

ตามเกณฑ์สมุดปกปกน พระจอมเกล้าลาดกระบัง
จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสของซูโครส
ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนประจุปรกรด



นางสาวชาวศรี เหลืองรัตนาก
นางสาวบุศรา ศิริวงศ์เชียร

เลขหม.....
เลขทะเบียน..... 33990
วัน, เดือน, ปี 27 ก.ย. 2542

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2541

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Kinetics of the Sucrose Hydrolysis Catalyzed by an Acidic Ion Exchange Resin

Miss Chaowasri Luengratanakorn

Miss Budsara Siriwongwichian



A Report Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Bachelor of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

1998

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์เรื่อง จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสของซูโครส
ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนประจุรูปกรด

โดย นางสาวเซาวศรี เหลืองรัตนากร
นางสาวบุศรา ศิริวงศวิเชียร

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

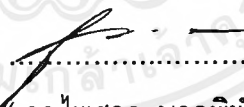
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง


อาจารย์ที่ปรึกษา ดร. ประกอบ กิจไชยา


ปริญญาานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญาานิพนธ์


.....ประธานกรรมการ
(ดร. ประกอบ กิจไชยา)


.....กรรมการ
(ดร.ไพศาล นาคพิพัฒน์)


.....กรรมการ
(อาจารย์ สันติ วัฒนานุสรณ์)


.....กรรมการ
(อาจารย์ บุญชัย โชติวิริยวานิชย์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรื่อง จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสของซูโครสด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนประจุ
รูปกรด

โดย นางสาวเชาวศรี เหลืองรัตนากร

นางสาวบุศรา ศิริวงศิริเชียร

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร. ประกอบ กิจไชยา

ปริญญาานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสของซูโครสเร่งปฏิกิริยา
ด้วย Lewatit S100 ซึ่งเป็นเรซินแลกเปลี่ยนประจุในรูปกรดชนิดเจล บรรจุในเครื่องปฏิกรณ์แบบ
แพ็คเบด ที่อุณหภูมิคงที่ ผลลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยานี้คือกลูโคสและฟรุคโตส ผลการทดลองแสดงว่า
ปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเมื่อเทียบกับความเข้มข้นของซูโครส อัตราเร็วของปฏิกิริยาซูโครส
ไฮโดรลิซิสคือ $\{(4.82 \cdot 10^5) \cdot \exp[-63901/(8.3144 \cdot T)]\} \cdot C_A$ โมลซูโครส/(ลิตรของตัวเร่งปฏิกิริยา*
วินาที) เมื่อ T คืออุณหภูมิในหน่วยเคลวินและ W_A คือความเข้มข้นในหน่วย เปอร์เซ็นต์ น้ำหนัก/
ปริมาตร

ค่าการเปลี่ยนสารตั้งต้นจากการทดลองครั้งแรกและครั้งสุดท้ายได้ค่าใกล้เคียงกัน แสดง
ว่าเรซินแลกเปลี่ยนประจุมีเสถียรภาพสูงไม่มีการเสื่อมสภาพ

Report Title Kinetics of the Sucrose Hydrolysis Catalyzed by an Acidic Ion Exchange Resin

By Miss Chaowasri Luengratanakorn

Miss Budsara Siriwongwichian

Advisor Dr. Prakorb Kitchaiya

Report for Bachelor Degree of Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering Faculty of Engineering

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Abstract

The kinetics of the sucrose hydrolysis by Lewatit S100, a gel type acidic ion exchange resin, as catalyst was studied in a packed bed reactor under isothermal condition. The products of this reaction are glucose and fructose. Results showed that the reaction is first order with respect to sucrose concentration. The rate of sucrose hydrolysis was determined to be $\{(4.82 \cdot 10^5) \cdot \exp[-63901/(8.3144 \cdot T)]\} \cdot W_A$ moles sucrose/ (liter catalyst*sec) where T is temperature in Kelvin and W_A is concentration in percent weight/volume.

The conversion from sucrose hydrolysis by Lewatit S100 can be estimated to be $1 - \exp\{(1.65 \cdot 10^7) \cdot \exp[-63901/(8.3144 \cdot T)] \cdot \tau\}$, where τ is the space time in seconds. For example, 98% conversion at 60°C requires 2503 seconds space time. The experimental conversion for the first and the last run were almost the same, after plenty of runs were performed. Thus, the ion exchange resin had a high stability without any deactivation.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ บริษัท รามาโปรดักชัน จำกัดที่ได้เอื้อเพื่อน้ำตาลฟรุคโตส และ บริษัท โพลีเคมี มาร์เก็ตติ้ง จำกัดที่ได้เอื้อเพื่อเรซินแลกเปลี่ยนประจุ Lewatit S100 เพื่อใช้ในการทดลอง ขอขอบคุณ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้เอื้อเพื่อเครื่องพอลาริเมตรเพื่อใช้ในการทดลอง ขอขอบคุณ คุณศุภางค์เพ็ญ เรื่องเวทที่ได้ให้ความช่วยเหลือด้านคอมพิวเตอร์เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ ดร. ประกอบ กิจไชยา อาจารย์ที่ปรึกษาซึ่งได้ให้คำแนะนำแก่ผู้จัดทำในการดำเนินโครงการ ตลอดจนการหาอุปกรณ์สำหรับการทำการทดลอง ขอขอบคุณอาจารย์ภาควิชา วิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ได้ให้คำแนะนำและให้ความช่วยเหลือในการทำการทดลองรวมถึงการใช้อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง และขอขอบคุณเพื่อนนักศึกษาชั้นปีที่ 4 ทุกคน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือตามความสามารถที่จะช่วยเหลือได้ ท้ายที่สุดขอขอบคุณผู้ร่วมทำโครงการนี้ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการทำโครงการอย่างเต็มความสามารถซึ่งทำให้โครงการสามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญภาพ	ฎ
สารบัญตาราง	ฐ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฒ
บทที่	
1. บทนำ	1
1. ความเป็นมา	1
2. วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
3. ขอบเขตของโครงการ	2
4. ขั้นตอนการดำเนินงาน	2
5. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
2. น้ำตาลชูโครส กลูโครสและฟรุคโตส	3
1. คุณสมบัติของชูโครส	3
2. คุณสมบัติทางกายภาพของชูโครส	4
3. คุณสมบัติทางเคมีของชูโครส	6
3.1 ออกซิเดชันของชูโครส	6
3.2 ไฮโดรลิซิสของชูโครส	6
3.3 การเสียสภาพด้วยอัลคาไลน์	6
3.4 การเสียสภาพจากความร้อน	6

	หน้า
4. ประโยชน์ของการใช้ซูโครส	6
4.1 การประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร	6
4.2 การประยุกต์ใช้ในการสังเคราะห์ทางเคมี	6
4.3 การประยุกต์ใช้ในการหมัก	7
4.4 การประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมยา	7
5. ฟรุคโตส	7
6. กลูโคส	7
3. เครื่องปฏิกรณ์แบบแพ็คเบด	8
1. สมการสำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบแพ็คเบด	8
2. การหาอันดับของปฏิกิริยา	11
2.1 ปฏิกิริยาอันดับศูนย์	11
2.2 ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง	12
2.3 ปฏิกิริยาอันดับสอง	13
3. การหาค่าพลังงานกระตุ้น	14
4. การเกิดปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสของซูโครสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอนไซม์	15
1. เอนไซม์ที่ใช้ในการไฮโดรไลซ์ซูโครส	16
2. การเกิดปฏิกิริยาของเอนไซม์	17
5. ตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนประจุ	20
1. คุณสมบัติของ Lewatit S100	20
2. การพิจารณาค่าความจุโดยทั่วไปของเรซิน	21
3. ปัจจัยที่มีผลต่อความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยา	23
3.1 ปริมาณครอสลิงค์	23
3.2 ความเป็นกรดที่รุนแรง	23
4. ความเสถียรต่อความร้อนของตัวเร่งปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนประจุ	24
5. จลนพลศาสตร์การเกิดปฏิกิริยาดิซัลฟอนेशन	26
6. สรุปรูปข้อดีของตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนประจุ	26

	หน้า
6. การเกิดปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสของซูโครสด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนประจุ	27
1. ปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสของซูโครส	27
2. การทดลองของ George Bodamer และ Robert Kunin	27
2.1 ขั้นตอนการทดลอง	28
2.2 ผลของหมู่ฟังก์ชันที่ต่างกัน	30
2.3 ผลจากการที่สารละลายกรดถูกทำให้เป็นกลาง	31
2.4 ผลจากความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา	31
2.5 ผลจากขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยา	31
2.6 ผลจากความพรุนของเรซิน	32
3. พลังงานกระตุ้น	34
4. การทดลองของ O'Connell	35
5. การทดลองเมื่อเกิดการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา	39
7. วิธีการทดลองและผลการทดลอง	44
1. การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา	44
2. เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง	44
3. การสร้างกราฟมาตรฐาน	46
4. วิธีการทดลอง	
4.1 การหาค่าความจุของตัวเร่งปฏิกิริยา	52
4.2 การหาอันดับของปฏิกิริยา	52
4.3 การหาค่าพลังงานกระตุ้น	53
5. ผลการทดลอง	53
5.1 ผลการหาค่าความจุของตัวเร่งปฏิกิริยา	52
5.2 ผลการหาอันดับของปฏิกิริยา	53
5.3 ผลการหาค่าพลังงานกระตุ้น	60

	หน้า
6. การเปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนสารตั้งต้นจากการทดลอง และค่าการเปลี่ยนสารตั้งต้นจากการคำนวณ	62
7. การเสื่อมสภาพ	63
8. สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	65
เอกสารอ้างอิง	66



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของน้ำตาลซูโครส	3
3.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบแพ็คเบด	10
3.2 กราฟที่พล็อตระหว่าง $\ln[1/(1-X)]$ กับ τ	13
3.3 กราฟที่พล็อตระหว่าง $\ln k$ กับ $1/RT$	14
4.1 การพิสูจน์พารามิเตอร์ของ Michaelis-Menten	18
5.1 โครงสร้างทางเคมีของเรซิน	21
5.2 ปฏิกิริยาดีซัลฟอนेशन	24
5.3 ความเสถียรต่อความร้อนที่อุณหภูมิ 155 องศาเซลเซียส ความดัน 150 psi	25
5.4 ความเสถียรต่อความร้อนที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส	25
6.1 การเปลี่ยนซูโครสด้วยแอมเบอร์ไลต์ ไออาร์-120 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	28
6.2 การเปลี่ยนซูโครสด้วยแอมเบอร์ไลต์ ไออาร์-120 ที่อุณหภูมิ 25 50 และ 75 องศาเซลเซียส	29
6.3 อัตราเร็วของซูโครสที่เปลี่ยนไปเมื่อเทียบกับขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยา	32
6.4 อัตราเร็วของซูโครสที่เปลี่ยนไปเมื่อเทียบกับปริมาณของครอสลิงค์	33
6.5 ปฏิกิริยาอันดับที่ 1 เมื่อใช้ซูโครสเริ่มต้นเข้มข้น 15%	36
6.6 ปฏิกิริยาอันดับที่ 1 เมื่อใช้ซูโครสเริ่มต้นเข้มข้น 30%	36
6.7 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อปฏิกิริยา	37
6.8 ปฏิกิริยาอันดับที่ 1 เมื่อใช้ซูโครสเริ่มต้นเข้มข้น 45%	38
6.9 ข้อมูลความสัมพันธ์จากรูปที่ 6.8	38
6.10 การเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยไซเดียม	40
6.11 การเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยโปแตสเซียม	40
6.12 กราฟเปรียบเทียบความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยากับปริมาณกรด	42

	หน้า
7.1 อุปกรณ์การทดลองที่ยังไม่ได้พันจนวน	45
7.2 อุปกรณ์การทดลองที่พันจนวนแล้ว	45
7.3 กราฟมาตรฐานสารละลายซูโครสเริ่มต้นเข้มข้น 20%	50
7.4 กราฟมาตรฐานสารละลายซูโครสเริ่มต้นเข้มข้น 30%	51
7.5 กราฟปฏิกิริยาอันดับศูนย์	55
7.6 กราฟปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง	57
7.7 กราฟปฏิกิริยาอันดับสอง	59
7.8 กราฟการหาค่าพลังงานกระตุ้น	61
7.9 กราฟเปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนสารตั้งต้นจากการทดลอง และค่าการเปลี่ยนสารตั้งต้นจากการคำนวณ	63



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติทางการยภาพของซูโครส	4
2.2 การเปรียบเทียบค่าความหวานของสารให้ความหวานต่าง ๆ	5
5.1 ผลการเปรียบเทียบการรีเจเนอเรตโลหะหนักด้วยกรด	22
5.2 ค่าความจุที่ได้โดยการปรับเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	23
6.1 ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาของซูโครสด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาต่าง ๆ	29
6.2 ผลจากการที่สารละลายกรดถูกทำให้เป็นกลาง	30
6.3 ผลจากความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส	31
6.4 ผลจากขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยาไออาร์-120 ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส	32
6.5 ผลจากความพรุนของซิลฟอนิกเรซิน	33
6.6 ผลจากความพรุนของหมู่คาร์บอกซิลิก	33
6.7 ค่าพลังงานกระตุ้นของการเปลี่ยนแปลงซูโครส	34
6.8 ผลของความเข้มข้นของสารละลายซูโครสต่อค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยา ที่เป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 1	39
7.1 ปริมาณซูโครส กลูโคสและฟรุคโตส ที่ค่าการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นต่าง ๆ ของสารละลายซูโครสเริ่มต้นเข้มข้น 20%	48
7.2 ปริมาณซูโครส กลูโคสและฟรุคโตส ที่ค่าการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นต่าง ๆ ของสารละลายซูโครสเริ่มต้นเข้มข้น 30%	48
7.3 ผลการหาค่าความจุของตัวเร่งปฏิกิริยา	53
7.4 ผลการหาค่าความจุของตัวเร่งปฏิกิริยาจากตารางที่ 7.3	54
7.5 ผลการหาอันดับของปฏิกิริยาอันดับศูนย์	54
7.6 ผลการหาอันดับของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง	56
7.7 ผลการหาอันดับของปฏิกิริยาอันดับสอง	58
7.8 ผลการหาค่าพลังงานกระตุ้น	60
7.9 ผลการเปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นจากการทดลอง และค่าการเปลี่ยนสารตั้งต้นจากการคำนวณ	62
7.10 ผลการเปรียบเทียบการทดลองครั้งแรกและครั้งสุดท้าย	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A	=	พรีเอ็กซ์โปเนนเชียลของสมการอาร์เรเนียส
C_A	=	ความเข้มข้นของสาร A (โมล/ลิตร)
C_{A0}	=	ความเข้มข้นเริ่มต้นของสาร A (โมล/ลิตร)
\bar{C}_H	=	ความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนในเรซิน (มิลลิอีควิวาเลนต์/มิลลิลิตร)
C_s	=	ความเข้มข้นของซูโครสในสารละลาย (โมล/ลิตร)
D_s	=	ค่าการแพร่ของซูโครสกับเรซิน (ตารางเซนติเมตร/วินาที)
E	=	ค่าพลังงานกระตุ้นของการเกิดปฏิกิริยา (กิโลจูล/โมล)
f	=	อัตราส่วนของปริมาตรเรซินต่อปริมาตรที่เป็นกรดอย่างสมบูรณ์
F_A	=	อัตราการไหลของโมลสาร A (โมล/วินาที)
F_{A0}	=	อัตราการไหลเริ่มต้นของโมลสาร A (โมล/วินาที)
G_A	=	อัตราการเกิดสาร A จากปฏิกิริยาเคมี (โมล/วินาที)
h	=	ค่าชิลโมดูลัส (Thiele modulus)
k	=	ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยา
k_1, k_2	=	ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ T_1 และ T_2 ตามลำดับ
k_0	=	ค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับที่สอง ของการเปลี่ยนซูโครส (มิลลิลิตรต่อวินาที/มิลลิอีควิวาเลนต์)
N_A	=	จำนวนโมลของสาร A (โมล)
Q	=	อัตราการไหลของปริมาตร (ลิตร/นาที)
r_A	=	อัตราเร็วปฏิกิริยา (โมล/(ลิตรของตัวเร่งปฏิกิริยา*วินาที))
R	=	ค่าคงที่ของแก๊ส = 8.3144 (จูล/โมล.เคลวิน)
R	=	รัศมีของอนุภาคเรซิน (เซนติเมตร)
R_s	=	อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่อปริมาตรของเรซิน (โมล/มิลลิลิตร.วินาที)
T	=	อุณหภูมิ (เคลวิน)
T_1, T_2	=	อุณหภูมิที่ 1 และ 2 ตามลำดับ (เคลวิน)
v	=	อัตราการไหลของปริมาตร (ลิตร/นาที)
v_0	=	อัตราการไหลเริ่มต้นของปริมาตร (ลิตร/นาที)

V	=	ปริมาตรของเรซิน (มิลลิลิตร)
X	=	การเปลี่ยนสารตั้งต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์
η	=	effectiveness factor
ε	=	อัตราส่วนของว่างของเครื่องปฏิกรณ์แบบแพ็คเบด
λ	=	ค่าสัมประสิทธิ์การดูดของซูโครส
τ	=	สเปซไทม์ของเครื่องปฏิกรณ์ (นาที)

ตัวห้อย

a	=	เทียบเมื่อเรซินเป็นกรดอย่างสมบูรณ์
cal	=	ผลจากการคำนวณ
exp	=	ผลจากการทดลอง

บทที่ 1

บทนำ

1. ความเป็นมา

ซูโครสหรือน้ำตาลทรายเป็นน้ำตาลโมเลกุลคู่ เมื่อปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสจะเปลี่ยนไปเป็น กลูโคสและฟรุคโตส ซึ่งเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว อาจใช้กรดเป็นตัวเร่งให้เกิดปฏิกิริยา โดยจะมีทั้งแบบระบบเอกพันธ์ (Homogeneous system) และระบบ วิวิธพันธ์ (Heterogeneous system) ซึ่ง กลูโคสและฟรุคโตสที่ได้จะเป็นสารละลายอยู่ในวัฏภาคเดียวกัน ในทางการแพทย์ น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว โดยเฉพาะน้ำตาลกลูโคส มีความสำคัญอย่างมากเนื่องจากน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวนี้อาจเป็น แหล่งพลังงานที่ร่างกายสามารถดูดซึมและนำไปใช้ได้ทันทีโดยไม่ต้องผ่านกระบวนการย่อย นอกจากนี้ยังสามารถส่งเข้าสู่กระแสโลหิตได้โดยตรง จึงเหมาะกับผู้ป่วยที่มีปัญหาด้านระบบการย่อย หรือผู้ป่วยที่ไม่สามารถรับประทานอาหารได้ ส่วนน้ำตาล ฟรุคโตสเป็นน้ำตาลธรรมชาติที่หวานที่สุด และมีความสามารถในการละลายมากกว่าน้ำตาลทราย 20% และมีความเสถียรในการละลายมากกว่าน้ำตาลซูโครส จึงนำไปใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ได้หลากหลายเช่น เครื่องดื่ม ขนมหวานต่าง ๆ และไอศกรีม เป็นต้น

สำหรับการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสของซูโครสแบบวิวิธพันธ์นั้นเป็นเรื่องที่มีมานานแล้ว โดยในปี ค.ศ. 1911 Tacke และ Suchting [1] ได้พบว่ามี การเปลี่ยนแปลงของน้ำตาลซูโครสในดิน และในปี ค.ศ. 1914 Hanley เชื่อว่าการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนี้มาจากกรดฮิวมิก (Humic acids) ในดิน ต่อมา Rice และ Osugi ได้วิจัยว่าการเปลี่ยนแปลงของน้ำตาลซูโครสจะเกิดขึ้นในดินที่มีแร่ธาตุมาก และได้มีการวัดความเป็นกรดของดิน โดยดูจากการเปลี่ยนแปลงของซูโครสด้วย

ในโครงการศึกษานี้ จะศึกษาการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสของซูโครสแบบวิวิธพันธ์โดยใช้ ตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนประจุปรอท (Acidic Ion Exchange Resins) โดยตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนประจุปรอทมีชื่อทางการค้าคือ Lewatit S100

2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 2.1 ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสของซูโครสให้เปลี่ยนเป็นกลูโคสและฟรุคโตส
- 2.2 ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสของซูโครส
- 2.3 ศึกษาอุณหภูมิของการเกิดปฏิกิริยาที่ส่งผลต่อค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาด้วยสมการอาร์เรเนียส

3 ขอบเขตของโครงการ

- 3.1 ศึกษาส่วนประกอบที่สำคัญ สำหรับการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสของซูโครส ซึ่งได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนประจุปรกรด เครื่องปฏิกรณ์
- 3.2 ทดลองหาอันดับของปฏิกิริยาและพลังงานกระตุ้น โดยปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของสารป้อน อัตราการไหลและอุณหภูมิ

4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 4.1 เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนประจุปรกรดด้วยการเปลี่ยนประจุของโซเดียม (Na^+) ที่มีอยู่เดิมให้กลายเป็นประจุของไฮโดรเจน (หรือประจุที่มีสภาพเป็นกรด)
- 4.2 ประกอบอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งประกอบด้วย บีม ตัวกรองประจุเริ่มต้น เคเบิลให้ความร้อน เครื่องปฏิกรณ์ และระบบควบคุมอุณหภูมิ
- 4.3 ศึกษาและทดลองปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสของซูโครส รวมถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อปฏิกิริยา

5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 5.1 ได้รับข้อมูลทางจลนพลศาสตร์เบื้องต้นเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสของซูโครสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนประจุนิดกรด ซึ่งมีชื่อทางการค้าว่า Lewatit S100
- 5.2 สามารถนำข้อมูลที่ได้ไปพัฒนาเพื่อใช้ในกระบวนการผลิตจริง ได้

บทที่ 2

น้ำตาลซูโครส กลูโคสและฟรุคโตส

1. คุณสมบัติของซูโครส

ซูโครส (β -D-fructofuranosyl- α -D-glucopyranoside) หรือที่รู้จักกันดีคือน้ำตาลทราย มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 342.3 มีคุณสมบัติเป็นไดแซ็กคาไรด์ (Disaccharide) ของกลูโคสและฟรุคโตสต่อเชื่อมกันด้วยพันธะอัลฟาเบต้าไกลโคซิดิก (α, β -glycosidic bond) ดังรูปที่ 2.1



