

การเตรียมน้ำตาแร่ติวซ์จากเซลลูโลสด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลว



นางสาวภัทรพร ชูติเนตร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PREPARATION OF REDUCING SUGAR FROM CELLULOSE BY LIQUID PHASE PLASMA PROCESS.

Miss Pattaraporn Chutinaid



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเตรียมน้ำตาลรีตีวซ์จากเซลลูโลสด้วยกระบวนการ พลาสมาวิวัฒนาการของเหลว
โดย	นางสาวภัทรพร ชูดีเนตร
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริพร ดำรงค์ศักดิ์กุล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อิสราวุธ ประเสริฐสังข์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ศราวุธ ริมดุษิต)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริพร ดำรงค์ศักดิ์กุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อิสราวุธ ประเสริฐสังข์)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ ภาวนันต์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.นาวัน วิริยะเอี่ยมพิกุล)

ภัทรพร ชูดีเนตร : การเตรียมน้ำตาลรีดิวซ์จากเซลลูโลสด้วยกระบวนการพลาสมาวัฏภาคของเหลว (PREPARATION OF REDUCING SUGAR FROM CELLULOSE BY LIQUID PHASE PLASMA PROCESS.) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.ศิริพร ดำรงค์ศักดิ์กุล, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ผศ. ดร.อิศราวุธ ประเสริฐสังข์, 65 หน้า.

ปัจจุบันพลังงานจากชีวมวลเป็นพลังงานทางเลือกที่มีบทบาทสำคัญในการทดแทนพลังงานจากปิโตรเลียมที่เริ่มลดลง น้ำตาลกลูโคสที่ได้จากการย่อยสลายเซลลูโลสเป็นหนึ่งในวัตถุดิบหลักในการผลิตเอทานอลเพื่อเป็นพลังงานทางเลือก ทำให้กระบวนการย่อยสลายเซลลูโลสให้เป็นน้ำตาลโมเลกุลเล็กได้รับความสนใจมากขึ้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเตรียมน้ำตาลรีดิวซ์จากเซลลูโลสด้วยกระบวนการพลาสมาวัฏภาคของเหลวซึ่งเป็นวิธีใหม่ โดยทำการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำตาลรีดิวซ์ที่เกิดขึ้น ได้แก่ ชนิดของตัวทำละลายในสารแขวนลอยเซลลูโลส ชนิดของขั้วอิเล็กโทรดที่ใช้ในการทรีทพลาสมา ผลของการเพิ่มความถี่ไฟฟ้าของพลาสมา และผลของสารแขวนลอยเซลลูโลสที่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ปริมาณต่างๆ จากผลการศึกษาชนิดของตัวทำละลายในสารแขวนลอยเซลลูโลส และชนิดของขั้วอิเล็กโทรดที่ใช้ในระหว่างการทรีทพลาสมา พบว่าสารแขวนลอยเซลลูโลสที่ใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวทำละลาย และใช้เหล็กเป็นขั้วอิเล็กโทรดในการทรีทด้วยพลาสมา มีร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์สูงที่สุดเท่ากับ 25 สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ปริมาณอนุมูลไฮดรอกซิลที่เกิดขึ้นในระบบระหว่างการทรีทสารแขวนลอยเซลลูโลสด้วยพลาสมา ซึ่งพบว่าสารแขวนลอยเซลลูโลสที่ใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวทำละลาย และใช้เหล็กเป็นขั้วอิเล็กโทรดในการทรีทด้วยพลาสมา มีปริมาณอนุมูลไฮดรอกซิลมากที่สุด โดยอนุมูลไฮดรอกซิลจะเข้าทำลายพันธะไกลโคซิดิกของเซลลูโลส ทำให้เกิดการย่อยสลายเซลลูโลสได้ดี การศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงความถี่ที่ให้ในระบบระหว่างการทรีทสารแขวนลอยเซลลูโลสด้วยพลาสมาที่ความถี่ต่างๆ พบว่ากรณีความถี่ที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ปริมาณต่างๆ ในสารแขวนลอยเซลลูโลส พบว่าสารแขวนลอยเซลลูโลสที่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ปริมาณ 0.075% โดยปริมาตร มีร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์สูงที่สุดเท่ากับ 30 จากผลการศึกษาสรุปได้ว่าการเตรียมน้ำตาลรีดิวซ์จากเซลลูโลสด้วยพลาสมาวัฏภาคของเหลวโดยใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวทำละลาย ใช้เหล็กเป็นขั้วอิเล็กโทรด ความถี่ของพลาสมา 30 กิโลเฮิร์ตซ์ และเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ปริมาณ 0.075% โดยปริมาตร เป็นสภาวะที่ดีที่สุดที่ทำให้ได้ร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์สูงที่สุด

ภาควิชา	วิศวกรรมเคมี	ลายมือชื่อนิสิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก
ปีการศึกษา	2558	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5670329021 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS: CELLULOSE, SOLUTION PLASMA

PATTARAPORN CHUTINAID: PREPARATION OF REDUCING SUGAR FROM CELLULOSE BY LIQUID PHASE PLASMA PROCESS.. ADVISOR: ASSOC. PROF.SIRIPORN DAMRONGSAKKUL, Ph.D., CO-ADVISOR: ASST. PROF. ISARAWUT PRASERTSUNG, Ph.D., 65 pp.

Energy from biomass, plays an important role as renewable energy to replace petroleum energy. Cellulose can be degraded into reducing sugar, predominantly glucose. Reducing sugar can be further fermented into ethanol. Therefore, the degradation of cellulose to reducing sugar has received a lot of research interest. This work aimed to prepare reducing sugar from cellulose by solution plasma, a novel method. The investigated parameters are treatment time, type of solvents, type of electrodes, the frequency of solution plasma, and the addition of hydrogen peroxide. The results showed that %yield of total reducing sugar (TRS) was greatly enhanced by plasma treatment using Fe electrode and sulfuric acid as a solvent. The % TRS was increased by 25%. This corresponded to the results of the high amount of hydroxyl radical detected in the system. Glycosidic bonds of cellulose were destroyed by hydroxyl radicals, generated by solution plasma, resulting in the degradation of cellulose. The effects of various frequency of plasma used to treat cellulose suspensions showed that, the %TRS was increased with increasing frequency of plasma. In the case of adding hydrogen peroxide into cellulose suspensions, it was found that the %TRS was the highest when 0.075% (v/v) of hydrogen peroxide was added. Possibly it was the amount of hydrogen peroxide added in the system that was sufficient to enhance to Fenton reaction, resulting in more hydroxyl radicals. From the result, it could be concluded that, the solution plasma process was successfully introduced to treat cellulose suspensions in order to prepare reducing sugar. The highest %TRS was achieved when sulfuric acid was used as solvent with Fe electrode, at the frequency of 30 kHz, and the addition of 0.075% (v/v) of hydrogen peroxide.

Department: Chemical Engineering Student's Signature

Field of Study: Chemical Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2015 Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยได้รับการช่วยเหลือจากหลายๆ ท่าน ซึ่งผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ศิริพร ดำรงค์ศักดิ์กุล อาจารย์ที่ปรึกษา, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อิศราวุธ ประเสริฐสังข์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม เป็นอย่างสูงสำหรับการให้คำปรึกษาเกี่ยวกับงานวิจัย วางแผนการวิจัย การตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ และแนวทางในการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบคุณคณะกรรมการ ซึ่งได้แก่ รองศาสตราจารย์ ดร. ศราวุธ ริมดุสิต ประธานกรรมการ, รองศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ ภาสันต์ และ ดร. นาวิน วิริยะเยี่ยมพิกุล กรรมการ ที่ท่านได้สละเวลาอันมีค่ามาสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนงานวิจัยจากหน่วยวิจัยเทคโนโลยีพลาสมาและนิวเคลียร์ฟิวชัน (Plasma Technology and Nuclear Fusion Research Unit.) ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. โศรดา กนกพานนท์ สำหรับคำแนะนำและข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการทำการทดลอง

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร สำหรับสถานที่และอุปกรณ์ในการทำการทดลอง รวมทั้งเอื้อเฟื้อเครื่องมือในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมวัสดุการแพทย์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และห้องปฏิบัติการวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ได้ให้กำลังใจ คำแนะนำ และให้ความช่วยเหลือจนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และทุกคนในครอบครัวที่เป็นกำลังใจให้การสนับสนุนตลอดมาจนกระทั่งงานวิจัยลุล่วงไปได้ด้วยดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	1
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 มูลเหตุจูงใจ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	5
2.1 เซลลูโลส (cellulose).....	5
2.1.1 แหล่งกำเนิดเซลลูโลส.....	5
2.1.2 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส.....	6
2.2 กระบวนการย่อยสลายเซลลูโลส.....	8
2.2.1 การย่อยสลายเซลลูโลสด้วยกรดเข้มข้นหรือกรดเจือจาง (Acid hydrolysis).....	8
2.2.2 การย่อยสลายเซลลูโลสด้วยเอนไซม์ (Enzyme hydrolysis).....	10
2.3 พลาสมาวิภาคของเหลว (Solution plasma).....	12
2.3.1 หลักการของพลาสมาวิภาคของเหลว.....	12
2.3.2 เครื่องกำเนิดพลาสมาวิภาคของเหลว.....	13
2.3.3 การประยุกต์ใช้พลาสมาวิภาคของเหลว.....	15
2.4 ชนิดของน้ำตาล.....	16

2.5 เทคนิคการวิเคราะห์คุณลักษณะและสมบัติของเซลลูโลสที่ผ่านการทรีทด้วยพลาสมาวิทยุ ภาคของเหลว	18
2.5.1. การวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ด้วยเทคนิคกรดไดไนโตรซาลิไซลิก (3,5 dinitrosalicylic acid, DNS)	19
2.5.2. การวิเคราะห์ปริมาณอนุโมลไฮดรอกซิลด้วยกรดซาลิไซลิก	19
2.5.3 การวิเคราะห์โครงสร้างความเป็นผลึกด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD).....	20
2.5.4 การวิเคราะห์ลักษณะสัญญาณด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope TEM)	21
2.5.5 การวิเคราะห์การดูดกลืนแสงด้วยเทคนิค UV-Vis spectrophotometry.....	22
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	23
2.6.1 การย่อยสลายเซลลูโลสด้วยกรด	23
2.6.2 การย่อยสลายเซลลูโลสด้วยเอนไซม์.....	24
2.6.3 ระบบที่ย่อยสลายเซลลูโลสด้วยวิธีอื่น	26
2.6.4 ระบบที่ใช้พลาสมาวิทยุภาคของเหลวย่อยสลายพอลิแซ็กคาไรด์	26
บทที่ 3 วัสดุและวิธีดำเนินงานวิจัย	29
3.1 วัสดุและสารเคมี.....	29
3.2 อุปกรณ์.....	29
3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	31
3.3.1 การติดตั้งระบบพลาสมาวิทยุภาคของเหลว	32
3.3.2 การย่อยสลายเซลลูโลสด้วยพลาสมาวิทยุภาคของเหลว	33
3.3.3 การวิเคราะห์สมบัติส่วนของของแข็งที่ผ่านการทรีทและไม่ทรีทด้วยพลาสมา	33
3.3.3.1 การตรวจสอบความเป็นผลึกของเซลลูโลสด้วยเทคนิค XRD	33

3.3.3.2 การศึกษาลักษณะสัณฐานของตะกอนที่สีกร่อนจากข้าวเปลือกโทรดด้วยเทคนิค TEM.....	34
3.3.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติของส่วนของเหลวที่ผ่านการทรีทด้วยพลาสมา.....	34
3.3.4.1 การวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ด้วยวิธี DNS.....	34
3.3.4.2 การหาปริมาณอนุมูลไฮดรอกซิลด้วยกรดซาลิไซลิก	35
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	36
4.1 ผลของชนิดตัวทำละลายในสารแขวนลอยเซลล์ูโลสและเวลาในการทรีทด้วยพลาสมาวัฏภาคของเหลว	36
4.2 ผลของชนิดข้าวเปลือกโทรดและเวลาในการทรีทสารแขวนลอยเซลล์ูโลสด้วยพลาสมาวัฏภาคของเหลว	39
4.3 ลักษณะสัณฐานของอนุภาคที่สีกร่อนจากข้าวเปลือกโทรดระหว่างทรีทสารแขวนลอยเซลล์ูโลสด้วยพลาสมาวัฏภาคของเหลว	45
4.4 ผลของพลาสมาวัฏภาคของเหลวที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างความเป็นผลึกของเซลล์ูโลส.....	48
4.5 ผลของการเปลี่ยนแปลงความถี่ที่มีต่อร้อยละผลได้ของน้ำตาลรีดิวซ์.....	51
4.6 ผลของการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในสารแขวนลอยเซลล์ูโลสที่มีต่อร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์	53
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	56
5.1 สรุปผลการทดลอง	56
5.2 ข้อเสนอแนะ	58
รายการอ้างอิง	59
ภาคผนวก.....	62
ภาคผนวก ก.	63
ภาคผนวก ข.	64

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์65



สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2. 1	โครงสร้างของเซลลูโลสในผนังเซลล์พืช	5
รูปที่ 2. 2	โครงสร้างทางเคมีของน้ำตาลกลูโคส	6
รูปที่ 2. 3	โครงสร้างของเซลลูโลส	6
รูปที่ 2. 4	พันธะไฮโดรเจนระหว่างสายเซลลูโลสในชั้นเดียวและระหว่างชั้น	7
รูปที่ 2. 5	ลักษณะโครงสร้างความเป็นระเบียบของเซลลูโลส	7
รูปที่ 2. 6	กลไกการย่อยสลายเซลลูโลส	9
รูปที่ 2. 7	การทำปฏิกิริยาของกรดกับน้ำตาลกลูโคส	9
รูปที่ 2. 8	โครงสร้างของเซลลูโลสฟอสเฟต	10
รูปที่ 2. 9	กลไกการย่อยสลายเซลลูโลสด้วยเอนไซม์เซลลูเลส	11
รูปที่ 2. 10	การเข้าทำลายพันธะไกลโคซิดิกของเซลโลไบโอสด้วยเอนไซม์เบต้ากลูโคซิเดส	12
รูปที่ 2. 11	ภาพถ่ายและแบบจำลองของพลาสมาวิภาคของเหลว	13
รูปที่ 2. 12	ไดอะแกรมของเครื่องกำเนิดพลาสมาวิภาคของเหลว	14
รูปที่ 2. 13	โครงสร้างทางเคมีของน้ำตาลกลูโคส	17
รูปที่ 2. 14	โครงสร้างของน้ำตาลโมเลกุลคู่ที่เป็นน้ำตาลรีดิคัล	18
รูปที่ 2. 15	โครงสร้างของน้ำตาลโมเลกุลคู่ที่เป็นน้ำตาลนอนรีดิคัล	18
รูปที่ 2. 16	ปฏิกิริยาของน้ำตาลรีดิคัลกับกรดไดไนโตรซาลิไซลิก	19
รูปที่ 2. 17	ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นของกรดซาลิไซลิกและอนุมูลไฮดรอกซิล	20
รูปที่ 2. 18	เส้นเบนของรังสีเอ็กซ์ระหว่างอะตอมภายในของผลึก	21
รูปที่ 2. 19	ส่วนประกอบและการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน	22
รูปที่ 3. 1	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	31
รูปที่ 3. 2	ระบบพลาสมาวิภาคของเหลว.....	32
รูปที่ 3. 3	ถึงปฏิกรณ์พลาสมาและหัวอิเล็กโทรด.....	33

- รูปที่ 4. 1** ร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากสารแขวนลอยเซลลูโลส 1% โดยน้ำหนัก ในตัวทำละลาย 4 ชนิด คือ น้ำกลั่น กรดฟอสฟอริก กรดไนตริก และกรดซัลฟิวริก ซึ่งผ่านการทรีทด้วยพลาสติกภาควัภาคของเหลวที่เวลา 0-300 นาที ความถี่ไฟฟ้า 15 กิโลเฮิร์ตซ์ โดยใช้ทั้งสแตนเป็นขั้วอิเล็กโทรด37
- รูปที่ 4. 2** กลไกการไฮโดรไลซิสเซลลูโลสด้วยกรด38
- รูปที่ 4. 3** ร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากสารแขวนลอยเซลลูโลส 1% โดยน้ำหนัก ในกรดซัลฟิวริก 0.04 โมลาร์ โดยใช้ขั้วอิเล็กโทรด 3 ชนิด คือ ทั้งสแตน ทองแดง และเหล็ก ทรีทด้วยพลาสติกเป็นเวลา 0-300 นาที ความถี่ไฟฟ้า 15 กิโลเฮิร์ตซ์ และร้อยละได้น้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากสารแขวนลอยเซลลูโลส 1% โดยน้ำหนัก ในกรดซัลฟิวริก 0.04 โมลาร์ ด้วยการให้ความร้อนที่ 60 องศาเซลเซียส (ไม่ผ่านการทรีทด้วยพลาสติก).....40
- รูปที่ 4. 4** แสดงกลไกการย่อยสลายโคโคซานด้วยกระบวนการพลาสติกภาควัภาคของเหลว41
- รูปที่ 4. 5** ความเข้มข้นของอนุภาคไฮดรอกซิลที่ตรวจพบในสารแขวนลอยเซลลูโลส 1% โดยน้ำหนัก ในกรดซัลฟิวริก 0.04 โมลาร์ ทรีทด้วยพลาสติกโดยใช้ขั้วอิเล็กโทรด 3 ชนิด คือ ทั้งสแตน ทองแดง และเหล็กเป็นเวลา 0-300 นาที ความถี่ไฟฟ้า 15 กิโลเฮิร์ตซ์43
- รูปที่ 4. 6** การเกิดปฏิกิริยาระหว่างน้ำตาลรีดิวซ์และไอออนที่เกิดขึ้นในระบบระหว่างการทรีทสารแขวนลอยเซลลูโลสด้วยพลาสติกที่ใช้ทองแดงเป็นขั้วอิเล็กโทรด45
- รูปที่ 4. 7** ลักษณะสัญญาณของอนุภาคที่สึกกร่อนจากขั้วอิเล็กโทรดระหว่างการทรีทสารแขวนลอยเซลลูโลส 1% โดยน้ำหนัก ด้วยพลาสติกในสารละลายกรดซัลฟิวริก 0.04 โมลาร์ โดยใช้เหล็กและทองแดงเป็นขั้วอิเล็กโทรด ที่เวลา 300 นาที ความถี่ไฟฟ้า 15 กิโลเฮิร์ตซ์ ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (ก) เมื่อใช้เหล็กเป็นขั้วอิเล็กโทรด (ข) เมื่อใช้ทองแดงเป็นขั้วอิเล็กโทรด (สเกลบาร์เท่ากับ 20 นาโนเมตร).....47
- รูปที่ 4. 8** ผลการวิเคราะห์ด้วย XRD ของเซลลูโลสในสารแขวนลอยเซลลูโลสที่ไม่ผ่านการทรีทและผ่านการ ทรีทด้วยพลาสติกในสารละลายกรดซัลฟิวริก 0.04 โมลาร์ โดยใช้ขั้วอิเล็กโทรด 3 ชนิด คือ ทั้งสแตน ทองแดง และเหล็ก ความถี่ไฟฟ้า 15 กิโลเฮิร์ตซ์ เป็นเวลา 300 นาที49
- รูปที่ 4. 9** ร้อยละดัชนีความเป็นผลึกของเซลลูโลสในสารแขวนลอยเซลลูโลสที่ไม่ผ่านการทรีทและผ่านการ ทรีทด้วยพลาสติกในสารละลายกรดซัลฟิวริก 0.04 โมลาร์ โดยใช้ขั้วอิเล็กโทรด 3 ชนิด คือ ทั้งสแตน ทองแดง และเหล็ก ความถี่ไฟฟ้า 15 กิโลเฮิร์ตซ์ เป็นเวลา 0-300 นาที50

รูปที่ 4. 10 ร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์ที่เกิดจากสารแขวนลอยเซลลูโลส 1% โดยน้ำหนัก ในสารละลายกรดซัลฟิวริก 0.04 โมลาร์ ซึ่งผ่านการทรีทด้วยพลาสมาวิภาคของเหลว ความถี่ไฟฟ้า 15 22.5 และ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ เป็นเวลา 0-300 นาที โดยใช้เหล็กเป็นขั้วอิเล็กโทรด52

รูปที่ 4. 11 ร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์ที่เกิดจากสารแขวนลอยเซลลูโลส 1% โดยน้ำหนัก ในสารละลายกรดซัลฟิวริก 0.04 โมลาร์ ซึ่งผ่านการทรีทด้วยพลาสมาวิภาคของเหลว ความถี่ไฟฟ้า 15 กิโลเฮิร์ตซ์ เป็นเวลา 0-300 นาที ใช้เหล็กเป็นขั้วอิเล็กโทรด โดยมีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ปริมาณ 0.1% 0.05% และ 0.075% โดยปริมาตร เปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....54



บทที่ 1

บทนำ

1.1 มุลเหตุจูงใจ

ปัจจุบันพลังงานจากชีวมวลเป็นพลังงานทางเลือกที่มีบทบาทสำคัญในการทดแทนพลังงานจากปิโตรเลียมที่เริ่มลดน้อยลงและยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก ดังนั้นการพัฒนาการผลิตวัตถุดิบสำหรับการผลิตพลังงานชีวมวล อาทิ การผลิตแป้งจากมันสำปะหลัง การผลิตน้ำมันปาล์ม การผลิตน้ำตาลทรายจากอ้อย เป็นต้น ในปัจจุบันพลังงานชีวมวลที่ได้รับความความสนใจเป็นอย่างมาก อาทิ การผลิตเอทานอล ซึ่งการผลิตเอทานอลสามารถผลิตได้จากวัตถุดิบประเภทน้ำตาล แป้ง และเซลลูโลส [1] เนื่องจากเซลลูโลสเป็นวัตถุดิบที่ได้จากธรรมชาติ ไม่นิยมนำไปผลิตเป็นอาหารของมนุษย์ ไม่ส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม และให้ประสิทธิภาพการผลิตน้ำตาลกลูโคสสูง น้ำตาลกลูโคสที่ได้จากการย่อยสลายเซลลูโลสยังเป็นหนึ่งในวัตถุดิบหลักที่ใช้ในกระบวนการผลิตเอทานอลเพื่อเป็นพลังงานทางเลือก ทำให้กระบวนการย่อยสลายเซลลูโลสให้เป็นน้ำตาลโมเลกุลเล็กจึงได้รับความสนใจมากขึ้นตามความต้องการในการใช้พลังงานและการลดลงของแหล่งเชื้อเพลิงจากซากดึกดำบรรพ์ [2, 3]

เซลลูโลสเป็นคาร์โบไฮเดรตประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ที่เชื่อมต่อกันด้วยมอนอแซ็กคาไรด์ซึ่งมีน้ำตาลกลูโคสเป็นโมเลกุลที่เล็กที่สุด แต่ละโมเลกุลของน้ำตาลกลูโคสจะเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิก มีแรงยึดเหนี่ยวของพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่ ทำให้สายโซ่ของเซลลูโลสเรียงขนานกัน มีลักษณะเป็นเส้นใยสะสมในผนังเซลล์พืชทุกชนิด มักอยู่รวมกันกับเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน ทำให้โครงสร้างของพืชมีความแข็งแรง เซลลูโลสไม่สามารถละลายน้ำ ทนต่อปฏิกิริยาของเอนไซม์ กรด และด่างที่เจือจาง ไม่พบในเซลล์สัตว์ ร่างกายของมนุษย์ไม่สามารถย่อยสลายได้ แต่ในกระเพาะของวัว กระบือ ม้า และสัตว์ที่แทะมีกีบ ซึ่งมีเอนไซม์เซลลูเลสที่ได้จากแบคทีเรียสามารถย่อยสลายเซลลูโลสให้เป็นน้ำตาลกลูโคสได้ โดยน้ำตาลกลูโคสเป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอเอทานอลซึ่งเป็นพลังงานทางเลือกที่มีความสำคัญและได้รับความนิยมาภายในประเทศ ดังนั้นจึงมีนักวิจัยให้ความสนใจที่จะศึกษาวิธีการผลิตน้ำตาลกลูโคสจากการย่อยสลายเซลลูโลสเป็นจำนวนมาก [4-7]

กระบวนการย่อยสลายเซลลูโลสที่นิยมนำมาใช้ในปัจจุบันมี 2 วิธี คือ การย่อยสลายทางเคมีด้วยกรดหรือด่างเข้มข้น และกระบวนการย่อยสลายด้วยเอนไซม์เซลลูเลส [8-14] ในกระบวนการย่อยสลายเซลลูโลสด้วยกรดหรือด่างเข้มข้น อาทิ กรดซัลฟิวริก กรดฟอสฟอริก และโซเดียมไฮดรอกไซด์

เป็นต้น นิยมดำเนินการในสภาวะที่รุนแรงและอุณหภูมิสูง ส่งผลให้เกิดการย่อยสลายน้ำตาลกลูโคสไปด้วย เกิดปฏิกิริยาข้างเคียงและต้นทุนสูง เนื่องจากวัสดุที่ใช้ต้องทนต่อการกัดกร่อน การกำจัดกรดออกจากผลิตภัณฑ์ทำได้ยากและหลายขั้นตอน สำหรับกระบวนการย่อยสลายเซลลูโลสด้วยเอนไซม์เซลลูเลส เป็นกระบวนการผลิตน้ำตาลกลูโคสที่มีประสิทธิภาพ เนื่องจากเอนไซม์มีความจำเพาะเจาะจงในการเข้าทำปฏิกิริยา การเกิดปฏิกิริยาสามารถเกิดได้ในสภาวะไม่รุนแรง อุณหภูมิที่ใช้ไม่สูงมาก แต่การย่อยสลายด้วยเอนไซม์ต้องใช้เวลาหลายวัน การทำให้เกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์และได้ผลิตภัณฑ์น้ำตาลกลูโคสมากจำเป็นต้องผ่านขั้นตอนการพรีทรีทเซลลูโลสด้วยกรดเข้มข้นสูง ทำให้มีหลายขั้นตอนและมีความยุ่งยาก

กระบวนการพลาสมาวิญญาคของเหลวเป็นกระบวนการที่ค้นพบโดย O.Takai [9] และได้มีการประยุกต์ใช้พลาสมาในด้านต่างๆ อาทิ การสังเคราะห์อนุภาคนาโน การปรับปรุงพื้นผิวของโลหะ และการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากกระบวนการพลาสมาวิญญาคของเหลวเป็นกระบวนการที่ใช้แรงดันและความถี่ไฟฟ้ากระตุ้นให้สารละลายเกิดเป็นอนุมูลอิสระที่มีความสามารถในการเข้าทำปฏิกิริยาได้ดี [9] นอกจากนี้ชนิดของขั้วอิเล็กโทรดที่ใช้ยังส่งผลต่อความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาภายในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมา จากงานวิจัยของ I. Prasertsung และคณะ[15] ซึ่งได้ศึกษาการย่อยสลายโคโตซานด้วยกระบวนการพลาสมาวิญญาคของเหลว โดยพบว่า โคโตซานที่ผ่านการทรีทด้วยพลาสมาจะมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำลง เนื่องจากกระบวนการพลาสมาสามารถสร้างอนุมูลไฮดรอกซิลที่มีความว่องไวในการเข้าทำปฏิกิริยา ทำให้ความเป็นผลึกลดลงส่งผลให้โคโตซานเกิดการย่อยสลายได้ ในงานวิจัยของ O. Pornsunthorntawe และคณะ [16] ได้ศึกษาการย่อยสลายโคโตซานด้วยกระบวนการพลาสมาวิญญาคของเหลวร่วมกับเติมโลหะเชิงซ้อน พบว่าการเติมโลหะเชิงซ้อนชนิดคอปเปอร์ (II) (Cu^{2+}) และไอรอน (III) (Fe^{3+}) ส่งผลทำให้น้ำหนักโมเลกุลและค่าความหนืดของโคโตซานลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ได้เติมโลหะเชิงซ้อนที่ผ่านการทรีทด้วยพลาสมา ซึ่งให้เห็นว่าการเติมโลหะเชิงซ้อนทำให้เกิดการย่อยสลายโคโตซานด้วยพลาสมาเพิ่มขึ้น จากงานวิจัยทั้งสอง แสดงให้เห็นว่าพลาสมาสามารถย่อยสลายโคโตซานซึ่งเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ชนิดหนึ่ง ทำให้เกิดแนวคิดในผลิตน้ำตาลรีดิวซ์จากการย่อยสลายเซลลูโลสด้วยพลาสมา

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาการย่อยสลายเซลลูโลสซึ่งมีอยู่เป็นจำนวนมากในธรรมชาติด้วยพลาสมาวิญญาคของเหลว โดยวิธีการย่อยสลายเซลลูโลสด้วยพลาสมาวิญญาคของเหลวจะเกิดขึ้นภายใต้สภาวะที่ไม่รุนแรง โดยใช้กรดเจือจาง นอกจากนี้พลาสมาวิญญาคของเหลวยังเป็นระบบที่ใช้

