

# เครื่องทดสอบการถ่ายเทมวลสารผ่านชั้นฟิล์ม



รายงานผลการดำเนินงานโครงการวิจัยโดยใช้เงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประจำปี 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนำ

รายงานนี้ จัดทำขึ้นเพื่อแสดงผลของโครงการวิจัยเรื่อง เครื่องทดสอบการถ่ายเทมวลสารผ่านชั้นฟิล์มในปฏิกิริยาเชิงเร่งแบบวิวิธพันธ์ ซึ่งได้รับเงินทุนสนับสนุนจากเงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ ประจำปี 2551 โดยเนื้อหาส่วนใหญ่มาจากวิทยานิพนธ์เรื่อง การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงน้ำตาลซูโครสเป็นกลูโคสและฟรุกโตสโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนประจุเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ของ นายชลเสกข์ ชาญคณิตหิรัญ และ นางสาวชลิดา ธีระศักดิ์สกุลชัย นักศึกษาระดับปริญญาตรี ชั้นปีที่ 4 ปีการศึกษา 2551 ในความดูแลของ ดร. วลัยรัตน์ สุขสมัย หัวหน้าโครงการวิจัย โดยในงานวิจัยดังกล่าว ได้ทำการออกแบบเครื่องทดสอบการถ่ายเทมวลสารผ่านชั้นฟิล์ม แล้วทำการทดสอบกับปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสสารละลายน้ำตาลซูโครส โดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนประจุเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งจากการศึกษาพบว่า ปฏิกิริยาดังกล่าวน่าจะมีการถ่ายเทมวลสารผ่านชั้นฟิล์มเกิดขึ้นจริง ดังแสดงรายละเอียดต่างๆ ไว้ในรายงานนี้ เครื่องถ่ายเทมวลสารผ่านชั้นฟิล์มที่สร้างขึ้นนี้ สามารถนำไปใช้ในการวิจัยเพื่อหาข้อมูลสำหรับออกแบบและปรับปรุงกระบวนการเพิ่มมูลค่าน้ำตาลซูโครสโดยการเปลี่ยนให้เป็นกลูโคสและฟรุกโตส อีกทั้งยังสามารถใช้ศึกษากระบวนการแยกน้ำตาลกลูโคสและฟรุกโตสออกจากกันเพื่อให้ได้สารผลิตภัณฑ์ที่บริสุทธิ์ขึ้นอีกด้วย การได้รับทุนสนับสนุนโครงการวิจัยนี้ จึงนับว่าเป็นประโยชน์อย่างยิ่ง ทั้งในด้านส่งเสริมงานวิจัยของอาจารย์และนักศึกษา และในด้านการพัฒนากระบวนการผลิตซึ่งอาจสามารถต่อยอดไปประยุกต์ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมในอนาคตได้อีกด้วย

RCH  
TP  
159  
.S4

23450

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....  
วันเดือนปี.....

105809

2 ส.ค. 2552

b. 1816094X  
i. ....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อให้บริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
โปรดปฏิบัติตามข้อปฏิบัติให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งในการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
คำนำ .....	I
สารบัญ.....	II
สารบัญตาราง.....	IV
สารบัญรูป.....	VI
สัญลักษณ์.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของ โครงการงาน.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตโครงการ.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ทฤษฎี.....	4
2.1.1 น้ำตาลซูโครส.....	4
2.1.2 น้ำตาลกลูโคส.....	5
2.1.3 น้ำตาลฟรุกโตส.....	6
2.1.4 การแยกฟรุกโตสเบื้องต้น.....	6
2.1.5 ปฏิริยาไฮโดรลิซิสของซูโครส.....	8
2.1.6 ตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนประจุรูปกรด.....	9
2.1.7 เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุ.....	11
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	17
บทที่ 3 การทดลอง.....	20
3.1 สารเคมีที่ใช้.....	19
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	19
3.3 วิธีการทดลอง.....	20
3.3 วิธีการใช้งานเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวแบบสมรรถนะสูง (HPLC).....	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล.....	22
4.1 การทดลองเพื่อหาอันดับปฏิกิริยา.....	22
4.2 การทดลองเพื่อหาพลังงานกระตุ้น.....	34
4.3 การทดลองเพื่อวิเคราะห์ผลจากการถ่ายโอนมวล โดยใช้ปริมาณสัดส่วนของน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาและอัตราการไหลคงที่.....	36
4.4 การทดลองเพื่อทดสอบปริมาณกลูโคสและฟรุกโตสที่เกิดขึ้นจริงเทียบ ปริมาณกลูโคสและฟรุกโตสที่เกิดขึ้นตามทฤษฎี.....	37
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	39
วิจารณ์การทดลองและข้อเสนอแนะ.....	40
เอกสารอ้างอิง.....	41
ภาคผนวก ก ตัวอย่างการวิเคราะห์ปริมาณสารละลายที่ได้จากการทดลองโดยใช้เครื่อง โครมาโทกราฟีของเหลวแบบสมรรถนะสูง (HPLC).....	42
ภาคผนวก ข การเตรียมกราฟมาตรฐานวิเคราะห์ปริมาณ.....	43
ภาคผนวก ค ข้อมูลดิบ.....	46
ภาคผนวก ง ตัวอย่างการคำนวณ.....	50
ง1. ตัวอย่างการคำนวณหาความเข้มข้นซูโครสจากกราฟมาตรฐานวิเคราะห์ปริมาณ.....	50
ง2. ตัวอย่างการคำนวณหาค่าการแปลงผันทางเคมีของซูโครส.....	51
ง3. ตัวอย่างการคำนวณหาค่าสเปซไทม์.....	51
ง4. ตัวอย่างการคำนวณหาพลังงานกระตุ้นและค่าพรีเอ็กซ์โพเนนเชียล ของสมการอาร์เรเนียส.....	51
ภาคผนวก จ การทดลองเพิ่มเติม.....	52
จ1. การทดลองเพื่อวิเคราะห์ผลจากตัวกรอง.....	52
จ2. การทดลองเพื่อวิเคราะห์ผลจากการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	53

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางกายภาพของซูโครส.....	4
ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบค่าความหวานของสารละลายซูโครส กลูโคสและฟรุกโตส.....	5
ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของตัวดูดซับโพลีสไตรีน-ไดไวนิลเบนซีนในรูปแบบแคลเซียม.....	7
ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนประจุกรด.....	9
ตารางที่ 4.1 ข้อมูลผลการทดลองเมื่อใช้สมมติฐานให้อันดับปฏิกิริยาเป็นอันดับศูนย์ ที่ความเข้มข้นซูโครสเริ่มต้นประมาณ 16.98 กรัม/100มิลลิลิตร.....	22
ตารางที่ 4.2 ข้อมูลผลการทดลองเมื่อใช้สมมติฐานให้อันดับปฏิกิริยาเป็นอันดับศูนย์ ที่ความเข้มข้นซูโครสเริ่มต้นประมาณ 34.47 กรัม/100มิลลิลิตร.....	23
ตารางที่ 4.3 ข้อมูลผลการทดลองเมื่อใช้สมมติฐานให้อันดับปฏิกิริยาเป็นอันดับหนึ่ง ที่ความเข้มข้นซูโครสเริ่มต้นประมาณ 16.98 กรัม/100มิลลิลิตร.....	26
ตารางที่ 4.4 ข้อมูลผลการทดลองเมื่อใช้สมมติฐานให้อันดับปฏิกิริยาเป็นอันดับหนึ่ง ที่ความเข้มข้นซูโครสเริ่มต้นประมาณ 34.47 กรัม/100มิลลิลิตร.....	27
ตารางที่ 4.5 ข้อมูลผลการทดลองเมื่อใช้สมมติฐานให้อันดับปฏิกิริยาเป็นอันดับสอง ที่ความเข้มข้นซูโครสเริ่มต้นประมาณ 16.98 กรัม/100มิลลิลิตร.....	30
ตารางที่ 4.6 ข้อมูลผลการทดลองเมื่อใช้สมมติฐานให้อันดับปฏิกิริยาเป็นอันดับสอง ที่ความเข้มข้นซูโครสเริ่มต้นประมาณ 34.47 กรัม/100มิลลิลิตร.....	31
ตารางที่ 4.7 ค่าคงที่อัตราที่สภาวะต่างๆ เมื่ออันดับปฏิกิริยาเป็นอันดับหนึ่ง.....	34
ตารางที่ 4.8 วิเคราะห์ผลจากการแพร่โดยใช้ปริมาณสัดส่วนของน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยา และอัตราการไหลคงที่.....	36
ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบปริมาณกลูโคสและฟรุกโตสที่เกิดขึ้นจริงเทียบปริมาณกลูโคส และฟรุกโตสที่เกิดขึ้นตามทฤษฎี ที่ความเข้มข้น 16.98 กรัม/100 มิลลิลิตร.....	37
ตารางที่ 4.10 เปรียบเทียบปริมาณกลูโคสและฟรุกโตสที่เกิดขึ้นจริงเทียบปริมาณกลูโคส และฟรุกโตสที่เกิดขึ้นตามทฤษฎี ที่ความเข้มข้น 34.47 กรัม/100 มิลลิลิตร.....	38
ตารางที่ ก1. แสดงค่าตัวอย่างพื้นที่ผิวของสารละลายหลังทำปฏิกิริยา.....	42
ตารางที่ ข1. เทียบปริมาณสารละลายซูโครสกับพื้นที่ผิว.....	43
ตารางที่ ข2. เทียบปริมาณสารละลายกลูโคสกับพื้นที่ผิว.....	44
ตารางที่ ข3. เทียบปริมาณสารละลายฟรุกโตสกับพื้นที่ผิว.....	45
ตารางที่ ค1. พื้นที่ผิวของสารต่างๆที่สภาวะคงตัว ที่สารละลายซูโครสเริ่มต้น 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ ค2. พื้นที่พิกของสารต่างๆที่สภาวะคงตัว ที่สารละลายซูโครสเริ่มต้น 30 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก.....	47
ตารางที่ ค3. ความเข้มข้นของสารต่างๆที่สภาวะคงตัว ที่สารละลายซูโครสเริ่มต้น 15 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก.....	48
ตารางที่ ค4. ความเข้มข้นของสารต่างๆที่สภาวะคงตัว ที่สารละลายซูโครสเริ่มต้น 30 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก.....	49
ตารางที่ จ1. ผลการทดลองเพื่อวิเคราะห์ผลจากตัวกรอง.....	52
ตารางที่ จ2. ผลการทดลองเพื่อวิเคราะห์ผลจากการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	53



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของน้ำตาลซูโครส.....	4
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของน้ำตาลกลูโคส.....	6
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของน้ำตาลฟรุกโตส.....	6
รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของ Lewatit S100.....	9
รูปที่ 2.5 เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุ.....	12
รูปที่ 3.1 ชุดทดลองเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุ.....	19
รูปที่ 4.1 กราฟปฏิกิริยาอันดับศูนย์ ที่ความเข้มข้นซูโครส เท่ากับ 16.98 กรัม/100 มิลลิลิตร.....	24
รูปที่ 4.2 กราฟปฏิกิริยาอันดับศูนย์ ที่ความเข้มข้นซูโครส เท่ากับ 34.47 กรัม/100 มิลลิลิตร.....	25
รูปที่ 4.3 กราฟปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ที่ความเข้มข้นซูโครส เท่ากับ 16.98 กรัม/100 มิลลิลิตร.....	28
รูปที่ 4.4 กราฟปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ที่ความเข้มข้นซูโครส เท่ากับ 34.47 กรัม/100 มิลลิลิตร.....	29
รูปที่ 4.5 กราฟปฏิกิริยาอันดับสอง ที่ความเข้มข้นซูโครส เท่ากับ 16.98 กรัม/100 มิลลิลิตร.....	32
รูปที่ 4.6 กราฟปฏิกิริยาอันดับสอง ที่ความเข้มข้นซูโครส เท่ากับ 34.47 กรัม/100 มิลลิลิตร.....	33
รูปที่ 4.7 กราฟการหาค่าพลังงานกระตุ้น.....	35
รูปที่ ก1. ตัวอย่างกราฟแสดงพื้นที่ที่ฟิคเมื่อทำการวิเคราะห์สารละลายหลังทำปฏิกิริยา.....	42
รูปที่ ข1. กราฟวิเคราะห์ปริมาณซูโครส.....	43
รูปที่ ข2. กราฟวิเคราะห์ปริมาณกลูโคส.....	44
รูปที่ ข3. กราฟวิเคราะห์ปริมาณฟรุกโตส.....	45

## สัญลักษณ์

$A$	Pre - exponential factor
$C_{A0}$	ความเข้มข้นสาร A เริ่มต้น, โมล/ลิตร
$C_A$	ความเข้มข้นของสาร A , โมล/ลิตร
$E$	พลังงานกระตุ้น, กิโลจูล/โมล
$F_{A0}$	อัตราไหลเชิงโมลของสาร A ที่เวลาเริ่มต้น, โมล/นาที
$F_A$	อัตราไหลเชิงโมลของสาร A ที่เวลาใดๆ, โมล/นาที
$G_A$	อัตราการเกิดสาร A จากปฏิกิริยาเคมี (Rate of generation)
$k$	ค่าคงที่อัตรา
$k_A$	ค่าคงที่อัตราที่คิดเทียบสาร A
$N_A$	จำนวนโมลของสาร A
$n$	อันดับรวมของปฏิกิริยา
$R$	ค่าคงที่แก๊ส
$r_A$	อัตราการเกิดปฏิกิริยาของสาร A , โมล/กรัมของตัวเร่งปฏิกิริยา. นาที
$r'_A$	อัตราการเกิดปฏิกิริยาของสาร A , โมล/ปริมาตรของตัวเร่งปฏิกิริยา. นาที
$t$	เวลา, นาที
$T$	อุณหภูมิสัมบูรณ์, เคลวิน
$V$	ปริมาตรของตัวเร่งปฏิกิริยา, มิลลิลิตร
$v_0$	อัตราการไหลของสายป้อน, มิลลิลิตรต่อนาที
$W$	น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา, กรัม
$X_A$	ค่าแปลงผันทางเคมีของสาร A
$\tau$	สเปซไทม์
$\rho$	ความหนาแน่นของตัวเร่งปฏิกิริยา, กรัมต่อมิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา [1]