Haworth perspective formula

Conformational structure of sucrose

in solid crystals

รูปที่ 2.1 โครงสร้างของน้ำตาลซูโครส [2]

ในทางอุตสาหกรรมน้ำตาลที่ได้จะมาจาก 2 แหล่งใหญ่ ๆ คือ หัวบีท (Sugarbeets) และอ้อย (Sugarcanes) ในสมัยแรก ซูโครสจะถูกสกัดออกมาโดยตัดอ้อยออกเป็นชิ้น ๆ แล้วสกัดด้วยน้ำร้อน จากนั้นนำสารละลายที่ได้มาทำให้ใสด้วยปูนขาว แล้วนำไประเหยให้เข้มข้นแล้วตกตะกอน จะได้น้ำตาลทราย ส่วนที่เหลือจะเรียกว่ากากน้ำตาล (Molasses)

2. คุณสมบัติทางกายภาพของซูโครส

น้ำตาลซูโครสจะมีความบริสุทธิ์เฉลี่ยถึงประมาณ 99.96% โดยสารเจือปนอื่นๆ ประมาณครึ่งหนึ่งคือน้ำ คุณสมบัติของซูโครสจะแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางกายภาพของซูโครส [2]

คุณสมบัติ	ค่า
ความหนาแน่น (d_4^{15} , kg/m ³)	1587.9
จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)	160-186
ค่าดัชนีการเบี่ยงเบนแสง (องศา)	+66.53
ค่าการละลายน้ำที่ 20 องศาเซลเซียส (g/g)	2.00
ปริมาตรโมลาร์ปรากฏ (Apparent molar volume) ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส (cm ³ /mol)	209.5
ค่าความร้อนจำเพาะ (J/mol)	
รูปร่างผลึกที่ 20 องศาเซลเซียส	415.8
รูปร่างอัสติรฐานที่ 22 องศาเซลเซียส	90.2
ค่าความร้อนของการละลาย (kJ/mol)	4.75±0.26
โมเมนต์ไดโพล (Dipole moment) (C*m)	3.1*10 ⁻¹⁸
เอนทัลปีของการตกผลึกที่ 30 องศาเซลเซียส (kJ/mol)	10.5
ความหนาแน่นแบบบัลค์ (Bulk density) (kg/m ³)	
แบบผลึก	930
แบบผง	600
เอนโทรปี (J/(mol*K))	360.5

ความหวานของน้ำตาลซูโครสเป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่สุดโดยจะใช้เป็นตัวมาตรฐานในการวัดความหวานของสารให้ความหวานอื่น ๆ โดยความหวานนี้จะขึ้นกับอุณหภูมิ ค่าพีเอช ความเข้มข้นของสารละลายซูโครส และอื่น ๆ โดยตารางที่ 2.2 จะแสดงการเปรียบเทียบความหวานของสารให้ความหวานต่าง ๆ

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบค่าความหวานของสารให้ความหวานต่าง ๆ [2]

สารให้ความหวาน	ค่าความหวานสัมพัทธ์ (Relative sweetness)
ฟรุคโตส (Fructose)	1.2-1.8
ซูโครส (Sucrose)	1.00
กลูโคส (Glucose)	0.60
มอลโตส (Maltose)	~0.5
แลคโตส (Lactose)	0.15-0.30
กาแลคโตส (Galactose)	0.32
แซคคาริน (Saccharin)	250-550
แอสพาทาม (Aspartame)	120-200
ซูคราโลส (Sucralose)	550-750
ไซคลาเมท (Cyclamate)	30-50
อาซีซัลเฟม เค (Acesulfame K)	~200
อัลลิเทม (Alitame)	2000

ฟรุคโตสจะมีความหวานมากกว่าซูโครสที่อุณหภูมิห้อง (ที่ประมาณ 5 องศาเซลเซียส) แต่ที่อุณหภูมิสูงจะให้ที่ต่างออกไป โดยที่ 40 องศาเซลเซียส ทั้งน้ำตาลซูโครสและน้ำตาลฟรุคโตสจะมีความหวานเท่ากัน ซูโครสจะมีหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl) 8 หมู่ ซึ่งส่งผลให้มีการละลายน้ำที่ดีมาก และจะละลายได้ดีขึ้นเมื่อมีของแข็งอื่นละลายอยู่ด้วย ซึ่งส่งผลให้ได้ยิลด์ (Yield) ของการตกผลึกลดลง

3. คุณสมบัติทางเคมีของซูโครส

หมู่คาร์บอนิล (Carbonyl group) ของกลูโคสและฟรุคโตส ที่เป็นพันธะไกลโคซิดิก (Glycosidic) ของซูโครส ทำให้กลายเป็นพันธะนอนรีดิวซิง (Nonreducing) หมู่ไฮดรอกซิลของซูโครสจะมีความเป็นกรดที่อ่อนมาก ๆ

- 3.1 ออกซิเดชันของซูโครส (Oxidation of sucrose) ซูโครสจะถูกออกซิไดซ์ด้วยกรดไนตริก โปแตสเซียมเปอร์แมงกาเนต และ เปอร์ออกไซด์ โดยใช้ออกซิเจน และ แพลลาเดียมหรือแพลตินัม จะได้อนุพันธ์ของกรดซูโครนิก (Sucronic acid derivative)
- 3.2 ไฮโดรลิซิสของซูโครส (Hydrolysis of sucrose) ซูโครสสามารถถูกไฮโดรไลซ์เป็นกลูโคสและฟรุคโตสได้ด้วยเอนไซม์อินเวอร์เตส (Invertase) ระหว่างที่เกิดปฏิกิริยาการเบี่ยงเบนแสงจะลดลงจนติดลบตามปริมาณของฟรุคโตสที่เกิดขึ้น น้ำตาลสามารถถูกทำลายได้ด้วยพีเอชที่รุนแรง โดยใช้อุณหภูมิที่สูงและค่าพีเอชที่ต่ำ
- 3.3 การเสียสภาพด้วยอัลคาไลน์ (Alkaline degradation) ที่พีเอชสูง ซูโครสจะค่อนข้างเสถียร อย่างไรก็ตาม ที่ความเป็นด่างที่รุนแรงและมีการให้ความร้อน ซูโครสจะเปลี่ยนไปเป็นกรดอินทรีย์ และคีโตนได้ ในสถานะสารละลายซูโครสจะเสถียรมากที่สุดที่ค่าพีเอชประมาณ 9
- 3.4 การเสียสภาพจากความร้อน (Thermal degradation) ความร้อนของการเกิด (Formation) และการเผา (Combustion) ของซูโครสคือ -2.26 MJ/mol (540 kcal/mol) และ -5.79 MJ/mol (-1384 kJ/mol) ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ $160-186$ องศาเซลเซียสซูโครสจะเริ่มเปลี่ยนสภาพโดยจะมีการแพร่กระจายของกลีเซอรอล

4. ประโยชน์ของการใช้ซูโครส

- 4.1 การประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร (Food applications) ซูโครสโดยส่วนใหญ่จะใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร โดยจะใช้เพิ่มความหวาน ซึ่งซูโครสจะป้องกันการสูญเสียสี กลิ่น และรสชาติของอาหารไปกับระบบการผลิต
- 4.2 การประยุกต์ใช้สังเคราะห์สารเคมี (Feedstock for chemical synthesis application) ในส่วนนี้จะเป็นการใช้ซูโครสน้อยกว่า 0.5% ของซูโครสทั้งหมด โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะใช้ผลิตพวกเอสเทอร์ ซึ่งจะเป็นเอสเทอร์แบบที่ไม่เป็นพิษ และจุลินทรีย์สามารถย่อยสลายได้ (Biodegradable) ชูโครสโมโนเอสเทอร์ จะใช้ทำเป็นสารลดแรงตึงผิว สารซักล้าง และอิมัลซิฟายเออร์

4.3 การประยุกต์ใช้ในการหมัก (Fermentation feedstock application) ชูโครสในรูปของกากน้ำตาลจะใช้ผลิตสารประกอบอินทรีย์ต่าง ๆ เช่น กรดแลคติก กรดกลูตามิก กรดซิตริก กลีเซอรอล และแอนติไบโอติก รัม (Rum) ก็ผลิตมาจากการหมักกากน้ำตาลของอ้อยซึ่งใช้ในการผลิตของพวกเบียร์

4.4 การประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมยา (Pharmaceutical application) ชูโครสจะใช้ผสมในยาเพื่อปกปิดรสชาติที่ไม่พึงประสงค์

5. ฟรุคโตส

ฟรุคโตสเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว เป็นไอโซเมอร์กับกลูโคส ละลายน้ำได้ดี โมเลกุลของฟรุคโตสที่มีความว่องไวสูงที่อุณหภูมิสูง ฟรุคโตสไม่เพียงจะเปลี่ยนเป็นน้ำตาลอย่างรวดเร็วเท่านั้นแต่ยังจะเกิดการโพลีเมอไรซ์เป็นไดแอนไฮดริส (Dianhydrieds) ด้วย นอกจากนี้ยังจะเกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วกับเอมีน (Amines) และโปรตีน (Protein) ด้วย ฟรุคโตสสามารถนำไปใช้เป็นสารให้ความหวานในอาหารควบคุมน้ำหนักเนื่องจากมีแคลอรีต่ำ และการใช้ฟรุคโตสในอุตสาหกรรมจะช่วยประหยัดต้นทุนเนื่องจากฟรุคโตสมีความหวานเป็น 1.2 ถึง 1.8 เท่าของชูโครส ฟรุคโตสสามารถใช้ในอุตสาหกรรมยาและอุตสาหกรรมอาหาร เช่น อุตสาหกรรมเครื่องดื่ม, ซ็อกโกแลต, โยเกิร์ต, ขนมขบเคี้ยว, หมากฝรั่ง เป็นต้น

6. กลูโคส

กลูโคสเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวเช่นเดียวกับฟรุคโตส แต่มีความหวานน้อยกว่าชูโครสและฟรุคโตส กลูโคสเป็นน้ำตาลที่ให้พลังงานได้รวดเร็ว เนื่องจากกลูโคสสามารถผ่านเข้าไปในกระแสโลหิตได้โดยตรง ในขณะที่ฟรุคโตสจะถูกดูดซึมที่ตับแล้วจึงเปลี่ยนเป็นกลูโคสก่อนผ่านเข้าสู่กระแสโลหิต กลูโคสสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมยาและอุตสาหกรรมอาหารได้เช่นเดียวกับฟรุคโตส

ให้ A แทนซูโครส

$$\left[\begin{array}{c} \text{อัตราการไหลเข้า} \\ \text{ของสาร A} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{อัตราการไหล} \\ \text{ออกของสาร A} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{อัตราการเกิดสาร A} \\ \text{จากปฏิกิริยาเคมี} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{อัตราการสะสม} \\ \text{สาร A ในระบบ} \end{array} \right]$$

$$F_{AO} - F_A + G_A = \frac{dN_A}{dt} \quad (3.1)$$

เมื่อ F_{AO} คือ อัตราการไหลของโมลสาร A เริ่มต้น (โมล/วินาที)

F_A คือ อัตราการไหลของโมลสาร A ที่เวลาใดๆ (โมล/วินาที)

G_A คือ อัตราการเกิดสาร A จากปฏิกิริยาเคมี (โมล/วินาที)

N_A คือ จำนวนโมลของสาร A (โมล)

t คือ เวลา (วินาที)

อัตราการเกิดของ A สัมพันธ์กับค่าอัตราเร็วปฏิกิริยาและปริมาตรคือ

$$G_A = r_A V \quad (3.2)$$

เมื่อ V คือ ปริมาตร (ลิตร)

r_A คือ อัตราเร็วปฏิกิริยา (โมล/(ลิตร*วินาที))

อัตราการเกิดของ A เป็นค่าที่เปลี่ยนแปลงตามปริมาตร ไม่ใช่ค่าคงที่ ดังนั้นค่าอัตราการเกิดของ A รวมจึงเท่ากับผลรวมของอัตราการเกิดย่อยที่แต่ละตำแหน่ง

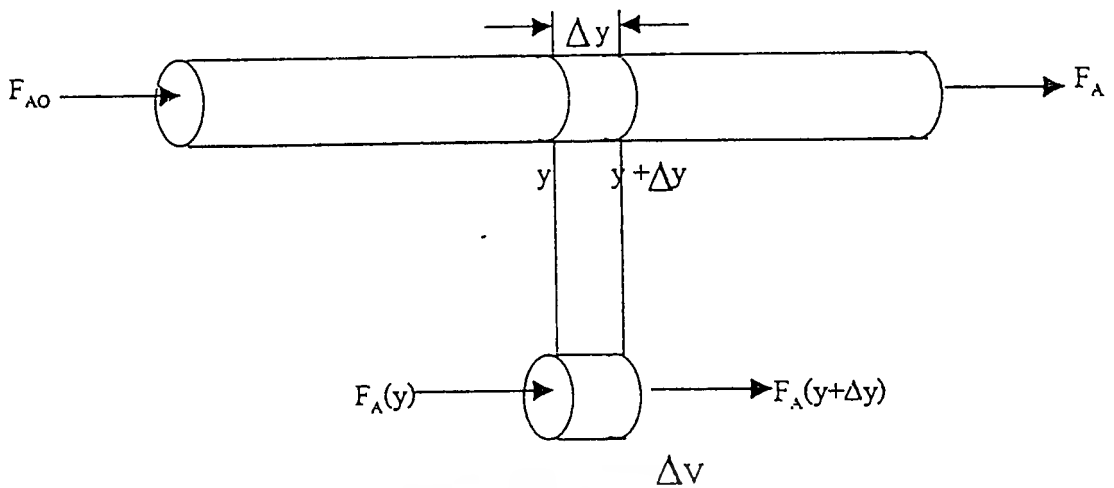
$$\sum_{i=1}^M \Delta G_{Ai} = \sum_{i=1}^M r_A \Delta V_i \quad (3.3)$$

ให้ $M \rightarrow \infty$ และ $\Delta V \rightarrow 0$ และอินทิเกรต

$$G_A = \int^V r_A dV \quad (3.4)$$

แทนสมการ (3.4) ในสมการ (3.1)

$$F_{AO} - F_A + \int^V r_A dV = \frac{dN_A}{dt} \quad (3.5)$$



รูปที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบแพ็ค [3]

จากรูปที่ 3.1 แบ่งเครื่องปฏิกรณ์ออกเป็นปริมาตรย่อย ΔV พิจารณาปริมาตรย่อยที่แบ่งออกมาให้ $F_A(y)$ เป็นอัตราการไหลของโมลสาร A ที่ปริมาตร ΔV

$$\int r_A dV = r_A \Delta V \quad (3.6)$$

ที่สภาวะคงตัว (Steady state)

$$\frac{dN_A}{dt} = 0 \quad (3.7)$$

แทนสมการ (3.6) และ (3.7) ในสมการ (3.5) จะได้

$$F_A(y) - F_A(y + \Delta y) + r_A \Delta V = 0 \quad (3.8)$$

ปริมาตร ΔV มีความสัมพันธ์กับพื้นที่หน้าตัดและความยาวคือ

$$\Delta V = A \Delta y \quad (3.9)$$

แทนสมการ (3.9) ในสมการ (3.8)

$$\frac{F_A(y + \Delta y) - F_A(y)}{\Delta y} = Ar_A \quad (3.10)$$

ให้ $\Delta y \rightarrow 0$

$$\frac{dF_A}{dy} = Ar_A \quad (3.11)$$

เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดของเครื่องปฏิกรณ์เป็นค่าคงที่ ดังนั้น $dV = A dy$

จึงได้ว่า

$$\frac{dF_A}{dV} = r_A \quad (3.12)$$

เนื่องจาก

$$\left[\begin{array}{c} \text{อัตราการไหลโดยโมลสาร} \\ A \text{ ที่ออกจากระบบ} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{อัตราการไหลโดยโมลสาร} \\ A \text{ ที่เข้าระบบ} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{อัตราการใช้โดยโมล} \\ \text{สาร A ในระบบ} \end{array} \right]$$

$$F_A = F_{A0} - F_{A0}X \quad (3.13)$$

เมื่อ X คือ การเปลี่ยนสารตั้งต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์

แทนสมการ (3.13) ในสมการ (3.12)

$$F_{A0} \frac{dX}{dV} = -r_A \quad (3.14)$$

ซึ่งเป็นสมการการออกแบบของเครื่องปฏิกรณ์แบบแพ็คเบดเบด

2. การหาอันดับของปฏิกิริยา

ในการหาอันดับของปฏิกิริยาจะเริ่มต้นด้วยการสมมติให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาอันดับต่างๆ กันแล้วจึงพิจารณาว่าผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับสมมติฐานใด

2.1 ปฏิกิริยาอันดับศูนย์

$$-r_A = k \quad (3.15.)$$

แทนสมการ (3.15) ลงในสมการ (3.14) จะได้ว่า

$$F_{A0} \frac{dX}{dV} = k \quad (3.16)$$

อินทิเกรต

$$\int_0^X dX = \frac{k}{F_{A0}} \int_0^V dV \quad (3.17)$$

ดังนั้น

$$X = \frac{k}{F_{A0}} V \quad (3.18)$$

ค่าอัตราการไหลของดมลมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นและค่าอัตราการไหลของปริมาตร (Volumetric flow rate) ดังสมการ

$$F_{A0} = C_{A0} v_0 \quad (3.19)$$

แทนสมการ (3.19) ลงในสมการ (3.18)

$$X = \frac{k}{C_{A0}} \left(\frac{V}{v_0} \right) \quad (3.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าสเปซไทม์มีความสัมพันธ์กับปริมาตรและค่าอัตราการไหลของปริมาตรดังสมการ

$$\tau = \frac{V}{v_0} \quad (3.21)$$

แทนค่าสมการ (3.21) ลงในสมการ (3.20)

$$X = \frac{k}{C_{A0}} \tau \quad (3.22)$$

จากสมการ (3.22) พบว่า ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นมีผลต่อค่าการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์ ดังนั้นเมื่อพล็อตกราฟระหว่าง X กับ τ จะให้ความชันเท่ากับ k/C_{A0}

2.2 ปฏิกริยาอันดับหนึ่ง

$$-r_A = kC_A \quad (3.23)$$

เมื่อ k คือ ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกริยา

C_A คือ ความเข้มข้นของสาร A ที่เวลาใดๆ

สารละลายซูโครสมีสถานะเป็นของเหลว อุณหภูมิและความดันในเครื่องปฏิกรณ์คงที่ดังนั้น

$$C_A = C_{A0}(1-X) \quad (3.24)$$

เมื่อ C_{A0} คือ ความเข้มข้นของสาร A เริ่มต้น

แทนสมการ (3.23) และ (3.24) ในสมการ (3.14)

$$F_{A0} \frac{dX}{dV} = kC_{A0}(1-X) \quad (3.25)$$

ค่าอัตราการไหลของโมลมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นและอัตราการไหลของปริมาตร (Volumetric flow rate) ดังสมการ

$$F_{A0} = C_{A0}v_0 \quad (3.26)$$

เมื่อ v_0 คือ อัตราการไหลของปริมาตรสาร A เริ่มต้น

แทนสมการ (3.26) ในสมการ (3.25) และอินทิเกรต จะได้

$$\int_0^X \frac{dX}{1-X} = \frac{k}{v_0} \int_0^V dV \quad (3.27)$$

$$\ln \frac{1}{1-X} = \frac{k}{v_0} V \quad (3.28)$$

เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง $\ln \frac{1}{1-X}$ กับ τ โดยเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการไหลของปริมาตรเริ่มต้น



รูปที่ 3.2 กราฟที่พล็อตระหว่าง $\ln \frac{1}{1-X}$ กับ τ

จะได้ความชันเท่ากับ k เมื่อ k คือค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยา

จากสมการ (3.28) จะเห็นได้ว่า สมการของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งไม่ขึ้นกับค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย ดังนั้นถึงแม้จะเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายจะยังคงให้ค่าความชันของกราฟเท่าเดิม

$$-r_A = kC_A^2 \quad (3.29)$$

แทนสมการ (3.24) ลงในสมการ (3.29)

$$-r_A = kC_{A0}^2(1-X)^2 \quad (3.30)$$

แทนสมการ (3.30) ลงในสมการ (3.14)

$$F_{A0} \frac{dX}{dV} = kC_{A0}^2(1-X)^2 \quad (3.31)$$

อินทิเกรต

$$\int_0^X \frac{dX}{(1-X)^2} = k \frac{C_{A0}}{v_0} \int_0^V dV \quad (3.32)$$

ดังนั้น

$$\frac{1}{1-X} = kC_{A0} \frac{V}{v_0} \quad (3.33)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (3.21) จะได้ว่า

$$\frac{1}{1-X} = kC_{A0}\tau \quad (3.34)$$

จากสมการ (3.34) พบว่า ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นมีผลต่อค่าการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์ และเมื่อพล็อตกราฟระหว่าง $1/(1-X)$ กับ τ จะได้เส้นกราฟที่มีความชันเท่ากับ kC_{A0}

