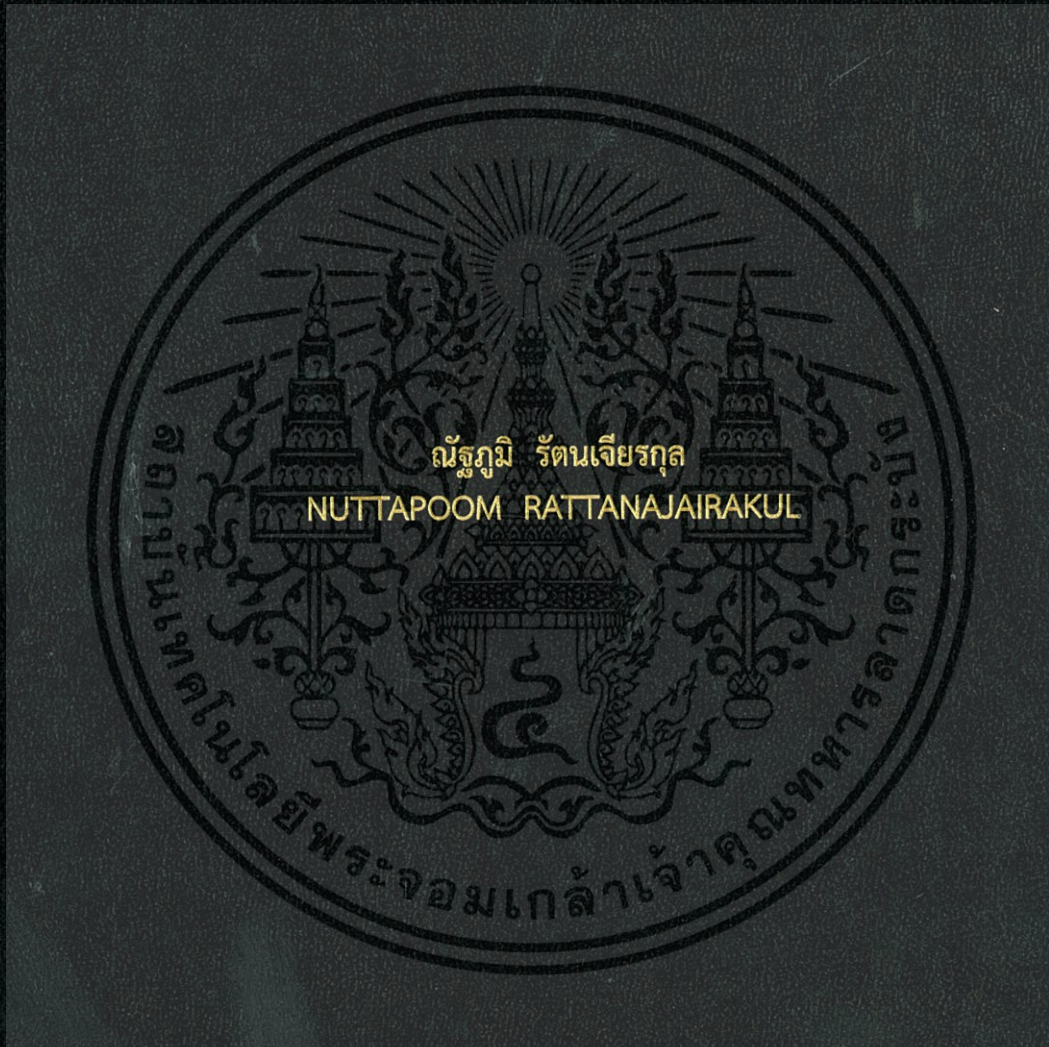


การเปลี่ยนกลูโคสเป็นกรดแลคติกในสารละลายด่าง

A CONVERSION OF GLUCOSE TO LACTIC ACID IN ALKALINE SOLUTION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

KMITL-2016-EN-M-220-199

การเปลี่ยนกลูโคสเป็นกรดแลคติกในสารละลายต่าง

A CONVERSION OF GLUCOSE TO LACTIC ACID IN ALKALINE SOLUTION



T148264



b. 00265345  
l.

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 148264  
รับเดือนปี 18 ต.ค. 2560

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

KMITL-2016-EN-M-220-199

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# A CONVERSION OF GLUCOSE TO LACTIC ACID IN ALKALINE SOLUTION



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2016

KMITL-2016-EN-M-220-199

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2016

FACULTY OF ENGINEERING





**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การเปลี่ยนกลูโคสเป็นกรดแลคติกในสารละลายต่าง  
Thesis Title A Conversion of Glucose to Lactic Acid in Alkaline Solution  
นักศึกษา นายณัฐภูมิ รัตนเจียรกุล  
รหัสประจำตัว 57601350  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ประกอบ กิจไชยา  
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2016-EN-M-220-199

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.สมหมาย	พิวสอาด	
ผศ.ดร.อภิรักษ์	นัมคณิสร์ณ	
ผศ.ดร.สันติ	วัฒนานุสรณ์	
ผศ.ดร.วัลย์รัตน์	จันทร์อัมพร	วัลย์รัตน์
รศ.ดร.ประกอบ	กิจไชยา	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพฤหัสบดีที่ 8 ธันวาคม พ.ศ. 2559 เวลา 10.00-12.00 น.  
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 4

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
วันที่ 8 ธันวาคม พ.ศ. 2559  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเปลี่ยนกลูโคสเป็นกรดแลคติกในสารละลายต่าง
นักศึกษา	นายณัฐภูมิ รัตนเจียรกุล
รหัสประจำตัว	57601350
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. ประกอบ กิจไชยา

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงกลูโคสเป็นกรดแลคติกในสารละลายต่าง ภายใต้ความดันบรรยากาศในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะและแบบกึ่งกะ เพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆที่ส่งผลต่อการสังเคราะห์กรดแลคติก โดยทำการทดสอบปัจจัยดังต่อไปนี้ (1) ผลของชนิดต่าง (2) ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (3) ปริมาณน้ำตาลกลูโคสเริ่มต้น (4) อัตราการป้อนสารละลายกลูโคส (5) อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา (6) ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะ ซิงค์ออกไซด์ และ (7) ผลของเกลือโซเดียมซัลไฟต์ พบว่าการควบคุมความเข้มข้นของสารละลายกลูโคสในระบบให้ต่ำ โดยการค่อยๆป้อนสารละลายน้ำตาลกลูโคส ความเข้มข้นต่ำ และ ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สูง ที่อุณหภูมิ  $50^{\circ}\text{C}$  เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์กรดแลคติกให้ได้ค่าผลได้สูง โดยสภาวะดังกล่าวคือ ป้อนสารละลายกลูโคสเข้มข้นร้อยละ 16.7%โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ด้วยอัตราการไหล 0.1 มิลลิลิตรต่ออนาที เข้าทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 3.25 โมลต่อลิตร เป็นเวลา 22 ชั่วโมง ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งกะได้ค่าผลได้กรดแลคติก 53%

Thesis	A CONVERSION OF GLUCOSE TO LACTIC ACID IN ALKALINE SOLUTION
Student	Mr.Nuttapoom Rattanajairakul
Student ID.	57601350
Degree	Master of Engineering
Program	Chemical Engineering
Year	2016
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Prakob Kitchaiya

### ABSTRACT

A conversion of glucose to lactic acid in alkaline solutions under atmospheric condition in batch and semi-batch reactors was studied. Factors that affect lactic acid synthesis, e.g. types of alkaline, glucose and base concentrations, feed rate of glucose solution, reaction temperature, presence of zinc oxide catalyst and sodium sulfate salt, were investigated. The optimum synthesis condition for a high lactic acid yield is keeping a low concentration of glucose in the system by gradually feed glucose solution into the high concentration of sodium hydroxide at 50°C. That condition was feeding 16.7%w/v glucose solution at the rate of 0.1 mL/min into the reactor filled with 3.25 molar sodium hydroxide solutions for 22 hours reaction time in the semi-batch reactor. It produced lactic acid yield for 53%.

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว (Monosaccharide).....	5
2.1.1 การเรียกชื่อของมอนอแซ็กคาไรด์.....	5
2.1.2 สมบัติทางกายภาพของมอนอแซ็กคาไรด์.....	7
2.1.2.1 โครงสร้าง (Structure).....	7
2.1.2.2 ไอโซเมอริซึม (Isomerism).....	8
2.1.2.3 อีพิเมอร์ (Epimer).....	9
2.1.3 การเกิดปฏิกิริยาของกลูโคส.....	10
2.1.3.1 การเกิดปฏิกิริยากับกรด.....	10
2.1.3.2 การเกิดปฏิกิริยากับด่าง.....	10
2.1.3.2.1 การเกิดกรดแซคคาลินิก (Saccharinic acid).....	13
2.1.3.2.2 ปฏิกิริยาคาลาเมลไรเซชัน (Caramelisation).....	14
2.1.3.4 ปฏิกิริยาโทโมเมโรเซชัน.....	15

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.1.3.5 ปฏิกริยาออกซิเดชัน.....	15
2.2 กรดแลคติก (Lactic acid) .....	16
2. 2.1 การสังเคราะห์กรดแลคติก.....	17
2.2.1.1 การสังเคราะห์กรดแลคติกทางเคมี.....	17
2.2.1.2 การย่อน้ำตาลเป็นกรดแลคติกโดยการหมัก.....	18
2.2.2 การทำให้กรดแลคติกบริสุทธิ์ .....	19
2.2.2.1 การแยกโดยการกลั่น.....	19
2.2.2.2 การแยกด้วยไฟฟ้าเคมี (Electro dialysis).....	19
2.3 การนำกรดแลคติกไปใช้ประโยชน์.....	22
2.3.1 อุตสาหกรรมอาหาร.....	22
2.3.2 อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง.....	22
2.3.3 อุตสาหกรรมอื่นๆ .....	22
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	23
บทที่ 3 การทดลอง.....	31
3.1 การทดลองเปลี่ยนแปลงกลูโคสเป็นกรดแลคติกและกรดอินทรีย์อื่นๆ.....	31
3.2 การวิเคราะห์น้ำตาลกลูโคสที่เหลืออยู่และผลิตภัณฑ์ กรดอินทรีย์อื่นๆ ที่เกิดขึ้น .....	33
3.2.1 การวิเคราะห์น้ำตาลกลูโคส .....	33
3.2.2 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์กรดอินทรีย์ที่เกิดขึ้น .....	37
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	41
4.1 ผลของชนิดต่าง.....	41
4.2 ผลของความเข้มข้นต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	43
4.3 ผลของปริมาณกลูโคสเริ่มต้น.....	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา เว้นแต่ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4 ผลของอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา .....	45
4.5 ผลของอัตราการป้อนสารละลายกลูโคส .....	46
4.6 ผลของเกลือโซเดียมซัลไฟต์.....	50
4.7 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะซิงก์ออกไซด์ (ZnO).....	52
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ .....	54
5.1 สรุปผลการทดลอง .....	54
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	55
เอกสารอ้างอิง .....	56
ภาคผนวก.....	59
ภาคผนวก ก การคำนวณความเข้มข้นของสาร ค่าคอนเวอร์ชัน ค่าผลได้ การสร้างกราฟ และสมการสารมาตรฐาน .....	61
ภาคผนวก ข ข้อมูลผลการทดลอง.....	70
ภาคผนวก ค โครมาโตแกรม HPLC .....	77
ประวัติผู้เขียน.....	78

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การเรียกชื่อของน้ำตาลตามจำนวนคาร์บอนและตามหมู่ฟังก์ชัน.....	6
2.2 สมบัติของน้ำตาลรีดิวิซ.....	16
2.3 สมบัติทางกายภาพต่างๆของกรดแลคติก.....	17
2.4 สรุปงานวิจัยการเปลี่ยนแปลงน้ำตาลเป็นกรดแลคติกด้วยวิธีทางปฏิกิริยาเคมี .....	28
4.1 ผลของชนิดต่างที่มีต่อผลิตภัณฑ์ต่างๆ .....	41
4.2 ผลของปริมาณความเข้มข้นที่มีต่อผลิตภัณฑ์กรดแลคติก .....	43
4.3 ผลของปริมาณกลูโคสเริ่มต้นที่ส่งผลต่อค่าผลได้ของกรดแลคติก ในสภาวะต่าง 1 และ 2.5 โมลต่อลิตร .....	44
4.4 ผลของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อค่าผลได้ของกรดแลคติก.....	45
ข.1 ค่าผลได้ของกรดแลคติกในสารละลายต่างชนิดต่างๆ ความเข้มข้นกลูโคสเริ่มต้น 2 % w/v ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 120 นาที ความเข้มข้นต่าง 0.5 โมลต่อลิตร โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ.....	68
ข.2 ค่าผลได้ของกรดแลคติกในสารละลายต่างเซลล์เชียมออกไซด์ ความเข้มข้นกลูโคส เริ่มต้น 1 %w/v ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 125 °C เป็นเวลา 120 นาที ความเข้มข้น ต่าง 1 โมลต่อลิตรโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ .....	68
ข.3 ค่าผลได้ของกรดแลคติกในสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ ปริมาณกลูโคสเริ่มต้น 2 %w/v ในสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นต่างๆ ที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 120 นาทีในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ .....	69
ข.4 ค่าผลได้ของกรดแลคติกในสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ ปริมาณกลูโคสเริ่มต้น ต่างๆในสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1และ 2.5 โมลต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 120 นาที ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ.....	69
ข.5 ค่าผลได้กรดแลคติก ที่ความเข้มข้นต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2.5 โมล/ลิตร กลูโคสเริ่มต้น 2 % w/v ที่อุณหภูมิ 50 และ 80 °C เป็นเวลา 120 นาที .....	70
ข.6 ค่าผลได้กรดแลคติก และ ค่าการเปลี่ยนแปลงของกลูโคส ความเข้มข้นต่างโซเดียม ไฮดรอกไซด์ 2.5 โมล/ลิตร อัตราการป้อนสารละลายกลูโคส 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นสารละลายกลูโคส 30 % w/v ที่อุณหภูมิ 50 70 และ 80 °C.....	70

## สารบัญตาราง (ต่อ)

- ข.7 ค่าผลได้กรดแลคติก และ ค่าการเปลี่ยนแปลงของกลูโคส ในสารละลายต่าง  
โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 และ 2.5 โมล/ลิตร โดยมีการเติม ซิงค์ออกไซด์  
0.5 โมลต่อลิตร อัตราการป้อนสารละลายกลูโคสเท่ากันคือ 0.5 มิลลิลิตรต่อ  
นาที ความเข้มข้นสารละลายกลูโคส 30 % w/v ที่อุณหภูมิ 80 °C..... 71
- ข.8 ค่าผลได้กรดแลคติก และ ค่าการเปลี่ยนแปลงของกลูโคส ความเข้มข้นต่าง  
โซเดียมไฮดรอกไซด์ 3.25 โมล/ลิตร อัตราการป้อนสารละลายกลูโคส 0.1  
มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นสารละลายกลูโคส 16.7 % w/v เป็นเวลา 20  
ชั่วโมง แล้วปล่อยให้ปฏิกิริยาดำเนินต่อไปอีก 2 ชั่วโมง เทียบกับอัตราการ  
ป้อนสารละลายกลูโคส 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นสารละลายกลูโคส  
30 % w/v เป็นเวลา 2 แล้วปล่อยให้ปฏิกิริยาดำเนินต่อไปอีก 20 ชั่วโมง  
ที่อุณหภูมิ 50 °C ..... 72
- ข.9 ค่าผลได้กรดแลคติก และ ค่าการเปลี่ยนแปลงของกลูโคส ความเข้มข้นต่าง  
โซเดียมไฮดรอกไซด์ 3.25 โมล/ลิตร อัตราการป้อนสารละลายกลูโคส 0.5  
มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นสารละลายกลูโคส 30 % w/v เป็นเวลา 66 นาที  
แล้วปล่อยให้ปฏิกิริยาดำเนินต่อไปอีก 19 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50 °C ..... 73
- ข.10 ค่าผลได้กรดแลคติก และ ค่าการเปลี่ยนแปลงของกลูโคส ความเข้มข้นต่างโซเดียม  
ไฮดรอกไซด์ 3.25 โมล/ลิตร อัตราการป้อนสารละลายกลูโคส 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที  
ความเข้มข้นสารละลายกลูโคส 30 % w/v เป็นเวลา 66 นาที แล้วปล่อยให้ปฏิกิริยา  
ดำเนินต่อไปอีก 19 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50 °C เทียบกับ การทำปฏิกิริยาที่สภาวะเดียว  
กัน แต่ ป้อนสารละลายกลูโคส 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นสารละลายกลูโคส  
30 % w/v เป็นเวลา 66 นาที แล้วปล่อยให้ปฏิกิริยาดำเนินต่อไปจนถึง 5 ชั่วโมง  
จากนั้นป้อนสารละลายกลูโคสอีกครั้งด้วยสภาวะเดิม(รวมเวลาในการทำปฏิกิริยา  
ทั้งหมด 10 ชั่วโมง)..... 73
- ข.11 ค่าผลได้กรดแลคติก และ ค่าการเปลี่ยนแปลงของกลูโคส ในสารละลายต่าง  
โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 3.25 โมล/ลิตร โดยมีการเติมเกลือโซเดียมซัลเฟต  
0.5 โมลต่อลิตร และ ทำการทดลองเทียบกับกรณีไม่มีเกลือ อัตราการป้อน  
สารละลายกลูโคส 0.1 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นสารละลายกลูโคส  
16.7 % w/v ที่อุณหภูมิ 50 °C ..... 75

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของเซลลูโลสในพืช .....	4
2.2 โครงสร้างของแอลดีไฮด์และคีโตน.....	5
2.3 น้ำตาลอัลโดสและน้ำตาลคีโตสที่เล็กที่สุด .....	6
2.4 โครงสร้างของน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว.....	7
2.5 โครงสร้างแบบวงเปิดและโครงสร้างแบบวงแหวน.....	7
2.6 โครงสร้าง D และ L ไอโซเมอร์ของกลูโคส .....	8
2.7 โครงสร้างวงแหวนของน้ำตาล .....	9
2.8 โครงสร้างอีพิเมอร์ของกลูโคส แมนโนส และกาแลกโตส.....	9
2.9 กลูโคสถูกดึงน้ำออกจากโมเลกุลได้สาร Hydroxymethylfurfural .....	10
2.10 กลูโคสเมื่ออยู่ในสารละลายต่าง.....	11
2.11 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของน้ำตาลในสารละลายต่าง .....	11
2.12 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของกลูโคสและฟรุกโตสไปเป็นผลิตภัณฑ์ C1 และ C2 .....	12
2.13 กลไกการเกิดปฏิกิริยาจากสารไฮโดรคาร์บอน 2 อะตอมไปเป็น กรดอะซิติก.....	12
2.14 กลไกการเกิดกรดน้ำตาล (saccharinic acid).....	13
2.15 ปฏิกิริยาออกซิเดชันของกลูโคส.....	15
2.16 สูตรโครงสร้างของกรดแลคติก .....	16
2.17 หลักการทำงานเมมเบรน 2 ขั้วไฟฟ้า.....	20
2.18 ระบบการแยกด้วยไฟฟ้าเคมีแบบทวีคูณ.....	20
2.19 ระบบการกำจัดเกลือ.....	21
2.20 ระบบการแยกไฟฟ้าเคมีด้วยน้ำ.....	21
2.21 กลไกการแตกตัวของกลูโคสไปเป็น ผลิตภัณฑ์คาร์บอน 3 อะตอม คาร์เบนไอออน และ แอลดีไฮด์ .....	23
2.22 เกิดปฏิกิริยาบีต้าอีลิมีเนชัน( $\beta$ -Elimination) ไปเป็น Diones .....	24
2.23 การเกิดแลคเตทจาก ไดโอน(Dione) .....	24
2.24 การเกิดแอลดอลคอนเดนเวชันย้อนกลับของกลูโคสไปเป็นผลิตภัณฑ์คาร์บอน 2 อะตอม คาร์ เบนไอออนและน้ำตาลที่มีคาร์บอน 4 อะตอม.....	25
2.25 การเปลี่ยนแปลงกลูโคสเป็นกรดแลคติกในน้ำภายใต้อุณหภูมิวิกฤต .....	26
2.26 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะต่างๆต่อค่าผลได้กรดแลคติกจากไพรวอลตีไฮด์.....	27

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.28 แสดงกลไกการเปลี่ยนแปลงไพรวอลลตีไฮด์เป็นกรดแลคติกโดยตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะ .....	27
3.1 เครื่องปฏิกรณ์ในการทำปฏิกิริยา.....	32
3.2 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาที่เวลาต่างๆ .....	33
3.3 ปริมาณน้ำตาลกลูโคส (เปอร์เซ็นต์) ในสารละลาย DNSA .....	35
3.4 ตัวอย่างในสารละลาย DNSA .....	36
3.5 เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ .....	36
3.6 เครื่องโซนิกเคเตอร์ (Ultrasonic Bath).....	38
3.7 เครื่อง High Performance Liquid Chromatography (HPLC).....	39
3.8 โครมาโตแกรมการเปลี่ยนแปลงกลูโคสเป็นกรดแลคติกและกรดอินทรีย์อื่นๆที่เวลาต่างๆ .....	40
4.1 ค่าผลได้และค่าการเปลี่ยนแปลงของกลูโคสที่อุณหภูมิ 125 °C ในแคลเซียมไฮดรอกไซด์.....	42
4.2 ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งกะ .....	46
4.3 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกลูโคสและผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่อุณหภูมิ 50 °C โดยศึกษาผลของอัตราการป้อนสารละลายกลูโคส .....	47
4.4 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกลูโคสและผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่อุณหภูมิ 50 °C โดยศึกษาผลของอัตราการป้อนสารละลายกลูโคส .....	48
4.4 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกลูโคสและผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่อุณหภูมิ 50 °C โดยศึกษาผลของอัตราการป้อนสารละลายกลูโคส .....	49
4.5 การเกิดปฏิกิริยาอย่างง่ายของกลูโคสในสารละลายต่าง .....	50
4.6 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกลูโคสและผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่อุณหภูมิ 50 °C โดยศึกษาผลของเกลือโซเดียมซัลไฟต์.....	51
4.7 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกลูโคสและผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่อุณหภูมิ 80 °C โดยศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาซิงค์ออกไซด์.....	52

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันขยะเป็นอีกหนึ่งปัญหาสำคัญระดับโลก ซึ่งขยะส่วนใหญ่มักจะถูกกำจัดโดยวิธีการฝังกลบดิน แล้วปล่อยให้สลายตัว แต่ขยะบางชนิดสลายตัวยาก เช่น พลาสติก การนำพลาสติกกลับมาใช้ใหม่ (Reuse) หรือการแปรสภาพก่อนนำกลับมาใช้ใหม่ (Recycle) เป็นวิธีกำจัดขยะพลาสติกบางส่วนที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน ดังนั้นพลาสติกชีวภาพ (Bioplastics) ได้เข้ามามีบทบาทมากขึ้นในอุตสาหกรรมพลาสติก และผลิตภัณฑ์เนื่องจากความสนใจในการแก้ไขปัญหาในเรื่องภาวะโลกร้อนจึงหันมาเลือกสินค้าที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมทั้งในเรื่องของบรรจุภัณฑ์หรือผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมไม่ก่อให้เกิดขยะและมลพิษ เน้นการผลิตที่ลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก ในประเทศที่พัฒนาแล้วจึงหันมาให้ความสนใจอีกหนึ่งทางเลือกในการผลิตพลาสติกจากแหล่งทรัพยากรทดแทนที่ไม่มีวันหมดจากชีวมวล

การศึกษาวិธีการสังเคราะห์กรดแลคติกจากน้ำตาล โดย Nef Evans และคณะ [1] งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยแรกๆที่ค้นพบว่าน้ำตาลจะมีปฏิกิริยาบางอย่างกับต่างและให้ผลิตภัณฑ์เป็นกรดแลคติก แต่อย่างไรก็ตามในอดีตกรดแลคติกยังไม่เป็นที่ต้องการของตลาด งานวิจัยเกี่ยวกับการผลิตกรดแลคติกจึงไม่ได้รับความสนใจแต่ในปัจจุบันความสำคัญเกี่ยวกับพลังงานที่ยั่งยืน ทรัพยากรหมุนเวียนที่สามารถใช้ได้ไม่จำกัด และ ผู้บริโภคหันมาเลือกสินค้าที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมการใช้สิ่งของหรือเครื่องอำนวยความสะดวกต่างๆที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากยิ่งขึ้นจึงมีการวิจัยหันมาสนใจทำเกี่ยวกับกระบวนการสังเคราะห์กรดแลคติกอีกครั้ง กระบวนการผลิตกรดแลคติกที่ใช้ในปัจจุบันคือกระบวนการหมักที่อาศัยเอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยควบคุมอุณหภูมิและค่าความเป็นกรด-ด่าง ซึ่งใช้สารตั้งต้นเป็นพวกคาร์โบไฮเดรต ให้ค่าผลได้ของกรดแลคติกมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ [2] แต่อย่างไรก็ตามการหมักก็ยังคงต้องใช้เวลาและมีความซับซ้อนในการเลี้ยงเชื้อ นักวิจัยส่วนหนึ่งจึงมุ่งเน้นไปที่การเกิดปฏิกิริยาเคมีที่ใช้เวลาไม่นานนักและยังให้ค่าผลได้กรดแลคติกที่สูงในระดับหนึ่ง แต่กระบวนการผลิตกรดแลคติกด้วยวิธีการเกิดปฏิกิริยาทางเคมียังได้ผลไม่เป็นที่ยอมรับนำมาประยุกต์ใช้ในการผลิตเชิงอุตสาหกรรม เนื่องจากการใช้สภาวะอุณหภูมิหรือปริมาณต่างๆที่สูงให้ค่าผลได้กรดแลคติกที่ต่ำเมื่อเทียบกับกระบวนการหมัก บางงานวิจัยได้ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีที่เป็นโลหะทรานซิชันบางชนิดที่อุณหภูมิสูง 300 °C เช่น โครเมียม (Cr(III)) ไอออน (Fe(III)) คอปเปอร์ (Cu(II)) และ สังกะสี (Zn(II)) เป็นต้น ทำให้ค่าผลได้กรดแลคติกสูงสุด 35 เปอร์เซ็นต์ [3] และ มีงานวิจัยบางงานพยายามหาตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความว่องไวและทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ข้างเคียงที่มีประโยชน์อย่างเช่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการวิจัยเท่านั้น เมื่อนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่วารณใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แพลตตินัมบนตัวรองรับต่างๆ เช่น แพลตตินัมบนตัวรองรับคาร์บอน (Pt/C) แพลตตินัมบนตัวรองรับแมกนีเซียมออกไซด์ (Pt/MgO) และแพลตตินัมบนตัวรองรับซิลิกอนไดออกไซด์ (Pt/SiO<sub>2</sub>) สารละลายเบสทำให้ได้ค่าผลได้กรดแลคติกสูงสุด 57 เปอร์เซ็นต์และได้ผลิตภัณฑ์ข้างเคียงที่มีคุณค่าเช่นกรดกลูโคนิก [4]

งานวิจัยนี้เล็งเห็นถึงความสำคัญในการสังเคราะห์กรดแลคติกและโอกาสในการแข่งขันเชิงอุตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพ และเพื่อตอบโจทย์การแข่งขันในระดับอุตสาหกรรม งานวิจัยนี้จึงพยายามพัฒนาปฏิกิริยาให้ได้ค่าผลได้ของกรดแลคติกที่มีค่าสูงเทียบเท่าหรือต่างกันไม่มากเมื่อเทียบกับการหมักด้วย จุลินทรีย์ และพัฒนาให้ใช้เป็นปฏิกิริยาแบบต่อเนื่องได้ โดยมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของโลหะทรานซิชันบางชนิด เช่น ZnO ซึ่งคาดว่าจะช่วยเพิ่มค่าผลได้ของกรดแลคติก และทำการลดปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาไฮดรอกไซด์ เทียบกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไฮดรอกไซด์เพียงอย่างเดียว และหาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์กรดแลคติก

## 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงกลูโคสเป็นกรดแลคติกและกรดอินทรีย์อื่นๆ โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยา เทียบกับการมีตัวเร่งและโลหะทรานซิชันบางชนิดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

1.2.2 เพื่อศึกษาศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ ได้แก่ เวลา อุณหภูมิ ตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณกลูโคสเริ่มต้น ปริมาณตัวเร่งเริ่มต้น และ อัตราการป้อนสารตั้งต้น ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงกลูโคสเป็นกรดแลคติก

## 1.3 ขอบเขตของโครงการ

1.3.1 ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงกลูโคสเป็นกรดแลคติกและกรดอินทรีย์อื่นๆ โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยา เทียบกับการมีตัวเร่งและโลหะทรานซิชันบางชนิดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

1.3.2 ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงกลูโคสเป็นกรดแลคติก ในสภาวะอุณหภูมิไม่สูงในช่วง(50-80°C)

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

กระบวนการเปลี่ยนแปลงกลูโคสเป็นกรดแลคติกสามารถทำได้ในสภาวะอุณหภูมิไม่สูงในช่วง (50-80°C) ความดันบรรยากาศ ทำให้ช่วยลดต้นทุนในการออกแบบสร้างเครื่องจักรและต้นทุนการผลิต โดยลดความยุ่งยากซับซ้อนและทำให้กรดแลคติกมีราคาถูกลงเนื่องจากต้นทุนการผลิตที่ลดลง ทำให้ตลาดการค้า poly lactic acid (PLA) เป็นที่ต้องการมากขึ้น มีการใช้พลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพแพร่หลายมากขึ้น ส่งผลต่อการลดลงของปัญหาปริมาณขยะที่สูงมากขึ้นทุกวันและยังเพิ่มขีดจำกัดการแข่งขันให้มีประสิทธิภาพในระดับอุตสาหกรรม