ซูโครสหรือน้ำตาลทรายเป็นน้ำตาลโมเลกุลคู่ เมื่อทำเกิดปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสจะเปลี่ยนไปเป็นกลูโคสและฟรุกโตส ซึ่งเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว ในการทำปฏิกิริยาจะใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งมีทั้งแบบระบบเอกพันธ์ (Homogeneous system) และระบบบิวิธพันธ์ (Heterogeneous system) โดยกลูโคสและฟรุกโตสที่ได้จะเป็นสารละลายอยู่ในวัฏภาคเดียวกัน

น้ำตาลกลูโคสและฟรุกโตสนั้นสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลายด้าน น้ำตาลกลูโคสมีอยู่ในธรรมชาติทั่วไป เช่น ในพืช ผัก ผลไม้ น้ำผึ้ง น้ำตาลกลูโคสเป็นน้ำตาลที่สลายให้พลังงานมากที่สุดในเรื่องมีชีวิต มีความหวานเป็นอันดับสองรองจากน้ำตาลฟรุกโตส ทางทางการแพทย์ใช้กลูโคสเป็นแหล่งพลังงานที่ต้องการใช้อย่างรวดเร็ว เช่น ในผู้ป่วยที่อ่อนแอ น้ำตาลกลูโคสเป็นน้ำตาลชนิดเดียวในกระแสเลือดของมนุษย์ที่ได้จากการย่อยคาร์โบไฮเดรตจึงเรียกว่า น้ำตาลในเลือด (Blood sugar) เซลล์จำนวนมากใช้ไขมันและโปรตีนในการสร้างพลังงานได้ อย่างไรก็ตาม เมื่อเชื้อปรสิตใช้กลูโคสอย่างเร็วเท่านั้น ส่วนในสัตว์มักพบน้ำตาลกลูโคสมีอยู่ตลอดเวลา เนื่องจากเป็นสารที่จำเป็นต้องใช้ในการเปลี่ยนโมเลกุลของไขมันและโปรตีนเป็นคาร์โบไฮเดรต น้ำตาลฟรุกโตสเป็นน้ำตาลที่มีรสหวานกว่าน้ำตาลชนิดอื่น พบมากในน้ำผึ้ง โดยในน้ำผึ้งมีน้ำตาลฟรุกโตสเป็นองค์ประกอบถึง 40% นอกจากนี้ยังพบในเกสรดอกไม้ ผัก ผลไม้ กากน้ำตาล ที่มีรสหวาน เช่น มะม่วงสุก เป็นต้น น้ำตาลฟรุกโตสเป็นสารที่ให้ความหวานสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำตาลกลูโคสและน้ำตาลซูโครส ดังนั้นเมื่อต้องการบริโภคอาหารที่มีความหวานเท่ากันเราจึงบริโภคน้ำตาลฟรุกโตสเป็นปริมาณที่น้อยกว่าการบริโภคน้ำตาลกลูโคสหรือน้ำตาลซูโครส นอกจากนี้การที่น้ำตาลฟรุกโตสสามารถดูดซึมเข้าสู่เซลล์ต่างๆ ภายในร่างกายได้โดยไม่ต้องอาศัยฮอร์โมนอินซูลินเข้าช่วยทำให้ไม่เกิดปัญหาระดับน้ำตาลในเลือดสูงไป แม้ว่าการทำงานของฮอร์โมนอินซูลินจะบกพร่องก็ตาม นอกจากนี้ น้ำตาลฟรุกโตสยังมีการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม อาทิเช่น นำมาทำน้ำตาลไอซิ่งซึ่งเป็นน้ำตาลป่นละเอียด นิยมใช้ในการทำคุกกี้ ขนมเค้ก ในอุตสาหกรรมเครื่องดื่มจะเป็นเครื่องดื่มประเภทให้พลังงานเร็ว เป็นที่นิยมกันมากในกลุ่มนักกีฬา ด้วยเหตุนี้ น้ำตาลฟรุกโตสจึงเป็นที่นิยมใช้อย่างมากในอุตสาหกรรมอาหาร เครื่องดื่ม และยารักษาโรค ซึ่งมีแนวโน้มจะมีการนำมาใช้มากยิ่งขึ้นต่อไปในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสของซูโครสแบบวิวิธพันธุ์นั้นเป็นเรื่องที่มีมานานแล้ว ซึ่งข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเป็นเรื่องที่มีความสำคัญอย่างมากในการนำไปหาค่าสถานะที่เหมาะสมและปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการผลิตกลูโคสและฟรุกโตสจากซูโครส โดยในโครงการวิจัยนี้จะทำการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสของซูโครสแบบวิวิธพันธุ์โดยใช้ตัวเร่ง-ปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนประจุรูปกรด (Acid Ion exchange resins)

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสของซูโครสโดยใช้ตัวเร่ง-ปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนประจุรูปกรด
2. ศึกษาค่าทางจลนพลศาสตร์และการถ่ายเทมวลของการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสของซูโครสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนประจุรูปกรด

## 1.3 ขอบเขตของโครงการ

1. ศึกษาส่วนประกอบที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง เช่น กลไกการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสของซูโครส ตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนประจุรูปกรด เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุ
2. ทำการหาค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยา ผลที่เกิดจากการถ่ายเทมวลสาร อันดับปฏิกิริยาและพลังงานกระตุ้น โดยทำการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายซูโครส (15 – 45 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) อัตราการไหล (6.78 – 2.46 มิลลิลิตรต่อนาที) และ อุณหภูมิของการทำปฏิกิริยา (38 – 70 องศาเซลเซียส)

## 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาและค้นคว้าเกี่ยวกับข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับโครงการ
2. เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนประจุรูปกรดโดยทำการรีเจนเนอเรชัน
3. ประกอบอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งประกอบด้วย สายยาง ท่อซิลิโคน บั๊ม ตัวกรอง ประจุเริ่มต้น อ่างให้ความร้อน เทอร์โมคัปเปิล และเครื่องปฏิกรณ์ท่อสแตนเลส
4. ศึกษาและทดลองปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสของซูโครสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนประจุรูปกรด รวมถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อปฏิกิริยา
5. สรุปผลการทดลอง
6. จัดทำรายงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการนี้

1. มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการทดลองในโครงการนี้ เช่น การเตรียมสารละลาย การใช้เครื่องมือโครมาโทกราฟีของเหลวแบบสมรรถนะสูง การเตรียมเรซิน รวมถึงหลักการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆอีกด้วย
2. ทราบถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสของซูโครสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนประจุปรอท
3. ได้รับข้อมูลทางจลนศาสตร์เบื้องต้นเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการศึกษาไฮโดรลิซิสของซูโครสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนประจุปรอท
4. สามารถนำข้อมูลที่ได้ไปพัฒนาเพื่อใช้ในกระบวนการผลิตจริงได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

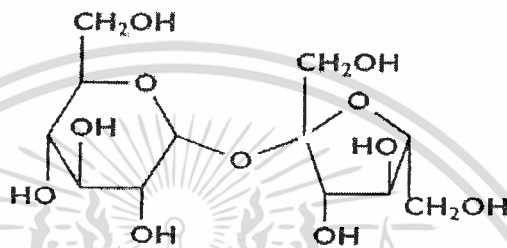
### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ทฤษฎี

##### 2.1.1 น้ำตาลซูโครส [1,2,3]

น้ำตาลซูโครส ( $\beta-D-fructofuranosyl-\alpha-D-glucopyranoside$ ) หรือที่รู้จักกันดีในชื่อ น้ำตาลทราย มีสูตรโมเลกุลเป็น  $C_{12}H_{22}O_{11}$

โครงสร้างทางเคมีของซูโครส คือ



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของน้ำตาลซูโครส

ในทางอุตสาหกรรมน้ำตาลทรายได้มาจาก 2 แหล่งใหญ่ๆ คือ หัวบีตและอ้อย ในสมัยแรกซูโครสจะถูกสกัดออกมาโดยตัดอ้อยออกเป็นชิ้นๆ แล้วสกัดด้วยน้ำร้อน จากนั้นนำสารละลายที่ได้มาทำให้ใสด้วยปูนขาว แล้วนำไปประเหยให้เข้มข้นแล้วตกตะกอนจะได้น้ำตาลทราย น้ำตาลซูโครสเป็นน้ำตาลโมเลกุลคู่ (Disaccharide) ของกลูโคสและฟรุกโตสที่เชื่อมกันด้วยพันธะอัลฟา-เบต้าไกลโคซิดิก ( $\alpha, \beta-glycosidicbond$ ) โดยฟรุกโตสเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว มีสูตรโมเลกุล  $C_6H_{12}O_6$  ซึ่งเป็นไอโซเมอร์กับกลูโคส

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
ค่าความร้อนของการละลาย (kJ/mol)	$4.75 \pm 0.26$
ความหนาแน่นแบบบิลค์ (Bulk density) ( $kg/m^3$ )	
แบบผลึก	930
แบบผง	600

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ 600 ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหวานของน้ำตาลซูโครสเป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่สุด โดยจะใช้เป็นตัวมาตรฐานในการวัดความหวานของสารให้ความหวานอื่นๆ ด้วย โดยความหวานนี้จะขึ้นกับอุณหภูมิ ค่า pH ความเข้มข้นของสารละลายซูโครส และอื่นๆ

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบค่าความหวานของสารละลายซูโครส กลูโคสและฟรุกโตส [2]

สารให้ความหวาน	ค่าความหวานสัมพัทธ์ (Relative sweetness)
ซูโครส	1.00
ฟรุกโตส	1.2 – 1.8
กลูโคส	0.60

### ประโยชน์ของการใช้ซูโครส

**การประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร** ซูโครสโดยส่วนใหญ่จะใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร โดยจะใช้เพิ่มความหวาน ซึ่งซูโครสจะป้องกันการสูญเสีย กลิ่น และรสชาติของอาหาร ไปกับระบบการผลิต

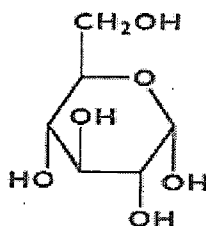
**การประยุกต์ใช้สังเคราะห์สารเคมี** ในส่วนนี้จะเป็นการใช้ซูโครสน้อยกว่า 0.5 เปอร์เซ็นต์ของซูโครสทั้งหมด โดยจะใช้ผลิตพวกเอสเทอร์ ซึ่งเป็นเอสเทอร์แบบที่ไม่มีพิษ และจุลินทรีย์สามารถย่อยสลายได้ (Biodegradable) ซูโครสโมโนเอสเทอร์ จะใช้ทำเป็นสารลดแรงตึงผิว สารซักล้าง และอีมีลซิฟลายเออร์

**การประยุกต์ใช้ในการหมัก** ซูโครสในรูปของกากน้ำตาลจะใช้ผลิตสารประกอบอินทรีย์ต่างๆ เช่น กรดแลคติก กรดกลูตามิก กรดซิตริก กลิเซอรอล และแอนติไบโอติก

**การประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมยา** ซูโครสจะใช้ผสมในยาเพื่อปกปิดรสชาติที่ไม่พึงประสงค์

#### 2.1.2 น้ำตาลกลูโคส [1,2,3]

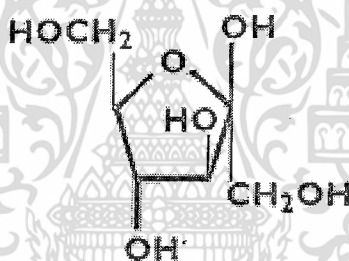
กลูโคสเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวเช่นกันกับฟรุกโตส แต่มีความหวานน้อยกว่าซูโครสและฟรุกโตส กลูโคสเป็นน้ำตาลที่ให้พลังงานได้รวดเร็ว เนื่องจากกลูโคสสามารถผ่านเข้าไปในกระแสโลหิตได้โดยตรง ในขณะที่ฟรุกโตสจะถูกดูดซึมที่ตับแล้วจึงเปลี่ยนเป็นกลูโคสก่อนผ่านเข้าสู่กระแสโลหิต กลูโคสถูกใช้ประโยชน์ทั้งในทางการแพทย์และอุตสาหกรรมอาหาร เช่น ใช้ในการเพิ่มระดับน้ำตาลของผู้ป่วย ใช้ในการหมักแอลกอฮอล์ และเติมแต่งในอาหารต่างๆ เป็นต้น



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของน้ำตาลกลูโคส

### 2.1.3 น้ำตาลฟรุกโตส [1,2,3]

ฟรุกโตส หรือน้ำตาลผลไม้ พบมากในผลไม้และน้ำผึ้ง เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว เป็นไอโซเมอร์กับกลูโคส ละลายน้ำได้ดี โมเลกุลของฟรุกโตสมีความว่องไวสูงเมื่ออุณหภูมิสูง ฟรุกโตสสามารถเกิดการพอลิเมอไรซ์เป็นไดแอนไฮไดรด์ (Dianhydrides) ได้ นอกจากนี้ยังจะเกิดปฏิกิริยารวดเร็วกับเอมีนและโปรตีนด้วย ฟรุกโตสสามารถนำไปใช้เป็นสารให้ความหวานในอาหารควบคุมน้ำหนักเนื่องจากมีแคลอรีต่ำ และฟรุกโตสมักใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร เนื่องจากมีความหวานมากกว่าน้ำตาลชนิดอื่น เช่น อุตสาหกรรมเครื่องดื่ม ขนมหวาน ช็อคโกแลต เป็นต้น



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของน้ำตาลฟรุกโตส

### 2.1.4 การแยกฟรุกโตสเบื้องต้น [4]

การแยกสารองค์ประกอบที่ต้องการนำไปใช้งาน สามารถทำได้โดยการใช้เครื่องแยกสารผสม โดยอาศัยความแตกต่างของความสามารถในการดูดซับขององค์ประกอบ เครื่องแยกสารผสมนั้นสามารถจำแนกตามลักษณะการทำงานได้เป็น เครื่องแยกสารผสมแบบกะ เครื่องแยกสารผสมแบบกึ่งต่อเนื่องและเครื่องแยกสารผสมแบบต่อเนื่อง