3. การหาค่าพลังงานกระตุ้น

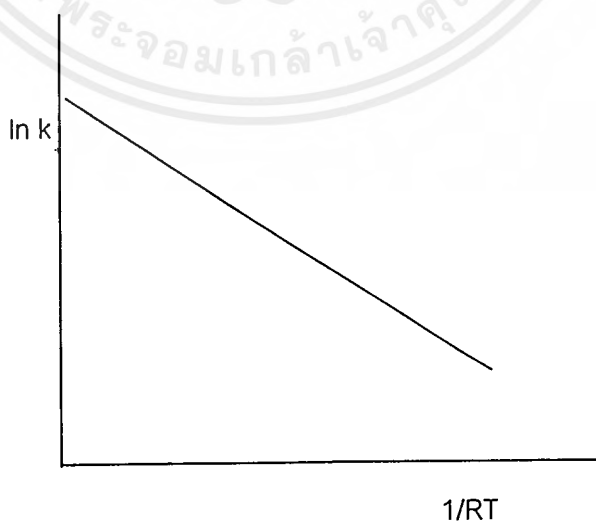
ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยา (Reaction rate constant, k) เป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับตัวแปรหลาย ๆ อย่าง เช่น ในปฏิกิริยาที่อยู่ในสถานะก๊าซ ค่า k จะขึ้นอยู่กับตัวเร่งปฏิกิริยาและเป็นฟังก์ชันของความดันรวม ส่วนในปฏิกิริยาที่อยู่ในสถานะของเหลว ค่า k อาจขึ้นอยู่กับความดันรวม ความแข็งแรงของประจุ (Ionic strength) การเลือกตัวทำละลาย แต่ปัจจัยที่กล่าวมานั้นมีผลกับค่า k น้อยกว่าเมื่อเทียบกับอุณหภูมิ ดังนั้น ในห้องปฏิบัติการหรือในปฏิกิริยาทางอุตสาหกรรม จึงตั้งสมมติฐานให้ค่า k เป็นค่าที่ขึ้นกับอุณหภูมิเพียงอย่างเดียว ดังสมการอาร์เรเนียส

$$k(T) = Ae^{-E/RT} \quad (3.35)$$

จัดให้อยู่ในรูปลอการิทึมธรรมชาติ (Natural logarithm)

$$\ln k = \ln A - (E/R)(1/T) \quad (3.36)$$

พล็อตกราฟระหว่าง $\ln k$ กับ $1/RT$ จะได้ความชันเท่ากับ $-E$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $\ln A$



รูปที่ 3.3 กราฟพล็อตระหว่าง $\ln k$ กับ $1/RT$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การเกิดปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสของซูโครส โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอนไซม์

เอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มักใช้ในการเร่งปฏิกิริยาเกี่ยวกับอาหาร เอนไซม์เป็นโปรตีนที่เกิดจากการต่อสายโซ่ยาวของกรดอะมิโน เอนไซม์จะแบ่งออกเป็น 6 หมู่ใหญ่ ๆ คือ

- ออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-reduction)
- การย้ายหมู่ (Group transfer)
- ไฮโดรลิซิส (Hydrolysis)
- การกำจัดหมู่ (Group removal)
- ไอโซเมอไรเซชัน (Isomerization)
- การต่อโมเลกุล (Joining of molecules)

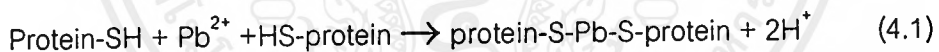
ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอนไซม์แบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ

- ตัวเร่งปฏิกิริยาเอนไซม์แบบเคลื่อนที่ได้ (Mobilized enzyme) เอนไซม์สามารถเคลื่อนที่ไปได้ทั่วโดยจะมีเฟสเดียวกับสารตั้งต้น
- ตัวเร่งปฏิกิริยาเอนไซม์แบบเคลื่อนที่ไม่ได้ (Immobilized enzyme) จะเป็นการนำเอนไซม์ไปเกาะติดกับตัวรองรับของแข็ง โดยสามารถทำได้โดย
 - (ก) นำเอนไซม์ไปดูดซับกับผิวของของแข็ง (Adsorption at a solid surface)
 - (ข) นำเอนไซม์ไปกักไว้ในเจล (Trapping in a gel)
 - (ค) นำเอนไซม์ไปเกิดครอสลิงค์โดยใช้เอเจนต์แบบไบฟังก์ชัน (Cross-linking of enzyme using a bifunctional agent)
 - (ง) นำเอนไซม์ไปเชื่อมด้วยพันธะโควาเลนต์กับตัวรองรับ (Covalent binding to a support)

1. เอนไซม์ที่ใช้ในการไฮโดรลิซิสซูโครส

เอนไซม์ที่ใช้ในการไฮโดรลิซิสซูโครส คือเอนไซม์อินเวอร์เตส หรือที่เรียกอย่างเป็นทางการว่าเบต้าฟรุคโตฟิวราโนซิเดส (β -fructofuranosidase) โดยจะไฮโดรไลส์ที่ปลายนอน ริตวซิง ส่วนเอนไซม์อัลฟาดีกลูโคซิเดส (α -D-glucosidase) ก็สามารถเร่งปฏิกิริยานี้ได้โดยจะไปแตกปลายของกลูโคส

เอนไซม์อินเวอร์เตสส่วนใหญ่ที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารโดยจะมีการใช้ฟรุคโตสมากกว่าซูโครสเนื่องจากฟรุคโตสจะมีความหวานกว่า และไม่เป็นผลึกง่าย อย่างไรก็ตามการใช้เอนไซม์อินเวอร์เตสก็มีขีดจำกัดเนื่องจากเอนไซม์อื่น ๆ เช่น กลูโคสไอโซเมอเรส จะใช้ในการเปลี่ยนกลูโคสไปเป็นฟรุคโตสและจะมีราคาสูงกว่าเอนไซม์อินเวอร์เตสมาก ในอุตสาหกรรมอาหารต้องการเอนไซม์อินเวอร์เตสที่มีความบริสุทธิ์สูง เอนไซม์อินเวอร์เตสสามารถใช้ในช่วงพีเอช 3.5-5.5 โดยจุดที่เหมาะสมที่สุดคือที่พีเอช 4.5 อุณหภูมิสูงสุดที่ใช้คือ 55 องศาเซลเซียส จะมีค่า K_m ประมาณ 2-5 มิลลิโมลาร์ นอกจากนี้การใช้เอนไซม์จะต้องระวังตัวหน่วงเอนไซม์ (Enzyme inhibitor) ซึ่งจะเป็นพวกโลหะหนักต่าง ๆ เช่น ตะกั่วและปรอท และพวก nerve gas ซึ่งจะไปยับยั้งเมตาบอลิซึมของเอนไซม์ เช่น ไอออนของตะกั่วจะไปทำปฏิกิริยากับหมู่ซัลไฟดริล (Sylfhydryl group, -SH) ในโปรตีน



ซึ่งการเปลี่ยนโครงสร้างของพันธะไดซัลไฟด์ จะทำให้เอนไซม์เสียหาย จากปฏิกิริยาเหล่านี้จะนำไปใช้ประโยชน์ในด้านการผลิตยาฆ่าแมลง

สำหรับการไฮโดรลิซิสแบบต่อเนื่องจะใช้เมมเบรนแบบอัลตราฟิลเตรชัน (ultrafiltration membranes) ที่มีเอนไซม์อินเวอร์เตสที่อยู่กับที่ (immobilized invertase enzyme) บนเส้นใยเซลลูโลสไตรอะซิเตต (cellulose triacetate fibres)

2. การเกิดปฏิกิริยาของเอนไซม์

การเกิดปฏิกิริยาของเอนไซม์จะแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนคือ

2.1 เอนไซม์ (E) ทำปฏิกิริยากับสับสเตรต (Substrate, S) ได้เป็นสารเชิงซ้อนของเอนไซม์-สับสเตรต (E*S)



2.2 สารเชิงซ้อนจะกลับไปเป็นเอนไซม์กับสับสเตรตดั้งเดิม



2.3 สารเชิงซ้อนจะทำปฏิกิริยากับสารอื่น (ในที่นี้คือน้ำ, W) ได้ผลิตภัณฑ์ออกมา (ในที่นี้คือกลูโคสและฟรุคโตส, P)



สมการที่ (4.2), (4.3) และ (4.4) จะมีค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ k_1 , k_2 และ k_3 ตามลำดับ จากปฏิกิริยาจะได้ว่า อัตราการหายไปของสับสเตรต ($-r_s$) คือ

$$-r_s = k_1(E)(S) - k_2(E^*S) \quad (4.5)$$

และอัตราการเกิดสารเชิงซ้อนเอนไซม์-สับสเตรตคือ

$$r_{E^*S} = k_1(E)(S) - k_2(E^*S) - k_3(W)(E^*S) \quad (4.6)$$

ความเข้มข้นทั้งหมดของเอนไซม์ (E_t) จะเท่ากับ

$$(E_t) = (E) + (E^*S) \quad (4.7)$$

จัดรูปแบบสมการที่ (4.7) ใหม่ จะได้

$$(E) = (E_t) - (E^*S) \quad (4.8)$$

แทนสมการที่ (4.8) ลงในสมการที่ (4.6) โดยใช้หลักการของ Pseudo-Steady-State Hypothesis, PSSH (สมมติฐานให้อัตราสุทธิของการเกิดเอนไซม์-สับสเตรตเป็นศูนย์) จะได้

$$r_{E^*S} = 0 = k_1[(E_t) - (E^*S)](S) - k_2(E^*S) - k_3(E^*S)(W) \quad (4.9)$$

จะได้

$$(E^*S) = \frac{k_1(E_t)(S)}{k_1(S) + k_2 + k_3(W)} \quad (4.10)$$

แทนสมการ (4.8) ลงในสมการ (4.5) ได้

$$-r_s = k_1[(E_t) - (E^*S)](S) - k_2(E^*S) \quad (4.11)$$

ลบสมการที่ (4.11) ด้วยสมการที่ (4.9) จะได้

$$-r_s = k_3(W)(E^*S) \quad (4.12)$$

แทนค่า (E^*S) จะได้

$$-r_s = \frac{k_1 k_3 (W)(E_t)(S)}{k_1(S) + k_2 + k_3(W)} \quad (4.13)$$

ให้ $k'_3 = k_3(W)$ และ $K_m = \frac{k'_3 + k_2}{k_1}$ จะได้

$$-r_s = \frac{k'_3(S)(E_t)}{(S) + K_m} \quad (4.14)$$

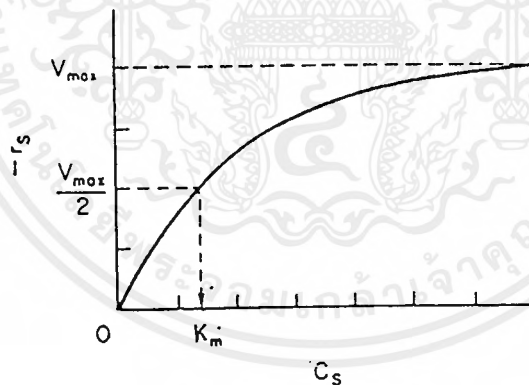
K_m คือ ค่าคงที่ของ Michaelis

ให้ V_{max} แทนอัตราเร็วที่สุดของปฏิกิริยาสำหรับความเข้มข้นของเอนไซม์ทั้งหมด

$$V_{max} = k'_3(E_t) \quad (4.15)$$

จะได้

$$-r_s = \frac{V_{max}(S)}{(S) + K_m} \quad (4.16)$$



รูปที่ 4.1 การพิสูจน์พารามิเตอร์ของ Michaelis-Menten [3]

จากรูปที่ 4.1 ที่ความเข้มข้นของสับสเตรตต่ำ ๆ

$$-r_s = \frac{V_{max}(S)}{K_m} \quad (4.17)$$

ที่ความเข้มข้นของสับสเตรตสูง ๆ หรือ

$$S \geq K_m$$

จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$-r_s \cong V_{\max}$$

เมื่อพิจารณาที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นครึ่งหนึ่งของอัตราเร็วที่สุด

$$-r_s = V_{\max} / 2$$

ดังนั้น

$$\frac{V_{\max}}{2} = \frac{V_{\max}(S_{1/2})}{K_m + (S_{1/2})} \quad (4.18)$$

แก้สมการที่ (4.18) จะได้

$$K_m = (S_{1/2}) \quad (4.19)$$

ค่า V_{\max} จะขึ้นกับความเข้มข้นของเอนไซม์ทั้งหมด แต่ค่า K_m จะไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของเอนไซม์ทั้งหมด



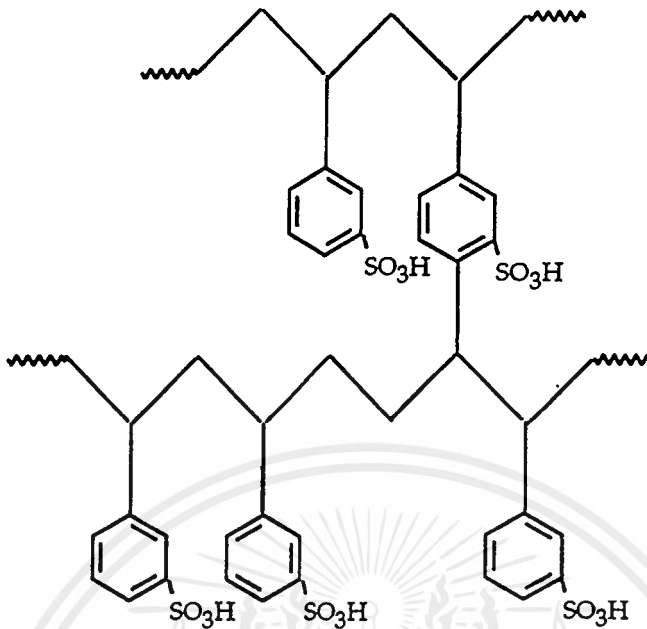
บทที่ 5

ตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนประจุรูปกรด

1. คุณสมบัติของ Lewatit S100

ตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนประจุที่ใช้ในการทดลองนี้มีชื่อทางการค้าคือ Lewatit S100 จากบริษัท ไบเออร์ (เยอรมัน) จำกัดซึ่งจะมีคุณสมบัติดังนี้

รูปประจุ	โซเดียม
รูปร่าง	เม็ด (Beads)
สี	น้ำตาลอ่อน
เมตริก (Matrix)	พอลิสไตรีน
หมู่ฟังก์ชัน	หมู่ซัลโฟนิกซึ่งมีไดไวนิลเบนซีนเป็น ครอสลิงค์
การกระจายขนาด	0.315-1.25 มิลลิเมตร
ขนาดที่ส่งผล (Effective size)	0.46 มิลลิเมตร
ความหนาแน่น	1.28
ปริมาณความชื้น	42-45% โดยน้ำหนัก
ค่าความจุประจุทั้งหมด	2.1 อีควิวาเลนต์ต่อลิตร
ช่วงอุณหภูมิที่ใช้	-10 ถึง 120 องศาเซลเซียส
ช่วงพีเอช	0-14
อุณหภูมิในการเก็บ	-10 ถึง 40 องศาเซลเซียส
การเปลี่ยนแปลงปริมาตร	+8%
(จากการเปลี่ยนโซเดียมไอออนเป็นไฮโดรเจนไอออน)	



รูปที่ 5.1 โครงสร้างทางเคมีของเรซิน

2. การพิจารณาค่าความจุโดยทั่วไปของเรซิน

วิธีการหาค่าความจุที่ง่ายและรวดเร็วที่สุดคือการหาปริมาณหมู่ที่เข้าไปทำปฏิกิริยากับเรซิน วิธีนี้จะให้ผลเป็นมัลติอีควิวาเลนต์ (Multi equivalent) ของไอออนที่แลกเปลี่ยนต่อกรัมของเรซินแห้ง โดยหลักการคือจะใช้การไทเทรตโดยตรง (Direct titration) ด้วยไฮดรอกไซด์ (OH^-) ที่มากเกินไปทำให้เรซินเปลี่ยนไอออนได้ง่ายและสมบูรณ์ โดยนำตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 1 มิลลิลิตรแช่ในสารละลายผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 นอร์มัล กับโซเดียมคลอไรด์ 5% ปริมาตรสารละลาย 200 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ 1 คืนเป็นอย่างน้อย ไอออนของไฮโดรเจนในเรซินจะถูกไอออนของโซเดียมเข้าไปแทนที่ไอออนของไฮโดรเจนจึงถูกปล่อยออกมาทำให้สารละลายมีความเป็นกรด-เบสเปลี่ยนไป คือมีไฮดรอกไซด์ลดลง

ตารางที่ 5.1 ผลเปรียบเทียบการรีเจนเนอเรต (Regenerate) โลหะหนักด้วยกรด

ความจุของเกลือโลหะหนักที่ถูกดึงออกมาในหน่วยเมกกะอีควิวาเลนต์ต่อกรัม		
ไอออนของโลหะหนัก	รีเจนเนอเรตด้วยกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลาร์	รีเจนเนอเรตด้วยกรดไนตริก 1 โมลาร์
ไอออนของเหล็ก	4.23	4.49
ไอออนของปรอท	4.39	4.49
ไอออนของแบเรียม	2.43	4.04
ไอออนของตะกั่ว	2.21	4.49
ไอออนของเงิน	3.08	4.49
ไอออนของโซเดียม	4.49	4.49

จากนั้นจึงนำสารละลายมาไทเทรตหาไฮดรอกไซด์ที่เหลือจึงสามารถรู้ปริมาณไอออนของไฮโดรเจนได้ สาเหตุที่ใช้กรดไนตริกเนื่องจากสามารถรีเจนเนอเรตพวกโลหะหนักตกตะกอนด้วยไอออนของคลอไรด์หรือไอออนของซัลเฟตได้ดีกว่าประจุของไนเตรตดังตารางที่ 5.1 ส่วนการเติมโซเดียมคลอไรด์ เพื่อเพิ่มแรงผลักดันแลกเปลี่ยนให้เข้าสู่สมดุลของเรซินที่เป็นกรดอ่อนได้อย่างสมบูรณ์ และที่ใช้ความเข้มข้น 5% เนื่องจากเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับทางทฤษฎีมากที่สุดดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ค่าความจุที่ได้โดยการปรับเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

ค่าความจุในหน่วยเมกกะอีควิวาเลนต์ต่อกรัม					
ชนิดของเรซิน	ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์				
	ค่าทาง ทฤษฎี	0	1	5	10
คาร์บอกซิลิก I	10.6	10.12	10.24	10.49	11.18
		10.12	10.24	10.38	11.03
คาร์บอกซิลิก II	12.2	11.50	11.80	12.11	12.63
		11.58	11.76	12.06	12.40
คาร์บอกซิลิก		5.12	5.23	5.57	5.69
ซัลโฟนิก		5.08	5.19	5.52	5.72
ฟอสฟอนิก	8.7	8.73	8.91	8.86	8.79
		8.80	8.91	8.72	8.68

3. ปัจจัยที่มีผลต่อความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยา

3.1 ปริมาณครอสลิงค์

สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเจล (Gellular resins) อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะลดลงเมื่อปริมาณครอสลิงค์ (Crosslink) เพิ่มขึ้น

สำหรับเรซินที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ (Macroporous resins, MR) ปริมาณครอสลิงค์จะมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเพียงเล็กน้อย

ที่ปริมาณครอสลิงค์เท่า ๆ กัน เรซินที่มีรูพรุนขนาดใหญ่จะให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เร็วกว่า เรซินแบบเจล

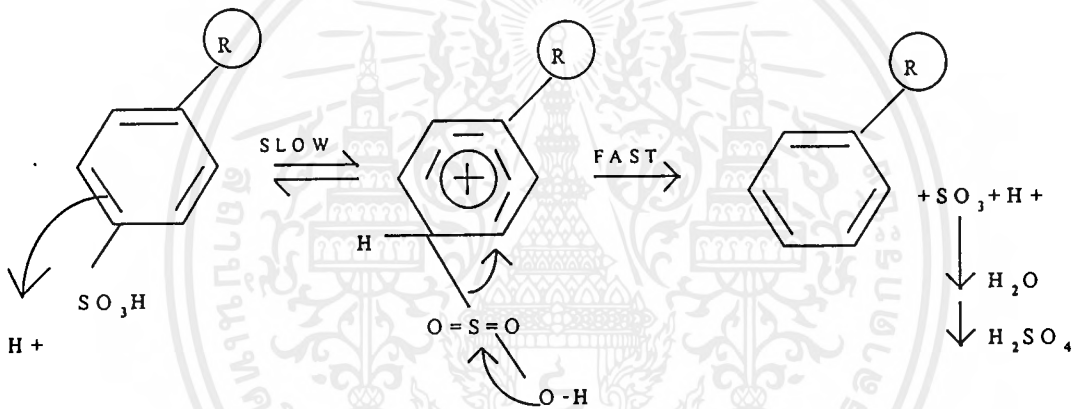
3.2 ความเป็นกรดที่รุนแรง (Super acid)

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเป็นกรดต่ำกว่าจะให้ค่าการเปลี่ยนแปลงที่น้อยกว่า นั่นคือความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาแปรผันตามความเป็นกรด

Klein และ Widdecke ได้ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดที่รุนแรง มีชื่อทางการค้าว่า Nafion ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ชนิดเปอร์ฟลูออโรซัลฟอนิก (Perfluorosulfonic) ใช้เร่งปฏิกิริยาการเติมหมู่ซัลฟอนิก (Alkylation) ของเบนซีนกับไพโรฟิลีน พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ได้เร็วกว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบซัลฟอนิกถึง 3 เท่า

4. ความเสถียรต่อความร้อน (Thermal stability) ของตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนประจุรูปกรด

ตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนประจุรูปกรดมักจะถูกทำให้เสียสภาพด้วยความร้อน เช่น หมู่ซัลฟอนิกจะถูกทำให้เสียสภาพด้วยความร้อน คือเกิดปฏิกิริยาดีซัลฟอนเนชัน (Desulfonation) ดังรูปที่ 5.2