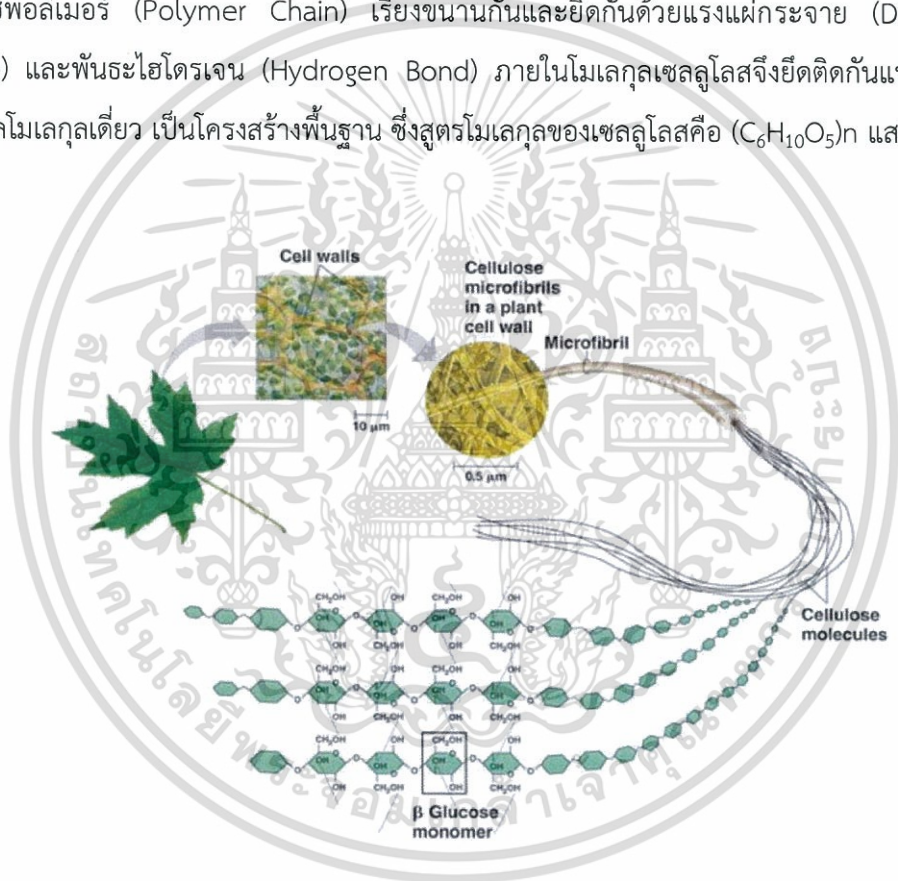


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เซลลูโลส (Cellulose) [5] เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่พบมากที่สุดประมาณ 45 เปอร์เซ็นต์ของสารอินทรีย์ทั้งหมด ในธรรมชาติส่วนใหญ่สะสมอยู่ที่ผนังเซลล์ในพืชชั้นสูงทุกชนิด ซึ่งมีส่วนประกอบของเซลลูโลส มากกว่า 97 ถึง 99 เปอร์เซ็นต์ จัดว่าเป็นเซลลูโลสบริสุทธิ์ประกอบด้วยสายโซ่พอลิเมอร์ (Polymer Chain) เรียงขนานกันและยึดกันด้วยแรงแผ่กระจาย (Dispersion Force) และพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen Bond) ภายในโมเลกุลเซลลูโลสจึงยึดติดกันแน่น โดยมีน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว เป็นโครงสร้างพื้นฐาน ซึ่งสูตรโมเลกุลของเซลลูโลสคือ  $(C_6H_{10}O_5)_n$  แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเซลลูโลสในพืช [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.1 น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว (Monosaccharide)

มอนอแซ็กคาไรด์ (Monosaccharide) หรือน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว เป็นโครงสร้างพื้นฐานของ ไดแซ็กคาไรด์ (Disaccharide) หรือน้ำตาลโมเลกุลคู่ เช่น ซูโครส (Common sugar) และ พอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) เช่น เซลลูโลสและแป้ง มอนอแซ็กคาไรด์เป็นสารที่มีรสหวาน ละลายในน้ำได้ดีแต่ไม่ละลายในตัวทำละลายไม่มีขั้ว มอนอแซ็กคาไรด์เป็นคาร์โบไฮเดรตที่มีขนาดโมเลกุลเล็กที่สุด ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสให้เป็นคาร์โบไฮเดรตที่เล็กลงได้อีก มีสูตรโครงสร้างพื้นฐานคือ  $(\text{CH}_2\text{O})_n$  ซึ่ง  $n$  เป็นจำนวนเต็มตั้งแต่ 3 ถึง 7 คาร์บอนจะต่อกันเป็นสายตรงไม่แตกแขนง มีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) จับกับคาร์บอนทุกตัว ยกเว้นคาร์บอน 1 ตัว ที่จะมีหมู่ฟังก์ชัน (Functional group) มาจับ หมู่ฟังก์ชันของคาร์โบไฮเดรตจะมี 2 หมู่ คือ หมู่แอลดีไฮด์ (-CHO) หรือ หมู่คีโตน (C=O) มอนอแซ็กคาไรด์ที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นแอลดีไฮด์จะเรียกว่าน้ำตาลอัลโดส (Aldose Sugar) มอนอแซ็กคาไรด์ที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นคีโตนจะเรียกว่าน้ำตาลคีโตส (Ketose Sugar) สามารถจำแนกมอนอแซ็กคาไรด์ได้ตามจำนวนอะตอมคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบตั้งแต่ 3 ถึง 7 ได้ตามลำดับดังนี้ ไตรโอส (Triose) เทโทรอส (Tetrose) เพนโทส (Pentose) เฮกโซส (Hexose) และเฮปโทส (Heptose) น้ำตาลอัลโดสที่เล็กที่สุด ได้แก่ กลีเซอรอลดีไฮด์ (Glyceraldehyde) และน้ำตาลคีโตสที่เล็กที่สุด คือ ไดไฮดรอกซีอะซิโตน (Dihydroxyacetone) มีคาร์บอน 3 อะตอม แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 น้ำตาลอัลโดสและน้ำตาลคีโตนที่เล็กที่สุด (ก) กลีเซอรอลดีไฮด์ และ (ข) ไดไฮดรอกซีอะซิโตน

### 2.1.1 การเรียกชื่อของมอนอแซ็กคาไรด์

การเรียกชื่อของมอนอแซ็กคาไรด์จะเรียกตามหมู่ฟังก์ชันในโมเลกุลถ้าเป็นหมู่แอลดีไฮด์ให้ระบุเป็น อัลโด ถ้าเป็นหมู่คีโตนให้ระบุเป็น คีโต ไว้ข้างหน้าจำนวนคาร์บอน เช่น น้ำตาลกลูโคสที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นหมู่แอลดีไฮด์ และมีจำนวนคาร์บอนอยู่ 6 อะตอม มีชื่อเรียกว่า น้ำตาลอัลโดเฮกโซส เป็นต้น

ตารางที่ 2.1 แสดงการเรียกชื่อของน้ำตาลตามจำนวนคาร์บอนและตามหมู่ฟังก์ชัน [6]

จำนวน คาร์บอน	การเรียกชื่อ		ตัวอย่างน้ำตาล	
	อัลโดส	คีโตส	น้ำตาลอัลโดส	น้ำตาลคีโตส
3	aldotriose	ketotriose	glyceraldehyde	dihydroxyacetone
4	aldotetrose	ketotetrose	erythrose	erythulose
5	aldopentose	ketopentose	ribose	ribulose
6	aldohexose	ketoheptose	glucose, galactose	fructose
7	aldoheptose	ketoheptose	-	sedoheptulose

สารประกอบแอลดีไฮด์และคีโตนจัดเป็นโมเลกุลมีขั้วปานกลาง จุดเดือด-จุดหลอมเหลว และการละลายน้ำต่ำกว่าแอลกอฮอล์ที่มีมวลโมเลกุลใกล้เคียงกัน สมบัติส่วนใหญ่ของแอลดีไฮด์และคีโตนเหมือนกันมาก แต่เนื่องจากแอลดีไฮด์มีอะตอมไฮโดรเจนต่ออยู่กับหมู่คาร์บอนิลทำให้มีผลต่อสมบัติทางเคมี 2 ประการ คือ แอลดีไฮด์จะถูกออกซิไดส์ได้ง่าย ในขณะที่คีโตนจะถูกออกซิไดส์ได้ยาก และแอลดีไฮด์จะว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาการเติมด้วยนิวคลีโอไฟล์ (Nucleophilic Addition) มากกว่าคีโตน



แอลดีไฮด์

คีโตน

(ก)

(ข)

R และ R' อาจจะเป็นอะลิฟาติก (Aliphatic) หรืออะโรมาติก (Aromatic)

รูปที่ 2.3 โครงสร้างของแอลดีไฮด์และคีโตน

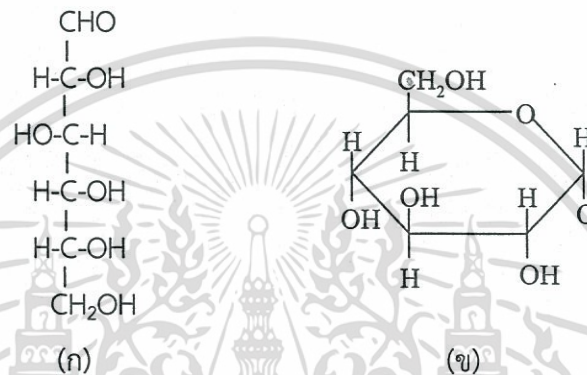
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.1.2 สมบัติทางกายภาพของมอนอแซ็กคาไรด์ [7]

แอลดีไฮด์และคีโตนเป็นสารประกอบที่มีหมู่คาร์บอนิล (C=O) เป็นหมู่ฟังก์ชันหลักซึ่งจะมีสูตรโครงสร้างดังนี้

### 2.1.2.1 โครงสร้าง (Structure)

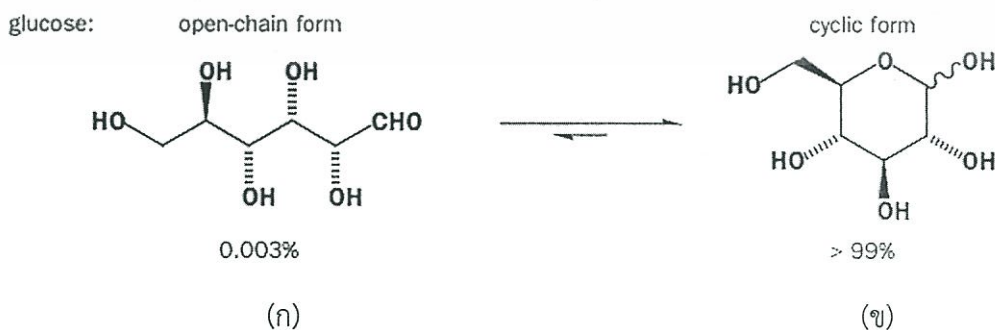
มอนอแซ็กคาไรด์มีโครงสร้าง 2 แบบ ได้แก่ โครงสร้างที่เป็นเส้นตรง (Fischer Projection) และโครงสร้างที่เป็นวงแหวน (Harworth Projection)



รูปที่ 2.4 โครงสร้างน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว (ก) แบบ Fischer Projection และ (ข) แบบ Harworth Projection

ซึ่งโดยทั่วไปโครงสร้างของกลูโคสจะอยู่ในรูปของวงแหวนหกเหลี่ยมเป็นส่วนใหญ่ (>99%) เนื่องจากมีความเสถียรมากกว่าซึ่งเราสามารถวัดความเสถียรได้จากค่าคงที่สมดุล ( $K_{eq}$ ) ดังสมการที่ (2.1) และแสดงดังรูปที่ 2.5

$$K_{eq} = \frac{K_{forward}}{K_{reverse}} \quad (2.1)$$



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของกลูโคส (ก) คือ แบบวงเปิด และโครงสร้างของกลูโคส (ข) คือ แบบวงแหวน

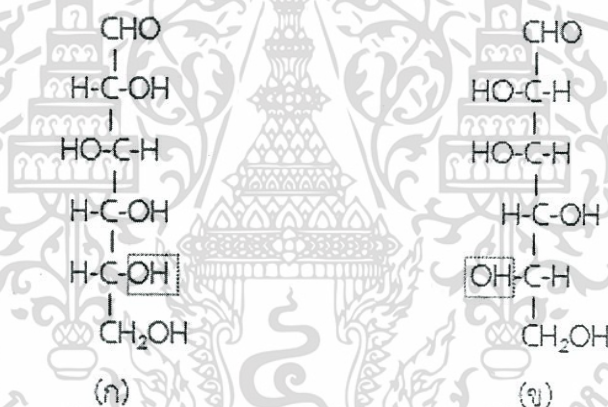
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.2.2 ไอโซเมอริซึม (Isomerism)

ไอโซเมอริซึมเป็นปรากฏการณ์ทางเคมีที่สารประกอบที่มีสูตรโครงสร้างเหมือนกันแต่มีการจัดเรียงตัวในทิศทางสามมิติแตกต่างกัน ทำให้คุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของสารนั้นแตกต่างกันไป ด้วย เรียกสารที่มีปรากฏการณ์แบบนี้ว่าเป็นไอโซเมอร์ซึ่งกันและกัน สารแต่ละชนิดสามารถเกิดไอโซเมอร์ได้  $2n$  ซึ่ง  $n$  คือ จำนวนคาร์บอนที่ไม่สมมาตร

#### D และ L isomer

เกิดจากการจัดเรียงตัวของ  $-H$  และ  $-OH$  ของคาร์บอนอะตอมที่ติดกับคาร์บอนอะตอมตัวสุดท้ายที่ไม่สมมาตร (asymmetric carbon atom,  $C^*$ ) เช่น กลูโคสจะมี 2 ไอโซเมอร์ โดยดูจากหมู่  $-OH$  ของคาร์บอนอะตอมตัวที่ 5 ของกลูโคส(ในกรอบสี่เหลี่ยมสีแดง) ถ้าหมู่  $-OH$  อยู่ทางขวามือจะมีโครงสร้างแบบ D-isomer แต่ถ้า  $-OH$  อยู่ทางซ้ายมือจะมีโครงสร้างแบบ L-isomer ในธรรมชาติ น้ำตาลส่วนใหญ่จะมีโครงสร้างแบบ D-isomer



รูปที่ 2.6 โครงสร้าง (ก) D isomer (ข) L isomer ของกลูโคส

จากรูปที่ 2.6 โครงสร้างของ D และ L isomer ของกลูโคส เป็นภาพสะท้อนกระจกเงาซึ่งกันและกัน โครงสร้างซ้อนทับกันไม่สนิท เรียกไอโซเมอร์แบบนี้ว่า อีแนนทิโอเมอร์ (Enantiomer)  $C^*$  เป็น Asymmetric Carbon atom หรือ Chiral Carbon atom หมายถึง คาร์บอนอะตอมที่มีอะตอมอื่นๆ ที่ไม่เหมือนกันทั้ง 4 หมู่มาเกาะที่แขนทั้ง 4 ข้างของคาร์บอนอะตอมแบบพันธะเดี่ยว

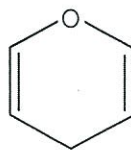
#### วงแหวนฟูแรโนสและพีแรโนส

เมื่อน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวอยู่ในสารละลายส่วนใหญ่จะมีการฟอร์มตัวอยู่ในรูปวงแหวน เนื่องจากหมู่แอลดีไฮด์หรือหมู่คีโตน ทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล จะได้สารที่ชื่อว่า เฮมิอะซิตาลและเฮมิคีตาลตามลำดับ เป็นผลให้เกิดการจัดเรียงตัวของน้ำตาลเป็นรูป 5 เหลี่ยม (Furan) และรูป 6 เหลี่ยม (Pyranose) เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เฮลียม (Pyran) ดังรูปที่ 2.7 น้ำตาลที่มีโครงสร้างเป็นรูป 5 เหลี่ยมจะเรียกว่า น้ำตาลฟูแรโนส (Furanose) ส่วนน้ำตาลที่มีโครงสร้างเป็นรูป 6 เหลี่ยมจะเรียกว่า น้ำตาลไพแรโนส (Pyranose)



(ก)

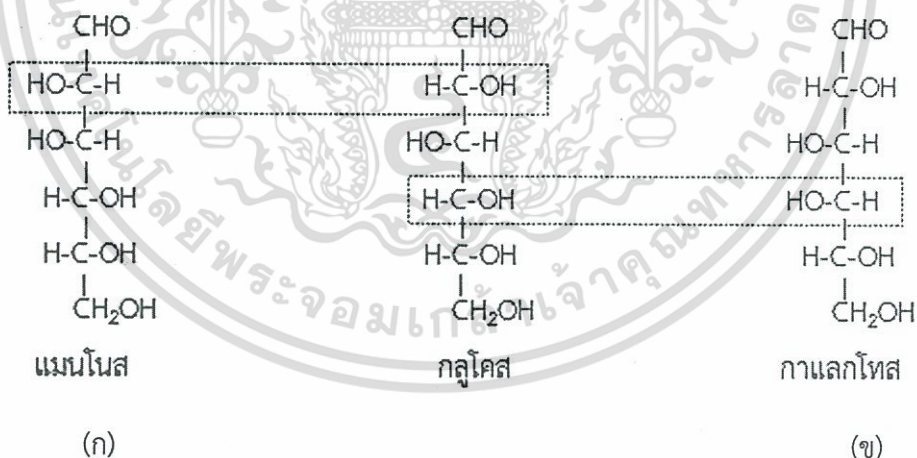


(ข)

รูปที่ 2.7 โครงสร้างของน้ำตาลรูป 5 เหลี่ยม (Furan) และ 6 เหลี่ยม (Pyran)

### 2.1.2.3 อีพิเมอร์ (Epimer)

เป็นคุณสมบัติของมอนอแซ็กคาไรด์ที่มีสูตรโครงสร้างเหมือนกันแต่มีการจัดเรียงตัวของ  $-H$  และ  $-OH$  ต่างกัน 1 ตำแหน่ง เช่น กลูโคส กาแลกโทส และแมนโนส มีสูตรเหมือนกัน คือ  $C_6H_{12}O_6$  แต่มีการเรียงตัวของ  $-H$  และ  $-OH$  ต่างกัน 1 ตำแหน่ง โดยที่โครงสร้างของแมนโนสจะต่างจากกลูโคส ที่การเรียงตัวของ  $-H$  และ  $-OH$  ที่ C ตำแหน่งที่ 2 เรียกโครงสร้างลักษณะนี้ว่า แมนโนสเป็นอีพิเมอร์กับกลูโคส และกลูโคสเป็นอีพิเมอร์กับกาแลกโทส เนื่องจากการเรียงตัวของ  $-H$  และ  $-OH$  ต่างกันที่ C ตำแหน่งที่ 4 ดังรูปที่ 2.8

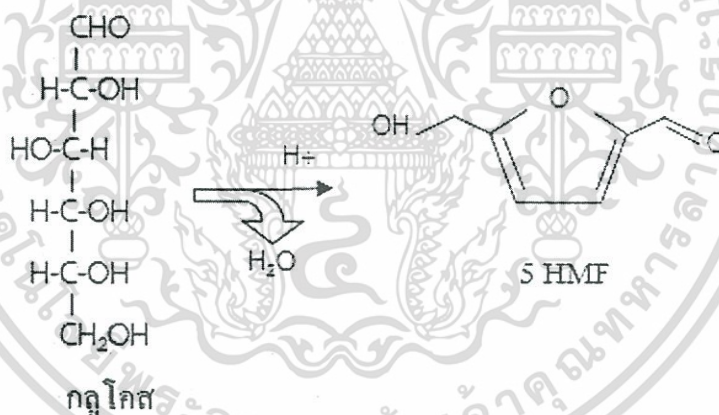


รูปที่ 2.8 โครงสร้างอีพิเมอร์ของกลูโคส (ก) คือ แมนโนส และ (ข) คือ กาแลกโทส

## 2.1.3 การเกิดปฏิกิริยาของกลูโคส

### 2.1.3.1 การเกิดปฏิกิริยากับกรด

เมื่อน้ำตาลทำปฏิกิริยากับกรดแก่ที่ไฮโดรเทอร์มัล จะได้สารประกอบที่มีโครงสร้างเป็นรูปวงแหวน ทั้งนี้เพราะน้ำตาลเกิดปฏิกิริยาไซโคลเซชัน (Cyclization) จากการสูญเสียโมเลกุลของน้ำ กลายเป็นสารประกอบเฟอร์ฟิวรัล (Furfural) หรืออนุพันธ์ของเฟอร์ฟิวรัล (Furfural Derivative) สารประกอบเฟอร์ฟิวรัลที่เกิดขึ้นนี้สามารถทำปฏิกิริยาได้กับสารพวกฟีนอล (Phenol) หลายชนิด เกิดเป็นสารประกอบที่มีสี ดังนั้นปฏิกิริยานี้จึงนำมาใช้ประโยชน์ในการตรวจหาน้ำตาลได้ ปฏิกิริยาระหว่างน้ำตาลกับกรดแสดงดังรูปที่ 2.9 กรดจะทำหน้าที่เป็นตัวตั้งโมเลกุลของน้ำออกจากน้ำตาล กรดแก่ HCl H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> และ H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> ที่มีความเข้มข้น 4 ถึง 6 โมลาร์ มักจะถูกนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่สภาวะอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ถ้าอุณหภูมิต่ำกว่านี้จะต้องใช้กรดแก่ที่เข้มข้นมากขึ้น สำหรับน้ำตาลเพนโทส (C5 อะตอม) เมื่อเกิดปฏิกิริยานี้จะได้เฟอร์ฟิวรัล น้ำตาลเฮกโซส (C6 อะตอม) จะได้ Hydroxyl Methyl Furfural ซึ่งเป็นอนุพันธ์ของเฟอร์ฟิวรัล อัตราเร็วของปฏิกิริยานี้จะแตกต่างกันออกไปตามชนิดของน้ำตาล อุณหภูมิ และความเข้มข้นของกรด

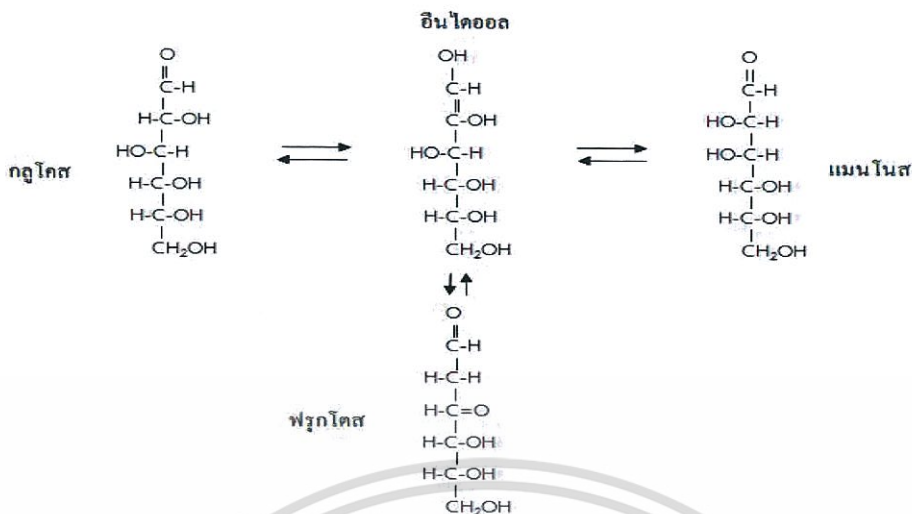


รูปที่ 2.9 กลูโคสจะถูกตั้งน้ำออกจากโมเลกุลได้สาร 5-ไฮดรอกซี เมทิล เฟอร์ฟิวรัล (5-Hydroxy Methyl Furfural)

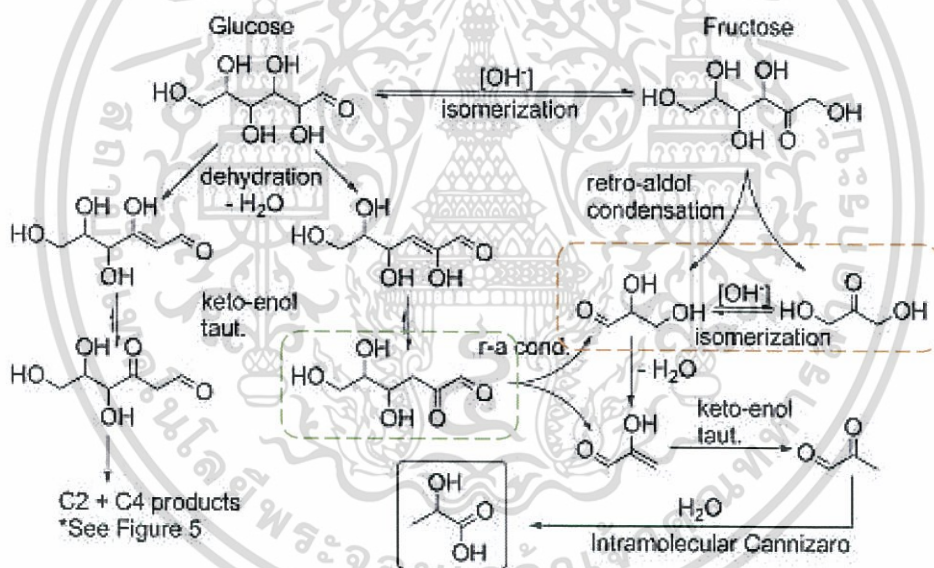
### 2.1.3.2 การเกิดปฏิกิริยากับด่าง

เมื่อมอนอแซ็กคาไรด์อยู่ในสารละลายของด่าง เช่น แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)<sub>2</sub>) หรือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) น้ำตาลกลูโคสจะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดไอโซเมอร์ไรเซชันไปเป็น ฟรุกโตส และแมนโนส ซึ่งกลูโคส ฟรุกโตส และแมนโนส สามารถเปลี่ยนโครงสร้างไปมาระหว่างกันได้ ซึ่งการเปลี่ยนรูปไปมาของมอนอแซ็กคาไรด์ผ่านสารตัวกลางคือ อีนไดออล (Ene-diol) เรียกการเปลี่ยนแปลงในลักษณะนี้ว่า Lobry de Bruyn Transformation แสดงดังรูปที่ 2.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



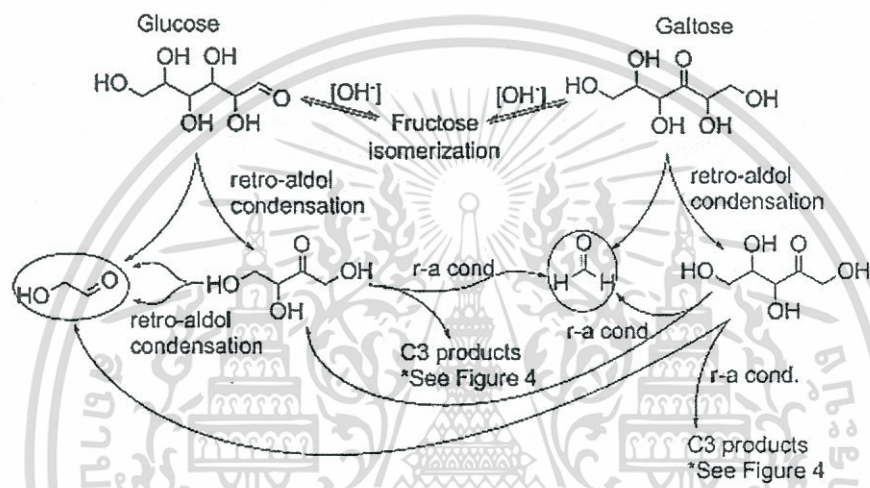
รูปที่ 2.10 กลูโคสเมื่ออยู่ในสารละลายต่าง



รูปที่ 2.11 แผนภาพกลไกการเกิดปฏิกิริยาของน้ำตาลในสารละลายต่าง โดย (r-a = retro-aldol และ taut. = tautomerization) [10]

กลไกการเกิดปฏิกิริยาในสารละลายต่างสามารถแสดงได้ดังนี้ [10] คือ กลูโคสสามารถเกิดไอโซเมอร์ไรเซชันภายใต้สภาวะต่างเป็นสารตัวกลาง 1,2 อินโดซอล ซึ่งสามารถเกิดการเปลี่ยนรูปร่างไปมาเป็น ฟรุกโตสและแมนโนสได้ โดย น้ำตาลแต่ละตัวสามารถเกิดปฏิกิริยา รีโทล-แอลดอลคอนเดนเซชัน (Retro-Aldol Condensation) แยกเป็นสองโมเลกุลที่มีขนาดเล็กลง ซึ่งมีเพียงตำแหน่งเดียวเท่านั้นที่สามารถแตกเป็นสารที่มีคาร์บอน 3 อะตอม (C3) คือ ไดไฮดรอกซีอะซิโตน (Dihydroxy Actone) และ กลีเซอรอลดีไฮด์ (Glyceroldehyde) แสดงได้ดังกรอบสี่เหลี่ยมสีส้มในรูปที่ 2.11 ซึ่งเป็นสารเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

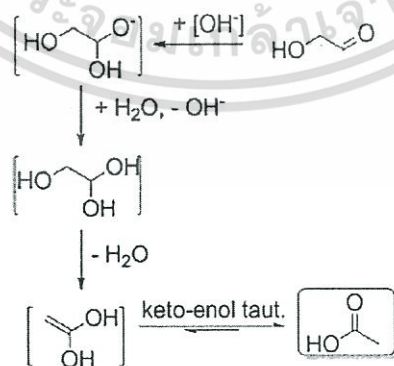
หลักที่เป็นตัวกลางที่นำไปสู่ แลคเตท ผ่านปฏิกิริยา อินทราโมเลกุลาคานิซาร์ (Intramolecular Cannizaro) กลูโคสสามารถเกิดปฏิกิริยาดังน้ำออก (Dehydration) เป็น อินอลโมเลกุลและเกิดต่อได้สองทาง ทางแรก 2-ไฮดรอกซีอินอล (2-hydroxy Enol) สามารถเปลี่ยนไปเป็น 1,2-ไดคีโตน (1,2-Diketone) ดังกรอบสี่เหลี่ยมสีเขียว ซึ่งสามารถเกิด รีโทล แอลดอลคอนเดนเซชันต่อได้โมเลกุลที่มีคาร์บอน 3 อะตอมและนำไปสู่แลคเตท ส่วนทางที่สอง 1,2-ไดคีโตนสามารถเกิด รีโทล แอลดอลคอนเดนเซชัน ได้โมเลกุลคาร์บอน 5 4 3 2 และ 1 อะตอม ขึ้นอยู่กับการเข้าทำปฏิกิริยาของไฮดรอกไซด์ จากต่างเข้าทำที่ตำแหน่งไหนซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แผนภาพกลไกการเกิดปฏิกิริยาของกลูโคสและฟรุคโตสไปเป็นผลิตภัณฑ์ C1 และ C2

โดย (r-a = แอลดอลคอนเดนเซชันย้อนกลับ และ taut. คือ ทอโทเมอไรเซชัน) [10]

นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์ C2 สามารถเกิดปฏิกิริยาการเติมน้ำ การดึงกำจัดน้ำ และ ทอโทเมอไรเซชัน ไปเป็นกรดอะซิติกได้ดังรูปที่ 2.13