เครื่องแยกสารผสมแบบกะ สามารถแยกองค์ประกอบของสารผสมออกจากกัน โดยการนำตัวดูดซับ ไปใส่ในถังบรรจุสารผสม จากนั้นทำการกวนให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างสารที่ต้องการแยกกับตัวดูดซับ เครื่องแยกสารผสมแบบกะนี้ไม่ค่อยเป็นที่นิยมในวงการอุตสาหกรรม เนื่องจากให้ประสิทธิภาพการแยกต่ำ รวมถึงต้องเสียเวลาในการหยุดเครื่องเพื่อเก็บผลิตภัณฑ์และใส่สารป้อนชุดใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องแยกสารผสมแบบกึ่งต่อเนื่อง สามารถแยกองค์ประกอบของสารผสมได้โดยการป้อนสารผสมที่ต้องการแยกอย่างต่อเนื่องผ่านเข้าสู่ถังที่ภายในบรรจุด้วยตัวดูดซับ เครื่องแยกสารผสมแบบกึ่งต่อเนื่องให้ประสิทธิภาพในการแยกที่ดี แต่มักประสบปัญหาด้านการสัมผัสกันไม่ทั่วถึงระหว่างสารผสมที่ต้องการแยกองค์ประกอบกับตัวดูดซับ ทำให้ตัวดูดซับบางส่วนไม่ได้ถูกใช้งาน

เครื่องแยกสารผสมแบบต่อเนื่อง อาศัยหลักการไหลสวนทางกันอย่างต่อเนื่องระหว่างสารผสมที่ต้องการแยกองค์ประกอบกับตัวดูดซับ ทำให้การแยกสารผสมด้วยเครื่องแยกสารผสมแบบต่อเนื่องมีประสิทธิภาพดีกว่าแบบอื่นๆ จึงเป็นที่นิยมใช้อย่างมากในอุตสาหกรรม

การแยกกลูโคสและฟรุกโตสนั้นมักนิยมใช้ตัวดูดซับเป็นเรซิน โพลีสไตรีน ไดไวนิลเบนซีนในรูปแบบแคลเซียม

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของตัวดูดซับ โพลีสไตรีน ไดไวนิลเบนซีนในรูปแบบแคลเซียม

สถานะทางกายภาพ	ลูกปัด
สี	สีอำพัน
ค่าพีเอช	5.0 – 9.0
จุดเดือด	100 องศาเซลเซียส
ความดันไอ	22 hPa ที่ 20 องศาเซลเซียส
ความหนาแน่นไอ	< 1.0
ความสามารถในการละลายน้ำ	ไม่ละลายน้ำ
ความถ่วงจำเพาะ	1.10 - 1.40

#### ลักษณะสำคัญของเรซินที่มีผลต่อคุณภาพของการแยกของผสม

คุณสมบัติทางกายภาพหลักของตัวกลางในการแยก คือ ขนาดของอนุภาค การกระจายตัวของรูพรุน และความสามารถในการทนต่อความดันสูง โดยทั่วไปแล้วเรซินที่มีรูปร่างเป็นทรงกลมและมีอนุภาคขนาดเล็กจะทำให้การแยกของผสมมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

ขนาดของอนุภาคและการกระจายตัวของอนุภาคเป็นตัวหลักที่น่าสนใจเกี่ยวกับการแยกของผสม ยิ่งอนุภาคเป็นทรงกลมขนาดเล็ก และยังมีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง ยิ่งทำให้การแยกของผสมมีประสิทธิภาพมากขึ้นและขนาดของอนุภาคและการกระจายตัวของอนุภาคจะเป็นตัวกำหนดแรงดันอัดของระบบ ยิ่งอนุภาคมีขนาดเล็ก ยิ่งจะทำให้เกิดค่าแรงดันอัดมากขึ้น และทำให้มีค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานมากขึ้น โดยทั่วไปขนาดอนุภาคที่เหมาะสมมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.2 – 0.4 มิลลิเมตร

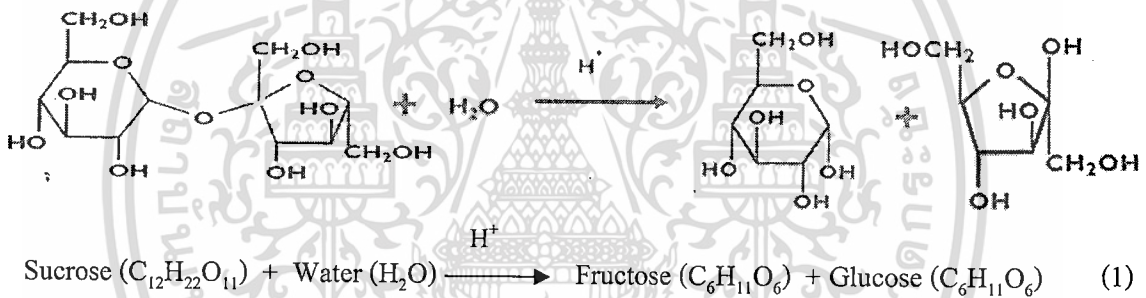
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### เรซินรูปแคลเซียม ทำให้เกิดการแยกสองรูปแบบในเวลาเดียวกัน ดังนี้

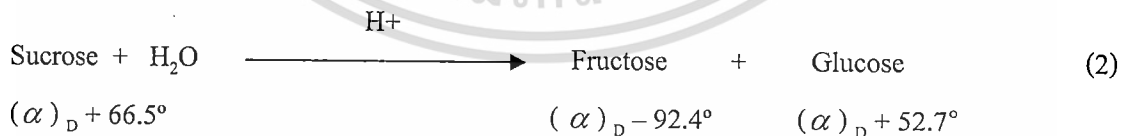
1. เรซินทำหน้าที่เป็นตัวคัดขนาดโมเลกุล (molecular sieve) ถ้าโมเลกุลของของผสมที่ต้องการแยกมีขนาดใหญ่จะไม่สามารถผ่านเข้าไปในโมเลกุลของเรซินได้ ดังนั้นโมเลกุลของของผสมน่าจะผ่านเข้าไปในโมเลกุลของเรซินได้มากหรือน้อยขึ้นกับขนาดโมเลกุลของของผสมนั้น
2. เรซินจะทำการแยกน้ำตาลโดยขึ้นกับความแตกต่างของส่วนผสมน้ำตาล ซึ่งจะมีเฉพาะฟรุกโตสกับกาแลคโตสเท่านั้นที่รวมตัวกับเรซิน ส่วนน้ำตาลกลูโคสและน้ำตาลซูโครสจะไม่มีการรวมตัวกับเรซินจึงหลุดผ่านไป

#### 2.1.5 ปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสของซูโครส [1,2,3]

เมื่อเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวของโมเลกุลซูโครสด้วยน้ำแล้ว ทำให้เกิดเป็นโมเลกุลของกลูโคสและฟรุกโตสในจำนวนที่เท่ากัน ซึ่งเกิดได้เมื่อมีกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยที่ซูโครสมีมวลโมเลกุลเท่ากับ 342 ส่วนกลูโคสและฟรุกโตสมีมวลโมเลกุล 180 เท่ากัน



ในปฏิกิริยาการแตกตัวนี้ปรากฏการณ์ที่สำคัญ คือ การเปลี่ยนแปลงของการเบี่ยงเบนแสง ซึ่งจะมีการหมุนระนาบแสงไปทางบวก กลูโคสมีการหมุนระนาบแสงไปทางบวก และ ฟรุกโตสมีการหมุนระนาบแสงไปทางลบ

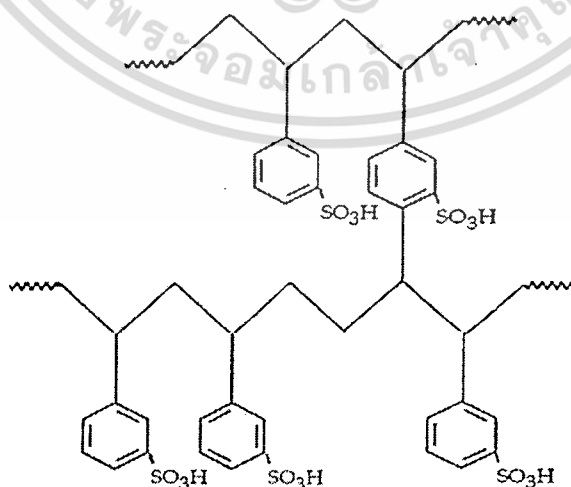


### 2.1.6 ตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนประจุรูปกรด

ตัวเร่งปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนประจุรูปกรดที่ใช้ในการทดลองนี้มีชื่อทางการค้า คือ Lewatit S100 โดยบริษัท ไบเออร์ (เยอรมัน) จำกัด ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนประจุรูปกรด

รูปประจุ	Na <sup>+</sup>
หมู่ฟังก์ชัน	กรดซัลโฟนิก
เมตริก	โพลีสไตรีน ครอสลิงค์
โครงสร้าง	เจล
<b>คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี</b>	
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (เส้นผ่านศูนย์กลาง)	0.58 mm (+/- 0.05)
ความหนาแน่น	1.28 g/ml
ปริมาณความชื้น	42 – 48 %wt
ค่าความจุทั้งหมด	2.0 eq/l
อายุการใช้งานสูงสุด	24 เดือน
อุณหภูมิในการเก็บ	-10 - 40 องศาเซลเซียส
ช่วงอุณหภูมิในการใช้งานสูงสุด	120 องศาเซลเซียส
ช่วงค่าพีเอชที่ใช้งาน	0 – 14
การเปลี่ยนแปลงปริมาตร (Na <sup>+</sup> ไปเป็น H <sup>+</sup> )	+8%



รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของ Lewatit S100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ปัจจัยที่มีผลต่อความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยา [2]

### 1. ปริมาณครอสลิงค์

สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเจล (Gellular resins) อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะลดลงเมื่อปริมาณครอสลิงค์ (Crosslink) เพิ่มขึ้น

สำหรับเรซินที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ (Macroporous resins, MR) ปริมาณครอสลิงค์จะมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเพียงเล็กน้อย ที่ปริมาณครอสลิงค์เท่าๆกัน เรซินที่มีรูพรุนขนาดใหญ่จะให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เร็วกว่าแบบเจล

### 2. ความเป็นกรด

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเป็นกรดต่ำกว่าจะให้ค่าการเปลี่ยนแปลงที่น้อยกว่านั่นคือความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาแปรผันตามความเป็นกรด

## ปฏิกิริยาเชิงเร่งแบบวิวิธพันธุ์ [5]

กลไกการเกิดปฏิกิริยาในการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาประจูปกติมีด้วยกัน 7 ขั้นตอนดังนี้

สมมติเกิดปฏิกิริยา  $A \rightarrow B$

1. การแพร่ของสารตั้งต้น (A) จากของไหลภายนอกไปยังผิวสัมผัสระหว่างของไหลและตัวเร่งปฏิกิริยา (พื้นผิวด้านนอกของอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยา)
2. การแพร่ภายใน (Intraparticle diffusion) ของสารตั้งต้นเข้าสู่รูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา
3. การดูดซับของสารตั้งต้น A ที่ตำแหน่งว่องไวภายในของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา
4. การเกิดปฏิกิริยาเคมีเปลี่ยนสารตั้งต้นที่ถูกดูดซับให้กลายเป็นผลิตภัณฑ์ ซึ่งยังคงถูกดูดซับอยู่บนตำแหน่งว่องไว
5. การคายของผลิตภัณฑ์ที่ออกจากตำแหน่งว่องไว
6. การแพร่ของผลิตภัณฑ์ภายในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาออกสู่พื้นผิวด้านนอกของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา
7. การแพร่ของผลิตภัณฑ์จากพื้นผิวสัมผัสระหว่างของไหลกับตัวเร่งปฏิกิริยาไปยังกระแสการไหล

อัตราเร็วของปฏิกิริยาโดยรวม (Overall rate) จะถูกกำหนดโดยขั้นตอนที่ช้าที่สุด ถ้าขั้นตอนในการแพร่ (ขั้นที่ 1, 2, 6 และ 7) เกิดขึ้นเร็วมากเมื่อเปรียบเทียบกับขั้นตอนในการทำปฏิกิริยา (ขั้นตอนที่ 3, 4 และ 5) ขั้นตอนในการแพร่จะถือว่าไม่มีผลต่ออัตราเร็วของปฏิกิริยาโดยรวม ในทางตรงกันข้าม ถ้าขั้นตอนในการแพร่มีผลต่ออัตราเร็วของปฏิกิริยาโดยรวม การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของของไหลจะทำให้อัตราเร็วของปฏิกิริยาโดยรวมเปลี่ยนไป

### 2.1.7 เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุ [6,7]

ในการศึกษานี้ จะสมมติให้เป็นการไหลของของไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุ (Packed bed reactor) โดยลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้มีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอก มีการป้อนสารตั้งต้นเข้าและดึงผลิตภัณฑ์ออกพร้อมกันอย่างต่อเนื่องในขณะที่ปฏิกิริยาดำเนินอยู่ โดยตามแบบจำลองการไหลแบบนี้ จะมีค่าความเข้มข้นของสารในเครื่องปฏิกรณ์จะมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับตำแหน่งในแนวรัศมีของท่อแต่จะเปลี่ยนแปลงตามความยาวของเครื่องปฏิกรณ์ มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็งเพื่อเร่งปฏิกิริยาในสถานะของเหลว โดยปฏิกิริยาเคมีจะเกิดขึ้นได้เฉพาะบริเวณที่ตัวเร่งปฏิกิริยาสัมผัสกับของเหลวเท่านั้น และการไหลที่แต่ละระนาบของของไหลมีความเร็วเท่ากัน ในการออกแบบสมการสำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุ จะต้องทำการดุลโมลก่อน