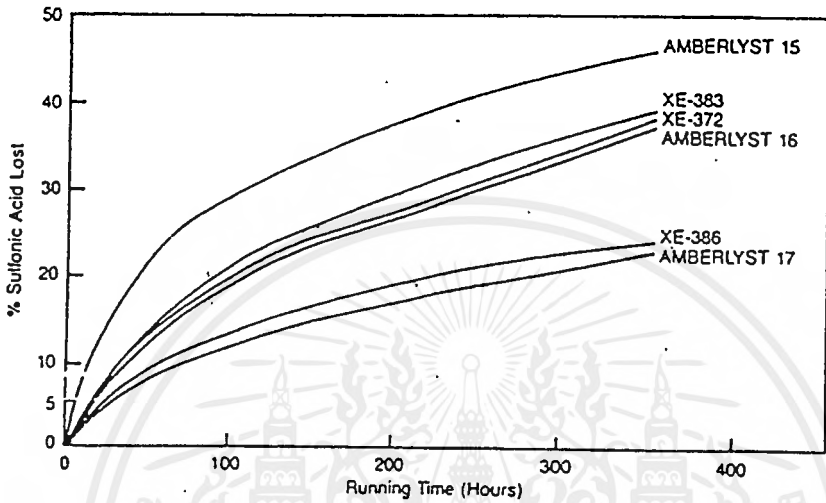
รูปที่ 5.2 ปฏิกิริยาดีซัลฟอนเนชัน

อัตราเร็วการเกิดปฏิกิริยาดีซัลฟอนเนชันจะขึ้นกับ

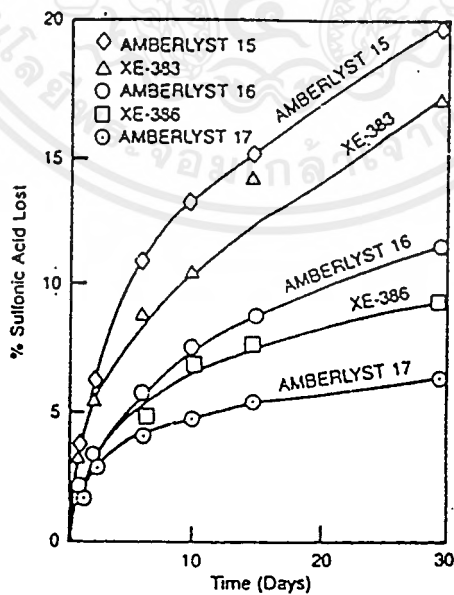
- อุณหภูมิ : อัตราการเกิดปฏิกิริยาดีซัลฟอนเนชันจะเพิ่มขึ้น 2 ถึง 3 เท่า ทุก ๆ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น 10 องศาเซลเซียส
- ความเข้มข้นของกรด : อัตราการเกิดปฏิกิริยาดีซัลฟอนเนชันจะเพิ่มขึ้น 2 ถึง 3 เท่า ทุก ๆ ความเข้มข้นของกรดที่เพิ่มขึ้น 1 นอร์มัล
- ความหนาแน่นของประจุ : หมู่ซัลฟอนิกที่มีความหนาแน่นของประจุมากกว่าจะมีความเสถียรต่อความร้อนน้อยกว่าหมู่ซัลฟอนิกที่มีความหนาแน่นของประจุน้อยกว่า

การทดสอบการเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการวัดความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกโดยการไทเทรตกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มาตรฐานใช้ระบบการไหลแบบต่อเนื่อง

(Continuous flow) จะใช้เรซิน 30 มิลลิลิตร บรรจุในท่อสแตนเลส อัตราการไหล 4 บาร์เรลต่อชั่วโมง อุณหภูมิ 155 องศาเซลเซียส ความดัน 150 พีเอสไอ ได้ผลดังรูปที่ 5.3 และรูปที่ 5.4 จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิต่ำกว่า 130 องศาเซลเซียส อัตราการเกิดปฏิกิริยาดิซัลฟอนเนชันจะค่อนข้างคงที่



รูปที่ 5.3 ความเสถียรต่อความร้อนที่อุณหภูมิ 155 องศาเซลเซียส ความดัน 150 พีเอสไอ [4]



รูปที่ 5.4 ความเสถียรต่อความร้อนที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. จลนพลศาสตร์การเกิดปฏิกิริยาดีซัลฟอนเนชัน

กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการแตกตัวของหมู่ SO_3H ให้ผลเป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ขึ้นกับความเข้มข้นของหมู่ซัลฟอนิก จากการใช้โครงสร้างหลัก (Backbone) เป็นสไตรีนไดไวนิลเบนซีน (Styrene-divinylbenzene) พบว่าหมู่ ไดอัลคิล (Dialkyl) ทำให้วงแหวนอะโรมาติก (Aromatic) มีอิเล็กตรอนมากเมื่อเทียบกับสไตรีน ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาดีซัลฟอนเนชันสูงขึ้น และยังได้อีกว่าเรซินที่มีปริมาณครอสลิงค์มากจะเสถียรต่อความร้อนน้อย ในรูปที่ 5.3 และรูปที่ 5.4 แอมเบอร์ไลต์-15 มีปริมาณ ครอสลิงค์มากกว่าแอมเบอร์ไลต์-16 และหมู่ อะลิฟาติกซัลฟอนิก (Aliphatic sulfonic) จะเสถียรต่อความร้อนมากกว่าหมู่อะโรมาติกซัลฟอนิก (Aromatic sulfonic) เนื่องจากอะลิฟาติกจะเกิดปฏิกิริยาการแตกโมเลกุลซูโครสด้วยน้ำน้อยกว่า

6. สรุปข้อดีของตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนประจุปรกรด

- 6.1 เป็นการลดการเกิดการกัดกร่อน
- 6.2 ไม่จำเป็นต้องทำการแยกหรือกำจัดตัวเร่งปฏิกิริยาออกหลังจากการเกิดปฏิกิริยาแบบปฏิกิริยาเอกพันธ์
- 6.3 เป็นการลดการเกิดของเสีย
- 6.4 เพิ่มความบริสุทธิ์และยี่ลด์ของผลิตภัณฑ์
- 6.5 ราคาถูกกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์
- 6.6 เก็บรักษาได้ง่าย

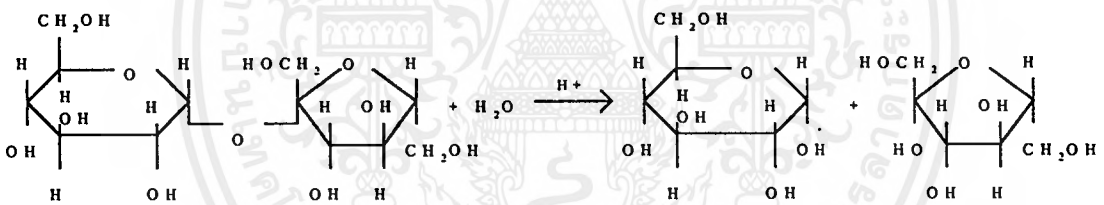
เรซินนอกจากจะใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแล้วยังใช้เป็นตัวกำจัดสารปนเปื้อนพวกไอออนออก เช่น กำจัด Na^+ K^+ Mg^{2+} Ca^{2+} Fe^{2+} Fe^{3+} ประจุลบของสารอนินทรีย์ ไชมัน กรดอินทรีย์ ในน้ำอ้อย ในอุตสาหกรรม beet sugar จะใช้ในการกำจัดไอออน เพื่อป้องกัน scale ใน เครื่องระเหย และระบบท่อ ลดยี่ลด์ของกากน้ำตาล เพิ่มยี่ลด์ของน้ำตาล นอกจากนี้ยังใช้เป็น dryers และ treatment แก๊สอีกด้วย

บทที่ 6

การเกิดปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสของซูโครส ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนประจุปรกรด

1. ปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสของซูโครส

ซูโครสหรือน้ำตาลทรายนั้น จะประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอน 12 อะตอม ไฮโดรเจน 22 อะตอม และออกซิเจน 11 อะตอม ($C_{12}H_{22}O_{11}$) ซึ่งเมื่อเกิดปฏิกิริยาการแตกโมเลกุลซูโครสด้วยน้ำแล้ว จะมีการรวมโมเลกุลของน้ำเข้าไปด้วยทำให้เกิดการแตกตัวกลายเป็นกลูโคสและฟรุคโตส ในจำนวนที่เท่ากัน โดยปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



โดยที่ ซูโครสมีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 342 และหมุนระนาบแสงไปทางบวกมีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 18 กลูโคสมีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 180 และหมุนระนาบแสงไปทางบวก ฟรุคโตสมีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 180 และหมุนระนาบแสงไปทางลบ

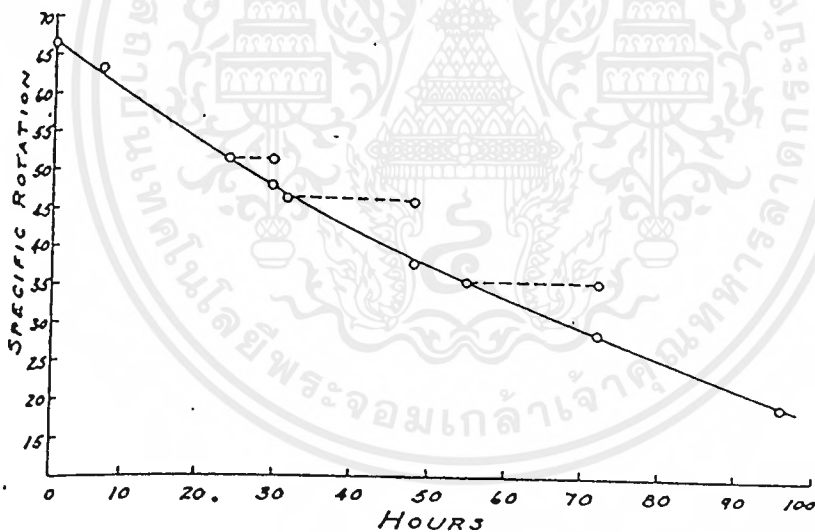
2. การทดลองของ George Bodamer และ Robert Kunin [1]

George Bodamer และ Robert Kunin ได้ทำการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสของซูโครสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนประจุปรกรดคือแอมเบอร์ไลต์ ไออาร์-120 (Amberlite IR-120) ซึ่งมีหมู่ซัลฟอนิกเป็นแบบพอลิสไตรีนเกาะติดกับโครงสร้างหลัก โดยจะทำการเปลี่ยนให้

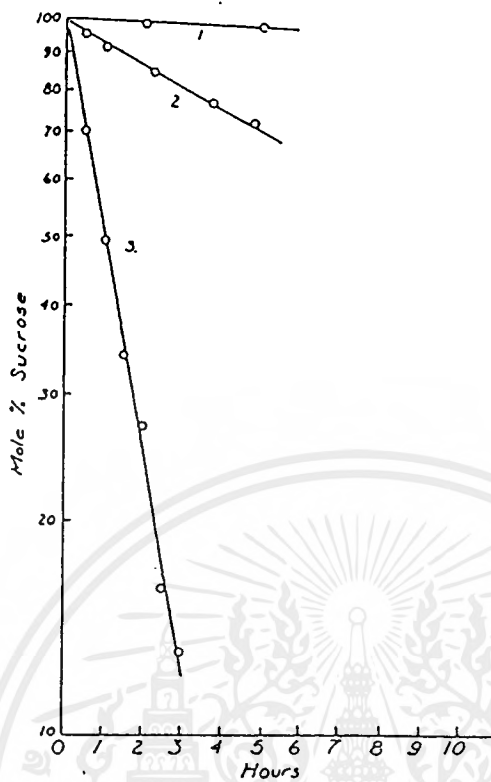
เป็นประจุของไฮโดรเจนด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 4% แล้วล้างด้วยน้ำดีไอออไนซ์ (Deionized water)

2.1 ขั้นตอนการทดลอง

จะใช้น้ำตาลซูโครส 600 กรัมละลายในน้ำดีไอออไนซ์ 2320 มิลลิลิตร นำสารละลายใส่ลงในกระบอกปริมาตร 5 ลิตร ติดตั้งเทอร์โมมิเตอร์ และมีการกวน โดยจะทำคล้ายเป็นเครื่องปฏิกรณ์แบบแบทช์ (Batch reactor) จะมีการกวนรวมกับตัวเร่งปฏิกิริยา 200 กรัม มีความชื้น 40% หลังจากการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา 1 นาที จะมีการนำตัวอย่าง 10 มิลลิลิตรมาตรวจสอบด้วยพอลาริมิเตอร์ (Polarimeter) และหยุดทำการทดลองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า 2% ผลการทดลองที่ได้ แสดงในรูปที่ 6.1 และ รูปที่ 6.2



รูปที่ 6.1 การเปลี่ยนซูโครสด้วยแอมเบอร์ไลต์ ไออาร์-120 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส [1]



- 1 : ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส
 2 : ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส
 3 : ที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส

รูปที่ 6.2 การเปลี่ยนหมู่โครสด้วยแอมเบอร์ไลต์ ไออาร์-120 ที่อุณหภูมิ 25 50 และ 75 องศาเซลเซียส ตามลำดับ [1]

ตารางที่ 6.1 ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาของซูโครสด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาต่าง ๆ

ตัวเร่งปฏิกิริยา	$k \cdot 10^4 (\text{sec}^{-1})$				
	25 องศาเซลเซียส	50 องศาเซลเซียส	75 องศาเซลเซียส	88 องศาเซลเซียส	100 องศาเซลเซียส
ไออาร์ซี-50	0	0	0.8	2.1	9.8
ไออาร์-120	0.7	26.3	117.0	-	-
กรดไฮโดรคลอริก 0.001 นอร์มัล	-	0.5	12.0	-	199.2
กรดไฮโดรคลอริก 0.18 นอร์มัล	18.0	790.0	-	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ผลของหมู่ฟังก์ชันที่ต่างกัน

จากตารางที่ 6.1 ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่แห้ง 20 กรัม และใช้สารละลายน้ำตาลซูโครส 20% ได้ว่าระบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแอมเบอร์ไลต์ชนิดไออาร์ซี-50 (IRC-50) จะมีค่าพีเอชประมาณ 6 ส่วนระบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไออาร์-120 (IR-120) จะมีค่าพีเอชเข้าใกล้ 3 พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไออาร์-120 จะให้อัตราการเปลี่ยนซูโครสเร็วกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไออาร์ซี-50 และตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ที่เป็นสารละลายกรด

จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไออาร์-120 แล้วเกิดมีค่าพีเอชต่ำอาจเนื่องมาจาก

- กรดซัลฟอนิกในพอลิสไตรีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ๆ ถูกสกัดออกมาจากเรซินเนื่องจากการสัมผัสกันนาน ๆ ที่อัตราส่วนเรซินต่อสารละลายสูง ๆ
- กรดถูกแลกเปลี่ยนออกจากเรซินเนื่องมาจากประจุในสารละลาย
- กรดถูกแลกเปลี่ยนออกจากเรซินเนื่องจากอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ที่ถูกสกัดออกจากกระบอกแก้ว

ตารางที่ 6.2 ผลจากการที่สารละลายกรดถูกทำให้เป็นกลาง [1]

ตัวเร่งปฏิกิริยา	$k \cdot 10^4 (\text{sec}^{-1})$			
	พีเอช	50 องศา เซลเซียส	75 องศา เซลเซียส	100 องศา เซลเซียส
ไออาร์-120	3	26.3	117.0	-
ไออาร์-120 และ เอ็กซ์อี-75	7	9.0	69.0	-
ไออาร์ซี-50	6	0	0.8	9.8
ไออาร์ซี-50 และ เอ็กซ์อี-75	6.8	0	-	1.4
ไออาร์ซี-50 และ ไออาร์-45	5-6	-	-	5.2
ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา	6.0	-	-	2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ผลจากการที่สารละลายกรดถูกทำให้เป็นกลาง

จากการใช้เรซินประจุบวกต่อสารละลายซูโครส 20% 100 กรัม เมื่อมีการเติมเรซินประจุลบลงไปด้วยในปริมาณ (น้ำหนัก) ที่เท่ากัน โดยจะทดลองใช้ทั้งเรซินประจุลบแบบแรง (Amberlite XE-75) และเรซินประจุลบแบบอ่อน (Amberlite IR-45) ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 6.2 ซึ่งพบว่าค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยามีค่าลดลงเมื่อสารละลายถูกทำให้เป็นกลางมากขึ้น

2.4 ผลจากความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา

เมื่อทดลองใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 5 20 40 และ 80 กรัมต่อสารละลายซูโครส 100 กรัมตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ผลที่ได้แสดงดังในตารางที่ 6.3 พบว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น

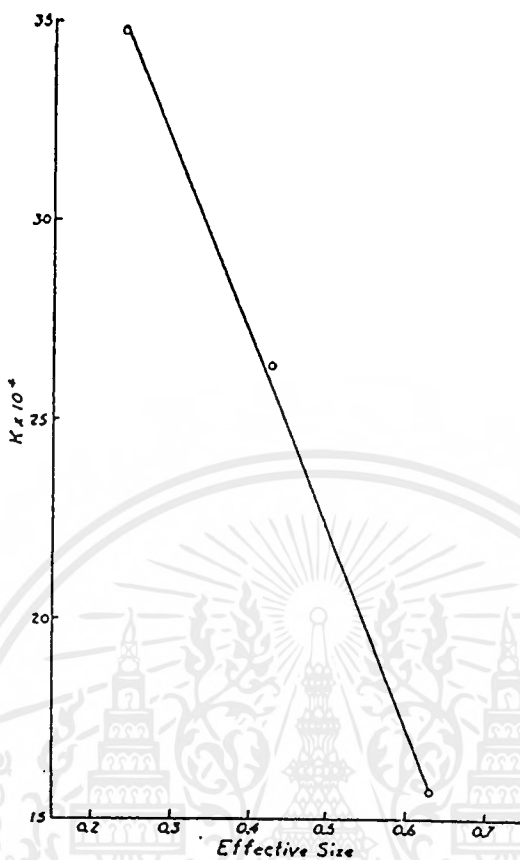
สำหรับความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลนั้นมีการศึกษากันน้อย แต่คาดว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลเพิ่มขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสของซูโครสเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

ตารางที่ 6.3 ผลจากความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาไออาร์-120 (กรัม) ต่อ 100 กรัมของซูโครส	$k \cdot 10^4 (\text{sec}^{-1})$
5	4.8
20	26.3
40	34.4
80	71.6

2.5 ผลจากขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยา

ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ใช้สารละลายน้ำตาลเข้มข้น 20% ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไออาร์-120 ได้ผลดังในตารางที่ 6.4 ซึ่งจะพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีขนาดเล็กจะให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เร็วกว่า จึงสามารถสรุปได้ว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาถูกควบคุมด้วยอัตราการแพร่ โดยผลของค่า k จะแสดงดังในรูปที่ 6.3



รูปที่ 6.3 อัตราเร็วของซูโครสที่เปลี่ยนไปเมื่อเทียบกับขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยา [1]

ตารางที่ 6.4 ผลจากขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยาไออาร์-120 ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส [1]

ขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยา (มิลลิเมตร)	$k \cdot 10^4 (\text{sec}^{-1})$
0.24	34.7
0.45	26.3
0.63	15.7

2.6 ผลจากความพรุนของเรซิน [1]

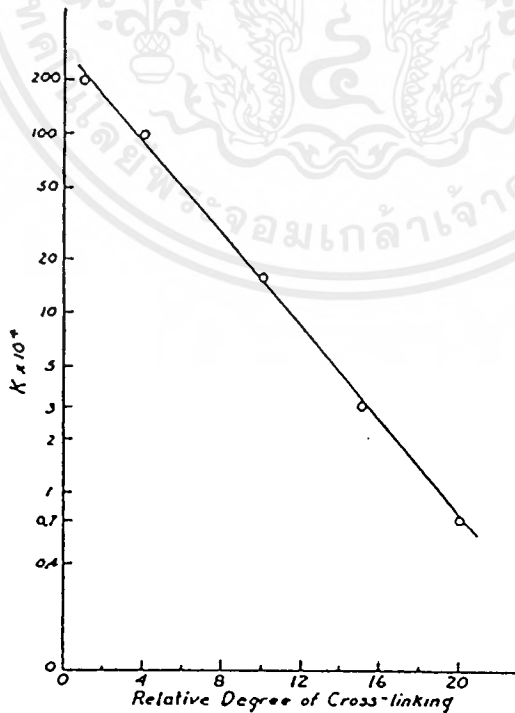
แอมเบอร์ไลต์ ไออาร์-120 จะมีระดับความพรุนขึ้นกับระดับครอสลิงค์ โดยเมื่อใช้อัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลและเรซินเดียวกัน ขนาดของเรซินเดียวกัน ได้ผลดังแสดงดังในตารางที่ 6.5 และตารางที่ 6.6 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าค่า k เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มค่าความพรุน (ลดระดับของ ครอสลิงค์) โดยค่า k แสดงดังในรูปที่ 6.4

ตารางที่ 6.5 ผลจากความพรุนของซิลฟอนิกเรซิน [1]

ปริมาณครอสลิงค์ เปรียบเทียบ	$k \cdot 10^4 \text{ (sec}^{-1}\text{)}$		
	25 องศาเซลเซียส	50 องศาเซลเซียส	75 องศาเซลเซียส
1	7.6	199.2	-
4	5.2	110.3	-
10	0.7	26.3	117.0
15	-	3.0	48.6
20	-	0.7	23.2

ตารางที่ 6.6 ผลจากความพรุนของหมู่คาร์บอกซิลิก [1]

ปริมาณครอสลิงค์เปรียบเทียบ	$k \cdot 10^4 \text{ (ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส)(sec}^{-1}\text{)}$
1	50.0
2	9.0



รูปที่ 6.4 อัตราเร็วของการเปลี่ยนแปลงของโครสที่เปลี่ยนไปเมื่อเทียบกับปริมาณของครอสลิงค์ [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. พลังงานกระตุ้น

Haskell และ Hammett [1] ได้ทดสอบปฏิกิริยาการแตกโมเลกุลซูโครสด้วยน้ำด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งแบบเอกพันธ์ และแบบวิวิธพันธ์ โดยค่า k สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 6.1

$$E = -4.56 * \frac{\log k_1 - \log k_2}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}} \quad (6.1)$$

ค่าพลังงานกระตุ้นแสดงดังในตารางที่ 6.7 ซึ่งพบว่าค่าพลังงานกระตุ้นของระบบเอกพันธ์จะมีค่ามากกว่าของระบบวิวิธพันธ์ ทั้งนี้อาจเนื่องจาก

ในระบบวิวิธพันธ์ อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะถูกควบคุมด้วยอัตราการแพร่เข้าสู่ตัวเร่งปฏิกิริยา ความเข้มข้นของกรดในวัฏภาคของเรซินจะมีมากกว่าแบบเอกพันธ์หลายเท่า จากปฏิกิริยาการดูดซับจะนำไปสู่การเกิดปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์

ตารางที่ 6.7 ค่าพลังงานกระตุ้นของการเปลี่ยนแปลงซูโครส [1]

