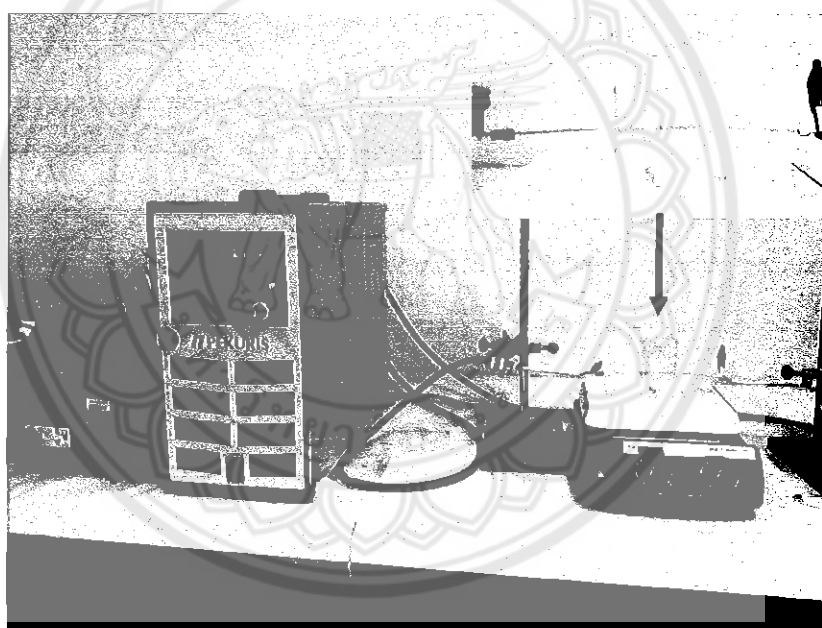
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ในการศึกษาการย่อยสลายโมเลกุลของเซลลูโลสด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลว สามารถสรุปขั้นตอนดำเนินงานวิจัยได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.3.1 การติดตั้งระบบพลาสมาวิทยุภาคของเหลว

กระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลวเกิดขึ้นในระบบปิด โดยเครื่องปฏิกรณ์แก้วจะมีขั้วของอิเล็กโทรดเชื่อมต่อทั้งสองด้าน อิเล็กโทรดที่ติดตั้งจะห่างกันประมาณ 0.2 มิลลิเมตร ที่ปลายทั้งสองด้านของขั้วอิเล็กโทรดจะเชื่อมต่อเข้ากับพาวเวอร์ซัพพลายระบบไฟฟ้ากระแสตรง โดยเครื่องปฏิกรณ์แก้วจะตั้งอยู่ด้านบนของเครื่องปั่นกวาน



รูปที่ 3.2 การติดตั้งระบบพลาสมาวิทยุภาคของเหลว

3.3.2 การย่อยสลายเซลลูโลสด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลว

เตรียมสารละลายเซลลูโลสที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก โดยการนำเซลลูโลส น้ำหนัก 1 กรัม ละลายในสารละลายกรด โดยมีการใช้กรด 3 ชนิด คือ กรดซัลฟิวริก กรดไนตริก และ กรดไฮโดรคลอริก และใช้ความเข้มข้น 3 ความเข้มข้น คือ 0.02 0.04 และ 0.08 โมลาร์ ปริมาณ 100 มิลลิลิตร ทำการย่อยสลายสารละลายเซลลูโลสด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลว ที่มีความต่างศักย์ 2 กิโลโวลต์ (Kilovolt) ความถี่ของเครื่องกำเนิดพลาสมา 15 22.5 และ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่อัตราส่วน 1:0.05 1:0.075 1:0.1 และ 1:0.2 ความกว้างของพัลส์ (Pulse

Width) 3 ไมโครวินาที (μs) และชั่วอิลีกโทรตชนิดเหล็ก โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ ชนิดของกรด ความเข้มข้นของกรด ความถี่ของเครื่องกำเนิดพลาสมา อัตราส่วนเซลลูโลสต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยมวล และเวลาที่ใช้ในการทรีท 0-300 นาที

3.3.4 วิเคราะห์ความเป็นผลึกของเซลลูโลสก่อนและหลังการย่อยสลายด้วยเทคนิค XRD

การวิเคราะห์โครงสร้างความเป็นผลึกของเซลลูโลสสามารถทำได้ด้วยเทคนิค XRD โดยใช้การแผ่รังสี CuK_{α} ที่แรงดัน 40 กิโลโวลต์ และกระแสไฟฟ้า 40 มิลลิแอมแปร์ โดยมุมที่ใช้ระหว่าง 10 ถึง 40 องศา ด้วยความเร็วในการสแกน 2 องศาต่อนาที [45]

3.3.5 วิเคราะห์ปริมาณของน้ำตาลที่ได้จากการย่อยสลายเซลลูโลสโดยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลว

3.3.5.1 การเตรียม DNS reagent และการทำกราฟมาตรฐาน

การวัดปริมาณของน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากการย่อยสลายเซลลูโลสด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลวสามารถทำได้โดยใช้เทคนิค Dinitrosalicylic Colorimetric Method (DNS) การเตรียม DNS reagent ใช้ NaOH 1 กรัม ละลายในน้ำประมาณ 40 มิลลิลิตร จะได้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จากนั้นเติม Na-K tartrate 30 กรัม ลงไปผสมจนละลาย และเติม 3,5-dinitrosalicylic acid 1 กรัม Na_2SO_3 0.5 กรัม และ phenol 0.2 กรัม ตามลำดับ ผสมเป็นสารละลาย จากนั้นปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร และเก็บไว้ในขวดที่บดแสง

กราฟมาตรฐานหรือ Calibration curve จะถูกนำไปใช้เพื่อวัดปริมาณของน้ำตาลรีดิวซ์โดยการเปรียบเทียบความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์กับค่าความสามารถการดูดกลืนแสง สามารถทำได้โดยการเตรียมสารละลายกลูโคสที่มีความเข้มข้นในช่วง 0.1 ถึง 0.9 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร อย่างละ 0.5 มิลลิลิตร จากนั้นผสมด้วย DNS reagent จำนวน 0.5 มิลลิลิตร แล้วนำไปต้มในน้ำเดือดเป็นเวลา 10 นาที เสร็จแล้วนำมาแช่ในน้ำเย็นและเติมน้ำกลั่น 5 มิลลิลิตร ลงในสารตัวอย่าง นำสารตัวอย่างที่ได้ไปวัดค่าความสามารถการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร แล้วนำค่าที่ได้ไปพล็อตกราฟโดยให้แกนตั้งเป็นค่าความสามารถการดูดกลืนแสงและแกนนอนเป็นความเข้มข้นของสารตัวอย่าง

1729829X



สำนักหอสมุด

3.3.5.2 การวัดปริมาณของน้ำตาลรีดิวซ์ด้วยเทคนิค DNS

27 ส.ค. 2561

ตัวอย่างของเซลล์ที่ถูกย่อยสลายโดยพลาสมาวิภาคของเหลวที่เวลาต่างๆ จะถูกนำมาวัดปริมาณของน้ำตาลรีดิวซ์โดยการนำตัวอย่างปริมาณ 0.5 มิลลิลิตร ผสมกับ DNS reagent ปริมาณ 0.5 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปต้มที่น้ำเดือดเป็นเวลา 10 นาที แล้วนำมาแช่น้ำเย็นเพื่อหยุดปฏิกิริยาของ DNS reagent จากนั้นเติมน้ำจำนวน 5 มิลลิลิตร และวัดความสามารถการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร โดยใช้เครื่อง UV-VIS แล้วนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานเพื่อหาปริมาณของน้ำตาลรีดิวซ์



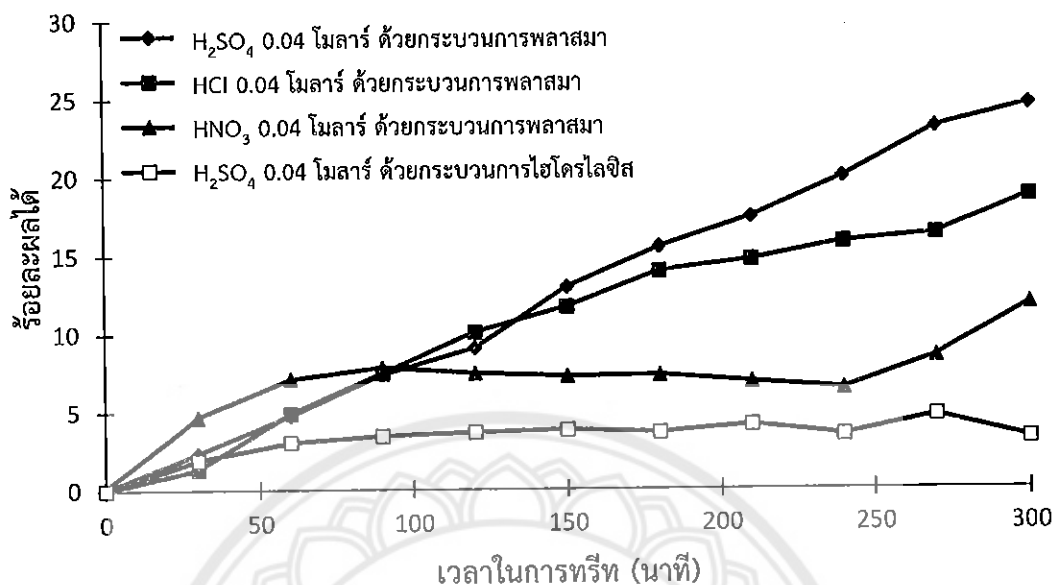
บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

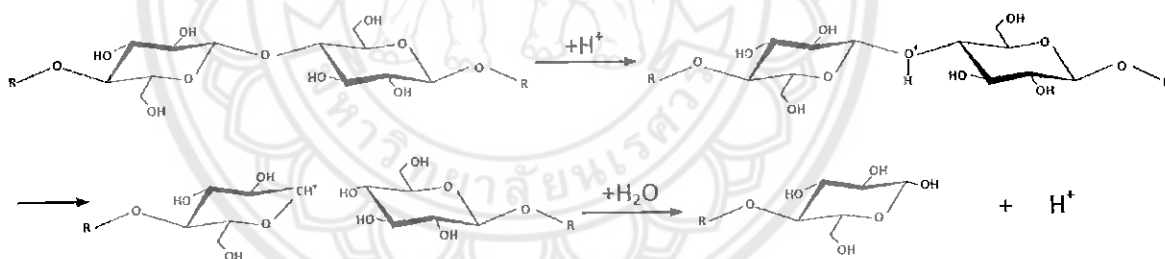
จากการทดลองย่อยสลายเซลลูโลสด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลว โดยศึกษาสภาวะต่างๆ ที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายเซลลูโลส ได้แก่ ผลของชนิดกรดที่มีต่อร้อยละผลได้ ผลของความเข้มข้นที่มีต่อร้อยละผลได้ ผลของความถี่ที่มีต่อร้อยละผลได้ ผลของการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีผลต่อร้อยละผลได้และความเป็นผลึกหลังจากการย่อยสลาย จะอธิบายดังต่อไปนี้