แรงดันไฟฟ้าเพื่อให้ของเหลวสามารถนำไฟฟ้าได้ และของเหลวเกิดการแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระที่มีความว่องไวในการเข้าทำปฏิกิริยากับเซลลูโลส ชนิดของขั้วอิเล็กโทรดที่ใช้ในการทรีทเซลลูโลสด้วยพลาสมาจะมีผลต่อชนิดของอนุภาคที่เกิดขึ้นในระบบ และความสามารถในการย่อยสลายเซลลูโลส งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำตาลรีดิวซ์ที่เกิดขึ้น ได้แก่ ชนิดของตัวทำละลายในสารแขวนลอยเซลลูโลส ชนิดของขั้วอิเล็กโทรดที่ใช้ในการทรีทพลาสมา ผลของการเพิ่มความถี่ไฟฟ้าของพลาสมา และผลของการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในสารแขวนลอยเซลลูโลสก่อนการทรีทด้วยพลาสมา นอกจากนี้ยังศึกษาโครงสร้างความเป็นผลึกของเซลลูโลสที่ผ่านการทรีทด้วยพลาสมา และลักษณะสัณฐานของอนุภาคที่เกิดจากการสีก่อนของขั้วอิเล็กโทรดในระหว่างการทรีทด้วยพลาสมา เพื่อพัฒนากระบวนการใหม่ที่จะสามารถเตรียมน้ำตาลรีดิวซ์จากเซลลูโลส และพัฒนาพลังงานทางเลือกจากชีวมวลให้เกิดประโยชน์สูงสุดต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาผลของการย่อยสลายเซลลูโลสด้วยกระบวนการพลาสมาวัฏภาคของเหลว

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 ติดตั้งระบบกระบวนการพลาสมาวัฏภาคของเหลว

1.3.2 เตรียมสารแขวนลอยเซลลูโลส 1 กรัม ในตัวทำละลาย 100 มิลลิลิตร และทรีทด้วยพลาสมาโดยมีตัวแปรที่ทำการศึกษาดังนี้

- ชนิดของตัวทำละลาย คือ น้ำกลั่น กรดซัลฟิวริก กรดฟอสฟอริก และกรดไนตริก
- ชนิดของขั้วอิเล็กโทรด คือ ทังสเตน เหล็ก และทองแดง
- ความถี่ไฟฟ้าที่ให้ในระบบระหว่างการทรีท คือ 15 22.5 และ 30 กิโลเฮิร์ตซ์
- การเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 0.05% 0.075% และ 0.1% โดยปริมาตร ในสารแขวนลอยเซลลูโลส

1.3.3 การวิเคราะห์ผลของการย่อยสลายเซลลูโลสด้วยพลาสมาวัฏภาคของเหลว

1.3.3.1 การวิเคราะห์ส่วนของเหลวที่ผ่านการย่อยสลายด้วยพลาสมา

- ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ด้วยเทคนิค Dinitrosalicylic Method (DNS)

- ปริมาณอนุมูลไฮดรอกซิลที่เกิดในระบบระหว่างการทรีทสารแขวนลอยเซลลูโลสด้วยพลาสมา

1.3.3.2 การวิเคราะห์ส่วนของแข็งของสารแขวนลอยเซลลูโลสที่ผ่านการทรีทด้วยพลาสมา

- โครงสร้างความเป็นผลึกของเซลลูโลสด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction (XRD)
- ลักษณะสัณฐานของอนุภาคที่สีกร่อนจากซั้วอิเล็กโตรระหว่างการทรีทสารแขวนลอยเซลลูโลสด้วยพลาสมาด้วยเทคนิค Transmission Electron Microscopy (TEM)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถเตรียมน้ำตาลกลูโคสจากเซลลูโลสโดยกระบวนการพลาสมาวิภาคของเหลวซึ่งเป็นวิธีใหม่ที่ใช้เวลาไม่มาก และไม่ก่อให้เกิดมลภาวะมากนัก



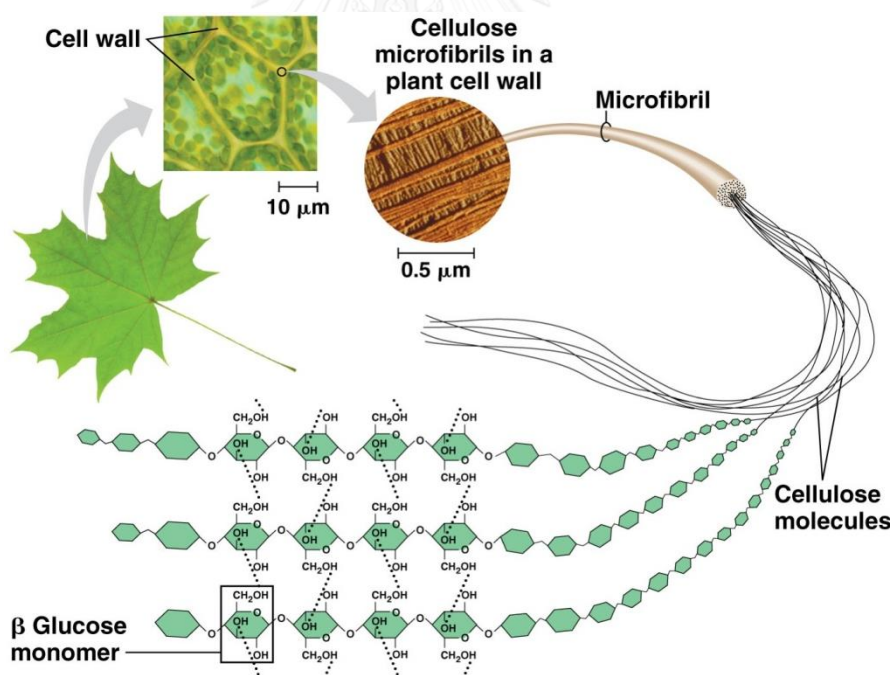
บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 เซลลูโลส (cellulose)

2.1.1 แหล่งกำเนิดเซลลูโลส

เซลลูโลส เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่สะสมอยู่ในผนังเซลล์พืชทุกชนิด ซึ่งเซลลูโลสมีแรงยึดติดกันระหว่างสายโซ่โมเลกุลทำให้มีโครงสร้างเรียงขนานกันอย่างเป็นระเบียบ เซลลูโลสในผนังเซลล์ (Cell wall) ประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคสที่เรียงต่อกันไม่ต่ำกว่า 14,000 โมเลกุล โมเลกุลของน้ำตาลกลูโคสจะเกาะกันเป็นคู่ตามยาวและเรียงขนานกันโดยไม่มีกิ่งก้านสาขา เซลลูโลสที่เรียงตัวเป็นมัดๆ เรียกว่า ไมโครไฟบริล (Microfibril) โดยมีสารเพกทิน (Pectin) ทำหน้าที่ในการเชื่อมเพื่อให้ผนังเซลล์ของพืชมีความแข็งแรง โครงสร้างของเซลลูโลสในผนังเซลล์พืชแสดงในรูปที่ 2.1



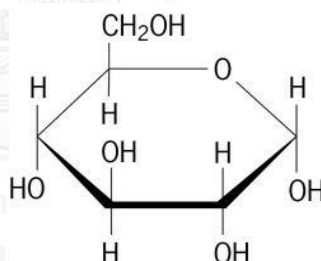
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเซลลูโลสในผนังเซลล์พืช [5]

เซลลูโลสส่วนใหญ่ที่พบในธรรมชาติมักจะอยู่รวมกับลิกนิน เฮมิเซลลูโลส เพนโตแซน ซึ่งสารประกอบดังกล่าวมีความแตกต่างจากเซลลูโลส สารประกอบที่มีโครงสร้างใกล้เคียงกับเซลลูโลสคือ เฮมิเซลลูโลส โดยประกอบด้วยกลุ่มของน้ำตาลหลายชนิด น้ำตาลกลุ่มใหญ่ที่สุดจะเป็น น้ำตาล

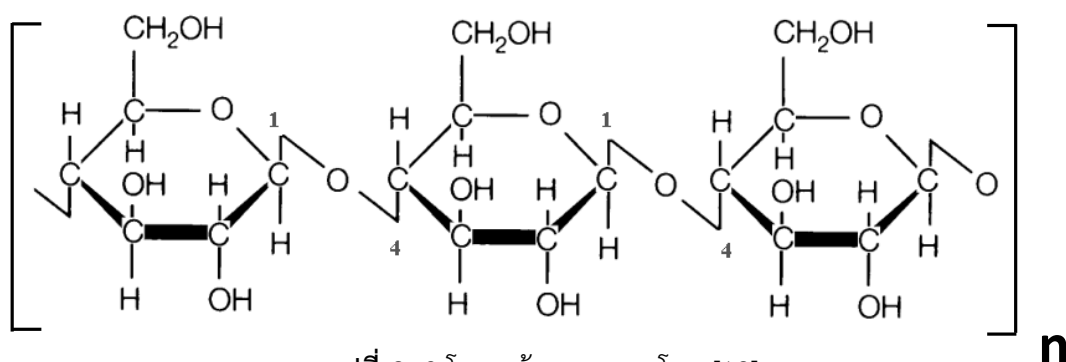
ไซโลส (xylose) ซึ่งมีคาร์บอน 5 ตัว เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิก ที่ตำแหน่ง บีตา (1,4) เป็นโซ่หลัก นอกจากนี้ยังมีน้ำตาลกลุ่มอื่น เช่น น้ำตาลกลูโคส และน้ำตาลอะราบินอส ความแตกต่างของเฮมิเซลลูโลสกับเซลลูโลส คือ เฮมิเซลลูโลสสามารถละลายได้ดีในสารละลายต่างหรือกรดอ่อน ในขณะที่เซลลูโลสไม่สามารถละลายได้ [1-4]

2.1.2 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส

เซลลูโลสเป็นคาร์โบไฮเดรตประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคส (D-Glucose) เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิก (Glycosidic bond) ระหว่างคาร์บอนตำแหน่งที่ 1 และคาร์บอนตำแหน่งที่ 4 ของหน่วยที่อยู่ติดกันหรือที่ตำแหน่ง บีตา 1,4 เป็นสายยาวมากกว่า 2,000 โมเลกุล โดยมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 20,000 – 2,400,000 ดาลตัน ภายในโครงสร้างของเซลลูโลสยึดติดกันด้วยพันธะไฮโดรเจนและแรงแผ่กระจายของโมเลกุล การเรียงตัวของโมเลกุลเซลลูโลสมีลักษณะเป็นเส้นตรง ทำให้เซลลูโลสทำปฏิกิริยากับสารต่างๆ ได้ช้า สูตรเคมีทั่วไป คือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ เมื่อ n คือ จำนวนน้ำตาลกลูโคสทั้งหมดในโครงสร้าง โดยโครงสร้างทางเคมีของน้ำตาลกลูโคสแสดงในรูปที่ 2.2 และโครงสร้างของเซลลูโลสแสดงในรูปที่ 2.3

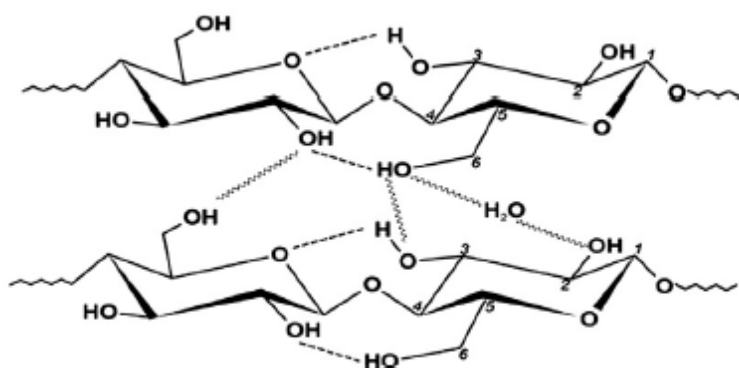


รูปที่ 2. 2 โครงสร้างทางเคมีของน้ำตาลกลูโคส [17]

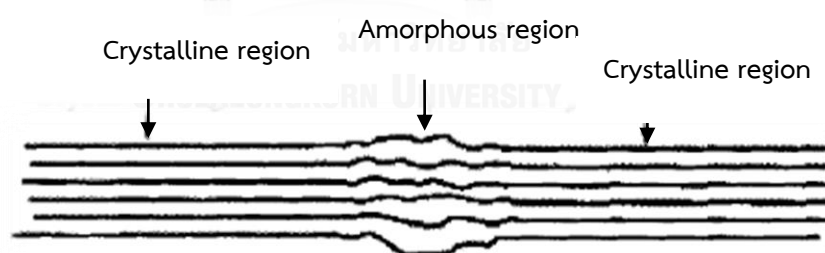


รูปที่ 2. 3 โครงสร้างของเซลลูโลส [18]

เนื่องจากการเชื่อมกันระหว่างน้ำตาลกลูโคสเป็นแบบ β -configuration ส่งผลให้หน่วยน้ำตาลกลูโคสลับชั้นลงภายในสายโซ่ ดังนั้นโมเลกุลขนาดใหญ่จึงมีโครงสร้างเป็นแบบซินดิโอแทคติก (Syndiotactic) โมเลกุลของเซลลูโลสมีลักษณะเป็นเส้นตรงมีพันธะไฮโดรเจนเชื่อมต่อกัน พันธะไฮโดรเจนระหว่างสายเซลลูโลสในชั้นเดียวและระหว่างชั้นแสดงในรูปที่ 2.4 ทำให้โครงสร้างโมเลกุลจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ โดยทั่วไปเซลลูโลสประกอบด้วยส่วนที่เป็นผลึก (Crystalline) 55-75% และอสัณฐาน (Amorphous) 25-45% [4] ลักษณะโครงสร้างความเป็นระเบียบของเซลลูโลสแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2. 4 พันธะไฮโดรเจนระหว่างสายเซลลูโลสในชั้นเดียวและระหว่างชั้น [17]



รูปที่ 2. 5 ลักษณะโครงสร้างความเป็นระเบียบของเซลลูโลส [17]

โครงสร้างของเซลลูโลสมีผลต่อความสามารถในการเข้าทำปฏิกิริยาของกรด [5] หมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl) ในโครงสร้างอสัณฐานมีความว่องไวต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก และเกิดปฏิกิริยาเคมีได้ง่าย บริเวณโครงสร้างผลึกซึ่งมีการจัดเรียงตัวแน่นเป็นระเบียบ และมีพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่ทำให้มีความแข็งแรงสูง ดังนั้นหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างผลึกจึงเกิดปฏิกิริยาได้ยาก แต่

สามารถทำให้บริเวณโครงสร้างผลึกเกิดปฏิกิริยาได้โดยการทำให้เกิดการบวมตัว หรือการลดความเป็นโครงสร้างผลึกโดยทำปฏิกิริยากับกรดเข้มข้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสารที่ทำปฏิกิริยาและสภาวะที่ใช้ อาทิ เวลา อุณหภูมิ และชนิดของตัวทำละลาย

2.2 กระบวนการย่อยสลายเซลลูโลส

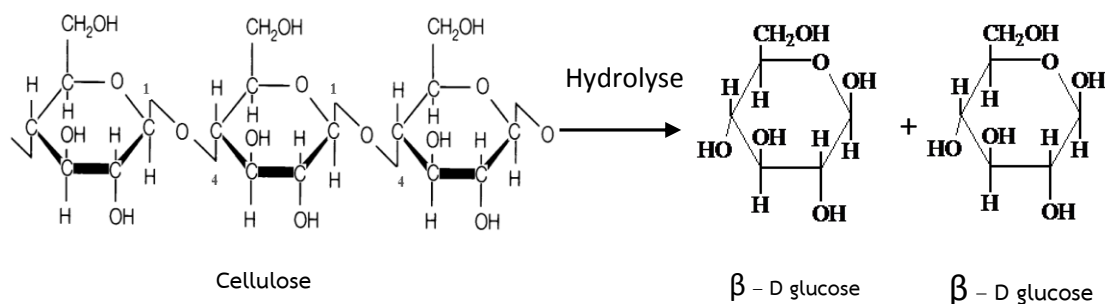
เซลลูโลสเป็นสารประกอบที่มีโครงสร้างเป็นผลึกจับตัวกันระหว่างกลูโคสด้วยพันธะไกลโคไซด์ซึ่งยากต่อการย่อยสลาย นอกจากนี้ ในธรรมชาติเซลลูโลสจะอยู่ร่วมกับลิกนิน ซึ่งเป็นตัวขัดขวางการย่อยสลายด้วย ซึ่งการย่อยสลายเซลลูโลสที่นิยมมี 2 วิธี คือ

2.2.1 การย่อยสลายเซลลูโลสด้วยกรดเข้มข้นหรือกรดเจือจาง (Acid hydrolysis) [5]

โดยทั่วไปเซลลูโลสสามารถถูกย่อยสลายหรือไฮโดรไลซ์ด้วยกรด อาทิ กรดซัลฟิวริก กรดฟอสฟอริก และกรดไฮโดรคลอริก ซึ่งปฏิกิริยาจะเกิดที่อุณหภูมิสูง ช่วงของความเข้มข้นของกรดและอุณหภูมิที่นิยมใช้ทั่วไป คือ กรดไฮโดรคลอริกในช่วงความเข้มข้น 37-42% ที่อุณหภูมิ 30-50 องศาเซลเซียส กรดซัลฟิวริกในช่วงความเข้มข้น 65-75% ที่อุณหภูมิ 35-45 องศาเซลเซียส และกรดฟอสฟอริกในช่วงความเข้มข้น 71-85% ที่อุณหภูมิ 22-50 องศาเซลเซียส โดยอาจมีการผสมระหว่างกรดไฮโดรคลอริกและกรดซัลฟิวริกหรือกรดฟอสฟอริกที่อุณหภูมิต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียส เป็นต้น

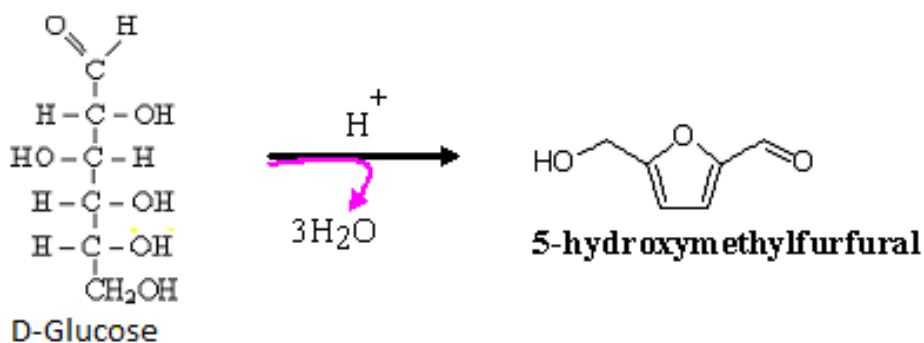
กลไกการย่อยสลายเซลลูโลสด้วยกรด

โครงสร้างเซลลูโลสประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (OH^-) ประมาณ 31-48% ซึ่งเป็นหมู่ที่มีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา ทำให้ H^+ ที่เกิดจากการแตกตัวของกรดในตัวทำละลายน้ำเข้าทำปฏิกิริยาที่พันธะไกลโคซิดิกของเซลลูโลส (ระหว่างคาร์บอนตำแหน่งที่ 1 และคาร์บอนตำแหน่งที่ 4 ของน้ำตาลกลูโคสที่เชื่อมต่อกัน) ทำให้พันธะแยกออกเกิดการย่อยสลายเซลลูโลสเป็นน้ำตาลกลูโคสและน้ำตาลชนิดอื่นๆ ได้ กลไกการย่อยสลายเซลลูโลสแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2. 6 กลไกการย่อยสลายเซลลูโลส [19]

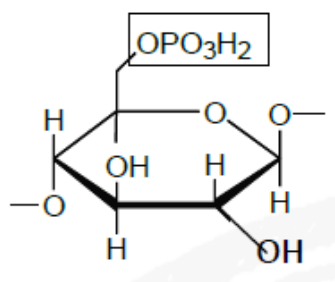
ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นน้ำตาลกลูโคสซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับกรดต่อและจะถูกดึงน้ำออกจากโมเลกุลเกิดเป็นเฟอร์ฟูรัล (Furfural) และ 5 - ไฮดรอกซีลเมทิลเฟอร์ฟูรัล (5 - hydroxymethylfurfural, 5-HMF) ปริมาณที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับสภาวะที่ใช้ในการย่อยทั้งความเป็นกรดและระยะเวลาด้วย การทำปฏิกิริยาของกรดกับน้ำตาลกลูโคสแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2. 7 การทำปฏิกิริยาของกรดกับน้ำตาลกลูโคส [16]

การละลายเซลลูโลสด้วยกรดฟอสฟอริกทำให้เซลลูโลสที่มีโครงสร้างแบบผลึกกลายเป็นโครงสร้างแบบอสัณฐาน ส่งผลให้การไฮโดรไลซิสเซลลูโลสง่ายขึ้น ซึ่งสามารถเกิดได้ 2 กระบวนการคือ ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน และการแข่งขันของโครงสร้างพันธะไฮโดรเจน

ในกระบวนการแรกจะเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน (Esterification) ระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของเซลลูโลสและหมู่ไฮดรอกซิลกรดฟอสฟอริก เกิดเป็นเซลลูโลสฟอสเฟตที่มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุได้ดี ส่งผลให้เซลลูโลสสามารถย่อยสลายได้ง่ายขึ้น โครงสร้างของเซลลูโลสฟอสเฟตแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2. 8 โครงสร้างของเซลลูโลสฟอสเฟต [21]

สำหรับกระบวนการแข่งขันของโครงสร้างพันธะไฮโดรเจนจะเกิดขึ้นระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของสายโซ่เซลลูโลสและโมเลกุลน้ำหรือไอออนไฮโดรเจน ในขณะที่เดียวกันอาจเกิดปฏิกิริยาอื่น ๆ ขึ้นด้วย การไฮโดรไลซิสด้วยกรดของเซลลูโลสเกิดขึ้นที่พันธะปีต้าไกลโคซิดิก เนื่องจากเกิดการถ่ายเทโปรตอนจากการด้อยอย่างรวดเร็วไปยังอะตอมออกซิเจนของเซลลูโลส จากนั้นจะแลกเปลี่ยนเกิดเป็นคาร์บอนเนียมไอออน (Carbonium ion, C⁺) และเกิดโมเลกุลน้ำ ทำให้พันธะไกลโคซิดิกแยกออกอย่างช้าๆ เป็นผลให้เซลลูโลสเกิดการย่อยสลาย

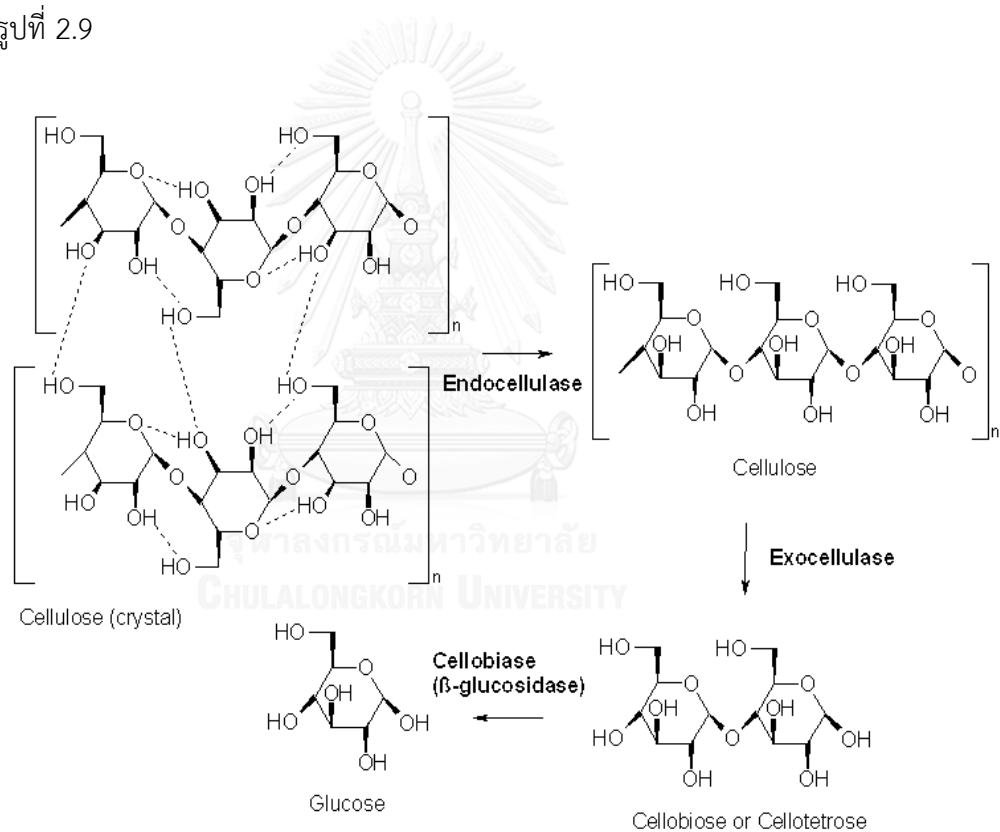
ข้อดีของวิธีการย่อยสลายเซลลูโลสด้วยกรดเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีที่ย่อยสลายด้วยเอนไซม์คือ ประหยัดและสะดวก เนื่องจากขั้นตอนการย่อยด้วยเอนไซม์ต้องมีขั้นตอนพรีทรีท (Pretreatment) และต้องใช้เวลาในการย่อยสลายเพื่อการทำงานที่ดีของเอนไซม์ นอกจากนี้ วิธีการย่อยสลายด้วยกรดยังใช้ปริมาณกรดเพียงเล็กน้อย และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาสั้นกว่า

2.2.2 การย่อยสลายเซลลูโลสด้วยเอนไซม์ (Enzyme hydrolysis)

เอนไซม์เซลลูเลส (Cellulase) เป็นเอนไซม์ที่ใช้ในการย่อยสลายเซลลูโลสซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากจุลินทรีย์ อาทิ เชื้อรา แบคทีเรีย โดยการย่อยสลายเซลลูโลสด้วยเอนไซม์จะเกิดปฏิกิริยาภายใต้สภาวะที่ไม่รุนแรง ที่อุณหภูมิประมาณ 50 องศาเซลเซียส และความดันบรรยากาศ เนื่องจากเอนไซม์เซลลูเลสมีความจำเพาะเจาะจงในการย่อยสลายต่อเซลลูโลส ซึ่งมีข้อดีคือ ทำให้ไม่สูญเสียน้ำตาลกลูโคสระหว่างการเกิดปฏิกิริยาและสะดวกต่อการย่อยสลาย สามารถผลิตน้ำตาลกลูโคสได้ในปริมาณมาก เอนไซม์เซลลูเลส ประกอบด้วย 3 กลุ่ม คือ เอนโดเซลลูเลส (Endo - cellulase) เอกโซเซลลูเลส (Exo - cellulase) และ เบต้ากลูโคซิเดส (β - glucosidase) โดยที่เซลลูเลสแต่ละกลุ่มจะทำหน้าที่ต่างกัน

กลไกการย่อยสลายเซลลูโลสด้วยเอนไซม์เซลลูเลส

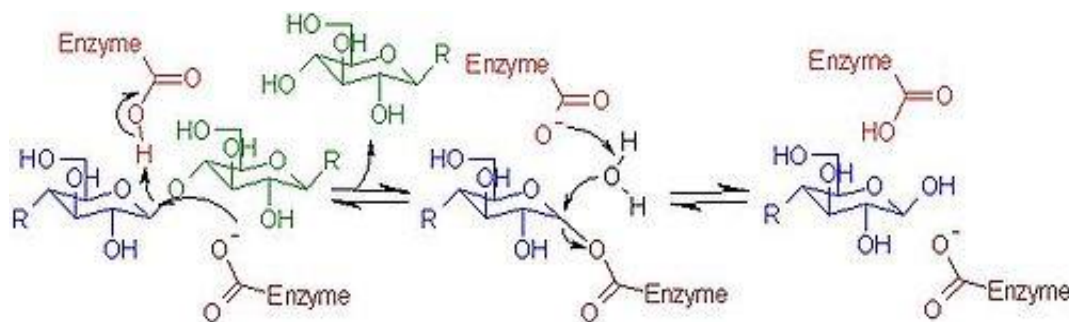
การย่อยสลายเซลลูโลสด้วยเอนไซม์เซลลูเลสเป็นกระบวนการย่อยสลายที่มีความจำเพาะเจาะจงสูง เอนไซม์จะไม่ทำปฏิกิริยากับสารอื่น ๆ ที่ปนเปื้อนมา ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์น้ำตาลกลูโคสที่มีความบริสุทธิ์ เอนไซม์จะทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายโดยเริ่มจาก เอนโดเซลลูเลสจะเข้าทำลายพันธะ β 1-4 ไกลโคซิดิกแบบชุ่มภายในโมเลกุลของเซลลูโลส ทำให้เกิดการแตกตัวของโครงสร้างผลึก เกิดเป็นเซลลูโลสที่มีปลายอิสระ หลังจากนั้นเอกโซเซลลูเลสจะเข้าไปย่อยสลายเซลลูโลสให้เป็นเซลโลไบโอส (Cellobiose) ขั้นตอนสุดท้ายเบต้ากลูโคซิเดสจะเข้าไปทำลายพันธะ β 1-4 ไกลโคซิดิกของเซลโลไบโอส เกิดเป็นน้ำตาลกลูโคส [12-14] กลไกการย่อยสลายเซลลูโลสด้วยเอนไซม์เซลลูเลสแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 กลไกการย่อยสลายเซลลูโลสด้วยเอนไซม์เซลลูเลส [19]