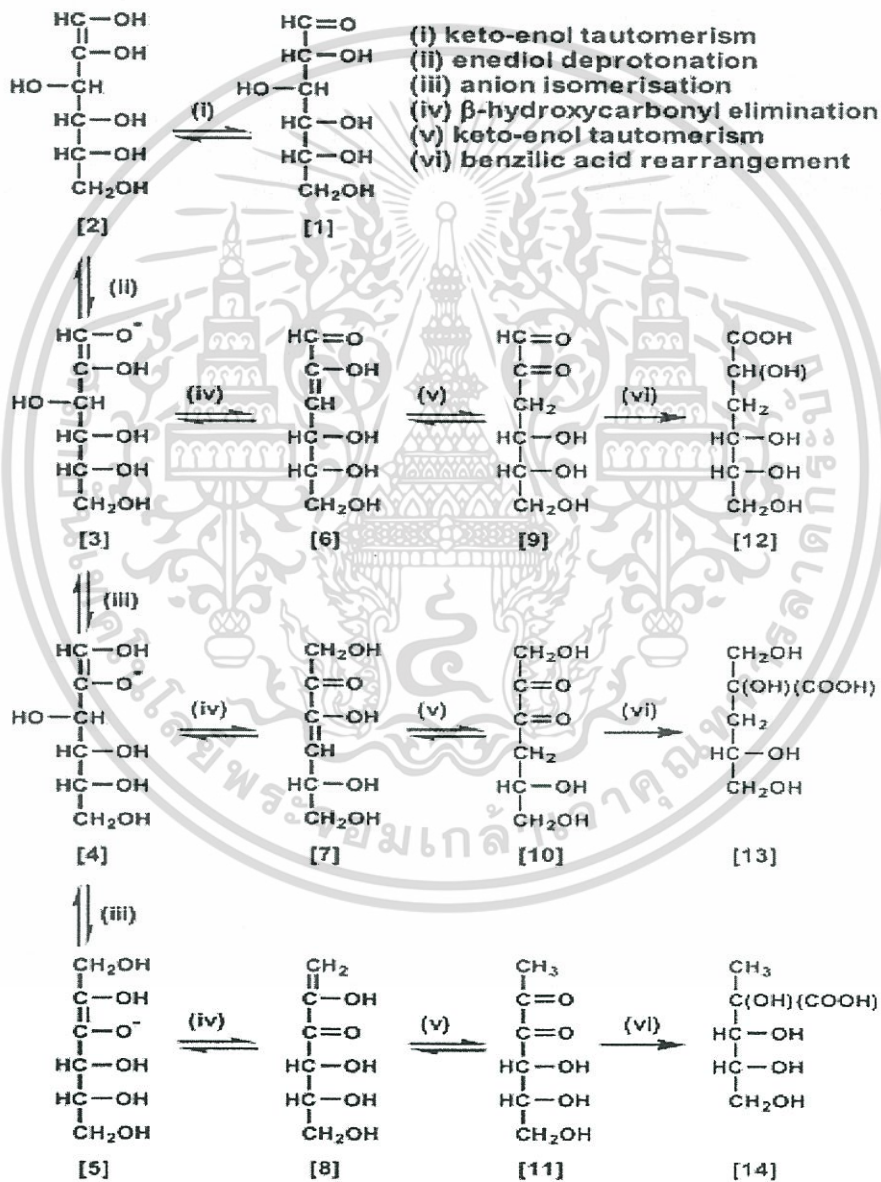


รูปที่ 2.13 กลไกการเกิดปฏิกิริยาจากสารไฮดรคาร์บอน 2 อะตอมไปเป็น กรดอะซิติก [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเกิดกรดแซคคาลินิก (Saccharinic Acid) [11]

นอกจากนี้ Nef-Isbell ได้เสนอกลไกการเสื่อมสลายของกลูโคส (1) ในสารละลายต่างแสดง ดังรูป 2.14 ชั้นแรกกลูโคสถูกเปลี่ยนเป็น อินโดอล (2) ผ่านปฏิกิริยา คีโต-อินอล โทเทอร์เมอร์ไรเซชัน (Keto-enol Tautomerisation) จากนั้นเกิดปฏิกิริยาต่อเป็น อินโดอลแอนไอออน (3) ผ่านปฏิกิริยาการดึงโปรตรอนออกโดยไฮดรอกไซด์ไอออน (Deprotonation) จากนั้นแอนไอออนไฮโดรเมอร์ไรเซชันที่เกิดขึ้นส่งผลให้ได้ของผสมของตัวกลางแอนไอออน (3-5) กลับไปกลับมาได้



รูปที่ 12.14 กลไกการเกิดกรดน้ำตาล (Saccharinic Acid) [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แอนไฮออน (3-5) เกิดปฏิกิริยาผ่านการหลุดออกของหมู่ไฮดรอกซิลที่ตำแหน่งเบต้า ( $\beta$ -Hydroxycarbonyl Elimination) ไปเป็นหมู่คาร์บอนิล คือ สาร (6-8) จากนั้นก็เกิดการจัดเรียงรูปร่างใหม่ผ่านปฏิกิริยา คีโต-อินอล โทเทอร์เมอร์ไรเซชัน เป็นสารประกอบ Vicinal Dicarbonyl(9-11) จากนั้นก็เกิดปฏิกิริยาการจัดเรียงตัวใหม่เป็นกรด (Benzilic acid Rearrangement) ไปเป็นดีออกซีแอลดอลนิกหรือกรดน้ำตาล (Saccharinic acid) (12-14) โดยสาร (12) คือ D-Glucometa saccharinic Acid (13) คือ D-Glucoisosaccharinic Acid และ (14) คือ D-Glucosaccharinic Acid

### 2.1.3.3 ปฏิกิริยาคาลาเมลไรเซชัน (Caramelisation) [12]

โดยทั่วไปการทำสุญญากาศให้ปลอดภัยจะให้ความร้อนใน ออโต้เคป (Autoclaving) ระหว่างกระบวนการทำให้ปลอดภัยของกลูโคสบางส่วนของสารละลายจะมีการเปลี่ยนไปเป็นสารที่มีสีเหลือง ซึ่งการเพิ่มขึ้นของสีเมื่อ เวลา อุณหภูมิ ความเข้มข้นของกลูโคส ปริมาณการมีอยู่ของสารอื่นเช่นเกลือ ต่าง หรือไอออน อื่นๆ ซึ่งกลไกการเปลี่ยนสีของสารละลายกลูโคสจะเรียกว่า นอนเอนไซม์มาติกบราวน์นิ่ง (Non-Enzymatic Browning) โดยมีปฏิกิริยาคาลาเมลไรเซชัน เป็นหนึ่งในชนิดหลักของ นอนเอนไซม์มาติกบราวน์นิ่ง

ปฏิกิริยาคาลาเมลไรเซชันมีความสัมพันธ์กับน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาการสูญเสียน้ำที่อุณหภูมิสูงโดยปฏิกิริยาจะเริ่มจากการเกิดไฮโซเมอร์ไรเซชันของน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวไปเป็นสารตัวกลางที่มีมวลโมเลกุลเบา (Low-molecular weight) กับสารที่มีกลิ่น (Aroma Compound) เช่น 5-ไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟูรอล (5-HMF) และ 2-เฟอร์ฟูรอล (2-FA) ซึ่งมันสามารถเกิดปฏิกิริยากอนเดนเซชัน และ โพลีเมอร์ไรเซชัน ต่อไปเป็นสารที่มีมวลโมเลกุลสูง(High-molecular Weight) ซึ่งเป็นสารที่มีสีเกิดขึ้น โดยสารที่มีสีนี้เราจะเรียกว่า คาลาเมล

สีของคาลาเมลเกิดขึ้นจากการให้ความร้อนแก่คาร์โบไฮเดรตกับสารเคมีจำพวกโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โซเดียมซัลไฟต์ (Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>) แอมโมเนียมคลอไรด์ (NH<sub>4</sub>Cl)

สีของคาลาเมลมี 4 ชนิดดังต่อไปนี้

- คาลาเมลชนิดที่ 1 รู้จักในชื่อของ เพลน หรือ สปีริต คาลาเมล (Plain or Spirit Caramel) เกิดขึ้นเมื่อมี โซเดียมไฮดรอกไซด์
- คาลาเมลชนิดที่ 2 รู้จักในชื่อของ เคสติกซัลไฟต์คาลาเมล(Caustic Sulphite caramel) เกิดขึ้นเมื่อมี โซเดียมซัลไฟต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

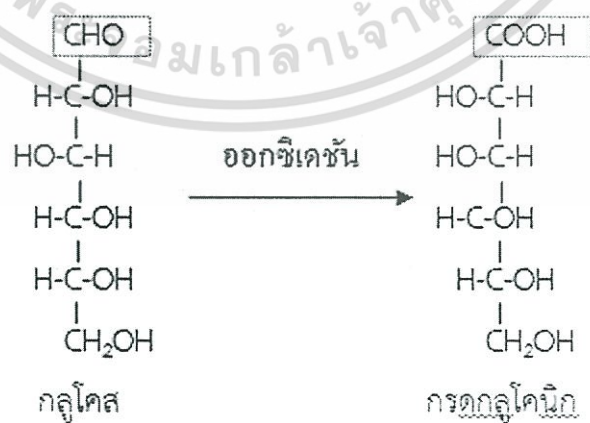
- คาลาเมลชนิดที่ 3 รู้จักในชื่อของ แอมโมเนีย หรือ เบียร์ คาลาเมล (Ammonia or Beer Caramel) เกิดขึ้นเมื่อมี แอมโมเนีย
- คาลาเมลชนิดที่ 4 รู้จักในชื่อของ แอมโมเนีย ซัลไฟต์ คาลาเมล (Ammonia -Sulphite Caramel) เกิดขึ้นเมื่อมี แอมโมเนียและซัลไฟต์อยู่ด้วย

#### 2.1.3.4 ปฏิกริยาทอโทเมอไรเซชัน [13]

ปฏิกริยาทอโทเมอไรเซชันเป็นปฏิกริยาการเคลื่อนที่ของโปรตอน ซึ่งเป็นปฏิกริยาพื้นฐานที่เกิดขึ้นได้ง่ายปฏิกริยาหนึ่ง เมื่อโปรตอนเกิดการเคลื่อนที่จะส่งผลให้โครงสร้างของสารมีการเปลี่ยนแปลงไปโดยที่สารยังคงมีสูตรโมเลกุลเหมือนกันแต่มีโครงสร้างของสารที่ต่างกันและสามารถเปลี่ยนกลับไปกลับมาระหว่างกันได้เรียกว่า ทอโทเมอร์ ปฏิกริยาทอโทเมอไรเซชัน ที่พบบ่อยคือปฏิกริยาการเปลี่ยนระหว่างคีโตอินอลและระหว่างหมู่ อะมิโนกับอิมิโน ซึ่งพบว่าเป็นอีกปฏิกริยาหนึ่งที่พบในการเปลี่ยนแปลงน้ำตาลในสารละลายต่างเนื่องจากมีหมู่คีโตอินอล

#### 2.1.3.5 ปฏิกริยาออกซิเดชัน [14]

หมู่แอลดีไฮด์หรือหมู่คีโตนของมอนอแซ็กคาไรด์สามารถถูกออกซิไดส์ด้วยสารออกซิไดส์ เช่น โซเดียมเปอร์ไอโอเดตหรือกรดไนตริก ผลผลิตที่ได้คือกรดน้ำตาล เช่น กลูโคสถูกออกซิไดส์ด้วยโซเดียมเปอร์ไอโอเดตได้เป็นกรดกลูโคนิก การออกซิไดส์เกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อหมู่ไฮดรอกซิล ของคาร์บอนตำแหน่งที่ 1 มีสภาพอิสระ ดังนั้นจึงเรียกมอนอแซ็กคาไรด์ที่มีสมบัติแบบนี้ว่า น้ำตาลรีดิวซ์ (reducing sugar) นอกจากนี้ยังสามารถถูกออกซิไดส์ได้ด้วยตัวเร่งปฏิกริยาโลหะทรานซิชัน เช่น  $\text{Au}/\text{Al}_2\text{O}_3$   $\text{Pt}/\text{SiO}_2$  และ  $\text{Pd}/\text{SiO}_2$  [4]



รูปที่ 2.15 ปฏิกริยาออกซิเดชันของกลูโคส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## น้ำตาลรีดิวิซ์

คาร์โบไฮเดรตที่มีหมู่อัลดีไฮด์และคีโตนอิสระจะมีคุณสมบัติเป็นตัวรีดิวิซ์สามารถทำปฏิกิริยากับสารละลายที่มีคุณสมบัติเป็นตัวออกซิไดซ์ได้เมื่อคาร์โบไฮเดรตอยู่ในสารละลายต่าง และเกิดการจับตัวใหม่ของคาร์บอนอะตอม ทำให้วงเปิดออกเป็นสายยาว และมีหมู่อัลดีไฮด์ หรือ คีโตนอิสระเกิดขึ้น และ เกิดปฏิกิริยาการจับตัวใหม่ของคาร์บอนอะตอมกลับไปกลับมาระหว่างรูปแบบ 2 ชนิด คือ คีโตนและอินอล ดังรูปที่ 2.10 คาร์โบไฮเดรตส่วนมากมีคุณสมบัตินี้ เช่น กลูโคส ฟรุกโตส มอลโตส และแมนโนส เป็นต้น ยกเว้นเพียงชนิดเดียว คือ ซูโครส เนื่องจากคาร์บอนอะตอมที่ 1 ไม่มีหมู่ อัลดีไฮด์อิสระ

คุณสมบัติของการเป็นน้ำตาลรีดิวิซ์สามารถทดสอบได้โดยเอาสารละลายที่ต้องการทดสอบมาทำปฏิกิริยากับสารละลายเบนดิคส์ (Benedict's Reagent) หรือสารละลายเฟห์ลิง (Fehling's Reagent) [15]

## 2.2 กรดแลคติก (Lactic acid)

กรดแลคติกมีชื่อทางเคมีว่า 2-hydroxypropionic acid หรือ 2-hydroxypropanoic acid กรดแลคติกเป็นกรดอินทรีย์ที่มีคาร์บอน 3 อะตอม คาร์บอนหนึ่งอะตอมที่อยู่ส่วนปลายเป็นส่วนของหมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl Group) ส่วนอะตอมคาร์บอนอีกปลายหนึ่งเป็นหมู่เมทิล (Methyl Group) หรือหมู่ไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon) และอะตอมของคาร์บอนที่อยู่ตรงกลางมีหมู่แอลกอฮอล์ กรดแลคติกมีอยู่ 2 รูปแบบคือ L(+)-Lactic acid และ D(-)-Lactic acid ซึ่งมีสูตรโครงสร้างทางเคมี แตกต่างกันดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 สูตรโครงสร้างของกรดแลคติก (ก) โครงสร้างของกรดแลคติกรูป L(+) (ข) คือโครงสร้างของกรดแลคติกรูป D(-)

สมบัติทางกายภาพต่างๆของกรดแลคติกแสดงได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สมบัติของกรดแลคติก

น้ำหนักโมเลกุล	90.08
จุดหลอมเหลว D(-) หรือ L(+)	52.8 – 54 องศาเซลเซียส
DL (ในอัตราส่วนต่างๆ)	16.8 - 33 องศาเซลเซียส
จุดเดือด DL	82 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 0.5 มม. ของปรอท
	122 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 14 มม. ของปรอท
ค่าคงที่ของการแตกตัว	$1.37 \times 10^{-4}$
( $K_a$ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)	
ค่าความร้อนของการเผาไหม้ ( $H_c$ )	1361 กิโลจูลต่อโมล
ค่าความร้อนจำเพาะ	190 กิโลจูลต่อ(โมลองศาเซลวิน) (kJ/mole.K)
( $C_p$ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)	
ค่าความเป็นกรด ( $pK_a$ )	3.86

### 2.2.1 การสังเคราะห์กรดแลคติก

โดยทั่วไปกรดแลคติกสามารถผลิตได้ 2 วิธี คือ จากกระบวนการสังเคราะห์ทางเคมี และจากกระบวนการย่อยน้ำตาลเป็นกรดแลคติกด้วยเอนไซม์หรือจุลินทรีย์

#### 2.2.1.1 การสังเคราะห์กรดแลคติกทางเคมี

ในอดีตกรดแลคติกสังเคราะห์ได้จากการเติม Hydrogen Cyanide ลงใน Acetaldehyde ทำให้เกิด Lactronitrile ซึ่งปฏิกิริยานี้เกิดในสภาวะที่เป็นของเหลวที่ความดันบรรยากาศสูงซึ่งทำให้บริสุทธิ์โดยกระบวนการกลั่นจากนั้น Lactronitrile ถูกไฮโดรไลต์เป็นกรดแลคติก โดยใช้กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น หรือกรดซัลฟิวริกเพื่อสร้างเป็นเกลือแอมโมเนียและกรดแลคติก จากนั้นกรดแลคติกจะเกิดกระบวนการ Esterification ด้วยเมทานอลได้เมทิลแลคเตตซึ่งสามารถระเหยได้ง่ายขึ้นจึงถูกทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้บริสุทธิ์โดยการกลั่นและไฮโดรไลต์โดยน้ำภายใต้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดเพื่อสร้างกรดแลคติก และ เมทานอลสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ กระบวนการสังเคราะห์ทางเคมีจะสร้าง Racemic Mixture ของกรดแลคติก ที่เป็นกรดแลคติกที่มีการผสมกันระหว่างกรดแลคติกที่มีโครงสร้างรูป L(+) และ D(-) ที่มีสัดส่วนไม่แน่นอนทำให้ไม่สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมได้ แต่ในปัจจุบันการผลิตกรดแลคติกส่วนใหญ่ใช้วิธีการหมักซึ่งเป็นวิธีที่ให้ค่าผลได้ของกรดแลคติกที่สูงแต่เนื่องจากต้องใช้เวลาานาน และมีข้อจำกัดเรื่องเวลาที่ต้องใช้มากและความซับซ้อนของกระบวนการเลี้ยงเชื้อและการแยกที่ยุ่งยากมาก หลายงานวิจัยจึงหันมาสนใจการผลิตกรดแลคติกด้วยกระบวนการทางเคมีเป็นจำนวนมาก

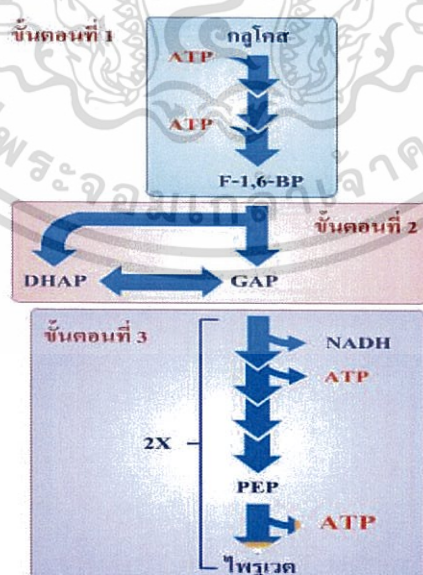
### 2.2.1.2 การย่อยน้ำตาลเป็นกรดแลคติกโดยการหมัก [16]

กระบวนการย่อยน้ำตาลเป็นกรดแลคติกในการหมักนั้นเกิดขึ้นโดยอาศัยการไกลโคไลซิส (Glycolysis) หรือขบวนการเผาผลาญกลูโคสซึ่งเป็นกระบวนการเมแทบอลิซึมของคาร์โบไฮเดรตในสิ่งมีชีวิต เช่น จุลินทรีย์แลคโตแบซิลลัสสามารถเปลี่ยนน้ำตาลเป็นกรดแลคติกโดยสามารถแสดงกลไกหลักๆได้ 3 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 เป็นการเติมหมู่ฟอสเฟตจาก ATP ให้น้ำตาลกลูโคส

ขั้นตอนที่ 2 เปลี่ยนน้ำตาลที่มี 6 คาร์บอน ให้เป็น น้ำตาลที่มีคาร์บอน 3 อะตอม หรือที่เรียกว่าไตรออสฟอสเฟต (Triose Phosphate) จำนวน 2 ตัว (ในที่นี้คือ GAP และ DHAP)

ขั้นตอนที่ 3 เป็นการออกซิเดชันของไตรออสฟอสเฟตให้เป็นไพรูเวท และได้ ATP



รูปที่ 2.17 ขั้นตอนของปฏิกิริยาไกลโคไลซิส [16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งการหมักจะมีการควบคุมพีเอช โดยการเติมปูนขาว แสดงดังสมการที่ 2.2 เมื่อเสร็จสิ้นการทำปฏิกิริยา ผลิตภัณฑ์จะประกอบไปด้วยแคลเซียมแลคเตต



Carbohydrate    Calcium Hydroxide                  Calcium Lactate

เนื่องจากการเติมสารประกอบแคลเซียม เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต แคลเซียมไฮดรอกไซด์ จึง จำเป็นต้องละลายตะกอนของแคลเซียมแลคเตตด้วยกรด เช่น กรดซัลฟิวริก หรือกรดไฮโดรคลอริก เพื่อให้ได้กรดแลคติกและแคลเซียมซัลเฟต ดังสมการที่ 2.3



Calcium Lactate                  Sulfuric Acid                  Lactic Acid                  Calcium Sulphate

## 2.2.2 การทำให้กรดแลคติกบริสุทธิ์

### 2.2.2.1 การแยกโดยการกลั่น

การกลั่นกรดแลคติกด้วยอุณหภูมิและความดันบรรยากาศไม่สามารถกลั่นกรดแลคติกจากของผสมได้เนื่องจากกรดแลคติกสามารถเกิดปฏิกิริยากับตัวมันเองเกิดเป็นไดเมอร์หรือพอลิเมอร์ได้โดยมีกรดจากตัวแลคติกเองเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา[17] การกลั่นกรดแลคติกโดยการทำให้ปฏิกิริยา เอสเทอร์ริฟิเคชัน (Esterification) ของกรดแลคติก กับ เมทานอลได้เป็น เมทิลแลคเตท ระเหยออกมาจากของผสมและได้น้ำ ดังสมการที่ 2.4



lactic acid                  methanol                  methyl lactate

หลังจากนั้นจะทำปฏิกิริยาการไฮโดรไลซิสโดยน้ำเพื่อให้ได้กรดแลคติกบริสุทธิ์ดังสมการที่ 2.5



methyl lactate                                  lactic acid                  methanol

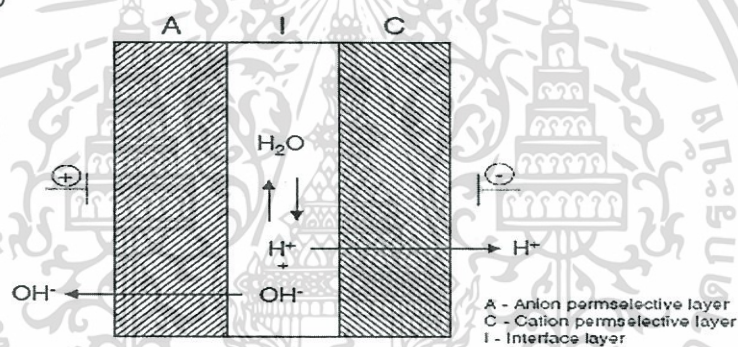
### 2.2.2.2 การแยกด้วยไฟฟ้าเคมี (Electro Dialysis)

ความก้าวหน้าในเทคโนโลยีเมมเบรนในการแยกและการทำให้บริสุทธิ์โดยการใช้อุปกรณ์กรองระดับไมโคร (Microfiltration) กรองระดับนาโน (Ultrafiltration) และ การแยกด้วยไฟฟ้าเคมี (ED)

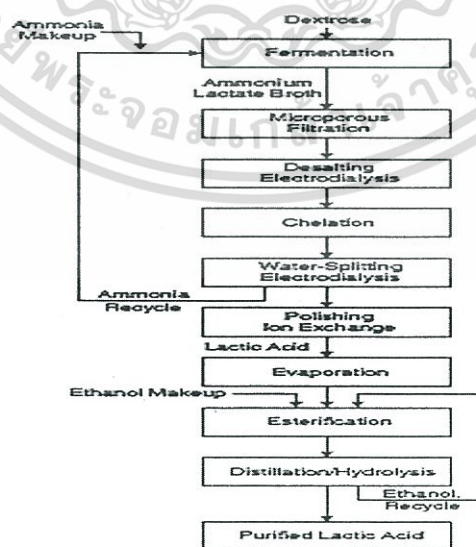
[18] ซึ่งจะนำไปสู่กระบวนการใหม่สำหรับผลิตภัณฑ์กรดแลคติกโดยไม่มีการสร้างเกลือที่เป็นของเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำเอกสารนี้ไปใช้  
 ไม่สามารถใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมมเบรนสามารถแยกน้ำให้กลายเป็น โปรตอนและไฮดรอกซิลไอออนแสดงดังรูป 2.17 ซึ่งความก้าวหน้าของเทคโนโลยีนี้สามารถทำให้โปรตอนเคลื่อนที่หากกรดที่มีประจุลบกลายเป็นกรดอิสระ (Free Acid) ส่วนและไฮดรอกซิลไอออนเคลื่อนที่หาประจุบวกกลายเป็นด่างอิสระ (Free Base) ทำให้แยกเกลือของกรดแลคติกออกจากสารละลายต่างได้ แต่ก็ยังมีปัญหาเกี่ยวกับการแยกสารที่มีประจุบวกมากกว่าหนึ่ง เช่น แคลเซียม และ แมกนีเซียม ในรูปไฮดรอกไซด์ที่ไม่ละลายน้ำ ที่บริเวณรอยต่อระหว่างเมมเบรนสองชั้นไฟฟ้า โดยทั่วไปเมมเบรนมีข้อจำกัดในการทนไอออนประจุสองบวกได้ประมาณ 1ppm แต่ในอุตสาหกรรมหมักมีความเข้มข้นของไอออนประจุสองบวกในช่วง 1000 ppm ดังนั้นจึงมีกระบวนการเพื่อแก้ไขปัญหานี้คือ ระบบการแยกด้วยไฟฟ้าเคมีแบบทวีคูณ (Double ED) แสดงดังรูปที่ 2.18 ซึ่งถูกพัฒนาโดยสถาบันเทคโนโลยีชีวภาพมิชิแกนซึ่งกระบวนการนี้ใช้หน่วยระบบการกำจัดเกลือด้วยไฟฟ้าเคมี (Desalting ED) ในการกำจัดไอออนหลายประจุ ดังรูปที่ 2.19 และ ความเข้มข้นของเกลือแลคเตทโดยใช้ระบบระบบการแยกไฟฟ้าเคมีด้วยน้ำ (Water-Splitting ED) ดังรูปที่ 2.20

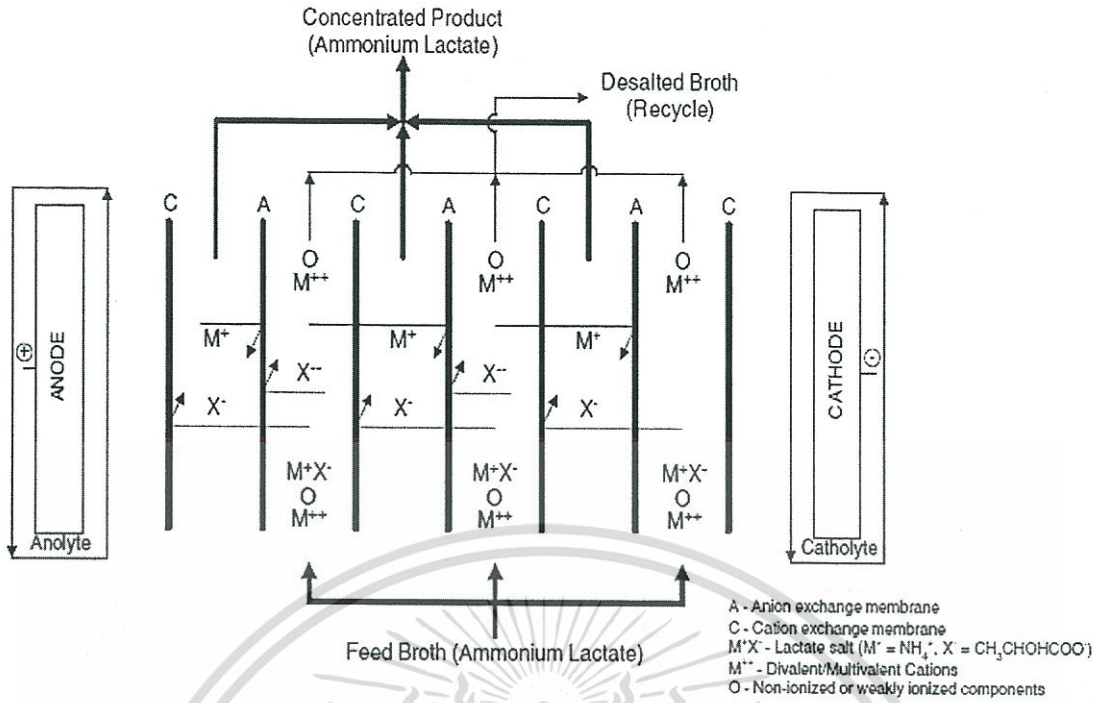


รูปที่ 2.17 หลักการทำงานเมมเบรน 2 ชั้นไฟฟ้า (Bipolar Electro Dialysis Membrane)