ตัวเร่งปฏิกิริยา	ค่าพลังงานกระตุ้น (kcal/mol)	ค่าพลังงานกระตุ้น (kJ/mol)
กรดไฮโดรคลอริก 0.001 นอร์มัล	28.2	118.0
กรดไฮโดรคลอริก 0.18 นอร์มัล	30.0	125.5
ซัลฟอนิกเรซิน		
ปริมาณครอสลิงค์		
1	25.8	108.0
4	24.2	101.3
10 (แอมเบอร์ไลต์ ไออาร์-120)	27.6	115.5
15	25.1	105.0
20	31.6	132.2
ไออาร์-120 และเอ็กซ์ซี -75	18.3	76.6
หมู่คาร์บอกซิลิก (ไออาร์ซี-50)	25.9	108.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

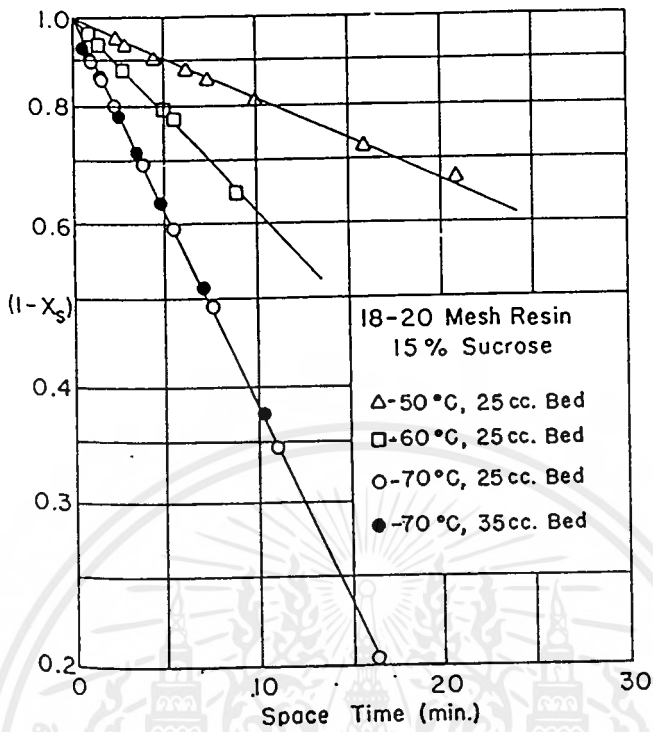
4. การทดลองของ O'Connell

ในปีค.ศ. 1964 Reed และ Dranoff ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสารละลายซูโครส 15% ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบแพ็คเบด (Packed bed reactor) โดยใช้แอมเบอร์ไลต์ ไออาร์-120 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาอันดับ 1 สำหรับอุณหภูมิ 50 ถึง 75 องศาเซลเซียส ในช่วงค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ที่กว้าง โดยสรุปว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะขึ้นกับอัตราการแพร่ด้านใน (Intraparticle diffusion) เป็นอย่างมาก และได้ค่าพลังงานกระตุ้นประมาณ 16 กิโลแคลอรีต่อกรัมโมล

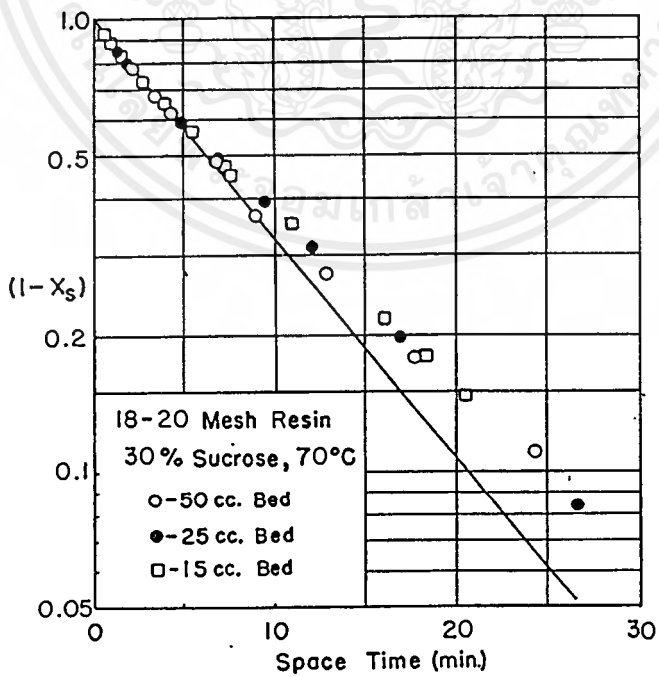
O'Connell ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสารละลายซูโครส 20% ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา Dowex 50W-X8 พบว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาอันดับ 1 โดยจะขึ้นกับความเข้มข้นของซูโครส แต่ไม่ขึ้นกับการถ่ายเทมวลด้านนอก (External mass transfer) และมีผลจากการแพร่ด้านในเป็นอย่างมาก แต่พบค่าพลังงานกระตุ้นที่ได้มีค่ามากกว่าของ Reed และ Dranoff คือประมาณ 18 ถึง 20 กิโลแคลอรีต่อกรัมโมล นอกจากนี้ O'Connell ได้สรุปว่าเมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายซูโครสมากขึ้นจนถึง 45% ผลจากการถ่ายเทมวลด้านนอกจะมีความสำคัญพอ ๆ กับการแพร่ด้านในซึ่งจะทำให้ความเป็นปฏิกิริยาอันดับ 1 เสียไปเนื่องจากมีปฏิกิริยาการตีเกรด (Degradation reaction) เกิดขึ้น

การทดลองของ O'Connell จะใช้เครื่องมือเหมือนของ Reed และ Dranoff โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบแพ็คเบดมีแจ็กเก็ต (Jacket) สำหรับหล่อเย็นเพื่อควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ เส้นผ่าศูนย์กลางของเครื่องปฏิกรณ์เท่ากับ 1 นิ้ว ผลที่ได้จะถูกรวบรวมด้วยเครื่องพอลาริมิเตอร์ ซูโครสที่ใช้จะใช้เกรดรีเอเจนต์ ที่ความเข้มข้น 15% 30% และ 45% ตามลำดับ ตัวเร่งปฏิกิริยาจะแบ่งออกเป็น 3 ขนาด

ผลที่ได้พบว่าที่ความเข้มข้น 15% ตัวเร่งปฏิกิริยาเมซ 18-20 ปรับเปลี่ยน 3 อุณหภูมิ นำไปสร้างกราฟเซมิล็อกได้ดังรูปที่ 6.5 แต่เมื่อใช้ความเข้มข้น 30% ผลที่ได้จะมีการเบี่ยงเบนออกไปดังรูปที่ 6.6 เนื่องจากมีผลของการถ่ายเทมวลด้านนอก จากรูปที่ 6.6 พบว่าขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยาจะไม่ค่อยมีผล



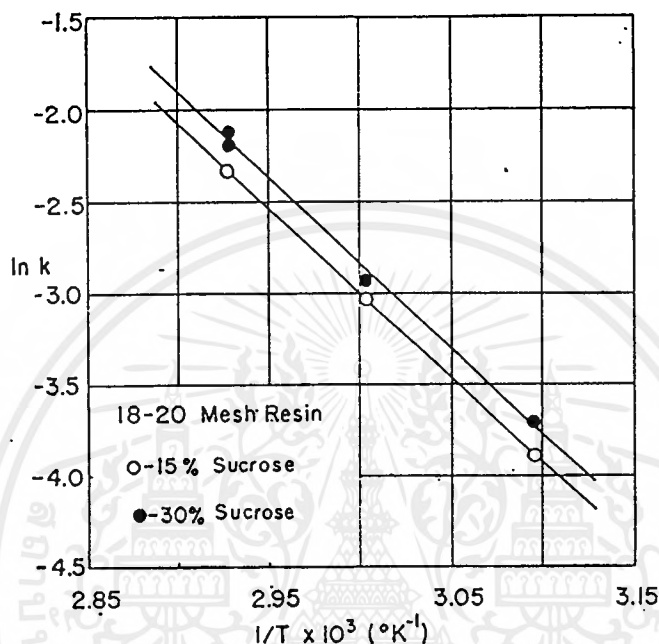
รูปที่ 6.5 ปฏิกริยาอันดับที่ 1 เมื่อใช้ซูโครส 15% [5]



รูปที่ 6.6 ปฏิกริยาอันดับที่ 1 เมื่อใช้ซูโครส 30% [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า k ที่เป็นอันดับ 1 สามารถคำนวณได้จากสมการของอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) ได้กราฟดังรูปที่ 6.7 โดยได้ค่าพลังงานกระตุ้น 18.4 กิโลแคลอรีต่อกรัมโมล

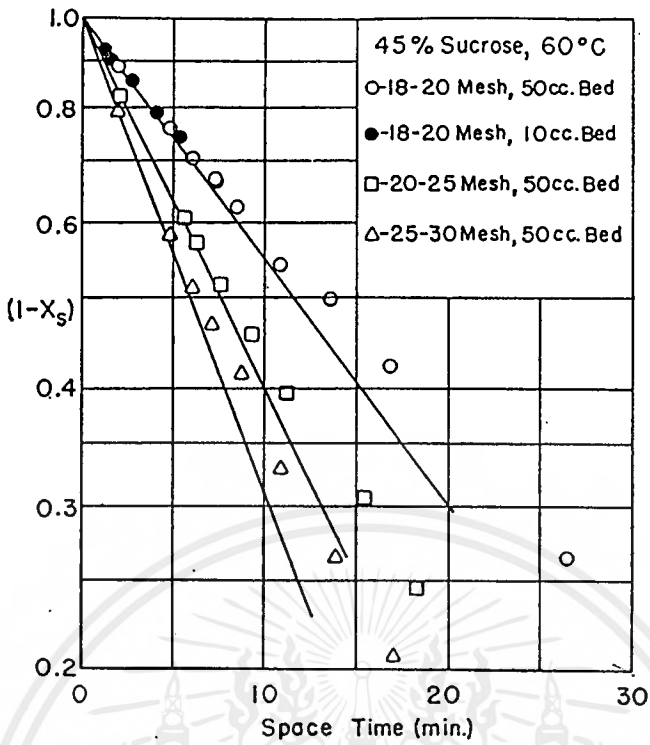


รูปที่ 6.7 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อปฏิกิริยาการเปลี่ยนซูโครส [5]

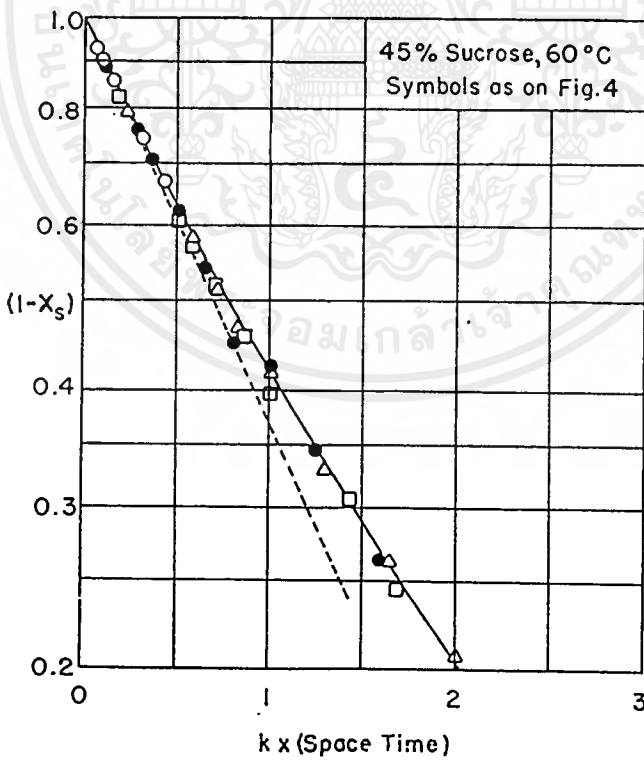
สำหรับสารละลายซูโครสความเข้มข้น 45% ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาขนาดต่าง ๆ กัน 3 ขนาด ขนาดของเบด (Bed) ต่างกัน ทดลองที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ได้ผลดังรูปที่ 6.8 พบว่าเส้นตรงจะเบี่ยงเบนออกไปจากการทดลอง

ค่า k จะขึ้นกับความเข้มข้นของสารป้อนด้วย การเพิ่มขึ้นของค่า k กับความเข้มข้นมีผลมาจาก 2 ผลกระทบคือ การเพิ่มขึ้นของค่าสัมประสิทธิ์การดูด (Sorption coefficient) ของซูโครส ในเรซิน เมื่อความเข้มข้นมากขึ้น และ การเพิ่มขึ้นของค่าคงที่อัตราเอกพันธ์ (Homogeneous rate constant) ของปฏิกิริยาการเปลี่ยนซูโครสตามความเข้มข้นของซูโครส โดยแสดงดังในตารางที่ 6.8

การเบี่ยงเบนไปจากจลนศาสตร์อันดับ 1 อาจมีเหตุผลมาจากความเข้มข้นของซูโครสและอุณหภูมิที่สูงขึ้น



รูปที่ 6.8 ปฏิกิริยาอันดับที่ 1 เมื่อใช้ซูโครส 45% [5]



รูปที่ 6.9 ข้อมูลความสัมพันธ์จากรูปที่ 6.8 [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.8 ผลของความเข้มข้นของสารละลายซูโครสต่อค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาที่เป็นอันดับที่ 1 (ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และรัศมีของอนุภาค 0.46 มิลลิเมตร)

ความเข้มข้นของสารละลายซูโครส	ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา (นาที่ ⁻¹)
15	0.0482
30.9	0.0536
45.9	0.0603

5. การทดลองเมื่อเกิดการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา (Degradation) [6]

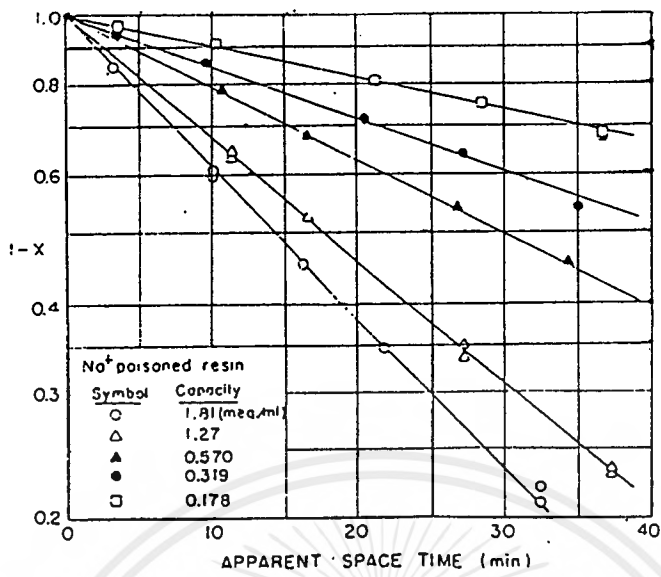
การทดลองนี้จะใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบแพ็คที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 นิ้ว อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Dowex 50W-X8 ขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยาในรูปของไซเดียมไอออนคือ เมช 20-25 ในรูปของไฮโดรเจนไอออนมีเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 0.8 มิลลิเมตร บรรจุ 50 มิลลิลิตร โดยการทำให้เป็นกรดด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่มากเกินพอ 50 มิลลิลิตร จะทำการเสื่อมสภาพด้วยสารละลายผสมไฮโดรคลอริก ไซเดียมคลอไรด์ และโปแตสเซียมคลอไรด์ที่รู้อัตราส่วนให้ไหลเข้าไปช้า ๆ แล้วล้างด้วยน้ำดีไออไนซ์ จนแน่ใจว่าเรซินมีความเป็นยูนิฟอร์มแล้ว

ผลที่ได้จะใช้การตั้งสมมติฐานให้เป็นจลนศาสตร์อันดับที่ 1 ค่าการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับสเปซไทม์ (Space time) ใช้สมการการไหลแบบหน้าการไหลสม่ำเสมอ (Plug flow reactor)

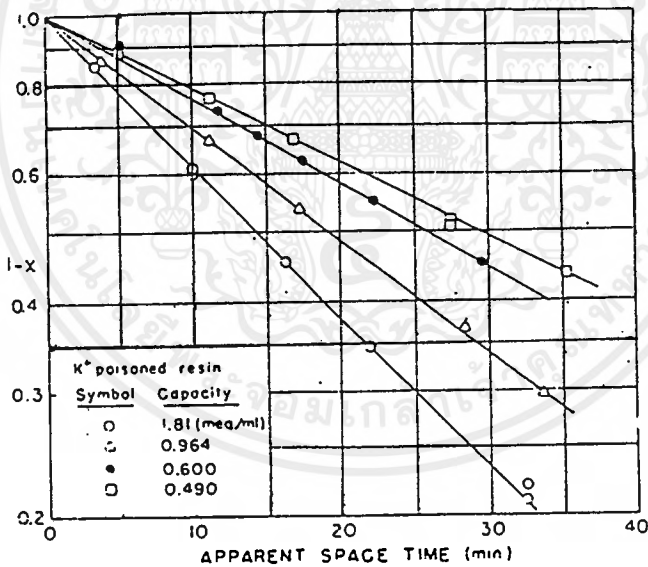
$$\ln(1-x) = -kT_a \quad (6.2)$$

คาดว่าค่า K เป็นฟังก์ชันกับปริมาณไฮโดรเจนของเรซิน

การทดลองจะเป็นการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยของไซเดียมและโปแตสเซียมผลที่ได้พบว่าเป็นแบบอันดับที่ 1 ดังรูปที่ 6.10 และรูปที่ 6.11



รูปที่ 6.10 การเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยโซเดียม [6]



รูปที่ 6.11 การเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยโปแตสเซียม [6]

จากการตั้งสมมุติฐานจะได้ว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาต่อปริมาตรของเรซินที่สมดุลจะขึ้นกับความเข้มข้นของซูโครสที่ผิวของอนุภาค

$$R_s = \eta k \lambda C_s \quad (6.3)$$

R_s = อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่อปริมาตรของเรซิน (โมล/มิลลิลิตร.วินาที)

η = ค่าเอฟเฟคทีฟเนส แฟคเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

k = ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยา

λ = ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับของซูโครส

C_s = ความเข้มข้นของซูโครสในสารละลาย (โมล/ลิตร)

จากพารามิเตอร์ของ Wheeler-Thiele โดย

$$\eta = \frac{3}{h} [\text{hcoth}(h) - 1] \quad (6.4)$$

โดย

$$h = R\sqrt{k/D_s} \quad (6.5)$$

h = ค่าฮิลโมดูลัส

R = รัศมีของอนุภาคเรซิน (เซนติเมตร)

D_s = ค่าการแพร่ซึมของซูโครสกับเรซิน (ตารางเซนติเมตร/วินาที)

สมมติค่า k เป็นอันดับที่ 1

$$k = k_0 \bar{C}_H \quad (6.6)$$

รวมสมการจะได้

$$\ln(1-x) = -k_0 \bar{C}_H \lambda (1-\varepsilon) \tau \quad (6.7)$$

ε = อัตราส่วนช่องว่างของเครื่องปฏิกรณ์แบบแพ็คเบด

τ = สเปนซ์ไทล์ของเครื่องปฏิกรณ์ (วินาที)

ทำสมการให้ง่ายโดยใช้

$$\begin{aligned} \eta &= 3/h \text{ เมื่อ } h \text{ มีขนาดใหญ่} \\ &= 1.0 \text{ เมื่อ } h \text{ มีขนาดเล็ก} \end{aligned} \quad (6.8)$$

จะได้

$$\begin{aligned} \ln(1-x) &= -\frac{3\lambda(1-\varepsilon)}{R} \sqrt{k_0 \bar{C}_H D_s \tau} \text{ เมื่อค่า } h \text{ มีขนาดใหญ่} \\ &= -k_0 \bar{C}_H \lambda (1-\varepsilon) \tau \text{ เมื่อค่า } h \text{ มีขนาดเล็ก} \end{aligned} \quad (6.9)$$

เมื่อไฮโดรเจนไอออนเข้าแทนที่โซเดียมไอออน ขนาดของอนุภาคของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนจะมีการหดเกิดขึ้นประมาณ 10% ของขนาดเดิม ให้ f เป็นอัตราส่วนของปริมาณของอนุภาคในรูปของสเปนซ์ไทล์และความจุ จะได้

$$f(\bar{C}_H) = V N_a \quad (6.10)$$

$$\tau_a = V_a / Q = \tau / f \quad (6.11)$$

$$\bar{C}_{H a} = \bar{C}_H V N_a = \bar{C}_H f \quad (6.12)$$

$$R = f^{1/3} R_a \quad (6.13)$$

นำสมการทั้งหมดใส่ในสมการที่ 6.9 จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\ln(1-x) = \frac{3\lambda(1-\varepsilon)}{R} \sqrt{k_0 \bar{C}_{H_2} D_s \tau_a} f^{1/6} \quad \text{เมื่อค่า } h \text{ มีขนาดใหญ่}$$

$$= -k_0 \bar{C}_{H_2} \lambda(1-\varepsilon) \tau_a \quad \text{เมื่อค่า } h \text{ มีขนาดใหญ่} \quad (6.14)$$

ถ้า $f(\bar{C}_H = 0) \cong 0.9$ จะพบว่าผลของการหดของอนุภาคสามารถตัดทิ้งได้ เนื่องจากการตั้งสมมติฐานให้เป็นค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 จะได้

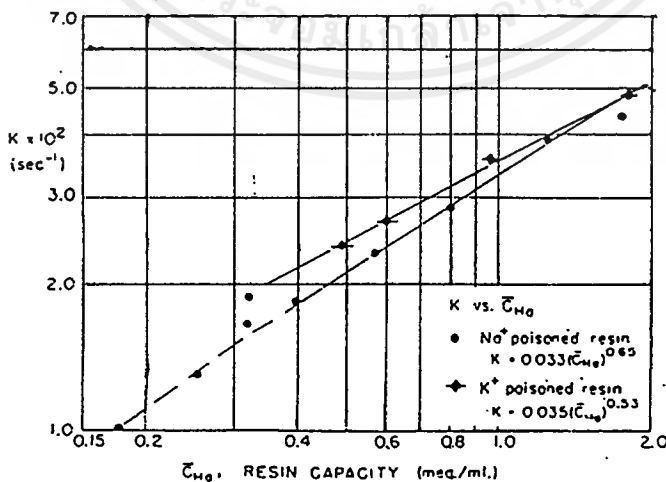
$$K = \frac{3\lambda(1-\varepsilon)}{R_a} \sqrt{k_0 \bar{C}_{H_2} D_s} \quad \text{เมื่อค่า } h \text{ มีขนาดใหญ่}$$

$$= k_0 \lambda(1-\varepsilon) \bar{C}_{H_2} \quad \text{เมื่อค่า } h \text{ มีขนาดเล็ก} \quad (6.15)$$