ในการเข้าทำลายพันธะไกลโคซิดิกของเซลโลไบโอสด้วยเอนไซม์เบต้ากลูโคซิเดส ส่วนของออกซิเจนไอออนในเอนไซม์จะเข้าไปดึงไฮโดรเจนออกจากพันธะไกลโคซิดิกระหว่างโมเลกุลของน้ำตาลกลูโคสที่อยู่ติดกัน เมื่อโมเลกุลของน้ำตาลกลูโคสแยกออกจากกัน ไฮโดรเจนที่จับกับเอนไซม์เบต้ากลูโคซิเดสจะถูกดึงกลับเข้าสู่โมเลกุลของน้ำตาลกลูโคสอีกครั้ง ทำให้น้ำตาลกลูโคสไม่ถูกทำลาย

กระบวนการนี้จึงเป็นกระบวนการที่ได้ผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำตาลกลูโคสสูง การเข้าทำลายพันธะไกลโคซิดิกของเซลโลไบโอสด้วยเอนไซม์ เบต้ากลูโคซิเดสแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การเข้าทำลายพันธะไกลโคซิดิกของเซลโลไบโอสด้วยเอนไซม์เบต้ากลูโคซิเดส [19]

ข้อดีของการย่อยสลายเซลลูโลสด้วยเอนไซม์ คือ เอนไซม์สามารถทำงานได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ แรงปฏิกิริยาได้โดยไม่ต้องให้ความร้อนทำให้ประหยัดต้นทุนในการผลิต ปฏิกิริยาที่มีเอนไซม์เป็นตัวเร่งจะเกิดได้เร็วกว่าปฏิกิริยาที่ไม่มีเอนไซม์ เนื่องจากเอนไซม์ไปลดพลังงานอิสระของการกระตุ้นของปฏิกิริยา ทำให้ปฏิกิริยาไปสู่ภาวะสมดุลได้เร็ว เอนไซม์มีความจำเพาะกับสารตั้งต้น ดังนั้นผลผลิตที่ได้จะมีความบริสุทธิ์มาก ไม่เกิดปฏิกิริยาข้างเคียง เนื่องจากเอนไซม์มีความจำเพาะกับสารตั้งต้น นอกจากนี้ยังไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ที่ทนต่อการกัดกร่อน

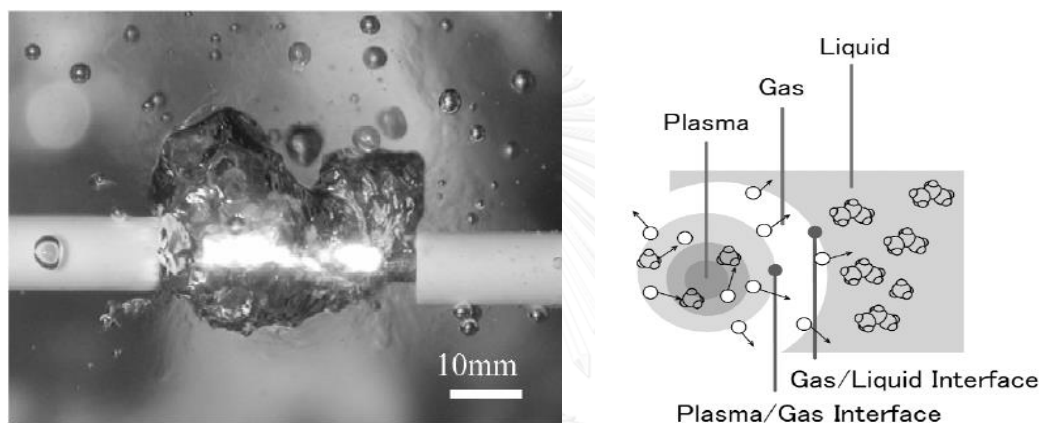
2.3 พลาสมาวิญญากาศของเหลว (Solution plasma) [9]

2.3.1 หลักการของพลาสมาวิญญากาศของเหลว

พลาสมาวิญญากาศของเหลว คือ กระบวนการผลิตพลาสมาที่ล้อมรอบด้วยวิญญากาศของเหลว โดยใช้ความต่างศักย์ของไฟฟ้ากระตุ้นให้เกิดอนุมูลอิสระ (Free radical) ซึ่งอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจะเข้าทำปฏิกิริยาได้เร็ว ข้อดีของพลาสมาวิญญากาศของเหลว คือ สามารถใช้งานได้หลากหลาย เนื่องจากสามารถเลือกชนิดของตัวทำละลายและสารละลายที่ใช้ในการผลิตพลาสมาได้ ในปัจจุบันกระบวนการพลาสมาได้รับความนิยมในการนำมาประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ อาทิ การสังเคราะห์อนุภาคนาโน การดัดแปลงพื้นผิวของโลหะ และการบำบัดน้ำเสีย เป็นต้น [9]

รูปแบบการเกิดพลาสมาวิญญากาศของเหลวแสดงไว้ในรูปที่ 2.11 โดยพลาสมาเกิดขึ้นที่ตำแหน่งตรงกลางระหว่างขั้วอิเล็กโทรด ทั้งหมดซึ่งถูกล้อมรอบด้วยก๊าซและของเหลว ส่งผลให้เกิด

ผิวสัมผัสระหว่างสถานะ 2 บริเวณ คือ พลาสมา กับ ก๊าซ และ ก๊าซ กับ ของเหลว สถานะ ก๊าซ เกิดขึ้นเมื่อของเหลวที่อยู่ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดถูกกระตุ้นด้วยแรงดันไฟฟ้าสูง เมื่อถึงจุดที่สารเกิดการแตกตัวเป็นอนุภาคหรือสถานะพลาสมา บริเวณที่เกิดพลาสมาจะสามารถนำไฟฟ้าได้และทำให้เกิดฟองก๊าซขึ้นบริเวณรอบๆ พลาสมา ในขณะที่พลาสมาถูกกระตุ้นด้วยแรงดันไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง จะทำให้อนุภาคอิสระระหว่างขั้วอิเล็กโทรดเพิ่มมากขึ้น เกิดการเคลื่อนตัวไปในอยู่บริเวณของเหลวที่มีอนุภาคอิสระน้อยกว่าโดยอาศัยหลักการถ่ายโอนมวล ดังนั้นสารที่อยู่ในวัฏภาคของเหลวแพร่เข้ามาแทนที่ และถูกกระตุ้นให้แตกตัวกลายเป็นอนุภาคอิสระต่อไป จากหลักการดังกล่าว ส่งผลให้อนุภาคอิสระภายในสารละลายเพิ่มขึ้นจึงเกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้นด้วย

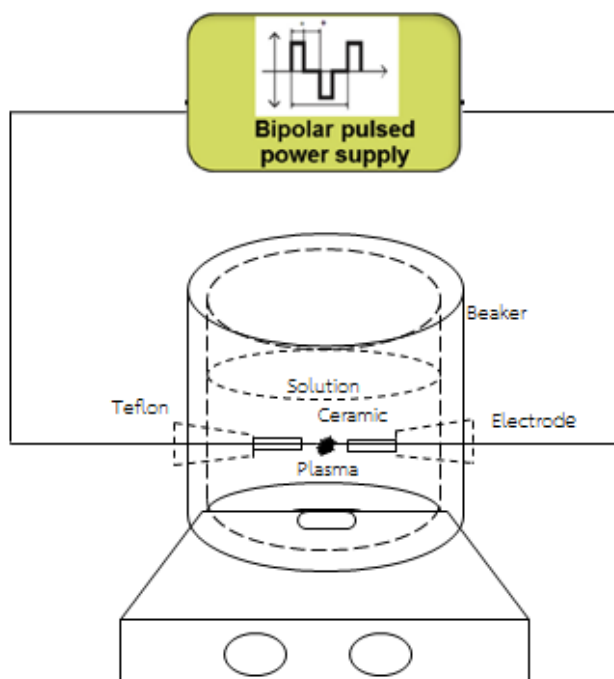


รูปที่ 2. 11 ภาพถ่ายและแบบจำลองของพลาสมาวัฏภาคของเหลว [9]

2.3.2 เครื่องกำเนิดพลาสมาวัฏภาคของเหลว

พลาสมาวัฏภาคของเหลวสามารถผลิตได้จากเครื่องกำเนิดพลาสมาดังแสดงในรูปที่ 2.12 โดยเครื่องกำเนิดพลาสมาจะประกอบด้วยองค์ประกอบสำคัญ 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ใช้แรงดันไฟฟ้าและความถี่ไฟฟ้าสูงระบบกระแสตรง ซึ่งแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าจะทำหน้าที่จ่ายกระแสไฟฟ้าแบบพัลส์ให้กับระบบ โดยมีทิศทางกระแสไฟฟ้าแบบสลับขั้วบวกและลบ (Bipolar pulse) เนื่องจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าโดยทั่วไปเป็นกระแสไฟฟ้าชนิดกระแสสลับ ดังนั้นจะต้องใช้อุปกรณ์ที่ติดตั้งไว้ในแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า ซึ่งทำหน้าที่ในการแปลงระบบไฟฟ้าจากกระแสสลับให้เป็นกระแสตรงก่อนที่จะจ่ายกระแสไฟฟ้าไปยังถึงปฏิกรณ์พลาสมาเพื่อผลิตพลาสมาต่อไป สำหรับองค์ประกอบส่วนที่ 2 คือ ถังปฏิกรณ์พลาสมา โดยทั่วไปแล้วนิยมทำจากวัสดุแก้วเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5-10 เซนติเมตร ซึ่งตำแหน่งด้านข้างของทั้ง 2 ด้านของถังปฏิกรณ์จะติดตั้ง

อิเล็กโทรดที่ทำจากวัสดุทั้งสแตน เหล็กและทองแดง เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร และระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดประมาณ 0.2 มิลลิเมตร อิเล็กโทรดทั้งสองจะถูกหุ้มด้วยเซรามิก เพื่อป้องกันความร้อนและการลัดวงจรของกระแสไฟฟ้าที่อาจเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิตพลาสมา



รูปที่ 2. 12 ไดอะแกรมของเครื่องกำเนิดพลาสมาวัฏภาคของเหลว [15]

พลาสมาสามารถสร้างอนุมูลอิสระในการเข้าทำปฏิกิริยากับสารละลายภายในเครื่องปฏิกรณ์ โดยอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจากการให้แรงดันไฟฟ้าและความถี่ไฟฟ้าสูงแก่ขั้วอิเล็กโทรด ส่งผลให้สารละลายที่อยู่ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทำหน้าที่เป็นสารตัวนำไฟฟ้า เมื่อโมเลกุลได้รับพลังงานจากกระแสไฟฟ้าจะแตกตัวเป็นไอออนที่สามารถนำไฟฟ้าได้ ไอออนเหล่านี้เรียกว่า อนุมูลอิสระ อนุมูลอิสระที่มักเกิดขึ้นระหว่างการทรีท สารละลายด้วยพลาสมา เช่น อนุมูลไฮดรอกซิล ($\text{OH}\cdot$) อนุมูลไฮโดรเปอร์ออกซิล ($\text{H}_2\text{O}_2\cdot$) อนุมูลอิสระอิเล็กตรอน (e^-) เป็นต้น [10] นอกจากนี้ ชนิดของขั้วอิเล็กโทรดยังมีผลต่อความสามารถในการสร้างอนุมูลอิสระ สีของแสงพลาสมาที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วอิเล็กโทรดซึ่งอยู่ภายในสารละลาย แสดงถึงชนิดของอนุมูลอิสระโดยสามารถตรวจวัดได้โดยเครื่อง Optical Emission Spectrometer (OES) [15]

2.3.3 การประยุกต์ใช้พลาสมาวิวัฒนาการของเหลว

การสังเคราะห์อนุภาคนาโนด้วยกระบวนการพลาสมาวิวัฒนาการของเหลว [9] เป็นการสังเคราะห์ภายใต้สารละลาย Chloroauric acid (HAuCl_4) ซึ่งเป็นสารละลายที่มีตัวทำละลายเป็นน้ำ (Aqueous solution) และไม่ใช่ น้ำ (Nonaqueous solution) ในระบบเปิด ที่ติดตั้งระบบพลาสมาแรงดัน 2.5 kV ความถี่ 60 kHz และ Pulse width 2 μs จากการศึกษา พบว่า ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคนาโนมีค่าสูงสุด 10.5 ± 3.6 นาโนเมตร ที่ความเข้มข้นของสารละลาย HAuCl_4 0.60 มิลลิโมลาร์ ซึ่งทำการวิเคราะห์ด้วย Transmission Electron Microscope (TEM) จากการศึกษาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Energy dispersive x-ray analysis (EDX) และ Infrared Spectroscopy (IR) ชี้ให้เห็นว่า อนุภาคนาโนมีองค์ประกอบของทองและมีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร โดยความเข้มข้นของพีทจะสูงขึ้นตามระยะเวลาในการดีสชาร์จ (Discharge time) นอกจากนี้ พลาสมาวิวัฒนาการของเหลวยังสามารถสังเคราะห์อนุภาคนาโนที่เป็นทองให้มีรูปร่างแบบเรขาคณิตได้ อาทิ สามเหลี่ยม ห้าเหลี่ยมและหกเหลี่ยม โดยใช้สารละลายที่มีตัวทำละลายเป็นน้ำ ดังนั้นการสังเคราะห์อนุภาคนาโนด้วยวิธีพลาสมาวิวัฒนาการของเหลวจึงเป็นวิธีที่คาดว่าจะสามารถพัฒนาการสังเคราะห์อนุภาคนาโนในรูปแบบต่างๆ เพิ่มเติมอีก

การดัดแปรพื้นผิวของโลหะด้วยกระบวนการพลาสมาวิวัฒนาการของเหลว [9] โดยใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วแอโนดและเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นขั้วแคโทด และคงค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายที่ใช้ระหว่าง 8 และ 12 จากการศึกษาพบว่า ลักษณะทางกระแสไฟฟ้าและแรงดัน (Current voltage) แสดงให้เห็นถึง 3 ส่วน ที่แตกต่างกัน คือ ส่วนที่ 1 ให้แรงดันต่ำ 0 และ 150 V ยังไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงพื้นผิวของขั้วแอโนดและแคโทดอย่างเห็นได้ชัด จากกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับความต่างศักย์ไฟฟ้า พบว่า ส่วนที่ 1 มีความชัน 0.5 mA/V เมื่อเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้ามากขึ้น พบว่า ความชันในส่วนที่ 2 เพิ่มขึ้นเป็น 7.5 mA/V และสังเกตเห็นฟองก๊าซเพิ่มมากขึ้น เมื่อให้แรงดันที่มากกว่า 175 V ลักษณะพื้นผิวของขั้วแอโนดเริ่มถูกดัดแปร ทั้งนี้ค่าแรงดันจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ด้วย ส่วนที่ให้แรงดันสูงสุด 200 V ความชันกราฟมีค่าต่ำลงเป็น 2.7 mA/V พื้นผิวของโลหะถูกพัฒนาเพิ่มมากขึ้นด้วย และอัตราการเกิดปฏิกิริยาของฟิล์มอะลูมิเนียมและไทเทเนียมออกไซด์เพิ่มขึ้นตามความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการดีสชาร์จที่สูงขึ้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงสุด $1.7 \mu\text{m}/\text{min}$ จากผลการศึกษาด้วยเทคนิค SEM ที่ฟิล์มอะลูมิเนียม 2 ชั้น พบว่า ฟิล์มชั้นนอกมีความแข็งแรงต่ำและมีรูพรุนสูง ภายในมีความแข็งแรง

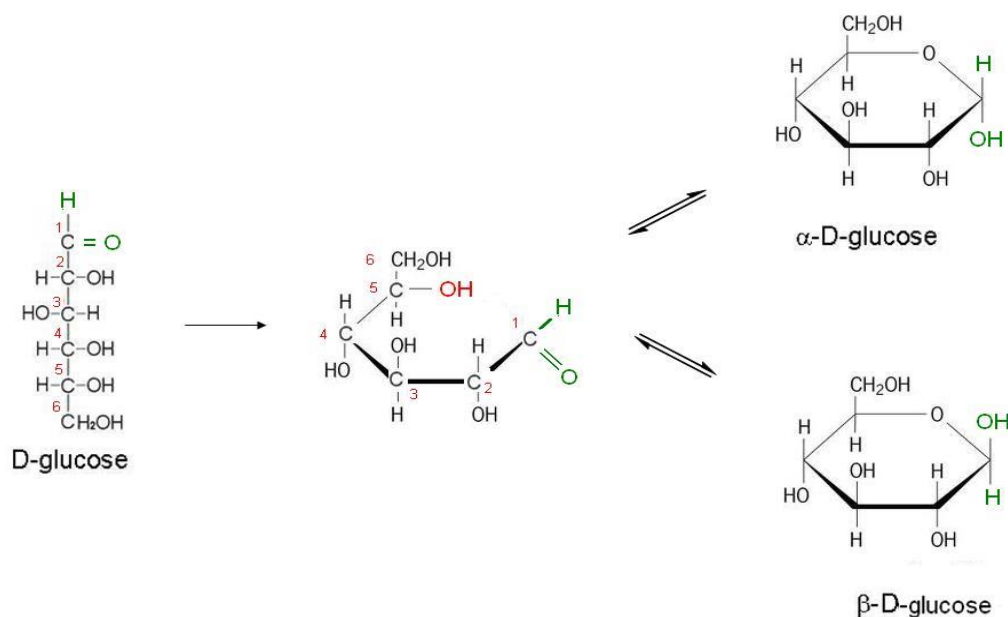
และมีลักษณะของเนื้อโลหะที่หนาแน่น เนื่องจากชั้นฟิล์มส่วนนอกสัมผัสกับพลาสติกได้มากกว่าภายใน ทำให้พื้นผิวถูกตัดแปรได้ดีกว่า

การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลว [9] โดยใช้แรงดัน 800 V และเวลาการเปิด ปิดของพัล 40 วินาที พบว่า สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมกับการบำบัดน้ำเสียคือ สารละลาย Na_2SO_4 และ CH_3COONa เมื่อทำการทดลองกับน้ำที่มีเชื้อแบคทีเรีย E. coil uc 4100 (แบคทีเรียแกรมลบ) และ Staphylococcus aureus (แบคทีเรียแกรมบวก) พบว่า การบำบัดด้วยพลาสมาที่เวลาสูงสุด 30 วินาที จะทำให้แบคทีเรียที่อยู่ในสารละลายตายทั้งหมด แสดงให้เห็นว่าพลาสมาสามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรียได้

2.4 ชนิดของน้ำตาล

การย่อยสลายเซลลูโลสด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลวในงานวิจัยนี้ จะทำการตรวจวัดปริมาณของน้ำตาลรีดิวซ์ เนื่องจากน้ำตาลรีดิวซ์เป็นน้ำตาลที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก วัตถุประสงค์การเข้าทำปฏิกิริยาทำให้สามารถตรวจวิเคราะห์ได้ง่าย นอกจากนี้ยังใช้เป็นตัวบ่งชี้ให้เห็นว่า เซลลูโลสได้ถูกย่อยสลายให้มีโมเลกุลเล็กลงด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลวได้

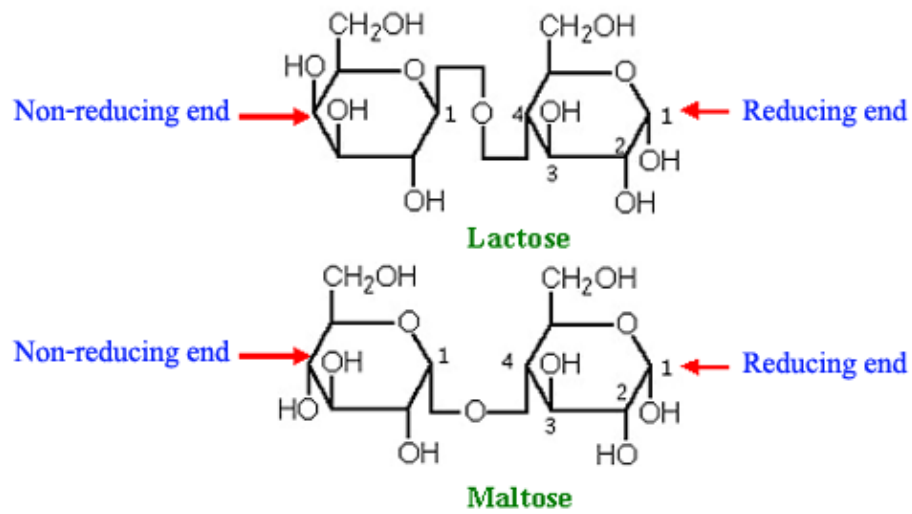
น้ำตาลกลูโคส (Glucose) เป็นน้ำตาลรีดิวซ์ชนิดหนึ่งและเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่มีความสำคัญ เพราะเป็นน้ำตาลพื้นฐานของคาร์โบไฮเดรตทุกตัว มีคาร์บอน 6 อะตอม (Hexose) ชนิดแอลโดส (Aldose) น้ำตาลกลูโคสที่พบอยู่ในรูป D-glucose มีโครงสร้างทางเคมีดังแสดงในรูปที่ 2.13 น้ำตาลกลูโคสเป็นน้ำตาลรีดิวซ์ (Reducing sugar) อาจเรียกว่า Dextrose (หมายถึง D-glucose) โครงสร้างของน้ำตาลกลูโคสมี 2 หลายแบบ คือ โครงสร้างแบบโซ่เปิด (open-chain structure) หรือ Fischer projection และโครงสร้างแบบวง (cyclic หรือ ring structure) หรือ Haworth projection ซึ่งเกิดจากการปิดวง โดยหมู่ไฮดรอกซิลทำปฏิกิริยากับหมู่คาร์บอนิลของแอลดีไฮด์ให้ได้อะซีตัล (acetal)



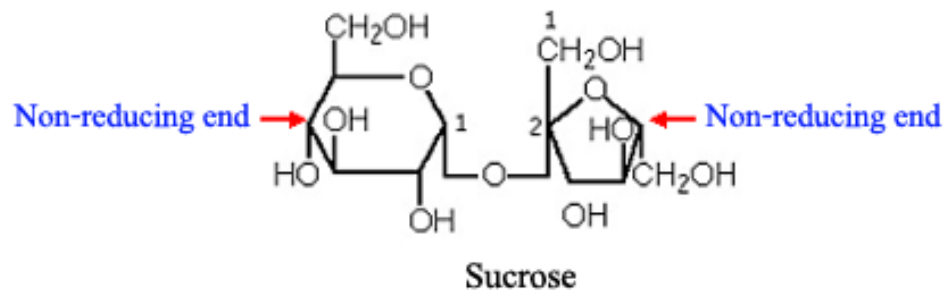
รูปที่ 2. 13 โครงสร้างทางเคมีของน้ำตาลกลูโคส [16]

น้ำตาลรีดิวซ์ (Reducing sugar) คือ น้ำตาลที่มีหมู่แอลดีไฮด์ (Aldehyde) หรือคีโตน (Ketone) ที่เป็นอิสระอยู่ในโมเลกุลของน้ำตาล และถูกออกซิไดส์ได้ง่ายด้วยตัวออกซิไดส์ (Oxidizing agent) อย่างอ่อน ทำให้เกิดการรวมตัวของหมู่ไฮดรอกซิลของ Anomeric carbon (C_1) ของน้ำตาลตัวหนึ่งกับหมู่ไฮดรอกซิลของคาร์บอนอะตอมอื่นที่ไม่ใช่ Anomeric carbon ของน้ำตาลอีกตัว ทำให้มี Reducing group เหลืออยู่ ส่วนที่น้ำตาลโมเลกุลเดียว 2 โมเลกุล รวมตัวแล้วไม่มี Reducing group เหลืออยู่ เรียกว่า น้ำตาลนอนรีดิวซ์ (Non reducing sugar)

ตัวอย่างของน้ำตาลรีดิวซ์ ได้แก่ น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว (Monosaccharide) ทุกชนิด เช่น น้ำตาลกลูโคส น้ำตาลกาแล็กโทส (Galactose) น้ำตาลฟรุคโทส (Fructose) เป็นต้น น้ำตาลโมเลกุลคู่ (Disaccharide) บางชนิด เช่น น้ำตาลแล็กโทส (Lactose) น้ำตาลมอลโทส (Maltose) โครงสร้างของน้ำตาลโมเลกุลคู่ที่เป็นน้ำตาลรีดิวซ์และนอนรีดิวซ์แสดงในรูปที่ 2.14 และ 2.15



รูปที่ 2. 14 โครงสร้างของน้ำตาลโมเลกุลคู่ที่เป็นน้ำตาลรีดิวซ์ [19]



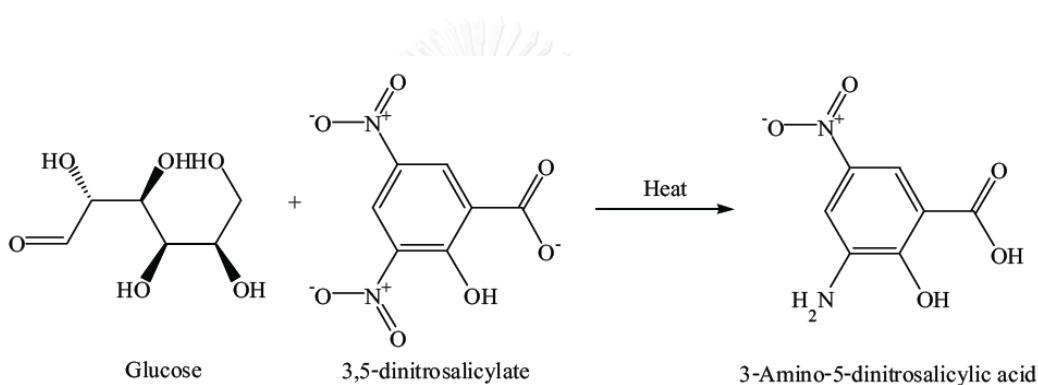
รูปที่ 2. 15 โครงสร้างของน้ำตาลโมเลกุลคู่ที่เป็นน้ำตาลนอนรีดิวซ์ [19]

2.5 เทคนิคการวิเคราะห์คุณสมบัติและสมบัติของเซลลูโลสที่ผ่านการทรีตด้วยพลาสมาวิญภาคของเหลว

เทคนิคการวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของเซลลูโลสที่ผ่านการทรีตด้วยพลาสมาที่ชี้ให้เห็นว่า เซลลูโลสถูกย่อยสลายมีดังต่อไปนี้

2.5.1. การวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ด้วยเทคนิคกรดไดไนโตรซาลิไซลิก (3,5 dinitrosalicylic acid, DNS) [11]

วิธี DNS เป็นวิธีที่ใช้ในการหาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (Reducing sugar) ในสารตัวอย่างที่ได้จากการย่อยสลายเซลลูโลส โดยโซเดียมไฮดรอกไซด์จะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่แอลดีไฮด์ของน้ำตาลรีดิวซ์ทำให้ไฮดรเจนหลุดออกและไฮดรอกซิลจากโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้าแทนที่ จากนั้นไฮดรเจนที่ออกจากหมู่แอลดีไฮด์ของน้ำตาลรีดิวซ์จะเข้าไปแทนที่ออกซิเจนของหมู่ไนโตรที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 3 ของกรดไดไนโตรซาลิไซลิกกลายเป็น 3-amino-5-nitrosalicylic acid ซึ่งมีสีส้ม-น้ำตาล สามารถดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร ปฏิกิริยาของวิธีการนี้แสดงในรูปที่ 2.16

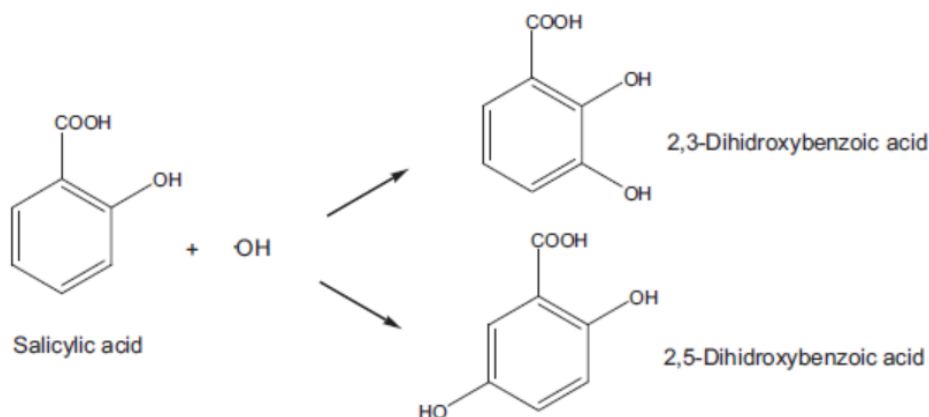


รูปที่ 2.16 ปฏิกิริยาของน้ำตาลรีดิวซ์กับกรดไดไนโตรซาลิไซลิก [11]

2.5.2. การวิเคราะห์ปริมาณอนุมูลไฮดรอกซิลด้วยกรดซาลิไซลิก [20]