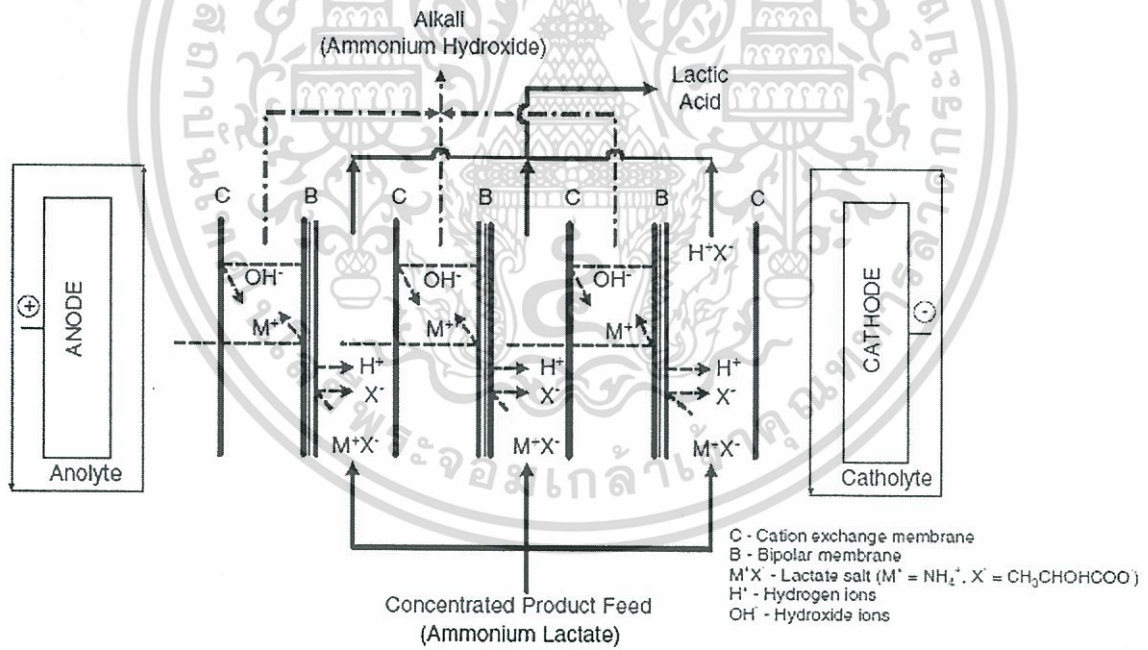


รูปที่ 2.18 ระบบการแยกด้วยไฟฟ้าเคมีแบบทวีคูณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 ระบบการกำจัดเกลือ (Desalting Electro Dialysis)



รูปที่ 2.20 ระบบการแยกไฟฟ้าเคมีด้วยน้ำ (Water-Splitting Electro Dialysis)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 การนำกรดแลคติกไปใช้ประโยชน์ [19]

### 2.3.1 อุตสาหกรรมอาหาร

อุตสาหกรรมอาหารถือเป็นอุตสาหกรรมที่นำกรดแลคติกมาใช้ประโยชน์มากที่สุด ซึ่งสามารถผลิตขึ้นได้เองหรือการเติมในกระบวนการหมักอาหารในอุตสาหกรรมหลายชนิด เช่น นมเปรี้ยว โยเกิร์ต ขนมปัง เบียร์ เนยเทียม ผักผลไม้ดอง ไส้กรอก และเครื่องดื่มบางชนิด เป็นต้น

### 2.3.2 อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง

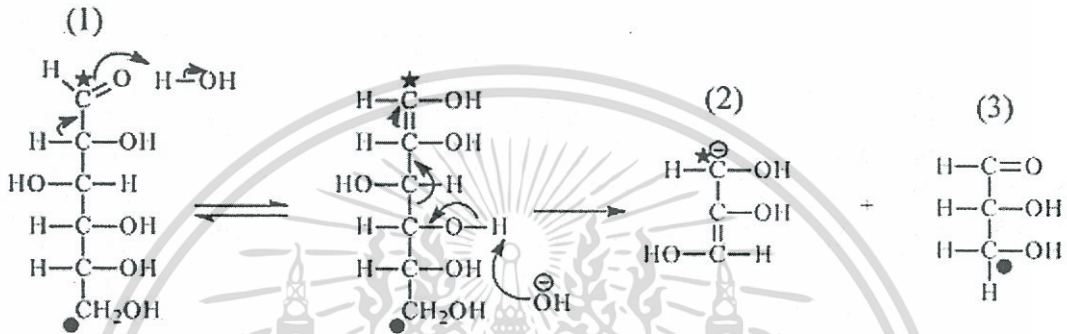
- ผลิภัณฑ์บำรุงผิว เช่น กรดแลคติก แลคเตท แคลเซียมแลคเตท โซเดียมแลคเตท เพื่อเป็นสารเร่งการผัดผิวใหม่ ให้ความชุ่มชื้น ลดการเกิดสิว ควบคุม pH
- ผลิภัณฑ์สำหรับช่องปาก เช่น แคลเซียมแลคเตท เพื่อป้องกันฟันผุ และยับยั้งการก่อตัวของหินปูน ในรูปของส่วนผสมของยาสีฟัน และน้ำยาบ้วนปาก
- ผลิภัณฑ์บำรุงเส้นผมโดยใช้กรดแลคติกเป็นส่วนผสมเพื่อทำหน้าที่เคลือบให้เส้นผมเงางาม
- ผลิภัณฑ์ทำความสะอาดร่างกาย โดยใช้แคลเซียมแลคเตทเป็นส่วนผสมเพื่อทำหน้าที่ให้ความชุ่มชื้น และซัดเซลล์ผิว

### 2.3.3 อุตสาหกรรมอื่นๆ

การใช้กรดแลคติกในอุตสาหกรรมด้านอื่นๆ คือ การผลิตพลาสติกที่มีคุณสมบัติย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เช่น การผลิตพลาสติกพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีทั้งข้อดีและข้อเสีย ข้อดีคือ มีฐานวัตถุดิบที่มาจากผลผลิตทางการเกษตรซึ่งสามารถหาได้ง่ายภายในประเทศ ย่อยสลายได้ มีอุณหภูมิหลอมอยู่ในระดับสูงพอสมควร ข้อเสียคือ เป็นพอลิเมอร์ที่ค่อนข้างเปราะมีค่าการยืดตัวต่ำ ทำให้มีข้อจำกัดในการนำ PLA ไปใช้ในงาน จำพวก फिल्मบรรจุภัณฑ์ที่ต้องการการยืดตัว ไม่ทนความร้อน ความแข็งแรงต่ำ และสุดท้ายราคาสูง ดังนั้นจึงต้องมีการพัฒนาโดยการนำไปผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นเพื่อปรับปรุงสมบัติที่ดีๆ เช่น การผสม PLA กับ Ecoflex ซึ่งเป็น โคพอลิเมอร์ที่มีสมบัติเด่นด้านความเหนียวและการยืดตัว ทำให้มีสมบัติใกล้เคียงกับ LDPE ดังนั้นการพัฒनावิจัยต่อยอดการนำกรดแลคติกไปเป็นพอลิเมอร์ และการปรับปรุงคุณภาพของ พอลิเมอร์ จึงเป็นสิ่งที่สำคัญอย่างยิ่ง [20]

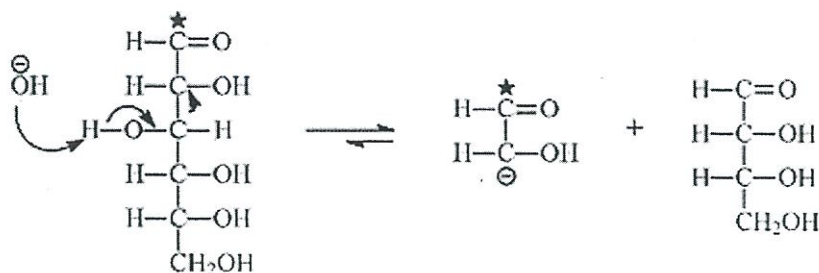
## 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Amanda V. Ellis และ Michael A. Wilson [21] ได้ศึกษาการสลายตัวของ  $1\text{-}^{13}\text{C-D-Glucose}$  (กลูโคสที่มีคาร์บอนตำแหน่งที่หนึ่งเป็นไอโซโทปคาร์บอน) ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ อุณหภูมิ  $145^{\circ}\text{C}$  เพื่อเข้าใจการเปลี่ยนแปลงคาร์บอนอะตอมของกลูโคสในสารละลายต่าง โดยงานวิจัยนี้ใช้  $^{13}\text{C}$  ไอโซโทปเพื่อใช้ระบุตำแหน่งของคาร์บอนที่เกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ซึ่งใช้ในการอธิบายกลไก โดยมีเครื่อง NMR Spectroscopy ในตรวจวัดผลิตภัณฑ์ต่างๆ



รูปที่ 2.21 กลไกการแตกตัวของกลูโคสไปเป็น C3 คาร์บอนไอออน และ แอลดีไฮด์

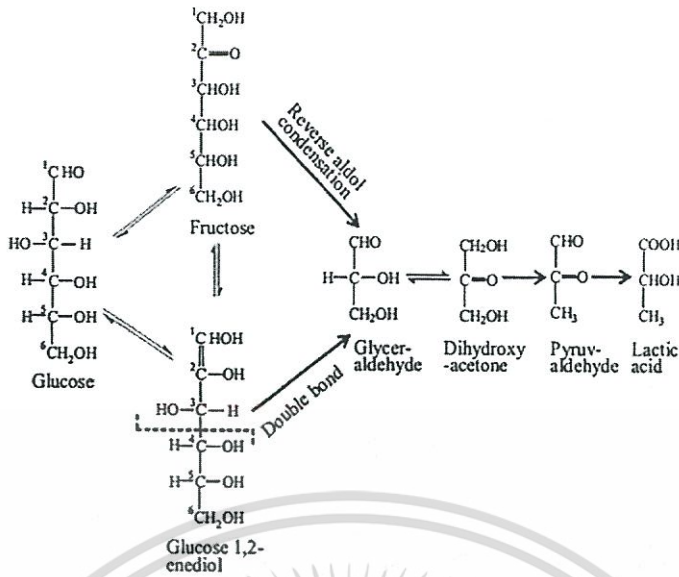
จากรูปที่ 2.21 และ 2.22 สำหรับ คาร์บอนไอโซโทป  $^{13}\text{C}$  ตำแหน่งที่หนึ่งใช้สัญลักษณ์เป็น ★ และ คาร์บอนตำแหน่งที่หกใช้สัญลักษณ์เป็น ● โดยเริ่มแรกกลูโคส (1) เกิดไอโซเมอร์ไรเซชันเป็น 1,2 อินโดล แล้วจึงแตกโมเลกุลเป็น C3 คาร์บอนไอออน (2) และ แอลดีไฮด์ (3) โดย แอลดีไฮด์ (3) สามารถเกิดปฏิกิริยา อีโนไลเซชัน (Enolization) ไปเป็นสาร (4) แสดงดังรูปที่ 2.22 ซึ่งคาร์บอนไอออน (2) อาจรับโปรตอนจากน้ำได้เป็นสาร (4) และ สาร (4) สามารถเกิดไอโซเมอร์ไรเซชันไปเป็นสาร (5)



รูปที่ 2.24 การเกิดแอลดอลคอนเดนเวชันย้อนกลับของกลูโคสไปเป็น C2 คาร์แบนไอออนและน้ำตาล C4 (น้ำตาลที่มีคาร์บอน 4 อะตอม)

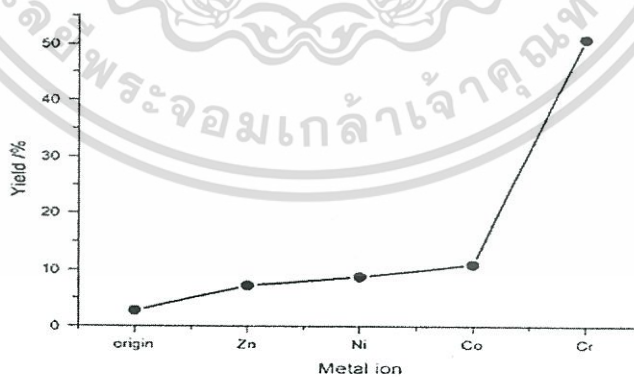
จากรูปที่ 2.24 สังเกตได้ว่าการเข้าทำปฏิกิริยาของไฮดรอกไซด์กรุปของต่างในตำแหน่งต่างของโครงสร้างกลูโคสเป็นตัวกำหนดผลิตภัณฑ์ที่มีความแตกต่างกันซึ่งจะเห็นได้จากกลไกการเกิดเป็น C2 คาร์แบนไอออนและน้ำตาล C4 เกิดจากการเข้ารับโปรตอนของไฮดรอกไซด์กรุปจากไฮดรอกซิลกรุปของคาร์บอนตำแหน่งที่3 จึงเกิด เป็น สารที่มี คาร์บอน 2 อะตอมกับ 4 อะตอมดังนั้นถ้าของไฮดรอกไซด์กรุปของต่างเข้าทำปฏิกิริยาที่ตำแหน่งอื่นก็จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างออกไป

Jin Zhou Enomoto Moriya และ Higashijima [3] ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงกลูโคสเป็นกรดแลคติกในสภาวะอุณหภูมิสูงโดยปราศจากตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ พบว่ากรดแลคติกสามารถผลิตได้จากคาร์โบไฮเดรตในสภาวะอุณหภูมิสูง ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นหลังจากจากทำปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงกลูโคสเป็นกรดแลคติกจะถูกวิเคราะห์โดยเครื่อง HPLC GC/MS และ NMR ผลจากการศึกษาพบว่าเกิดน้ำตาลฟรุกโตส กลีเซอรอลดีไฮด์ ไดไฮดรอกซีอะซีโตน และ ไพรูวอลดีไฮด์ ระหว่างการเกิดปฏิกิริยาโดยใช้กลูโคสเป็นสารตั้งต้น กลไกการเปลี่ยนแปลงกลูโคสเป็นกรดแลคติกในน้ำภายใต้อุณหภูมิวิกฤตแสดงดังรูปที่ 2.25 กลไกเริ่มจากไอโซเมอร์ไรเซชันกลูโคสไปเป็นฟรุกโตส แล้วฟรุกโตสอาจจะถูกเปลี่ยนเป็นกลีเซอรอลดีไฮด์และไดไฮดรอกซีอะซีโตน ทั้งสองสารนี้เกิดปฏิกิริยาการสูญเสียน้ำเป็นไพรูวอลดีไฮด์ ต่อได้เป็นกรดแลคติก จากการทดลองพบว่าไพรูวอลดีไฮด์เป็นผลิตภัณฑ์ของกลีเซอรอลดีไฮด์และไดไฮดรอกซีอะซีโตน และกรดแลคติกเป็นผลิตภัณฑ์หลักของไพรูวอลดีไฮด์ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงกลูโคสเป็นกรดแลคติกในน้ำภายใต้อุณหภูมิวิกฤตมีลักษณะคล้ายกับการเปลี่ยนแปลงกลูโคสเป็นกรดแลคติกในสารละลายต่าง ซึ่งหมายความว่าน้ำภายใต้อุณหภูมิวิกฤตอาจทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาต่าง (Bronsted Base Catalyst)



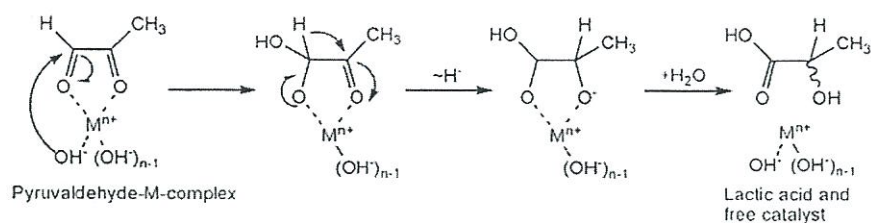
รูปที่ 2.25 การเปลี่ยนแปลงกลูโคสเป็นกรดแลคติกในน้ำภายใต้อุณหภูมิวิกฤต

Kong Li Wang He และ Ling [22] พบว่าตัวกลางที่สำคัญของการเปลี่ยนแปลงชีวมวลเป็นกรดแลคติกคือไพรวอลดีไฮด์งานวิจัยนี้จึงศึกษากลไกการเปลี่ยนแปลงของไพรวอลดีไฮด์เป็นกรดแลคติก โดยมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะต่างๆ คือ Zn(II), Ni(II), Co(II) และ Cr(III) ผลการทดลองเป็นดังรูปที่ 2.25 พบว่ากรดอินทรีย์ต่างๆ เช่น กรดออกซาลิก กรดฟอร์มิก กรดมาลิก กรดอะซิติก กรดมาลิลิก กรดฟูมาริก และ กรดโพพิโนอิก คือผลิตภัณฑ์ที่ได้ ผลได้กรดแลคติกที่มากที่สุดคือ 50.93 เปอร์เซ็นต์ แสดงดังรูปที่ 2.26 ได้จากการใช้ Cr (III) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 300°C และได้เสนอกลไกการเปลี่ยนแปลงไพรวอลดีไฮด์เป็นกรดแลคติกโดยมีโลหะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดังรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.26 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะต่างๆต่อค่าผลได้กรดแลคติกจากไพรวอลดีไฮด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.27 แสดงกลไกการเปลี่ยนแปลงไพรูวอลดีไฮด์เป็นกรดแลคติกโดยตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะ

เป็นที่ทราบกันดีว่าค่าคงที่สมดุลการแตกตัวของสาร ( $K_{eq}$ ) จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ดังนั้นน้ำที่อุณหภูมิสูงจึงอาจเกิดแตกตัวเป็นไฮดรอกซิลไอออนซึ่งจับตัวเป็นคอมเพล็กซ์กับโลหะทรานซิชันทำให้แสดงสมบัติเป็นกรดของลิวอิส (Lewis acid) ซึ่งสามารถรับคู่อิเล็กตรอนจาก โมเลกุลของออกซิเจนในสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนแล้วเกิดปฏิกิริยาต่อไปเป็นกรดแลคติกได้

ตารางที่ 2.3 สรุปงานวิจัยการเปลี่ยนแปลงน้ำตาลเป็นกรดแลคติกด้วยวิธีทางปฏิกิริยาเคมี

น้ำตาล	ต่าง	ตัวเร่งปฏิกิริยา	อุณหภูมิ (°C)	ความดัน	เวลา	อากาศ	ค่าผลได้กรดแลคติก	ผลิตภัณฑ์อื่น ๆ	อ้างอิง
Glucose 0.9g	KOH 1.5M	-	37 °C	บรรยากาศ	12 day	-	57%	-	[23]
Xylose 90 mg	-	CuCTAB/MgO 60 mg ใน NaOH 2.5M	120 °C	0.4 MPa	1 h	Ar	43%	กรดฟอร์มิก 14%	[24]
Glucose 90 mg							35%	กรดฟอร์มิก 10%	
Glucose 2%	-	AlCl <sub>3</sub> 0.1M	180 °C	บรรยากาศ	2 h	-	35%	-	[25]
		CrCl <sub>3</sub> 0.1M					30%	-	
		FeCl <sub>3</sub> 0.1M					15%	HMF 30%	
		CuCl <sub>2</sub> 0.1M					12%	HMF 25%	
Cellulose 2%	-	AlCl <sub>3</sub> 0.1M	-	-	-	-	23%	-	-
		CrCl <sub>3</sub> 0.1M					16%		

น้ำตาล	ต่าง	ตัวเร่งปฏิกิริยา	อุณหภูมิ (°C)	ความดัน	เวลา	อากาศ	ค่าผลได้กรดแลคติก	ผลิตภัณฑ์อื่น ๆ	อ้างอิง
Glucose 0.07 g	-	ZnSO <sub>4</sub> CoSO <sub>4</sub> NiSO <sub>4</sub> Cr(SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> 0 – 800 ppm	300	บรรยากาศ	120 s	N <sub>2</sub>	10% ที่ Co 400 ppm	ไม่ได้ระบุ	[26]
Glucose 0.25 mmol/L	NaOH 1 M	CRu/C Cu/C Ag/C Pd/C Pt/C Pt/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Pt/SiO <sub>2</sub> Pt/MgO	80	บรรยากาศ	2 hr	-	45% 56% 54% 50% 43% 57% 50% 57%	กรดกลูโคนิก 4.9% กรดกลูโคนิก 4.4% กรดกลูโคนิก 8.4% กรดกลูโคนิก 15.5% กรดกลูโคนิก 45% กรดกลูโคนิก 13% กรดกลูโคนิก 17% กรดกลูโคนิก 23%	[4]

น้ำตาล	ต่าง	ตัวเร่งปฏิกิริยา	อุณหภูมิ (°C)	ความดัน	เวลา	อากาศ	ค่าผลได้กรดแลคติก	ผลิตภัณฑ์อื่น ๆ	อ้างอิง
glucose	Ca(OH) <sub>2</sub>	-	195-198	-	7 h	-	30%	-	[27]
Fructose		-	194-199	-	7.5 h	-	38.5%	-	
Sucrose		-	257	-	2-4 min	-	70%	-	

## บทที่ 3

### การทดลอง

การทดลองศึกษาการสังเคราะห์กรดแลคติกจากกลูโคสในสารละลายต่างโดยใช้ปฏิกิริยาแบบต่อเนื่อง โดยศึกษาปัจจัยต่างๆ ดังต่อไปนี้

- ศึกษาผลของชนิดต่าง
- ศึกษาผลของความเข้มข้นของด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์
- ศึกษาผลของความเข้มข้นของกลูโคสเริ่มต้น
- ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยา
- ศึกษาผลของอัตราการป้อนสารละลายกลูโคส
- ศึกษาผลของเกลือโซเดียมซัลไฟด์
- ศึกษาผลของตัวเร่งโลหะซิงค์ออกไซด์

#### 3.1 การทดลองเปลี่ยนแปลงกลูโคสเป็นกรดแลคติกและกรดอินทรีย์อื่นๆ

สารเคมี

- 1) น้ำตาลกลูโคส
- 2) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

อุปกรณ์

- |  |   |         |
|--|---|---------|
| 1) เครื่องปฏิกรณ์สามคอแบบแจ็กเก็ตขนาด 250 มิลลิลิตร  | 1 | อัน     |
| 2) เครื่องกวนสารให้ความร้อน (Hotplate Stirrer)       | 1 | เครื่อง |
| 3) แท่งแม่เหล็กกวนสาร (Magnetic Bar)                 | 1 | อัน     |
| 4) เครื่องปั๊มเอชพีแอลซี (HPLC pump)                 | 1 | เครื่อง |
| 5) อ่างควบคุมอุณหภูมิแบบหมุนเวียน (Circulating Bath) | 1 | เครื่อง |
| 6) เทอร์โมมิเตอร์                                    | 1 | อัน     |
| 7) ข้อต่อแก้วสำหรับติดเทอร์โมมิเตอร์กับคอของปฏิกรณ์  | 1 | อัน     |
| 8) จุกยาง  | 1 | อัน     |

##### 3.1.1 การเตรียมชุดทดลองในการเปลี่ยนกลูโคสไปเป็นกรดแลคติก

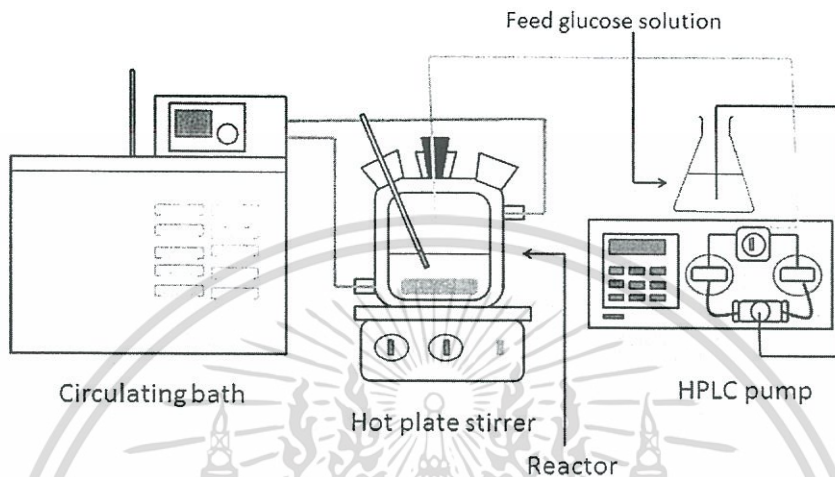
วิธีการประกอบเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองดังรูปที่ 3.1 มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) นำปฏิกรณ์สามคอแบบแจ็กเก็ตวางบนเครื่องกวนสารต่อสายเข้ากับอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบหมุนเวียนซึ่งเป็นอุปกรณ์ให้ความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ติดตั้งเทอร์โมมิเตอร์กับข้อต่อแก้วสำหรับติดตั้งเทอร์โมมิเตอร์กับคอของปฏิกรณ์ ใช้จุกยางที่มีรูปิดคอของปฏิกรณ์ 3 คอ ตรงกลางเพื่อเป็นรูสำหรับป้อนสารด้วยสายยางจากเครื่องปั๊มเอชพีแอลซี ส่วนอีกคอที่เหลือปิดด้วยจุกแก้วป้องกันอากาศจากภายนอกให้เข้าน้อยที่สุด

3) ติดตั้งปั๊มเอชพีแอลซี โดยนำสายที่ทำหน้าที่ป้อนสารใส่ลงในรูตรงกลางของปฏิกรณ์ 3 คอ เพื่อเป็นตัวป้อนสารเข้ามาในระบบแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ชุดทดลองในการเปลี่ยนกลูโคสเป็นกรดแลคติก

### 3.1.2 วิธีการทดลองเปลี่ยนกลูโคสเป็นกรดแลคติก

1) เตรียมสารละลายกลูโคสความเข้มข้นตามต้องการ เช่น ต้องการเตรียมสารละลายกลูโคส 30 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักโดยปริมาตร ทำโดยการชั่งน้ำตาลกลูโคส 30 กรัม ละลายในน้ำกลั่นจากนั้นปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร

2) นำสารละลายในข้อ 1 ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร แล้วจึงนำสายปั๊มเอชพีแอลซี จุ่มลงในสารละลาย จากนั้นล้างสายปั๊มเอชพีแอลซี ด้วยสารละลายจากข้อ 1 โดยปรับอัตราการไหลของปั๊มให้อยู่ที่ 5 มิลลิลิตรต่อนาที เพื่อให้สายยางเต็มไปด้วยด้วยสารละลายกลูโคสและพร้อมสำหรับป้อนเข้าปฏิกรณ์

3) เตรียมสารละลายต่างโดยการนำโซเดียมไฮดรอกไซด์ปริมาณ 10 กรัม ละลายในน้ำแล้วปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร จะได้สารละลายต่างเข้มข้น 2.5 โมลต่อลิตร จากนั้นนำไปบรรจุใส่เครื่องปฏิกรณ์ พร้อมกับใส่แท่งแม่เหล็กกวนสาร

4) นำเครื่องปฏิกรณ์ มาต่อกับอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบหมุนเวียนซึ่งทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิให้ได้ตามที่ต้องการ แล้วจึงวางบนเครื่องปั่นกวนสารแบบให้ความร้อน (Hotplate Stirrer) ซึ่งทำหน้าที่กวนแท่งแม่เหล็กอย่างรวดเร็ว รอจนได้อุณหภูมิที่ต้องการพร้อมกับการปั่นกวนด้วยแท่งแม่เหล็ก

5) เมื่ออุณหภูมิได้ตามที่ต้องการทำการต่อสายจากขั้นตอนที่ 2 เพื่อป้อนสารตั้งต้นลงในเครื่องปฏิกรณ์แล้วเริ่มจับเวลา

6) เก็บตัวอย่างที่ได้ ณ เวลา ต่างๆแล้วทำการหยุดปฏิกิริยาทันที โดยนำตัวอย่างที่เก็บได้ไปแช่ในอ่างน้ำแข็ง (สามารถเก็บตัวอย่างไว้ในตู้เย็น โดยไม่มีผลต่อผลิตภัณฑ์กรดอินทรีย์ที่เกิดขึ้น)

7) วิเคราะห์ผลิตภัณฑ์กรดอินทรีย์ที่เกิดขึ้น และสารตั้งต้นกลูโคสที่ลดลง



รูปที่ 3.2 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาที่เวลาต่างๆ

3.2 การวิเคราะห์น้ำตาลกลูโคสที่เหลืออยู่และผลิตภัณฑ์กรดแลคติก และกรดอินทรีย์อื่นๆ ที่เกิดขึ้นด้วยเครื่องยูวีสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

### 3.2.1 การวิเคราะห์น้ำตาลกลูโคส

สารเคมี

- 1) น้ำตาลกลูโคส
- 2) โซเดียมไฮดรอกไซด์
- 3) กรดไดโนโตรซาลิซิลิก
- 4) โซเดียม-โพแทสเซียม ทาเทรต

อุปกรณ์

- |                                     |    |      |
|-------------------------------------|----|------|
| 1) ขวดปรับปริมาตรขนาด 250 มิลลิลิตร | 1  | ขวด  |
| 2) ขวดปรับปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร  | 10 | ขวด  |
| 3) ปิเปตขนาด 10 มิลลิลิตร           | 1  | อัน  |
| 4) ปิเปตขนาด 1 มิลลิลิตร            | 1  | อัน  |
| 5) แท่งแก้ว                         | 1  | อัน  |
| 6) ปีกเกอร์ขนาด 200 มิลลิลิตร       | 2  | อัน  |
| 7) หลอดทดลองขนาด 10 มิลลิลิตร       | 10 | หลอด |
| 8) ลูกแก้ว                          | 10 | ลูก  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9) เครื่องยิวีสเปกโตรโฟโตมิเตอร์	1	เครื่อง
10) เครื่องให้ความร้อน (Hotplate)	1	เครื่อง
11) หม้อต้มน้ำ	1	อัน

### ตอนที่ 1 การเตรียมน้ำตาลกลูโคสมาตรฐาน

- 1) ชั่งน้ำตาลกลูโคส 0.1 กรัม ละลายในน้ำกลั่นมีปริมาตรรวม 10 มิลลิลิตร จะได้สารละลายน้ำตาลกลูโคสความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร
- 2) ตูตสารละลายน้ำตาลกลูโคสจากข้อ 1 มา 1 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 10 มิลลิลิตร จะได้สารละลายน้ำตาลกลูโคสความเข้มข้น 0.1 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร
- 3) เตรียมสารละลายน้ำตาลกลูโคสความเข้มข้น 0.02 0.04 0.06 และ 0.08 เปอร์เซ็นต์ ด้วยวิธีในการทำเองเดียวกับข้อ 2

### ตอนที่ 2 การเตรียมสารละลาย DNSA [29]

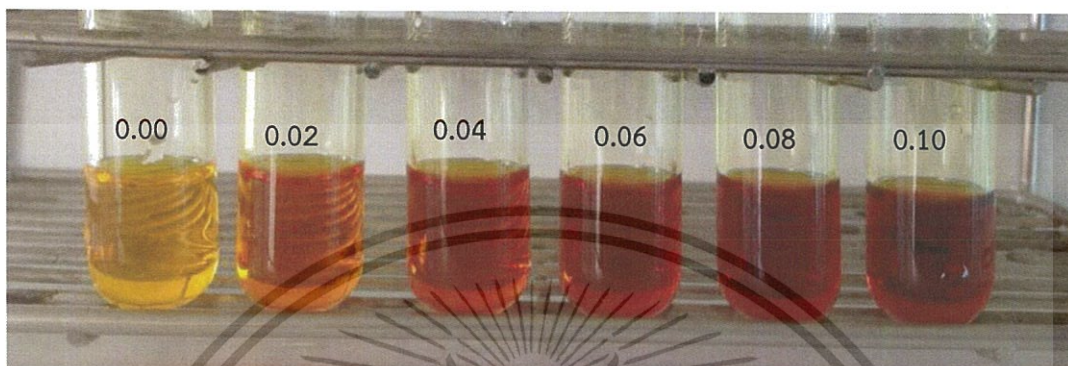
- 1) ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ 4 กรัมละลายในน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร คนให้ละลายเข้ากันจะได้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 2 โมลาร์ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร
- 2) ชั่งไดโนโตรซาลิซิลิกแอซิด 2.5 กรัมละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 50 มิลลิลิตร จากข้อ 1 คนให้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน
- 3) ชั่งโซเดียมโพแทสเซียมทาทเรต 75 กรัมใส่ลงในสารละลายข้อ 2 เติมน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตรสุดท้ายเป็น 250 มิลลิลิตร คนให้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน เก็บสารละลาย DNSA นี้ไว้ในขวดสีน้ำตาลเพื่อไม่ให้เสียสภาพ