4.1 ผลของชนิดกรดต่อร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์

จากกราฟที่ 4.1 แสดงผลของชนิดของกรดและเวลาที่ใช้ในการทรีทพลาสมาที่มีต่อร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์ พบว่าการทรีทด้วยพลาสมาโดยใช้กรดไนตริก 0.04 โมลาร์ เป็นตัวทำละลายมีแนวโน้มของร้อยละผลได้เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเวลาผ่านไป 100 นาที และคงที่จนกระทั่งเวลาที่ใช้ในการทรีท 250 นาที จากนั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนกระทั่งนาที่ที่ 300 และให้ร้อยละผลได้ 11.8 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปลี่ยนชนิดของกรดเป็นกรดไฮโดรคลอริก 0.04 โมลาร์ และกรดซัลฟิวริก 0.04 โมลาร์ จะให้แนวโน้มของร้อยละผลได้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเวลาที่ใช้ในการทรีท 300 นาที กรดไฮโดรคลอริกจะให้ร้อยละผลได้น้อยกว่ากรดซัลฟิวริกที่ 18.7 เปอร์เซ็นต์ และ 24.5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เนื่องจากชนิดของกรดเป็นตัวแปรที่สำคัญในกระบวนการไฮโดรไลซิสเนื่องจากกระบวนการไฮโดรไลซิสจะดำเนินการโดยการแตกตัวของสารละลายได้ไฮโดรเจนไอออน (H^+) จากนั้นไฮโดรเจนไอออนจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับพันธะภายในซึ่งในที่นี้คือเซลลูโลสจึงทำให้เซลลูโลสที่เป็นสายโซ่ยาวแตกตัวออกมาเป็นสายโซ่ที่สั้นลงจนกลายเป็นน้ำตาลรีดิวซ์ในที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 4.2 แสดงกลไกการย่อยสลายเซลลูโลสโดยไฮโดรเจนไอออน จากรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าร้อยละผลได้โดยใช้กรดซัลฟิวริกจะมีร้อยละผลได้มากที่สุดและกรดไฮโดรคลอริกและกรดไนตริกจะได้ผลได้ร้อยละน้อยลงมา ตามลำดับ เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลของกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) นั้นมีจำนวนของอะตอมไฮโดรเจนอยู่สองอะตอมซึ่งมากกว่ากรดไฮโดรคลอริก (HCl) และกรดไนตริก (HNO_3) ที่มีไฮโดรเจนอยู่อะตอมเดียว จึงทำให้กรดซัลฟิวริกนั้นแตกตัวเป็นไฮโดรเจนไอออนได้มากกว่ากรดอีกสองชนิดเป็นผลให้เกิดการย่อยสลายได้มากกว่า



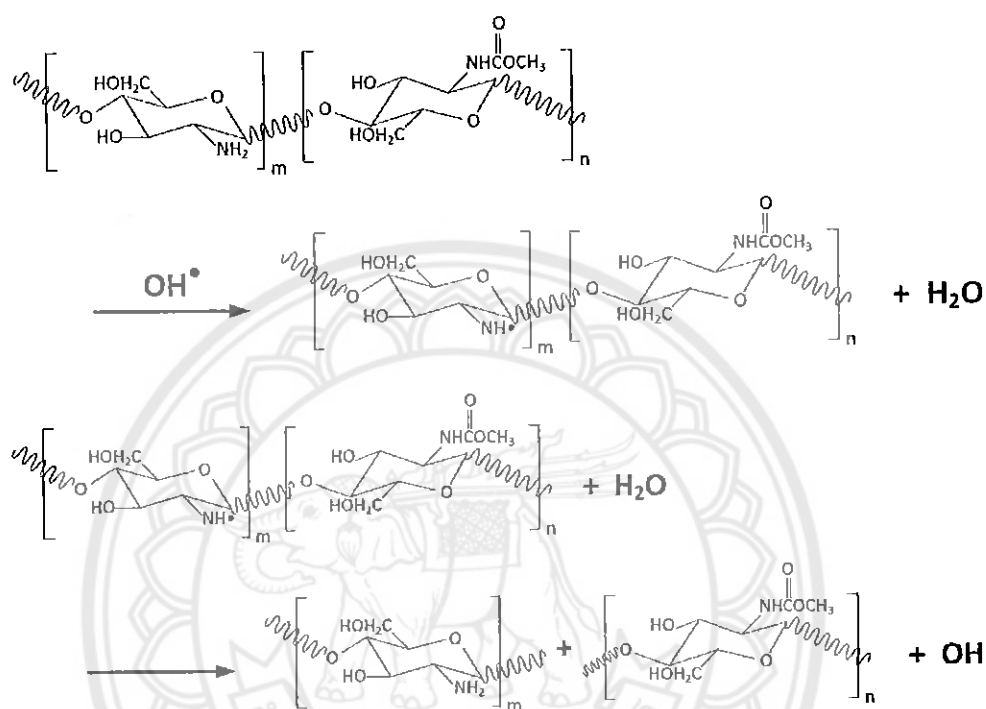
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงร้อยละผลได้ของน้ำตาลรีดิวซ์ที่มีชนิดของกรดและเวลาที่ใช้ในการทรีทพลาสมาต่างกัน



รูปที่ 4.2 กลไกการไฮโดรไลซิสของเซลลูโลส [48]

เมื่อเปรียบเทียบการไฮโดรไลซิสด้วยกรดเพียงอย่างเดียวและการประยุกต์ใช้กระบวนการพลาสมา จะเห็นว่าการย่อยสลายด้วยกระบวนการพลาสมาพร้อมกับกรดซัลฟิวริกจะให้ร้อยละผลได้ 24.5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมากกว่าการไฮโดรไลซิสเพียงอย่างเดียวได้ร้อยละผลได้ของน้ำตาลรีดิวซ์ 3.2 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากระหว่างการทรีทด้วยกระบวนการพลาสมาจะสามารถผลิตหมู่ว่องไวต่างๆ โดยเฉพาะหมู่ว่องไวไฮดรอกซิล ($\text{OH}\cdot$) จากรายงานการวิจัยของ Prasertsung O., และคณะ [23] พบว่าหมู่ว่องไวไฮดรอกซิลสามารถทำปฏิกิริยากับพันธะไกลโคซิดิก ซึ่งเป็นหมู่ที่เชื่อมระหว่างหน่วยกลูโคสในโคโตซาน ดังแสดงในรูปที่ 4.3 กลไกการย่อยสลายโคโตซานด้วยหมู่ว่องไวไฮดรอกซิล โดยที่หมู่ว่องไวไฮดรอกซิลจะเข้าไปจับหมู่ฟังก์ชัน NH_2 เพื่อให้ได้ $\text{NH}\cdot$ และน้ำ ทำให้ $\text{NH}\cdot$

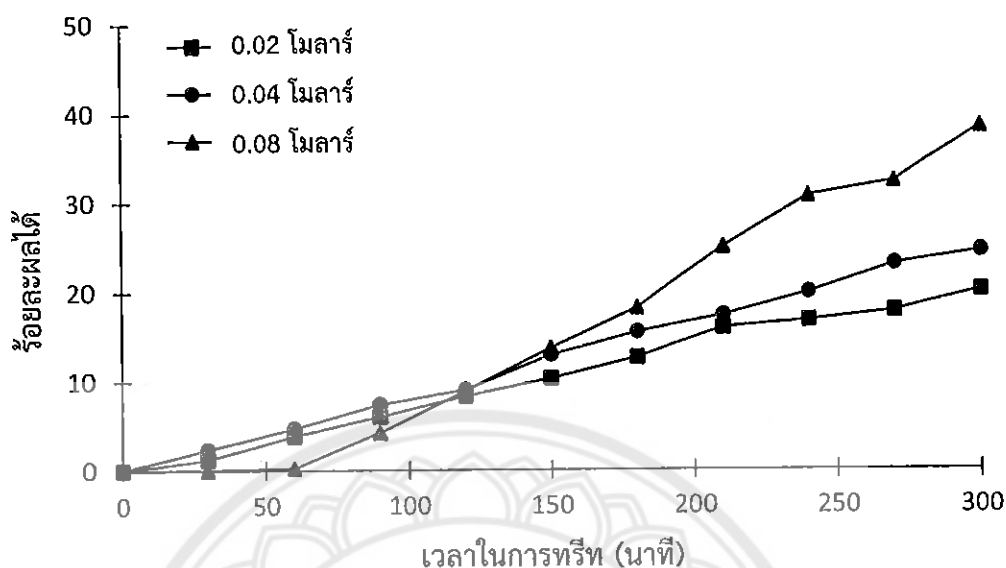
สามารถดึงไฮโดรเจนจากพันธะไกลโคซิดิกจึงทำให้สายโซ่ที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกขาดออกจากกันส่งผลทำให้สายโซ่สั้นลง ดังนั้นการใช้พลาสมาจะช่วยส่งเสริมให้เกิดการย่อยสลายเซลลูโลสซึ่งมีโครงสร้างคล้ายคลึงกับไคโตซานได้ดี



รูปที่ 4.3 แสดงกลไกการย่อยสลายไคโตซานด้วยหมู่ว่องไวไฮดรอกซิล [23]

4.2 ผลของความเข้มข้นกรดต่อร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์