การวิเคราะห์ปริมาณอนุมูลไฮดรอกซิลด้วยกรดซาลิไซลิก ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นโดยอนุมูลไฮดรอกซิลเข้าทำปฏิกิริยากับกรดซาลิไซลิกที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 3 และ 5 เกิดผลิตภัณฑ์ คือ 2,3-Dihydroxybenzoic acid (2,3-DHBA) และ สาร 2,5-Dihydroxybenzoic acid (2,5-DHBA) โดยการเข้าทำปฏิกิริยาระหว่างอนุมูลไฮดรอกซิลและกรดซาลิไซลิก มีอัตราส่วนโมล 1 ต่อ 1 ปริมาณผลิตภัณฑ์ทั้งสองชนิดที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับวิธีที่ใช้ในการสร้างอนุมูลไฮดรอกซิล เมื่ออนุมูลไฮดรอกซิลถูกสร้างด้วยวิธีทางเคมี (Chemical) 2,3-DHBA จะเกิดขึ้นในระบบมากกว่า 2,5-DHBA และอนุมูลไฮดรอกซิลถูกสร้างด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical) 2,5-DHBA จะเกิดขึ้นในระบบมากกว่า 2,3-DHBA ในงานวิจัยนี้ จะทำการตรวจวัดปริมาณของกรดซาลิไซลิกที่ลดลงด้วยการวัดค่า

การดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่น 303 นาโนเมตร เพื่อคำนวณหาปริมาณอนุมูลไฮดรอกซิลที่เกิดขึ้นในระบบ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างกรดซาลิไซลิกและอนุมูลไฮดรอกซิล แสดงในรูปที่ 2.17



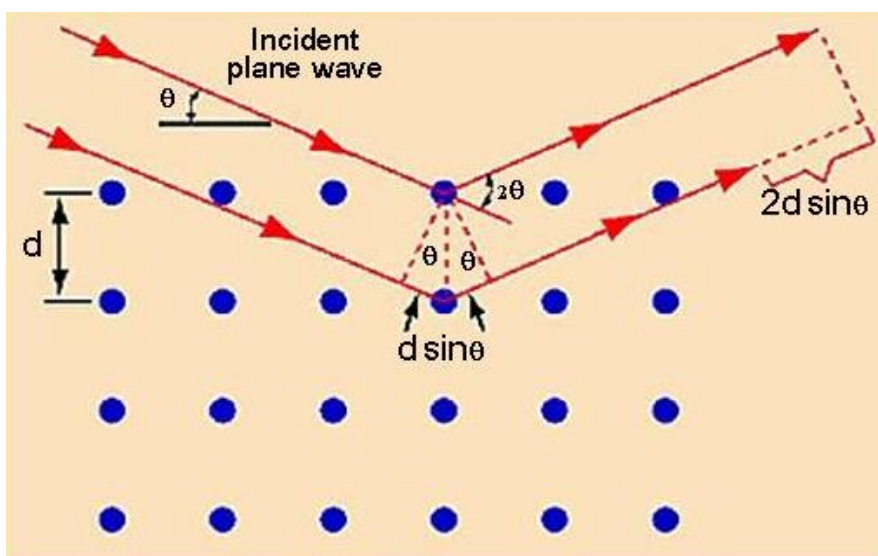
รูปที่ 2. 17 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นของกรดซาลิไซลิกและอนุมูลไฮดรอกซิล [20]

2.5.3 การวิเคราะห์โครงสร้างความเป็นผลึกด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD)

[21]

เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เป็นเทคนิคที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างความเป็นผลึกที่ไม่ทำลายสารตัวอย่าง นิยมใช้อย่างแพร่หลายในงานด้านเคมีและเคมีชีวภาพ โดยใช้ในการตรวจวัดโครงสร้างของโมเลกุลต่างๆ อาทิ สารประกอบอนินทรีย์ ดีเอ็นเอ โปรตีนที่มีอยู่ตามธรรมชาติ รวมถึงวัสดุสังเคราะห์ เป็นต้น

หลักการของการตรวจสอบโครงสร้างความเป็นผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ จะอาศัยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ไปตามช่องว่างระหว่างอะตอมภายในผลึกแสดงในรูปที่ 2.18 ค่าการเลี้ยวเบนของรังสีจะถูกบันทึก จากนั้นทำการวิเคราะห์ธรรมชาติของโครงสร้างผลึกนั้นๆ โดยระยะห่างระหว่างอะตอมนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการของ Bragg's Law คือ $2d\sin\theta = n\lambda$ โดยที่ λ คือ ความยาวคลื่นของรังสี θ คือ มุมที่รังสีผ่านเข้ามาถึงผลึก d คือ ระยะห่างของแต่ละระนาบ และ n คือ อันดับของการเลี้ยวเบนโดยทั่วไปจะกำหนดให้ $n = 1$



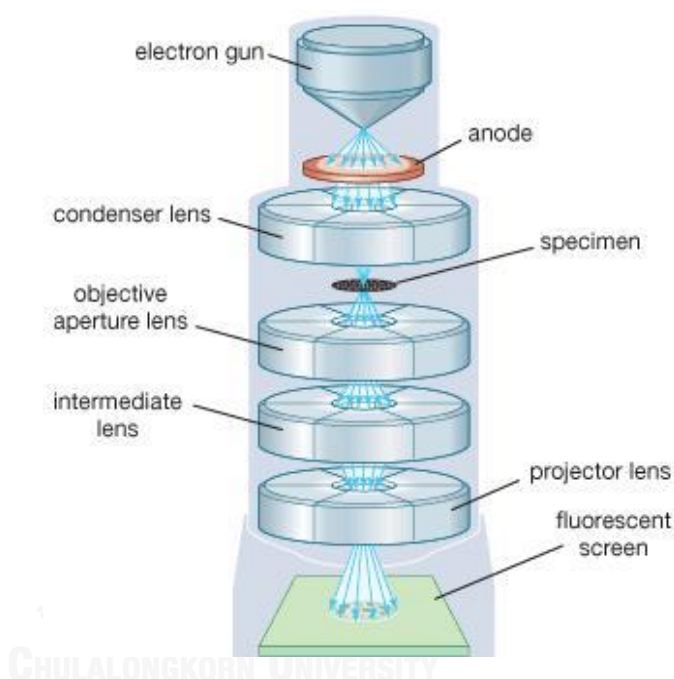
รูปที่ 2. 18 เลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ระหว่างอะตอมภายในของผลึก [22]

รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของวัสดุที่เป็นผลึกจะมีลักษณะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับการจัดเรียงตัวของผลึก ซึ่งมีลักษณะเฉพาะสำหรับธาตุแต่ละชนิด ดังนั้นรูปแบบการเลี้ยวเบนจึงสามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้ได้ว่าสารตัวอย่างนั้นประกอบด้วยวัสดุที่เป็นผลึกของสารชนิดใด นอกจากนี้ ความเข้มและขนาดความกว้างของพีกการเลี้ยวเบนรังสีเป็นค่าที่แปรผันตามปริมาณของวัสดุที่เป็นผลึกภายในสารตัวอย่าง ดังนั้นจึงสามารถใช้ค่าความเข้มและขนาดความกว้างของพีกในการคำนวณหาปริมาณ และขนาดของวัสดุสารตัวอย่างได้

2.5.4 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope TEM) [21, 23, 24]

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านเป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ใช้ศึกษาตัวอย่างที่มีความบางมาก ซึ่งเตรียมขึ้นโดยวิธีพิเศษเพื่อให้ลำอนุภาคอิเล็กตรอนผ่านทะลุได้ การสร้างภาพจากกล้องจะทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านตัวอย่าง เหมาะสำหรับศึกษารายละเอียดขององค์ประกอบภายในของตัวอย่าง เช่น องค์ประกอบภายในเซลล์ ลักษณะของเยื่อหุ้มเซลล์ ผนังเซลล์ เป็นต้น ซึ่งให้รายละเอียดได้ดีกว่ากล้องจุลทรรศน์ชนิดอื่นๆ เนื่องจากมีกำลังขยายสูงสุดประมาณ 0.1 นาโนเมตร ทำให้ประสิทธิภาพในการแจกแจงรายละเอียดสูง หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron Gun) ทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนโดย filament ที่ถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะถูกบีบให้เป็นลำอิเล็กตรอนด้วยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic lens) ทำหน้าที่เป็น Condenser lens จะ

สามารถปรับลำอิเล็กตรอนให้มีขนาดเล็กหรือใหญ่ได้ตามต้องการลำอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ทะลุผ่านตัวอย่าง (Specimen) ขนาดประมาณ 60 - 90 นาโนเมตร อิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านตัวอย่างจะวิ่งไปยังเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective aperture lens) ที่ทำหน้าที่ปรับโฟกัสและสร้างภาพที่ Intermediate lens และถูกขยายสัญญาณภาพด้วย Projector lens ลงบนฉากเรืองแสง (Fluorescence Screen) เกิดเป็นภาพ 2 มิติ ถ้าวัตถุที่มีค่าเลขอะตอม (Atomic Number) มาก ภาพที่ได้จะมีสีดำ ส่วนวัตถุที่มีเลขอะตอมน้อย ภาพที่เห็นจะเป็นสีขาว โดยภาพที่ได้จะถูกบันทึกด้วยกล้อง CCD (Charge Coupled Device) ส่วนประกอบและการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่านแสดงในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2. 19 ส่วนประกอบและการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน [23]

2.5.5 การวิเคราะห์การดูดกลืนแสงด้วยเทคนิค UV-Vis spectrophotometry [21, 24]

เครื่อง UV-VIS Spectrophotometer จะใช้ในการตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วงรังสียูวี และช่วงแสงขาวที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืนโดยสารตัวอย่าง ซึ่งค่าการดูดกลืนแสงจะมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารที่อยู่ในตัวอย่าง และความยาวคลื่นที่ใช้ขึ้นอยู่กับชนิดของสารที่อยู่ในตัวอย่าง สารตัวอย่างที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์จะเป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อน และสารอนินทรีย์ ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงรังสียูวี เมื่อโมเลกุลของสารตัวอย่างถูกฉายด้วยแสงที่มีพลังงานเหมาะสม จะทำให้อิเล็กตรอนภายในอะตอมได้รับพลังงานจากแสงที่ดูดกลืนแล้วเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในชั้นที่มี

ระดับพลังงานสูงกว่า เมื่อทำการวัดปริมาณของแสงที่ผ่านมาจากตัวอย่างเทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่ความยาวคลื่นต่างๆ ตามกฎของ Beer-Lambert ดังนั้นจึงสามารถใช้เทคนิคนี้ในการระบุชนิดและปริมาณของสารต่างๆ ที่มีอยู่ในตัวอย่างได้

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.6.1 การย่อยสลายเซลลูโลสด้วยกรด

ในปี ค.ศ. 2009 J. Zhang และคณะ [5] ได้ศึกษาการละลายของเซลลูโลสที่มีความเป็นผลึกสูงใน กรดฟอสฟอริกความเข้มข้นเข้มข้น 85% โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิ 30 50 และ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง จากผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างความเป็นผลึกของเซลลูโลสด้วยเทคนิค XRD พบว่า เซลลูโลสที่ผ่านการละลายด้วยกรดฟอสฟอริกที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จะเกิดการเปลี่ยนแปลงความเป็นผลึกอย่างชัดเจน โดยเวลาในการละลายเซลลูโลสในกรดฟอสฟอริกในช่วง 2 - 6 ชั่วโมง จะส่งผลให้ร้อยละความเป็นผลึกลดลงอยู่ในช่วง 70.6 - 39.1 ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy (C-NMR Spectroscopy) พบว่า ระดับความเป็นผลึก (Degree of crystallinity) ของเซลลูโลสที่ผ่านการละลายด้วยกรดฟอสฟอริกลดลงจาก 94.4% เป็น 32.4% ในขณะที่โครงสร้างอสัณฐาน (Amorphous) ของเซลลูโลสเพิ่มขึ้นจาก 40.6% เป็น 67.6% เมื่อทำการศึกษาจลนพลศาสตร์โดยตั้งสมมติฐานว่าเป็นปฏิกิริยาลำดับที่ 1 จะได้ค่าคงที่ของอัตราการลดลงของโครงสร้างผลึก (K) ที่อุณหภูมิ 30 50 และ 70 องศาเซลเซียส คือ 0.06 0.17 และ 0.12 ต่อชั่วโมง ตามลำดับ โดยมีค่า Pre-exponential factor (A_0) เท่ากับ 1.2×10^6 ต่อชั่วโมง และพลังงานกระตุ้น (Activation energy) มีค่า 42.4 กิโลจูลต่อโมล จากผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้กรดเข้มข้นในสารละลายเซลลูโลสส่งผลให้ความเป็นผลึกของเซลลูโลสลดลงด้วย

ในปี ค.ศ. 2010 R. Zhang และคณะ [25] ได้ทำการศึกษาผลของการไฮโดรไลซิสซังข้าวโพดด้วยกรดไนตริกความเข้มข้น 0.2% 0.4% และ 0.6% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 150 165 และ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที จากการหาร้อยละน้ำหนักแห้ง พบว่าร้อยละน้ำหนักแห้งลดลงเมื่ออุณหภูมิในการไฮโดรไลซิสเพิ่มขึ้น กรณีการไฮโดรไลซิสซังข้าวโพดด้วยความเข้มข้นของกรดไนตริก 0.6% โดยน้ำหนัก พบว่าร้อยละน้ำหนักแห้งลดลงมากที่สุด สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณของส่วนของเหลวหลังจากการไฮโดรไลซิสด้วยกรดไนตริกด้วยเทคนิค HPLC พบว่าความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสและเฟอฟูรอล (Furfural) สูงขึ้นตามอุณหภูมิและความเข้มข้นของกรดไนตริกที่เพิ่มขึ้น จากผลของการไฮโดรไลซิสซังข้าวโพดด้วยกรดไนตริกความเข้มข้น 0.6% โดยน้ำหนัก พบว่าความ

เข้มข้นของไฮโดรไลซิสและกรดอะซิติกสูงสุด เท่ากับ 22.03 และ 5.86 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ ที่เวลาในการไฮโดรไลซิสเพียง 2 นาที ในขณะที่ความเข้มข้นของอะราบินอสสูงสุด 2.95 กรัมต่อลิตร เมื่อใช้กรดไนตริก 0.4% ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เวลา 5 นาที จากผลการศึกษาพบว่า ค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสต่ำกว่าการไฮโดรไลซิสด้วยกรดซัลฟิวริกอย่างมีนัยสำคัญ จากงานวิจัยนี้จะเห็นได้ว่าการไฮโดรไลซิสซึ่งช้ากว่าโดยกรดไนตริกที่ความเข้มข้นต่ำสามารถย่อยสลายให้เป็นน้ำตาลได้ โดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาน้อยแต่ต้องใช้อุณหภูมิสูง

ในปี ค.ศ. 2013 J. Ni และคณะ [1] ได้ทำการศึกษาการพรีทรีท (Pretreatment) เซลลูโลสด้วยกรดฟอสฟอริกความเข้มข้น 85% โดยปริมาตร ก่อนนำไปเข้าสู่กระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยกรดซัลฟิวริกเจือจางความเข้มข้น 0.04 โมลาร์ จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างความเป็นผลึกด้วยเทคนิค XRD พบว่า เซลลูโลสที่ผ่านการพรีทรีทเป็นระยะเวลาสั้นจะส่งผลให้ค่าความเป็นผลึกของเซลลูโลสลดลง ซึ่งสอดคล้องกับการตรวจสอบสัณฐานพื้นผิวของเซลลูโลสด้วยเทคนิค SEM ที่เห็นว่าลักษณะพื้นผิวของเซลลูโลสที่ผ่านการพรีทรีทมีการกระจายตัวของเส้นใยและเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ เมื่อเปรียบเทียบกับเซลลูโลสที่ไม่ได้ผ่านการพรีทรีท ซึ่งแสดงถึงลักษณะโครงสร้างอสัณฐาน จากการวิเคราะห์เชิงปริมาณของน้ำตาลที่ได้หลังจากการพรีทรีทและการไฮโดรไลซิสด้วยกรดเจือจางพบว่า การพรีทรีทเซลลูโลสด้วยกรดทำให้อ้อยละผลได้น้ำตาลกลูโคส และน้ำตาลรีดิวิซ์ เท่ากับ 57.8% และ 87.7% ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการที่ไม่ได้ผ่านการพรีทรีท เมื่อทำการศึกษาโดยใช้คลื่นไมโครเวฟเข้าช่วยในการไฮโดรไลซิส พบว่า อ้อยละผลได้น้ำตาลกลูโคสเพิ่มขึ้นเป็น 73.3% จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการพรีทรีทเซลลูโลสด้วยกรดเข้มข้นและการประยุกต์ใช้คลื่นไมโครเวฟเข้าช่วยในกระบวนการไฮโดรไลซิสส่งเสริมให้ได้ปริมาณของน้ำตาลกลูโคสและน้ำตาลรีดิวิซ์สูงขึ้น

2.6.2 การย่อยสลายเซลลูโลสด้วยเอนไซม์

ในปี ค.ศ. 2008 Y. Chuning และคณะ [12] ได้ศึกษาผลการพรีทรีทฟางข้าวสาลีด้วยรังสีแกมมาก่อนการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์เซลลูเลส ซึ่งกระบวนการพรีทรีทฟางข้าวสาลีจะใช้ปริมาณความเข้มข้นของรังสีแกมมา Co-60 จากการวิเคราะห์เชิงปริมาณของฟางข้าวสาลีที่ผ่านการพรีทรีทด้วยรังสีแกมมา พบว่าการฉายรังสีในปริมาณสูงส่งผลทำให้การสูญเสียน้ำหนักและการกระจายตัวของขนาดฟางข้าวสาลีที่ผ่านการบดมีปริมาณเพิ่มขึ้น การพรีทรีทฟางข้าวสาลีด้วยรังสีแกมมาก่อนการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์เซลลูเลส ส่งผลให้อ้อยละผลได้น้ำตาลกลูโคสเพิ่มขึ้นตามปริมาณการฉายรังสีที่

เพิ่มขึ้น เมื่อฉายรังสีที่ปริมาณ 500 กิโลเกรย์ ทำให้ผลได้น้ำตาลกลูโคสสูงสุด 13.40% และฟางข้าวสาเลีที่ผ่านการฉายรังสีแล้วนำไปบดก่อนการไฮโดรไลซิส พบว่า การฉายรังสีปริมาณ 500 กิโลเกรย์และบดจนสามารถกรองด้วยขนาดตะแกรง 140 มีผลได้น้ำตาลกลูโคสสูงสุด 10.24% เมื่อทำการวิเคราะห์ผลที่ผ่านการพรีทรีทด้วยรังสีแกมมาก่อนนำไปไฮโดรไลซิส พบว่า ภายหลังการพรีทรีทด้วยรังสี 22 วัน โดยใช้ปริมาณรังสี 400 กิโลเกรย์ ทำให้ผลได้ของน้ำตาลกลูโคสเพิ่มขึ้น 20% เมื่อเปรียบเทียบกับผลได้น้ำตาลกลูโคสในกรณีที่ไม่มีการพรีทรีท และเมื่อการพรีทรีทฟางข้าวสาเลีด้วยรังสีเป็นเวลา 9 วัน พบว่าผลได้ของน้ำตาลรีดิวซ์ลดลง อาจเนื่องมาจากน้ำตาลรีดิวซ์ถูกย่อยสลายเป็นน้ำตาลกลูโคสได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับไม่มีการพรีทรีท จากผลการศึกษานี้จะเห็นได้ว่าการพรีทรีทฟางข้าวสาเลีด้วยรังสีแกมมาก่อนการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์เซลลูเลสใช้ระยะเวลาในกระบวนการพรีทรีทนานและมีความซับซ้อนหลายขั้นตอน

ในปี ค.ศ. 2010 J. Zhang และคณะ [13] ได้ทำการศึกษาผลของการพรีทรีท (Pretreatment) เซลลูโลสด้วยกรดฟอสฟอริกเข้มข้น ที่ส่งผลต่อการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์เซลลูเลส โดยในการทดลองได้ทำการพรีทรีทเซลลูโลสด้วยกรดฟอสฟอริกที่อุณหภูมิ 323 เคลวิน เป็นเวลา 10 ชั่วโมง จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction (XRD) และ Atomic Force Microscopy (AFM) พบว่า เซลลูโลสที่ผ่านการพรีทรีทด้วยกรดฟอสฟอริกมีความเป็นผลึกลดลงและลักษณะสัญญาณพื้นผิวของเส้นใยมีความขรุขระมากขึ้น จากผลวิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) แสดงให้เห็นว่าพื้นผิวที่มีความขรุขระของเซลลูโลสที่ผ่านการพรีทรีทจะส่งเสริมการดูดซับเอนไซม์เซลลูเลสบนพื้นผิวของเซลลูโลสซึ่งทำให้เกิดการไฮโดรไลซิสเซลลูโลสด้วยเอนไซม์ได้ดีขึ้น ผลที่ได้สอดคล้องกับผลการศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ของการดูดซับเอนไซม์ (Adsorption kinetics) ซึ่งพบว่า เซลลูโลสที่ไม่ผ่านการพรีทรีทมีค่าคงที่ของการดูดซับเอนไซม์ (K) ที่อุณหภูมิ 278, 293 และ 308 เคลวิน มีค่า 0.016, 0.024, 0.041 ต่อนาที่ และที่ผ่านการพรีทรีทด้วยกรดฟอสฟอริก 0.095, 0.149, 0.218 ต่อนาที่ ตามลำดับ จากการศึกษาค่าพลังงานกระตุ้น (Activation energy) ของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแสดงให้เห็นว่า เซลลูโลสที่ผ่านการพรีทรีทจะมีพลังงานกระตุ้นสูงกว่าเซลลูโลสที่ไม่ได้ผ่านการพรีทรีท นอกจากนี้ยังพบว่า การไฮโดรไลซิสเซลลูโลสด้วยเอนไซม์เป็นเวลา 120 ชั่วโมง เซลลูโลสที่ไม่ได้พรีทรีทจะได้ผลได้น้ำตาลกลูโคส 7.21% เซลโลไบโอส 13.16% และน้ำตาลทั้งหมด 20.37% เซลลูโลสที่ผ่านการพรีทรีทด้วยกรดฟอสฟอริกจะส่งผลทำให้ผลิตภัณฑ์น้ำตาลเพิ่มขึ้น คือ น้ำตาลกลูโคส 24.10% เซลโลไบโอส 41.42% และน้ำตาล

ทั้งหมด 65.52% จากงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ว่า การพรีทรีทเซลลูโลสด้วยกรดจะช่วยส่งเสริมให้เกิดการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์ได้ดีขึ้น จึงทำให้ได้ผลิตภัณฑ์น้ำตาลสูงขึ้นเช่นกัน

2.6.3 ระบบที่ย่อยสลายเซลลูโลสด้วยวิธีอื่น

ในปี ค.ศ. 2011 Z. Wang และคณะ [14] ศึกษาการย่อยสลายเซลลูโลสด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ดำเนินการโดยใช้ชนิดของขั้วอิเล็กโทรด คือ กราไฟต์และพอลิเตตระฟลูออโรเอทีลีน (PTFE) และเติม 2 - เอทิลแอนทราควิโนน (2-ethylanthraquinone : EAQ) ลงในสารละลายเพื่อช่วยในการเกิดปฏิกิริยาเฟนตอน (Fenton reaction) จากผลการตรวจวัดปริมาณ H_2O_2 ด้วยเทคนิค Molybdate โดยใช้ UV-Vis spectroscopy พบว่า การใช้ EAQ 5% โดยน้ำหนัก ส่งผลให้มีความเข้มข้นของ H_2O_2 สูงสุด 23 ไมโครกรัมต่อลิตร จากการวิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วยเทคนิค XRD พบว่า ดีกรีแสดงความเป็นผลึกทั้งหมด (Total degree of crystalline) ลดลงจาก 22,452 เป็น 15,272 เมื่อเปรียบเทียบกับเซลลูโลสที่ไม่ผ่านการย่อยสลาย จากการศึกษาผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นหลังผ่านการย่อยสลายเซลลูโลส พบว่า ผลได้ของน้ำตาลที่ละลายน้ำและ 5-HMF มีปริมาณสูงสุด เท่ากับ 10.2% และ 5.6% ตามลำดับ เมื่อใช้เวลาในการย่อยสลาย 4 ชั่วโมง จากการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy 1H NMR และ ^{13}C NMR พบว่า เซลลูโลสที่ผ่านการย่อยสลายมีโครงสร้างทางเคมีของ CH_2OH $C=CH$ และ COH ซึ่งเป็นโครงสร้างของมอนอแซ็กคาไรด์ แสดงให้เห็นว่าเซลลูโลสสามารถย่อยสลายด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีได้ สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer ความยาวคลื่นที่มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด คือ 284 นาโนเมตร ซึ่งเป็นค่าความยาวคลื่นที่แสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นมีส่วนประกอบของหมู่ฟังก์ชันแอลดีไฮด์ จากผลการศึกษาสรุปได้ว่า เซลลูโลสสามารถถูกย่อยสลายได้ด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีร่วมกับปฏิกิริยาเฟนตอนที่เกิดจากการสร้างอนุมูลอิสระในการเข้าทำลายพันธะของเซลลูโลสเพื่อให้ได้น้ำตาลที่มีโมเลกุลเล็ก

2.6.4 ระบบที่ใช้พลาสมาวัฏภาคของเหลวย่อยสลายพอลิแซ็กคาไรด์

ในปี ค.ศ. 2013 I. Prasertsung และคณะ [15] ได้ศึกษาการย่อยสลายปีต้าโคโตซานด้วยกระบวนการพลาสมาวัฏภาคของเหลว โดยตรวจสอบผลของพลาสมาที่มีต่อสมบัติของโคโตซาน ในการทดลองจะปรับเวลาที่ใช้ในการทรีทโคโตซานด้วยพลาสมาจาก 0 ถึง 300 นาที โคโตซานที่ผ่านการทรีทด้วยพลาสมาจะถูกนำไปวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลด้วยเทคนิค Gel Permeation Chromatography (GPC) ค่าความหนืดด้วย Viscometer โครงสร้างความเป็นผลึกด้วยเทคนิค XRD

คุณลักษณะทางเคมีด้วย FT-IR สมบัติการละลายด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer และการวิเคราะห์การแยกส่วน จากผลการศึกษาพบว่า ไคโตซานที่ผ่านการทรีตด้วยพลาสมาเป็นเวลา 15 ถึง 120 นาที มีค่าความหนืดและน้ำหนักโมเลกุลของไคโตซานลดลง อย่างเห็นได้ชัดเมื่อเปรียบเทียบกับไคโตซานที่ไม่ผ่านการทรีตด้วยพลาสมา ซึ่งชี้ให้เห็นว่าเกิดกระบวนการย่อยสลายไคโตซานระหว่างการทรีตด้วยพลาสมา จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างความเป็นผลึก แสดงให้เห็นว่าความเป็นผลึกของ ไคโตซานถูกทำลาย ส่งผลทำให้โครงสร้างของไคโตซานเปลี่ยนแปลงเป็นโครงสร้างแบบ ออสัญฐาน จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR พบว่า การทรีตด้วยพลาสมาไม่ส่งผลต่อโครงสร้างทางเคมีของ ไคโตซาน จากการวิเคราะห์การละลายน้ำของไคโตซาน พบว่าร้อยละผลได้ของไคโตซานที่ละลายน้ำมีค่าสูงขึ้นเมื่อเวลาที่ใช้ในการทรีตพลาสมาสูงขึ้น จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่ากระบวนการพลาสมาวิฤภาคของเหลวสามารถนำมาใช้ในการย่อยสลายไคโตซานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในปี ค.ศ. 2014 O. Pornsunthorntawe และคณะ [16] ได้ศึกษาการดีพอลิเมอร์ไรเซชัน (Depolymerization) ของไคโตซานที่เติมโลหะเชิงซ้อนแตกต่างกัน 4 ชนิด คือ ซิลเวอร์ (Ag^+) ซิงค์ (II) (Zn^{2+}) คอปเปอร์ (II) (Cu^{2+}) และไอรอน (III) (Fe^{3+}) ซึ่งดำเนินการดีพอลิเมอร์ไรเซชันด้วยกระบวนการพลาสมาวิฤภาคของเหลว การตรวจสอบคุณลักษณะของไคโตซานที่ผ่านการทรีตด้วยพลาสมาวิฤภาคของเหลวจะใช้เวลาในการทดลองตั้งแต่ 0 ถึง 180 นาที โดยไคโตซานจะถูกวิเคราะห์ความหนืดด้วยเครื่อง Viscometer น้ำหนักโมเลกุลด้วยเทคนิค Gel Permeation Chromotography (GPC) โครงสร้างความเป็นผลึกด้วยเทคนิค Wide-angle X-ray diffraction (WAXD) โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค FT-IR การวิเคราะห์การแยกส่วนและตรวจวัดระดับความเป็นพอลิเมอร์ด้วยเทคนิค ESI-MS ผลการศึกษาพบว่า การทรีตไคโตซานที่เติมโลหะเชิงซ้อน Cu^{2+} และ Fe^{3+} ด้วยพลาสมา ส่งผลให้ค่าความหนืดและน้ำหนักโมเลกุลของไคโตซานลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาตั้งแต่ 0 ถึง 45 นาที และคงที่จนถึง 180 นาที ในขณะที่การทรีตไคโตซานที่เติมโลหะเชิงซ้อนชนิด Ag^+ และ Zn^{2+} พบว่าค่าความหนืดและน้ำหนักโมเลกุลของไคโตซานไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่าง มีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับกรทรีตไคโตซานที่ไม่เติมโลหะเชิงซ้อน สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์โครงสร้างความเป็นผลึก ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการทรีตไคโตซานด้วยพลาสมาโดยมีการเติมโลหะเชิงซ้อน Cu^{2+} และ Fe^{3+} ทำให้โครงสร้างความเป็นผลึกลดลงอย่างเห็นได้ชัด จากการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี พบว่าการทรีตไคโตซานด้วยพลาสมาทั้งที่เติมและไม่เติมโลหะเชิงซ้อนไม่ส่งผลต่อโครงสร้างทางเคมี เมื่อทำการวิเคราะห์การละลายน้ำและตรวจวัดระดับความเป็นพอลิเมอร์ พบว่า ไคโตซานที่มีการเติมโลหะเชิงซ้อน Zn^{2+} Cu^{2+} และ Fe^{3+} สามารถละลายน้ำได้เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาที่ใช้ในการทรีตเพิ่มขึ้นและระดับ