### ตอนที่ 3 การเตรียมกราฟมาตรฐานสำหรับใช้วัดปริมาณน้ำตาลกลูโคส

- 1) ปิเปตสารละลายน้ำตาลกลูโคสที่มีความเข้มข้น 100 250 500 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ลงในหลอดทดลอง 4 หลอด หลอดละ 1 ความเข้มข้น ปริมาตร 1 มิลลิลิตร และเตรียมโดยใช้น้ำเปล่าปริมาตร 1 มิลลิลิตร 1 หลอด สำหรับใช้เป็น Blank
- 2) ปิเปตสารละลาย DNSA ลงในหลอดทดลองจากข้อ 1 หลอดละ 1 มิลลิลิตร เขย่าสารในหลอดทดลองให้เป็นเนื้อเดียวกัน
- 3) ปิดฝาของหลอดทดลองด้วยลูกแก้วเพื่อป้องกันการระเหย แล้วนำหลอดทดลองไปต้มในน้ำเดือด เป็นเวลา 10 นาที
- 4) นำสารละลายที่ผ่านการต้มแล้วมาแช่ในน้ำแข็งทันทีเพื่อหยุดปฏิกิริยา แล้วเติมน้ำกลั่น ปริมาตร 10 มิลลิลิตรลงในหลอดทดลองทุกหลอด เขย่าให้สารเป็นเนื้อเดียวกัน

5) นำสารละลายในหลอดทดลองทุกหลอดมาวัดค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ด้วยเครื่องยูวีสเปกโตรโฟโตมิเตอร์แสดงดังรูปที่ 3.5 ความยาวคลื่น 520 นาโนเมตร โดยใช้น้ำเปล่าในสารละลาย DNSA เป็น Blank จดบันทึกค่าการดูดกลืนแสงของน้ำตาลกลูโคสแต่ละความเข้มข้น

6) สร้างกราฟมาตรฐานความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคส



รูปที่ 3.3 น้ำตาลกลูโคสเปอร์เซ็นต์ต่างๆในสารละลาย DNSA

ตอนที่ 4 ขั้นตอนการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลกลูโคสหลังจากทำปฏิกิริยา

1) เก็บตัวอย่างหลังจากทำปฏิกิริยาที่เวลา 5 10 15 20 30 40 60 และ 120 นาที ของแต่ละการทดลอง

2) นำตัวอย่างที่เก็บได้มาเจือจางด้วยน้ำกลั่นให้ได้ความเข้มข้นไม่เกิน 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เพราะเครื่องยูวีสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ไม่สามารถอ่านค่าการดูดกลืนแสงของสารที่มีความเข้มข้นสูงเกินกว่านี้ได้ ดังนั้นจึงปิเปตสารละลายตัวอย่างมา 1 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตรสุดท้ายเป็น 10 มิลลิลิตร ซึ่งในแต่ละเวลาในการเก็บตัวอย่างจะมีความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสที่เปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นจึงมีการคำนวณก่อนล่วงหน้าเพื่อหาว่าควรทำการเจือเป็นเท่าใด

3) ปิเปตสารละลายตัวอย่างความเข้มข้นที่เจือจางแล้วจากข้อ 2 ลงในหลอดทดลองแต่ละหลอด ปริมาณหลอดละ 1 มิลลิลิตร และน้ำเปล่าปริมาตร 1 มิลลิลิตร 1 หลอด เพื่อใช้เป็น Blank

4) ปิเปตสารละลาย DNSA ลงในหลอดทดลองทุกหลอด หลอดละ 1 มิลลิลิตร เขย่าสารในหลอดทดลองให้เป็นเนื้อเดียวกัน

5) ปิดฝาของหลอดทดลองด้วยลูกแก้วเพื่อป้องกันการระเหย แล้วนำหลอดทดลองไปต้มในน้ำเดือด เป็นเวลา 10 นาที

6) นำสารละลายที่ผ่านการต้มแล้วมาแช่ในน้ำแข็งทันทีเพื่อหยุดปฏิกิริยา แล้วเติมน้ำกลั่นปริมาตร 10 มิลลิลิตรลงในหลอดทดลองทุกหลอด เขย่าให้สารเป็นเนื้อเดียวกัน

7) นำสารละลายในหลอดทดลองทุกหลอดมาวัดค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ด้วยเครื่องยูวีสเปกโตรโฟโตมิเตอร์แสดงดังรูปที่ 3.5 ความยาวคลื่น 520 นาโนเมตร โดยใช้น้ำเปล่าในสารละลาย DNSA เป็น Blank จดบันทึกค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่าง

8) นำค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างแต่ละหลอดที่ได้มาเทียบความเข้มข้นจากกราฟมาตรฐานความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสที่ได้จากตอนที่ 3

9) คำนวณค่าคอนเวอร์ชันกลูโคส



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างในสารละลาย DNSA



รูปที่ 3.5 เครื่องยูวีสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1) เมทานอลสำหรับ HPLC (Methanol HPLC grade,  $\geq 99.9\%$ )
- 2) กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 98%
- 3) โซเดียมซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )

#### อุปกรณ์

1) กระจกบอขวดขนาด 100 มิลลิลิตร	1	อัน
2) ปิเปตขนาด 1 มิลลิลิตร	1	อัน
3) ขวดปรับปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร	10	อัน
4) เข็มฉีดยาสำหรับกรองสารขนาด 5 มิลลิลิตร	1	อัน
5) ที่กรองสารสำหรับเข็มฉีดยา (Syringe filter)	1	กล่อง
6) เข็มสำหรับฉีดยาเข้าเครื่อง HPLC ขนาด 100 ไมโครลิตร	1	อัน
7) เครื่องโซนิเคเตอร์ (Ultrasonic Bath) ยี่ห้อ Ultrawave limited รุ่น CF2 1YY	1	เครื่อง
8) เครื่อง High Performance Liquid Chromatography (HPLC)	1	เครื่อง

#### ตอนที่ 1 การเตรียม Mobile phase

- 1) ตูดยาละลายกรดซัลฟิวริก 0.54 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตรสุดท้ายเป็น 1 ลิตร จะได้กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1 มิลลิโมล/ลิตร และชั่งโซเดียมซัลเฟต 1.136 กรัม ละลายในน้ำกลั่นปรับปริมาตรสุดท้ายเป็น 1 ลิตร จะได้สารละลายโซเดียมซัลเฟต 8 มิลลิโมล/ลิตร
- 2) นำสารละลายในข้อ 1 ผสมกัน ในอัตราส่วน 1 ต่อ 1 โดยปริมาตร จะได้ Mobile phase (pH 2.8)
- 3) เตรียมเมทานอลความเข้มข้น 60 เปอร์เซ็นต์ โดยตวงเมทานอลสำหรับ HPLC 600 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตรสุดท้ายเป็น 1 ลิตร ใช้สำหรับล้างคอลัมน์ก่อนและหลังวิเคราะห์ตัวอย่าง
- 4) นำ Mobile phase และเมทานอลที่ได้จากการเตรียม ไปโซนิเคตด้วยเครื่องโซนิเคเตอร์ แสดงดังรูปที่ 3.6 เป็นเวลา 15 นาที เพื่อไล่ฟองอากาศที่มีอยู่ในสารละลายทั้งสอง



รูปที่ 3.6 เครื่องโซนิเคเตอร์ (Ultrasonic Bath)

## ตอนที่ 2 การตั้งสภาวะการใช้งานของเครื่องไฮเพอร์สเซอร์ลิควิดโครมาโตกราฟ (High Performance Liquid Chromatograph, HPLC)

สภาวะเครื่อง HPLC ที่ใช้มีดังนี้ [29]

- 1) คอลัมน์ Phenomenex Spherclone 5 $\mu$  ODS(2) ขนาด 250 x 4.6 มิลลิเมตร
- 2) อุณหภูมิคอลัมน์ 25 องศาเซลเซียส
- 3) ดีเทกเตอร์ที่ใช้คือ UV ความยาวคลื่น 210 นาโนเมตร
- 4) Mobile phase H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 1 มิลลิโมล/ลิตร และ Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 8 มิลลิโมล/ลิตร ในอัตราส่วน 1 ต่อ 1 โดยปริมาตร (pH 2.8) อัตราการไหล 1 มิลลิลิตร/นาที

## ตอนที่ 3 การเตรียมกราฟมาตรฐานสำหรับใช้วัดปริมาณกรดอินทรีย์ที่เกิดขึ้น

- 1) เตรียมสารละลายกรดแลคติก กรดอะซิติก และกรดฟอร์มิก ที่ความเข้มข้น 100 500 1,000 2,000 4,000 และ 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเตรียมจากสารละลายเข้มข้นของกรดแลคติก กรดอะซิติก และกรดฟอร์มิก ตามลำดับ
- 2) นำสารละลายกรดอินทรีย์ที่ผ่านการกรองมาฉีดวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC แสดงดังรูปที่ 3.7 จดบันทึกพื้นที่ใต้พีคเทียบกับความเข้มข้นสารละลายกรดอินทรีย์
- 3) สร้างกราฟมาตรฐานความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ (แสดงในภาคผนวก ก.)

## ตอนที่ 4 ขั้นตอนการวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ที่เกิดขึ้น

- 1) เก็บตัวอย่างหลังจากทำปฏิกิริยาที่เวลา 5 10 15 20 30 45 60 และ 120 นาที ของแต่ละ การทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

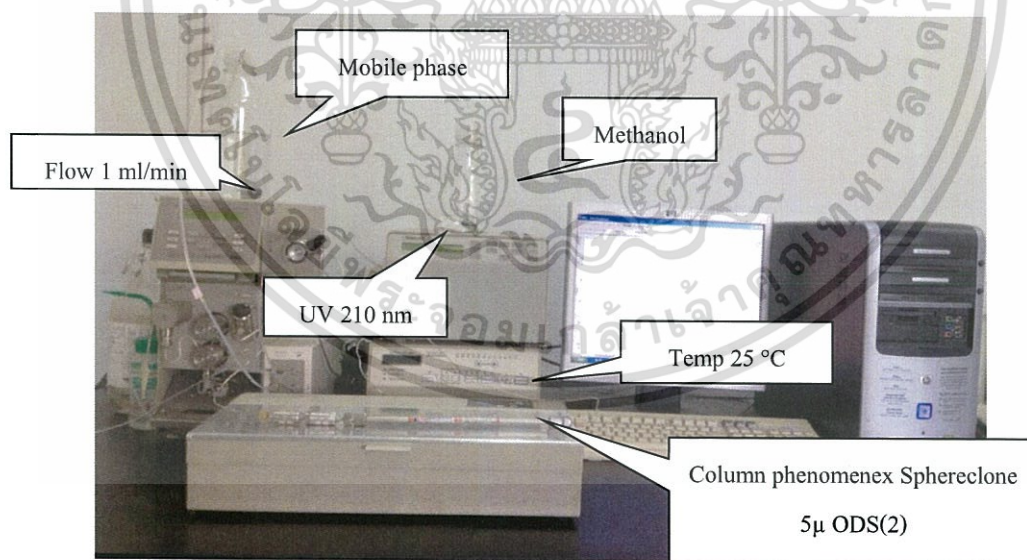
2) นำตัวอย่างที่เก็บได้มาเติมกรดซัลฟิวริก เพื่อเปลี่ยนจากผลิตภัณฑ์เกลือเป็นกรด ตัวอย่างเช่น ดังที่ใส่ก่อนการเกิดปฏิกิริยามีความเข้มข้น 2.5 โมล/ลิตร ดังนั้นควรเติมกรดซัลฟิวริก ความเข้มข้น 1.345 โมล/ลิตร (ความเข้มข้นของโปรตอนเป็น 2 เท่าเพราะกรดซัลฟิวริกมีโปรตอน 2 ตัวจึงมีความเข้มข้นโปรตอนเท่ากับ 2.69 โมล/ลิตร) ซึ่งเพียงพอในการปรับเบสให้เป็นกลางและทำให้ โซเดียมแลคเตทกลายเป็นกรดแลคติกได้ โดยเติมกรดซัลฟิวริกลงในตัวอย่างอัตราส่วน 1 ต่อ 1 โดย ปริมาตร ซึ่งทำโดยใช้ไมโครปิเปตดูดสารละลายตัวอย่างมา 1 มิลลิลิตร แล้วเติมกรดซัลฟิวริกลงไป 1 มิลลิลิตร

3) จากนั้นเจือจางด้วยน้ำกลั่นจนมีปริมาตร 10 มิลลิลิตรโดยความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ไม่ควรเกินกราฟมาตรฐานที่ทำไว้ในตอนที่ 3

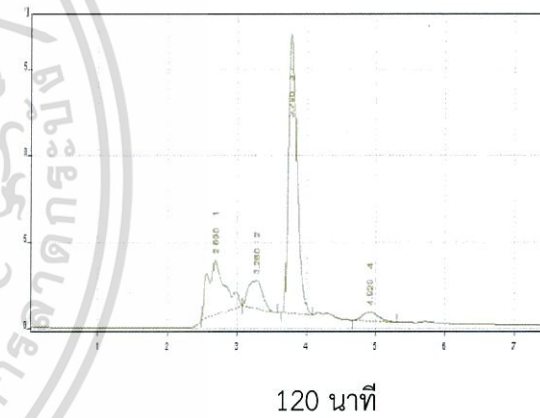
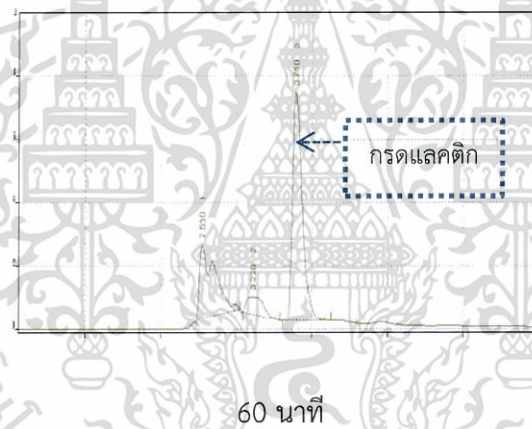
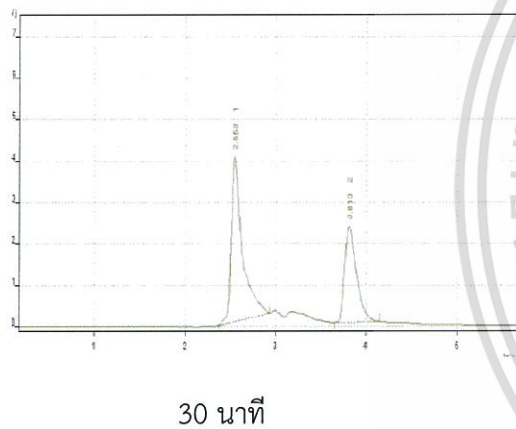
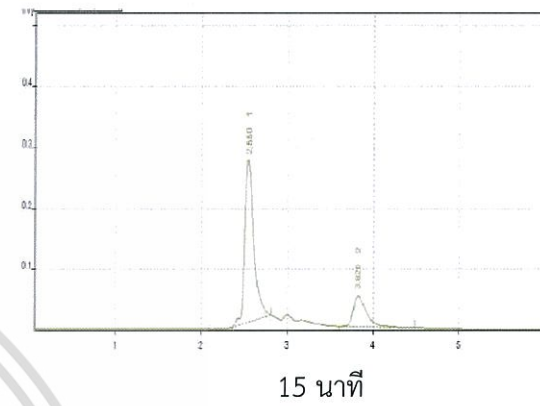
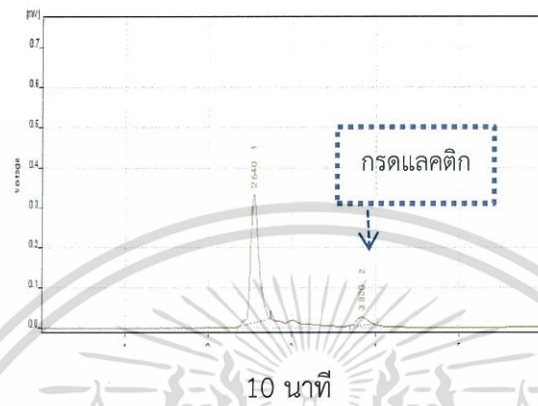
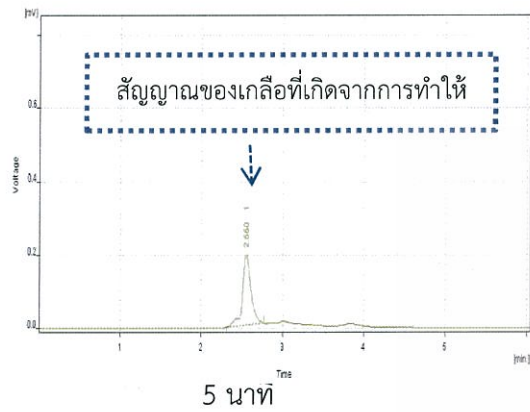
4) นำสารละลายที่ต้องการวิเคราะห์มากรองด้วยที่กรองสารสำหรับเข็มฉีดยา (Syringe filter) และนำมาฉีดวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC แสดงดังรูปที่ 3.7 จดบันทึกพื้นที่ใต้พีคโครมาโตแกรมของกรดแลคติกและกรดอินทรีย์อื่นๆ แสดงดังรูปที่ 3.8

5) นำพื้นที่ที่ได้มาเทียบความเข้มข้นจากกราฟมาตรฐานความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ที่ได้จาก ตอนที่ 2

6) คำนวณค่าผลได้ผลิตภัณฑ์กรดแลคติกและกรดอินทรีย์อื่นๆ



รูปที่ 3.7 เครื่อง High Performance Liquid Chromatograph (HPLC)



รูปที่ 3.8 โครมาโตแกรมการเปลี่ยนแปลงกลูโคสเป็นกรดแลคติกและกรดอินทรีย์อื่นๆ ที่เวลาต่าง

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปราย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงกลูโคสเป็นกรดแลคติกในสารละลายต่าง กล่าวคือ ผลของชนิดต่าง ผลของอุณหภูมิ ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยา ผลของอัตราการป้อนสารละลายน้ำตาล ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาซิงค์ออกไซด์และผลของเกลือโซเดียมซัลไฟต์ ซึ่งแสดงผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลองได้ดังนี้

#### 4.1 ผลของชนิดของต่าง

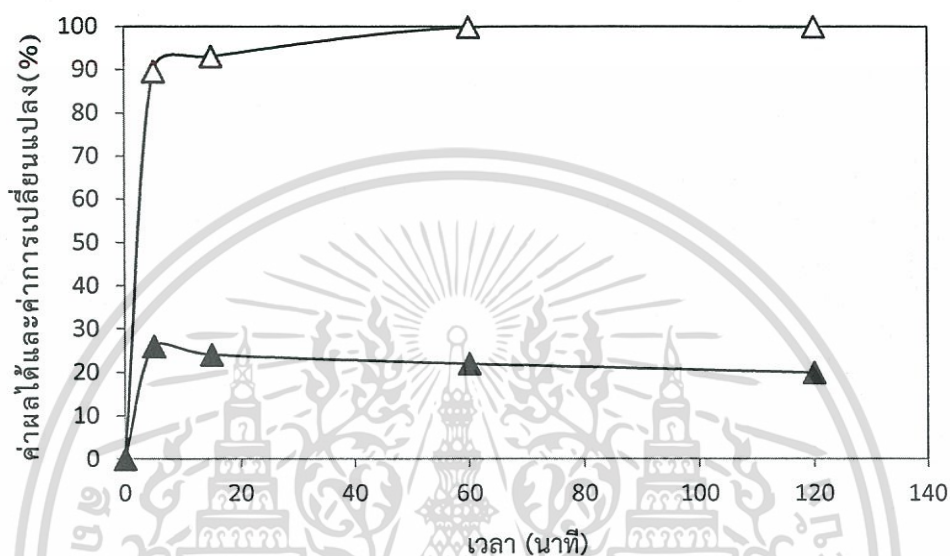
เมื่อใช้ความเข้มข้นกลูโคสเริ่มต้น 2 % w/v ในสารละลายต่างชนิดต่างๆ 4 ชนิดคือ NaOH  $\text{Ca(OH)}_2$   $\text{K}_2\text{CO}_3$   $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ  $80^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 120 นาที ความเข้มข้นต่าง 0.5 โมลต่อลิตร โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้ค่าผลได้ของกรดแลคติกสูงสุด 37.2 % ทั้งนี้เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงกลูโคสเป็นกรดแลคติกจำเป็นต้องมีปริมาณ ไฮดรอกไซด์ไอออนหรือความเป็นด่างที่มากพอเพื่อเกิดปฏิกิริยาแอลดอลคอนเดนเซชันแบบผันกลับ (Reto-aldol Condensation) ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 หัวข้อที่ 2.1.3.2 ดังนั้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความสามารถในการแตกตัวให้ไฮดรอกไซด์ไอออน 100 % จึงทำให้เกิดกรดแลคติกมากกว่าสารละลายต่างอื่นๆ ส่วนต่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์แม้จะเป็นด่างแต่มีข้อจำกัดในการละลาย (ละลายในน้ำได้น้อยกว่า 0.5%) จึงทำให้ค่าผลได้กรดแลคติกมีปริมาณน้อย ในขณะที่ต่างอ่อน เช่น โซเดียมและโปตัสเซียมคาร์บอเนตจะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ได้เป็นกรดอะซิติกมากและไม่มีกรดแลคติกเกิดขึ้น

ตารางที่ 4.1 ผลของชนิดต่างที่มีต่อผลิตภัณฑ์กรดแลคติก

ชนิดต่าง	pH ของสารละลาย	ค่าผลได้ของกรดแลคติก(%)
NaOH	วัดไม่ได้	37.2
$\text{Ca(OH)}_2$	13	13.1
$\text{K}_2\text{CO}_3$	12	-
$\text{Na}_2\text{CO}_3$	11	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากปูนขาว (CaO) มีราคาถูกเมื่อละลายน้ำเกิดเป็น  $\text{Ca(OH)}_2$  จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจที่จะทำการทดลองโดยนำปูนขาว 0.6 กรัม มาละลายน้ำและปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร แล้วจึงถ่ายสารละลายลงภาชนะแก้วที่มีฝาปิดมิดชิด จากนั้นอุ่นให้สารละลายต่างของปูนขาวให้ร้อนประมาณ  $90^\circ\text{C}$  แล้วจึงเติมผงกลูโคสลงไป 1 กรัม ก่อนจะนำไปให้ความร้อนผ่านอ่างน้ำมันที่เตรียมไว้ให้มีอุณหภูมิ  $125^\circ\text{C}$  และทำการเก็บสารตัวอย่างที่เวลาต่างๆ โดยการทดลองนี้เป็นการทดลองด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ค่าผลได้และค่าการเปลี่ยนแปลงของกลูโคสที่อุณหภูมิ  $125^\circ\text{C}$  ในต่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\Delta$ ) คือค่าการเปลี่ยนแปลงของกลูโคส และ ( $\blacktriangle$ ) คือค่าผลได้ของกรดแลคติก

จากรูปที่ 4.1 พบว่าผลได้ของกรดแลคติกในต่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากปูนขาวมีค่าประมาณ 26% ในช่วง 10 นาทีแรก และ ลดลงเรื่อยๆเมื่อเวลาผ่านไป นอกจากนั้นยังได้ผลิตภัณฑ์ที่ไม่สามารถระบุได้อีกจำนวนมาก ซึ่งอาจเป็นเพราะการละลายของปูนขาวเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่น้อย ส่งผลให้ปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออนไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาจึงทำให้ได้กรดแลคติกในปริมาณต่ำ นอกจากนี้ด้วยอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่สูงจึงส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียงอื่นๆหลายปฏิกิริยา ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์จำนวนมาก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ให้ผลได้ของกรดแลคติกมากกว่าเมื่อเทียบกับต่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในสภาวะเดียวกัน

## 4.2 ผลของความเข้มข้นต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์

จากผลการทดลองเลือกชนิดต่างข้างต้น จึงได้เลือกต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อทำปฏิกิริยากับ น้ำตาลเพื่อสังเคราะห์กรดแลคติกโดย ทำการทดสอบผลของความเข้มข้นต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อการเกิดกรดแลคติก โดยมีสภาวะการเกิดปฏิกิริยาดังนี้ ปริมาณกลูโคสเริ่มต้น 2 %w/v ในสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 120 นาที ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ แสดงผลการทดลองดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลของปริมาณความเข้มข้นที่มีต่อผลิตภัณฑ์กรดแลคติก

ความเข้มข้น NaOH(mol/L)	ค่าผลได้ของกรดแลคติก(%)
0.5	37.2
1.0	50.6
2.5	59.6
3.25	60.0

พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์มากขึ้นส่งผลต่อการเกิดกรดแลคติกในปริมาณที่สูงขึ้น ทั้งนี้เป็นผลมาจากปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออนที่สูงส่งผลให้โมเลกุลของกลูโคสมีโอกาการทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออนแล้วเกิดปฏิกิริยาแอลดอลคอนเดนเซชันแบบผันกลับ ได้ผลิตภัณฑ์เป็นกรดแลคติกและ กรดอินทรีย์อื่นๆที่ระบุปริมาณไม่ได้ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.1.3.2 และ 2.1.3.3 เช่น กรดแซคคาโรลินิก (Saccharinic Acid) และ สารมวลโมเลกุลขนาดใหญ่ (High Molecular Weight Compound) ที่มีสีน้ำตาล แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์จาก 2.5 ไปเป็น 3.25 โมลต่อลิตร พบว่า ค่าผลได้ของกรดแลคติกมีค่าต่างกันเพียงเล็กน้อยเนื่องจากความเข้มข้นต่าง 2.5 โมลต่อลิตรมีปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออนที่มากเกินไปสำหรับการเกิดปฏิกิริยาไปเป็นกรดแลคติก ดังนั้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ไปเป็น 3.25 โมลต่อลิตรจึงไม่ค่อยส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของกรดแลคติก

### 4.3 ผลของปริมาณกลูโคสเริ่มต้น

จากการศึกษาในหัวข้อ 4.2 เมื่อใช้กลูโคสเข้มข้นเริ่มต้น 2% พบว่าความเข้มข้นต่าง 2.5 โมลต่อลิตร ที่มีปริมาณต่างมากเพียงพอต่อการเกิดแลคติก ดังนั้น เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นน้ำตาลกลูโคสเริ่มต้นในปริมาณต่างๆ ที่ส่งผลต่อค่าผลได้ของกรดแลคติกจึงใช้กลูโคสเริ่มต้น 2 5 10 20 กรัม ทำปฏิกิริยากับสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 และ 2 โมลต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 50 °C นาน 120 นาที ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ได้ผลแสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลของปริมาณกลูโคสเริ่มต้นที่ส่งผลต่อค่าผลได้ของกรดแลคติก ในสถานะต่าง 1 และ 2.5 โมลต่อลิตร

ความเข้มข้นกลูโคส เริ่มต้น(กรัม)	ค่าผลได้ของกรดแลคติก(%) ที่ความเข้มข้นต่าง	
	1 โมลต่อลิตร	2.5 โมลต่อลิตร
	2	50.6
5	43.4	50.7
10	28.6	45.4
20	5.5	26.3

จากตารางที่ 4.3 พบว่าที่ความเข้มข้นของกลูโคสเริ่มต้น 2% ให้ค่าผลได้กรดแลคติกมากที่สุดทั้งกรณีความเข้มข้นต่าง 1 และ 2.5 โมลต่อลิตร เนื่องจากความเข้มข้นของสารตั้งต้นส่งผลต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้ โดยที่ความเข้มข้นของกลูโคสสูงพบว่าจะเกิดปฏิกิริยาได้ผลิตภัณฑ์ข้างเคียงเป็น กรดแซคคาโรนิก (Saccharinic Acid) และ เกิดปฏิกิริยาคาลาเมลไรเซชัน (Caramellisation) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารมวลโมเลกุลขนาดใหญ่ และ สังเกตเห็นเป็นสารสีน้ำตาล ซึ่งผลิตภัณฑ์เหล่านี้เกิดจากสัดส่วนโดยโมลของต่างต่อน้ำตาลน้อย ทำให้ไฮดรอกไซด์ไอออนไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาไปเป็นกรดแลคติก ดังนั้นการใช้สารตั้งต้นกลูโคสในปริมาณต่ำเมื่อเทียบกับต่างจึงเป็นสิ่งจำเป็นในการเปลี่ยนกลูโคสไปเป็นกรดแลคติก