ทำการดุล โมลของสาร A

$$\left[ \begin{array}{c} \text{อัตราการไหล} \\ \text{เข้าของสาร A} \end{array} \right] - \left[ \begin{array}{c} \text{อัตราการไหล} \\ \text{ออกของสาร A} \end{array} \right] + \left[ \begin{array}{c} \text{อัตราการเกิดหรือ} \\ \text{สลายของสาร A} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{c} \text{อัตราการสะสม} \\ \text{ของสาร A ในระบบ} \end{array} \right]$$

$$F_{A0} - F_A + G_A = \frac{dN_A}{dt} \quad (3)$$

เมื่อ  $F_{A0}$  คือ อัตราไหลเริ่มต้นของสาร A

$F_A$  คือ อัตราการไหลของสาร A ที่เวลาใดๆ

$G_A$  คือ อัตราการเกิดสาร A จากปฏิกิริยาเคมี (Rate of generation)

$N_A$  คือ จำนวนโมลของสาร A

$t$  คือ เวลา

เนื่องจากปฏิกิริยาที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นของแข็งเรามักนิยามอัตราการเกิดปฏิกิริยาเทียบกับมวลของตัวเร่งปฏิกิริยาแทนการเทียบจากปริมาตรที่ทำปฏิกิริยา ดังนั้นอัตราการเกิดของสาร A จากปฏิกิริยาเคมี คือ

$$G_A = r_A W \quad (4)$$

เมื่อ  $W$  คือ น้ำหนักรวมของตัวเร่งปฏิกิริยา

$r_A$  คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาของสาร A เทียบมวลตัวเร่งปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการเกิดของสาร A เป็นค่าที่เปลี่ยนแปลงตามน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาในแต่ละตำแหน่งภายในเครื่องปฏิกรณ์ ดังนั้นอัตราการเกิดของ A รวม จึงเท่ากับผลรวมของอัตราการเกิดย่อยแต่ละตำแหน่ง

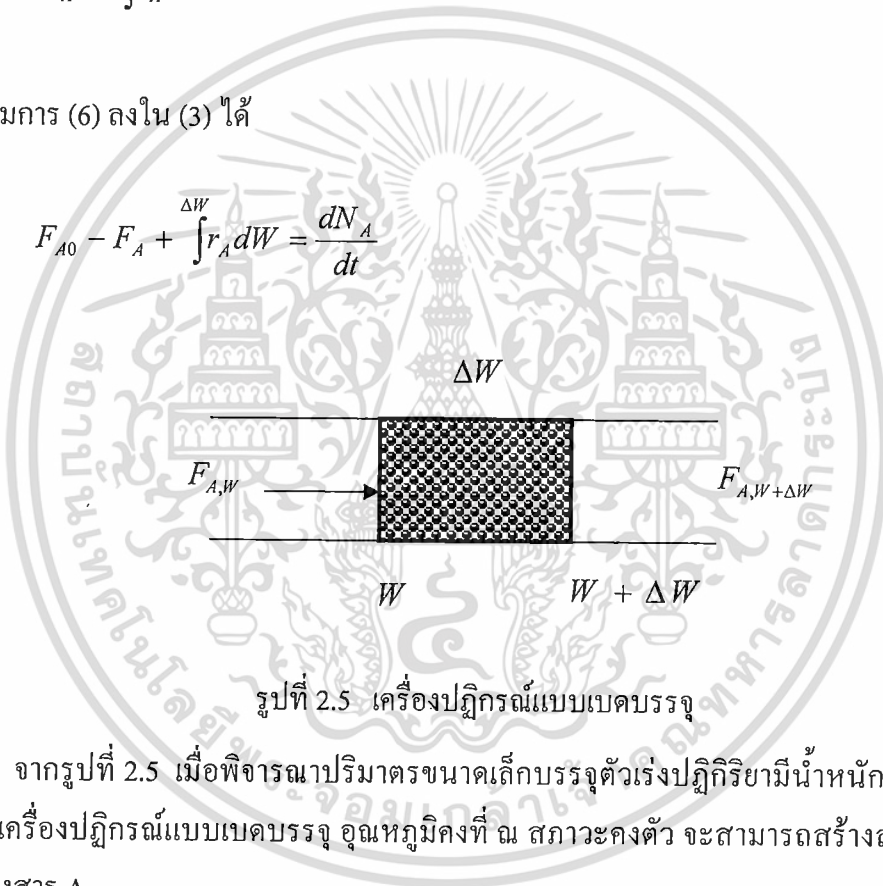
$$\sum_{i=1}^M \Delta G_{Ai} = \sum_{i=1}^M r_A \Delta W_i \quad (5)$$

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

$$G_A = \int r_A dW \quad (6)$$

แทนสมการ (6) ลงใน (3) ได้

$$F_{A0} - F_A + \int r_A dW = \frac{dN_A}{dt} \quad (7)$$



รูปที่ 2.5 เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุ

จากรูปที่ 2.5 เมื่อพิจารณาปริมาตรขนาดเล็กบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยามีน้ำหนักเท่ากับ  $\Delta W$  ภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุ อุณหภูมิคงที่ ณ สภาวะคงตัว จะสามารถสร้างสมการสมดุลมวลของสาร A

$$\int r_A dW = r_A \Delta W \quad (8)$$

ที่สภาวะคงตัว (Steady state)

$$\frac{dN_A}{dt} = 0 \quad (9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนสมการ (8) และ (9) ลงในสมการ (7) ได้

$$F_{A,W} - F_{A,W+\Delta W} + r_A \Delta W = 0 \quad (10)$$

โดยนำหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา  $\Delta W$  มีความสัมพันธ์กับพื้นที่หน้าตัด ( $A$ ) และความยาว ( $y$ ) คือ

$$\Delta W = \Delta V \rho = A \Delta y \rho \quad (11)$$

เมื่อ  $V$  คือ ปริมาตรของตัวเร่งปฏิกิริยา

$\rho$  คือ ความหนาแน่นของตัวเร่งปฏิกิริยา

แทนสมการ (11) ลงใน (10) และให้  $\Delta y \rightarrow 0$  ได้

$$\frac{dF_A}{dy} = A \rho r_A \quad (12)$$

เมื่อให้ความหนาแน่นของตัวเร่งปฏิกิริยาคงที่จะได้

$$\rho r_A = r'_A \quad (13)$$

เมื่อ  $r'_A$  คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาของสาร A เทียบปริมาตรตัวเร่งปฏิกิริยา

เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดของเครื่องปฏิกรณ์เป็นค่าคงที่ ดังนั้น  $dV = A dy$  จึงได้ว่า

$$\frac{dF_A}{dV} = r'_A \quad (14)$$

เนื่องจาก

$$\left[ \begin{array}{c} \text{อัตราการไหลโดยโมลสาร A} \\ \text{ที่ออกจากระบบ} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{c} \text{อัตราการไหลโดยโมล} \\ \text{สารที่เข้าระบบ} \end{array} \right] - \left[ \begin{array}{c} \text{อัตราการใช้สาร A} \\ \text{ในระบบ} \end{array} \right]$$

$$F_A = F_{A0} - F_{A0} X \quad (15)$$

เมื่อ  $X$  คือ ค่าการแปลงผันทางเคมีของสารตั้งต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์ (Conversion)

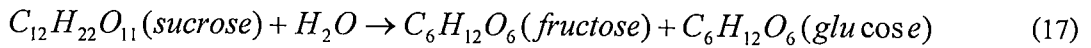
แทนสมการ (15) ลงใน (14) ได้

$$F_{A0} \frac{dX}{dV} = -r'_A \quad (16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### การหาอันดับปฏิกิริยา [6,7]

จากปฏิกิริยา



โดยปฏิกิริยานี้จะมีสมมติฐานให้เป็นปฏิกิริยาแบบผันกลับไม่ได้ โดยปฏิกิริยาจะดำเนินไปในทิศทางเดียวจนกระทั่งสารตั้งต้นตัวใดตัวหนึ่งหมดไปจากระบบ จะมีสมการกฎอัตรา

$$-r_A = k C_A^n \quad (18)$$

เมื่อ  $r_A$  คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาของสาร A

$k$  คือ ค่าคงที่อัตรา

$C_A$  คือ ความเข้มข้นของสาร A

$n$  คือ อันดับปฏิกิริยา

เนื่องจากความเข้มข้นของน้ำมีค่ามากกว่าความเข้มข้นของซูโครสมาก ๆ อัตราการเกิดปฏิกิริยาจึงขึ้นกับความเข้มข้นของซูโครสเท่านั้น

ในการหาอันดับปฏิกิริยาจะเริ่มต้นด้วยการสมมติให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาอันดับต่างๆ กัน แล้วจึงพิจารณาว่าผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับสมมติฐานใด

- ปฏิกิริยาอันดับศูนย์

มีสมการกฎอัตรา

$$-r_A = k \quad (19)$$

จากสมการ (16) แทนใน (19) ได้

$$F_{A0} \frac{dX}{dV} = k \quad (20)$$

ย้ายข้างแล้วอินทิเกรตได้

$$X = \frac{k}{F_{A0}} V \quad (21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาโดยโมลมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นและค่าอัตราไหลโดยปริมาตร ดังสมการ

$$F_{A0} = C_{A0} v_0 \quad (22)$$

เมื่อ  $C_{A0}$  คือ ความเข้มข้นสาร A เริ่มต้น  
 $v_0$  คือ อัตราการไหลโดยปริมาตร

แทนสมการ (22) ลงใน (21) ได้

$$X = \frac{k}{C_{A0}} \left( \frac{V}{v_0} \right) \quad (23)$$

ค่าสเปซไทม์มีความสัมพันธ์กับปริมาตรและอัตราไหลของปริมาตร ดังสมการ

$$\tau = \frac{V}{v_0} \quad (24)$$

แทนสมการ (24) ลงใน (23) จะได้

$$X = \frac{k}{C_{A0}} \tau \quad (25)$$

ดังนั้นเมื่อพลอตกราฟระหว่าง  $X$  และ  $\tau$  จะมีความชันเท่ากับ  $\frac{k}{C_{A0}}$

- ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

$$-r_A = kC_A \quad (26)$$

สารละลายซูโครสมีสถานะเป็นของเหลว อุณหภูมิและความดันในเครื่องปฏิกรณ์คงที่ ดังนั้น

$$C_A = C_{A0}(1 - X) \quad (27)$$

แทนสมการ (26) และ (27) ลงใน (16) ได้

$$F_{A0} \frac{dX}{dV} = kC_{A0}(1 - X) \quad (28)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนสมการ (22) ลงใน (28) และอินทิเกรตจะได้

$$\int_0^X \frac{dX}{1-X} = \frac{k}{v_0} \int_0^V dV \quad (29)$$

$$\ln \frac{1}{1-X} = \frac{k}{v_0} V \quad (30)$$

เมื่อพลอตกราฟระหว่าง  $\ln \frac{1}{1-X}$  กับ  $\tau$  โดยเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการไหลของปริมาตรเริ่มต้น จะได้ความชันเท่ากับ  $k$

- ปฏิกริยาอันดับสอง

$$-r_A = kC_A^2 \quad (31)$$

จากสมการ (27) แทนลงใน (31) ได้

$$-r_A = kC_{A0}^2 (1-X)^2 \quad (32)$$

แทนสมการ (32) ลงใน (16) ได้

$$F_{A0} \frac{dX}{dV} = kC_{A0}^2 (1-X)^2 \quad (33)$$

อินทิเกรต

$$\int_0^X \frac{dX}{(1-X)^2} = \frac{kC_{A0}}{v_0} \int_0^V dV \quad (34)$$

$$\frac{1}{1-X} = kC_{A0} \frac{V}{v_0} \quad (35)$$

เมื่อพลอตกราฟระหว่าง  $\frac{1}{1-X}$  กับ  $\tau$  โดยเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการไหลของปริมาตรเริ่มต้น จะได้ความชันเท่ากับ  $kC_{A0}$

การหาพลังงานกระตุ้น [6,7]

จะใช้ค่าคงที่อัตรา (Reaction rate constant, k) ซึ่งเป็นค่าคงที่ไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของสารต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในการเกิดปฏิกิริยาเคมี แต่จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นตามความสัมพันธ์ของ Arrhenius ดังสมการ

$$k_A = Ae^{-E/RT} \tag{36}$$

เมื่อพิจารณาจากทางทฤษฎีจลนพลศาสตร์ของแก๊สจะพบว่า  $e^{-E/RT}$  คือ สัดส่วนจำนวนครั้งการชนกันระหว่างโมเลกุลที่มีระดับพลังงานสูงกว่าหรือเท่ากับพลังงานกระตุ้น โดยเมื่อพิจารณาอย่างละเอียด อาจพบว่า ค่าคงที่อัตราอาจขึ้นกับชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เลือกใช้ ความดันรวมของระบบ และชนิดของตัวทำละลาย แต่เนื่องจากค่าอิทธิพลของตัวแปรอื่นที่มีต่อค่าคงที่อัตรา นั้นน้อยมาก เมื่อเทียบกับอิทธิพลจากอุณหภูมิ ดังนั้นจึงใช้สมการที่ (36) ในการคำนวณ

- เมื่อ  $E$  คือ ค่าพลังงานกระตุ้นหรือพลังงานขั้นต่ำซึ่ง โมเลกุลของสารตั้งต้นจะต้องมี เพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้
- $A$  คือ ค่าพรีเอ็กซ์โพเนนเชียลของสมการอาร์เรเนียส
- $k_A$  คือ ค่าคงที่อัตราที่คิดเทียบสาร A
- $T$  คือ อุณหภูมิ
- $R$  คือ ค่าคงที่แก๊ส