ความเป็นพอลิเมอร์ของไคโตซานอยู่ในช่วง 2 ถึง 3 จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่า การเติมโลหะเชิงซ้อนชนิด Cu^{2+} และ Fe^{3+} ส่งเสริมให้เกิดการดีพอลิเมอร์ไรเซชันของไคโตซานด้วยพลาสมาวิทยุภาคของเหลวที่มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น

ในปี ค.ศ. 2015 T. Tantiplapol และคณะ [25] ได้ศึกษาการย่อยสลายปีต้าไคโตซานด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลว โดยศึกษาผลของชนิดขั้วอิเล็กโทรด 3 ชนิด คือ ทั้งสแตนทองแดง และเหล็ก และศึกษาผลของค่าความถี่ไฟฟ้าที่ให้ในระบบ 3 ค่า คือ 15 22.5 และ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ ต่อสมบัติของไคโตซาน ในการทดลองจะปรับเวลาที่ใช้ในการทรีตไคโตซานด้วยพลาสมาจาก 0 ถึง 210 นาที ไคโตซานที่ผ่านการทรีตด้วยพลาสมาจะถูกนำไปวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลด้วยเทคนิค GPC ค่าความหนืดด้วย Viscometer โครงสร้างความเป็นผลึกด้วยเทคนิค XRD โครงสร้างทางเคมีด้วย FT-IR สมบัติการละลายด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer ตรวจวัดสมบัติของพลาสมาด้วยเทคนิค Optical emission spectroscopy (OES) และการวิเคราะห์การแยกส่วน ผลการศึกษาพบว่า ไคโตซานที่ผ่านการทรีตด้วยพลาสมาน้ำหนักโมเลกุลของไคโตซานลดลงอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเปรียบเทียบชนิดของขั้วอิเล็กโทรด พบว่าไคโตซานที่ถูกทรีตด้วยขั้วเหล็กมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำสุดตามเวลาในการทรีตที่เพิ่มขึ้น จากการศึกษาความถี่ไฟฟ้าที่ใช้ระหว่างการทรีตโดยใช้ขั้วเหล็กพบว่า น้ำหนักโมเลกุลของไคโตซานลดลงตามความถี่ไฟฟ้าของพลาสมาในระบบที่เพิ่มสูงขึ้น จากการตรวจวัดสมบัติของพลาสมาด้วยเทคนิค Optical emission spectroscopy (OES) พบว่า มีการเปล่งแสงของธาตุที่มีความยาวคลื่นต่างกันเมื่อชนิดขั้วอิเล็กโทรดต่างกัน แสดงให้เห็นว่าชนิดของขั้วอิเล็กโทรดส่งผลต่อสมบัติของพลาสมา จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโมเลกุลของไคโตซานกับเวลาในการทรีตแสดงให้เห็นว่า มีความสัมพันธ์ในรูปแบบความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างความเป็นผลึกด้วยเทคนิค XRD แสดงให้เห็นว่าความเป็นผลึกของไคโตซานที่ ทรีตด้วยขั้วเหล็กจะถูกทำลายมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับขั้วชนิดอื่น จากการศึกษาด้วยเทคนิค FT-IR พบว่า ชนิดของขั้วอิเล็กโทรดและความถี่ไฟฟ้าที่ใช้ระหว่างการทรีตด้วยพลาสมาไม่ส่งผลต่อโครงสร้างทางเคมีของไคโตซาน จากการศึกษาการละลายน้ำของไคโตซาน พบว่า ขั้วอิเล็กโทรดชนิดเหล็กทำให้เกิดร้อยละผลได้ของไคโตซานที่ละลายน้ำมีค่าสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบกับขั้วอิเล็กโทรดชนิดอื่น จากผลของการให้ความถี่ไฟฟ้าและเวลาที่ใช้ในการทรีตพลาสมาเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ร้อยละผลได้ของไคโตซานที่ละลายน้ำสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่าขั้วอิเล็กโทรดชนิดเหล็กและความถี่ไฟฟ้าสูงสุด 30 กิโลเฮิร์ตซ์ ช่วยเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายไคโตซานให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

บทที่ 3 วัสดุและวิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุและสารเคมี

3.1.1 เซลลูโลส ขนาดอนุภาค 150 ไมครอน (Cellulose powder) บริษัท HiMedia Laboratories Pvt. Ltd. ประเทศอินเดีย

3.1.2 กรดฟอสฟอริก บริษัท Ajax Finechem Pty. Ltd. ประเทศออสเตรเลีย

3.1.3 กรดซัลฟิวริก บริษัท RCi Labscan co. ltd. ประเทศไทย

3.1.4 กรดไนตริก บริษัท Ajax Finechem Pty. Ltd. ประเทศออสเตรเลีย

3.1.5 น้ำตาลกลูโคส (D Glucose) บริษัท Ajax Finechem Pty. Ltd. ประเทศออสเตรเลีย

3.1.6 กรด 3,5 ไนโตรซาลิไซริก บริษัท sigma-aldrich Co. ประเทศอินเดีย

3.1.7 ฟีนอล บริษัท Merck-chemicals co. Lid. ประเทศเยอรมนี

3.1.8 โซเดียมซัลไฟด์ บริษัท Thermo Fisher Scientific Inc. ประเทศอังกฤษ

3.1.9 โซเดียมไฮดรอกไซด์ บริษัท RCi Labscan co. ltd. ประเทศไทย

3.1.10 โปแทสเซียมโซเดียมทาร์เทรท (Sochelle salt) บริษัท Ajax Finechem Pty. Ltd. ประเทศออสเตรเลีย

3.1.11 กรดซาลิไซลิก บริษัท HiMedia Laboratories Pvt. Ltd. ประเทศอินเดีย

3.1.12 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ บริษัท Thermo Fisher Scientific Inc. ประเทศอังกฤษ

3.2 อุปกรณ์

3.2.1 เครื่องพลาสติกภาควัสดุของเหลว

3.2.2 ขั้วอิเล็กโทรด 3 ชนิด คือ ทังสเตน เหล็กและทองแดง

3.2.3 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffractometer, XRD)

3.2.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope, TEM)

3.2.5 เครื่องวิเคราะห์การดูดกลืนแสง (UV-Visible Spectroscopy, UV-Vis) ยี่ห้อ Thomas Scientific ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.2.6 เครื่องกวนสารละลาย (Magnetic stirrer)



3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

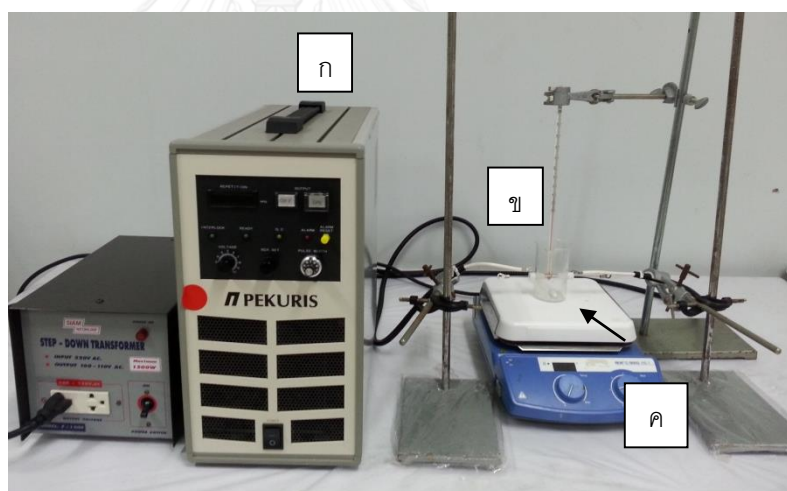
ในการศึกษาการย่อยสลายเซลล์ูโลสที่ทรีทด้วยพลาสมาไว้ภูมิภาคของเหลวสามารถสรุปขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังแสดงในรูปที่ 3.1



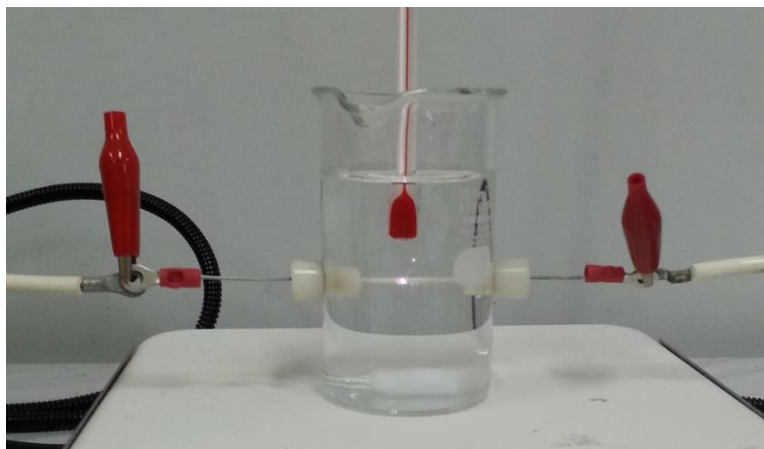
รูปที่ 3. 1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.3.1 การติดตั้งระบบพลาสมาวิวัฒนาการของเหลว

พลาสมาวิวัฒนาการของเหลวจะเกิดขึ้นภายในถังปฏิกรณ์พลาสมาระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่เป็นขั้วบวกและขั้วลบที่มีระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทั้ง 2 เท่ากับ 0.2 มิลลิเมตร โดยจะทำการเปลี่ยนชนิดของขั้วอิเล็กโทรด 3 ชนิด คือ ทังสเตน เหล็ก และทองแดง ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร ขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองด้านจะเชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายไฟ (Power supply) ซึ่งทำหน้าที่จ่ายกระแสไฟฟ้าตรงแบบพัลส์โดยใช้แรงดันไฟฟ้าในช่วง 2 ถึง 3 กิโลโวลต์ ความถี่ไฟฟ้า 15 กิโลเฮิร์ตซ์ และ Pulse width 3 ไมโครวินาที สำหรับการพริทเซลลูโลสด้วยพลาสมา เนื่องจากแหล่งจ่ายไฟเป็นการจ่ายกระแสไฟฟ้าชนิดกระแสสลับ ดังนั้นจึงต้องเชื่อมต่อกับเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าจากกระแสสลับให้เป็นกระแสตรงก่อนจ่ายไปยังถังปฏิกรณ์พลาสมา ระบบพลาสมาวิวัฒนาการของเหลว (ก. แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า ข. ถังปฏิกรณ์พลาสมา ค. ขั้วอิเล็กโทรด) แสดงในรูปที่ 3.2 และ ถังปฏิกรณ์พลาสมาและขั้วอิเล็กโทรด แสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3. 2 ระบบพลาสมาวิวัฒนาการของเหลว



รูปที่ 3. 3 ถังปฏิกรณ์พลาสมาและขั้วอิเล็กโทรด

3.3.2 การย่อยสลายเซลลูโลสด้วยพลาสมาวัฏภาคของเหลว

สารละลายเซลลูโลสที่จะใช้ในการย่อยสลายเซลลูโลสด้วยพลาสมาวัฏภาคของเหลว จะถูกเตรียมให้มีความเข้มข้น 1% โดยน้ำหนัก ในตัวทำละลายต่างชนิดกัน 4 ชนิด คือ น้ำกลั่น กรดซัลฟิวริก 0.04 โมลาร์ กรดไนตริก 0.04 โมลาร์ และกรดฟอสฟอริก 0.04 โมลาร์ ซึ่งสารละลายที่ได้มีลักษณะ เป็นสารแขวนลอย สารแขวนลอยเซลลูโลสจะถูกทรีตด้วยพลาสมาโดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดต่างกัน 3 ชนิด คือ ทั้งสแตน เหล็ก และทองแดง เวลาในการทรีตตั้งแต่ 0 ถึง 300 นาที เก็บสารตัวอย่างที่เวลา 0 30 60 90 120 180 240 และ 300 นาที จากนั้นนำสารแขวนลอยเซลลูโลสที่ผ่านการทรีตและไม่ได้ผ่านการทรีตไปปั่นเหวี่ยงเป็นเวลา 5 นาที เพื่อแยกส่วนของแข็งและของเหลว จากนั้นนำของแข็งและของเหลวมาทำการวิเคราะห์สมบัติต่อไป

3.3.3 การวิเคราะห์สมบัติส่วนของของแข็งที่ผ่านการทรีตและไม่ทรีตด้วยพลาสมา

3.3.3.1 การตรวจสอบความเป็นผลึกของเซลลูโลสด้วยเทคนิค XRD [24]

การตรวจสอบความเป็นผลึกของเซลลูโลสด้วยเทคนิค XRD จะใช้สารตัวอย่างที่เป็นของแข็งบดเป็นผงให้มีขนาดประมาณ 10 ไมโครเมตร จากนั้นนำใส่ในภาชนะแล้วกดด้วยแรงพอประมาณที่จะทำให้ผงเกาะติดกันโดยไม่ต้องใช้ตัวประสานและปาดผิวหน้าให้เรียบได้ระดับ เพื่อให้ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วยเทคนิค XRD ไม่คาดเคลื่อน ตรวจสอบโดยใช้ความเข้มการแผ่รังสีของ $\text{Cu K}\alpha$ ที่แรงดัน 40 กิโลโวลต์ กระแสไฟฟ้า 40 มิลลิแอมแปร์ และมุมที่ใช้ 2θ ระหว่าง 5°

และ 45° หลังจากทำการวิเคราะห์จะได้ค่าความเป็นผลึกและความเป็นอสัณฐาน จากนั้นนำมาคำนวณหาร้อยละความเป็นผลึก Crystallinity Index (CrI) [1, 21, 26] ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$\text{Crystallinity Index (\%)} = (I_{002} - I_{am}) / I_{002} \times 100$$

เมื่อ I_{002} คือ ค่าความเข้มแสงที่มุมซึ่งแสดงความเป็นผลึกสูงสุดของเซลลูโลส (22.4°)

I_{am} คือ ค่าความเข้มแสงที่มุมซึ่งแสดงความเป็นอสัณฐานของเซลลูโลส (18°)

3.3.3.2 การศึกษาลักษณะสัณฐานของตะกอนที่สีกกร่อนจากข้าวโอ๊ตด้วยเทคนิค TEM [24]

การเตรียมสารตัวอย่างเพื่อตรวจสอบลักษณะสัณฐานของตะกอนที่สีกกร่อนจากข้าวโอ๊ตจะทำได้โดยนำสารแขวนลอยปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกส่วนตะกอนของแข็งและของเหลว อบตะกอนของแข็งให้แห้งที่อุณหภูมิ 40 °C แยกตะกอนของข้าวโอ๊ตออกจากเซลลูโลสโดยใช้แท่งแม่เหล็กซึ่งตะกอนที่ได้มีลักษณะเป็นของแข็งละเอียดเกิดจากข้าวโอ๊ตที่สีกกร่อนออกมาระหว่างการทรยศสารแขวนลอยเซลลูโลสด้วยพลาสติก จากนั้นทำให้กระจายตัว (disperse) ในสารละลาย เช่น เอทานอล อะซีโตน น้ำ เป็นต้น นำมาหยดลงบน Grid ที่มีคาร์บอนเป็นตัวรองรับ ประมาณ 1-2 หยดปล่อยให้แห้ง จากนั้นนำมาวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

3.3.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติของส่วนของเหลวที่ผ่านการทรยศด้วยพลาสติก

3.3.4.1 การวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ด้วยวิธี DNS [11]

การเตรียมสารละลาย DNS Reagent จะทำได้โดยละลายฟีนอล 0.2 กรัม กรดไดโนโตรซาลิไซลิก 1 กรัม และโซเดียมซัลไฟต์ 0.05 กรัม ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร จะได้สารละลายสีเหลือง จากนั้นเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 กรัม สารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีส้ม สารละลายที่ได้มีปริมาณรวมทั้งหมด 100 มิลลิลิตร จากนั้นทำการเตรียมสารละลาย Sochelle salt ความเข้มข้นร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก

การวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ด้วยวิธี DNS โดยนำของเหลวตัวอย่างประมาณ 3 มิลลิลิตร ผสมกับสารละลาย DNS Reagent ปริมาณ 3 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน จากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปต้มในน้ำเดือดเป็นเวลา 5-6 นาที จากนั้นนำสารละลายออกจากความร้อนและเติมสารละลาย Sochelle salt ปริมาณ 1 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน ทิ้งไว้ให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง นำ

สารละลายตัวอย่างที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร จากนั้นนำไปคำนวณหาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์โดยใช้น้ำตาลกลูโคสเป็นสารละลายมาตรฐาน และคำนวณหาร้อยละผลได้ของน้ำตาลรีดิวซ์ (Total reducing sugar, TRS) จากสมการ

$$\text{ร้อยละผลได้ของน้ำตาลรีดิวซ์} = \frac{\text{ความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์ที่วัดได้}}{\text{ความเข้มข้นเซลลูโลสทั้งหมดในสารละลาย}} \times 100$$

3.3.4.2 การหาปริมาณอนุมูลไฮดรอกซิลด้วยกรดซาลิไซลิก [20]

การวิเคราะห์ปริมาณอนุมูลไฮดรอกซิลด้วยกรดซาลิไซลิก โดยละลายกรดซาลิไซลิกในน้ำกลั่น ให้มีความเข้มข้น 1×10^{-3} โมลาร์ จากนั้นนำสารละลายตัวอย่างที่ผ่านการปั่นเหวี่ยงแล้วปริมาณ 2 มิลลิลิตร ผสมกับสารละลายกรดซาลิไซลิก 2 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน ทิ้งไว้เพื่อให้สารละลายทั้งสองทำปฏิกิริยากันประมาณ 8-10 นาที หลังจากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 303 นาโนเมตร โดยใช้กรดซาลิไซลิกเป็นสารละลายมาตรฐาน เพื่อวิเคราะห์ความเข้มข้นที่ลดลงของกรดซาลิไซลิกภายหลังการเข้าทำปฏิกิริยากับอนุมูลไฮดรอกซิลที่เกิดขึ้นในสารละลายตัวอย่าง

บทที่ 4

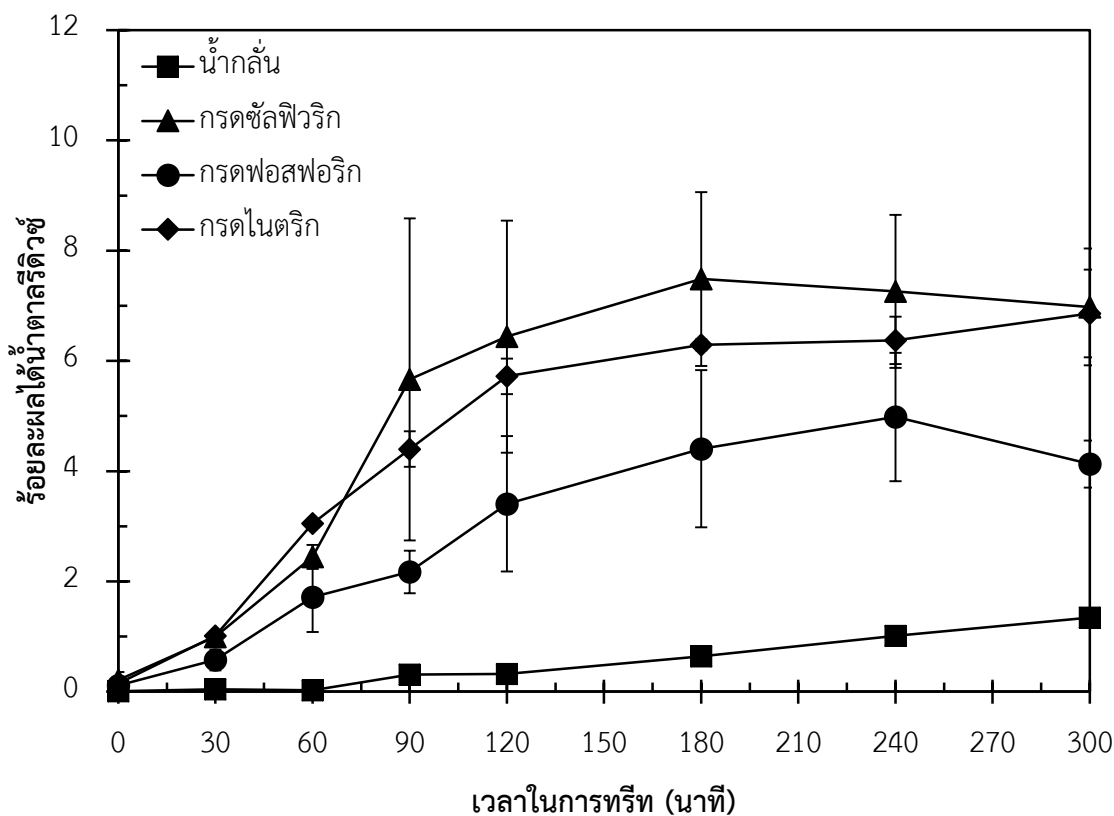
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลของชนิดตัวทำละลายในสารแขวนลอยเซลลูโลสและเวลาในการทรีทด้วยพลาสมาวัฏภาคของเหลว

ผลการวิเคราะห์ร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์ที่เกิดจากสารแขวนลอยเซลลูโลส 1% โดยน้ำหนักในตัวทำละลาย 4 ชนิด คือ น้ำกลั่น กรดพอสฟอริกความเข้มข้น 0.04 โมลาร์ กรดไนตริกความเข้มข้น 0.04 โมลาร์ และกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.04 โมลาร์ ที่ผ่านการทรีทด้วยพลาสมาเป็นเวลา 0-300 นาที ความถี่ไฟฟ้า 15 กิโลเฮิร์ตซ์ โดยใช้ทั้งสแตนเป็นขั้วอิเล็กโทรด แสดงดังรูปที่ 4.1

จากผลร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์ของสารแขวนลอยเซลลูโลสในตัวทำละลายต่างชนิดกัน ที่ผ่านการ ทรีทด้วยพลาสมา พบว่าเมื่อผ่านการทรีทด้วยพลาสมา สารแขวนลอยเซลลูโลสที่ใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย ในช่วงเวลา 90 นาทีแรก มีค่าร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์ต่ำมาก จึงไม่สามารถวิเคราะห์ปริมาณได้ และค่อยๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ตั้งแต่เวลาที่ 90 นาที จนมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1% เมื่อเวลา 300 นาที ในขณะที่เมื่อเปรียบเทียบร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์ของสารแขวนลอยเซลลูโลสที่ใช้กรดเป็นตัวทำละลาย พบว่าร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์ของสารแขวนลอยเซลลูโลสที่ใช้กรดชนิดต่างๆ เป็นตัวทำละลาย มีค่ามากกว่ากรณีใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลายอย่างเห็นได้ชัด แสดงให้เห็นว่าสารแขวนลอยเซลลูโลสที่อยู่ในตัวทำละลายกรด สามารถถูกย่อยสลายเป็นน้ำตาลรีดิวซ์ได้ดีกว่าในน้ำกลั่น และเมื่อเปรียบเทียบชนิดของกรดที่ใช้ พบว่า สารแขวนลอยเซลลูโลสที่ใช้กรดพอสฟอริกเป็นตัวทำละลาย มีร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดตั้งแต่เวลา 30 นาที จนถึง 120 นาที และสูงสุดเท่ากับ 5% ที่เวลา 240 นาที ในขณะที่เมื่อทรีทด้วยพลาสมาครบ 300 นาที ร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์กลับลดลงเล็กน้อยเหลือ 4% ทั้งนี้อาจเนื่องจากกรดพอสฟอริกเป็นกรดอ่อน และมีความเข้มข้นต่ำ จึงอาจทำให้เกิดการย่อยสลายเซลลูโลสอย่างช้าๆ จากผลการวิเคราะห์สารแขวนลอยเซลลูโลสที่ใช้ตัวทำละลายกรดไนตริกและกรดซัลฟิวริกซึ่งเป็นกรดแก่ พบว่าร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์ของสารแขวนลอยเซลลูโลสที่ใช้ตัวทำละลายกรดไนตริกเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดตั้งแต่เวลา 30 นาที จนถึง 120 นาที และค่อนข้างคงที่จนถึงเวลา 300 นาที โดยค่าร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์กรณีใช้กรดไนตริกมีค่าสูงสุดเท่ากับ 7 ในขณะที่สารแขวนลอยเซลลูโลสที่ใช้ตัวทำละลายกรดซัลฟิวริกมีร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์สูงกว่ากรณีใช้กรดไนตริกเล็กน้อย โดยมีอัตราการเพิ่มขึ้นของผลได้สูงที่สุดใน

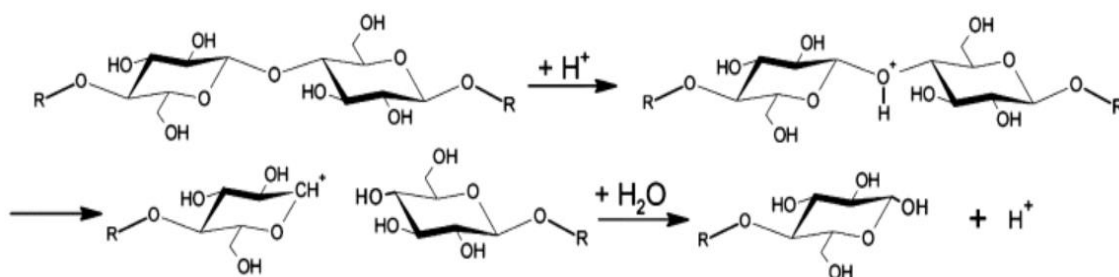
ช่วงเวลา 30 นาที ถึง 90 นาที จากนั้นจะมีอัตราการเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนถึงนาทีที่ 180 ซึ่งให้ค่าร้อยละผลได้สูงสุดเท่ากับ 8 ภายหลังจากนาทีที่ 180 ค่าร้อยละผลได้จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนจนถึงนาทีที่ 300 นาที



รูปที่ 4. 1 ร้อยละผลได้น้ำตาลรีตวซ์ที่ได้จากสารแขวนลอยเซลลูโลส 1% โดยน้ำหนัก ในตัวทำละลาย 4 ชนิด คือ น้ำกลั่น กรดฟอสฟอริก กรดไนตริก และกรดซัลฟูริก ซึ่งผ่านการทรีทด้วยพลาสมาไว้ ภาควิชาของเหลวที่เวลา 0-300 นาที ความถี่ไฟฟ้า 15 กิโลเฮิร์ตซ์ โดยใช้ทั้งสแตนเป็นขั้วอิเล็กโทรด

จากการวิเคราะห์ผลของร้อยละผลได้น้ำตาลรีตวซ์จะเห็นได้ว่า สารแขวนลอยเซลลูโลสที่ใช้ น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลายมีร้อยละผลได้น้ำตาลรีตวซ์ที่ต่ำกว่าตัวทำละลายกรด เนื่องจากความสามารถในการแตกตัวของน้ำกลั่นให้ H^+ น้อยกว่าความสามารถในการแตกตัวให้ H^+ ของกรด จึงส่งผลให้การไฮโดรไลซิสเซลลูโลสซึ่งเป็นกระบวนการในการย่อยสลายเซลลูโลสให้เป็นน้ำตาลรีตวซ์ต่ำกว่ากรณีใช้กรดเป็นตัวทำละลาย หรือแทบจะไม่สามารถไฮโดรไลซิสเซลลูโลสด้วยน้ำได้ ทั้งนี้เพราะโครงสร้างส่วนใหญ่ของเซลลูโลสเป็นผลึก ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีความแข็งแรง ย่อยสลายได้ยาก และเมื่อใช้ตัวทำละลายกรด จะเห็นได้ว่า ร้อยละผลได้น้ำตาลรีตวซ์มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อ