#### 4.4 ผลของอุณหภูมิ

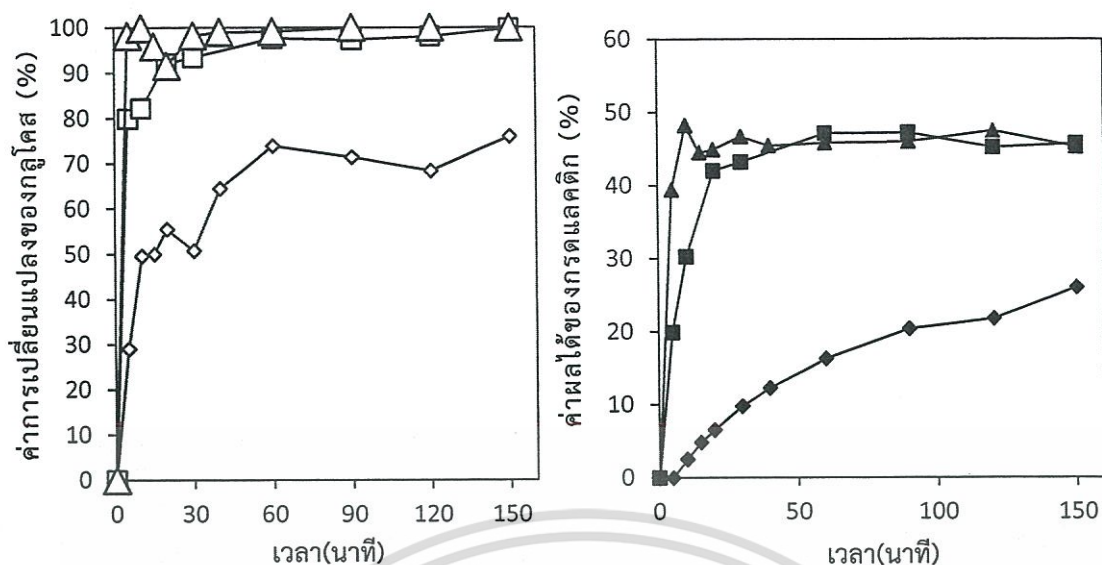
จากผลการทดลองข้างต้นได้ทำการทดลองที่อุณหภูมิ คงที่  $50^{\circ}\text{C}$  จึงได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนกลูโคสเป็นกรดแลคติกโดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 50 และ  $80^{\circ}\text{C}$  ความเข้มข้นกลูโคสเริ่มต้นเท่ากันคือ 2 กรัม ความเข้มข้นต่าง 2.5 โมลต่อลิตร และ เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ แสดงผลการทดลองดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อค่าผลได้ของกรดแลคติก

เวลาในการทำ ปฏิกิริยา(ชั่วโมง)	ค่าผลได้ของกรดแลคติก(%) ที่อุณหภูมิ	
	$50^{\circ}\text{C}$	$80^{\circ}\text{C}$
2	59.6	55.4

พบว่าค่าผลได้ของกรดแลคติกที่อุณหภูมิ  $50^{\circ}\text{C}$  มากกว่าที่อุณหภูมิ  $80^{\circ}\text{C}$  อยู่ประมาณ 5% เนื่องจากที่อุณหภูมิ  $50^{\circ}\text{C}$  สารตั้งต้นค่อยๆเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียงได้น้อยกว่าที่สภาวะอุณหภูมิสูง เพราะ เมื่อทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูง ระบบจะมีพลังงานมากพอที่จะสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาอื่นๆ แข่งขันกับ ปฏิกิริยาการเกิดกรดแลคติกได้มากขึ้น ดังนั้นการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ  $50^{\circ}\text{C}$  จึงให้ค่าผลได้ของกรดแลคติกที่มากกว่าที่อุณหภูมิ  $80^{\circ}\text{C}$

นอกจากนี้ยังทำการทดลองที่อุณหภูมิ 50 70 และ  $80^{\circ}\text{C}$  โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งกะ (Semi Batch Reactor) ความเข้มข้นของด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์เริ่มต้น 2.5 โมลต่อลิตร โดยป้อนสารละลายกลูโคส 30 %w/v อัตราการไหล 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลา 120 นาที ด้วยปั๊ม HPLC จากนั้นหยุดป้อนสาร แล้วปล่อยให้ปฏิกิริยาดำเนินต่อไปอีก 30 นาที เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของกลูโคสไปเป็นกรดแลคติกที่อุณหภูมิต่างๆ และหาสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยา ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.2



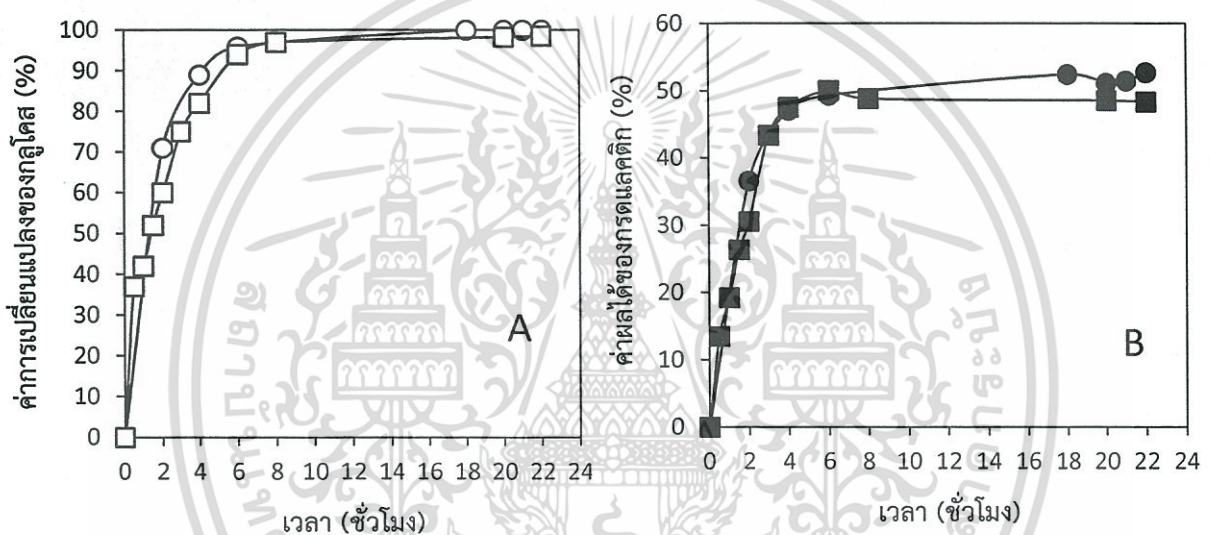
รูปที่ 4.2 ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งกะ (A) คือค่าการเปลี่ยนแปลงของกลูโคส ที่ 50°C (◇) 70°C (□) 80°C (△) และ (B) คือค่าผลได้ของกรดแลคติก ที่ 50°C (◆) 70°C (□) 80°C (△)

จากกราฟที่ 4.2B สังเกตได้ว่าที่อุณหภูมิที่อุณหภูมิ 70 และ 80°C ได้ค่าผลได้ของกรดแลคติกที่เวลา 150 นาที มีปริมาณใกล้เคียงกันประมาณ 45% ส่วนที่อุณหภูมิ 50°C ค่าผลได้ของกรดแลคติก 26% โดยสังเกตได้ว่าที่อุณหภูมิ 70 และ 80°C ค่าผลได้ของกรดแลคติกเพิ่มขึ้นและคงที่อย่างรวดเร็ว เป็นที่ทราบกันดีว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเร็วขึ้นทำให้จึงเห็นว่าที่อุณหภูมิ 70 และ 80°C เกิดปฏิกิริยาเร็วในช่วงแรกแล้วจึงคงที่ ส่วนที่อุณหภูมิ 50°C ได้ค่าผลได้น้อยกว่าที่อุณหภูมิ 70 และ 80°C ที่เวลาเท่ากัน เนื่องจากปฏิกิริยาค่อยๆเกิดการเปลี่ยนแปลงและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เพราะปริมาณสารตั้งต้นยังคงเหลืออยู่ โดยสามารถสังเกตได้จากรูปที่ 4.2A และในขณะที่อุณหภูมิ 70 และ 80°C สารตั้งต้นกลูโคสถูกใช้ในการเกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว และไม่เหลือสารตั้งต้นให้เกิดปฏิกิริยาต่อไปอีก แต่อย่างไรก็ตาม การเกิดปฏิกิริยาที่ 50°C ถ้าใช้เวลาในการทำปฏิกิริยามากขึ้น ค่าผลได้ของกรดแลคติกได้เพิ่มสูงขึ้นมากกว่าที่อุณหภูมิ 70 และ 80°C ในลักษณะเดียวกับผลการทดลองในกรณีการใช้ปฏิกรณ์แบบกะในตารางที่ 4.4

#### 4.5 ผลของอัตราการป้อนสารละลายกลูโคสในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งกะ

การป้อนสารละลายน้ำตาลเข้าสู่ปฏิกรณ์แบบกึ่งกะที่เต็มไปด้วยสารละลายต่างเข้มข้นมีข้อดีในด้านมีต่างปริมาณมากเกินพอในช่วงแรกของการทำปฏิกิริยา อย่างไรก็ตามการค่อยๆป้อนสารละลายกลูโคสเจือจางเข้าระบบมีข้อเสียคือทำให้ระบบเต็มไปด้วยน้ำ ซึ่งทำให้สารละลายต่างโซเดียมไฮดรอก

ไซต์ในระบบเจือจางลง และเพื่อเป็นการศึกษาผลของอัตราการป้อนสารละลายกลูโคส ที่ส่งผลต่อค่าผลได้ของกรดแลคติกจึงได้ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งกะโดยใช้สารละลายต่างไซเตียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นเริ่มต้น 3.25 โมลต่อลิตร เพื่อให้ระบบมีความเข้มข้นของต่างที่มากเพียงพอแม้จะป้อนสารละลายกลูโคสเจือจางที่เต็มไปด้วยน้ำเข้าระบบ โดยทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ  $50^{\circ}\text{C}$  และป้อนสารละลายกลูโคสเข้มข้น 16.7 %w/v อัตราการป้อน 0.1 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลา 20 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้ปฏิกิริยาดำเนินต่อไปอีก 2 ชั่วโมง ทำการทดลองเทียบกับกรณี ป้อนสารละลายกลูโคสเข้มข้น 30 %w/v อัตราการป้อน 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลา 120 นาที แล้วปล่อยให้ปฏิกิริยาดำเนินต่อไปจนถึงเวลา 22 ชั่วโมง เมื่อคิดเป็นปริมาณน้ำตาลแล้วสองการทดลองนี้มีปริมาณน้ำตาลเท่ากัน คือ 20 กรัม แสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.3

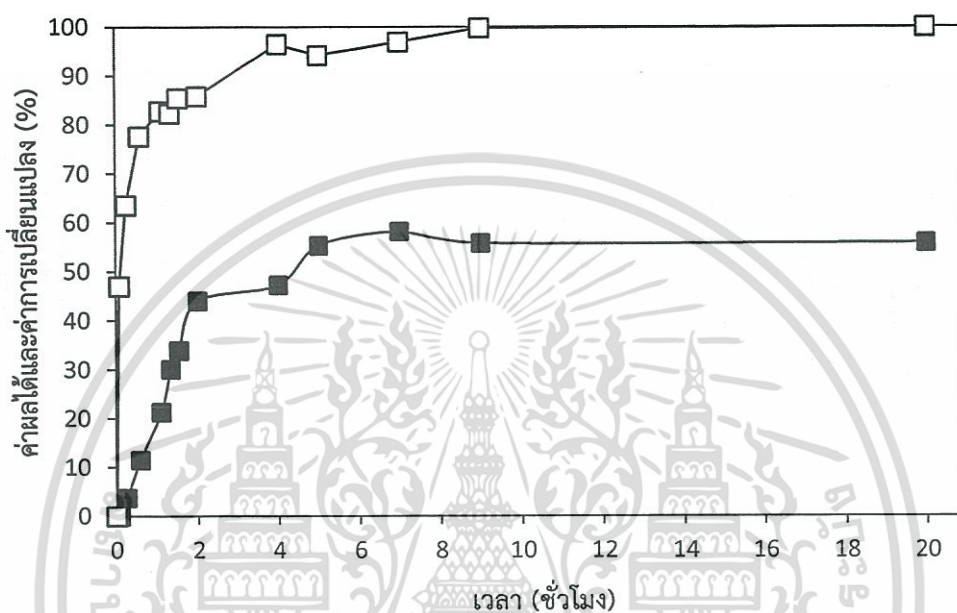


รูปที่ 4.3 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกลูโคสและค่าผลได้ของกรดแลคติก ที่อุณหภูมิ  $50^{\circ}\text{C}$  ที่เวลาใดๆ A คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงของกลูโคส (□) และ (○) คืออัตราการป้อนสารละลายกลูโคสที่ 0.5 และ 0.1 มิลลิลิตรต่อนาทีตามลำดับ B คือ ค่าผลได้ของกรดแลคติก (■) และ (●) คืออัตราการป้อนสารละลายกลูโคสที่ 0.5 และ 0.1 มิลลิลิตรต่อนาทีตามลำดับ

จากรูปที่ 4.3B แสดงให้เห็นว่าค่าผลได้ของกรดแลคติกในกรณีอัตราการป้อนสารละลายกลูโคส 0.1 มิลลิลิตรต่อนาที มีแนวโน้มค่อยๆเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปจนถึงเวลา 22 ชั่วโมง ได้ค่าผลได้ของกรดแลคติก 53% ส่วนกรณีอัตราการป้อนสารละลายกลูโคส 0.5 มิลลิลิตรต่อนาทีมีแนวโน้มที่ค่อยๆเพิ่มขึ้นในลักษณะเดียวกัน แต่ค่าผลได้ของกรดแลคติกมีค่า 48% ที่เวลา 4 ชั่วโมงแล้วคงที่จนถึงเวลา 22 ชั่วโมง เมื่อเปรียบเทียบค่าผลได้ของกรดแลคติก กรณีอัตราการป้อนสารละลายกลูโคส 0.1 มิลลิลิตรต่อนาที สูงกว่ากรณี 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที ถึง 5% เนื่องจากการค่อยๆป้อนสารเป็นการรักษาปริมาณกลูโคสในระบบให้ต่ำอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นกลูโคสจึงเกิดปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กันเองไปเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียงได้น้อยลง แต่อย่างไรก็ตามการค่อยๆป้อนสารยังมีข้อเสียคือต้องใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานานกว่าถึง 18 ชั่วโมงเมื่อลดความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสในระบบลง โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ  $50^{\circ}\text{C}$  ในปฏิกรณ์แบบกึ่งกะ ความเข้มข้นของต่างเริ่มต้น 3.25 โมลต่อลิตร อัตราการไหลสารละลายกลูโคส 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นของสารละลายกลูโคส 30 %w/v โดยหยุดป้อนสารที่เวลา 66 นาที (คิดเป็นปริมาณน้ำตาล 10 กรัม) แล้วปล่อยให้ปฏิกิริยาดำเนินต่อไปอีก 19 ชั่วโมง แสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.4

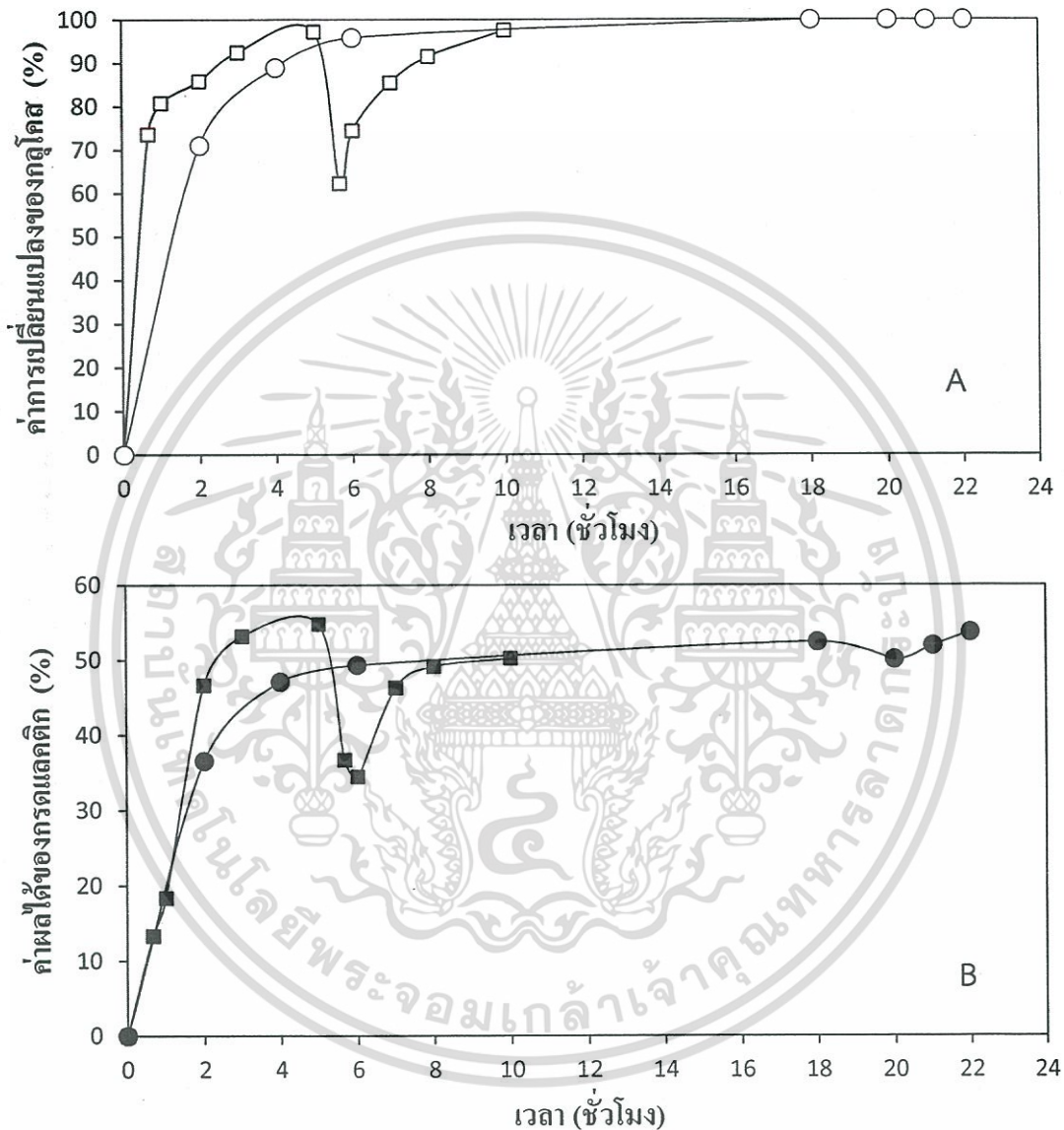


รูปที่ 4.4 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกลูโคสและค่าผลได้ของกรดแลคติก ที่อุณหภูมิ  $50^{\circ}\text{C}$  เทียบกับเวลา (□) คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงของกลูโคส (■) คือ ค่าผลได้ของกรดแลคติก

จากรูปที่ 4.4 จะสังเกตได้ว่าค่าผลได้ของกรดแลคติกค่อยๆเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนคงที่ประมาณ 55% ที่เวลา 5 ชั่วโมง ซึ่งสูงกว่าทั้งในกรณีค่อยๆป้อนสารละลายกลูโคสและการป้อนสารละลายกลูโคสแบบต่อเนื่องดังที่แสดงไว้ในผลการทดลองก่อนหน้า ในรูปที่ 4.3 นอกจากนี้ยังใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาเพียง 5 ชั่วโมง เพื่อให้ได้ค่าผลได้ของกรดแลคติกที่ 55% ทั้งนี้เป็นเพราะสัดส่วนโดยโมลของต่างต่อน้ำตาลที่มากกว่า เนื่องจากป้อนสารละลายกลูโคสเข้าระบบน้อยกว่า(เมื่อคิดเป็นปริมาณน้ำตาลแล้วประมาณ 10 กรัม เมื่อเทียบกับผลการทดลองในรูปที่ 4.3 ใช้ปริมาณน้ำตาลสูงถึง 20 กรัม) ดังนั้นจึงทำให้ปริมาณต่างเพียงพอในการเปลี่ยนแปลงกลูโคสเป็นกรดแลคติก โดยสัดส่วนโดยโมลของน้ำตาลกลูโคสต่อต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์อยู่ที่ 1:6 แต่ทั้งนี้การใช้สัดส่วนน้ำตาลต่อต่างเช่นนี้เป็นการสิ้นเปลืองเพราะเหลือต่างในระบบปริมาณมาก ดังนั้นจึงทำการทดลองที่สภาวะเดียวกันคืออุณหภูมิ  $50^{\circ}\text{C}$  ความเข้มข้นของต่างเริ่มต้น 3.25 โมลต่อลิตร แต่ อัตราการไหลสารละลายกลูโคส 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นของสารละลายกลูโคส 30 %w/v โดยหยุดป้อนสารที่เวลา 66 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แล้วปล่อยให้ปฏิกิริยาดำเนินต่อไปอีก 4 ชั่วโมง จากนั้นก็ป้อนสารละลายกลูโคสอีกครั้งเป็นเวลา 66 นาที แล้วปล่อยให้ปฏิกิริยาดำเนินต่อไปอีก 4 ชั่วโมง (รวมแล้วป้อนสารละลายกลูโคส 2 ครั้ง คิดเป็นปริมาณกลูโคสที่ป้อนประมาณ 20 กรัม) โดยเทียบผลการทดลองกับรูปที่ 4.3 กรณีการป้อนสารละลายกลูโคสเข้มข้น 16.7%w/v อัตราการไหล 0.1 มิลลิลิตรต่ออนาที เป็นเวลา 20 ชั่วโมง ซึ่งคิดเป็นปริมาณน้ำตาลแล้วได้ 20 กรัมเท่ากัน ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.5



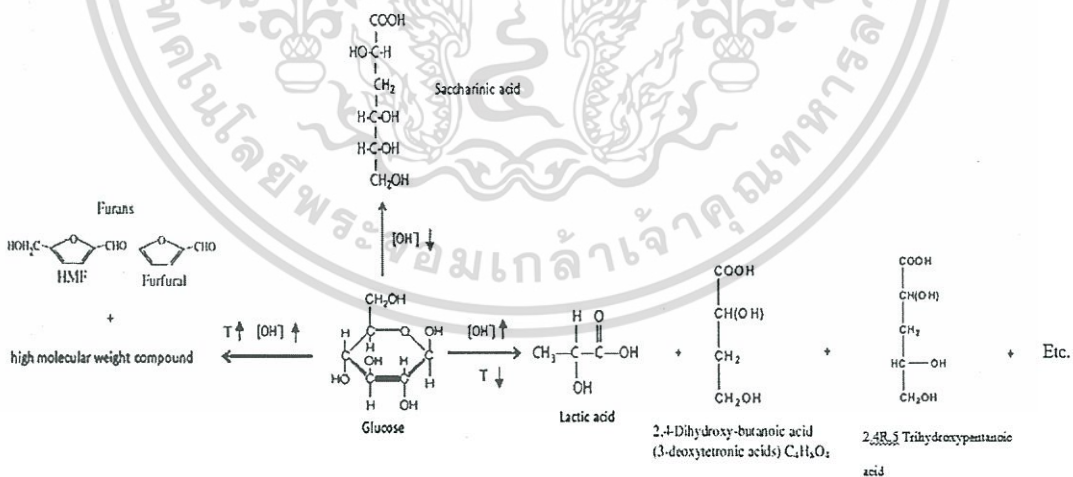
รูปที่ 4.5 ผลของปริมาณกลูโคสในระบบที่อุณหภูมิ 50°C เทียบกับเวลา A คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงของกลูโคส (○) และ (□) คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงของกลูโคสกรณีป้อนสารละลายกลูโคสเข้มข้นสูงเป็นเวลา 66 นาที และป้อนสารละลายกลูโคสเข้มข้นต่ำ 20 ชั่วโมง ตามลำดับ B คือค่าผลได้ของกรดแลคติก (●) และ (■) คือ ค่าผลได้กรดแลคติก กรณีป้อนสารละลายกลูโคสเข้มข้นสูงเป็นเวลา 66 นาที และป้อนสารละลายกลูโคสเข้มข้นต่ำ 20 ชั่วโมง ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.5B พบว่าค่าผลได้ของกรดแลคติก กรณีป้อนสารละลายกลูโคส 2 ครั้ง ในช่วงแรกพบว่าค่าผลได้ของกรดแลคติกค่อยๆเพิ่มขึ้นหลังหยุดป้อนสารจนมีค่า 56% ที่เวลา 5 ชั่วโมง แต่เมื่อป้อนสารละลายกลูโคสเข้าระบบเป็นครั้งที่ 2 พบว่าค่าผลได้ของกรดแลคติกลดลงเนื่องจากปริมาณกลูโคสที่เติมเข้าไปยังไม่ได้เปลี่ยนไปเป็นกรดแลคติกแต่เมื่อหยุดป้อนสารที่เวลา 6 ชั่วโมงแล้วปล่อยให้ ปฏิกิริยาดำเนินต่อไปอีก 4 ชั่วโมงพบว่าค่าผลได้ของกรดแลคติกมีค่า 50 % ซึ่งเมื่อเทียบผลการทดลองกับกรณีป้อนสารละลายกลูโคสเข้มข้นต่ำต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 20 ชั่วโมง พบว่ากรณีการป้อนสารละลายเข้มข้นแบบป้อนและหยุดให้ค่าผลได้ของกรดแลคติกน้อยกว่ากรณีการป้อนสารละลายกลูโคสเข้มข้นต่ำ 3% แต่ต้องใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาเร็วกว่าถึง 2.2 เท่า ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าวิธีการป้อนสารละลายกลูโคสเข้มข้นแล้วจึงปล่อยให้ปฏิกิริยาดำเนินต่อไปอีกระยะหนึ่ง เป็นอีกวิธีที่สามารถลดการสะสมของกลูโคสในระบบและให้ค่าผลได้ของกรดแลคติกสูงในระดับที่ยอมรับได้เช่นกัน

#### 4.6 ผลของเกลือโซเดียมซัลไฟต์

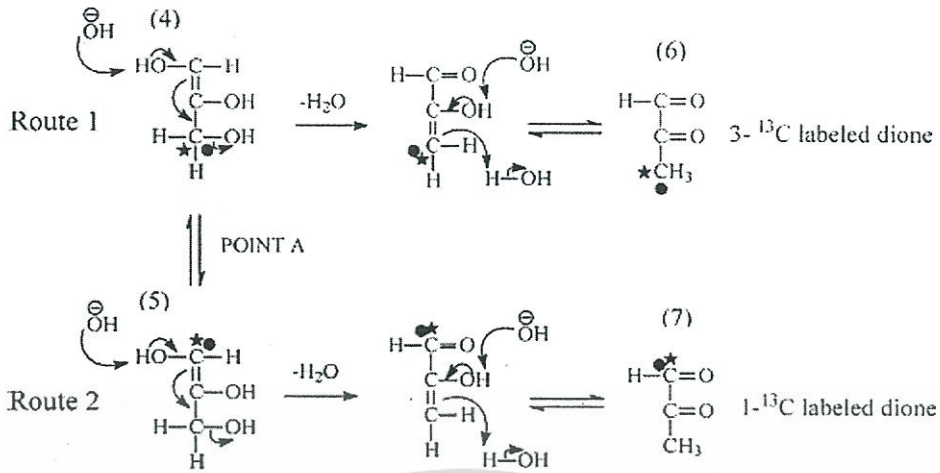
จากงานวิจัยของ Staffan Bergstrom[12] กล่าวว่ากรณีการมีอยู่ของเกลือโซเดียมซัลไฟต์ในปริมาณเล็กน้อยส่งผลยังการเปลี่ยนแปลงกลูโคสไปเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียงจำพวก สารมวลโมเลกุลใหญ่ผ่านการเกิดปฏิกิริยาคาลาเมลไรเซชัน ซึ่งเป็นสารที่มีสีน้ำตาล โดยปัจจัยหลักที่สนับสนุนการเกิดปฏิกิริยาคาลาเมลไรเซชัน คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของกลูโคส ความเข้มข้นของด่าง อุณหภูมิ และเวลาในการทำปฏิกิริยา แสดงแผนผังปฏิกิริยาได้ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 การเกิดปฏิกิริยาอย่างง่ายของกลูโคสในสารละลายต่าง[11,12]

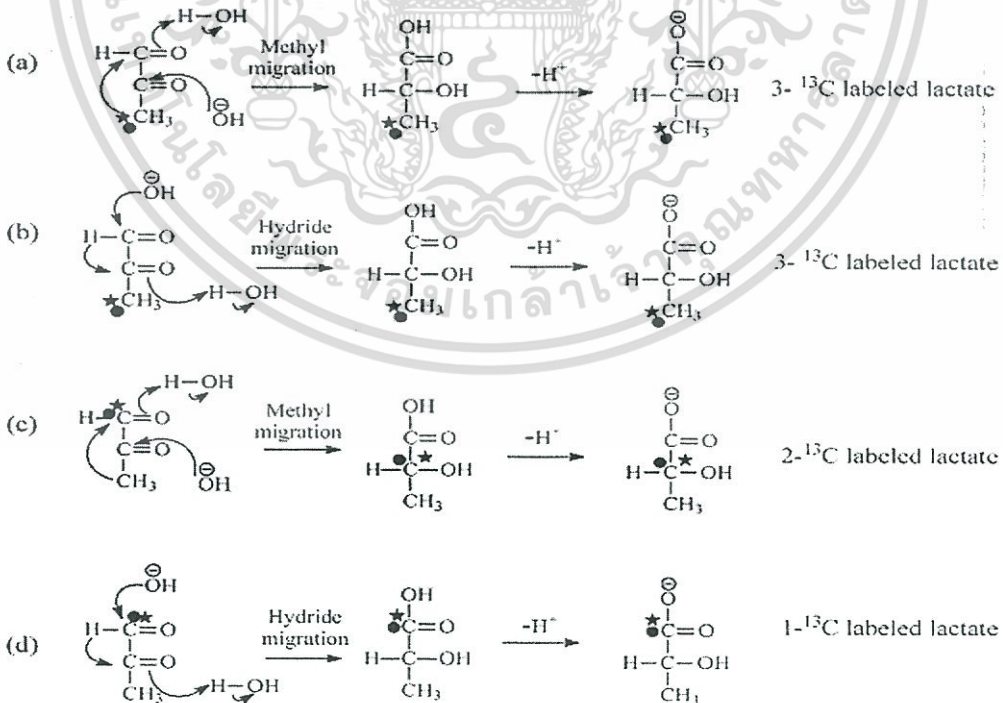
ดังนั้นจึงได้ทำการทดลองโดยมีข้อสันนิษฐานว่าเกลือโซเดียมซัลไฟต์ ส่งผลให้เกิดผลิตภัณฑ์ข้างเคียงน้อยลงนั้นหมายถึงส่งผลให้มีสารตั้งต้นเหลือมากขึ้นทำให้โอกาสที่จะเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการมากยิ่งขึ้น จึงทำการทดลองโดยใช้ปฏิกรณ์แบบกึ่งกะที่อุณหภูมิ  $50^{\circ}C$  ความเข้มข้นของด่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