จากกราฟที่ 4.4 แสดงผลของความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกและเวลาที่ใช้ในการพรีทพลาสมาที่มีต่อร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์ จากผลการทดลองพบว่าความเข้มข้นที่ 0.02 โมลาร์ มีแนวโน้มของร้อยละผลได้เพิ่มขึ้นต่อเนื่องจนกระทั่งนาที่ที่ 300 และให้ร้อยละผลได้ 20.1 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเป็น 0.04 โมลาร์ จะให้แนวโน้มของร้อยละผลได้เพิ่มขึ้นต่อเนื่องเช่นเดียวกับที่ความเข้มข้น 0.02 โมลาร์ แต่มีแนวโน้มที่สูงกว่า โดยให้ร้อยละผลได้นาทีที่ 300 เท่ากับ 24.5 เปอร์เซ็นต์ และที่ความเข้มข้น 0.08 โมลาร์ จะให้แนวโน้มของร้อยละผลได้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและมากกว่าความเข้มข้น 0.02 โมลาร์ และ 0.04 โมลาร์ โดยให้ร้อยละผลได้นาทีที่ 300 เท่ากับ 38.4 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้เนื่องจากความเข้มข้นของกรดที่มากขึ้นทำให้จำนวนโมลของกรดนั้นมากขึ้นด้วยจึงเป็นผลทำให้มีไฮโดรเจนไอออน (H^+) เพิ่มมากขึ้นซึ่งส่งเสริมการไฮโดรไลซิสเซลลูโลสทำให้สายตัวได้น้ำตาลรีดิวซ์ดังกลไกที่แสดงในรูปที่ 4.2 [48]

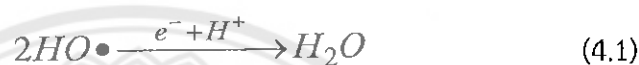


รูปที่ 4.4 กราฟแสดงร้อยละผลได้ที่เวลาต่างๆ โดยใช้ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่ต่างกันด้วยความถี่ของเครื่องกำเนิดพลาสมา 15 กิโลเฮิร์ตซ์

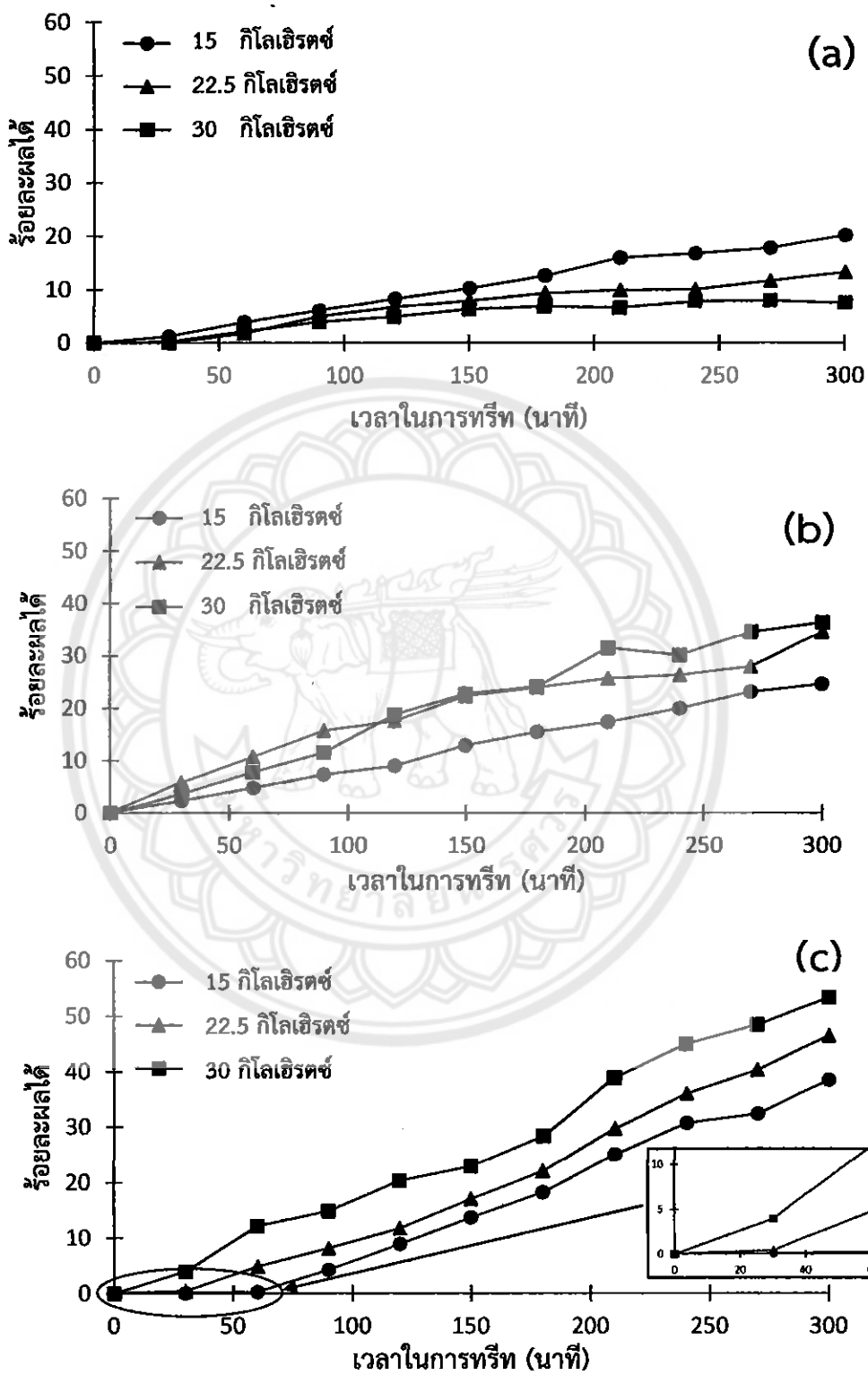
4.3 ผลของความถี่ของเครื่องกำเนิดพลาสมาต่อร้อยละผลได้ของน้ำตาลรีดิวซ์

จากรูปที่ 4.6 (a) แสดงผลของความถี่ของพลาสมาโดยใช้กรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.02 โมลาร์ ที่มีต่อร้อยละผลได้ของน้ำตาลรีดิวซ์ พบว่าที่ความถี่จากเครื่องกำเนิดพลาสมา 15 กิโลเฮิร์ตซ์ จะให้ร้อยละผลได้มากที่สุด 20.1 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มความถี่เป็น 22.5 กิโลเฮิร์ตซ์ และ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ จะได้ร้อยละผลได้ 13.2 เปอร์เซ็นต์ และ 7.5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จากรูปที่ 4.6 (b) แสดงผลของความถี่ของพลาสมาโดยใช้กรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.04 โมลาร์ ที่มีต่อร้อยละผลได้ของน้ำตาลรีดิวซ์ จากผลการทดลองพบว่าที่ความถี่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์ จะให้ร้อยละผลได้น้อยที่สุด 24.5 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเพิ่มความถี่เป็น 22.5 กิโลเฮิร์ตซ์ จะให้ร้อยละผลได้มากที่สุด 36.3 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อเพิ่มความถี่เป็น 30 กิโลเฮิร์ตซ์ จะให้ร้อยละผลได้ 34.4 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจากแนวโน้มของกราฟจะเห็นว่าการย่อยสลายที่ความถี่ 22.5 กิโลเฮิร์ตซ์ และความถี่ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ มีแนวโน้มใกล้เคียงกัน จากรูปที่ 4.6 (c) แสดงผลของความถี่ของพลาสมาโดยใช้กรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.08 โมลาร์ ที่มีต่อร้อยละผลได้ของน้ำตาลรีดิวซ์ จากการทดลองพบว่าที่ความถี่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์ จะให้ร้อยละผลได้น้อยที่สุด 38.4 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเพิ่มความถี่เป็น 22.5 กิโลเฮิร์ตซ์ และ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ จะให้ร้อยละผลได้ 46.4 เปอร์เซ็นต์ และ 53.2 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งจากแนวโน้มของกราฟจะเห็นได้ว่าการย่อยสลายที่ความถี่ต่างๆ ให้อัตราการย่อยสลายที่ต่างกัน โดยที่ความถี่ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ ให้อัตราการ

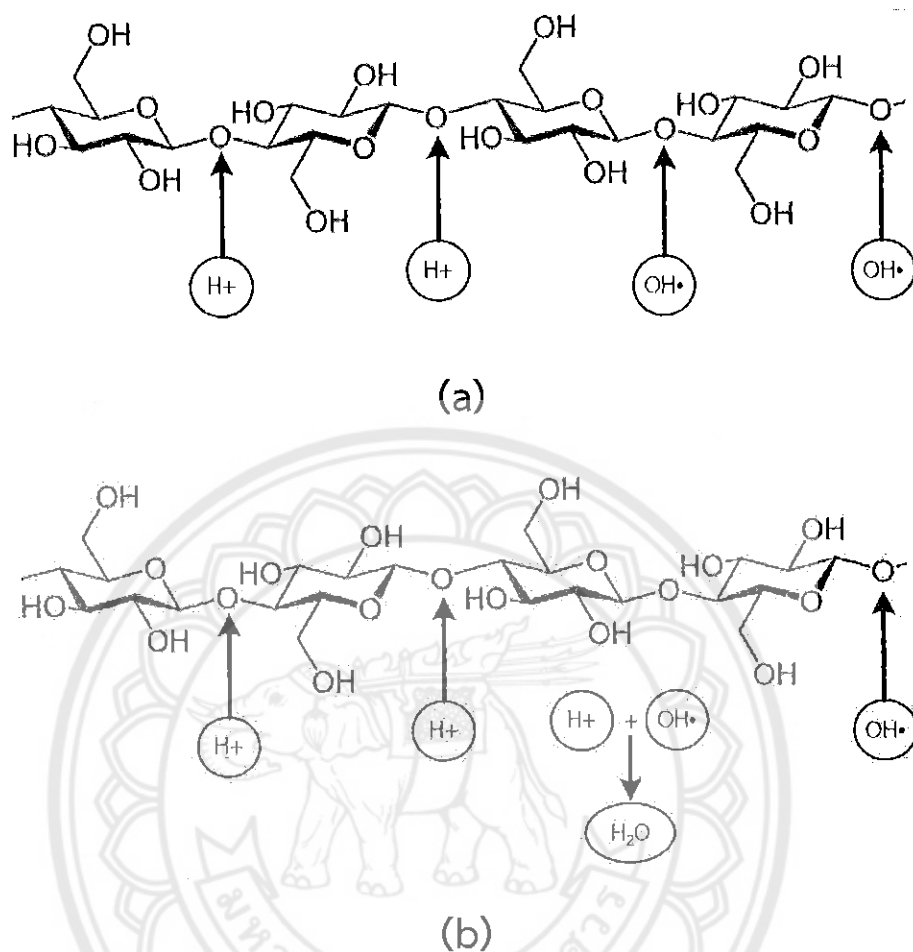
ย่อยสลายมากที่สุด จากรูปที่ 4.6 (a) จะเห็นได้ว่าการเพิ่มความถี่มีผลต่อการแตกตัวของสารละลายกรด อย่างไรก็ตามที่ความเข้มข้น 0.02 โมลาร์ ที่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์ นั้นเกิดการย่อยสลายมากที่สุดเมื่อเพิ่มความถี่ทำให้เกิดการย่อยสลายน้อยลง เนื่องจากการเพิ่มความถี่เป็นการเพิ่มพลังงานเข้าไปในระบบเพื่อกระตุ้นการแตกตัวของสารละลายกรดให้เกิดเป็นไฮโดรเจนไอออนและหมู่ว่องไวไฮดรอกซิล จากนั้นจะเข้าไปสลายพันธะภายในโครงสร้างเซลล์ลอส ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (a) ซึ่งพลังงานที่ให้แก่ระบบมากเกินไปจะทำให้มีหมู่ว่องไวไฮดรอกซิลในระบบมากเกินไปจากนั้นหมู่ว่องไวไฮดรอกซิลสามารถจับไฮโดรเจนไอออนและเกิดเป็นน้ำ ดังแสดงในสมการที่ 4.1 [47]