จากสมการที่ 6.15 ได้ทำนายว่าค่า k จะเป็นสัดส่วนกับ $(\bar{C}_{H_2})^{1/2}$ สำหรับค่า h ที่มีขนาดใหญ่ และเป็นสัดส่วนกับ \bar{C}_{H_2} สำหรับค่า h ที่มีขนาดเล็ก

จากข้อมูลของไซเดียมไฮออนพบว่าจะมีค่าความชันมากกว่าดังในรูปที่ 6.12 \bar{C}_{H_2} ลดลงต่ำกว่าประมาณ 0.3 มิลลิอีควิวาเลนต์ต่อมิลลิลิตร

อย่างไรก็ดี จะสามารถอธิบายได้โดยการปรับเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์การดูดและค่าการแทรกซึมภายใน (Intraparticle diffusivity) ของซูโครส เมื่อเรซินมีองค์ประกอบเปลี่ยนไป O'Connell รายงานว่า D_s ของเรซินที่เป็นกรดจะมีขนาดมากกว่าเป็น 1.15 เท่าของเรซินที่เป็นไซเดียม ค่าสัมประสิทธิ์การดูดจะใหญ่กว่าเป็น 1.30 เท่าในรูปของกรด เห็นว่า ค่าสัมประสิทธิ์การดูด และ D_s มีค่าใกล้ \bar{C}_{H_2} ระหว่างค่าจำกัดนี้ ถ้ามีการปรับเปลี่ยนที่แน่นอนแล้ว ค่า $\lambda(D_s)^{1/2}$ จะเป็นสัดส่วนกับ \bar{C}_{H_2} จะได้กำลังงานที่เหมาะสมคือ 0.17 ถ้าค่า h มีค่ามาก K จะเปลี่ยนตาม \bar{C}_{H_2} จนเป็น 0.67 ของค่ากำลังงาน พบว่าผลสนับสนุนตามรูปที่ 6.12



รูปที่ 6.12 กราฟเปรียบเทียบความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยากับปริมาณกรด [6]

ความแตกต่างระหว่างโปแตสเซียมไอออนและโซเดียมไอออน Helfferich กล่าวว่า โปแตสเซียมไอออนจะมีการแทรกซึมที่ไม่มีประจุ (diffusion of nonelectrolytes) มากกว่าโซเดียมไอออน แต่ค่าสัมประสิทธิ์การดูดจะคล้ายกัน Handel พบว่าการเสื่อมสภาพด้วยโปแตสเซียมไอออนจะเป็นเส้นตรงตามรูปที่ 6.12 แต่จะขึ้นกับ \bar{C}_H ถึง 0.83 ของค่ากำลังงาน แต่ปริมาณน้ำอิสระ (free water content) ของโปแตสเซียมไอออน จะน้อยกว่าโซเดียมไอออน

สรุปคือ การเปลี่ยนรูปร่างเป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ที่ตัวเร่งปฏิกิริยาเสื่อมสภาพเป็นการแทรกภายใน



บทที่ 7

วิธีการทดลองและผลการทดลอง

1. การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

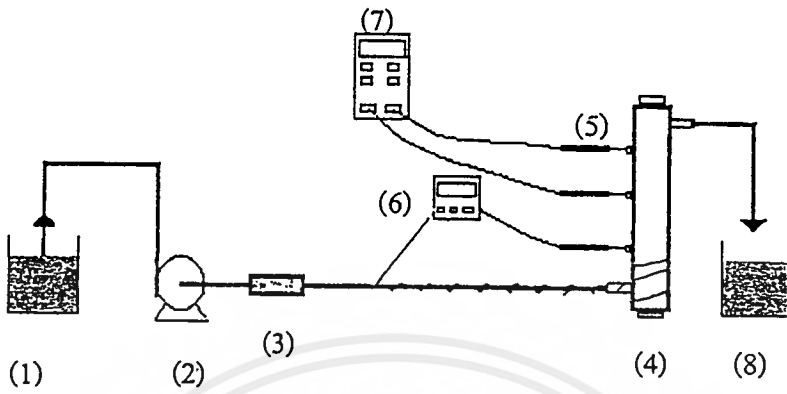
นำตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนประจุกรด 100 มิลลิลิตร แขนในสารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 1 โมลาร์ ทิ้งไว้ 1 คืน จากนั้นนำตัวเร่งปฏิกิริยามาล้างด้วยกรดไนตริกเข้มข้น 1 โมลาร์ อีก 1.5 ลิตร โดยใช้ระบบหยดให้ผ่านกรวยกรองที่มีกระดาษกรอง ต้องให้มีกรดท่วมอยู่ตลอดเวลา จากนั้นจึงล้างด้วยน้ำกลั่นอีก 3 ลิตร หรือจนกว่าน้ำที่ไหลผ่านออกมาไม่เป็นกรด แล้วทิ้งไว้ให้แห้ง

การบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์จะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 100 มิลลิลิตร โดยจะมีการกรองประจุก่อนเพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา (Deactivation) ในเครื่องปฏิกรณ์ เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้จะมีความว่องไวลดลงได้ง่ายเมื่อสัมผัสกับประจุชนิดอื่นๆ เช่น ประจุของไฮเดียม ประจุของแคลเซียม เป็นต้น

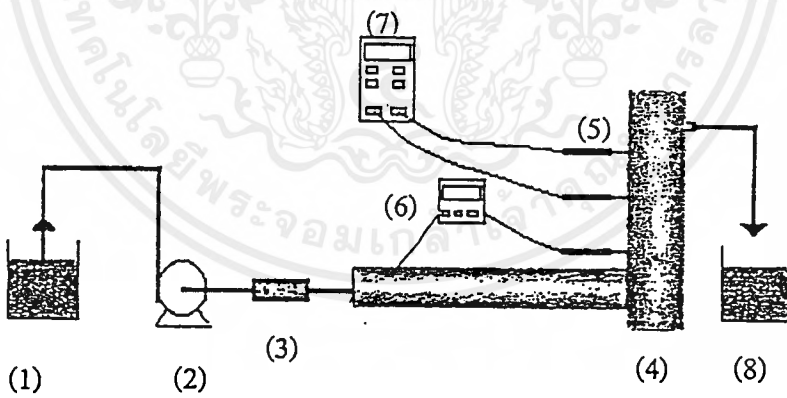
2. เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

ส่วนประกอบต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 7.1 และ 7.2 ประกอบด้วย

- 2.1 ภาชนะบรรจุสารป้อน สารละลายซูโครส
- 2.2 ป้อนของเหลว
- 2.3 ตัวกรองประจุ
- 2.4 เครื่องปฏิกรณ์แบบแพ็คเบด
- 2.5 เทอร์โมคัปเปิลชนิด K
- 2.6 เครื่องควบคุมอุณหภูมิ
- 2.7 เทอร์มิโมมิเตอร์
- 2.8 ภาชนะบรรจุผลึกภัณฑ์ สารละลายผสมซูโครส กลูโคส และฟรุคโตส



รูปที่ 7.1 อุปกรณ์การทดลองที่ยังไม่พันฉนวน



รูปที่ 7.2 อุปกรณ์การทดลองที่พันฉนวนแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เริ่มแรกสารละลายซูโครสจะถูกปั๊มส่งเข้าสู่ตัวกรองประจุเริ่มต้น (Filter) โดยสามารถปรับเปลี่ยนอัตราการไหลได้ ตัวกรองประจุจะทำหน้าที่แลกเปลี่ยนประจุของเกลือโลหะหรือโลหะหนักที่ปะปนมากับสารละลาย เพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์ โดยตัวกรองประจุเริ่มต้นนี้จะเป็นชนิดเดียวกันกับตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์ แต่ไม่มีการให้ความร้อน ดังนั้นจึงสมมติได้ว่าไม่เกิดปฏิกิริยาในขั้นตอนนี้ จากนั้นเมื่อสารละลายผ่านตัวกรองประจุเริ่มต้นแล้วจะถูกส่งเข้าสู่ท่อโลหะซึ่งมีเคเบิลให้ความร้อน (Heating cable) ให้ความร้อนเพื่อให้ได้อุณหภูมิที่ต้องการ โดยเคเบิลให้ความร้อนนี้จะพันอยู่รอบท่อโลหะ แล้วจึงหุ้มด้วยฉนวนเซรามิกเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน และหุ้มด้วยแผ่นอลูมิเนียมฟรอยด์อีกชั้นหนึ่ง โดยการพันฉนวนนี้ได้มีการทดลองแล้วว่าสามารถป้องกันการสูญเสียความร้อนเพียงพอที่จะทำให้อุณหภูมิของสารละลายถึงค่าที่ต้องการได้ ตัวเคเบิลให้ความร้อนนี้จะถูกควบคุมด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิที่ตั้งค่าอุณหภูมิที่ต้องการไว้ และรับค่าอุณหภูมิเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากเทอร์โมคัปเปิลตัวล่างสุดของเครื่องปฏิกรณ์ ส่วนเทอร์โมคัปเปิลอีก 2 ตัวซึ่งอยู่ตอนกลางและตอนบนของเครื่องปฏิกรณ์จะอ่านค่าอุณหภูมิและส่งสัญญาณวัดให้กับมิเตอร์ซึ่งจะอ่านค่าอุณหภูมิเพียงอย่างเดียว เพื่อให้แน่ใจว่าภายในเครื่องปฏิกรณ์มีอุณหภูมิเดียวกัน (Isothermal)

เมื่อสารละลายผ่านการให้ความร้อนแล้วจะถูกส่งเข้าเครื่องปฏิกรณ์แบบแพ็คเบดซึ่งบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาไว้จำนวน 100 มิลลิลิตร สารละลายซูโครสจะถูกไฮโดรไลซ์ให้เปลี่ยนเป็นกลูโคสและฟรุคโตส แล้วจึงนำสารละลายที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์มาตรวจสอบหาค่าการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์ด้วยเครื่องพอลาริมิเตอร์

สำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิเป็นเทอร์โมคัปเปิลชนิด K 3 ตัว วัดอุณหภูมิตอนล่าง ตอนกลางและตอนบนของเครื่องปฏิกรณ์ เทอร์โมคัปเปิลชนิด K สายบวกรทำจากโลหะผสมระหว่าง นิกเกิล 90% กับโครเมียม 10% ส่วนสายลบทำจากโลหะผสมระหว่างนิกเกิล 95% กับโลหะผสมอลูมิเนียม แมงกานีส และซิลิกอน 5% ซึ่งเทอร์โมคัปเปิลชนิด K นี้ใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากมีราคาถูก ใช้ได้ในช่วงอุณหภูมิกว้าง คือในช่วง -250 ถึง 1260 องศาเซลเซียส สามารถใช้กับงานในสภาวะออกซิไดซ์ (Oxidizing) หรือสภาวะเฉื่อย (Inert) ได้ดีกว่าแบบอื่น นอกจากนี้ในสภาพงานที่ต้องรับการแผ่รังสีโดยตรงจากแหล่งกำเนิดความร้อน เทอร์โมคัปเปิลชนิดนี้ก็สามารถใช้งานได้ดี คุณสมบัติที่เด่นของเทอร์โมคัปเปิลชนิดนี้คือให้แรงเคลื่อนเอาท์พุตสูง แต่มีข้อควรระวังคือ ไม่ควรให้เทอร์โมคัปเปิลชนิดนี้สัมผัสโดยตรงกับ

- งานในสภาวะรีดิวซ์ (Reducing) หรือเป็นการใช้งานสลับกันระหว่างสภาวะออกซิไดซ์และรีดิวซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สภาวะงานที่มีไอของซัลเฟอร์ เพราะซัลเฟอร์จะทำลายโลหะของเทอร์โมคัปเปิลโดยเฉพาะสายลอบจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว
- สภาวะงานที่เป็นสุญญากาศ (Vacuum) ยกเว้นในช่วงระยะเวลาสั้นๆ

3. การสร้างกราฟมาตรฐาน

การเปลี่ยนแปลงของซูโครสไปเป็นกลูโคสและฟรุคโตส เกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสของซูโครสโดยมีกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



จะเห็นได้ว่าซูโครสเมื่อเปลี่ยนเป็นกลูโคสและฟรุคโตสจะมีน้ำหนักไม่เท่าเดิมโดยจะมีน้ำหนักมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการรวมโมเลกุลของน้ำเข้ามาด้วย ดังนั้นการคิดค่าการเปลี่ยนแปลงจะคิดในหน่วยของโมลแล้วจึงแปลงเป็นหน่วยของน้ำหนัก

พบว่าซูโครส 1 โมล จะเปลี่ยนแปลงเป็นกลูโคสและฟรุคโตสอย่างละ 1 โมล ซึ่งการทดลองนี้จะใช้สารละลายซูโครส 20% และ 30% โดยน้ำหนัก ดังนั้นในการเปลี่ยนซูโครสเป็นกลูโคสและฟรุคโตสที่การเปลี่ยนแปลงของซูโครสต่าง ๆ กัน จะได้สารละลายผสมของน้ำตาลซูโครส กลูโคสและฟรุคโตสซึ่งสามารถหาความเข้มข้นของน้ำตาลแต่ละตัวได้อย่างแน่นอน สมดุลมวลสารและตัวอย่างดังต่อไปนี้

ตัวอย่างเช่น ที่ค่าการเปลี่ยนแปลง 0.2 สารละลายซูโครสเริ่มต้นเข้มข้น 200 กรัมต่อลิตร ถ้าคิดปริมาตรสารละลาย 50 มิลลิลิตร จะมีซูโครสปริมาณเริ่มต้น $(50/1000) \times 200 = 10$ กรัมและจะมีซูโครสเปลี่ยนแปลงไป $10 \times 0.2 = 2$ กรัม $= 2/342$ โมล $= 5.848 \times 10^{-3}$ โมล เพราะฉะนั้นจะเกิดกลูโคสและฟรุคโตสอย่างละ 5.848×10^{-3} โมล $= 5.848 \times 10^{-3} \times 180$ กรัม $= 1.0526$ กรัม

จากตัวอย่างข้างต้นสามารถคำนวณความเข้มข้นของน้ำตาลทั้งสามในสารละลายที่ค่าการเปลี่ยนแปลงของซูโครสต่างๆ กันเมื่อมีน้ำตาลซูโครสเริ่มต้นเข้มข้น 20% และ 30% ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 7.1 และ 7.2

ตารางที่ 7.1 ปริมาณซูโครส กลูโคสและฟรุคโตส ที่ค่าการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ของสารละลายซูโครสเริ่มต้นเข้มข้น 20%

การเปลี่ยนสารตั้งต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์	ปริมาณซูโครส (กรัม/50มิลลิลิตร)	ปริมาณกลูโคส (กรัม/50มิลลิลิตร)	ปริมาณฟรุคโตส (กรัม/50มิลลิลิตร)
0.1	9	0.5263	0.5263
0.2	8	1.0526	1.0526
0.3	7	1.5789	1.5789
0.4	6	2.1053	2.1053
0.5	5	2.6316	2.6316
0.6	4	3.1579	3.1579
0.7	3	3.6842	3.6842
0.8	2	4.2105	4.2105
0.9	1	4.7369	4.7369
1.0	0	5.2632	5.2632

ตารางที่ 7.2 ปริมาณซูโครส กลูโคสและฟรุคโตส ที่ค่าการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ของสารละลายซูโครสเริ่มต้นเข้มข้น 30%

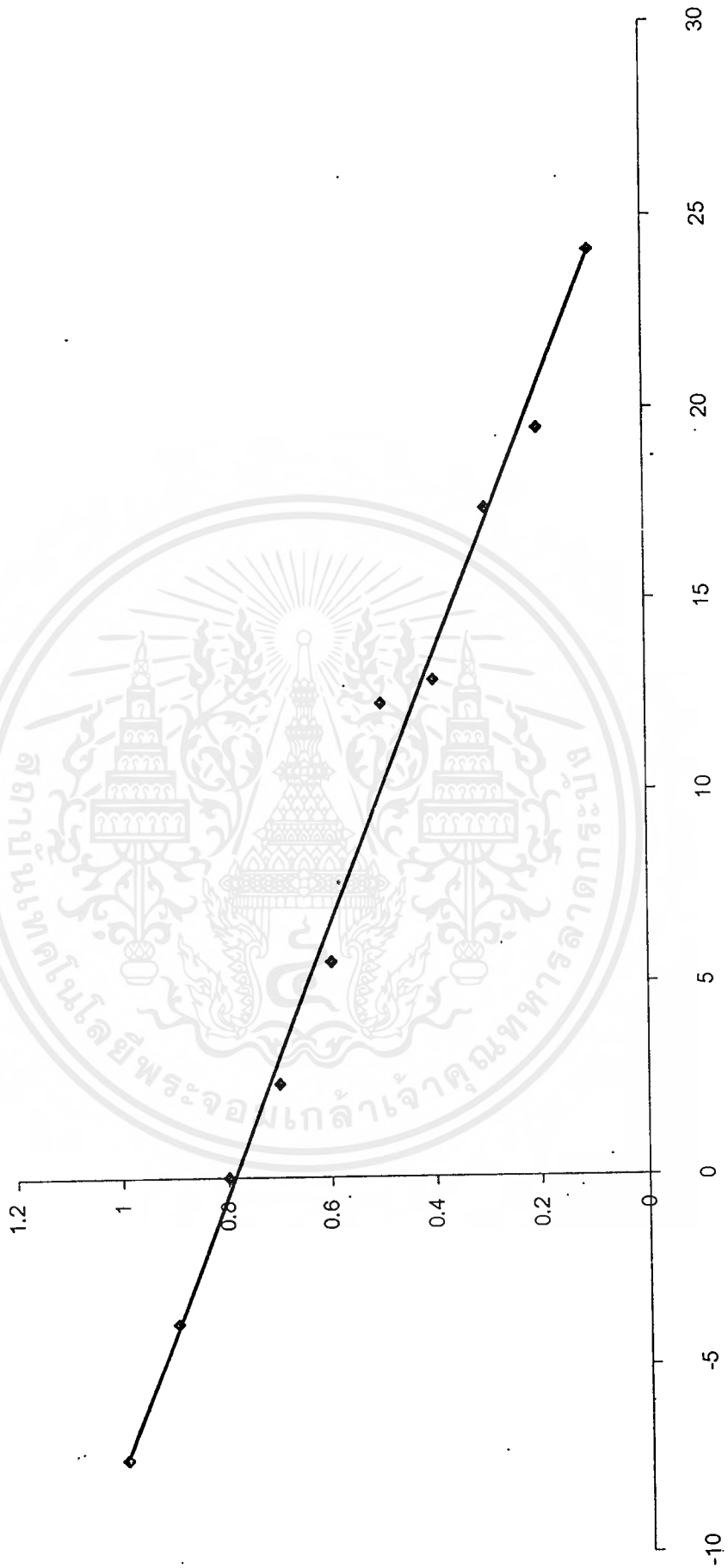
การเปลี่ยนสารตั้งต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์	ปริมาณซูโครส (กรัม/50มิลลิลิตร)	ปริมาณกลูโคส (กรัม/50มิลลิลิตร)	ปริมาณฟรุคโตส (กรัม/50มิลลิลิตร)
0.1	13.5	0.7895	0.7895
0.2	12.0	1.5789	1.5789
0.3	10.5	2.3684	2.3684
0.4	9.0	3.1579	3.1579
0.5	7.5	3.9474	3.9474
0.6	6.0	4.7369	4.7369
0.7	4.5	5.5263	5.5263
0.8	3.0	6.3158	6.3158
0.9	1.5	7.1053	7.1053
1.0	0	7.8948	7.8948

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 7.1 และตารางที่ 7.2 นำซูโครส กลูโคสและฟรุคโตสตามค่าการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ มาละลายให้ได้ 50 มิลลิลิตร แล้วนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องพอลาริมิเตอร์ เพื่อวัดค่าการเบี่ยงเบนแสง จากนั้นนำค่าที่ได้มาสร้างกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์และค่าการเบี่ยงเบนแสง ซึ่งจะได้กราฟมาตรฐานสำหรับสารละลายซูโครสที่ค่าการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ดังรูปที่ 7.3 และรูปที่ 7.4