เปรียบเทียบกับตัวทำละลายน้ำกลั่น เนื่องจากกรดแตกตัวให้ H^+ ได้ดี จึงเพียงพอต่อการเข้าทำลายโครงสร้างผลึกของเซลลูโลส เมื่อพิจารณาสารแขวนลอยเซลลูโลสที่ใช้ กรดฟอสฟอริกเป็นตัวทำละลาย พบว่าร้อยละผลได้ของน้ำตาลรีดิวซ์ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรดไนตริกและกรดซัลฟิวริก เนื่องจากกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) เป็นกรดอ่อนสามารถแตกตัวให้ H^+ ได้เพียงบางส่วน เมื่อเปรียบเทียบกับกรดไนตริก (HNO_3) และกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ซึ่งเป็นกรดแก่ทั้ง 2 ชนิด ซึ่งสามารถแตกตัวให้ H^+ ได้ทั้งหมด ทั้งนี้เมื่อเปรียบกรดแก่ทั้งสองชนิด จะเห็นว่า กรดไนตริกมีจำนวนไฮโดรเจน 1 ตัว และกรดซัลฟิวริกมีจำนวนไฮโดรเจน 2 ตัว กรดซัลฟิวริกจึงสามารถแตกตัวให้ H^+ มากกว่า ทำให้ร้อยละผลได้ของน้ำตาลรีดิวซ์ในสารแขวนลอยเซลลูโลสที่ใช้กรดซัลฟิวริกมีค่าสูงกว่ากรดไนตริก และสูงที่สุดในกลุ่มตัวทำละลายทั้งสี่ชนิดที่ใช้ในการศึกษานี้ ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ L. Kupiainen และคณะ [27] ที่ได้ศึกษาเปรียบเทียบผลของการไฮโดรไลซิสเซลลูโลสด้วยกรด 2 ชนิด คือ กรดฟอร์มิก ($HCOOH$) ความเข้มข้น 5-20% โดยน้ำหนัก และกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ความเข้มข้น 0.09-0.5% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 180-220 องศาเซลเซียส จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของเซลลูโลสด้วยเทคนิค XRD พบว่าเซลลูโลสที่ไฮโดรไลซิสด้วยกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้น 0.5% มีค่าดัชนีความเป็นผลึกต่ำกว่าเซลลูโลสที่ไฮโดรไลซิสด้วยกรดฟอร์มิก ที่ความเข้มข้น 20% แสดงให้เห็นว่า กรดซัลฟิวริกสามารถทำลายโครงสร้างความเป็นผลึกของเซลลูโลสได้ดีกว่ากรดฟอร์มิก ซึ่งเป็นผลจากการแตกตัวให้ H^+ ที่ดีกว่า เนื่องจากจำนวนของไฮโดรเจนของกรดซัลฟิวริกมีมากกว่ากรดฟอร์มิก ทำให้สามารถไฮโดรไลซิสเซลลูโลสได้ดีกว่า โดยกลไกการไฮโดรไลซิสเซลลูโลสด้วยกรด แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4. 2 กลไกการไฮโดรไลซิสเซลลูโลสด้วยกรด [27]

จากรูปที่ 4.2 กลไกการไฮโดรไลซิสเซลลูโลสด้วยกรดที่เกิดจากการแตกตัวของกรดในตัวทำละลายน้ำ ทำให้เกิด H^+ ที่มีความว่องไวในการเข้าทำปฏิกิริยา โดย H^+ จะเข้าทำปฏิกิริยาที่พันธะ β

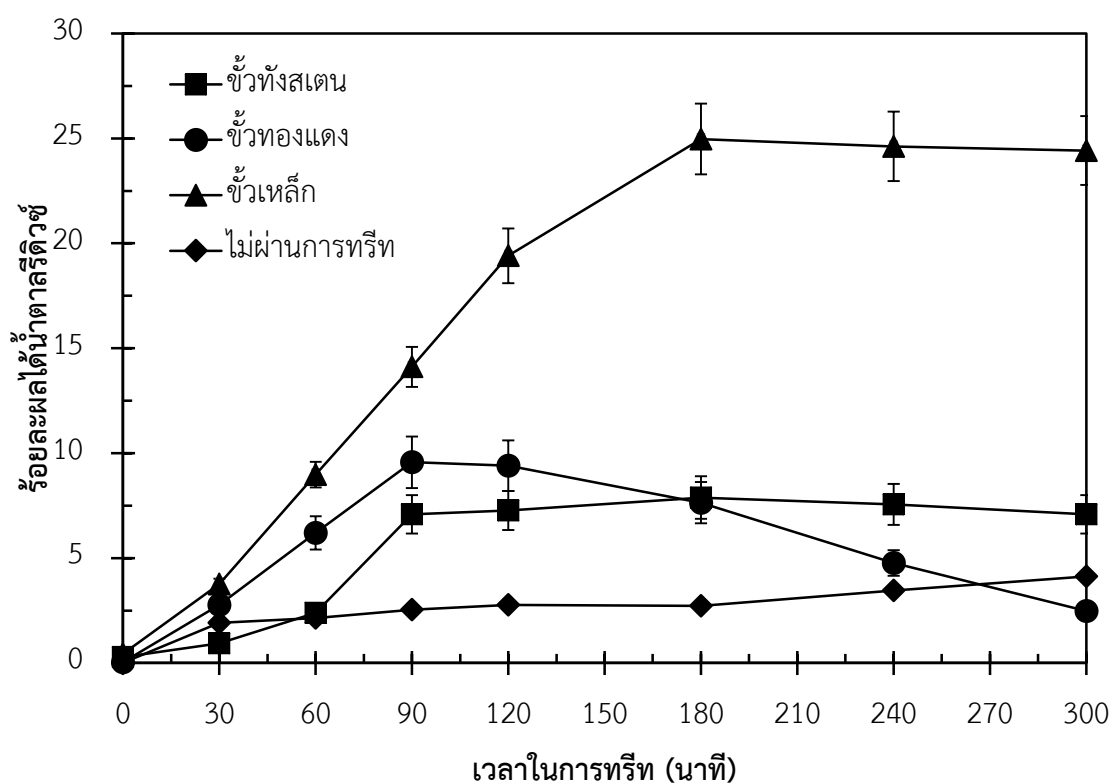
1-4 ไกลโคซิดิกของเซลลูโลส ทำให้พันธะแยกออก เกิดหมู่คาร์โบเนียมไอออน ซึ่งโมเลกุลของน้ำในตัวทำละลายจะทำปฏิกิริยากับหมู่คาร์โบเนียมไอออนของน้ำตาลรีดิวซ์ที่เกิดจากการไฮโดรไลซิสเซลลูโลส และเกิด H^+ ออกมา กลไกที่เกิดขึ้นจะทำให้เซลลูโลสเกิดการย่อยสลายเป็นน้ำตาลรีดิวซ์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความสามารถในการแตกตัวและปริมาณ H^+ ที่ได้จากการแตกตัวของกรดแต่ละชนิดด้วย

4.2 ผลของชนิดขั้วอิเล็กโทรดและเวลาในการทรีทสารแขวนลอยเซลลูโลสด้วยพลาสมาวัฏภาคของเหลว

ผลการวิเคราะห์ร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์ที่เกิดจากสารแขวนลอยเซลลูโลส 1% โดยน้ำหนัก ในตัวทำละลายกรดซัลฟิวริก 0.04 โมลาร์ โดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดต่างกัน 3 ชนิด คือ ทั้งสแตนทองแดง และเหล็ก ที่ผ่านการทรีทด้วยพลาสมาเป็นเวลา 0-300 นาที ความถี่ไฟฟ้า 15 กิโลเฮิร์ตซ์ และเปรียบเทียบกับร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์ที่เกิดจากสารแขวนลอยเซลลูโลส 1% โดยน้ำหนัก ด้วยกระบวนการไฮโดรไลซิสที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ซึ่งไม่ผ่านการทรีทด้วยพลาสมา ในตัวทำละลายกรดซัลฟิวริก 0.04 โมลาร์ (เนื่องจากกระหว่างการทรีทสารแขวนลอยเซลลูโลสในกรดซัลฟิวริกด้วยพลาสมา โดยใช้ขั้วเหล็กเป็นอิเล็กโทรดจะมีความร้อนเกิดขึ้นทำให้มีอุณหภูมิสูงสุด 60 องศาเซลเซียส ที่เวลา 300 นาที จึงเลือกใช้กรณีให้ความร้อน 60 องศาเซลเซียส เป็นกรณีเปรียบเทียบ) แสดงดังรูปที่ 4.3

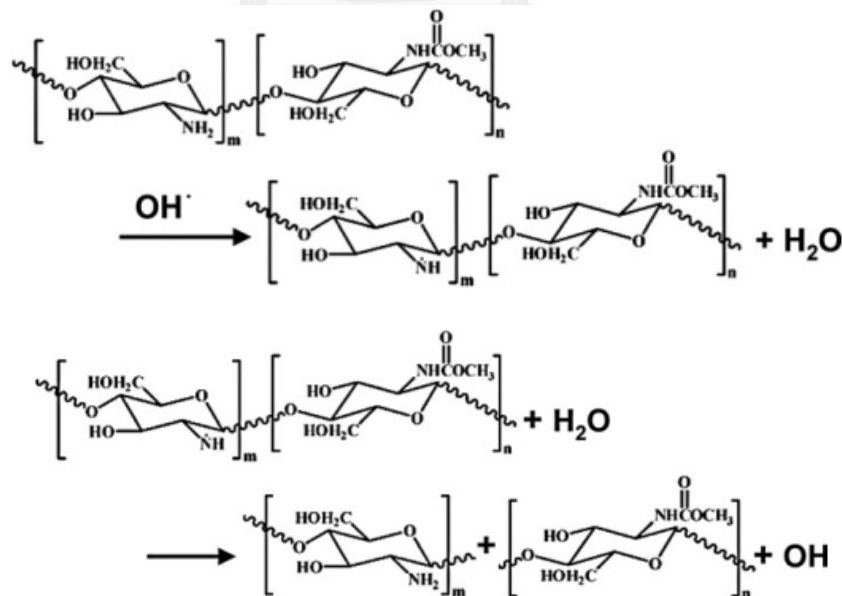
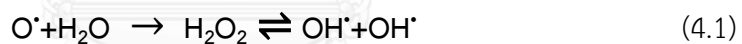
จากผลร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์ของสารแขวนลอยเซลลูโลสเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างสารแขวนลอยเซลลูโลสที่ได้รับความร้อนที่ 60 องศาเซลเซียส (ไม่ผ่านการทรีทด้วยพลาสมา) และกรณีที่ผ่านการทรีทด้วยพลาสมา พบว่าสารแขวนลอยเซลลูโลสที่ได้รับความร้อนที่ 60 องศาเซลเซียส (ไม่ผ่านการทรีทด้วยพลาสมา) มีร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์น้อยมาก มีค่าสูงสุดเท่ากับ 3% นาทีที่ 300 ในกรณีสารแขวนลอยเซลลูโลสที่ผ่านการทรีทด้วยพลาสมา พบว่าร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์ของสารแขวนลอยเซลลูโลสที่ใช้ขั้วอิเล็กโทรดชนิดต่างๆ มีค่ามากกว่ากรณีสารแขวนลอยเซลลูโลสที่ได้รับความร้อนที่ 60 องศาเซลเซียส (ไม่ผ่านการทรีทด้วยพลาสมา) แสดงให้เห็นว่าสารแขวนลอยเซลลูโลสที่ผ่านการทรีทด้วยพลาสมาถูกย่อยสลายเป็นน้ำตาลรีดิวซ์ได้มากกว่ากรณีเซลลูโลสที่ได้รับความร้อนที่ 60 องศาเซลเซียส (ไม่ผ่านการทรีทด้วยพลาสมา) เมื่อเปรียบเทียบสารแขวนลอยเซลลูโลสที่ผ่านการทรีทด้วยพลาสมาโดยใช้ขั้วอิเล็กโทรด 3 ชนิด พบว่า สารแขวนลอยเซลลูโลสที่ใช้ทั้งสแตนเป็นขั้วอิเล็กโทรด มีร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตั้งแต่เวลา 30 นาที จนถึง 90 นาที ประมาณ 6-7% หลังจากนั้นค่าร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์จะค่อนข้างคงที่จนถึง 300 นาที

ส่วนกรณีสารแขวนลอยเซลลูโลสที่ผ่านการทรีทด้วยพลาสมาที่ใช้ขั้วทองแดง พบว่าร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์มีอัตราการเพิ่มขึ้นของผลได้ต่อเนื่องในช่วงเวลา 30 นาที ถึง 90 นาที โดยมีร้อยละผลได้สูงสุด 10 ภายหลังจากที่ 90 ร้อยละผลได้ลดลงอย่างช้าๆ จนถึงนาทีที่ 300 ในขณะที่สารแขวนลอยเซลลูโลสที่ผ่านการทรีทด้วยพลาสมาโดยใช้เหล็กเป็นขั้วอิเล็กโทรด มีร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์สูงที่สุดเมื่อเทียบกับขั้วอิเล็กโทรดชนิดอื่น โดยมีอัตราการเพิ่มขึ้นของผลได้สูงที่สุดในช่วงเวลา 30 นาที ถึง 180 นาที โดยมีร้อยละผลได้สูงที่สุด 25 จากนั้นค่าร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์ค่อนข้างคงที่จนถึงนาทีที่ 300



รูปที่ 4. 3 ร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากสารแขวนลอยเซลลูโลส 1% โดยน้ำหนัก ในกรดซัลฟิวริก 0.04 โมลาร์ โดยใช้ขั้วอิเล็กโทรด 3 ชนิด คือ ทังสเตน ทองแดง และเหล็ก ทรีทด้วยพลาสมาเป็นเวลา 0-300 นาที ความถี่ไฟฟ้า 15 กิโลเฮิร์ตซ์ และร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากสารแขวนลอยเซลลูโลส 1% โดยน้ำหนัก ในกรดซัลฟิวริก 0.04 โมลาร์ ด้วยการให้ความร้อนที่ 60 องศาเซลเซียส (ไม่ผ่านการทรีทด้วยพลาสมา)

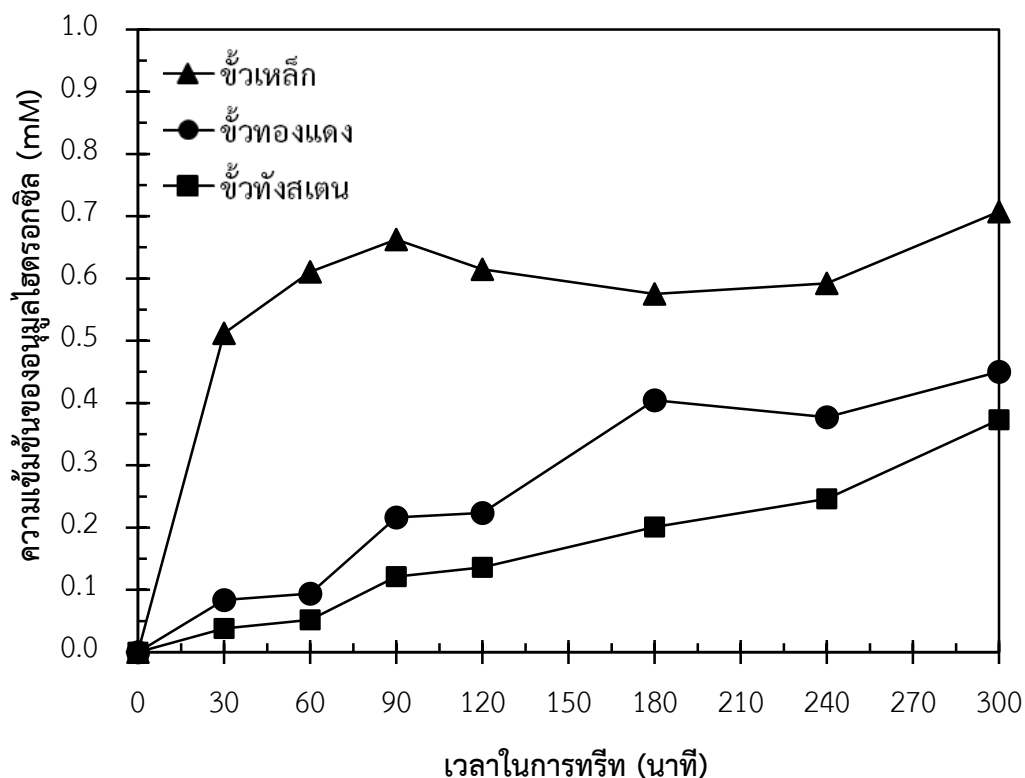
จากการวิเคราะห์ผลเปรียบเทียบร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์ของสารแขวนลอยเซลลูโลสที่ได้รับความร้อนที่ 60 องศาเซลเซียส (ไม่ผ่านการทรีตด้วยพลาสมา) และกรณีที่ไม่ผ่านการทรีตด้วยพลาสมา พบว่าร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์ของสารแขวนลอยเซลลูโลสที่ไม่ผ่านการทรีตด้วยพลาสมามีค่าสูงกว่ากรณีที่ไม่ผ่านการทรีตด้วยพลาสมา เนื่องจากพลาสมาซึ่งเกิดจากการป้อนกระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้า เชื่อมต่อกับขั้วอิเล็กโทรดของถังปฏิกรณ์พลาสมาที่บรรจุสารแขวนลอยเซลลูโลส กระแสไฟฟ้าจะทำให้เกิดพลังงานกระตุ้นให้สารละลายแตกตัวเป็นอนุภาคต่างชนิดกัน โดยเฉพาะอนุภาคไฮดรอกซิลเป็นอนุมูลอิสระที่มีความว่องไว ทำให้เข้าทำลายพันธะ β 1-4 ไกลโคซิดิกของเซลลูโลสส่งผลให้เกิดการย่อยสลายเป็นน้ำตาลรีดิวซ์ สอดคล้องกับรายงานของ Prasertsung I. และคณะ [15] ซึ่งแสดงกลไกการย่อยสลายโคโตซานด้วยกระบวนการพลาสมาวัฏภาคของเหลว โดยสารละลายเมื่อได้รับพลังงานจากพลาสมาจะทำให้เกิดอนุมูลออกซิเจน จากนั้นอนุมูลออกซิเจนทำปฏิกิริยากับน้ำจะได้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แตกตัวกลายเป็นอนุมูลไฮดรอกซิล ซึ่งเป็นปัจจัยในการลดน้ำหนักโมเลกุลของโคโตซานหลังผ่านการทรีตแล้ว โดยพันธะไกลโคซิดิกของโคโตซานถูกทำลายด้วยอนุมูลไฮดรอกซิลซึ่งเป็นอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการทรีตด้วยพลาสมา ส่งผลให้สายโซ่มอเลกุลถูกตัดขาดทำให้โคโตซานมีน้ำหนักโมเลกุลลดลง แสดงในสมการ 4.1 และรูปที่ 4.4



รูปที่ 4. 4 แสดงกลไกการย่อยสลายโคโตซานด้วยกระบวนการพลาสมาวัฏภาคของเหลว [15]

เนื่องจากโคโตซานเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกเช่นเดียวกับเซลลูโลส จึงทำให้มีโครงสร้างที่คล้ายคลึงกัน ดังนั้นกลไกการย่อยสลายเซลลูโลสด้วยพลาสมาจึงมีความเป็นไปได้ที่จะมีลักษณะกลไกแบบเดียวกับการย่อยสลายโคโตซานด้วยพลาสมา อนุมูลที่เกิดขึ้นระหว่างการทรีทสารแขวนลอยเซลลูโลสด้วยพลาสมานี้จะสามารถทำปฏิกิริยากับธาตุในระบบเกิดเป็นอนุมูลไฮดรอกซิล ซึ่งตรวจวัดในระหว่างการทรีทสารแขวนลอยเซลลูโลสด้วยพลาสมาที่เวลาต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.5

ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของอนุมูลไฮดรอกซิลในสารแขวนลอยเซลลูโลส 1% โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการทรีทด้วยพลาสมาโดยใช้ขั้วอิเล็กโทรด 3 ชนิด คือ ทังสเตน ทองแดง และเหล็ก เป็นเวลา 0-300 นาที ความถี่ไฟฟ้า 15 กิโลเฮิร์ตซ์ พบว่าสารแขวนลอยเซลลูโลสที่ทรีทด้วยพลาสมาโดยใช้ขั้วทังสเตน มีความเข้มข้นของอนุมูลไฮดรอกซิลเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ตั้งแต่เวลา 0 นาที จนถึงเวลา 300 นาที โดยมีค่าความเข้มข้นของอนุมูลไฮดรอกซิลสูงที่สุด 0.4 มิลลิโมลาร์ ที่เวลา 300 นาที และเมื่อใช้ทองแดงเป็นขั้วอิเล็กโทรดในการทรีทสารแขวนลอยเซลลูโลส พบว่าความเข้มข้นของอนุมูลไฮดรอกซิลเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องคล้ายกับกรณีที่ใช้ทังสเตนเป็นขั้วอิเล็กโทรด แต่มีค่าความเข้มข้นมากกว่าเล็กน้อย ในขณะที่เมื่อพิจารณาความเข้มข้นอนุมูลไฮดรอกซิลของสารแขวนลอยเซลลูโลสที่ทรีทด้วยพลาสมาโดยใช้เหล็กเป็นขั้วอิเล็กโทรด พบว่าความเข้มข้นอนุมูลไฮดรอกเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วภายใน 30 นาทีแรกของการทรีทพลาสมา โดยมีค่า 0.5 มิลลิโมลาร์ จากนั้นความเข้มข้นอนุมูลไฮดรอกซิลจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนถึงเวลา 90 นาที ภายหลังจากที่ 90 ความเข้มข้นจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนจนถึงนาทีที่ 300 โดยมีค่าสูงสุด 0.7 มิลลิโมลาร์



รูปที่ 4.5 ความเข้มข้นของอนุพลไฮดรอกซิลที่ตรวจพบในสารแขวนลอยเซลลูโลส 1% โดยน้ำหนัก ในกรดซัลฟิวริก 0.04 โมลาร์ ทรีทด้วยพลาสมาโดยใช้ขั้วอิเล็กโทรด 3 ชนิด คือ ทังสเตน ทองแดง และเหล็กเป็นเวลา 0-300 นาที ความถี่ไฟฟ้า 15 กิโลเฮิร์ตซ์

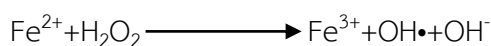
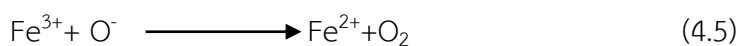
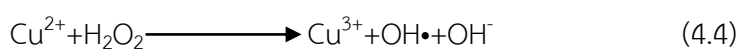
การเกิดอนุพลไฮดรอกซิลในสารแขวนลอยเซลลูโลสระหว่างการทรีทด้วยพลาสมามีความสำคัญต่อการย่อยสลายเซลลูโลสให้เป็นน้ำตาลรีดิวซ์ เนื่องจากอนุพลไฮดรอกซิลมีความว่องไวในการเข้าทำลายพันธะไกลโคซิดิกของเซลลูโลส โดยอนุพลไฮดรอกซิลเกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาระหว่างอนุพลอิสระที่เกิดจากแตกตัวของสารละลายและไอออนโลหะของขั้วอิเล็กโทรด เมื่อได้รับพลังงานกระตุ้นจากพลาสมา โดยชนิดของอนุพลที่หลุดออกจากขั้วอิเล็กโทรดสามารถตรวจสอบได้ด้วย OES ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ T. Tantiplapol และคณะ [25] ซึ่งศึกษาการย่อยสลายไคโตซานด้วยพลาสมาวิทยุภาคของเหลวที่เวลา 0-300 นาที ความถี่ไฟฟ้า 15-30 กิโลเฮิร์ตซ์ โดยได้ทำการตรวจวัดความยาวคลื่นในช่วงสมบัติการปล่อยพลังงานของอนุพลภายในสารละลายไคโตซานระหว่างการทรีทด้วยพลาสมา พบว่าอนุพลทองแดงที่เกิดจากการแตกตัวของขั้วทองแดงเมื่อได้รับพลังงาน

ระหว่างการทรีทด้วยพลาสมา มีสมบัติการปล่อยพลังงานที่ความยาวคลื่น 324.5 และ 521.8 นาโนเมตร และอนุมูลเหล็กที่เกิดขึ้นเมื่อขั้วเหล็กได้รับพลังงานระหว่างการทรีทโคโตซานด้วยพลาสมา มีสมบัติการปล่อยพลังงานที่ความยาวคลื่น 259.941 และ 425.8 นาโนเมตร นอกจากนี้ยังตรวจพบอนุมูลของไฮโดรเจนซึ่งมีสมบัติการปล่อยพลังงานที่ความยาวคลื่น 656.3 นาโนเมตร และอนุมูลของออกซิเจนมีสมบัติการปล่อยพลังงานที่ความยาวคลื่น 777 นาโนเมตร ซึ่งอนุมูลของไฮโดรเจนและออกซิเจนเกิดขึ้นจากการแตกตัวของสารละลาย ในขณะที่สารละลายโคโตซานที่ทรีทด้วยพลาสมาโดยใช้ทั้งสแตนเป็นขั้วอิเล็กโทรดมี การตรวจพบเพียงอนุมูลของไฮโดรเจนและออกซิเจน ไม่พบอนุมูลของทั้งสแตน อาจเนื่องจากขั้วทั้งสแตนมีการสึกกร่อนน้อยในระหว่างการทรีทด้วยพลาสมา ทำให้ไม่เกิดการแตกตัวของอนุมูลทั้งสแตนในระบบ ทั้งนี้การเกิดอนุมูลแต่ละชนิดที่ขึ้นอยู่กับชนิดของขั้วอิเล็กโทรดที่ใช้ โดยส่งผลทำให้เกิดปฏิกิริยาต่อไปในระบบและสามารถสร้างอนุมูลไฮดรอกซิลเพื่อย่อยสลายเซลล์โลส

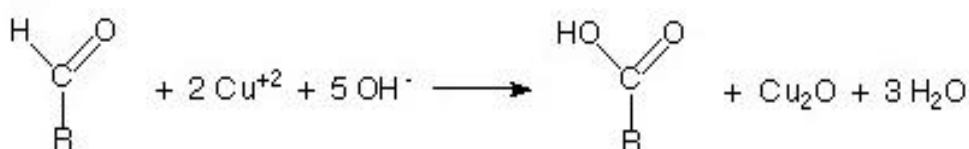
จากผลการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของอนุมูลไฮดรอกซิลในสารแขวนลอยเซลล์โลสที่ทรีทด้วยพลาสมา พบว่าสารแขวนลอยเซลล์โลสที่ทรีทด้วยพลาสมาโดยใช้ขั้วทั้งสแตน ตรวจพบความเข้มข้นของอนุมูลไฮดรอกซิลน้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับสารแขวนลอยเซลล์โลสที่ทรีทด้วยพลาสมาโดยใช้ขั้วทองแดงและเหล็ก เนื่องจากพลาสมาจะกระตุ้นให้ขั้วทองแดงและขั้วเหล็กเกิดกระบวนการอิเล็กโทรไลซิส ทำให้เกิดอนุภาคของทองแดงและอนุภาคของเหล็ก ซึ่งอนุภาคเหล่านี้จะสามารถเกิดเป็นไอออนของทองแดง (Cu^{2+}) และไอออนของเหล็ก (Fe^{2+}) จากปฏิกิริยาออกซิเดชัน ดังแสดงในสมการ (4.2) และสมการ (4.3) [15] ตามลำดับ



ไอออนของทองแดงและไอออนของเหล็กที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันจะสามารถสร้างอนุมูลไฮดรอกซิลได้ เมื่อไอออนเข้าทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยปฏิกิริยาเฟนตอนที่เกิดจากการสึกกร่อนของขั้วทองแดงและขั้วเหล็ก แสดงดังสมการ (4.4) และสมการ (4.5) ตามลำดับ



ปฏิกิริยาเฟนตอนของเหล็ก (สมการ (4.5)) ประกอบด้วยปฏิกิริยาย่อย 2 ปฏิกิริยา จะเห็นได้ว่า Fe^{3+} ทำปฏิกิริยากับ O^- เกิดเป็น Fe^{2+} จากนั้น Fe^{2+} จะทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เกิดเป็นอนุมูลไฮดรอกซิล ได้ Fe^{3+} ซึ่ง Fe^{3+} จะสามารถทำปฏิกิริยาสร้าง Fe^{2+} ต่อไปได้ ดังนั้นการทรีทพลาสมาด้วยขั้วเหล็กจึงสามารถเกิด Fe^{2+} ได้ 2 ปฏิกิริยา คือ ปฏิกิริยาออกซิเดชันและปฏิกิริยาเฟนตอน ทำให้สารแขวนลอยเซลล์ูโลสที่ทรีทด้วยพลาสมาโดยใช้ขั้วเหล็กมีอนุมูลไฮดรอกซิลมากกว่าขั้วอิเล็กโทรดชนิดอื่น สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์ที่เกิดจากสารแขวนลอยเซลล์ูโลสที่ทรีทพลาสมาด้วยขั้วเหล็กซึ่งมีค่าสูงสุด แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาเฟนตอนสามารถส่งเสริมให้เกิดอนุมูลไฮดรอกซิลได้เพิ่มขึ้น ดังเห็นได้จากการตรวจพบความเข้มข้นของอนุมูลไฮดรอกซิลที่เกิดจากการใช้เหล็กเป็นขั้วอิเล็กโทรด ที่มากกว่ากรณีใช้ขั้วทองแดง ทั้งนี้กรณีสารแขวนลอยเซลล์ูโลสที่ทรีทด้วยพลาสมาที่ใช้ขั้วทองแดงมีร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์ลดลง เนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นในระหว่างการทรีททำให้เกิดไอออนของทองแดง (Cu^{2+}) และปฏิกิริยาเฟนตอนทำให้เกิดไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) โดยไอออนทั้งสองจะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่แอลดีไฮด์ของน้ำตาลรีดิวซ์กลายเป็นหมู่คาร์บอกซิลิก ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์คอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งมีลักษณะเป็นตะกอนสีแดงอิฐ ในระหว่างการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ด้วยวิธี DNS [28] แสดงดังรูปที่ 4.6 ซึ่งเป็นปฏิกิริยาข้างเคียง ทำให้น้ำตาลรีดิวซ์ในระบบลดลง