เมื่อพิจารณาจากสมการที่ 4.1 พบว่าปริมาณของไฮโดรเจนไอออนและหมู่ว่องไวไฮดรอกซิลที่เข้าไปทำการย่อยสลายพันธะภายในเซลล์ลอสลดลง ดังนั้นการใช้ความถี่มากเกินไปเป็นการขัดขวางการย่อยสลายหรือการไฮโดรไลซิส ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (b) อย่างไรก็ตามเมื่อใช้ความเข้มข้นของกรดมากขึ้นจำเป็นต้องใช้ความถี่ที่มากขึ้นเพื่อผลิตไฮโดรเจนไอออนและหมู่ว่องไวไฮดรอกซิลในปริมาณที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดการย่อยสลายได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากรูปที่ 4.6 (b) จะเห็นได้ว่าการเพิ่มความเข้มข้นของกรด 0.04 โมลาร์ ที่ความถี่ 22.5 กิโลเฮิร์ตซ์ และ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ จะให้ร้อยละผลได้ใกล้เคียงกันและที่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์ มีร้อยละผลได้น้อยที่สุด เนื่องจากมีพลังงานในการกระตุ้นให้สลายตัวหรือความถี่ไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการแตกตัวเพื่อผลิตไฮโดรเจนไอออนและหมู่ว่องไวไฮดรอกซิลในปริมาณที่เหมาะสม โดยจะเห็นได้ชัดจากรูปที่ 4.6 (c) ใช้ความเข้มข้นของกรดที่มากขึ้นคือ 0.08 โมลาร์ เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในการแตกตัวของกรดที่มากขึ้นจึงต้องใช้ความถี่หรือพลังงานในการกระตุ้นให้แตกตัวที่มากขึ้น จึงทำให้เห็นได้ชัดว่าที่ความถี่ของเครื่องกำเนิดพลาสมาที่ให้ร้อยละผลได้มากที่สุดคือ 30 22.5 และ 15 กิโลเฮิร์ตซ์ ตามลำดับ จึงสามารถสรุปได้ว่าความถี่นั้นก็มีผลต่ออัตราการย่อยสลายหรือร้อยละผลได้ แต่มีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นซึ่งถ้าหากความเข้มข้นและความถี่ไม่สัมพันธ์กันจะทำให้การย่อยสลายไม่มีประสิทธิภาพเนื่องจากมีปริมาณของหมู่ว่องไวไฮดรอกซิลและไฮโดรเจนไอออนไม่เหมาะสมสำหรับกระบวนการย่อยสลาย โดยที่ความเข้มข้นต่ำจะต้องใช้ความถี่ต่ำจึงจะทำให้มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายมากที่สุด แต่เมื่อใช้ความเข้มข้นที่มากขึ้นจึงต้องใช้ความถี่ที่มากขึ้นเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายที่มากขึ้น



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงร้อยละผลได้ที่เวลาต่างๆ โดยใช้ความถี่ที่ต่างกัน (a) ความเข้มข้นกรด 0.02 โมลาร์ (b) ความเข้มข้นกรด 0.04 โมลาร์ (c) ความเข้มข้นกรด 0.08 โมลาร์

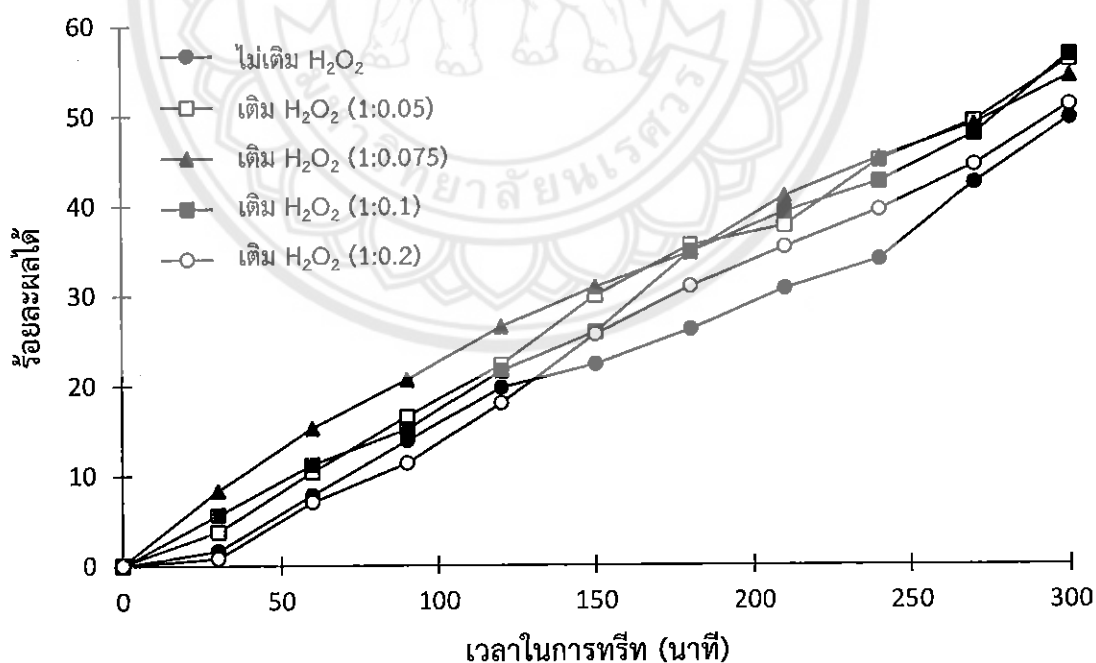


รูปที่ 4.6 กลไกการย่อยสลายเมื่อไฮโดรเจนไอออนและหมู่ฟองไวไฮดรอกซิล (a) มีปริมาณเหมาะสมกัน (b) มีปริมาณไม่เหมาะสมกัน

4.4 ผลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีผลต่ออัตราการย่อยสลาย

รูปที่ 4.7 แสดงผลของการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยอัตราส่วนต่างๆ ที่มีผลต่อร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์ พบว่ามีแนวโน้มของกราฟลักษณะเดียวกันคือเมื่อเวลาในการทรีทด้วยพลาสมามากขึ้นจะเกิดการย่อยสลายเซลลูโลสมากขึ้น เมื่อพิจารณาตัวอย่างที่ทำการย่อยสลายโดยไม่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์พบว่าร้อยละผลได้ในช่วงแรกจะต่ำและค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนกระทั่งได้ร้อยละผลได้ 49.6 เปอร์เซ็นต์ ใช้เวลาในการทรีทด้วยพลาสมา 300 นาที เมื่อเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ลงไปในระบบด้วยอัตราส่วน 1:0.05 พบว่าการเพิ่มขึ้นของร้อยละผลได้มากกว่าตัวอย่างที่ไม่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยจะเห็นได้จากแนวโน้มของกราฟที่เพิ่มขึ้นในช่วงแรกและให้ร้อยละผลได้ 56 เปอร์เซ็นต์ ใช้เวลาในการทรีทด้วยพลาสมา 300 นาที เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1:0.075 พบว่าแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของร้อยละผลได้ในช่วงเวลาในการทรีท 0 ถึง 150 นาทีจะเพิ่มขึ้นอย่างมาก