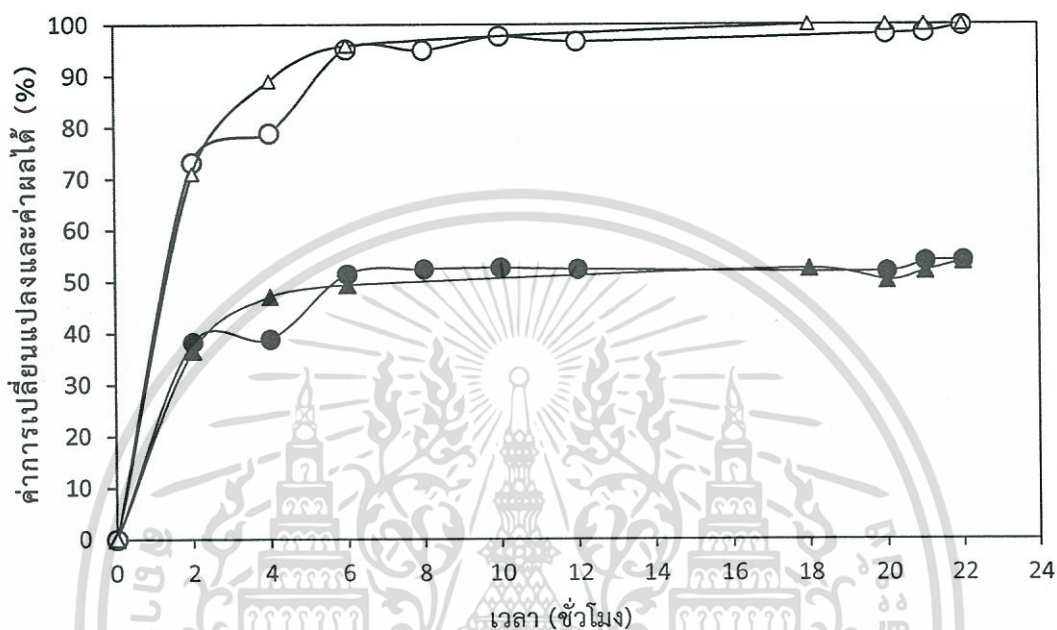
รูปที่ 2.22 กลไกของ ไตรโอส อีนไดออล (Triose-Enediol) เกิดปฏิกิริยาบีตาอิลิมีเนชัน ( $\beta$ -Elimination) ไปเป็น Diones

จากรูปที่ 2.22 แสดงถึงการเกิดของ 1,2-diones (6) และ (7) จาก (4) และ (5) ผ่านปฏิกิริยาบีตาอิลิมีเนชัน ( $\beta$ -Elimination) ของน้ำ ได้เป็น 3- $^{13}\text{C}$  Labeled Dione และ 1- $^{13}\text{C}$  Labeled Dione ซึ่ง สองสารนี้สามารถเกิดปฏิกิริยาต่อไปเป็นแลคเตทได้ดังรูปที่ 2.23 โดยสาร (6) เกิดการจัดเรียงรูปร่างใหม่ผ่านกลไก (a) การเคลื่อนย้ายของเมทิลกรุป และ (b) การเคลื่อนย้ายของไฮดรอกซิลกรุป ในทางกลับกันสาร (7) เกิดปฏิกิริยาผ่านกลไก (c) และ (d) ได้เป็น แลคเตทเช่นกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 2.23 การเกิดแลคเตทจาก ไดอโนน (Dione) ห้มาใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โซเดียมไฮดรอกไซด์เริ่มต้น 3.25 โมลต่อลิตร และเกลือโซเดียมซัลไฟต์ความเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร ซึ่งอัตราการไหลสารละลายกลูโคส 0.1 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นของสารละลายกลูโคส 16.7 %w/v โดยหยุดป้อนสารที่เวลา 20 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เวลาดำเนินต่อไปอีก 2 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 4.8 โดยเทียบผลการทดลองกับกรณีไม่มีเกลือในระบบดังผลการทดลองในรูปที่ 4.4

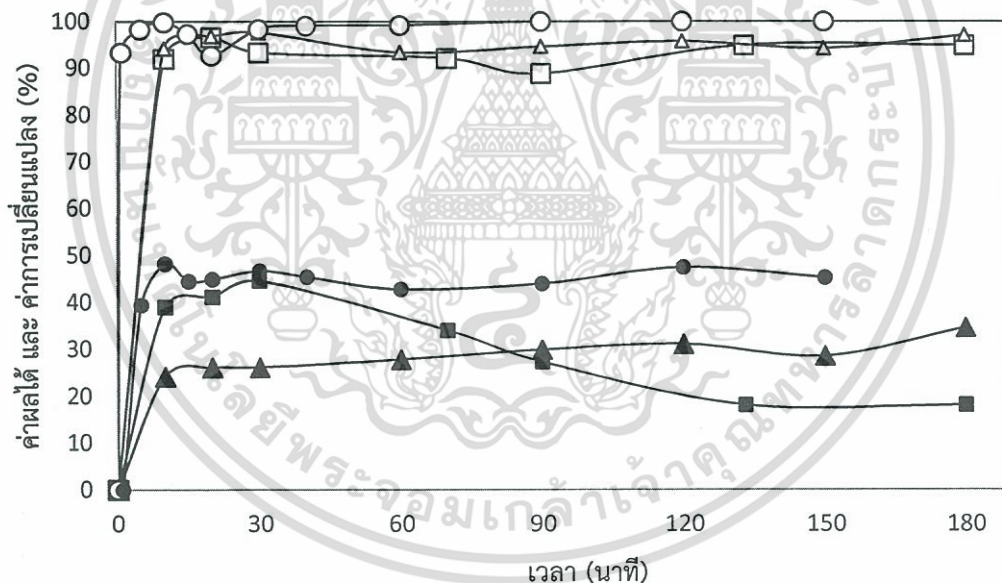


รูปที่ 4.7 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกลูโคสและค่าผลได้ของกรดแลคติก ที่อุณหภูมิ 50°C กรณีมีเกลือโซเดียมซัลไฟต์และกรณีไม่มีเกลือ (O) และ (Δ) คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงของกลูโคสของกรณีมีเกลือและไม่มีเกลือตามลำดับ (●) และ (▲) คือ ค่าผลได้ของกรดแลคติกกรณีมีเกลือและไม่มีเกลือตามลำดับ

จากรูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่าค่าผลได้ของกรดแลคติกทั้งในกรณีที่มีและไม่มีเกลือมีค่าเท่ากันคือ 53% นอกจากนี้ สีของสารละลายผสมไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด จึงสรุปได้ว่าเกลือโซเดียมซัลไฟต์ไม่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของกรดแลคติกและการลดลงของผลิตภัณฑ์จำพวกคาเมลหรือ สารมีสีน้ำตาล ทั้งนี้อาจเป็นเพราะสถานะที่ใช้เป็นต่างสูงเกินไปจึงทำให้การมีอยู่ของเกลือไม่ส่งผลยับยั้งการเกิดคาเมลไลเซชัน แต่ถ้าลดปริมาณความเข้มข้นของต่างลงจะทำให้กลูโคสเปลี่ยนไปเป็นกรดแลคติกได้ลดลงดังผลการทดลองในตารางที่ 4.3 ดังนั้นในการสังเคราะห์กรดแลคติกในสถานะต่างจึงหลีกเลี่ยงการเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียงจำพวกสารมีสีไม่ได้

#### 4.7 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะซิงก์ออกไซด์(ZnO)

ในบางงานวิจัยก่อนหน้านี้ได้มีการศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาของโลหะออกไซด์ที่อุณหภูมิสูงถึง  $270^{\circ}\text{C}$  ต่อการสังเคราะห์กรดแลคติกในสารละลายกลูโคสที่ไม่มีต่างซึ่งพบว่าการมีอยู่ของโลหะออกไซด์บางชนิดส่งผลต่อค่าผลได้ของกรดแลคติกที่สูงขึ้นเล็กน้อยและได้กรดอะซิติกที่เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ในสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ  $80^{\circ}\text{C}$  โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งกะดังนี้ 1. ความเข้มข้นของต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์เริ่มต้น 1 โมลต่อลิตร เทียบกับ 2. ความเข้มข้นของต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์เริ่มต้น 2.5 โมลต่อลิตร โดยมี ตัวเร่งปฏิกิริยาซิงค์ออกไซด์ในปริมาณที่เท่ากันคือ 0.5 โมลต่อลิตร และ 3. เทียบกับกรณีใช้ความเข้มข้นต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์เริ่มต้น 2.5 โมลต่อลิตรโดยปราศจากตัวเร่งปฏิกิริยาซิงค์ออกไซด์ อัตราการไหลสารละลายกลูโคส 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นของสารละลายกลูโคส 30 %w/v เท่ากันทั้ง 3 การทดลอง โดยหยุดป้อนสารที่เวลา 120 นาที แล้วปล่อยให้ปฏิกิริยาดำเนินต่อไปอีก 60 นาที แสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกลูโคสและค่าผลได้ของกรดแลคติก ที่อุณหภูมิ  $80^{\circ}\text{C}$  ที่สถานะต่างเริ่มต้น 1 โมลต่อลิตร เทียบกับ 2.5 โมลต่อลิตร โดยมี ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณที่เท่ากัน ( □ ) และ ( △ ) คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงของกลูโคสที่ความเข้มข้นต่างเริ่มต้น 1 และ 2.5 โมลต่อลิตรตามลำดับ ( ■ ) และ ( ▲ ) คือ ค่าผลได้ของกรดแลคติกที่ความเข้มข้นต่างเริ่มต้น 1 และ 2.5 โมลต่อลิตรตามลำดับ ส่วน ( ○ ) และ ( ● ) คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงของกลูโคสและค่าผลได้ของกรดแลคติกที่ความเข้มข้นต่างเริ่มต้น 2.5 โมลต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่กรณีนีไม่มีซิงค์ออกไซด์ตามลำดับศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าที่สภาวะความเข้มข้นต่าง 2.5 โมลต่อลิตร กรณีที่มีโลหะซิงค์ออกไซด์ ให้ค่าผลได้ของกรดแลคติก น้อยกว่ากรณีที่ไม่มีซิงค์ออกไซด์ เนื่องจากที่สภาวะความเข้มข้นของต่างสูงถึง 2.5 โมลต่อลิตร ส่งผลต่อสปีซีของซิงค์ให้อยู่ในรูปของโซเดียมซิงค์ไฮดรอกไซด์ ( $\text{Na}_2(\text{Zn}(\text{OH})_4)$ ) ซึ่งไม่มีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาและการเกิดคอมเพล็กซ์ของซิงค์ไฮดรอกไซด์ยังเป็นการใช้ไฮดรอกไซด์ไอออนในสารละลายมาเกิดคอมเพล็กซ์และทำให้มีไฮดรอกไซด์ไอออนในสารละลายน้อยลง ซึ่งสามารถสังเกตได้ว่ามีการเกิดคอมเพล็กซ์ไฮดรอกไซด์จากการทดลองคือ สารละลายเป็นสีใสไม่มีตะกอนของซิงค์ออกไซด์หลงเหลืออยู่ ดังนั้นค่าผลได้ของกรดแลคติกในกรณีต่าง 2.5 โมลต่อลิตรที่ไม่มีโลหะ ซิงค์ออกไซด์จึงมีค่าสูงกว่ากรณีที่ไม่มีซิงค์ออกไซด์ ส่วนที่สภาวะความเข้มข้นต่าง 1 โมลต่อลิตร ให้ค่าผลได้ของกรดแลคติกในช่วงแรกประมาณ 45% (ซึ่งใกล้เคียงกับกรณีต่าง 2.5 โมลต่อลิตรที่ไม่มีโลหะ ซิงค์ออกไซด์) และ ลดลงเรื่อยๆเมื่อเวลาผ่านไป ทั้งนี้เกิดจากปริมาณต่างถูกใช้ไปในการทำปฏิกิริยาจนหมด ส่งผลให้กลูโคสถูกเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียงอื่นแทนกรดแลคติก จากการทดลองสรุปได้ว่าซิงค์ออกไซด์ที่อุณหภูมิ  $80^\circ\text{C}$  ไม่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของกรดแลคติกแต่อย่างใด

## สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการทดลอง

การเปลี่ยนแปลงกลูโคสเป็นกรดแลคติกในสารละลายต่าง ที่อุณหภูมิ 50 70 และ 80°C ความดันบรรยากาศ พบว่าได้ผลิตภัณฑ์เป็น กรดแลคติก และกรดอินทรีย์อื่น ๆ ที่ไม่สามารถระบุได้ ปริมาณหนึ่ง นอกจากนี้ยังพบว่าเกิดเป็นสารที่มวลโมเลกุลขนาดใหญ่ ซึ่งสังเกตได้ว่ามีสีน้ำตาลเข้ม โดยงานวิจัยนี้ได้ค่าผลได้ของกรดแลคติกสูงสุดถึง 53% และเมื่อเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้าพบว่าข้อดีของผลงานวิจัยนี้คือ สามารถผลิตกรดแลคติกให้ได้ปริมาณเข้มข้นมากกว่าทุกงานวิจัยที่ได้มีผู้รายงานไว้ในกรณีการสังเคราะห์กรดแลคติกโดยวิธีทางเคมี ยังมีข้อดีในด้านของความไม่ยุ่งยากซับซ้อน ต้นทุนต่ำ เกิดปฏิกิริยาได้ที่อุณหภูมิต่ำ (50°C) ที่ความดันบรรยากาศ และสามารถใช้น้ำตาลจากแหล่งต่างๆ ได้เพราะไม่ต้องคำนึงถึงผลกระทบของการเติบโตของจุลินทรีย์ที่อาจส่งผลให้ค่าผลได้ของกรดแลคติก จากการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่อาจส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของกรดแลคติกสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออนจากแต่ละชนิดส่งผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงกลูโคสไปเป็นกรดแลคติก เนื่องจากไฮดรอกไซด์ไอออนถูกใช้เป็นตัวเร่งและเป็นสารที่เกิดปฏิกิริยาร่วมสารตั้งต้น ดังนั้นความเข้มข้นและความสามารถในการแตกตัวให้ไฮดรอกไซด์ไอออนจึงเป็นปัจจัยสำคัญในการเปลี่ยนกลูโคสไปเป็นกรดแลคติก ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์
2. ความเข้มข้นของต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ส่งผลต่อความเร็วในการเกิดปฏิกิริยาและค่าผลได้ของกรดแลคติก สัดส่วนโดยโมลของกลูโคสต่อต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา คือ 1:3 หรือ มากกว่า
3. อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา โดยที่อุณหภูมิ 70 และ 80°C เกิดปฏิกิริยาไปเป็นกรดแลคติกอย่างรวดเร็วแต่ในขณะเดียวกันก็ส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์ข้างเคียงในปริมาณที่สูงด้วยส่วนที่อุณหภูมิ 50°C ปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างช้าๆ และ ถ้าใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานานพอจะได้ค่าผลได้ของกรดแลคติกในปริมาณที่สูงมากกว่าการใช้ อุณหภูมิที่สูงกว่า
4. การรักษาความเข้มข้นของกลูโคสให้ต่ำอยู่ตลอดเวลาส่งผลให้โอกาสในการเกิดปฏิกิริยากันเองของกลูโคสไปเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียงลดลงและทำให้ค่าผลได้ของกรดแลคติกมากขึ้น

นอกจากนี้เทคนิคการป้อนสารตั้งต้นความเข้มข้นสูงเข้าระบบในระยะเวลาสั้นจากนั้นปล่อยให้ปฏิกิริยาดำเนินต่อไปจนค่าผลได้ของกรดแลคติกคงที่ แล้วจึง ป้อนสารตั้งต้นเข้าไปในระบบอีกครั้ง เป็นอีกวิธีที่จะประหยัดเวลาในการทำปฏิกิริยา และให้ค่าผลได้ของกรดแลคติกน้อยกว่าการป้อนสารละลายเจือจางเข้าระบบเพียง 3% (ผลการทดลองจากรูป 4.6)

5. การมีอยู่ของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะซิงค์ออกไซด์ที่อุณหภูมิ 80°C ในสถานะต่าง ไม่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของกรดแลคติก แต่ส่งผลในแง่ลบต่อการเกิดปฏิกิริยาเพราะทำให้ระบบมีไฮดรอกไซด์ไอออนลดลงเนื่องจากเกิดเป็นสปีซซิงค์ไฮดรอกไซด์ ซึ่งไม่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา
6. การมีอยู่ของเกลือโซเดียมซัลไฟต์ไม่ส่งผลต่อการลดลงของผลิตภัณฑ์ข้างเคียงของสารมีสีจำพวกเฟอร์ฟูรัล (Furfural) และ สารมวอลโมเลกุลขนาดใหญ่

จากการทดลองพบว่าสถานะที่เหมาะสมในการเปลี่ยนแปลงกลูโคสไปเป็นกรดแลคติกคือสถานะที่มีความเข้มข้นต่างสูง อุณหภูมิต่ำ และ ความเข้มข้นของกลูโคสที่ผสมอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์จะต้องอยู่ในระดับที่ต่ำตลอดเวลา คือ อุณหภูมิ 50°C ความเข้มข้นต่าง 3.25 mol/l ความเข้มข้นสารละลายกลูโคส 16.7 %w/v อัตราการป้อนสารละลายกลูโคส 0.1 ml/min โดยหยุดป้อนสารเป็นเวลา 20 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้ปฏิกิริยาดำเนินต่อไปอีก 2 ชั่วโมง ซึ่งได้ค่าผลได้ของกรดแลคติกประมาณ 53% ถึงอย่างไรก็ตามสถานะในการทำปฏิกิริยาดังกล่าวก็มีข้อจำกัดในด้านของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยานานถึง 22 ชั่วโมง

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การเปลี่ยนแปลงกลูโคสเป็นกรดแลคติกในสารละลายต่างมีข้อเสีย คือ ไฮดรอกไซด์ไอออนของต่างเคลื่อนที่ในสารละลายได้อย่างอิสระและเข้าทำปฏิกิริยาการกำจัดน้ำออกกับหมู่ไฮดรอกซิลของกลูโคสในตำแหน่งที่ไม่ต้องการซึ่งส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์ข้างเคียง ดังนั้น จึงมีข้อเสนอว่าควรทำการป้องกันหมู่ไฮดรอกซิลในตำแหน่งที่ไม่ต้องการของกลูโคสด้วยปฏิกิริยาทางเคมีโดยการทำเฮมิอะเซทัล (Hemiacetal) ก่อน จากนั้นจึง นำกลูโคสที่ได้มาทำปฏิกิริยาในสารละลายต่างอีกที ซึ่งอาจทำให้ไฮดรอกซิลไอออนเข้าทำปฏิกิริยาที่เราต้องการส่งผลให้ค่าผลได้ของกรดแลคติกมีค่าสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามวิธีนี้ก็ยังมีข้อเสียคือเป็นวิธีที่ยุ่งยากและซับซ้อน

5.2.2 การนำผลิตภัณฑ์ข้างเคียงที่ได้จากการทำปฏิกิริยาไปใช้ประโยชน์โดยการสังเคราะห์เป็น พอลิเมอร์ หรือ อาจทำการแยกไปใช้ในงานอื่นๆต่อไป

5.2.2.3 เนื่องจากการสังเคราะห์กรดแลคติกยังคงมีปัญหาเกี่ยวกับสารมีสีดังนั้นจึงควรมีการแยกสลายหรือกำจัดสีก่อนนำไปใช้สังเคราะห์พอลิเมอร์หรือเป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์สารอื่นๆด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Gibbs M. 1950. On the Mechanism of the Chemical Formation of Lactic Acid from Glucose Studied with C<sup>14</sup> Labeled Glucose. 72: 3964-3965.
- [2] Yea, L., Zhoua, X., Sufian, M., Li, Z. and Wua, J.C. 2013. "Highly efficient production of l-lactic acid from xylose by newly isolated *Bacillus coagulans* C106." *Bioresource Technology*. 132: 38-44.
- [3] Bicker, M., Endres, S., Ott, L. and Vogel, H. 2005. "Catalytical conversion of carbohydrates in subcritical water: A new chemical process for lactic acid production." *Journal of molecular catalysis A: Chemical*. 239: 151-157.
- [4] Onda, A., Ochi, T., Kajiyoshi, K. and Yanagisawa, K. 2008. "A new chemical process for catalytic conversion of d-glucose into lactic acid and gluconic acid." *Applied Catalysis A General*. 343: 49-54.
- [5] "Cellulose" [Online]. Available : <http://www.fibersource.com/f-tutor/cellulose.htm>. 2015.
- [6] "การเรียกชื่อมอนอแซ็กคาไรด์" [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา : <http://science.sru.ac.th/org/sci-elearning/courseonline/4022503/chapter-mono2.htm>. 2557.
- [7] Wade, L.G. "23 Carbohydrates and Nucleic Acids." *Organic Chemistry*. 7th ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson Education, 2009. 1097-141.
- [9] "สมบัติทางเคมีของมอนอแซ็กคาไรด์" [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา : <http://science.sru.ac.th/org/1234sci-elearning/courseonline/4022503/chapter-mono5.htm>. 2557.
- [10] Michael G. Manas, Jesús Campos, Liam S. Sharninghausen, Elisa Lin and Robert H. Crabtree. Royal 2015. "Selective catalytic oxidation of sugar alcohols to lactic acid." *Society of chemistry*;17:594-600.
- [11] Charles J, John F. Kennedy 2003. "Degradation of cellulose under alkaline conditions." *Carbohydrate Polymers* ;51:281-300.
- [12] Staffan Bergstrom, PhD. "Accelerated Glucose Discoloration Method-A Quick Tool For Glucose Stability Assessment." Master Thesis in Analytical Chemistry, Lund University Cristina Scret.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] นางสาวสุกฤตา อนันตวิทยานนท์ และ นางสาวณัฐนิชา อ่อนน้อม. “การศึกษากลไกปฏิกิริยาโทโทเมอไรเซชันของสาร กลุ่มแอนไฮโดรต์-อินอลด้วยวิธีการคำนวณทางเคมีควอนตัม.” มหิดลวิทยานุสรณ.
- [14] Derek, H. 2004. *Advances in Carbohydrate Chemistry and Biochemistry*. Massachusetts : Academic Press.
- [15] ศิริรัตน์ จันทจารุณี. “เอกสารประกอบการสอนวิชา เทคนิคทางเคมีอินทรีย์”, ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- [16] “Glycolysis(Embden-Meyerh of pathway)” [Online]. Available:<http://classes.midlandstech.com/carterp/Courses/bio225/chap05/ss4.htm>
- [17] “properties and reactions of lactic acid” [Online].แหล่งที่มา<https://archive.org/stream/propertiesreacti279fish#page/n1/mode/2up.2559>
- [18] Rathin Datta and Michael Henry. *Chem Technol Biotechnol*. Lactic acid: recent advances in products, processes and technologies – a review 2006; 81:1119-1129.
- [19] “การนำกรดแลคติกไปใช้ประโยชน์” [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.siamchemi.com/กรดแลคติก/2558>.
- [20] รศ.ดร. จตุพร วุฒิกนกกาญจน์ และ คณะ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. “งานวิจัย และ สิทธิบัตรที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาบรรจุภัณฑ์ จากพลาสติกชีวภาพชนิด PLA.” มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- [21] Amanda V. Ellis and Michael A. Wilson 2002. “Carbon Exchange in Hot Alkaline Degradation of Glucose.” *Jernal Organic Chemistry*; 67:8469-8474.
- [22] Kong, L., Li, G., Wang, H., He, W. and Ling, F. 2008. “Hydrothermal catalytic conversion of biomass for lactic acid production.” *Journal of chemical Technology and Biotechnology*. 83: 383-388.
- [23] Philip A. Shaffer and Theodore E. Friendemann. 1929. “Sugar activation by alkaline.” *Journal Biol.Chem* 86: 345-374.
- [24] Hemant Choudhary, Shun Nishimura, Kohki Ebitani 2015. “Synthesis of high-value organic acids from sugars promoted by hydrothermally loaded Cu oxide species on magnesia.” *Aplied Catalyst B: Environmental*;162:1-10.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [25] Lincai Peng , Lu Lin, Junhua Zhaung, Junping Zhuang, Beixiao Zhang and Yan Gong 2010. Catalytic Conversion of cellulose to Levulinic Acid by Metal Chlorides. *Molecules*;15:5258-5272.
- [26] Kong, L., Li, G., Wang, H., He, W. and Ling, F. 2008. "Hydrothermal catalytic conversion of biomass for lactic acid production." *Journal of chemical Technology and Biotechnology* 83: 383-388.
- [27] REX MONTGOMERY AND RICHARD A. RONCA 1953. " Chemical Production of Lactic and Other Acids from Molasses." *INDUSTRIAL AND ENGINEERING CHEMISTRY* 45:1136-1147.
- [28] Goodwin, J.F 1971. "Micromethod for measuring pentose by use of Aniline reagent." *Clin Chem*, 17, 397 – 399.
- [29] "Analysis of Organic Acid Standards" [Online]. Available: [http://hitachihta.com/sites/default/files/appnotes/Organic%20Acids\\_LC100029\\_E.pdf](http://hitachihta.com/sites/default/files/appnotes/Organic%20Acids_LC100029_E.pdf)
- [30] Zhou, Y., Domínguez, J.M., Cao, N. Du, J. and Tsao, G.T. 1999. "Optimization of L-Lactic acid production from glucose by *Rhizopus oryzae* ATCC 52311". *Applied Biochemistry and biotechnology*. Volume 78, Issue 1-3, pp 401-407.
- [31] Yang, B.Y. and Montgomery, R. 1995. "Alkaline degradation of glucose: effect of initial concentration of reactants". *Carbohydrate Research*. Volume 280, Issue 1, pp 27-45.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นาย ณัฐภูมิ รัตนเจียรกุล  
วัน เดือน ปีเกิด 15 สิงหาคม 2534 ที่กรุงเทพมหานคร  
ที่อยู่ 89/193 หมู่บ้านลานมณี ถ.สายไหม  
แขวงสายไหม เขตสายไหม กรุงเทพฯ 10202 โทร.0-2536-0715  
ประวัติการศึกษา 2557 วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### ประสบการณ์การ

- พ.ศ.2556 - นักศึกษาฝึกงาน ที่ บริษัท PQ Chemicals Thailand ชลบุรี แหลมฉบัง เป็น ระยะเวลา 3 เดือน
- พ.ศ.2559 - เข้าร่วมประชุมวิชาการ “สมาคมวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26 (TICHe 2016)” นำเสนอผลงานในหัวเรื่อง “การเปลี่ยนกลูโคสเป็นกรดแลคติกในสารละลายต่าง” จังหวัดบhumธานี ประเทศไทย 26-28 ตุลาคม 2559

## กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ประกอบ กิจไชยา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้ความช่วยเหลือทางด้านวิชาการ ให้คำแนะนำ และช่วยแก้ไขปัญหาดังกล่าว ตลอดจนการดูแลเอาใจใส่และการสนับสนุนในทุกด้านจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.สมหมาย ผิวสะอาด กรรมการสอบหัวข้อและโครงสร้างวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำข้อชี้แนะ และ ความอนุเคราะห์ในการช่วยส่งเคราะห์พลีแลคติกแอซิด ตลอดจนการดูแลเอาใจใส่ จนในที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณทุกท่าน ที่มีได้กล่าวนามในที่นี้ซึ่งมีส่วนช่วยให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ รวมทั้งขอขอบพระคุณบุคลากรที่ให้ออกาสทางการศึกษาและการสนับสนุนในทุกด้าน ตลอดจนเป็นกำลังใจที่ยิ่งใหญ่ให้แก่ข้าพเจ้า จนประสบความสำเร็จในการศึกษา และข้าพเจ้าหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่สนใจบ้างไม่มากก็น้อย

ณัฐภูมิ รัตนเกียรติกุล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก.

## การคำนวณความเข้มข้นของสาร ค่าการเปลี่ยนแปลงของสารตั้ง ต้น ค่าผลได้ การสร้างกราฟและสมการของสารมาตรฐาน

### 1. การคำนวณความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสที่เตรียมเป็นมาตรฐาน

น้ำตาลที่ทราบความเข้มข้นแน่นอน 1 เปอร์เซ็นต์ เตรียมจากชั่งน้ำตาลกลูโคส 1 กรัมละลาย  
ในน้ำกลั่นมีปริมาตรรวม 100 มิลลิลิตร จะได้สารละลายน้ำตาลกลูโคสความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์  
ปริมาณ 100 มิลลิลิตร จากนั้นก็นำสารละลายที่ได้มาเจือจางให้ได้ความเข้มข้นต่างๆ

ตัวอย่างการคำนวณ ต้องการเตรียมสารละลายที่มีความเข้มข้น 0.1 เปอร์เซ็นต์

จากสูตร

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

$C_1$  คือความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสที่ทราบความเข้มข้นแน่นอน

$V_1$  คือปริมาตรของน้ำตาลกลูโคสที่ทราบความเข้มข้นแน่นอน (ต้องการ)

$C_2$  คือความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสที่ต้องการเตรียม

$V_2$  คือปริมาตรของน้ำตาลกลูโคสที่ต้องการเตรียม

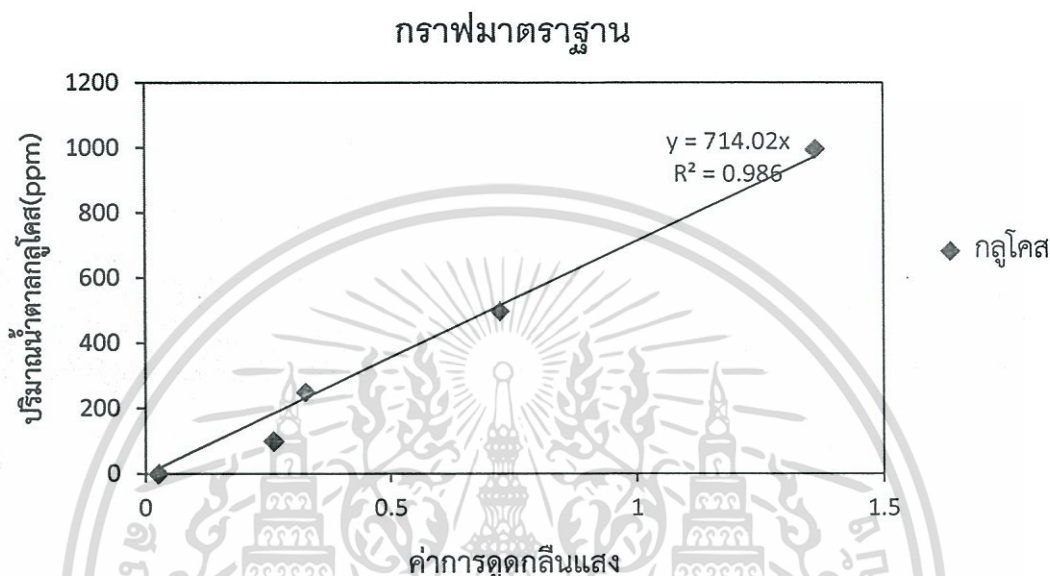
$$(1)(V_1) = (0.1)(10)$$

$$V_1 = 1$$

ดูตสารละลายน้ำตาลกลูโคสความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์ มา 1 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นให้ได้  
ปริมาตรสุดท้ายเป็น 10 มิลลิลิตร จะได้สารละลายน้ำตาลกลูโคสที่มีความเข้มข้น 0.1 เปอร์เซ็นต์  
ปริมาณ 10 มิลลิลิตร และสารละลายที่มีความเข้มข้น 0.05 0.025 0.01 เปอร์เซ็นต์ ก็สามารถทำการ  
คำนวณโดยวิธีเดียวกัน ซึ่งแปลงหน่วยความเข้มข้นกลูโคสจากเปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักต่อปริมาตรไป  
เป็นมิลลิกรัมต่อลิตร เช่น 0.1 %wt/volume ก็จะกลายเป็น 1000 mg/L หรือ ppm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากเตรียมน้ำตาลกลูโคสที่ความเข้มข้นต่างๆแล้ว นำน้ำตาลกลูโคสที่เตรียมได้มาทำปฏิกิริยากับสารละลาย DNSA ตามขั้นตอนที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.3.1 ตอนที่ 4 จากนั้นวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวีสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้มาสร้างกราฟมาตรฐานความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสได้ดังรูปที่ ก.