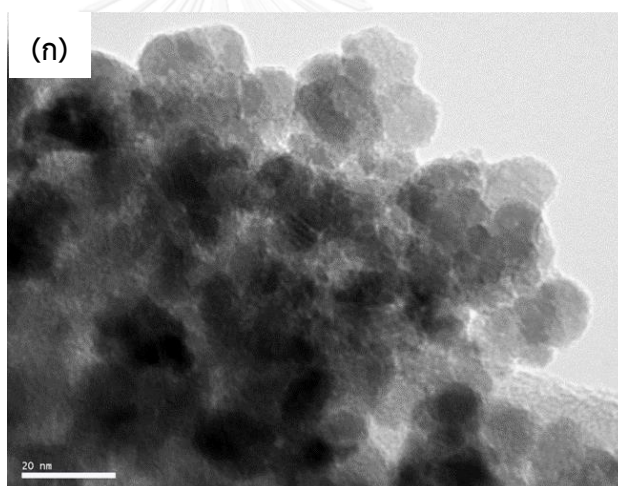
รูปที่ 4.6 การเกิดปฏิกิริยาระหว่างน้ำตาลรีดิวซ์และไอออนที่เกิดขึ้นในระบบระหว่างการทรีทสารแขวนลอยเซลล์ูโลสด้วยพลาสมาที่ใช้ทองแดงเป็นขั้วอิเล็กโทรด [28]

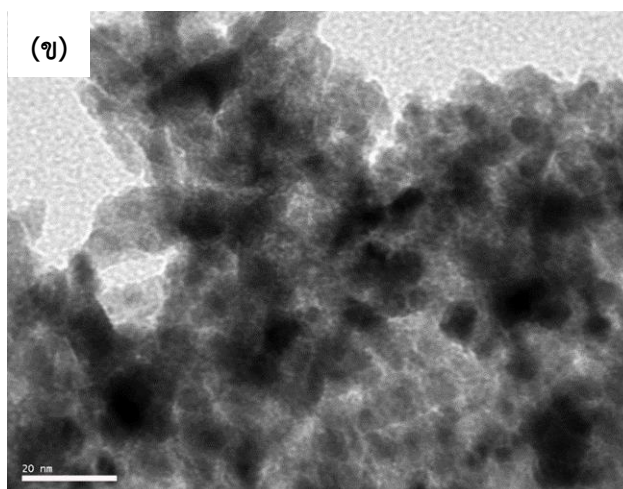
4.3 ลักษณะสัณฐานของอนุภาคที่สีกร่อนจากขั้วอิเล็กโทรดระหว่างทรีทสารแขวนลอยเซลล์ูโลสด้วยพลาสมาวิภาคของเหลว

ภายหลังการทรีทสารแขวนลอยเซลล์ูโลส 1% โดยน้ำหนัก ในสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.04 โมลาร์ โดยใช้ขั้วอิเล็กโทรด 3 ชนิด คือ ทั้งสแตน ทองแดง และเหล็ก ความถี่ไฟฟ้า 15 กิโลเฮิร์ตซ์ เป็นเวลา 300 นาที ได้นำสารตัวอย่างไปแยกส่วนด้วยการปั่นเหวี่ยง จากนั้นนำส่วน

ของแข็งไปแยกผงอนุภาคของซั้วอิเล็กโทรดด้วยการใช้แม่เหล็กไฟฟ้าดูดออก และทำการวิเคราะห์เพื่อ ยืนยันขนาดและการมีอยู่ของอนุภาคโลหะในสารแขวนลอยเซลล์โลสระหว่างการทรีตด้วยพลาสติก กรณีที่ใช้ซั้วทั้งสแตนไม่สามารถเก็บตัวอย่างอนุภาคของทั้งสแตน เพื่อวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานได้ เนื่องจากส่วนของแข็งที่แยกได้จากสารแขวนลอยเซลล์โลสที่ทรีตด้วยพลาสติก มีปริมาณน้อยและไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาจึงไม่สามารถนำมาวิเคราะห์ได้ ซึ่งเป็นเหตุให้มีเพียงผงอนุภาคของทองแดง และเหล็ก ที่ถูกนำไปวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน ดัง แสดงผลในรูปที่ 4.7

กรณีใช้เหล็กเป็นซั้วอิเล็กโทรด (รูปที่ 4.7 (ก)) จะสังเกตว่า อนุภาคเหล็กมีรูปร่างคล้ายทรงกลม มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 10 นาโนเมตร ในขณะที่ซั้วทองแดงที่สึกกร่อนมีลักษณะอนุภาคที่มีรูปร่างไม่แน่นอน มีขนาดเล็กเฉลี่ยประมาณ 5 นาโนเมตร (รูปที่ 4.7 (ข))





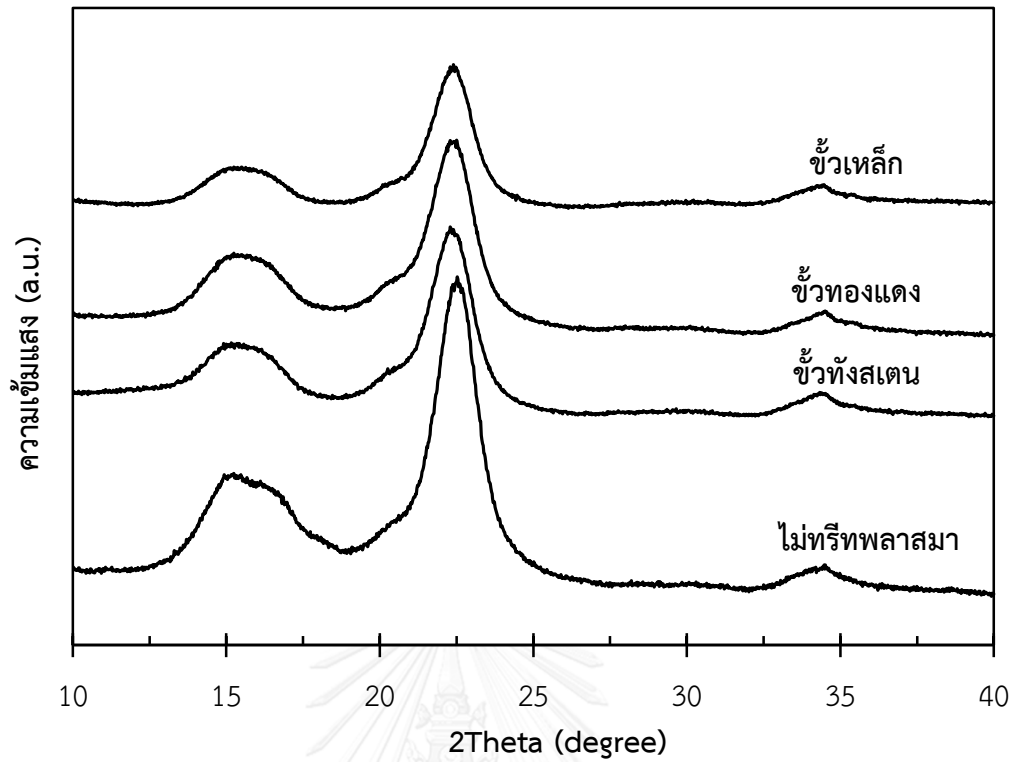
รูปที่ 4. 7 ลักษณะสัณฐานของอนุภาคที่สังเคราะห์จากซัลไฟด์ระหว่างการผลิตสารแขวนลอยเซลลูโลส 1% โดยน้ำหนัก ด้วยพลาสมาในสารละลายกรดซัลฟิวริก 0.04 โมลาร์ โดยใช้เหล็กและทองแดงเป็นซัลไฟด์ที่เวลา 300 นาที ความถี่ไฟฟ้า 15 กิโลเฮิร์ตซ์ ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (ก) เมื่อใช้เหล็กเป็นซัลไฟด์ (ข) เมื่อใช้ทองแดงเป็นซัลไฟด์ (สเกลบาร์เท่ากับ 20 นาโนเมตร)

เมื่อพิจารณาลักษณะสัณฐานของอนุภาคที่สังเคราะห์ออกจากซัลไฟด์และซัลไฟด์ทองแดง ในระหว่างการ ผลิตสารแขวนลอยเซลลูโลสด้วยพลาสมาจากรูปที่ 4.7 อนุภาคเหล่านี้มีขนาดเล็กมาก จึงคาดว่าจะกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอภายในสารแขวนลอยเซลลูโลส เนื่องจากการปั่นกวนสารแขวนลอยภายในถังปฏิกรณ์พลาสมาระหว่างการผลิตจะช่วยส่งเสริมให้เกิดอนุภาคไฮดรอกซิลในระบบได้เพิ่มขึ้น เกิดปฏิกิริยาเพนตอนขึ้นระหว่างผิวสัมผัสของอนุภาคโลหะและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่กระจายอยู่ในระบบ จากรายงานของ A.R. Tehrani และคณะ [29] ซึ่งได้ศึกษาการย่อยสลายสีย้อมผ้าในไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาอนุภาคคอปเปอร์เฟอไรต์ (Copper ferrite nanoparticles, CFNs) ที่มีลักษณะเป็นอนุภาคนาโน จากการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานด้วยเทคนิค TEM พบว่าลักษณะอนุภาคส่วนใหญ่เป็นทรงกลมขนาดเล็กเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 21 นาโนเมตร ซึ่งเป็นลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดี ทำให้ช่วยส่งเสริมการย่อยสลายสีย้อมผ้าจากน้ำเสียที่ปล่อยจากโรงงาน เนื่องจากอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยานาโนสามารถกระจายในของเหลวได้อย่างสม่ำเสมอ และมีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้น

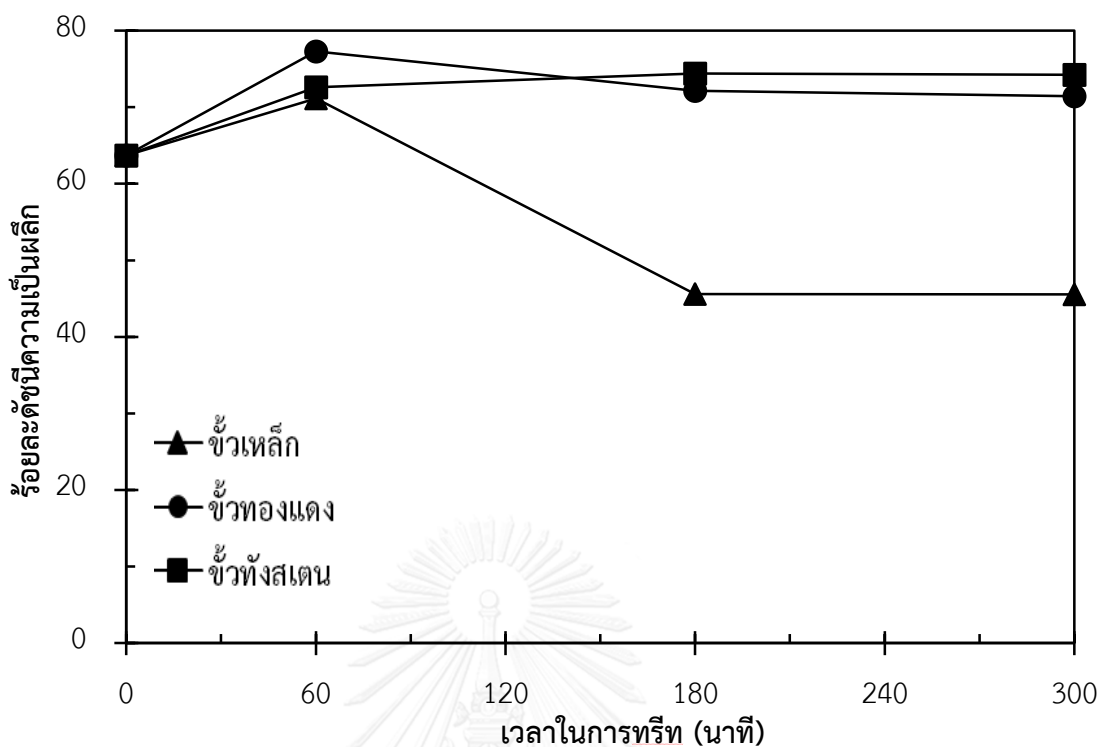
4.4 ผลของพลาสมาวิภาคของเหลวที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างความเป็นผลึกของ เซลลูโลส

ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD เพื่อศึกษาโครงสร้างผลึกของเซลลูโลสในสารแขวนลอย เซลลูโลสที่ผ่านการทรีทด้วยพลาสมา ในกรดซัลฟิวริก 0.04 โมลาร์ โดยใช้ขั้วอิเล็กโทรด 3 ชนิด คือ ทังสเตน ทองแดง และเหล็ก ความถี่ไฟฟ้า 15 กิโลเฮิร์ตซ์ เป็นเวลา 300 นาที เปรียบเทียบกับ เซลลูโลสที่ไม่ผ่านการทรีทด้วยพลาสมา แสดงดังรูปที่ 4.8

จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของเซลลูโลสในสารแขวนลอยเซลลูโลสที่ผ่านการทรีท และไม่ทรีทด้วยพลาสมา พบว่าเซลลูโลสที่ไม่ผ่านการทรีทด้วยพลาสมาจะแสดงพีคที่ตำแหน่ง 2 θ เท่ากับ 15.1 และ 22.5 องศา ซึ่งพีคดังกล่าวแสดงความเป็นผลึกของเซลลูโลส [27, 30] ภายหลังจาก ผ่านการทรีทด้วยพลาสมาโดยใช้ขั้วอิเล็กโทรด 3 ชนิด คือ ทังสเตน ทองแดง และเหล็ก เป็นเวลา 300 นาที พบว่าความสูงของพีคที่ตำแหน่ง 2 θ เท่ากับ 15.1 และ 22.5 องศา ลดต่ำลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่ให้เห็นว่าพลาสมาสามารถทำลายโครงสร้างผลึกของเซลลูโลสได้ ทำให้เกิดโครงสร้างแบบอสัณฐาน เพิ่มขึ้น ซึ่งโครงสร้างแบบอสัณฐานของเซลลูโลสจะถูกย่อยสลายได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้จะสังเกตได้ว่า ลักษณะของพีคที่แสดงถึงโครงสร้างผลึกของเซลลูโลสที่ผ่านการทรีท ด้วยพลาสมาโดยใช้ขั้ว อิเล็กโทรดทั้ง 3 ชนิด ยังไม่แสดงความแตกต่างกันอย่างชัดเจน เมื่อคำนวณร้อยละดัชนีความเป็นผลึก ของเซลลูโลสที่ผ่านการทรีทด้วยพลาสมาโดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดทั้ง 3 ชนิด เป็นเวลา 0-300 นาที ใน สารละลายกรดซัลฟิวริก 0.04 โมลาร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.8 พบว่าเซลลูโลสที่ไม่ผ่าน การทรีทด้วย พลาสมามีร้อยละดัชนีความเป็นผลึก 63 ในขณะที่เซลลูโลสที่ผ่านการทรีทด้วยพลาสมาที่ใช้ขั้ว ทังสเตนและทองแดง พบว่าร้อยละดัชนีความเป็นผลึกเพิ่มขึ้นโดยมีค่าประมาณ 75-79 ที่เวลา 60 นาที และค่อนข้างคงที่จนเวลาในการทรีทครบ 300 นาที ทั้งนี้ร้อยละดัชนีความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น เนื่องจากโครงสร้าง อสัณฐานของเซลลูโลสถูกทำลายด้วยการทรีทพลาสมา ทำให้ส่วนโครงสร้างของ เซลลูโลสส่วนใหญ่ที่คงอยู่เป็นโครงสร้างแบบผลึก ส่วนเซลลูโลสที่ผ่านการทรีทด้วยพลาสมาโดยใช้ เหล็กเป็นขั้วอิเล็กโทรด พบว่าร้อยละดัชนีความเป็นผลึกของเซลลูโลสที่เวลา 60 นาที มีค่าสูงสุด เท่ากับ 72 จากนั้นลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยมีค่าร้อยละดัชนีความเป็นผลึกประมาณ 48 เมื่อทรีทด้วย พลาสมาเป็นเวลา 180 นาที จากนั้นค่าร้อยละดัชนีความเป็นผลึกไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนจนถึง เวลา 300 นาที เมื่อเปรียบเทียบกับกรทรีทโดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดชนิดอื่น



รูปที่ 4. 8 ผลการวิเคราะห์ด้วย XRD ของเซลลูโลสในสารแขวนลอยเซลลูโลสที่ไม่ผ่านการทรีทและผ่านการ ทรีทด้วยพลาสมาในสารละลายกรดซัลฟิวริก 0.04 โมลาร์ โดยใช้ขั้วอิเล็กโทรด 3 ชนิด คือ ทังสแตน ทองแดง และเหล็ก ความถี่ไฟฟ้า 15 กิโลเฮิร์ตซ์ เป็นเวลา 300 นาที



รูปที่ 4. 9 ร้อยละดัชนีความเป็นผลึกของเซลลูโลสในสารแขวนลอยเซลลูโลสที่ไม่ผ่านการทรีทและผ่านการ ทรีทด้วยพลาสมาในสารละลายกรดซัลฟิวริก 0.04 โมลาร์ โดยใช้ขั้วอิเล็กโทรด 3 ชนิด คือ ทั้งสเต็ม ทองแดง และเหล็ก ความถี่ไฟฟ้า 15 กิโลเฮิร์ตซ์ เป็นเวลา 0-300 นาที

จากการวิเคราะห์ร้อยละดัชนีความเป็นผลึกของเซลลูโลสในสารแขวนลอยเซลลูโลสที่ไม่ผ่านการทรีท และผ่านการทรีทด้วยพลาสมา พบว่าเซลลูโลสที่ไม่ผ่านการทรีทด้วยพลาสมามีร้อยละความเป็นผลึกค่อนข้างสูง (โครงสร้างของเซลลูโลสประกอบด้วยโครงสร้างผลึกมากกว่าโครงสร้างอสัณฐาน) หลังจากเซลลูโลสผ่านการทรีทด้วยพลาสมาที่ใช้ขั้วทั้งสเต็มและทองแดงเป็นอิเล็กโทรด พบว่าร้อยละดัชนีความเป็นผลึกเพิ่มขึ้นเมื่อเข้าสู่เวลาที่ 60 และค่อนข้างคงที่จนถึงเวลาครบ 300 นาที ซึ่งมีค่าร้อยละดัชนีความเป็นผลึกสูงกว่าเซลลูโลสที่ไม่ผ่านการทรีทด้วยพลาสมา เนื่องจากโครงสร้างอสัณฐานของเซลลูโลสถูกทำลาย ทำให้เซลลูโลสมีเพียงโครงสร้างผลึกซึ่งมีความแข็งแรงกว่าอสัณฐาน สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ปริมาณของอนุมูลไฮดรอกซิลที่เกิดขึ้นระหว่างการทรีทสารแขวนลอยเซลลูโลสด้วยพลาสมา (รูปที่ 4.5) จะเห็นได้ว่าปริมาณอนุมูลไฮดรอกซิลที่เกิดขึ้นระหว่างการทรีทด้วย

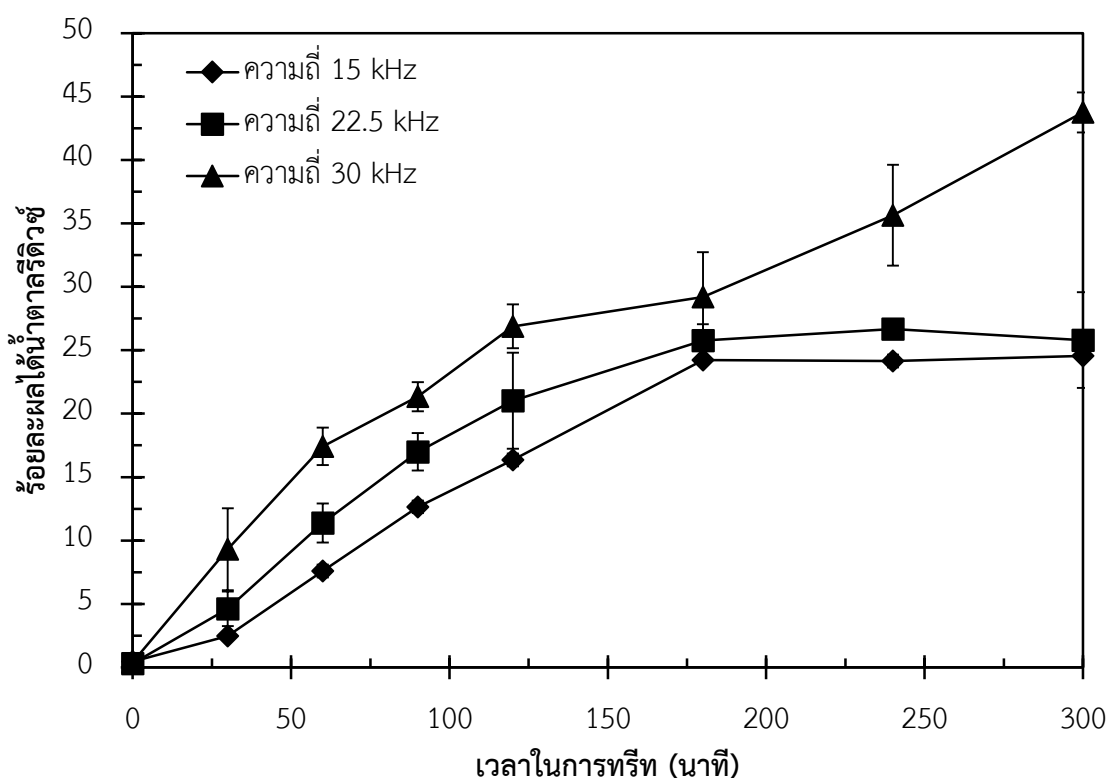
พลาสติกที่ใช้ขั้วทั้งสองและขั้วทองแดงมีน้อย ทำให้ ไม่เพียงพอต่อการเข้าทำลายโครงสร้างผลึกของ เซลลูโลสได้ เมื่อพิจารณากรณีที่ขั้วเหล็กเป็นขั้วอิเล็กโทรด พบว่าร้อยละนี้ความเป็นผลึกต่ำสุดเมื่อ เปรียบเทียบขั้วอิเล็กโทรดชนิดอื่น เนื่องจากสารแขวนลอยเซลลูโลสที่ผ่านการทรีทด้วยพลาสติกที่ใช้ ขั้วเหล็กสามารถสร้างอนุโมลไฮดรอกซิลในระบบได้มากกว่าขั้วทั้งสองและขั้วทองแดง ทำให้มีปริมาณ เพียงพอในการเข้าทำลายพันธะ β 1-4 ไกลโคซิดิกของเซลลูโลสซึ่งเป็นพันธะที่มีความแข็งแรง ส่งผล ให้เซลลูโลสถูกย่อยสลายได้ดีกว่าขั้วอิเล็กโทรดชนิดอื่น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Z. Wang และคณะ [14] ศึกษาการย่อยสลายเซลลูโลสด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมี ที่ดำเนินการโดยใช้ชนิดของขั้วอิเล็กโทรด คือ กราไฟต์และพอลิเตตระฟลูออโรเอทีลีน (PTFE) และเติม 2 - เอทิลแอนทราควิโนน (2- ethylanthraquinone : EAQ) ลงในสารละลายเพื่อช่วยในการเกิดปฏิกิริยาเฟนตัน (Fenton reaction) จากผลการตรวจวัดปริมาณ H_2O_2 ด้วยเทคนิค Molybdate โดยใช้เครื่องวัดการดูดกลืน แสง (UV-Vis spectroscopy) พบว่า อนุโมลไฮดรอกซิลที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาเฟนตันและการ เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในระบบ ทำให้ดีกรีแสดงความเป็นผลึกทั้งหมดของเซลลูโลส (Total degree of crystalline) ลดลงจาก 22,452 เป็น 15,272 เมื่อเปรียบเทียบกับเซลลูโลสที่ไม่ผ่านการ ย่อยสลาย จากการศึกษาผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นหลังผ่านการย่อยสลายเซลลูโลส พบว่า ผลได้ของน้ำตาล ที่ละลายน้ำและ 5-HMF มีปริมาณสูงสุด เท่ากับ 10.2% และ 5.6% ตามลำดับ

4.5 ผลของการเปลี่ยนแปลงความถี่ที่มีต่อร้อยละผลได้ของน้ำตาลรีดิวซ์

จากผลการวิเคราะห์ร้อยละผลได้ของน้ำตาลรีดิวซ์ที่เกิดจากสารแขวนลอยเซลลูโลส 1% โดย น้ำหนัก ในกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.04 โมลาร์ ที่ผ่านการทรีทด้วยพลาสติก โดยใช้ขั้วเหล็ก ความถี่ไฟฟ้า 15 กิโลเฮิร์ตซ์ เป็นเวลา 0-300 นาที พบว่ามีค่าร้อยละผลได้สูงสุด (รูปที่ 4.3) เมื่อ เปรียบเทียบกับกรณีที่ทรีทพลาสติกด้วยขั้วอิเล็กโทรดชนิดอื่น ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาผลของการเพิ่ม ความถี่พลาสติกที่มีต่อร้อยละผลได้ของน้ำตาลรีดิวซ์ โดยศึกษาที่ความถี่แตกต่างกัน 3 ค่า คือ 15 22.5 และ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ แสดงในรูปที่ 4.10

จากผลของร้อยละผลได้ของน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากสารแขวนลอยเซลลูโลส ที่ผ่านการทรีทด้วย พลาสติกที่ความถี่เพิ่มขึ้นในรูป 4.9 พบว่าสารแขวนลอยเซลลูโลสที่ทรีทด้วยพลาสติกความถี่ 22.5 กิโลเฮิร์ตซ์ มีร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดตั้งแต่ 30 นาที จนมีร้อยละผลได้สูงสุด เท่ากับ 28 ที่เวลา 180 นาที และค่อนข้างคงที่จนครบ 300 นาที ในขณะที่เมื่อเปรียบเทียบกับสาร

แขวนลอยเซลล์โลสที่ทรีทด้วยพลาสมาความถี่ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ พบว่าร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวิซ์เพิ่มขึ้นตั้งแต่เริ่มการทรีท (เวลา 0 นาที) จนมีค่าร้อยละผลได้สูงสุดที่เวลา 300 นาที เท่ากับ 43 ซึ่งมีค่าสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับสารแขวนลอยเซลล์โลสที่ทรีทด้วยความถี่ต่ำกว่า (ความถี่ 15 และ 22.5 กิโลเฮิร์ตซ์)



รูปที่ 4. 10 ร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวิซ์ที่เกิดจากสารแขวนลอยเซลล์โลส 1% โดยน้ำหนัก ในสารละลายกรดซัลฟิวริก 0.04 โมลาร์ ซึ่งผ่านการทรีทด้วยพลาสมาวิญญากาศของเหลว ความถี่ไฟฟ้า 15 22.5 และ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ เป็นเวลา 0-300 นาที โดยใช้เหล็กเป็นขั้วอิเล็กโทรด

จากการวิเคราะห์ผลของร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวิซ์จะเห็นได้ว่า สารแขวนลอยเซลล์โลสที่ผ่านการทรีทด้วยพลาสมาเมื่อเพิ่มความถี่จาก 15 กิโลเฮิร์ตซ์ เป็นความถี่ 22.5 กิโลเฮิร์ตซ์ พบว่าร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวิซ์เพิ่มมากกว่ากรณีที่ใช้พลาสมาความถี่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งเริ่มต้นเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดตั้งแต่นาทีที่ 30 จนถึงนาทีที่ 180 จากนั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนจนถึงนาทีที่ 300 เนื่องจากความถี่ของพลาสมาที่สูงขึ้นจะทำให้พลังงานภายในระบบสูงขึ้น ส่งผลให้พลังงานที่เกิดขึ้นกระตุ้นให้สารละลายแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระได้มากยิ่งขึ้น อนุมูลอิสระจะทำปฏิกิริยาส่งผลให้เกิดอนุมูลไฮดรอก