รูปที่ 7.3 กราฟมาตรฐานหลายชุดเริ่มต้นเพิ่มขึ้น 20%

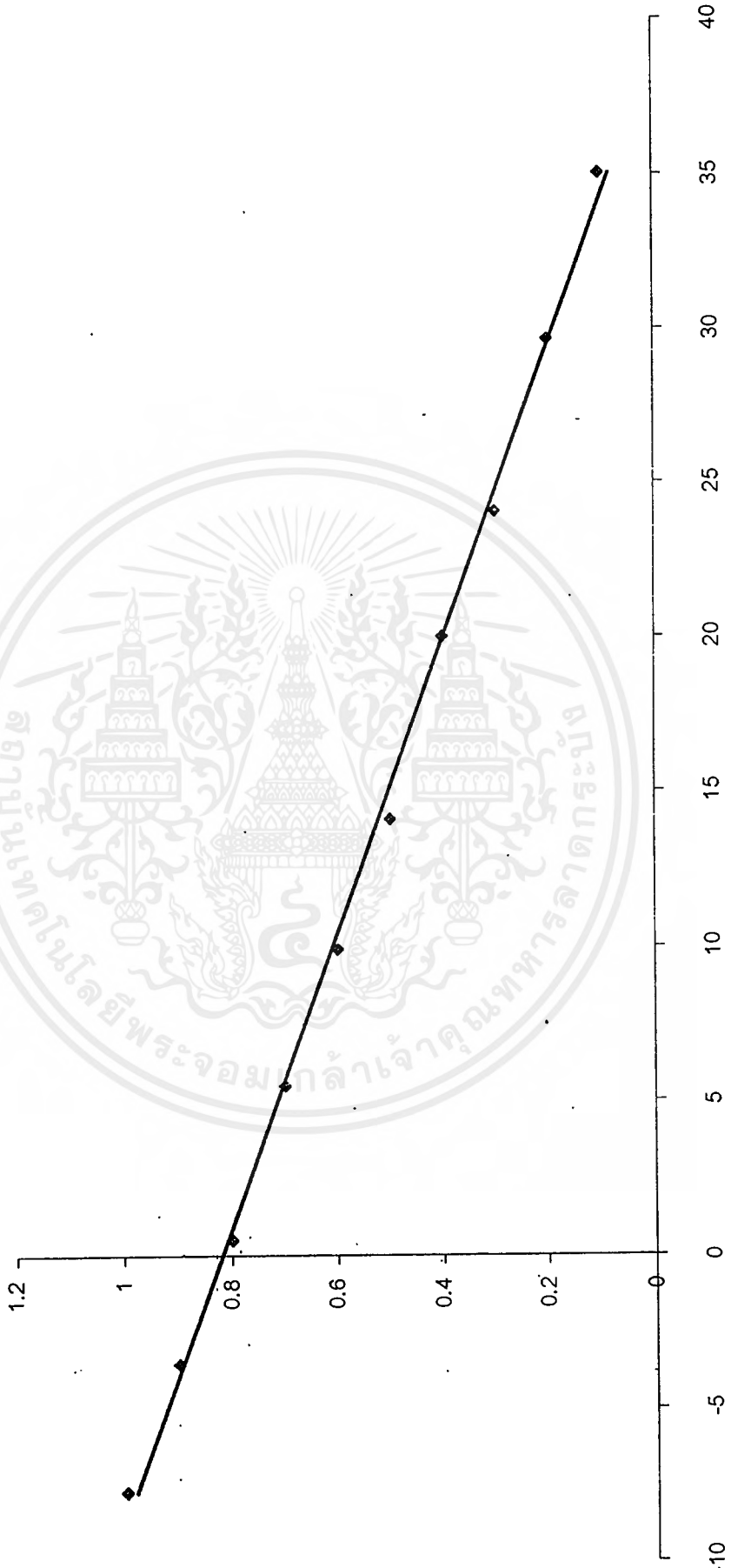


การเบี่ยงเบนแสง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต่ออ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 7.4 กราฟพหุนามฐานสามารละลายที่โครตเข้มข้นเริ่มต้น 30%



การเบี่ยงเบนแสง

4. วิธีการทดลอง

4.1 การหาค่าความจุประจุของตัวเร่งปฏิกิริยา

- 4.1.1 เตรียมสารละลายผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 นอร์มัล กับโซเดียมคลอไรด์ 15% โดยน้ำหนักประมาณ 250 มิลลิลิตร
- 4.1.2 เตรียมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 โมลาร์ มา 100 มิลลิลิตร
- 4.1.3 นำตั้งเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดมา 1 มิลลิลิตร แขนสารละลายผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 นอร์มัล กับโซเดียมคลอไรด์ 15% โดยน้ำหนักประมาณ 200 มิลลิลิตรทิ้งไว้ 1 คืน
- 4.1.4 นำสารละลายผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 นอร์มัล กับโซเดียมคลอไรด์ 15% โดยน้ำหนักที่เหลือมา 25 มิลลิลิตร นำมาไทเทรตกับสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.1 โมลาร์ ที่เตรียมไว้เพื่อเป็นการเทียบมาตรฐานความเข้มข้นของสารละลายผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์กับโซเดียมคลอไรด์
- 4.1.5 นำสารละลายผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 นอร์มัลกับโซเดียมคลอไรด์ 15% โดยน้ำหนักที่แช่ตั้งเร่งปฏิกิริยาทิ้งไว้ 1 คืนแล้ว มา 25 มิลลิลิตร ไทเทรตกับสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.1 โมลาร์ ที่เตรียมไว้บันทึกผล

4.2 การหาอันดับของปฏิกิริยา

- 4.2.1 ตั้งค่าอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ที่ 50 องศาเซลเซียส
- 4.2.2 เตรียมสารละลายซูโครสที่ความเข้มข้น 20% น้ำหนัก/ปริมาตร
- 4.2.3 ป้อนสารละลายผ่านเครื่องปฏิกรณ์ วัดค่าดัชนีการเบี่ยงเบนแสงของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านออกมาจากเครื่องปฏิกรณ์ทุกๆ 10 นาทีจนกระทั่งค่าเบี่ยงเบนแสงคงที่ บันทึกผล
- 4.2.4 เปลี่ยนค่าอัตราการไหลของปริมาตรแล้วทำซ้ำข้อ 4.2.3
- 4.2.5 เปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายซูโครสเป็น 30% น้ำหนัก/ปริมาตรแล้วทำซ้ำข้อ 4.2.3 และ 4.2.4 ตามลำดับ

4.3 การหาค่าพลังงานกระตุ้น

- 4.3.1 เตรียมสารละลายยูโครสที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20% น้ำหนัก/ปริมาตร
- 4.3.2 ตั้งค่าอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ที่ 40 องศาเซลเซียส
- 4.3.3 ป้อนสารละลายผ่านเครื่องปฏิกรณ์ วัดค่าดัชนีการเบี่ยงเบนแสงของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านออกมาจากเครื่องปฏิกรณ์ทุกๆ 10 นาที จนกระทั่งค่าเบี่ยงเบนแสงคงที่ บันทึกผล
- 4.3.4 เพิ่มค่าอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ครั้งละ 5 องศาเซลเซียส แล้วทำซ้ำข้อ 4.3.1 ถึง 4.3.3 โดยให้ค่าอุณหภูมิสูงสุดของเครื่องปฏิกรณ์เท่ากับ 80 องศาเซลเซียส

5. ผลการทดลอง

- 5.1 ผลการหาค่าความจุประจุของตัวเร่งปฏิกิริยา
ผลการหาค่าความจุของประจุที่ได้แสดงดังตารางที่ 7.3

ตารางที่ 7.3 ผลการทดลองการหาค่าความจุของตัวเร่งปฏิกิริยา

ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการเทียบมาตรฐาน	ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ได้หลังจากแช่ตัวเร่งปฏิกิริยา	ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ทำปฏิกิริยา
0.0921	0.0819	0.0102

จากการทดลอง ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 200 มิลลิลิตร และปฏิกิริยาระหว่างโซเดียมไฮดรอกไซด์กับกรดไฮโดรคลอริก เป็นปฏิกิริยาแบบหนึ่งต่อหนึ่ง เพราะฉะนั้นจะได้ตารางที่

7.4

ตารางที่ 7.4 ผลการทดลองการหาค่าความจุของตัวเร่งปฏิกิริยาจากตารางที่ 7.3

ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ ใช้ไปในหน่วยโมล (จากปริมาตร 200 มิลลิลิตร)	ปริมาณกรดไฮโดรคลอริกจาก ตัวเร่งปฏิกิริยาในหน่วยโมล ต่อตัวเร่งปฏิกิริยา 1 มิลลิลิตร	ความจุของตัวเร่งปฏิกิริยาใน หน่วยอีควิวาเลนต์ต่อตัวเร่ง ปฏิกิริยา 1 ลิตร
0.00204	0.00204	2.04

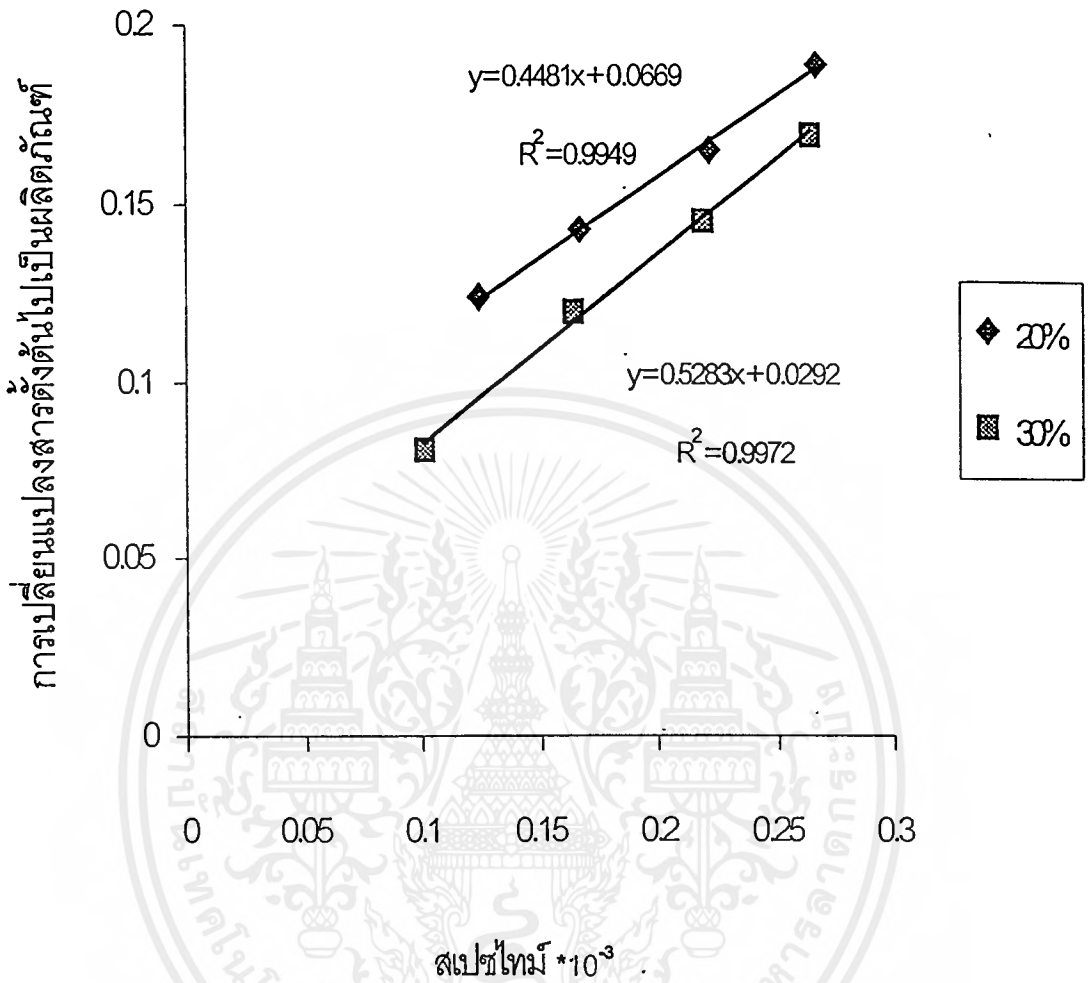
5.2 ผลการหาอันดับของปฏิกิริยา

ข้อมูลผลการทดลองที่ใช้สมมติฐานให้อันดับของปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาอันดับศูนย์แสดง
ดังตารางที่ 7.5

ตารางที่ 7.5 ผลการทดลองการหาอันดับของปฏิกิริยาอันดับศูนย์

ความเข้มข้น เริ่มต้นของสาร ละลายซูโครส	อัตราการไหล ของปริมาตร (ml/s)	การเบี่ยงเบนแสง	ค่าการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้น ไปเป็นผลิตภัณฑ์ (X)	สเปซไทม์ (τ)
20%	0.373	21.70	0.189	268.10
	0.449	22.40	0.164	222.72
	0.596	23.35	0.142	167.79
	0.799	24.00	0.124	125.16
30%	0.377	31.40	0.169	265.25
	0.456	33.00	0.144	219.30
	0.608	34.30	0.119	164.47
	0.992	36.25	0.081	100.80

นำข้อมูลที่ได้จากตารางมาพล็อตกราฟระหว่างค่าการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์กับสเปซไทม์ ดังรูปที่ 7.5



รูปที่ 7.5 กราฟปฏิกิริยาอันดับศูนย์

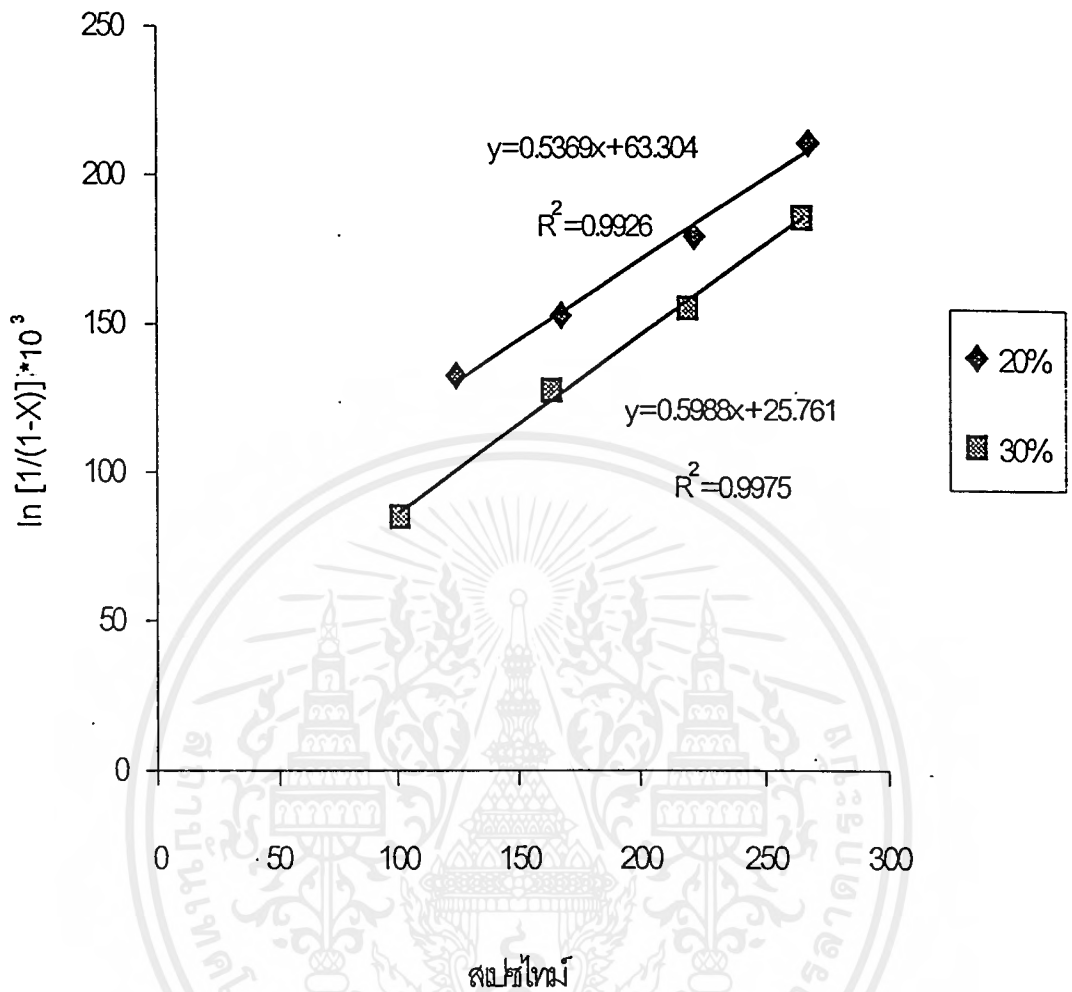
จากรูปที่ 7.5 เป็นกราฟที่ได้จากสมมติฐานที่ให้ปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาอันดับศูนย์ ซึ่งได้สมการที่ $3.22 X = (k/C_{A0})\tau$ ดังนั้นเมื่อพล็อตกราฟระหว่าง X กับ τ ความชันของกราฟนี้จะเท่ากับ k/C_{A0} และเนื่องจากที่อุณหภูมิเดียวกัน ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาเท่ากัน จะได้ว่า $k_{20\%}$ เท่ากับ $k_{30\%}$ ดังนั้นอัตราส่วนความชันของสารละลายซูโครส 20% ต่อความชันของสารละลายซูโครส 30% จะต้องเท่ากับ $3/2$ หรือเท่ากับ 1.5 แต่จากกราฟที่ได้พบว่า ค่าอัตราส่วนความชันของสารละลายซูโครส 20% ต่อ ความชันของสารละลายซูโครส 30% เท่ากับ 0.85 ดังนั้นปฏิกิริยานี้จึงไม่ใช่ปฏิกิริยาอันดับศูนย์

ข้อมูลผลการทดลองที่ใช้สมมติฐานให้อันดับของปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งแสดงดังตารางที่ 7.6

ตารางที่ 7.6 ผลการทดลองการหาอันดับของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายซูโครส	อัตราการไหลของปริมาตร (ml/s)	การเบี่ยงเบนแสง	ค่าการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์ (X)	$\ln \frac{1}{1-X}$	สเปซไทม์ (τ)
20%	0.373	21.70	0.189	0.210	268.10
	0.449	22.40	0.164	0.179	222.72
	0.596	23.35	0.142	0.153	167.79
	0.799	24.00	0.124	0.132	125.16
30%	0.377	31.40	0.169	0.185	265.25
	0.456	33.00	0.144	0.155	219.30
	0.608	34.30	0.119	0.127	164.47
	0.992	36.25	0.081	0.085	100.80

นำข้อมูลที่ได้จากตารางมาพล็อตกราฟระหว่าง $\ln [1/(1-X)]$ กับ τ แสดงดังรูปที่ 7.6



รูปที่ 7.6 กราฟปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

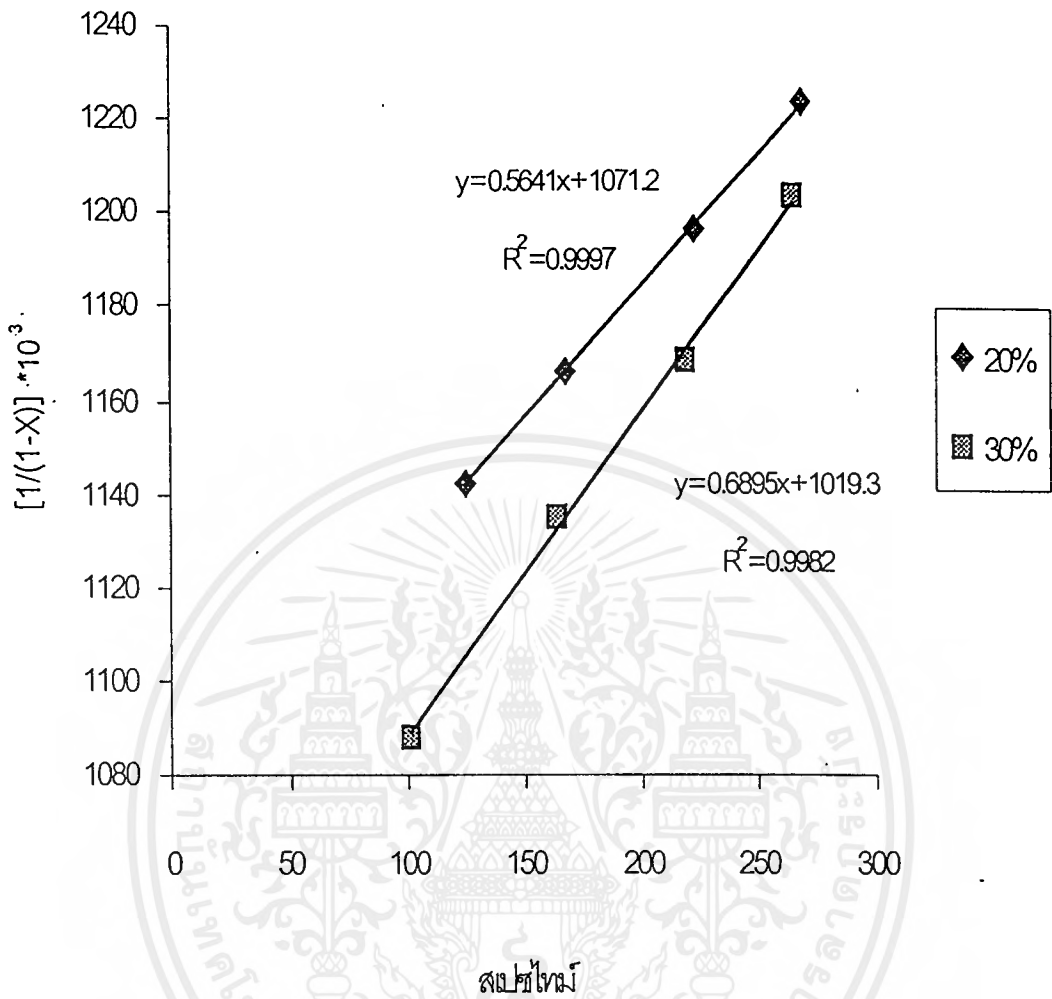
จากรูปที่ 7.6 เป็นกราฟที่ได้จากสมมติฐานที่ให้ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งซึ่งได้จากสมการ 3.28 $\ln [1/(1-X)] = k\tau$ ดังนั้น เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง $\ln [1/(1-X)]$ กับ τ จะได้กราฟที่มีค่าความชันเท่ากับ k ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความชันเริ่มต้นไม่มีผลต่อความชันของกราฟ ดังนั้นที่อุณหภูมิเดียวกันค่าความชันของสารละลายซูโครสที่ 20% จะต้องเท่ากับค่าความชันของสารละลายซูโครส 30% ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับกราฟที่ได้ ความชันของสารละลายซูโครส 20% มีค่าเท่ากับ 0.5369 และ ความชันของสารละลายซูโครส 30% มีค่าเท่ากับ 0.5988 จะเห็นได้ว่าความชันของกราฟทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกันมาก

ข้อมูลผลการทดลองที่ใช้สมมติฐานให้อันดับของปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาอันดับสองแสดงดังตารางที่ 7.7

ตารางที่ 7.7 ผลการทดลองการหาอันดับของปฏิกิริยาอันดับสอง

ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายซูโครส	อัตราการไหลของปริมาตร (ml/s)	การเบี่ยงเบนแสง	ค่าการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์ (X)	$\frac{1}{1-X}$	สเปซไทม์ (τ)
20%	0.373	21.70	0.189	1.233	268.10
	0.449	22.40	0.164	1.196	222.72
	0.596	23.35	0.142	1.166	167.79
	0.799	24.00	0.124	1.142	125.16
30%	0.377	31.40	0.169	1.203	265.25
	0.456	33.00	0.144	1.168	219.30
	0.608	34.30	0.119	1.135	164.47
	0.992	36.25	0.081	1.088	100.80