รูปที่ ก.1 กราฟมาตรฐานเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคส

สมการมาตรฐานความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสคือ

$$y = 714.02x$$

โดย  $y$  คือ ความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคส (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$x$  คือ ค่าการดูดกลืนแสง

## 2. การคำนวณความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสที่ได้จากการเทียบกับกราฟมาตรฐาน

จากการทดลองหาปริมาณน้ำตาลกลูโคสที่เหลืออยู่หลังจากทำปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงกลูโคสเป็นกรดอินทรีย์ โดยนำมาทำปฏิกิริยากับสารละลาย DNSA ตามขั้นตอนที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.3.1 ตอนที่ 4 หลังจากนั้นวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวีสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ นำค่าดูดกลืนแสงที่ได้มาเทียบความเข้มข้นจากกราฟมาตรฐานความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสที่เตรียมไว้ตามรูป ก.1

ตัวอย่างการคำนวณ นำตัวอย่างมาวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลที่เหลืออยู่หลังจากทำปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงกลูโคสเป็นกรดอินทรีย์ ได้ค่าการดูดกลืนแสงเท่ากับ 0.124

จากสมการมาตรฐานความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสคือ

$$y = 714.02 x$$

แทนค่า ;

$$y = 714.02 \times 0.124$$

$$y = 88.538$$

ดังนั้นตัวอย่างที่นำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงได้เท่ากับ 0.124 จะมีปริมาณน้ำตาลกลูโคสเป็น 88.538 มิลลิกรัมต่อลิตร

### 3. การคำนวณค่าคอนเวอร์ชันของน้ำตาลกลูโคส

ค่าคอนเวอร์ชันคำนวณมาจากสารที่เป็นตัวกำหนดปฏิกิริยา โดยเลือกสารตั้งต้นที่มีปริมาณน้อยที่สุดตามปริมาณสารสัมพันธ์ จากการทดลองนี้สารตั้งต้นที่เป็นตัวกำหนดปฏิกิริยาคือน้ำตาลกลูโคส

สมการการคำนวณค่าคอนเวอร์ชันของน้ำตาลกลูโคสคือ

$$\% \text{ conversion} = \frac{C_A}{C_{A0}}$$

โดย  $C_{A0}$  คือ ปริมาณของน้ำตาลกลูโคสเริ่มต้น

$C_A$  คือ ปริมาณของน้ำตาลกลูโคสที่เหลืออยู่

ตัวอย่างการคำนวณ ปริมาณน้ำตาลกลูโคสที่เหลืออยู่หลังจากทำปฏิกิริยาที่ได้จากการเทียบกราฟมาตรฐานกลูโคส คือ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปริมาณน้ำตาลกลูโคสเริ่มต้น คือ 2000 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากสมการการคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงของน้ำตาลกลูโคสคือ

$$\%conversion = \frac{C_{A0} - C_A}{C_{A0}} \times 100$$

แทนค่า ;

$$\begin{aligned} \%conversion &= \frac{2000 - 150}{2000} \times 100 \\ &= 92.5 \end{aligned}$$

ดังนั้นตัวอย่างที่มีน้ำตาลกลูโคสเหลืออยู่ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปริมาณน้ำตาลกลูโคสเริ่มต้น คือ 2000 มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีค่าการเปลี่ยนแปลงของน้ำตาลกลูโคสเป็น 92.5 เปอร์เซ็นต์

#### 4. การคำนวณความเข้มข้นของ Mobile phase สำหรับเครื่อง HPLC

Mobile phase สำหรับวิเคราะห์กรดอินทรีย์ตามหัวข้อ 3.5.2 คือ  $H_2SO_4$  1 มิลลิโมล/ลิตร และ  $Na_2SO_4$  8 มิลลิโมล/ลิตร ผสมกันในอัตราส่วน 1 ต่อ 1 โดยปริมาตร

ตัวอย่างการคำนวณ 1 มิลลิโมล/ลิตร ของ  $H_2SO_4$  ( $H_2SO_4$  MW 98.08 g/mol, sp.Gr 1.84, 98% (W/W))

ในสารละลาย 1000 มิลลิลิตร ต้องการให้มีเนื้อกรด  $H_2SO_4$  0.001 โมล =  $0.001 \times 98.08$  กรัม มีค่าเท่ากับ 0.9808 กรัม แต่กรด  $H_2SO_4$  มีอยู่ 98% ดังนั้นจะต้องชั่งกรด = 1.00081 กรัม เพื่อให้ได้ 1 มิลลิโมลของกรด  $H_2SO_4$

ค่าความหนาแน่นกรด  $H_2SO_4$  1.84 กรัมต่อมิลลิลิตร

ดังนั้นจึงต้องตูด กรด  $H_2SO_4$  =  $1.84 \times 1.00081 = 1.84$  ml

ดังนั้นเตรียม  $H_2SO_4$  ความเข้มข้น 1 มิลลิโมล/ลิตร โดยตูด  $H_2SO_4$  1.84 มิลลิลิตร ละลายใน น้ำกลั่นให้ปริมาตรสุดท้ายเป็น 1 ลิตร

ตัวอย่างการคำนวณ 8 มิลลิโมล/ลิตร ของ  $Na_2SO_4$  ( $H_2SO_4$  MW 142.04 g/mol)

จากสมการ 
$$M = \frac{m}{MW}$$

โดย M คือความเข้มข้นของสารที่ต้องการ (โมล)

m คือน้ำหนักสาร (กรัม)

MW คือน้ำหนักโมเลกุล (กรัม/โมล)

$$\text{แทนค่า ; } 8 \times 10^3 = \frac{m}{142.4}$$

$$m = 1.136 \text{ กรัม}$$

ดังนั้นเตรียม  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ความเข้มข้น 8 มิลลิโมล/ลิตร โดยชั่ง  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  1.136 กรัม เติมน้ำกลั่นให้ปริมาตรสุดท้ายเป็น 1 ลิตร

#### 5. การคำนวณความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์กรดอินทรีย์ที่เตรียมเป็นมาตรฐาน

กรดอินทรีย์ที่ทราบความเข้มข้นแน่นอน 1 เปอร์เซ็นต์ เตรียมจากชั่งกรดแลคติก 1 กรัม แล้วปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิตร จากนั้นก็เจือจางสารละลายให้ได้ความเข้มข้นต่างๆโดยใช้สมการดังตัวอย่างต่อไปนี้ ซึ่งกรดฟอร์มิก และ อะซิติกก็ทำด้วยวิธีเดียวกัน

ตัวอย่างการคำนวณ ต้องการเตรียมสารละลายที่มีความเข้มข้น 0.5 เปอร์เซ็นต์

$$\text{จากสูตร } C_1V_1 = C_2V_2$$

$C_1$  คือความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ที่ทราบความเข้มข้นแน่นอน

$V_1$  คือปริมาตรของกรดอินทรีย์ที่ทราบความเข้มข้นแน่นอน (ต้องหา)

$C_2$  คือความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ที่ต้องการเตรียม

$V_2$  คือปริมาตรของกรดอินทรีย์ที่ต้องการเตรียม

$$(1)(V_1) = (0.5)(10)$$

$$V_1 = 5$$

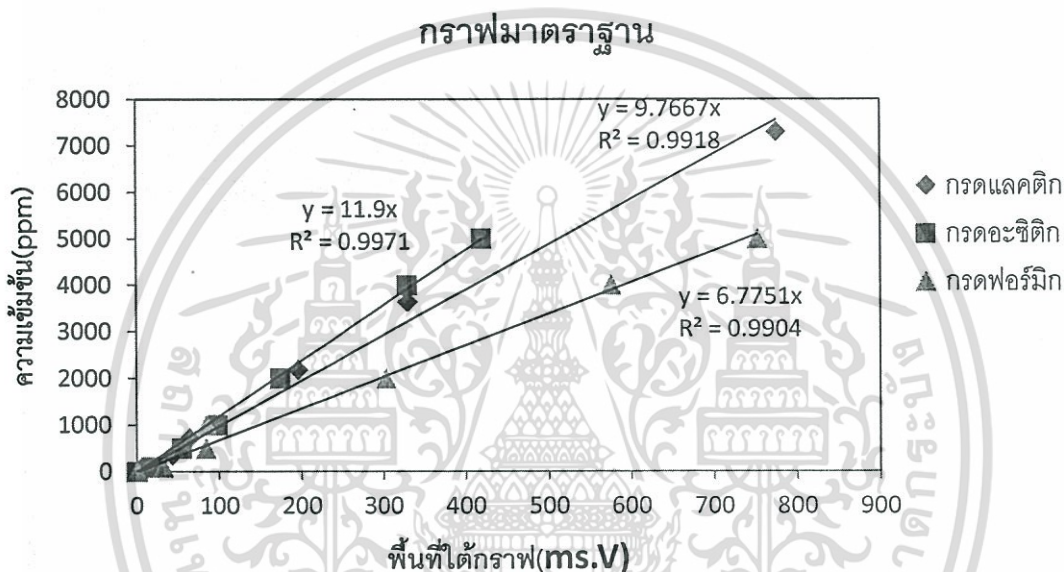
เตรียมสารละลายกรดอินทรีย์ความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์ มา 5 มิลลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตรสุดท้ายเป็น 10 มิลลิตร จะได้สารละลายกรดอินทรีย์ที่มีความเข้มข้น 0.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้ในเชิงการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ขึ้นตามการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปอร์เซ็นต์ ปริมาณ 10 มิลลิลิตร สารละลายที่มีความเข้มข้น 0.3 0.1 0.05 เปอร์เซ็นต์ ก็ทำการคำนวณโดยวิธีเดียวกัน

จากนั้นก็แปลงหน่วยความเข้มข้นกรดอินทรีย์จากเปอร์เซ็นต์ น้ำหนักโดยปริมาตรไปเป็น มิลลิกรัมต่อลิตร เช่น 0.5 %wt/volume ก็จะกลายเป็น 5,000 mg/L หรือ ppm

หลังจากเตรียมกรดอินทรีย์ที่มีความเข้มข้นต่างๆแล้ว นำกรดอินทรีย์ที่เตรียมได้มาวิเคราะห์หาพื้นที่ใต้กราฟด้วยเครื่อง HPLC จากนั้นนำค่าพื้นที่ใต้พีคที่ได้มาสร้างกราฟมาตรฐานความเข้มข้นกรดอินทรีย์ได้ดังรูปที่ ก.2



รูปที่ ก.2 กราฟมาตรฐานเปรียบเทียบค่าพื้นที่และความเข้มข้นของกรดอินทรีย์

สมการมาตรฐานความเข้มข้นของกรดแลคติกคือ

$$y = 9.7667x$$

โดย  $y$  คือ ความเข้มข้นของกรดแลคติก (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$X$  คือ ค่าพื้นที่ใต้พีค

สมการมาตรฐานความเข้มข้นของกรดอะซิติกคือ

$$y = 11.9x$$

โดย  $y$  คือ ความเข้มข้นของกรดอะซิติก (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$X$  คือ ค่าพื้นที่ใต้พีค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการมาตรฐานความเข้มข้นของกรดฟอร์มิกคือ

$$y = 6.7751x$$

โดย  $y$  คือ ความเข้มข้นของกรดฟอร์มิก (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$X$  คือ ค่าพื้นที่ใต้พีค

## 6. การคำนวณความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ที่ได้จากการเทียบกับกราฟมาตรฐาน

จากการทดลองหาปริมาณกรดอินทรีย์ที่ได้จากปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงกลูโคสเป็นกรดอินทรีย์ โดยนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC ตามขั้นตอนที่ได้กล่าวไว้ในข้อ 3.3.2 ตอนที่ 4 หลังจากนั้น นำค่าพื้นที่ใต้พีคที่ได้มาเทียบความเข้มข้นจากกราฟมาตรฐานความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ที่เตรียมไว้ตามรูป ก.2

ตัวอย่างการคำนวณ นำตัวอย่างมาวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ที่ได้จากปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงกลูโคสเป็นกรดอินทรีย์ มีค่าพื้นที่ใต้พีคเท่ากับ 60.696

จากสมการมาตรฐานความเข้มข้นของกรดแลคติกคือ

$$y = 9.7667x$$

แทนค่า ;

$$y = 9.7667 \times 60.696$$

$$y = 592.8$$

ดังนั้นตัวอย่างที่มีค่าพื้นที่ใต้พีคเท่ากับ 60.696 จะมีปริมาณกรดแลคติก เป็น 592.8 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนการคำนวณความเข้มข้นของกรดอะซิติกและกรดฟอร์มิกที่ได้จากปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงกลูโคสเป็นกรดอินทรีย์ก็ทำในทำนองเดียวกัน โดยเปลี่ยนสมการเป็นของกรดอะซิติกและกรดฟอร์มิกตามลำดับ

## 7. การคำนวณค่าผลได้ของผลิตภัณฑ์กรดอินทรีย์

ค่าผลได้คำนวณโดยใช้ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จริงเทียบกับผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ตามทฤษฎีค่า

ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ตามทฤษฎีนั้นจะมีค่ามากที่สุดที่เป็นไปได้เทียบมาจากสารตั้งต้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการการคำนวณค่าผลได้ของกรดอินทรีย์คือ

$$\% \text{ yield} = \frac{C_B}{C_{A0}} \times 100$$

โดย  $C_{A0}$  คือปริมาณของน้ำตาลกลูโคสเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$C_B$  คือปริมาณของกรดอินทรีย์ที่เกิดขึ้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)

ตัวอย่างการคำนวณ จากตัวอย่างกรดอินทรีย์ที่ผลิตได้มีความเข้มข้นของกรดแลคติก กรดอะซิติก และ กรดฟอร์มิก เป็น 5000 300 และ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งได้มาจากการนำพื้นที่ได้มาแปลงเป็นปริมาณกรดต่างๆโดยอาศัยกราฟ รูปที่ ก2. และปริมาณน้ำตาลกลูโคสเริ่มต้นคือ 10000 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากสมการการคำนวณค่าผลได้ของกรดอินทรีย์คือ

$$\% \text{ yield} = \frac{C_B}{C_{A0}} \times 100$$

แทนค่า ;

$$\% \text{ yield lactic acid} = \frac{5000}{10000} \times 100 = 50$$

$$\% \text{ yield acetic acid} = \frac{300}{10000} \times 100 = 3$$

$$\% \text{ yield formic acid} = \frac{600}{10000} \times 100 = 6$$

ดังนั้นตัวอย่างที่มีกรดแลคติก กรดอะซิติก และกรดฟอร์มิก เป็น 5000 300 และ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยทำการเทียบกับปริมาณน้ำตาลกลูโคสเริ่มต้นที่เวลาเดียวกัน เนื่องจากปริมาณน้ำตาลเพิ่มขึ้นตลอดเวลาเพราะทำการทดลองด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งกะ จึงมีการป้อนสารเข้าตลอดเวลา โดยกรณีตัวอย่างปริมาณกลูโคสเริ่มต้น คือ 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีค่าผลได้ของกรดแลคติก กรดอะซิติก และกรดฟอร์มิก เป็น 50 3 และ 6 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ภาคผนวก ข.

ข้อมูลผลการทดลอง

1. ข้อมูลผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงกลูโคสเป็นกรดแลคติก ในสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์

ตารางที่ ข.1 ค่าผลได้ของกรดแลคติกในสารละลายต่างชนิดต่างๆ ความเข้มข้นกลูโคสเริ่มต้น 2 % w/v ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 120 นาที ความเข้มข้นต่าง 0.5 โมลต่อลิตร โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ

ชนิดต่าง	PH ของสารละลาย	ค่าผลได้ของกรดแลคติก(%)
NaOH	วัดไม่ได้	37.2
Ca(OH) <sub>2</sub>	13	13.1
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	12	-
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	11	-

ตารางที่ ข.2 ค่าผลได้ของกรดแลคติกในสารละลายต่างแคลเซียมออกไซด์ ความเข้มข้นกลูโคสเริ่มต้น 1 % w/v ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 125 °C เป็นเวลา 120 นาที ความเข้มข้นต่าง 1 โมลต่อลิตร โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ

เวลา (นาที)	ค่าการเปลี่ยนแปลงกลูโคส (%)	ค่าผลได้กรดแลคติก (%)
5	89.55418	25.94551
15	93.05992	24.05237
60	99.874336	21.97117
120	99.9460216	19.94184

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.3 ค่าผลได้ของกรดแลคติกในสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ ปริมาณกลูโคสเริ่มต้น 2 %w/v ในสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นต่างๆ ที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 120 นาที ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ

ความเข้มข้น NaOH(mol/l)	ค่าผลได้ของกรดแลคติก(%)
0.5	37.2
1.0	50.6
2.5	59.6
3.25	60.0

ตารางที่ ข.4 ค่าผลได้ของกรดแลคติกในสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ ปริมาณกลูโคสเริ่มต้นต่างๆ ในสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 และ 2.5 โมลต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 120 นาที ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ

ความเข้มข้นกลูโคส เริ่มต้น(กรัม)	ค่าผลได้ของกรดแลคติก(%) ที่ความเข้มข้นต่าง	
	1 โมลต่อลิตร	2.5 โมลต่อลิตร
2	50.6	59.6
5	43.4	50.7
10	28.6	45.4
20	5.5	26.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.5 ค่าผลได้กรดแลคติก ที่ความเข้มข้นต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2.5 โมล/ลิตร กลูโคส เริ่มต้น 2 % w/v ที่อุณหภูมิ 50 และ 80 °C เป็นเวลา 120 นาที

เวลาในการทำ ปฏิกิริยา(ชั่วโมง)	ค่าผลได้ของกรดแลคติก(%) ที่อุณหภูมิ	
	50 °C	80 °C
2	59.6	55.4

ตารางที่ ข.6 ค่าผลได้กรดแลคติก และ ค่าการเปลี่ยนแปลงของกลูโคส ความเข้มข้นต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2.5 โมล/ลิตร อัตราการบ้อนสารละลายกลูโคส 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นสารละลายกลูโคส 30 % w/v ที่อุณหภูมิ 50 70 และ 80 °C

เวลา (นาที)	50 องศาเซลเซียส		70 องศาเซลเซียส		80 องศาเซลเซียส	
	ค่าการ เปลี่ยนแปลง กลูโคส (%)	ค่าผลได้ กรดแลค ติก (%)	ค่าการ เปลี่ยนแปลง กลูโคส (%)	ค่าผลได้ กรดแลค ติก (%)	ค่าการ เปลี่ยนแปลง กลูโคส (%)	ค่าผลได้ กรดแลค ติก (%)
0	0	0	0	0	0	0
5	29	0	79.90	19.89	98.15	39.44
10	49.54	2.53	82.21	30.26	99.79	48.23
15	50	4.82	92.08	41.99	95.86	44.49
20	55.48	6.52	93.48	43.20	91.55	44.92
30	50.73	9.77	97.64	47.13	98.21	46.70
40	64.47	12.26	97.32	47.20	99.03	45.43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

60	73.93	16.29	98.10	45.19	99.12	45.79
90	71.40	20.37	98.10	45.1	100	45.99
120	68.38	21.77	99.77	45.73	100	47.46
150	75.99	26.05	99.90	45.25	100	45.29

ตารางที่ ข.7 ค่าผลได้กรดแลคติก และ ค่าการเปลี่ยนแปลงของกลูโคส ในสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 และ 2.5 โมล/ลิตร โดยมีการเติม ซิงค์ออกไซด์ 0.5 โมลต่อลิตร อัตราการป้อนสารละลายกลูโคสเท่ากันคือ 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นสารละลายกลูโคส 30 % w/v ที่อุณหภูมิ 80 °C

เวลา (นาที)	NaOH 2.5 M และ ZnO 0.5 M		เวลา (นาที)	NaOH 1 M และ ZnO 0.5 M	
	ค่าการเปลี่ยนแปลงกลูโคส (%)	ค่าผลได้กรดแลคติก (%)		ค่าการเปลี่ยนแปลงกลูโคส (%)	ค่าผลได้กรดแลคติก (%)
10	94.1349184	24.1667594	10	38.9823	91.914664
20	96.7878568	26.1023136	20	41.13981	96.574942
30	97.640944	26.1432173	30	44.5882	93.27888
60	93.3480587	27.8390722	70	34.03907	92.0442448
90	94.607872	29.888963	90	27.34098	88.8157771
120	95.713382	31.0848833	133	18.11026	94.8539604
150	94.238972	28.5560817	180	18.07178	94.8318855
180	97.0650633	34.5749444	240	17.85072	94.569112

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.8 ค่าผลได้กรดแลคติก และ ค่าการเปลี่ยนแปลงของกลูโคส ความเข้มข้นต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ 3.25 โมล/ลิตร อัตราการป้อนสารละลายกลูโคส 0.1 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นสารละลายกลูโคส 16.7 % w/v เป็นเวลา 20 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้ปฏิกิริยาดำเนินต่อไปอีก 2 ชั่วโมง เทียบกับ อัตราการป้อนสารละลายกลูโคส 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นสารละลายกลูโคส 30 % w/v เป็นเวลา 2 แล้วปล่อยให้ปฏิกิริยาดำเนินต่อไปอีก 20 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50 °C

เวลา (ชั่วโมง)	อัตราการไหล 0.1 มิลลิลิตรต่อนาที		เวลา (ชั่วโมง)	อัตราการไหล 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที	
	ค่าการเปลี่ยนแปลงกลูโคส (%)	ค่าผลได้กรดแลคติก (%)		ค่าการเปลี่ยนแปลงกลูโคส (%)	ค่าผลได้กรดแลคติก (%)
2	94.1349184	24.1667594	0.5	37	13.4826
4	96.7878568	26.1023136	1	42	19.2136
6	97.640944	26.1432173	1.5	52	26.33975
18	93.3480587	27.8390722	2	60	30.55133
20	94.607872	29.888963	3	75	43.38792
21	95.713382	31.0848833	4	82	47.54733
22	94.238972	28.5560817	6	94	50.04628
			8	96.9832	48.81526
			20	98.24324	48.53736
			22	98.5	48.357

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.9 ค่าผลได้กรดแลคติก และ ค่าการเปลี่ยนแปลงของกลูโคส ความเข้มข้นต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ 3.25 โมล/ลิตร อัตราการป้อนสารละลายกลูโคส 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นสารละลายกลูโคส 30 % w/v เป็นเวลา 66 นาที แล้วปล่อยให้ปฏิกิริยาดำเนินต่อไปอีก 19 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50 °C

เวลา (ชั่วโมง)	ค่าการเปลี่ยนแปลงกลูโคส (%)	ค่าผลได้กรดแลคติก (%)
0.083333	47.01238	0
0.25	63.5231	3.734387
0.583333	77.63651	11.4609
1.1	82.79909	21.32663
1.333333	82.34473	30.08716
1.533333	85.46094	33.94386
2	85.84636	44.01217
4	96.46202	47.24908
5	94.17809	55.25083
7	96.89879	58.13643
9	99.75421	55.74584
20	99.93913	55.80545

ตารางที่ ข.10 ค่าผลได้กรดแลคติก และ ค่าการเปลี่ยนแปลงของกลูโคส ความเข้มข้นต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ 3.25 โมล/ลิตร ที่อุณหภูมิ 50 °C อัตราการป้อนสารละลายกลูโคส 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นสารละลายกลูโคส 30 % w/v เป็นเวลา 66 นาที แล้วปล่อยให้ปฏิกิริยาดำเนินต่อไปอีก 4 ชั่วโมง แล้วป้อนสารละลายกลูโคสที่สถานะเดิมอีกครั้ง เป็นเวลา 66 นาที จากนั้นหยุดป้อนสารแล้วปล่อยให้ปฏิกิริยาดำเนินต่อไปอีก 4 ชั่วโมง(เวลารวม 10 ชั่วโมง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนและเพื่อประโยชน์ในการนำไปใช้โดยไม่หวังกำไรค่า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารละลายกลูโคส 16.7 % w/v เป็นเวลา 20 นาที แล้วปล่อยให้ปฏิกิริยาดำเนินต่อไปจนถึง 22 ชั่วโมง (เมื่อคิดเป็นปริมาณน้ำตาลแล้วเป็น 20 กรัมเท่ากับ)

เวลา (ชั่วโมง)	ป้อนสารละลายกลูโคสเป็นเวลา 66 นาที 2 ครั้ง		เวลา (ชั่วโมง)	ป้อนสารละลายกลูโคสเป็นเวลา 20 ชั่วโมง	
	ค่าการเปลี่ยนแปลง กลูโคส (%)	ค่าผลได้ กรดแลคติก (%)		ค่าการเปลี่ยนแปลง กลูโคส (%)	ค่าผลได้ กรดแลคติก (%)
0	0	0	0	0	0
0.666667	73.6365103	13.33275	2	71.02956	36.58387226
1	80.79909091	18.34665	4	88.95937	47.10661078
2	85.84635636	46.65819	6	95.86137	49.33752495
3	92.46202182	53.2035	18	99.96801	52.45265771
5	97.17808727	54.80593	20	99.98489	50.12111405
5.666667	62.2923	36.7084	21	99.96979	51.96703952
6	74.5	34.46955	22	100	53.7447505
7	85.5	46.31396			
8	91.534	49.16904			
10	97.56821	50.23363			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

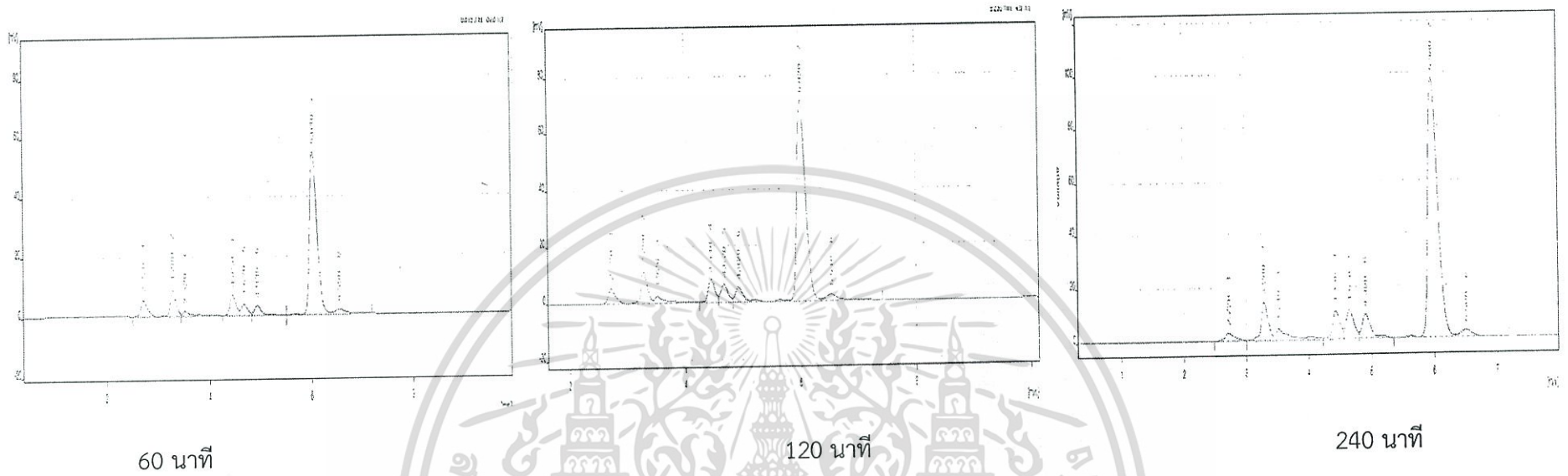
ตารางที่ ข.11 ค่าผลได้กรดแลคติก และ ค่าการเปลี่ยนแปลงของกลูโคส ในสารละลายต่าง โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 3.25 โมล/ลิตร โดยมีการเติมเกลือโซเดียมซัลไฟต์ 0.05 โมลต่อลิตร และ ทำการทดลองเทียบกับกรณีไม่มีเกลือ อัตราการป้อนสารละลายกลูโคส 0.1 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นสารละลายกลูโคส 16.7 % w/v ที่อุณหภูมิ 50 °C

เวลา (ชั่วโมง)	กรณีไม่มีเกลือโซเดียมซัลไฟต์		เวลา (ชั่วโมง)	กรณีมีเกลือโซเดียมซัลไฟต์	
	ค่าการเปลี่ยนแปลง กลูโคส (%)	ค่าผลได้กรดแลคติก (%)		ค่าการเปลี่ยนแปลง กลูโคส (%)	ค่าผลได้กรดแลคติก (%)
2	71.02956	36.58387	0	0	0
4	88.95937	47.10661	2	73.19704	38.28002
6	95.86137	49.33752	4	78.84443	38.83718
18	99.96801	52.45266	6	95.16736	51.42048
20	99.98489	51.12111	8	95.0134	52.37997
21	99.97007	51.47678	10	97.73915	52.63805
22	100	52.7307	12	96.68979	52.34392
			20	98.1578	51.86452
			21	98.46531	53.84
			22	99.72115	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.1 โครมาโตแกรมผลิตภัณฑ์จากการทำปฏิกิริยาของกลูโคสในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งกะ ความเข้มข้นสารละลายกลูโคส 16.7%w/v อัตราการป้อนสาร 0.1 มิลลิลิตรต่อนาที ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 3.25 โมล/ลิตร ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ที่เวลาต่างๆ