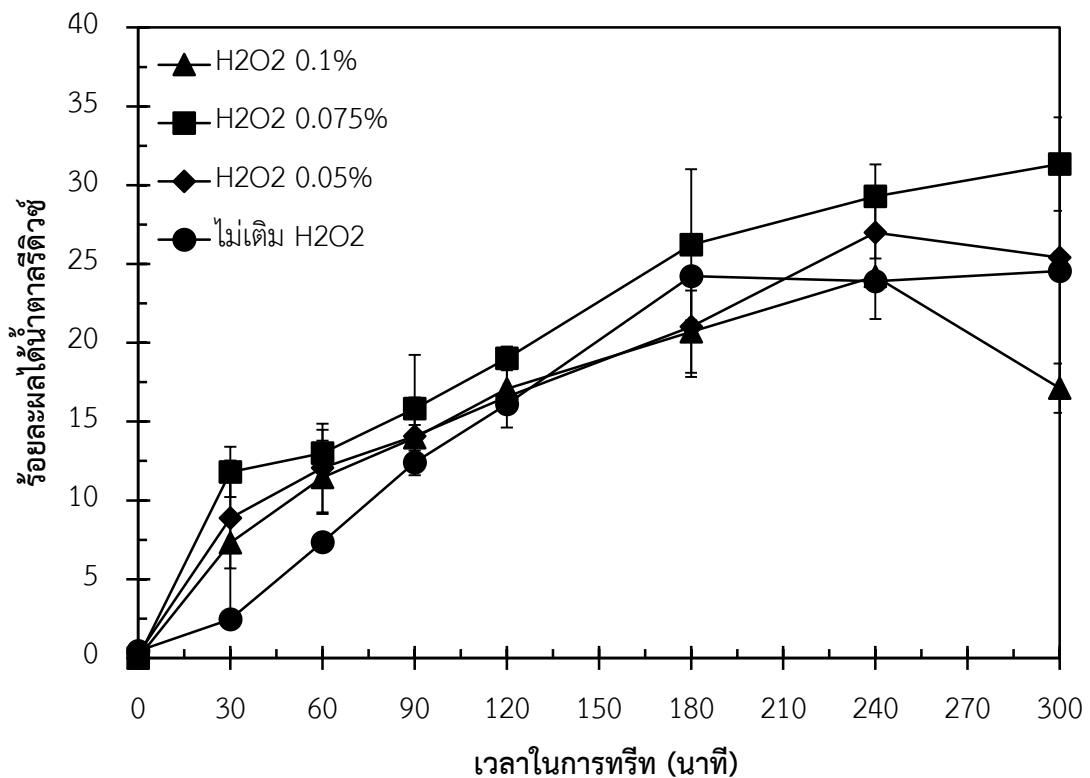
ซิลซึ่งสามารถเข้าย่อยสลายเซลลูโลสให้เป็นน้ำตาลรีดิวซ์ได้ จะเห็นได้ว่าช่วงเวลาในการทรีทที่มีค่าร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์ค่อนข้างคงที่ อาจจะเป็นผลมาจากพลังงานที่เกิดในระบบไม่เพียงพอต่อการกระตุ้นให้สารละลายแตกตัวเป็นอนุโมลอิสระได้ทั้งหมด ในขณะที่สารแขวนลอยเซลลูโลสที่ทรีทด้วยพลาสติกที่เพิ่มความถี่เป็น 30 กิโลเฮิร์ตซ์ พบว่าร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนและต่อเนื่องตั้งแต่เวลา 0 นาที จนถึง 300 นาที โดยมีค่าร้อยละผลได้สูงสุด 43 ซึ่งสูงกว่าร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์ที่เกิดจากสารแขวนลอยเซลลูโลสที่ทรีทด้วยพลาสติกความถี่ 15 และ 22.5 กิโลเฮิร์ตซ์ เนื่องจากพลังงานที่เกิดขึ้นในระบบมีมากกว่า ส่งผลให้พลังงานที่เกิดขึ้นกระตุ้นให้สารละลายแตกตัวเป็นอนุโมลอิสระได้มาก อาจเป็นผลให้เกิดการย่อยสลายเซลลูโลสให้เป็นน้ำตาลรีดิวซ์ได้ดีกว่าจากผลการวิเคราะห์ดังกล่าวจึงคาดว่า ถ้าทำการเพิ่มความถี่ให้ระบบพลาสติกมากกว่า 30 กิโลเฮิร์ตซ์ ในระหว่างการทรีทสารแขวนลอยเซลลูโลส อาจจะส่งผลให้มีร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มมากขึ้น แต่เนื่องจากอุปกรณ์กำเนิดพลาสติกที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีข้อจำกัดคือ ความถี่ต่ำสุดที่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์ และสูงสุดที่ 30 กิโลเฮิร์ตซ์

4.6 ผลของการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในสารแขวนลอยเซลลูโลสที่มีต่อร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์

จากผลการวิเคราะห์ร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์ที่เกิดจากสารแขวนลอยเซลลูโลส 1% โดยน้ำหนัก ในกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.04 โมลาร์ ที่ผ่านการทรีทด้วยพลาสติกโดยใช้ขั้วเหล็ก ความถี่ไฟฟ้า 15 กิโลเฮิร์ตซ์ เป็นเวลา 0-300 นาที (จากรูปที่ 4.3) พบว่าค่าร้อยละผลได้สูงสุด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากในระหว่างการทรีทสารแขวนลอยเซลลูโลสด้วยพลาสติกที่ใช้เหล็กเป็นขั้วอิเล็กโทรด มีการเกิดปฏิกิริยาเฟนทอน (จากสมการที่ 4.4 และ 4.5) ซึ่งส่งผลให้เกิดอนุมูลไฮดรอกซิลที่สามารถย่อยสลายเซลลูโลสตั้งได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 4.2 ดังนั้นจึงได้ศึกษาผลของสารแขวนลอยเซลลูโลสที่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 0.1% 0.05% และ 0.075% โดยปริมาตร เปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

จากผลร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์ของสารแขวนลอยเซลลูโลสที่ผ่านการทรีทด้วยพลาสติก โดยทำการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ แสดงในรูปที่ 4.11 พบว่าร้อยละผลได้ในกรณีที่มีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนในช่วงเวลาเริ่มต้นของการทรีทเทียบกับกรณีที่ไม่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับสารแขวนลอยเซลลูโลสที่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ปริมาณ 0.1% 0.075% และ 0.05% โดยปริมาตร ที่ผ่านการทรีทด้วยพลาสติก พบว่าการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในสารแขวนลอย

เซลลูโลสทั้ง 3 ปริมาณ มีร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนในช่วงเวลา 0-60 นาที ภายหลังจากที่ 90 มีแนวโน้มผลได้น้ำตาลรีดิวซ์ที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งจะเห็นได้ว่ากรณีที่ไม่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ปริมาณ 0.075% โดยปริมาตร มีร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์สูงสุดประมาณ 32 ที่เวลา 300 นาที ซึ่งมีค่าสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีอื่น เมื่อพิจารณาสารแขวนลอยเซลลูโลสที่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ปริมาณ 0.05% โดยปริมาตร พบว่ามีร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์สูงสุดประมาณ 27 ที่เวลา 240 นาที จากนั้นผลได้ลดลงจนมีค่าเท่ากับกรณีที่ไม่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่เวลา 300 นาที และที่น่าสังเกตคือ สารแขวนลอยเซลลูโลสที่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ปริมาณ 0.1% โดยปริมาตร มีร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์ลดลงต่ำกว่ากรณีที่ไม่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เวลา 300 นาที โดยมีค่าร้อยละผลได้ประมาณ 17



รูปที่ 4.11 ร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์ที่เกิดจากสารแขวนลอยเซลลูโลส 1% โดยน้ำหนัก ในสารละลายกรดซัลฟิวริก 0.04 โมลาร์ ซึ่งผ่านการทรีทด้วยพลาสมาวิทยุภาคของเหลว ความถี่ไฟฟ้า 15 กิโลเฮิร์ตซ์ เป็นเวลา 0-300 นาที ใช้เหล็กเป็นขั้วอิเล็กโทรด โดยมีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ปริมาณ 0.1% 0.05% และ 0.075% โดยปริมาตร เปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

จากผลการวิเคราะห์สารแขวนลอยเซลล์ูโลสที่มีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ มีร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์สูงกว่ากรณีที่ไม่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในช่วงเวลาเริ่มต้นของการทรีทด้วยพลาสมา แสดงให้เห็นว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เติมลงในระบบมีส่วนช่วยให้เกิดปฏิกิริยาเฟนตอนเพิ่มขึ้น ซึ่งปฏิกิริยาเฟนตอนจะทำให้เกิดอนุมูลไฮดรอกซิล ทำให้สามารถย่อยสลายเซลล์ูโลสให้เป็นน้ำตาลรีดิวซ์ได้มาก เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกรณีสารแขวนลอยเซลล์ูโลสที่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในปริมาณต่างๆ จะเห็นได้ว่ากรณีที่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ปริมาณ 0.1% โดยปริมาตรที่เวลา 300 นาที มีร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์ต่ำกว่ากรณีที่ไม่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ทั้งนี้อาจเนื่องจากปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีในระบบมากเกินไป ทำให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ไม่เกิดปฏิกิริยาขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาเฟนตอนในระบบ เมื่อพิจารณากรณีที่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ปริมาณ 0.05% และ 0.075% โดยปริมาตร จะเห็นได้ว่ามีค่าร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์ไม่ต่างกันมาก ซึ่งการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ปริมาณ 0.075% โดยปริมาตร ในสารแขวนลอยเซลล์ูโลสจะส่งผลให้มีค่าร้อยละได้น้ำตาลรีดิวซ์สูงสุด ที่เวลาในการทรีท 300 นาที ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เติมในระบบเพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาเฟนตอน แสดงให้เห็นว่าการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ปริมาณ 0.075% โดยปริมาตร ในสารแขวนลอยเซลล์ูโลสเป็นปริมาณที่เหมาะสม ซึ่งจะสามารถช่วยเพิ่มการย่อยสลายเซลล์ูโลสให้เป็นน้ำตาลรีดิวซ์ได้มากขึ้นในกระบวนการทรีทด้วยพลาสมา

จากผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลทั้งหมด แสดงให้เห็นว่าการย่อยสลายสารแขวนลอยเซลล์ูโลสให้เป็นน้ำตาลรีดิวซ์ด้วยพลาสมาวิธภาคของเหลวมีปัจจัยที่ส่งผลต่อร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์ คือ ชนิดของตัวทำละลายในสารแขวนลอยเซลล์ูโลส ชนิดของขั้วอิเล็กโทรดที่ใช้ในการทรีทสารแขวนลอยเซลล์ูโลสด้วยพลาสมา ความถี่ของพลาสมาที่ใช้ระหว่างการทรีท และการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ผลจากการศึกษาพบว่าสภาวะที่ดีที่สุดที่ส่งผลให้มีร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์สูงสุด คือ สารแขวนลอยเซลล์ูโลสที่ใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวทำละลาย และมีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.075% โดยปริมาตร ใช้เหล็กเป็นขั้วอิเล็กโทรด และความถี่ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ ในการทรีทด้วยพลาสมา ซึ่งสภาวะดังกล่าวทำให้ระบบเกิดการสีกกร่อนของขั้วเหล็กและเกิดปฏิกิริยาเฟนตอนได้มาก ส่งผลให้ปริมาณอนุมูลไฮดรอกซิลในระบบสูงจึงย่อยสลายเซลล์ูโลสได้ดี

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการย่อยสลายเซลลูโลสให้เป็นน้ำตาลรีดิวซ์ด้วยกระบวนการพลาสมาวิภาคของเหลว ซึ่งทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์ที่เกิดขึ้นระหว่างการทรินสารแขวนลอยเซลลูโลส 1% โดยน้ำหนัก ด้วยพลาสมา เมื่อทำการวิเคราะห์ผลของชนิดตัวทำละลายในสารแขวนลอยเซลลูโลสที่มีผลต่อร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์ 4 ชนิด ได้แก่ น้ำกลั่น กรดฟอสฟอริก ความเข้มข้น 0.04 โมลาร์ กรดไนตริกความเข้มข้น 0.04 โมลาร์ และกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.04 โมลาร์ พบว่าสารแขวนลอยเซลลูโลสใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวทำละลายมีร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์สูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับสารละลายชนิดอื่น ดังนั้นจึงเลือกกรดซัลฟิวริกเป็นตัวทำละลายในสารแขวนลอยเซลลูโลส เพื่อศึกษาชนิดของขั้วอิเล็กโทรดที่ใช้ในการทรินสารแขวนลอยเซลลูโลสด้วยพลาสมาที่ส่งผลต่อร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์ ชนิดของขั้วอิเล็กโทรดที่ใช้ในการวิเคราะห์ ได้แก่ ทังสเตน ทองแดง และเหล็ก พบว่าร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์สูงสุดเมื่อใช้เหล็กเป็นขั้วอิเล็กโทรดในการทรินสารแขวนลอยเซลลูโลสด้วยพลาสมา ซึ่งสอดคล้องกับผลของการวิเคราะห์ความเข้มข้นอนุมูลไฮดรอกซิลที่เกิดขึ้นระหว่างการทรินสารแขวนลอยเซลลูโลสด้วยพลาสมา โดยใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวทำละลาย และใช้เหล็กเป็นขั้วอิเล็กโทรด พบว่ามีอนุมูลไฮดรอกซิลเกิดขึ้นในระบบสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ใช้ขั้วอิเล็กโทรดชนิดอื่น

ในระหว่างการทรินสารแขวนลอยเซลลูโลสด้วยพลาสมาโดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดทองแดงและเหล็ก ซึ่งเกิดการสีกกร่อนของขั้วอิเล็กโทรดเป็นอนุภาคขนาดเล็กกระจายตัวอยู่ในสารแขวนลอยเซลลูโลสที่ถูกปั่นกววนตลอดเวลาในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมา จากการศึกษาลักษณะสัณฐานของอนุภาคที่สีกกร่อนจากขั้วอิเล็กโทรดทั้งสอง พบว่าอนุภาคที่สีกกร่อนออกจากขั้วเหล็กและทองแดงมีขนาดเล็กมาก จึงคาดว่าเกิดการกระจายตัวของอนุภาคอย่างสม่ำเสมอในระหว่างที่ถูกปั่นกววนในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมา ทำให้เกิดปฏิกิริยาเฟนตอนระหว่างผิวสัมผัสของอนุภาคโลหะและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ส่งผลให้เกิดอนุมูลไฮดรอกซิลในระบบเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาในส่วนของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกของเซลลูโลสที่ผ่านการทรินด้วยพลาสมา พบว่าเซลลูโลสที่ผ่านการทรินด้วยพลาสมาที่ใช้เหล็กเป็นขั้วอิเล็กโทรด มีร้อยละดัชนีความเป็นผลึกลดลงจาก 63 เหลือ 48 ซึ่งลดลงต่ำสุดเมื่อเปรียบเทียบกับ

กับข้อผิดพลาดชนิดอื่น เนื่องจากกรณีเซลล์โลสที่ถูกทรีทด้วยพลาสติกที่ใช้ขั้วเหล็ก ทำให้เกิดอนุมูลไฮดรอกซิลในระบบมากกว่าจึงสามารถเข้าทำลายโครงสร้างผลึกของเซลล์โลส ส่งผลให้เกิดการย่อยสลายเซลล์โลสได้ดี

จากการศึกษาผลของชนิดของตัวทำละลายและชนิดของขั้วอิเล็กโทรดที่ใช้ในการทรีทสารแขวนลอยเซลล์โลสด้วยพลาสติก สรุปได้ว่ากรณีที่ใช้ตัวทำละลายกรดซัลฟิวริกและเหล็กเป็นขั้วอิเล็กโทรดมีความเหมาะสมในการนำมาใช้เพื่อย่อยสลายเซลล์โลสที่สุด จึงได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความถี่ที่ให้ในระบบระหว่างการทรีทสารแขวนลอยเซลล์โลสด้วยพลาสติกที่มีผลต่อร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์ โดยทำการเพิ่มความถี่ให้แก่ระบบ 3 ค่า ได้แก่ 15 22.5 และ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ พบว่ากรณีที่ความถี่ที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งกรณีที่ใช้ความถี่ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ ส่งผลให้มีร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์สูงสุด เนื่องจากการเพิ่มความถี่ให้ระบบ ทำให้พลังงานพลาสติกเพิ่มขึ้น ส่งผลให้สารละลายภายในและอนุภาคที่เกิดจากเกิดการสีกกร่อนของขั้วอิเล็กโทรดแตกตัวให้อนุมูลไฮดรอกซิลในระบบเพิ่มขึ้น ทำให้เซลล์โลสย่อยสลายเป็นน้ำตาลรีดิวซ์ได้ดียิ่งขึ้น ผลการศึกษาการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในสารแขวนลอยเซลล์โลสก่อนนำไปทรีทด้วยพลาสติก โดยเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ ได้แก่ 0.05% 0.075% และ 0.1% โดยปริมาตร เปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่าสารแขวนลอยเซลล์โลสที่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ปริมาณ 0.075% โดยปริมาตร มีร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์สูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ปริมาณอื่น เนื่องจากปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เติมในระบบเพียงพอและเหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาฟenton ทำให้เกิดอนุมูลไฮดรอกซิลมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการย่อยสลายเซลล์โลสให้เป็นน้ำตาลรีดิวซ์ได้ดี

จากผลการวิจัยสามารถสรุปได้ว่าการเตรียมน้ำตาลรีดิวซ์จากเซลล์โลสด้วยพลาสติกวัสดุภาคของเหลวโดยใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวทำละลาย เหล็กเป็นขั้วอิเล็กโทรด ความถี่ของพลาสติก 30 กิโลเฮิร์ตซ์ และเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ปริมาณ 0.075% โดยปริมาตร ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่ส่งเสริมให้เกิดการย่อยสลายเซลล์โลสให้เป็นน้ำตาลรีดิวซ์ได้ดี ทำให้อัตราผลได้น้ำตาลรีดิวซ์สูงที่สุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. งานวิจัยนี้เบื้องต้นได้ทำการศึกษากิจกรรมของเซลล์ฟิวรีกที่ความเข้มข้น 3 ค่า ได้แก่ 0.02 0.04 และ 0.06 M พบว่าที่ความเข้มข้นมากกว่า 0.06 M ทำให้ขั้วอิเล็กโทรดที่ใช้ในการทรีทสารแขวนลอย เซลลูโลสมีความร้อนสูง ไม่สามารถทำการทรีทได้ ดังนั้นจึงควรทำการศึกษาดั้วทำลายกรดฟอสฟอริกและกรดไนตริกที่ความเข้มข้นต่างๆ เพิ่มเติม เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของกรดที่มีผลต่อร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์

2. ควรทำการวิเคราะห์ชนิดของน้ำตาลรีดิวซ์ที่เกิดขึ้นในสารแขวนลอยเซลลูโลสที่ผ่านการทรีทด้วยพลาสมาเพิ่มเติมด้วยเครื่อง High Performance Liquid Chromatography (HPLC) เพื่อทราบว่าพลาสมาสามารถย่อยสลายเซลลูโลสให้เป็นน้ำตาลรีดิวซ์ชนิดใด

3. ควรศึกษาวิธีการวิเคราะห์หาสารปนเปื้อนในสารตัวอย่างที่เกิดขึ้นหลังการทรีทสารแขวนลอยเซลลูโลสด้วยพลาสมา ซึ่งอาจเกิดจากการสีกกร้อนของขั้วอิเล็กโทรด เพื่อตรวจสอบความบริสุทธิ์ของน้ำตาลรีดิวซ์ที่จะนำไปใช้ในการผลิตไบโอเอทานอลต่อไป

รายการอ้างอิง

1. Ni, J., et al., *A novel facile two-step method for producing glucose from cellulose*. Bioresour Technol, 2013. **137**: p. 106-10.
2. Badiei, M., et al., *Comparison of Chemical Pretreatment Methods for Cellulosic Biomass*. APCBEE Procedia, 2014. **9**: p. 170-174.
3. S. Ye, C.J., *Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production*. bioresource Technology, 2002. **83**: p. 1-11.
4. Baccaro, S., et al., *Structure modifications and interaction with moisture in γ -irradiated pure cellulose by thermal analysis and infrared spectroscopy*. Polymer Degradation and Stability, 2013. **98**(10): p. 2005-2010.
5. Zhang, J., et al., *Dissolution of microcrystalline cellulose in phosphoric acid--molecular changes and kinetics*. Molecules, 2009. **14**(12): p. 5027-41.
6. Wu, Q.Q., et al., *Optimization and kinetic analysis on the sulfuric acid - Catalyzed depolymerization of wheat straw*. Carbohydr Polym, 2015. **129**: p. 79-86.
7. Q. Minxie, S.S., *Structure of a pancreatic amylase bound to a substrate analogue at 2.03 Å resolution*. 1997: p. 2285-2296.
8. Peng, H., et al., *A novel combined pretreatment of ball milling and microwave irradiation for enhancing enzymatic hydrolysis of microcrystalline cellulose*. Bioresour Technol, 2013. **130**: p. 81-7.
9. Takai, O., *Solution plasma processing (SPP)*. Pure and Applied Chemistry, 2008. **80**(9).
10. Baroch, P., et al., *Bipolar pulsed electrical discharge for decomposition of organic compounds in water*. Journal of Electrostatics, 2008. **66**(5-6): p. 294-299.
11. Miller, G., *Use of Dinitrosalicylic Acid Reagent for Determination of Reducing Sugar*. Analytical Chemistry, 1959.

12. Yang, C., et al., *Effect and aftereffect of gamma radiation pretreatment on enzymatic hydrolysis of wheat straw*. *Bioresour Technol*, 2008. **99**(14): p. 6240-5.
13. Zhang, J., et al., *Effect of phosphoric acid pretreatment on enzymatic hydrolysis of microcrystalline cellulose*. *Biotechnol Adv*, 2010. **28**(5): p. 613-9.
14. Wang, Z.-X., et al., *Electro-Fenton degradation of cellulose using graphite/PTFE electrodes modified by 2-ethylantraquinone*. *Carbohydrate Polymers*, 2011. **86**(4): p. 1807-1813.
15. Prasertsung, I., S. Damrongsakkul, and N. Saito, *Degradation of β -chitosan by solution plasma process (SPP)*. *Polymer Degradation and Stability*, 2013. **98**(10): p. 2089-2093.
16. Pornsunthorntawe, O., et al., *Depolymerization of chitosan-metal complexes via a solution plasma technique*. *Carbohydr Polym*, 2014. **102**: p. 504-12.
17. น้ำตาลกลูโคส. 2014; Available from: www.chemeddl.org.
18. โครงสร้างเซลลูโลส. 2014; Available from: www.foodnetworksolution.com.
19. เซลลูโลส1. 2014; Available from: www.artquill.blogspot.com.
20. E. Peraltaa, G.R., *Hydroxyl radicals quantification by UV spectrophotometry*. *Electrochimica Acta*, 2014. **129**: p. 137-141.
21. อมรสิทธิ์, และ., หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ เล่ม 1. 2535: พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพมหานคร. CHULALONGKORN UNIVERSITY
22. การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์. 2014; Available from: <http://www.kmitl.ac.th>.
23. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด. 2014; Available from: www.mfu.ac.th.
24. Settle, F., *Handbook of Instrumental techniques for analytical chemistry*.: *Prentice-Hall International*. 1997: United States of America
25. Tantiplapol, T., et al., *Influences of solution plasma conditions on degradation rate and properties of chitosan*. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2015. **32**: p. 116-120.
26. อมรสิทธิ์, และ., หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ เล่ม 1. 2535. พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพมหานคร.

27. Kupiainen, L., J. Ahola, and J. Tanskanen, *Distinct Effect of Formic and Sulfuric Acids on Cellulose Hydrolysis at High Temperature*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2012. **51**(8): p. 3295-3300.
28. DAVIS, G.R.F., *Yagoda papers: A permanent record of Benedict's test for reducing sugars*. Clilt. Chim. Acta, 1963. **8**: p. 634-635.
29. Tehrani-Bagha, A.R., M. Gharagozlou, and F. Emami, *Catalytic wet peroxide oxidation of a reactive dye by magnetic copper ferrite nanoparticles*. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2016. **4**(2): p. 1530-1536.
30. Zhang, R., et al., *Modeling and optimization of dilute nitric acid hydrolysis on corn stover*. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 2011. **86**(2): p. 306-314.



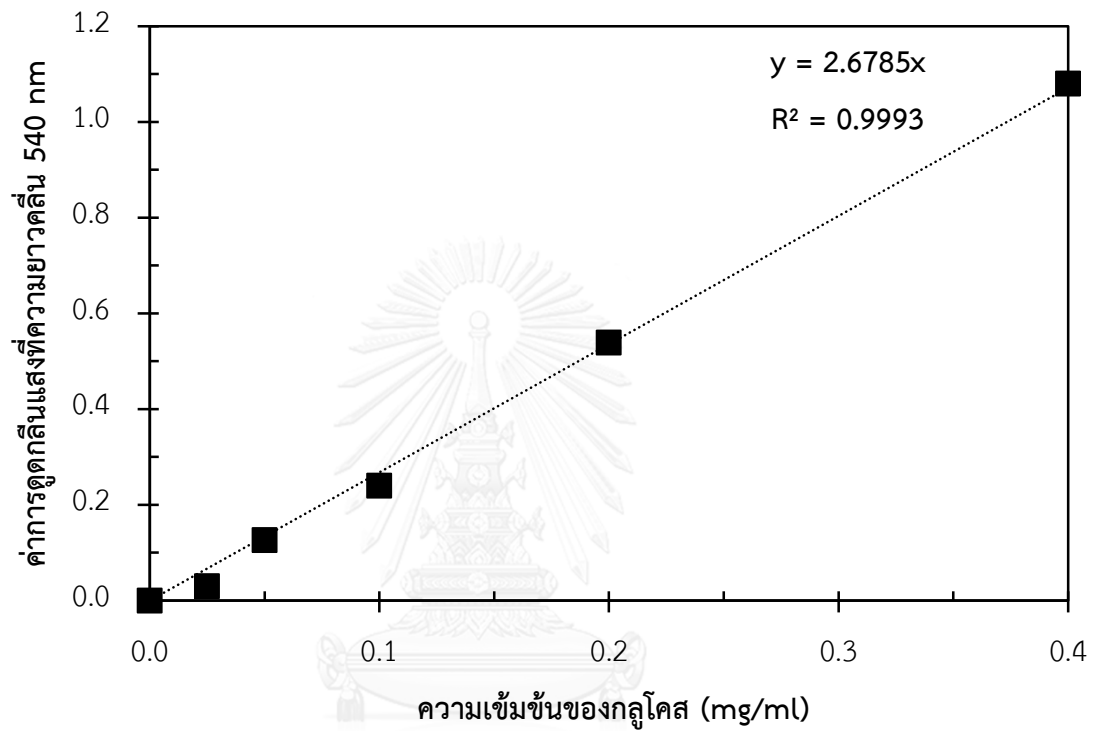
ภาคผนวก



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก.

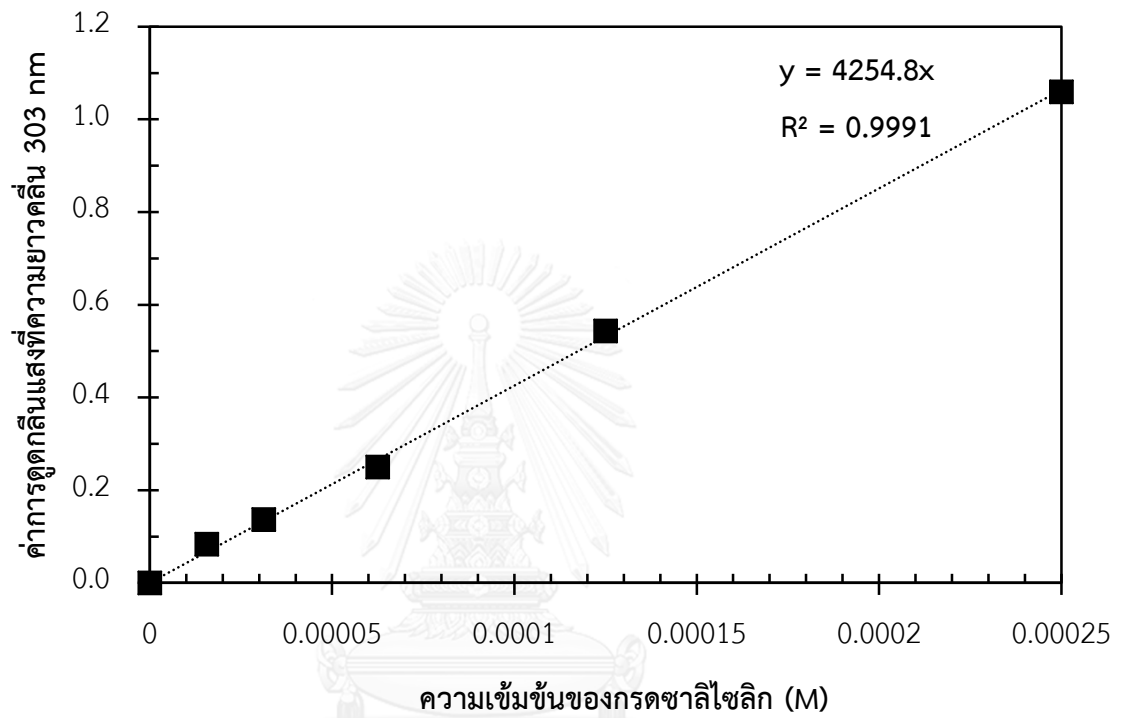
กราฟมาตรฐานของการวิเคราะห์น้ำตาลรีดิวซ์โดยวิธี DNS



รูปที่ ก.1 กราฟมาตรฐานของการวิเคราะห์น้ำตาลรีดิวซ์โดยวิธี DNS

ภาคผนวก ข.

กราฟมาตรฐานของการวิเคราะห์ปริมาณอนุมลไฮดรอกซิลโดยใช้กรดซาลีไซลิก



รูปที่ ข.1 กราฟมาตรฐานของการวิเคราะห์ปริมาณอนุมลไฮดรอกซิลโดยใช้กรดซาลีไซลิก

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวภัทรพร ชูตินेत्र เกิดเมื่อวันที่ 11 สิงหาคม พ.ศ. 2533 ที่จังหวัดอุบลราชธานี เข้าศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาที่โรงเรียนเบ็ญจะมะมหาราช สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ในปี การศึกษา 2555 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2556

การเผยแพร่ผลงานวิจัยในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

P. Chutinate, I. Prasertsung, N. Saito, and S. Damrongsakkul, Conversion of Cellulose to Reducing Sugar by Solution Plasma Process (SPP), Oral Presentation, The 5 th International Conference on Thai Institute of Chemical Engineering and Applied Chemistry Conference (ITICChE 2015), Dusit Thani, Pattaya, Thailand, 8-10 November 2015