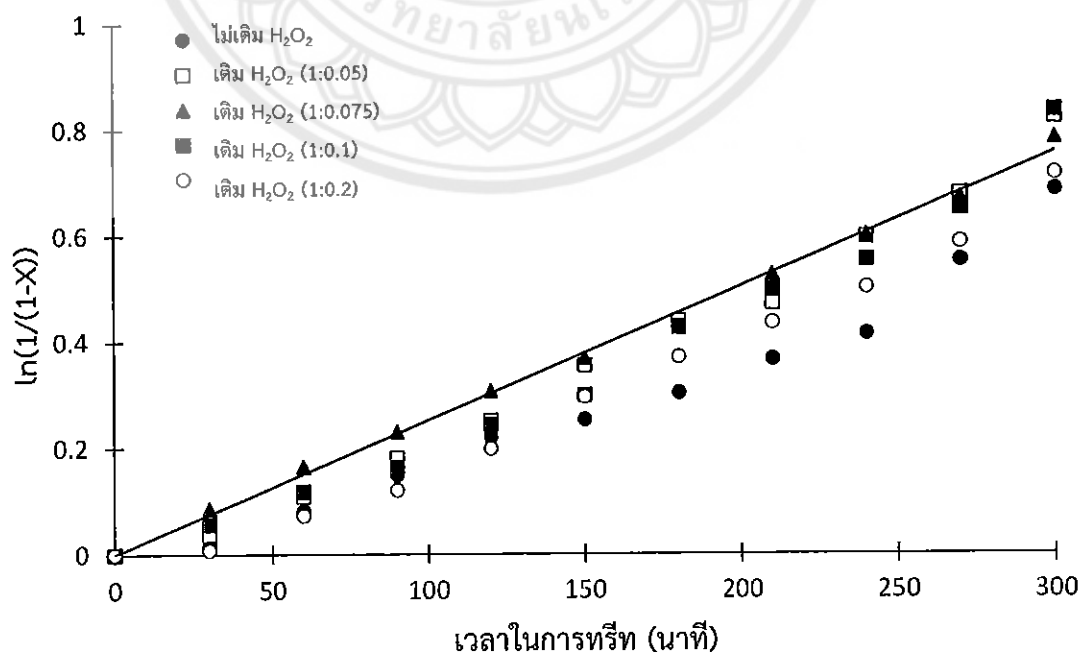
จากนั้นแนวโน้มจะลดลงจนกระทั่งมีแนวโน้มลักษณะเดียวกันกับอัตราส่วนอื่นๆ โดยจะได้ร้อยละผลได้เมื่อใช้เวลาในการทรีทด้วยพลาสมา 300 นาที ที่ 54.3 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในระบบเป็น 1:0.1 พบว่าแนวโน้มของร้อยละผลได้เมื่อเวลาในการทรีทด้วยพลาสมาในช่วงแรกน้อยกว่าสภาวะที่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อัตราส่วน 1:0.05 และ 1:0.075 หลังจากนั้นเมื่อเวลาในการทรีทเพิ่มขึ้นจะให้แนวโน้มมีลักษณะเดียวกันกับสภาวะที่กล่าวมาข้างต้น โดยได้ร้อยละผลได้ 56.6 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเวลาในการทรีทด้วยพลาสมา 300 นาที เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็น 1:0.2 พบว่าแนวโน้มของร้อยละผลได้ในช่วงแรกต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะอื่น เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นแนวโน้มจะมีลักษณะคล้ายคลึงกับสภาวะอื่นและให้ร้อยละผลได้ 51.1 เปอร์เซ็นต์ ใช้เวลาในการทรีทด้วยพลาสมา 300 นาที จากผลการทดลองทั้งหมดจะเห็นได้ว่าการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีผลต่อแนวโน้มของร้อยละผลได้ในช่วงแรกของการทรีทด้วยพลาสมาที่ 0 ถึง 150 นาที และพบว่าอัตราส่วนของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1:0.075 ให้แนวโน้มมากที่สุดเมื่อเทียบกับอัตราส่วนอื่นๆ จึงสามารถบอกได้ว่าที่อัตราส่วน 1:0.075 สามารถเพิ่มอัตราการย่อยสลายได้มากที่สุด ในทางกลับกันที่อัตราส่วน 1:0.2 ให้แนวโน้มของร้อยละผลได้เมื่อเวลาในการทรีทผ่านไปน้อยที่สุดเนื่องจากมีอัตราการย่อยสลายในช่วงแรกต่ำที่สุด



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงร้อยละผลได้ที่เวลาต่างๆ ด้วยการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่อัตราส่วนต่างๆ

เมื่อนำผลการทดลองไปคำนวณหาอัตราการย่อยสลายโดยใช้ Pseudo first order kinetics ในการคำนวณ ดังแสดงในรูปที่ 4.8 โดยที่ความชันของเส้นกราฟที่สภาวะต่างๆ บ่งบอกถึงค่าคงที่อัตรา

การย่อยสลายซึ่งสรุปในตารางที่ 4.1 จากผลพบว่าในแต่ละอัตราส่วนในการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จะให้ความชันของเส้นกราฟหรือค่าคงที่อัตราการย่อยสลายที่ต่างกัน โดยลำดับของค่าคงที่ในการย่อยสลายคือ $1:0.075 > 1:0.05 > 1:0.1 > 1:0.2 > \text{ไม่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์}$ ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ลงไปในระบบจะส่งผลต่อการย่อยสลาย โดยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถแตกตัวเป็นหมู่ว่องไวไฮดรอกซิล ($\text{OH}\cdot$) ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการย่อยสลายดังที่อธิบายในหัวข้อที่ 4.3 โดยที่อัตราส่วนของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ $1:0.075$ มีอัตราการย่อยสลายมากที่สุดเนื่องจากเป็นอัตราส่วนที่ให้ปริมาณหมู่ว่องไวไฮดรอกซิล ($\text{OH}\cdot$) เหมาะสมกับไฮโดรเจนไอออนมากที่สุดและเมื่อเวลาในการทรีทด้วยพลาสมาผ่านไปจะทำให้หมู่ว่องไวไฮดรอกซิล ($\text{OH}\cdot$) ที่ได้จากการแตกตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ค่อยๆ ลดจำนวนจนหมดลงจึงทำให้แนวโน้มของร้อยละผลได้ค่อยๆ กลับมามีลักษณะเหมือนกันเมื่อเวลาในการทรีทด้วยพลาสมาผ่านไป ในทางกลับกันอัตราส่วนของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ $1:0.2$ ให้ปริมาณหมู่ว่องไวไฮดรอกซิล ($\text{OH}\cdot$) มากเกินไปทำให้หมู่ว่องไวที่มากเกินไปจับตัวกับไฮโดรเจนไอออนกลายเป็นน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (b) จึงเป็นผลทำให้อัตราการย่อยสลายในช่วงแรกของการทรีทด้วยพลาสมาลดลงและเมื่อเวลาในการทรีทด้วยพลาสมาผ่านไปหมู่ว่องไวไฮดรอกซิล ($\text{OH}\cdot$) ที่ได้จากการแตกตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ค่อยๆ ลดปริมาณลงจึงทำให้แนวโน้มค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนกระทั่งมีลักษณะเช่นเดียวกับสภาวะอื่นๆ



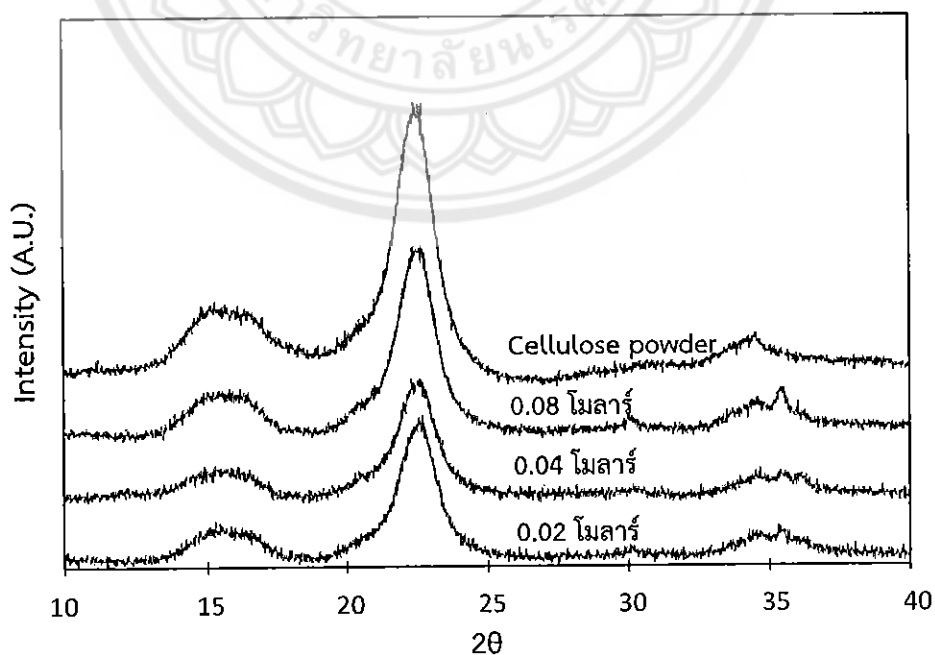
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงผลการคำนวณอัตราการใช้ Pseudo first order kinetics

ตารางที่ 4.1 ค่าคงที่อัตราการย่อยสลายเซลลูโลสและค่า R^2

อัตราส่วนของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	ค่าคงที่อัตราการย่อยสลายของเซลลูโลส (min^{-1})	ค่า R^2 จากกราฟ (รูปที่ 4.8)
ไม่เติมไฮโดรเปอร์ออกไซด์	0.0019	0.9508
1:0.05	0.0025	0.9786
1:0.075	0.0025	0.9967
1:0.1	0.0024	0.9674
1:0.2	0.0021	0.9636

4.5 ผลการทดสอบความเป็นผลึกด้วยเทคนิค XRD

จากรูปที่ 4.9 กราฟแสดงผลของการทดสอบตะกอนที่ความถี่ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ โดยใช้ความเข้มข้นกรดซัลฟิวริกที่ต่างกันด้วยเทคนิค XRD ที่เวลา 300 นาที พบว่าพีคที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 22.5 องศา พีคจะแสดงถึงความเป็นผลึกของเซลลูโลสและพีคที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 18.4 องศา แสดงโครงสร้างอสังฐานของเซลลูโลส ตัวอย่างเซลลูโลสที่ไม่ผ่านการทรีตด้วยพลาสมาจะมีพีคที่สูงที่สุดเนื่องจากมีความเป็นผลึกมาก เมื่อนำตัวอย่างไปทรีตด้วยกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.02 โมลาร์ พบว่าพีคที่ได้ต่ำลงและความเข้มข้นที่มากขึ้น 0.04 และ 0.08 โมลาร์ พบว่าพีคที่ได้สูงขึ้นตามลำดับ



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงผลของการทดสอบตะกอนที่ความถี่ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ โดยใช้ความเข้มข้นกรดที่ต่างกันด้วยเทคนิค XRD