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

George Bordamer และ Robert Kunin [8] ได้ทำการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสของซูโครสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนประจุรูปกรด (Heterogeneous system) ที่มีหมู่ซัลโฟนิค และมีหมู่คาร์บอกซิลิกเป็นองค์ประกอบ โดยกำหนดตัวแปรที่สนใจ คือ ขนาดอนุภาคและความพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 25, 50, 75 และ 100 องศาเซลเซียส โดยนำไปทำปฏิกิริยาแบบกะ ซึ่งจากการศึกษาพบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีหมู่ซัลโฟนิคเป็นองค์ประกอบมีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาสูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีหมู่คาร์บอกซิลิกเป็นองค์ประกอบ และอัตราการเกิดปฏิกิริยาของเรซินทั้งสองตัวจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาเล็กลง และเพิ่มขึ้นเมื่อมีความพรุนของอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาสูง และได้สรุปว่าอัตราการแพร่ภายในอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยามีความสำคัญในการเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนน้ำตาลซูโครส โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนประจุรูปกรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานวิจัยของ Reed และ Dranoff [9] ได้ศึกษาการหาค่าทางจลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสของซูโครสแบบต่อเนื่องในเบดนิ่งของตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนประจุรูปกรด โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว โดยมีตัวแปรที่สนใจ คือ อัตราไหลของสารละลายและขนาดอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยสนใจในช่วงค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์เท่ากับ 0.0014 – 4.8 อุณหภูมิของปฏิกิริยาอยู่ในช่วง 50 – 75 องศาเซลเซียส โดยพบว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนั้นเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง และมีค่าพลังงานกระตุ้น 15,950 แคลลอรี่ต่อกรัม โมล และยังพบว่า การแพร่ภายในมีผลอย่างมากต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา และไม่มีผลกระทบจากการแพร่ภายนอกในช่วงค่าที่ทำให้การทดลอง

Lifshutz และ Dranoff [10] ได้ศึกษาการหาค่าทางจลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสของซูโครสแบบต่อเนื่องในตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนประจุรูปกรดที่เป็นเบดนิ่ง โดยเมื่อใช้ความเข้มข้นสารละลายซูโครส 45 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิมีค่าเข้าใกล้ 60 องศาเซลเซียส พบว่าจะทำให้มีความเบี่ยงเบนไปจากปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง อาจเนื่องจากมีปฏิกิริยาการดีเกรด (Degradation reaction) เกิดขึ้น เช่น การเกิดตะกอนบนตัวเร่งปฏิกิริยา หรือเกิดจากการเพิ่มความเข้มข้นและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา และไม่สามารถยืนยันได้ว่าพบช่วงที่จำกัดด้วยการเกิดขึ้นฟิล์มของการถ่ายเทมวลหรือการแพร่ภายนอก (Film mass transfer limitations) ในความเข้มข้นสารละลายที่สูง

S.H.Khan และ K. Rahman [11] ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสารละลายซูโครสในเบดบรรจุของเรซินแลกเปลี่ยนประจุรูปกรด โดยหาค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยา อัตราการแพร่ (Effective Diffusivity) และสัมประสิทธิ์การกระจายตัวของความเข้มข้นไปยังอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยา (Distribution coefficients) ที่ความเข้มข้นของสารละลายซูโครส 20 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ได้ผลการทดลองดังนี้ เช่น ที่ความเข้มข้นสารละลายซูโครส 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ได้ค่าคงที่ปฏิกิริยาจำเพาะ (Specific rate constant) 0.0115 ถึง 0.7391 ต่อนาที ในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 70 องศาเซลเซียส มีค่าพลังงานกระตุ้น 24.93 กิโลแคลลอรี่ต่อโมล มีค่าพรีเอ็กซ์-โพรเนนเชียลของสมการอาร์เรเนียสเท่ากับ  $7.657 \times 10^{15}$  ต่อนาที มีค่าอัตราการแพร่อยู่ในช่วง  $3.826 \times 10^{-8}$  ถึง  $18.951 \times 10^{-8}$  ตารางเซนติเมตรต่อวินาที สัมประสิทธิ์การกระจายตัวของความเข้มข้นไปยังอนุภาคตัวเร่งมีความคล้ายคลึงกัน และพบว่าชั้นฟิล์มที่ด้านการถ่ายเทมวลจะเกิดที่อัตราการไหลต่ำและความเข้มข้นสารละลายสูง

## บทที่ 3

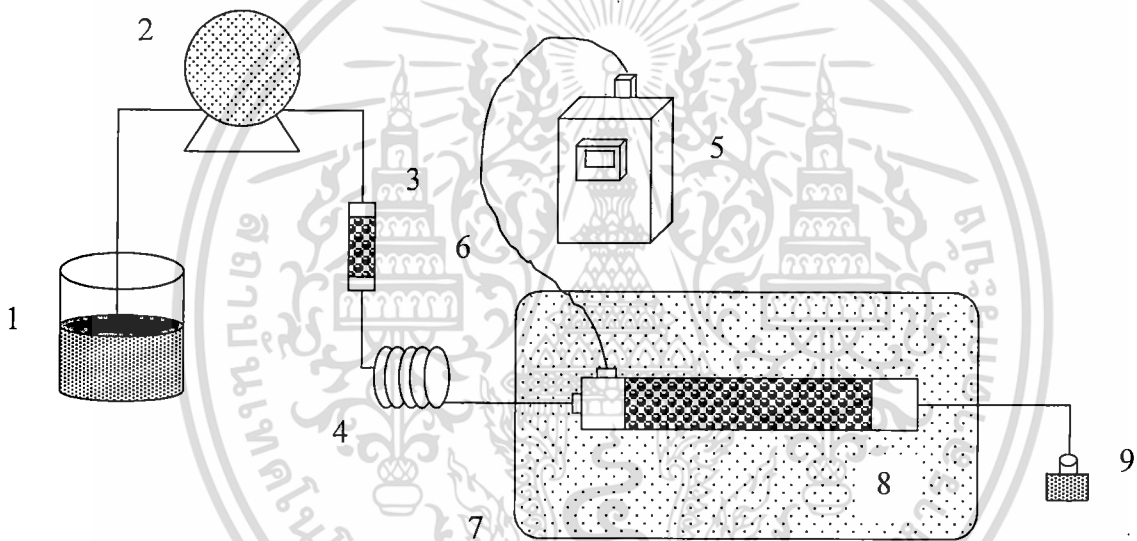
### การทดลอง

#### 3.1 สารเคมีที่ใช้

1. น้ำตาลซูโครส
2. น้ำกลั่น

#### 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ชุดทดลองเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุมีองค์ประกอบหลักดังแสดงในรูปที่ 3.1 และประกอบไปด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้



รูปที่ 3.1 ชุดทดลองเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุ

1. บีกเกอร์เก็บสารตั้งต้น
2. บั้วบ่อนสารตั้งต้น
3. เบดคักจับอ้อนอิสระที่ปนอยู่ในสารตั้งต้น ทำจากสายยางซิลิโคนภายในบรรจุเรซินแลกเปลี่ยนประจุ
4. อุปกรณ์ให้ความร้อนสารตั้งต้น (Preheater) ก่อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ ทำจากขดลวดทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1/8 นิ้ว ความยาว 3 เมตร
5. เครื่องแสดงผลอุณหภูมิ
6. เทอร์โมคัปเปิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. อ่างน้ำร้อนซึ่งมีชุดควบคุมอุณหภูมิแบบ PID ใช้ในการควบคุมอุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์และอุปกรณ์สารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยา
8. เครื่องปฏิกรณ์ทำจากสแตนเลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ  $\frac{1}{2}$  นิ้ว
9. ขวดเก็บสารผลิตภัณฑ์ เป็นขวดแก้ว

### 3.3 วิธีกรทดลอง

3.2.1 การเตรียมเรซินก่อนการทดลองจะต้องนำเรซินไปทำการรีเจนเนอเรต (Regenerate) ก่อนเพื่อเป็นการเติมประจุ  $H^+$  หรือขจัดไอออนที่ไม่ต้องการในตัวเรซินออกก่อน

1. เตรียมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 6 – 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ปริมาณ 1000 มิลลิลิตร
2. ทำการบรรจุเรซินลงในคอลัมน์
3. ทำการผ่านน้ำกลั่นลงไป เพื่อให้การจัดเรียงตัวของเรซินในคอลัมน์ดีขึ้น
4. นำสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่เตรียมมาในขั้นตอนข้างต้นไปผ่านลงในคอลัมน์บรรจุเรซิน
5. ทำการผ่านน้ำกลั่นลงในคอลัมน์บรรจุเรซินอีกครั้งจนพีเอช (pH) เข้าใกล้ 7
6. ทำการเก็บรักษาโดยการแช่เรซินในน้ำกลั่น และตรวจดูไม่ให้เรซินแห้ง เพื่อรอการนำไปใช้ต่อไป

3.2.2 การทำการทดลองหาความเป็นไปได้ของสารผลิตภัณฑ์ (น้ำตาลฟรุกโตส และน้ำตาลกลูโคส)

1. เตรียมสารละลายซูโครส ตามความเข้มข้นต่างๆ เช่น 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตรน้ำ
2. เปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิของอ่างให้ความร้อน เพื่อเตรียมให้น้ำในอ่างให้ความร้อนมีอุณหภูมิคงที่
3. บั่มสารตั้งต้น (สารละลายน้ำตาลซูโครส) เข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์
4. เก็บสารตัวอย่างที่ได้จากปากทางออกของเครื่องปฏิกรณ์ปริมาตรประมาณ 15 มิลลิลิตร โดยเก็บสารตั้งต้นตามระยะเวลาต่างๆ
5. นำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้ จากเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวแบบสมรรถนะสูง ( High Performance Liquid Chromatography, HPLC )

### 3.3 วิธีการใช้งานเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวแบบสมรรถนะสูง (HPLC)

1. ประกอบชุด Column และ Guard cartridge
2. ประกอบตัว Column เข้ากับ Pump P2000 และ Refractive Index detector (RI 150)
3. นำตัว Column วางลงใน HPLC column heater model T-120D เพื่อควบคุมอุณหภูมิที่ 40 องศาเซลเซียส
4. ปรับค่าอัตราการไหลและอัตราส่วนของสารพา (Mobile phase) น้ำและอะซีโตไนไตรล์ที่ใช้ในปริมาณ 20 ต่อ 80 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรตามลำดับ เลือกประเภทของสารที่จะทำการวิเคราะห์
5. เลื่อนตัวหมุนบนปั๊มให้ทำการปล่อยสารทิ้ง จากนั้นกดปุ่ม Purge สารนั้น เพื่อทำการไล่แก๊สออกก่อน (Degas) รอจนกว่าไม่มีฟองแก๊สออกจากสายปั๊ม
6. เมื่อไม่มีฟองแก๊สออกจากสายปั๊มแล้ว จากนั้นทำการเปลี่ยนตัวหมุนสายให้เข้าสู่ตัว Column และ Detector
7. รอจนกว่าเส้นกราฟ (Base line) คงที่
8. นีตสารตัวอย่างที่จะทำการวิเคราะห์ แล้วรออ่านค่าพีคจากเส้นกราฟ โดยใช้โปรแกรม CSW32

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

#### 4.1 การทดลองเพื่อหาอันดับปฏิกิริยา

ในการหาอันดับปฏิกิริยาของปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสของซูโครสนั้น จะต้องทำการพลอตกราฟในสภาวะอุณหภูมิและอัตราไหลต่างๆ ที่ความเข้มข้นของสารขาเข้าหลายๆค่า ลงในสมการอันดับปฏิกิริยาต่างๆ และทำการเทียบความชันของกราฟหรือค่าคงที่อัตราซึ่งจะไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของสารขาเข้าที่ต่างกัน ก็จะสามารรถทำนายอันดับปฏิกิริยาจากความชันของเส้นกราฟนั้นๆ ได้

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลผลการทดลองเมื่อใช้สมมติฐานให้อันดับปฏิกิริยาเป็นอันดับศูนย์ที่ความเข้มข้นซูโครสเริ่มต้นประมาณ 16.98 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที)	ค่าการแปลงผัน สารตั้งต้นไปเป็น ผลิตภัณฑ์ (X)	สเปซไทม์(วินาที)
38	6.78	0.009	148.673
	4.02	0.037	250.746
	2.58	0.092	390.698
49	6.78	0.089	148.673
	4.32	0.147	233.333
	2.88	0.186	350.000
58	6.36	0.164	158.491
	4.02	0.223	250.746
	2.52	0.389	400.000
69	6.78	0.250	148.673
	4.32	0.441	233.333
	2.76	0.595	365.217

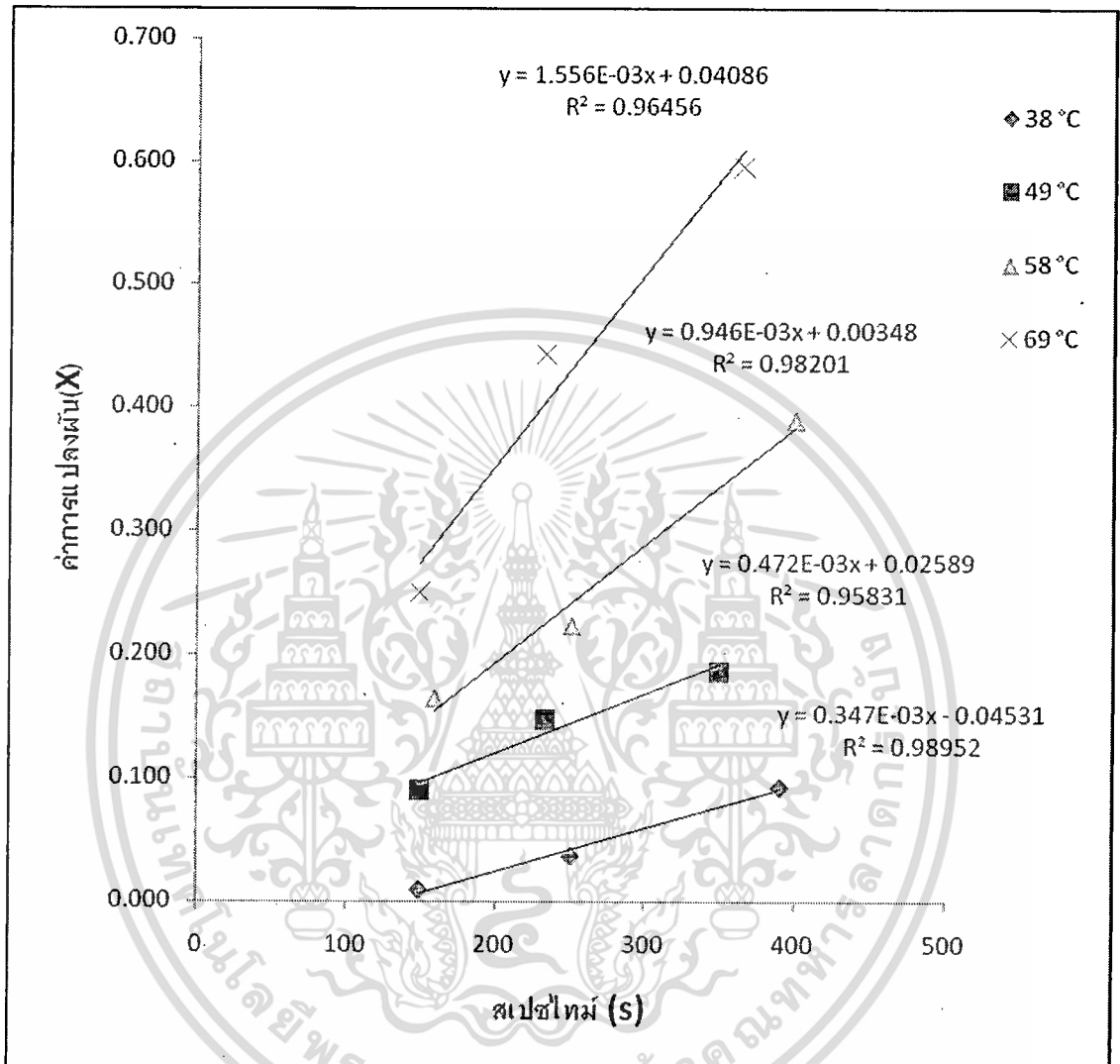
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ข้อมูลผลการทดลองเมื่อใช้สมมติฐานให้อันดับปฏิบัติการเป็นอันดับศูนย์ที่ความเข้มข้นซูโครสเริ่มต้นประมาณ 34.47 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร

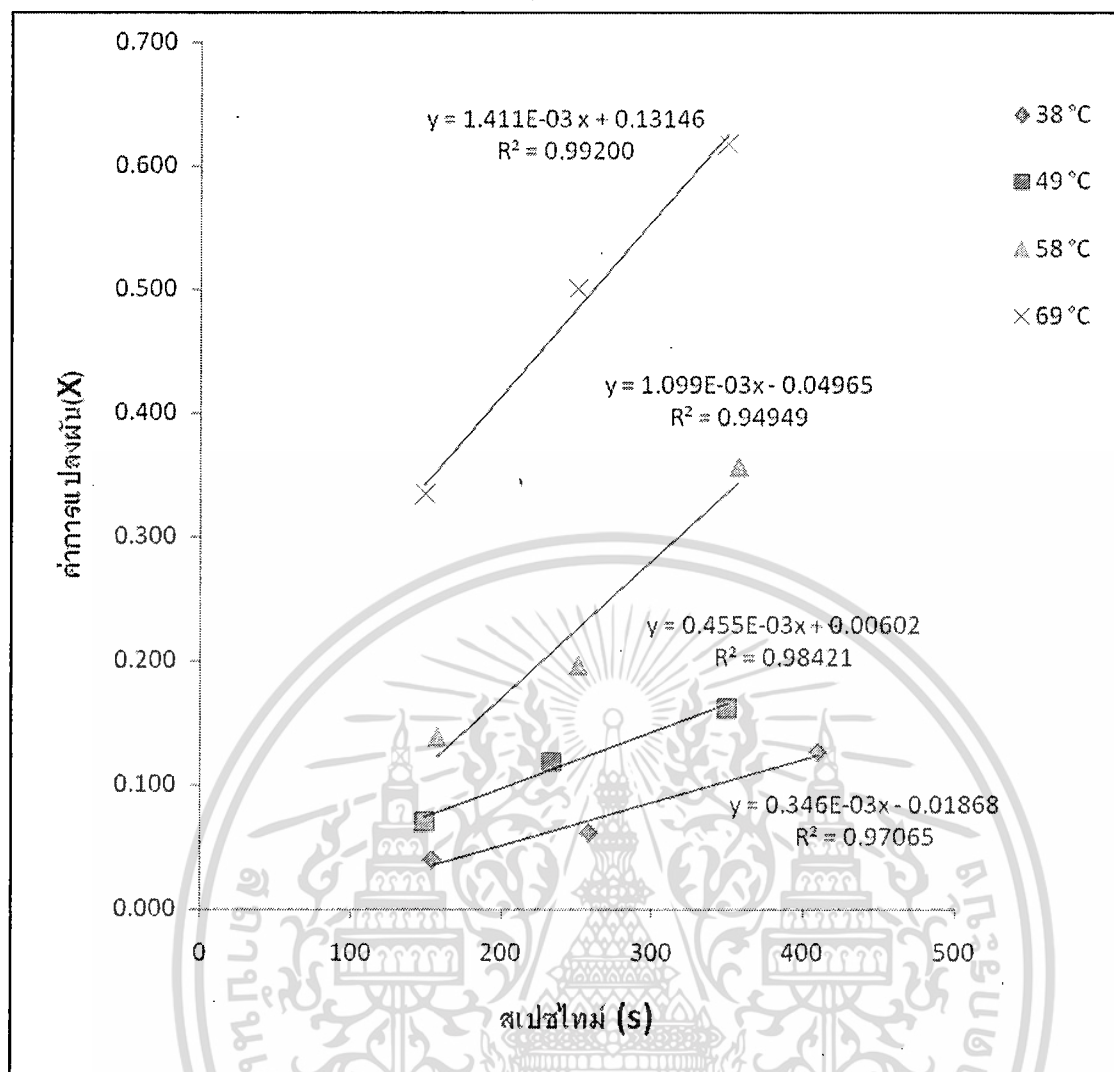
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที)	ค่าการแปลงผัน สารตั้งต้นไปเป็น ผลิตภัณฑ์ (X)	स्पेซไทม์(วินาที)
38	6.54	0.040	154.128
	3.90	0.062	258.462
	2.46	0.127	409.756
49	6.78	0.070	148.673
	4.32	0.119	233.333
	2.88	0.162	350.000
58	6.42	0.139	157.009
	4.02	0.197	250.746
	2.82	0.357	357.447
69	6.78	0.334	148.673
	4.02	0.500	250.746
	2.88	0.618	350.000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งเมื่อสมมติอันดับปฏิกิริยาให้เป็นอันดับศูนย์ จากสมการที่ (25) นำค่าแปลงผันทางเคมี(X) กับสเปซไทม์มาพลอตกราฟจะได้ดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 กราฟปฏิกิริยาอันดับศูนย์ ที่ความเข้มข้นซูโครสเริ่มต้นเท่ากับ 16.98 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร



รูปที่ 4.2 กราฟปฏิกิริยาอันดับศูนย์ ที่ความเข้มข้นซูโครสเริ่มต้นเท่ากับ 34.47 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร

จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 พบว่าเส้นกราฟมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ค่าความชันของกราฟจะมีค่าสูงขึ้น และที่อุณหภูมิเดียวกันและความเข้มข้นของซูโครสต่างกัน คือ 16.98 และ 34.47 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร ความชันของเส้นกราฟจะมีค่าต่างกันเล็กน้อย

จากการพลอตกราฟที่ 4.1 และ 4.2 โดยสมมติอันดับปฏิกิริยาเป็นอันดับศูนย์ สมการที่ (22)

$X = \frac{k}{C_{A0}} \tau$  จะได้ความชันของกราฟเท่ากับ  $\frac{k}{C_{A0}}$  และเมื่อคิดว่าที่อุณหภูมิเดียวกัน จะมีค่าคงที่

อัตรา ( $k$ ) เท่ากัน

ดังนั้นเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความชันของกราฟที่อุณหภูมิเดียวกันและความเข้มข้นซูโครสเริ่มต้นต่างกันจะได้ผลดังนี้

เมื่อเทียบที่อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียสเท่ากัน และที่ความเข้มข้นซูโครสเริ่มต้น 16.98 และ 34.47 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{k}{16.98} = 2.03 \text{ จะต้องเท่ากับอัตราส่วนของความชันของกราฟในรูปที่ 4.1 และ 4.2 คือ}$$

$$\frac{34.47}{0.346} = 1.00 \text{ เมื่อนำมาเปรียบเทียบแล้วจะได้ } 2.03 \neq 1.00$$

เช่นเดียวกับที่อุณหภูมิ 49 องศาเซลเซียส ได้ว่า  $2.03 \neq 1.03$  ที่อุณหภูมิ 58 องศาเซลเซียส ได้ว่า  $2.03 \neq 0.86$  ที่อุณหภูมิ 69 องศาเซลเซียส ได้ว่า  $2.03 \neq 1.10$  ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าปฏิกิริยานี้ไม่ใช่ปฏิกิริยาอันดับศูนย์

ตารางที่ 4.3 ข้อมูลผลการทดลองเมื่อใช้สมมติฐานให้อันดับปฏิกิริยาเป็นอันดับหนึ่งที่มีความเข้มข้นซูโครสเริ่มต้นประมาณ 16.98 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร

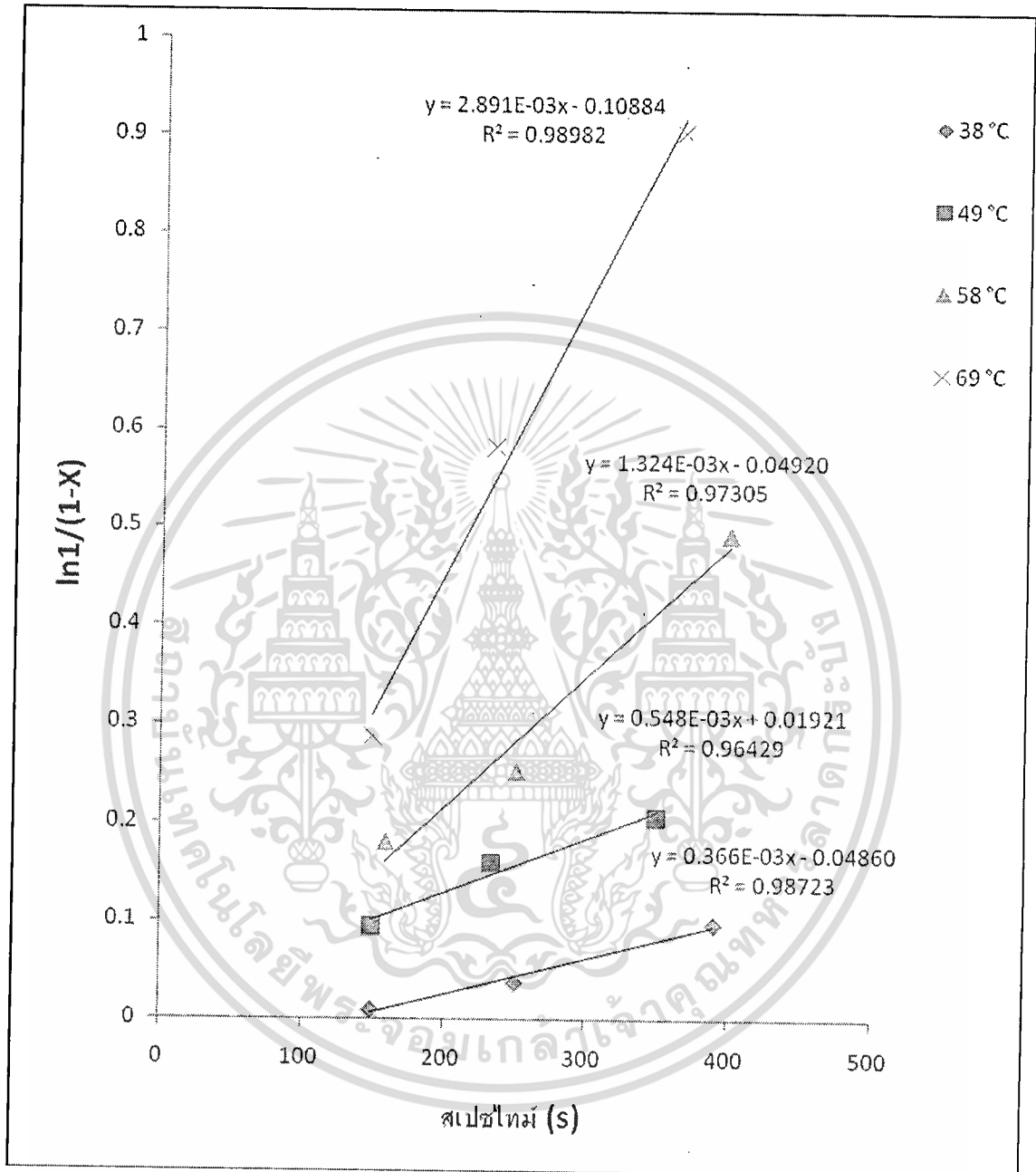
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที)	ค่าการแปลงผัน สารตั้งต้นไปเป็น ผลิตภัณฑ์(X)	$\ln 1/(1-X)$	สเปซไทม์ (วินาที)
38	6.78	0.009	0.009	148.673
	4.02	0.037	0.037	250.746
	2.58	0.092	0.097	390.698
49	6.78	0.089	0.094	148.673
	4.32	0.147	0.159	233.333
	2.88	0.186	0.206	350.000
58	6.36	0.164	0.180	158.491
	4.02	0.223	0.252	250.746
	2.52	0.389	0.492	400.000
69	6.78	0.250	0.287	148.673
	4.32	0.441	0.582	233.333
	2.76	0.595	0.903	365.217