นำข้อมูลที่ได้จากตารางมาพล็อตกราฟระหว่าง $1/(1-X)$ กับ τ ดังรูปที่ 7.7



รูปที่ 7.7 กราฟปฏิกิริยาอันดับสอง

จากรูปที่ 7.7 เป็นกราฟที่ได้จากสมมติฐานที่ให้ปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาอันดับสองซึ่งได้จากสมการที่ 3.34 $1/(1-X) = kC_{A0}\tau$ เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง $1/((1-X))$ กับ τ ความชันของกราฟนี้จะเท่ากับ kC_{A0} และเนื่องจากที่อุณหภูมิเดียวกัน $k_{20\%}$ เท่ากับ $k_{30\%}$ ดังนั้นอัตราส่วนความชันของสารละลายซูโครส 20% ต่อความชันของสารละลายซูโครส 30% จะต้องเท่ากับ 2/3 หรือเท่ากับ 0.67 แต่จากกราฟที่ได้พบว่า ค่าอัตราส่วนความชันของสารละลายซูโครส 20% ต่อ ความชันของสารละลายซูโครส 30% เท่ากับ 0.91 ดังนั้นปฏิกิริยานี้จึงไม่ใช่ปฏิกิริยาอันดับสอง

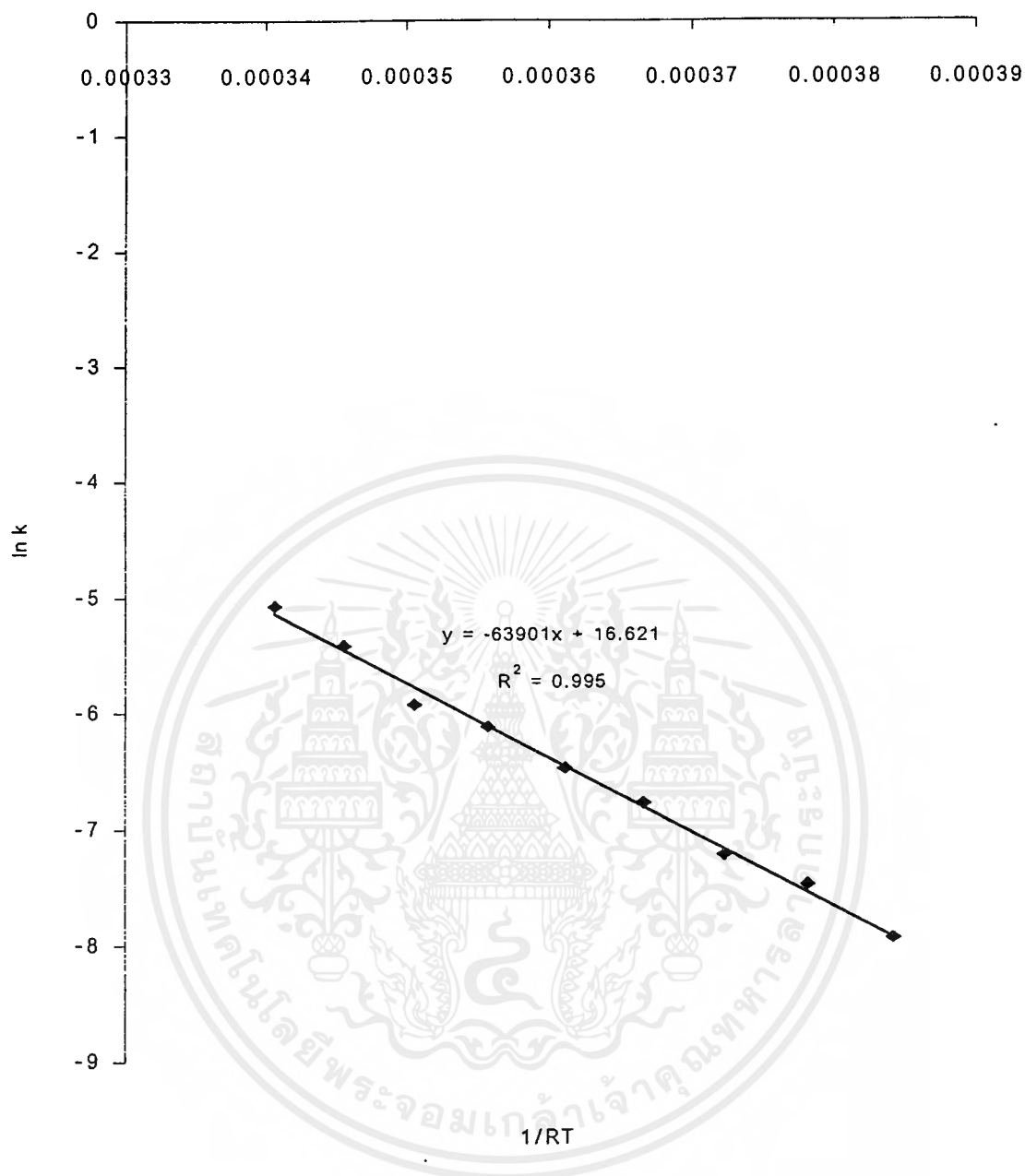
5.3 ผลการหาค่าพลังงานกระตุ้น

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองการหาค่าพลังงานกระตุ้นโดยการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิและอัตราการไหลแสดงดังตารางที่ 7.8

ตารางที่ 7.8 ผลการทดลองการหาค่าพลังงานกระตุ้น

อุณหภูมิ (K)	อัตราการไหล(ml/s)	การเบี่ยงเบนแสง	Conversion (X)	k	ln k	$\frac{1}{RT}$
313	0546	25.60	0.063	$3.52 \cdot 10^{-4}$	-7.95	$3.84 \cdot 10^{-4}$
318	0.535	24.15	0.100	$5.64 \cdot 10^{-4}$	-7.48	$3.78 \cdot 10^{-4}$
323	0.518	23.10	0.131	$7.29 \cdot 10^{-4}$	-7.22	$3.72 \cdot 10^{-4}$
328	0.533	21.00	0.193	$1.14 \cdot 10^{-3}$	-6.78	$3.67 \cdot 10^{-4}$
333	0.537	19.25	0.250	$1.54 \cdot 10^{-3}$	-6.48	$3.61 \cdot 10^{-4}$
338	0.534	16.40	0.338	$2.20 \cdot 10^{-3}$	-6.12	$3.56 \cdot 10^{-4}$
343	0.554	14.60	0.381	$2.66 \cdot 10^{-3}$	-5.93	$3.51 \cdot 10^{-4}$
348	0.546	8.45	0.553	$4.39 \cdot 10^{-3}$	-5.43	$3.46 \cdot 10^{-4}$
353	0.535	3.65	0.688	$6.22 \cdot 10^{-3}$	-5.08	$3.41 \cdot 10^{-4}$

จากผลการทดลองดังตารางที่ 7.9 นำมาพล็อตกราฟระหว่าง ln k กับ $1/RT$ ดังรูปที่ 7.8



รูปที่ 7.8 กราฟการหาค่าพลังงานกระตุ้น

สามารถคำนวณค่าความชันของกราฟได้เท่ากับ -63901 และได้จุดตัดแกน y เท่ากับ 16.621 เนื่องจากความชันของกราฟเท่ากับ $-E$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $\ln A$ ดังนั้นค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาจึงเท่ากับ 63901 J/mol หรือ 63.90 kJ/mol หรือ 15.27 kcal/mol และได้ค่าพรีเอ็กซ์โพเนนเชียลของสมการอาร์เรเนียสเท่ากับ $1.65 \cdot 10^7 \text{ sec}^{-1}$

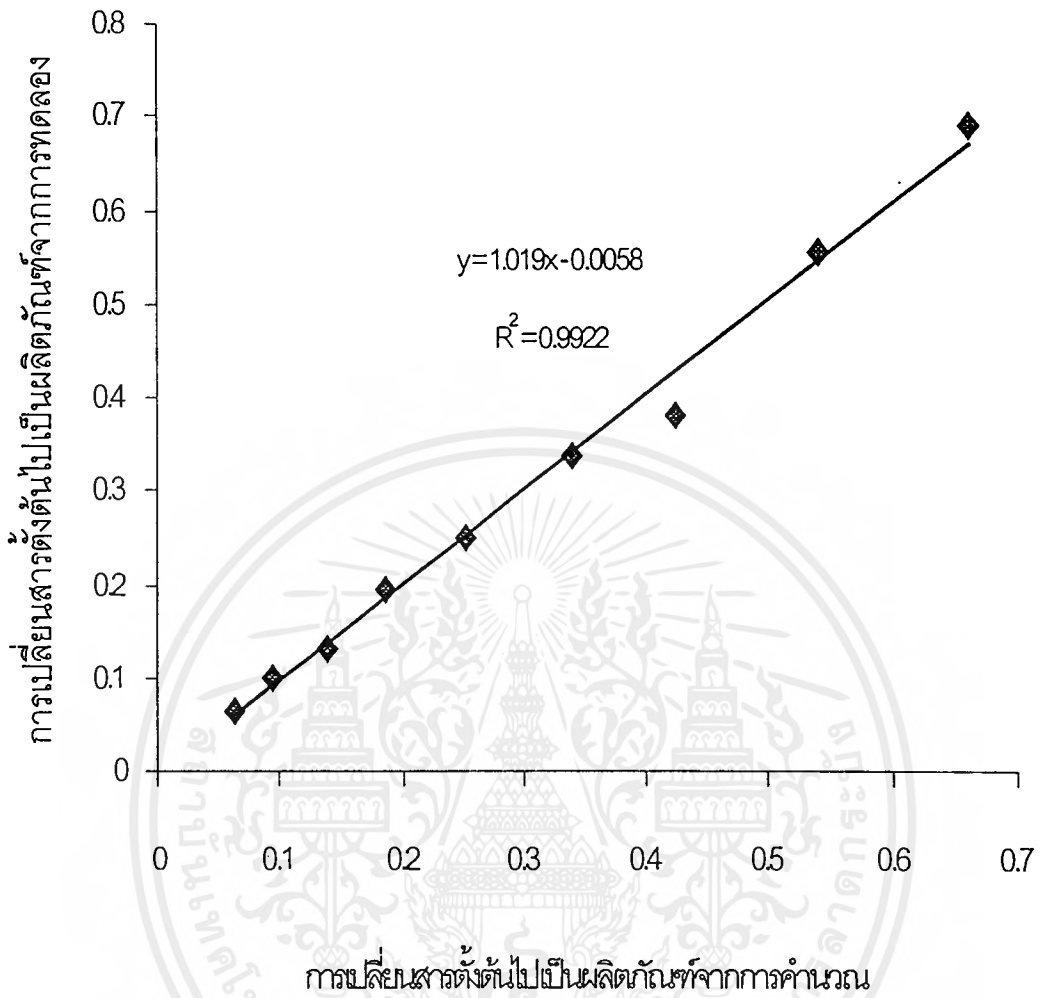
6. การเปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์จากการทดลองและค่าการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์จากการคำนวณ

ค่าการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์จากการทดลองจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์จากการคำนวณ โดยการนำค่าพลังงานกระตุ้นและค่า พรีเอ็กซีพอนเนนเชียล มาหาคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาจากสมการ $k = 1.65 \cdot 10^7 \exp[-63901/8.3144T]$ เมื่อได้ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาแล้วนำมาคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์จากสมการ $X = 1 - \exp[-kT]$ ได้ผลดังตารางที่ 7.9

ตารางที่ 7.9 การเปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์จากการทดลองและค่าการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์จากการคำนวณ

อุณหภูมิ (K)	อัตราการไหล (ml/s)	ดัชนีเบี่ยงเบน แสง	X_{exp}	k_{cal}	X_{cal}
313	0.546	25.60	0.063	$3.55 \cdot 10^{-4}$	0.063
318	0.535	24.15	0.100	$5.64 \cdot 10^{-4}$	0.094
323	0.518	23.10	0.131	$7.27 \cdot 10^{-4}$	0.137
328	0.533	21.00	0.193	$1.14 \cdot 10^{-3}$	0.187
333	0.537	19.25	0.250	$1.54 \cdot 10^{-3}$	0.253
338	0.534	16.40	0.338	$2.20 \cdot 10^{-3}$	0.338
343	0.554	14.60	0.381	$2.66 \cdot 10^{-3}$	0.425
348	0.546	8.45	0.553	$4.40 \cdot 10^{-3}$	0.540
353	0.535	3.65	0.688	$6.23 \cdot 10^{-3}$	0.661

นำข้อมูลจากตารางมาพล็อตระหว่างค่าการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์จากการทดลอง (X_{exp}) และ ค่าการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์จากการคำนวณ (X_{cal}) ดังรูปที่ 7.9



รูปที่ 7.9 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์จากการทดลอง และการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์จากการคำนวณ

จากกราฟพบว่าค่าความชันของกราฟและค่า R^2 มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าค่าการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์จากการทดลองและค่าการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์จากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นสมมติฐานที่ให้ปฏิกริยานี้เป็นปฏิกริยาอันดับหนึ่งจึงถูกต้อง

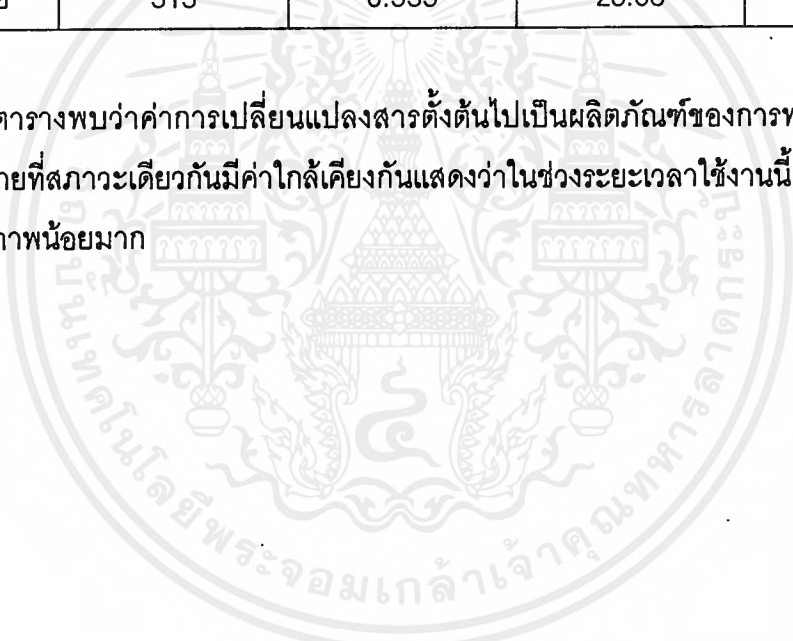
7. การเสื่อมสภาพ

เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการใช้งานแล้วอาจมีการเสื่อมสภาพได้ จึงต้องมีการตรวจสอบว่าค่าการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์ของการทดลองครั้งแรกและการทดลองครั้งสุดท้ายที่สภาวะเดียวกันมีค่าแตกต่างกันมากน้อยเพียงใด ผลการตรวจสอบแสดงดังตารางที่ 7.10

ตารางที่ 7.10 ผลการเปรียบเทียบการทดลองครั้งแรกและครั้งสุดท้าย

การทดลอง	อุณหภูมิ (K)	อัตราการไหล (ml/s)	การเบี่ยงเบนแสง	การเปลี่ยนแปลง สารตั้งต้นไปเป็น ผลิตภัณฑ์ (X)
ครั้งแรก	313	0.546	25.60	0.063
ครั้งสุดท้าย	313	0.535	25.68	0.062

จากตารางพบว่าค่าการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์ของการทดลองครั้งแรกและครั้งสุดท้ายที่สภาวะเดียวกันมีค่าใกล้เคียงกันแสดงว่าในช่วงระยะเวลาใช้งานนี้ตัวเร่งปฏิกิริยามีการเสื่อมสภาพน้อยมาก



บทที่ 8

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. ผลการทดลองการหาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาซุโครสไฮโดรลิซิส เร่งปฏิกิริยาด้วย Lewatit S100 ซึ่งเป็นเรซินแลกเปลี่ยนประจุรูปกรดชนิดเจล พบว่าเมื่อมีอัตราการไหลของปริมาตรเพิ่มขึ้น ค่าการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์จะมีค่าลดลง เมื่อนำข้อมูลมาพล็อตกราฟระหว่าง $\ln[1/(1-X)]$ กับ V/V_0 พบว่าได้กราฟเป็นเส้นตรง และเมื่อเปลี่ยนค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายซุโครส พบว่าความชันของกราฟทั้งสองความเข้มข้นมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าปฏิกิริยาซุโครสไฮโดรลิซิสนี้เป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง
2. เมื่อมีการเปลี่ยนอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ค่าต่างๆกัน พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ค่าการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์และค่า k เพิ่มขึ้น เมื่อนำค่า k ที่ได้ที่อุณหภูมิต่างๆกัน มาพล็อตกราฟระหว่าง $\ln k$ กับ $1/RT$ ได้กราฟเป็นเส้นตรง สามารถหาพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาได้จากความชันของกราฟ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 63.90 kJ/mol หรือ 15.27 kcal/mol และหาค่าพรีเอ็กซีโพเนนเชียลของสมการอาร์เรเนียสได้จากจุดตัดแกน y ซึ่งเท่ากับ $1.65 \cdot 10^7 \text{ sec}^{-1}$ ดังนั้นอัตราเร็วของปฏิกิริยาซุโครสไฮโดรลิซิสคือ $\{(1.65 \cdot 10^7) \cdot \exp[-63901/(8.3144 \cdot T)]\} \cdot C_A$ โมลซุโครส/(ลิตรของตัวเร่งปฏิกิริยา*วินาที) เมื่อ T คืออุณหภูมิในหน่วยเคลวินและ C_A คือความเข้มข้นในหน่วย โมล/ลิตร หรือ $\{(4.82 \cdot 10^5) \cdot \exp[-63901/(8.3144 \cdot T)]\} \cdot W_A$ โมลซุโครส/(ลิตรของตัวเร่งปฏิกิริยา*วินาที) เมื่อ W_A คือความเข้มข้นในหน่วยเปอร์เซ็นต์ น้ำหนัก/ปริมาตร
3. ค่าการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์สามารถหาได้จากสมการ $\ln [1/(1-X)] = kT$ หรือ $X = 1 - \exp[-kT]$ หรือ $X = 1 - \exp\{(-1.65 \cdot 10^7) \cdot \exp[-63901/(8.3144 \cdot T)] \cdot T\}$ ดังนั้นเมื่อทราบสเปซไทม์และอุณหภูมิ จะสามารถหาค่าการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์ได้
4. ค่าการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์จากการทดลองและค่าการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์จากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นสมมติฐานที่ให้ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งจึงถูกต้อง

5. เมื่อหาค่าการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นไปผลิตภัณฑ์ในการทดลองครั้งสุดท้าย โดยใช้สภาวะเดียวกันกับการทดลองครั้งแรก พบว่าค่าการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์ของการทดลองครั้งแรกและครั้งสุดท้ายมีค่าใกล้เคียงกัน จึงสรุปได้ว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนประจุมีการเสื่อมสภาพน้อยมากในช่วงระยะเวลาใช้งาน เนื่องจากมีการเปลี่ยนตัวกรองประจุอย่างสม่ำเสมอ



เอกสารอ้างอิง

1. Bodamer G.W, and Kunin R.,Heterogeneous Catalytic Inversion of Sucrose with Cation Exchange Resin,Industrial and Engineering Chemistry .1951,Vol.43,p.1082-1085
2. Kirk Othmer,Sugar,Kirk-Othmer Concise Encyclopedia of Chemical Technology, John Wiley,1985,Vol.23,p.1-9,87
3. Fogler H.S.,Elementary of Chemical Reaction Engineering ,2nd Edition,Prentice-Hall International,Inc.,1992,p.11-13,359-363.
4. Naden D. and Streat M.,Ion Exchange Technology .Ellis Horwood Limited,1984.
5. Lifshutz N. and Dranoff J.S.,Inversion of Concentrated Sucrose Solutions in Fixed Bed of Ion Exchange Resin.,I&EC Process Design and Development ,1968,Vol.7, No.2,p.266-269.
6. McGovern T.S. and Dranoff J.S.,Sucrose Inversion by Partially Deactivated Ion Exchange Resin Beds.,AIChE Journal ,1970,p.536-538.
7. Bodamer G.W. and Kunin R.,Behavior of Ion Exchange Resin in Solvents other than water.,Industrial and Engineering Chemistry ,1953,Vol.45,p.2577-2580.
8. Jakovac I.J.,Reaction catalyzed by Polymers with Acidic Functional Group ,1987, p.187-192
9. Dorfner K.,Ion Exchange Properties and Applications ,Ann Arbor Science Publishers Inc.,1973.
10. Kort M.J.,The Industrial Utilization of Sugar and Mill By-product ,Sugar Milling Research Institute,South Africa,1975.
11. Renicker R.A.,and Gates B.C.,Bisphenol A Synthesis : Kinetics of the Phenol-Acetone Condensation Reaction Catalyzed by Sulfonic Acid Resin.,AIChE Journal , 1974,Vol 25,No.5,p.933-940.
12. Pearce R. and Patterson W.R.,Catalysis and Chemical Processes ,John Wilay and Sons.
13. Dzedzic S.Z. and Kearsley M.W.,Glucose Syrups Science and Technology,Elsevier Science Publishers,1984.

14. Osborn G.H.,Systhetic Ion Exchanger ,London Chapman and Hall Ltd.,1961.
15. Fisher S. and Kunin R.,Routine Exchange Capacity Determinations of Ion Exchange Resin.,Analytical Chemistry ,1955,Vol.27,No.7,p.191-1194.
16. Collins P. and Ferrier R.,Monosaccharides ,John Wiley,1995,p.5-11.
17. <http://www.ee.umd.edu/~nsw/ench485/lab14.htm>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้