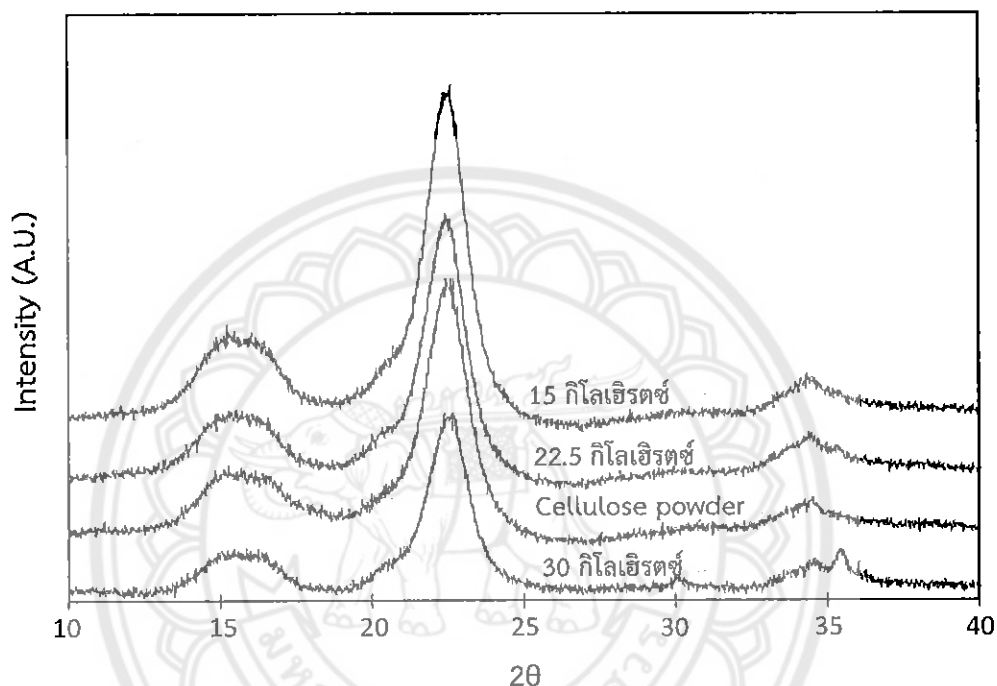
เมื่อนำค่าพีคของส่วนที่เป็นโครงสร้างผลึกและโครงสร้างอสัณฐานมาคำนวณหา Crystalline index ดังแสดงในตารางที่ 4.2 พบว่าเซลลูโลสที่ไม่ผ่านการทรีทด้วยพลาสมามีความเป็นผลึก 86.55 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ทรีทด้วยกระบวนการพลาสมาความถี่ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ ที่ความเข้มข้นต่างๆ พบว่าที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก 0.02 โมลาร์ มีความเป็นผลึกสูงขึ้นไปถึง 92.90 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากเกิดการย่อยสลายส่วนโครงสร้างอสัณฐานเป็นน้ำตาลรีดิวซ์ ทำให้เหลือแต่โครงสร้างผลึกและเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกเป็น 0.04 และ 0.08 โมลาร์ พบว่ามีความเป็นผลึกสูงขึ้นไปเนื่องจากโครงสร้างอสัณฐานถูกย่อยเป็นน้ำตาลรีดิวซ์มากขึ้น

ตารางที่ 4.2 แสดง Crystalline index เมื่อทรีทด้วยความถี่ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ โดยความเข้มข้นกรดที่ต่างกัน

สภาวะในการทดลอง	Crystalline index
Cellulose powder	86.55
0.02 โมลาร์	92.90
0.04 โมลาร์	93.88
0.08 โมลาร์	94.65

จากรูปที่ 4.10 กราฟแสดงผลของการทดสอบตะกอนที่ความเข้มข้น 0.08 โมลาร์ โดยใช้ความถี่ที่ต่างกันด้วยเทคนิค XRD ที่เวลา 300 นาที พบว่าพีคที่ตำแหน่ง 2 θ เท่ากับ 22.5 องศา จะแสดงความเป็นผลึกของเซลลูโลสและพีคที่ตำแหน่ง 2 θ เท่ากับ 18.4 องศา แสดงโครงสร้างอสัณฐานของเซลลูโลส พบว่าที่ความถี่ 15 และ 22.5 กิโลเฮิร์ตซ์ มีพีคสูงกว่าตัวอย่างเซลลูโลสแต่ที่ความถี่ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ จะให้พีคที่ต่ำกว่าเซลลูโลสที่ไม่ผ่านการทรีทด้วยพลาสมา เมื่อนำค่าพีคของส่วนที่เป็นโครงสร้างผลึกและโครงสร้าง อสัณฐานมาคำนวณหา Crystalline index ดังแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่าเซลลูโลสที่ไม่ผ่านการทรีทด้วยพลาสมามีความเป็นผลึก 86.55 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ทรีทด้วยกระบวนการพลาสมาความเข้มข้นกรด 0.08 โมลาร์ ที่ความถี่ต่างๆ พบว่าความถี่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์ มีความเป็นผลึก 93.29 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเพิ่มความถี่เป็น 22.5 และ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ จะให้ความเป็นผลึกต่างกันที่ 91.84 และ 94.65 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เนื่องจากการย่อยสลายเซลลูโลสด้วยเครื่องกำเนิดพลาสมาที่ความถี่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์ จะทำให้เกิดการย่อยสลายโครงสร้างผลึกเป็นอสัณฐานบางส่วนและย่อยสลายโครงสร้างอสัณฐานส่วนใหญ่เป็นน้ำตาลรีดิวซ์จึงทำให้ความเป็นผลึกสูงขึ้นไป เมื่อเพิ่มความถี่เป็น 22.5 กิโลเฮิร์ตซ์ จึงเป็นการเพิ่มพลังงานเข้าไปในระบบทำให้มีพลังงานเข้า

ไปช่วยย่อยสลายได้มากขึ้นจึงทำให้โครงสร้างที่เป็นผลึกถูกย่อยเป็นโครงสร้าง อสัณฐานก่อนจะถูกย่อยเป็นน้ำตาลรีดิวซ์มากขึ้นจึงทำให้ความเป็นผลึกลดลง เมื่อเพิ่มความถี่เป็น 30 กิโลเฮิร์ตซ์ จึงทำให้เกิดการย่อยสลายที่มากขึ้นทำให้โครงสร้างอสัณฐานส่วนใหญ่ถูกย่อยเป็นน้ำตาลรีดิวซ์ทำให้เหลือเพียงโครงสร้างผลึกจึงทำให้ความเป็นผลึกสูงขึ้น



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงผลของการทดสอบตะกอนที่ความเข้มข้น 0.08 โมลาร์ โดยใช้ความถี่ที่ต่างกัน ด้วยเทคนิค XRD

ตารางที่ 4.3 แสดง Crystalline index เมื่อทรีทด้วยความเข้มข้น 0.08 โมลาร์ โดยความถี่ที่ต่างกัน

สถานะในการทดลอง	Crystalline index
Cellulose powder	86.55
15 กิโลเฮิร์ตซ์	93.29
22.5 กิโลเฮิร์ตซ์	91.84
30 กิโลเฮิร์ตซ์	94.65

จากผลการทดลองความเข้มข้นของกรดและความถี่ที่มีผลต่อความเป็นผลึกจะเห็นได้ว่าการเพิ่มความเข้มข้นกรดนั้นจะมีผลทำให้เกิดการย่อยสลายส่วนโครงสร้างที่เป็นอสัณฐานมากขึ้นแต่สามารถเปลี่ยนโครงสร้างผลึกให้เป็นโครงสร้างอสัณฐานเพื่อเป็นน้ำตาลรีดิวซ์ต่อไปได้เพียงเล็กน้อยเนื่องจาก

โครงสร้างผลึกของเซลลูโลสมีพันธะไฮโดรเจนและพันธะไกลโคซิดิกจึงยากต่อการย่อยสลายด้วยกรดเพียงอย่างเดียว เมื่อเปรียบเทียบกับผลของความถี่ การเพิ่มความถี่จะเป็นการเพิ่มพลังงานให้ระบบเพื่อลดความเสถียรของพันธะต่างๆ อีกทั้งยังผลิตหมู่องไวที่สามารถเข้าทำการย่อยสลายได้มากขึ้นจึงทำให้การเพิ่มความถี่มีผลต่อการย่อยสลายโครงสร้างผลึกเป็นโครงสร้างอสัณฐาน จึงสรุปได้ว่าการเพิ่มความเข้มข้นของกรดจะสามารถช่วยในการย่อยโครงสร้างอสัณฐานให้เป็นน้ำตาลรีดิวซ์แต่ไม่สามารถย่อยสลายหรือลดความเป็นผลึกของโครงสร้างลงได้ แต่การเพิ่มความถี่ของเครื่องกำเนิดพลาสมาจะเป็นการเพิ่มพลังงานลงไปในระบบทำให้เกิดความไม่เสถียรจึงทำให้พันธะต่างๆ ภายในโครงสร้างผลึกของเซลลูโลสนั้นถูกย่อยสลายได้ง่ายขึ้น

ตารางที่ 4.4 สภาวะในการทดลองและร้อยละผลได้ของการย่อยสลายเซลลูโลสเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	สภาวะในการทดลอง	ร้อยละผลได้
Jinping Ni, et al (2013) [36]	พรีทรีทและไฮโดรไลซิสด้วยกรดซัลฟิวริก 0.04 โมลาร์ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	น้ำตาลกลูโคส 57.6%
Binzhe sun, et al (2015) [37]	ไฮโดรไลซิสเซลลูโลสรูปแบบไฮโดรเจลในไมโครเวฟด้วยกรดซัลฟิวริก 0.1 โมลาร์ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที	น้ำตาลกลูโคส 44.7 %
Binzhe sun, et al (2015) [32]	ละลายเซลลูโลสด้วย NaOH และตกตะกอนด้วย HCl จากนั้นไฮโดรไลซิสด้วยกรดซัลฟิวริกด้วยไมโครเวฟ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที	น้ำตาลกลูโคส 36.7 %
การศึกษาปัจจุบัน	ย่อยสลายด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลวในกรดซัลฟิวริก 0.08 โมลาร์ ความถี่ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ 80 องศาเซลเซียส	น้ำตาลรีดิวซ์ 53.2 %

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาสภาวะต่างๆ ของพลาสมาวิภูภาคของเหลวและวิเคราะห์ผลการทดลองจึงสามารถสรุปได้ว่าการย่อยสลายเซลลูโลสด้วยพลาสมาวิภูภาคของเหลวจะช่วยเพิ่มร้อยละผลได้ของน้ำตาลรีดิวซ์ เนื่องจากการใช้พลาสมาวิภูภาคของเหลวจะเป็นการช่วยกระตุ้นให้กรดแตกตัวเป็นไฮโดรเจนไอออนได้มากขึ้นและผลิตหมู่ว่องไวไฮดรอกซิลจึงสามารถย่อยสลายได้มากขึ้น ชนิดของกรดมีผลต่อการย่อยสลายซึ่งกรดซัลฟิวริกจะให้ร้อยละผลได้ของน้ำตาลรีดิวซ์มากที่สุดเนื่องจากกรดซัลฟิวริกมีอะตอมของไฮโดรเจนสองอะตอมซึ่งมากกว่ากรดไนตริกและกรดไฮโดรคลอริกจึงทำให้แตกตัวเป็นไฮโดรเจนไอออนได้มากกว่าการเพิ่มความเข้มข้นของกรดจะเป็นเหมือนการเพิ่มปริมาณไฮโดรเจนไอออนเข้าไปในระบบทำให้มีการย่อยสลายมากขึ้นจึงทำให้ร้อยละผลได้เพิ่มขึ้นตามไปด้วย การเพิ่มความถี่ของเครื่องกำเนิดพลาสมาจะเป็นการเพิ่มพลังงานเข้าไปในระบบช่วยกระตุ้นการผลิตหมู่ว่องไวไฮดรอกซิลมากขึ้นแต่ว่าการที่เพิ่มพลังงานมากเกินไปจะทำให้ปริมาณหมู่ว่องไวไฮดรอกซิลส่วนเกินนั้นจะไปขัดขวางการย่อยสลายจึงจำเป็นจะต้องหาความถี่และความเข้มข้นที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ร้อยละผลได้ของน้ำตาลรีดิวซ์ที่มากที่สุด ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมที่สุดคือความเข้มข้นกรด 0.08 โมลาร์ และความถี่เครื่องกำเนิดพลาสมา 30 กิโลเฮิร์ตซ์ จะให้ร้อยละผลได้ที่ 50 ถึง 55 เปอร์เซ็นต์ และการเพิ่มไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้าไปในระบบจะเป็นการเพิ่มอัตราการย่อยสลายโดยจะต้องเติมลงไปด้วยอัตราส่วนที่เหมาะสมเพื่อให้ไม่เป็นการขัดขวางการย่อยสลายในระบบโดยที่อัตราส่วน 1:0.075 จะเพิ่มอัตราการย่อยสลายได้มากที่สุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