ตารางที่ 4.4 ข้อมูลผลการทดลองเมื่อใช้สมมติฐานให้อันดับปฏิกิริยาเป็นอันดับหนึ่งที่มีความเข้มข้นซูโครสเริ่มต้นประมาณ 34.47 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที)	ค่าการแปลงผัน สารตั้งต้นไปเป็น ผลิตภัณฑ์(X)	$\ln 1/(1-X)$	สเปซไทม์ (วินาที)
38	6.54	0.040	0.041	154.128
	3.90	0.062	0.064	258.462
	2.46	0.127	0.136	409.756
49	6.78	0.070	0.072	148.673
	4.32	0.119	0.126	233.333
	2.88	0.162	0.177	350.000
58	6.42	0.139	0.149	157.009
	4.02	0.197	0.219	250.746
	2.82	0.357	0.442	357.447
69	6.78	0.334	0.406	148.673
	4.02	0.500	0.693	250.746
	2.88	0.618	0.962	350.000

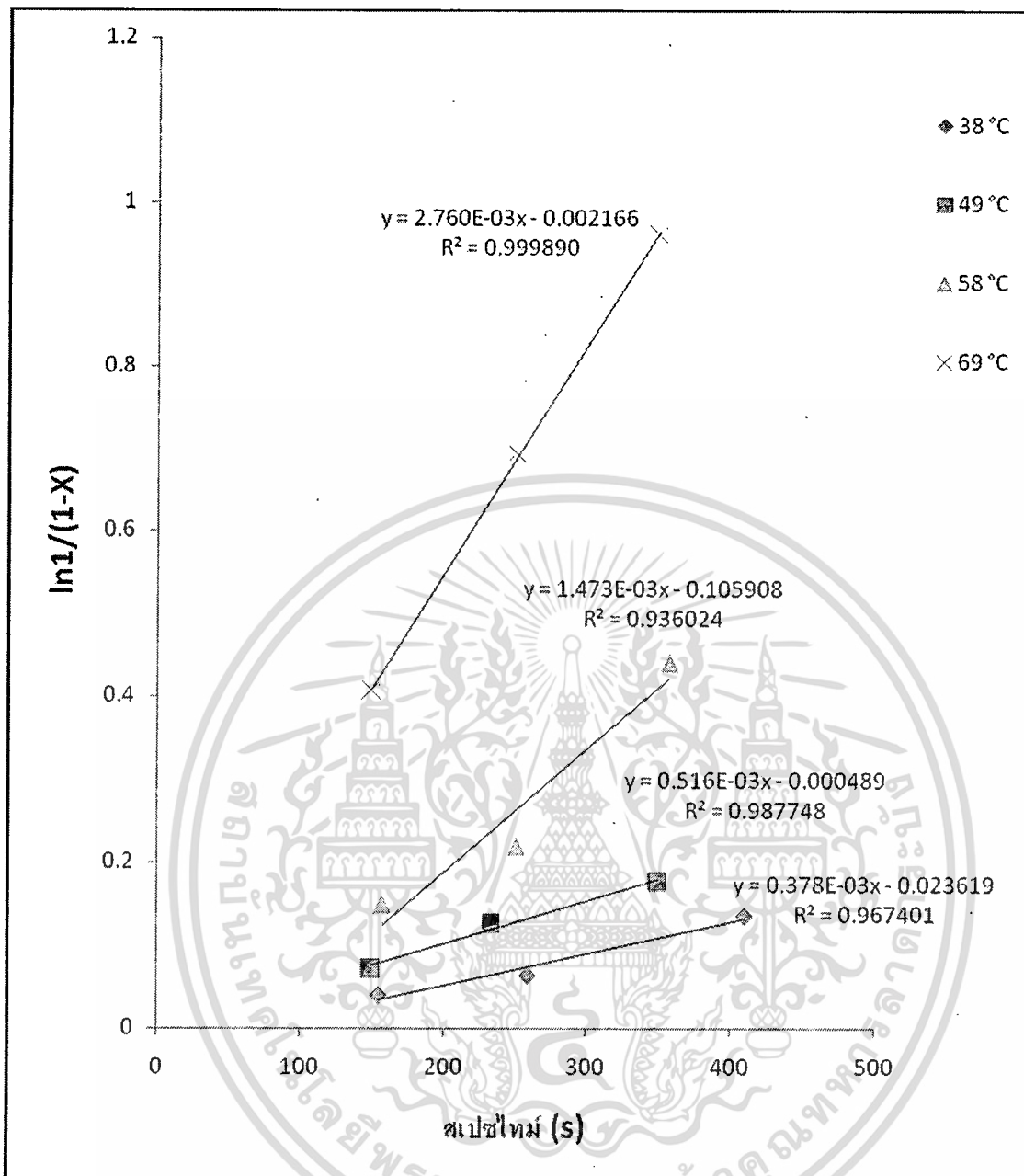
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเมื่อสมมติอันดับปฏิกิริยาให้เป็นอันดับหนึ่ง จากสมการที่ (30) นำค่า  $\ln 1/(1-X)$  กับสเปซไทม์มาพลอตกราฟจะได้ดังรูปที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 กราฟปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ที่ความเข้มข้นซูโครสเริ่มต้นเท่ากับ 16.98 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 กราฟปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ที่ความเข้มข้นซูโครสเริ่มต้นเท่ากับ 34.47 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร

จากรูปที่ 4.3 และ 4.4 พบว่าเส้นกราฟมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ค่าความชันของกราฟจะมีค่าสูงขึ้น และที่อุณหภูมิเดียวกันและความเข้มข้นของซูโครสต่างกัน คือ 16.98 และ 34.47 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร ความชันของเส้นกราฟจะมีค่าต่างกันเล็กน้อย

จากการพลอตกราฟที่ 4.3 และ 4.4 โดยสมมติอันดับปฏิกิริยาเป็นอันดับหนึ่ง สมการที่ (27)

$\ln \frac{1}{(1-X)} = kt$  จะได้ความชันของเส้นกราฟเท่ากับ  $k$  และเมื่อคิดค่าที่อุณหภูมิเดียวกัน ค่าคงที่

อัตรา ( $k$ ) จะมีค่าเท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นทำการเปรียบเทียบค่าความชื้นเมื่ออุณหภูมิเดียวกันและความเข้มข้นซูโครสเริ่มต้นต่างกันจะได้ผลดังนี้

เมื่อเทียบที่อุณหภูมิ 38 °C ความเข้มข้นซูโครสเริ่มต้น 16.98 และ 34.47 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร

$$\frac{k}{k} = 1 \text{ จะต้องเท่ากับอัตราส่วนของความชื้นเส้นกราฟในรูปที่ 4.3 และ 4.4 คือ } \frac{0.366}{0.378} = 0.97$$

เมื่อนำมาเปรียบเทียบแล้ว จะได้  $1 \approx 0.97$

เช่นเดียวกับที่อุณหภูมิ 49 องศาเซลเซียส ได้ว่า  $1 \approx 1.06$  ที่อุณหภูมิ 58 องศาเซลเซียส ได้ว่า  $1 \approx 0.90$  ที่อุณหภูมิ 69 องศาเซลเซียส ได้ว่า  $1 \approx 1.05$  จากการเปรียบเทียบได้ค่าคงที่อัตราใกล้เคียงกันมากจึงสรุปว่าปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

ตารางที่ 4.5 ข้อมูลผลการทดลองเมื่อใช้สมมติฐานให้อันดับปฏิกิริยาเป็นอันดับสองที่ความเข้มข้นซูโครสเริ่มต้นประมาณ 16.98 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที)	ค่าการแปลงผัน สารตั้งต้นไป เป็นผลิตภัณฑ์ (X)	$1/(1-X)$	สเปซไทม์ (วินาที)
38	6.78	0.009	1.009	148.673
	4.02	0.037	1.038	250.746
	2.58	0.092	1.102	390.698
49	6.78	0.089	1.098	148.673
	4.32	0.147	1.173	233.333
	2.88	0.186	1.229	350.000
58	6.36	0.164	1.197	158.491
	4.02	0.223	1.287	250.746
	2.52	0.389	1.636	400.000
69	6.78	0.250	1.332	148.673
	4.32	0.441	1.790	233.333
	2.76	0.595	2.467	365.217

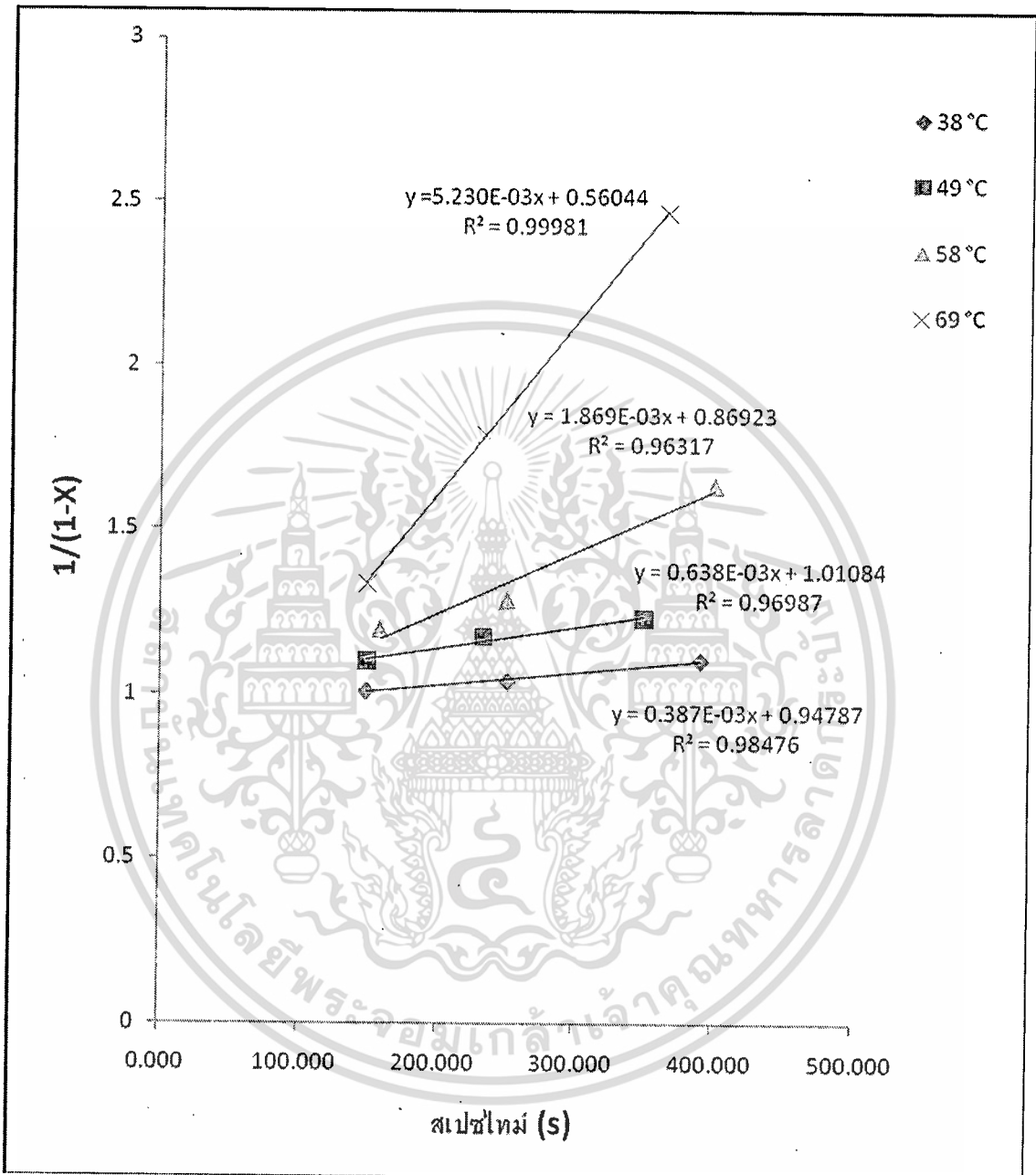
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ข้อมูลผลการทดลองเมื่อใช้สมมติฐานให้อันดับปฏิกิริยาเป็นอันดับสองที่ความเข้มข้นซูโครสเริ่มต้นประมาณ 34.47 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที)	ค่าการแปลงผัน สารตั้งต้นไป เป็นผลิตภัณฑ์ (X)	$1/(1-X)$	สเปซไทม์ (วินาที)
38	6.54	0.040	1.042	154.128
	3.90	0.062	1.066	258.462
	2.46	0.127	1.145	409.756
49	6.78	0.070	1.075	148.673
	4.32	0.119	1.135	233.333
	2.88	0.162	1.194	350.000
58	6.42	0.139	1.161	157.009
	4.02	0.197	1.245	250.746
	2.82	0.357	1.555	357.447
69	6.78	0.334	1.501	148.673
	4.02	0.500	2.000	250.746
	2.88	0.618	2.617	350.000