สำหรับงานวิจัยนี้ยังมีปัญหาที่ยังต้องศึกษาเพิ่มเติม อาทิเช่น การพรีทรีทเพื่อปรับปรุงสภาพของเซลลูโลสที่นำมาทำการย่อยสลายเพื่อเพิ่มร้อยละผลได้ของน้ำตาลและเป็นเพียงการเตรียมน้ำตาลรีดิวซ์ซึ่งสามารถพัฒนาต่อเป็นการเตรียมน้ำตาลกลูโคสซึ่งสามารถนำไปต่อยอด เช่น การนำน้ำตาลกลูโคสไปผลิตเป็นพลังงานทดแทนต่างๆ แต่อย่างไรก็ตามควรที่จะวิเคราะห์เพิ่มเติมในเรื่องความคุ้มค่าและต้นทุนที่ใช้ในการขยายขนาดให้สามารถนำไปใช้งานได้จริง

เอกสารอ้างอิง

- [1] Peng H., Li H., Luo H., and Xu J., A novel combined pretreatment of ball milling and microwave irradiation for enhancing enzymatic hydrolysis of microcrystalline cellulose. *Bioresource Technology* 2013; 130:81-87.
- [2] Sarkar N., Ghosh S.K., Bannerjee S., and Aikat K., Bioethanol production from agricultural wastes: an overview. *Renewable Energy* 2012; 37:19-27.
- [3] Laser M., Schulman D., Allen S., Lichwa J., and Antal M., A. Comparison of liquid hot water and steam pretreatments of sugar cane bagasse for bioconversion to ethanol. *Bioresource Technology* 2002; 81:33-44.
- [4] Gupta A., and Verma J.P., Sustainable bio-ethanol production from agro-residues: A review. *Renewable Sustainable Energy Review* 2015; 41:550-567.
- [5] Badger P.C., Ethanol From Cellulose: A General Review. *Trend in Crops and New Uses* (ASHS Press, Alexandria, VA) 2002:17-21.
- [6] Taherzadeh and Karimi Bioethanol review. *Bio Resources* 2007; 2: 472- 499.
- [7] Uihlein and Schbek Environmental impacts of a lignocellulosic feedstock biorefinery system: an assessment. *Biomass Bioenergy* 2009; 33:793-802
- [8] Demirbas A., Bioethanol from cellulosic materials: a renewable motor fuel from biomass. *Energy Sources* 2005; 27:327-333
- [9] Wyman C.E., Dale B.E., Elander R.T., Holtzapple M., Ladisch M.R., and Lee Y.Y., Comparative sugar recovery data from laboratory scale application of leading pretreatment technologies to corn stover. *Bioresource Technology* 2005; 96:2026-2032.
- [10] Shuai L., and Pan X., Hydrolysis of cellulose by cellulase-mimetic solid catalyst. *Energy & Environmental Science* 2012; 80:1028-1032.
- [11] Yang M., Zhang A., Liu B., Li W., and Xing J., Improvement of cellulose conversion caused by the protection of Tween-80 on the adsorbed cellulase. *Biochemical Engineering Journal* 2011; 56: 125-129.

- [12] Cantero A.D., Bermejo M.D., and Cocero M.J., High glucose selectivity in pressurized water hydrolysis of cellulose using ultra-fast reactors. *Bioresource Technology* 2013; 135:697-703.
- [13] Jones J., and Semrau K., Wood hydrolysis of ethanol production, previous experience and the economics of selected processes. *Biomass* 1984; 5: 109-135.
- [14] Katzen R., Madson P.W., and Monceaux D. A., Use of cellulosic feedstock for alcohol production. In *The Alcohols Textbook*, Lyons T.P., Murtagh J.E. and Kelsall D.R., (eds.), Nottingham University 1995 Press, 37-46.
- [15] Taherzadeh M. J., Eklund R., Gustafsson L., Niklasson C. and Liden G. Characterization and fermentation of dilute acid hydrolyzat from wood. *Industrial Engineering Chemical Research* 1997; 36:4659-4665.
- [16] Iranmahboob J., Nadim F., and Monemi S., Optimizing acid hydrolysis: a critical step for production of ethanol from mixed wood chips. *Biomass Bioenergy* 2002; 22:401-404.
- [17] Jain P., and Vigneshwaran N., Effect of Fenton pretreatment on cotton cellulosic substrates to enhance its enzymatic hydrolysis response. *Bioresource Technology* 2012; 103:219-226.
- [18] Orozco A., Ahmand M., Rooney D., and Walker G., Dilute acid hydrolysis of cellulose and cellulosic bio-waste using a microwave reactor system. *Trans. IChemE. Part B* 2007; 85:446-449.
- [19] Takai O., Solution plasma processing (SPP). *Pure Apply Chemistry* 2008; 80:2003-2011.
- [20] Potocký Š. , Saito N., and Takai O., Needle electrode erosion in water plasma discharge. *Thin Solid Films* 2009; 518:918-923.
- [21] Baroch P., Anita V., Saito N., and Takai O., Bipolar pulsed electrical discharge for decomposition of organic compounds in water. *Journal of Electrostatic* 2008; 66:294-299.
- [22] Prasertsung I., Damrongsakkul S., and Saito N., Degradation of β -chitosan by solution plasma process. *Polymer Degradation and Stability* 2013; 98:2089-2093.

- [23] Prasertsung I., Damrongsakkul S., Terashima C., Saito N., and Takai O., Preparation of low molecular weight chitosan using solution plasma system. *Carbohydrate Polymers* 2011; 87:2745-2749.
- [24] Pornsunthorntawe O., Katepetch C., Vanichvattanadecha C., Saito N., and Rujiravanit R., Depolymerization of chitosan-metal complexes via a solution plasma technique. *Carbohydrate Polymers* 2014; 102:504-512.
- [25] Oyeniyi Y.J., and Itiola O.A., The physicochemical characteristic of microcrystalline cellulose derived from sawdust agricultural waste products. *International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences* 2012; 1:197-200.
- [26] Diana C., Florin C., and Velemtin I.P., Amorphous cellulose-structure and characterization. *Cellulose Chemistry and Technology* 2011; 45(1-2):13-21.
- [27] Joseph M., Introduction to Textile Science. 1986; 5th Edition.
- [28] Laka M., and Chernyavskaya S., Obtaining microcrystalline cellulose from softwood and hardwood pulp. *Bioresources* 2007; 2(3):583-589.
- [29] วรณี แผงจันทิก., และ วิชัย เพ็ชรดี., การศึกษาการสกัดเอทานอลจากฟางข้าว. *ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น* 2546.
- [30] Swatloski R., Holbrey J., Spear S., and Rogers R., Cellulosic pulps fibers and materials. *Proceeding of the Electrochemical Society* 2002; 19:155.
- [31] Hu L., Lin L., Wu Z., Zhou S., and Liu S., Chemocatalytic hydrolysis of cellulose into glucose over solid acid catalysts. *Applied Catalysis B: Environmental* 2015; 174-175:225-243.
- [32] Sun B., Peng G., Duan L., Xu A., and Li X., Pretreatment by NaOH swelling and then HCl regeneration to enhance the acid hydrolysis of cellulose to glucose. *Bioresource Technology* 2015; 196:454-458.
- [33] Kang J., Li O.L., Saito N., Synthesis of structure-controlled carbon nano spheres by solution plasma process. *Carbon* 2013; 60:292-298.
- [34] Takai O., Solution plasma processing (SPP). *Pure and Applied Chemistry* 2008; 80:2003-201.

- [35] Miller G.L., Use of Dinitrosalicylic Acid Reagent for Determination of Reducing Sugar. *Analytical Chemistry* 1959; 31(3): 426–428.
- [36] Ni J., Wang H., Chen Y., She Z., Na H., and Zhu J., A novel facile two-step method for producing glucose from cellulose. *Bioresource Technology* 2013; 137:106-110.
- [37] Sun B., Duan L., Peng G., Li X., and Xu A., Efficient production of glucose by microwave-assisted acid hydrolysis of cellulose hydrogel. *Bioresource. Technology* 2015; 192:253-256.
- [38] Morales-delaRosa S., Campos-Martin J.M., and Fierro J.L.G., High glucose yields from the hydrolysis of cellulose dissolved in ionic liquids. *Chemical Engineering Journal* 2012; 181-182:538-541.
- [39] Zhang F., and Fang Z., Hydrolysis of cellulose to glucose at the low temperature of 423 K with CaFe_2O_4 -based solid catalyst. *Bioresource Technology* 2012; 124: 440-445.
- [40] Fang Z., Zhang F., Zeng H.Y., and Guo F., Production of glucose by hydrolysis of cellulose at 423 K in the presence of activated hydrotalcite nanoparticles. *Bioresource Technology* 2011; 102:8017-8021.
- [41] Vo H.T., Widayaya V.T., Jae J., Kim H.S., and Lee H., Hydrolysis of ionic cellulose to glucose. *Bioresource Technology* 2014; 167:484-489.
- [42] Hello K.M., Mihsen H.H., Mosa M.J., and Magtoof M.S., Hydrolysis of cellulose over silica-salicylaldehyde phenylhydrazone catalyst. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* 2015; 46:74-81.
- [43] Chimentao R.J., Lorente E., Gispert-Guirado F., Medina F., and Lopez F., Hydrolysis of dilute acid-pretreated cellulose under mild hydrothermal conditions. *Carbohydrate Polymers* 2014; 111:116-124.
- [44] Park J.H., Kumar N., Park D.H., Yusupov M., Neyts E.C., Verlactt C.C.W., Bogaert A., Kang M.H., Uhm H.S., Choi E.H., and Attri P., A comparative study for the inactivation of multidrug resistance bacteria using dielectric barrier discharge and nano-second pulsed plasma. *Scientific reports* 9 September (2015).

- [45] Chen Q., Wang Q., Mitsumra N., and Niida H., Improved Cellulose by Ionic Liquid Mixture with Solid Acid Catalysis and Its Application in Polyethylene Glycol Liquefaction. *Materials Sciences and Applications* 2013; 4:839-845.
- [46] เสาวนภรณ์ โชคสกุลพร., และคณะ การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์จากอ้อยเลา โดยกระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยกรด. *สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครพนม* 2557.
- [47] Winkler B.S., Boulton ME., Gottsch J.D., Sternberg P., Oxidative damage and age-related macular degeneration. 1999 Nov 3; 5:32.
- [48] Kupiainen L., Dilute Acid Catalysed Hydrolysis of Cellulose – Extension to formic acid. *University of Oulu Graduate School, Finland* 2012.
- [49] Vinu R., and SriBala G., Unified Kinetic Model for Cellulose Deconstruction via Acid Hydrolysis. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 2014; 53:8714-8725.
- [50] Pratt C., and Cornely K., *Essential Biochemistry*. Wiley 2013; 626.
- [51] Gunawardena G., *The Elements of Organic Chemistry*. Pages: 540.
- [52] Segal L., Creely J.J., Martin Jr A.E., and Conrad C.M., An Empirical Method for Estimating the Degree of Crystallinity of Native Cellulose using X-ray Diffractometer. *Textile Research Journal* 1959; 29:786-794.



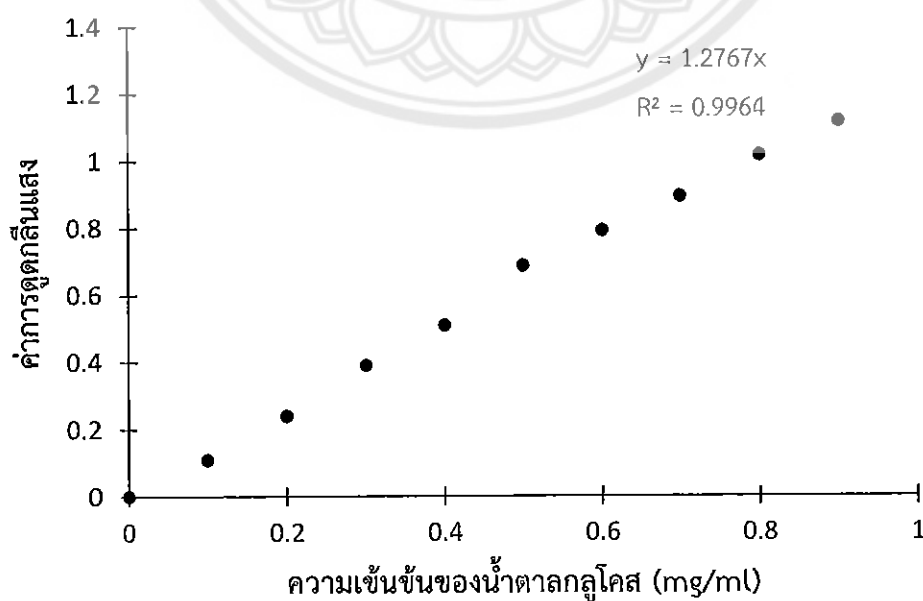
ภาคผนวก

ตัวอย่างการคำนวณ

กราฟมาตรฐานสำหรับการตรวจวัดปริมาณน้ำตาลด้วยเทคนิค DNS

ข้อมูลการวัดปริมาณน้ำตาลด้วยเทคนิค DNS โดยใช้น้ำตาลกลูโคสเป็นสารมาตรฐาน ดัง
แสดง

ความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคส (mg/mL)	ค่าการดูดกลืนแสง
0	0
0.1	0.108
0.2	0.239
0.3	0.389
0.4	0.509
0.5	0.687
0.6	0.791
0.7	0.893
0.8	1.015
0.9	1.116



จากกราฟจะได้ความชันเท่ากับ 1.2767

ตัวอย่างการคำนวณร้อยละผลได้ของน้ำตาลรีดิวซ์

ข้อมูลการทรีทตัวอย่างเซลลูโลสด้วยกรดซัลฟิวริก 0.08 โมลาร์ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ ครั้งที่ 1 ดังแสดงต่อไปนี้

เวลาในการทรีท (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง	ปริมาณการเจือจาง (เท่า)	ความเข้มข้นของน้ำตาล (mg/mL)	ร้อยละผลได้
0	0	8	0	0
30	0.063	8	0.3948	3.9477
60	0.194	8	1.2156	12.1563
90	0.237	8	1.4851	14.8508
120	0.325	8	2.0365	20.3650
150	0.366	8	2.2934	22.9341
180	0.452	8	2.8323	28.3230
210	0.552	9	3.8913	38.9128
240	0.638	9	4.4975	44.9753
270	0.687	9	4.8430	48.4295
300	0.756	9	5.3294	53.2936

จากข้อมูลที่นาทีที่ 300 สามารถนำมาคำนวณหาร้อยละผลได้ของน้ำตาลรีดิวซ์ได้ดังนี้

$$\text{ความเข้มข้นของน้ำตาล} = \frac{\text{ค่าการดูดกลืนแสง}}{\text{ความชันจากกราฟมาตรฐาน}} \times \text{ปริมาณการเจือจาง}$$

$$= \frac{0.756}{1.2767} \times 9 = 5.3294 \text{ mg/ml}$$

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละผลได้} &= \frac{\text{ผลิตภัณฑ์}}{\text{สารตั้งต้น}} \times \frac{\text{ความเข้มข้นของน้ำตาล}}{\text{ความเข้มข้นของเซลลูโลส}} \\ &= \frac{5.3294 \frac{\text{mg}}{\text{ml}}}{\frac{1 \text{ g}}{100 \text{ ml}}} = \frac{5.3294 \frac{\text{mg}}{\text{ml}}}{\frac{1000 \text{ mg}}{100 \text{ ml}}} = 0.53294 = 53.294\% \end{aligned}$$

ตัวอย่างการคำนวณ Pseudo first order kinetic

ข้อมูลการทรีทตัวอย่างเซลลูโลสด้วยกรดซัลฟิวริก 0.08 โมลาร์ 30 กิโลเฮิรตซ์ ครั้งที่ 2 ดังแสดงต่อไปนี้

เวลาในการทรีท (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง	ปริมาณการเจือจาง (เท่า)	ความเข้มข้นของน้ำตาล (mg/mL)	ร้อยละผลได้	X	$\ln \frac{1}{1-X}$
0	0	8	0	0	0	0
30	0.026	8	0.1629	1.6292	0.0163	0.0164
60	0.125	8	0.7833	7.8327	0.0783	0.0816
90	0.221	8	1.3848	13.8482	0.1385	0.1491
120	0.315	8	1.9738	19.7384	0.1974	0.2199
150	0.356	8	2.2308	22.3075	0.2231	0.2524
180	0.417	8	2.6130	26.1299	0.2613	0.3029
210	0.435	9	3.0665	30.6650	0.3066	0.3662
240	0.481	9	3.3908	33.9077	0.3391	0.4141
270	0.602	9	4.2438	42.4375	0.4244	0.5523
300	0.704	9	4.9628	49.6279	0.4963	0.6857

หมายเหตุ X คือ conversion

ปฏิกิริยาอันดับที่ 1

เซลลูโลส → น้ำตาลรีดีวซ์ : $A \rightarrow B$

$$-\frac{dC}{dt} = kC^1$$

$$-\int_{C_0}^C \frac{1}{C} dC = k \int_0^t dt$$

$$-(\ln C |_{C_0}^C) = kt$$

$$-(\ln C - \ln C_0) = \ln C_0 - \ln C = kt$$

$$\ln \frac{C_0}{C} = \ln \frac{C_0}{C_0(1-X)} = kt$$

$$\ln \frac{1}{1-X} = kt$$

เมื่อ ร้อยละผลได้ = $\frac{\text{ผลิตภัณฑ์}}{\text{สารตั้งต้น}} \times 100\%$

conversion (X) = $\frac{\text{สารตั้งต้นที่เปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์}}{\text{สารตั้งต้น}} \times 100\%$

กรณี $A \rightarrow B$

สารตั้งต้นเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ด้วยอัตราส่วน 1 ต่อ 1

ดังนั้น สารตั้งต้นที่เปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ = ผลิตภัณฑ์

$$\text{conversion (X)} = \frac{\text{ผลิตภัณฑ์}}{\text{สารตั้งต้น}} \times \frac{\text{ร้อยละผลได้}}{100}$$

ประวัติผู้จัดทำโครงการ



ชื่อ : นายก้องภพ บุญวงศ์
 ภูมิลำเนา : 167 หมู่ 6 ต. ห้วยไคร้ อ.แม่สาย จ.เชียงราย
 ประวัติการศึกษา :
 - จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสามัคคีวิทยาคม จังหวัดเชียงราย
 - ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรี ชั้นปีที่ 4 สาขาวิชา
 วิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
 E-mail : alanineify@gmail.com



ชื่อ : นายยอด ทองพิมพ์
 ภูมิลำเนา : 213/1 หมู่ 6 ต.สระแก้ว อ.เมืองกำแพงเพชร
 จ.กำแพงเพชร
 ประวัติการศึกษา :
 - จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนวัชรวิทยา จังหวัดกำแพงเพชร
 - ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรี ชั้นปีที่ 4 สาขาวิชา
 วิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
 E-mail : yodep_@hotmail.com



ชื่อ : นางสาวมลชนก ยอดวิเศษ
 ภูมิลำเนา : 154/2 หมู่ 9 ต.บุญเรือง อ.เชียงของ จ.เชียงราย
 ประวัติการศึกษา :
 - จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนกระทุ้มแบนวิเศษสมุทคุณ
 จังหวัดสมุทรสาคร
 - ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรี ชั้นปีที่ 4 สาขาวิชา
 วิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
 E-mail : Parn.Monchanok@gmail.com