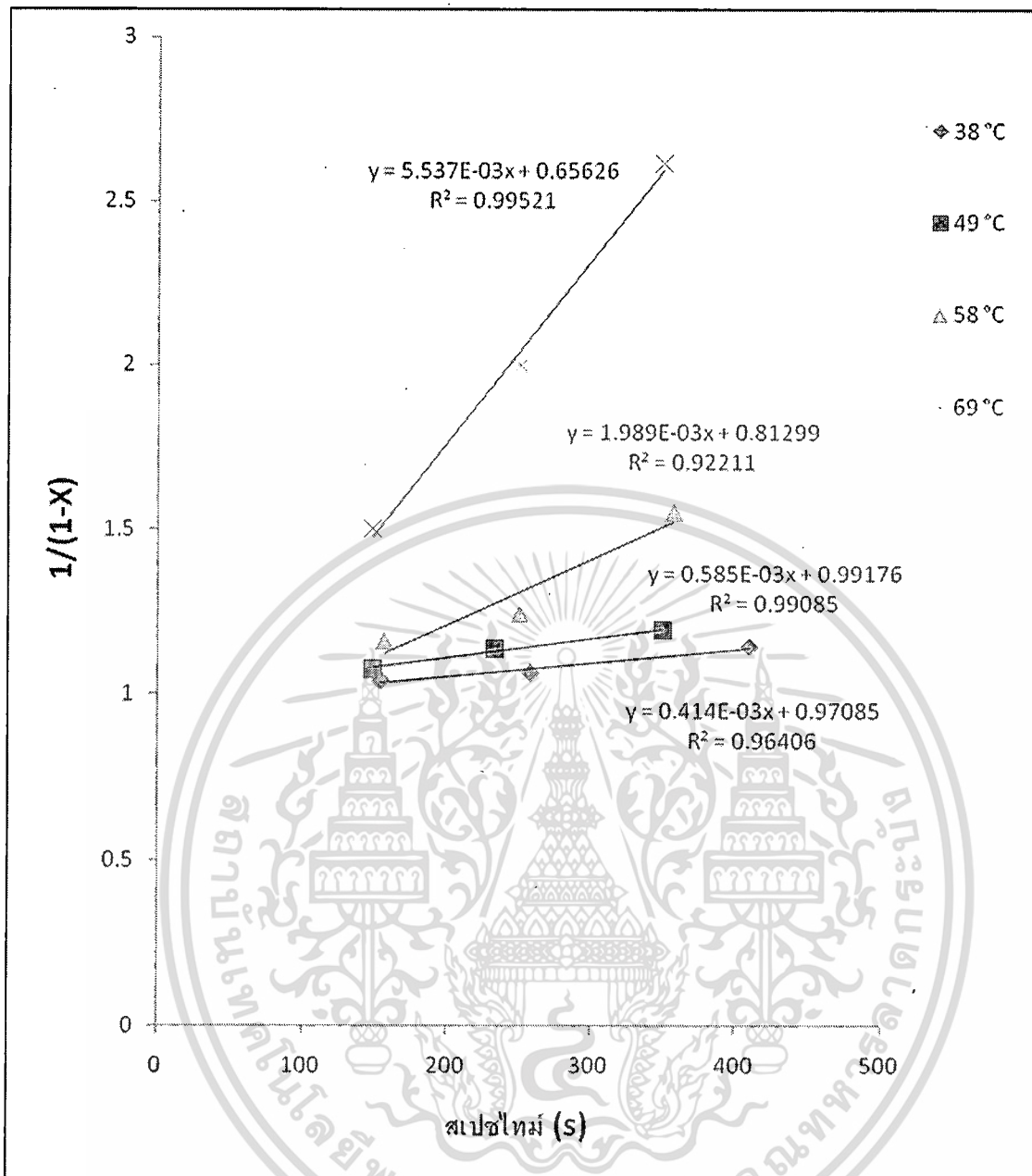
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเมื่อสมมติอันดับปฏิกิริยาให้เป็นอันดับสอง จากสมการที่ (35) นำค่า  $1/(1-X)$  กับสเปซไทม์มาพลอตกราฟจะได้ดังรูปที่ 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ



รูปที่ 4.5 กราฟปฏิกิริยาอันดับสอง ที่ความเข้มข้นซูโครสเริ่มต้นเท่ากับ 16.98 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 กราฟปฏิกิริยาอันดับสอง ที่ความเข้มข้นซูโครสเริ่มต้นเท่ากับ 34.47 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร

จากรูปที่ 4.5 และ 4.6 พบว่าเส้นกราฟมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ค่าความชันของกราฟจะมีค่าสูงขึ้น และที่อุณหภูมิเดียวกันและความเข้มข้นของซูโครสต่างกัน คือ 16.98 และ 34.47 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร ความชันของเส้นกราฟจะมีค่าต่างกันเล็กน้อย

จากการพลอตกราฟที่ 4.5 และ 4.6 โดยสมมติอันดับปฏิกิริยาเป็นอันดับสอง สมการที่ (32)

$\frac{1}{1-X} = (kC_{A0})t$  จะได้ความชันของกราฟเท่ากับ  $kC_{A0}$  และเมื่อคิดว่าที่อุณหภูมิเดียวกัน ค่าคงที่

อัตรา ( $k$ ) จะมีค่าเท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นทำการเปรียบเทียบค่าความชันของกราฟ เมื่ออุณหภูมิเดียวกันและความเข้มข้นซูโครสเริ่มต้นต่างกัน ได้ผลดังนี้

เมื่อเทียบที่อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นซูโครสเริ่มต้น 16.98 และ 34.47 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร  $\frac{k(16.98)}{k(34.47)} = 0.49$  จะต้องเท่ากับอัตราส่วนของความชันเส้นกราฟในรูปที่ 4.5 และ 4.6

ได้  $\frac{0.387}{0.414} = 0.93$  เมื่อนำมาเปรียบเทียบแล้ว จะได้  $0.49 \neq 0.93$

เช่นเดียวกับที่อุณหภูมิ 49 องศาเซลเซียส ได้ว่า  $0.49 \neq 1.09$  ที่อุณหภูมิ 58 องศาเซลเซียส ได้ว่า  $0.49 \neq 0.94$  ที่อุณหภูมิ 69 องศาเซลเซียส ได้ว่า  $0.49 \neq 0.94$  ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าปฏิกิริยานี้ไม่ใช่ปฏิกิริยาอันดับสอง

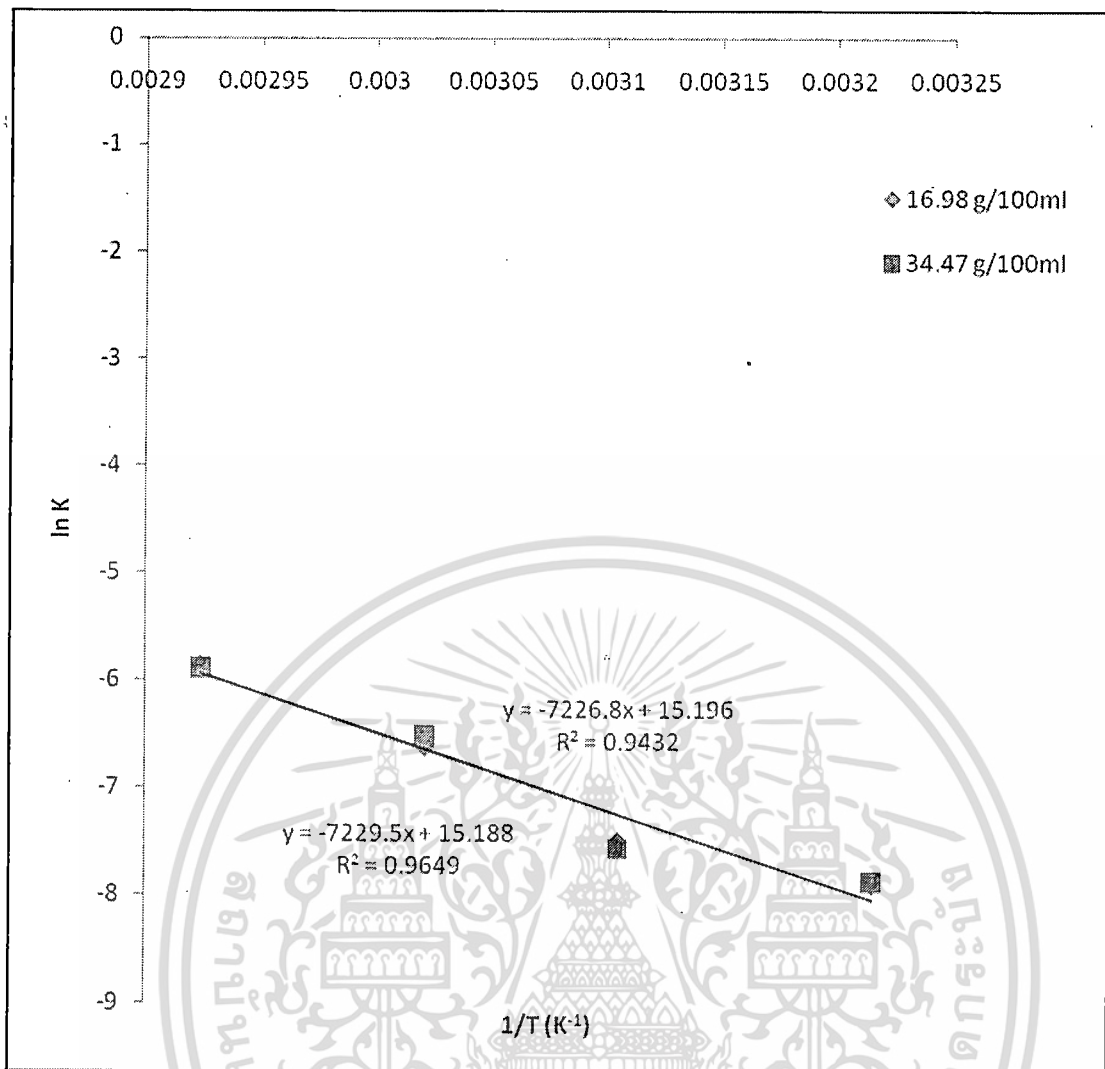
#### 4.2 การทดลองเพื่อหาพลังงานกระตุ้น

จากสมการที่ (36) นำค่า  $\ln k$  กับ  $1/T$  มาพลอตกราฟ (ข้อมูลจากตารางที่ 4.6) จะได้ค่าพลังงานกระตุ้นจากความชันของกราฟซึ่งเท่ากับ  $-\frac{E}{R}$  และค่าพรีเอ็กซ์โพเนนเชียลของสมการอาร์เรเนียสจากจุดตัดแกน  $y$  ซึ่งเท่ากับ  $(\ln A)$

ตารางที่ 4.7 ค่าคงที่อัตราที่สถานะต่างๆ เมื่ออันดับปฏิกิริยาเป็นอันดับหนึ่ง

ความเข้มข้นสารละลายซูโครสเริ่มต้น (กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร)	อุณหภูมิ (T) (องศาเซลวิน)	ค่าคงที่อัตรา ( $k \times 10^3$ ) (ต่อวินาที)	$1/T$ (ต่อองศาเซลวิน)	$\ln k$
16.98	311	0.366	0.0032	-7.913
	322	0.548	0.0031	-7.509
	331	1.324	0.0030	-6.627
	342	2.809	0.0029	-5.875
34.47	311	0.378	0.0032	-7.881
	322	0.516	0.0031	-7.569
	331	1.473	0.0030	-6.520
	342	2.760	0.0029	-5.893

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 กราฟการหาค่าพลังงานกระตุ้น

จากกราฟที่ 4.7 เมื่อพลอตกราฟระหว่างค่าคงที่อัตราและอุณหภูมิ โดยพลอตที่ความเข้มข้นซูโครสสองค่า คือ 16.98 และ 34.47 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร พบว่าเส้นกราฟมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง และมีความต่างกันน้อยมาก

จากกราฟที่ 4.7 ที่ความเข้มข้นซูโครส 16.98 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร สามารถหาพลังงานกระตุ้นได้  $60106 \frac{J}{mol} = 60.11 \frac{kJ}{mol} = 14.37 \frac{kcal}{mol}$  และค่าพรีเอ็กซ์โพเนนเชียลของสมการอาร์เรเนียสมีค่าเท่ากับ  $3.95 \times 10^6 \text{ sec}^{-1}$

จากกราฟที่ 4.7 ที่ความเข้มข้นซูโครส 34.47 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร สามารถหาพลังงานกระตุ้นได้  $60084 \frac{J}{mol} = 60.08 \frac{kJ}{mol} = 14.36 \frac{kcal}{mol}$  และค่าพรีเอ็กซ์โพเนนเชียลของสมการอาร์เรเนียสมีค่าเท่ากับ  $3.98 \times 10^6 \text{ sec}^{-1}$

ดังนั้น สรุปได้ว่าการทดลองนี้มีค่าพลังงานกระตุ้นอยู่ในช่วง 60.08 - 60.11 กิโลจูลต่อโมล และค่าพรีเอ็กซ์โพเนนเชียลของสมการอาร์เรเนียสอยู่ในช่วง  $3.95 - 3.98 \times 10^6$  ต่อวินาที ซึ่งประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรรมใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3 การทดลองเพื่อวิเคราะห์ผลจากการถ่ายโอนมวลโดยใช้ปริมาณสัดส่วนของน้ำหนักตัวเร่ง-ปฏิกิริยาและอัตราการไหลคงที่

การทดลองเพื่อวิเคราะห์ผลจากการถ่ายโอนมวลโดยใช้ปริมาณสัดส่วนของน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาและอัตราการไหลคงที่ เพื่อศึกษาผลจากการถ่ายโอนมวลทำการทดลองโดยใช้ อัตราส่วนน้ำหนักต่ออัตราการไหลเท่ากับ 2.19 นาที

ตารางที่ 4.8 วิเคราะห์ผลจากการแพร่โดยใช้ปริมาณสัดส่วนของน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาและอัตราการไหลคงที่

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	อัตรา การไหล เชิงมวล (กรัมต่อ วินาที)	น้ำหนัก ตัวเร่ง ปฏิกิริยา (กรัม)	ความเข้มข้น สารละลาย ซูโครสเริ่มต้น ( กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร)	ความเข้มข้น สารละลาย ซูโครสขาออก ( กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร)	อัตราการ เกิดปฏิกิริยา (กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร. นาที)	สเปซ ไทม์ (นาที)
	0.0385	5.070	21.68	18.36	1.516	2.19
49	0.0607	7.982	21.68	18.14	1.616	2.19
	0.1000	13.160	21.68	18.13	1.621	2.19

จากการทดลองพบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาของซูโครสจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อทำการเพิ่มน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาและอัตราการไหล จึงสรุปได้ว่า ปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสของซูโครสโดยตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นเรซินแลกเปลี่ยนประจุรูปกรด น่าจะมีผลจากการถ่ายโอนมวลเข้ามาเกี่ยวข้อง เนื่องจากเมื่อทำการเพิ่มอัตราการไหล จะทำให้ความเข้มข้นที่ผิวของไหลมีค่าต่างกับความเข้มข้นที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยาน้อยลง ทำให้ผลจากการถ่ายโอนมวลน้อยลง จึงทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น

#### 4.4 การทดลองเพื่อทดสอบปริมาณกลูโคสและฟรุกโตสที่เกิดขึ้นจริงเทียบปริมาณกลูโคสและฟรุกโตสที่เกิดขึ้นตามทฤษฎี

การคิดปริมาณกลูโคสและฟรุกโตสที่เกิดขึ้นตามทฤษฎี เช่น ที่ความเข้มข้นซูโครสเริ่มต้น 15 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร มีค่าการแปลงผันเท่ากับ 0.1 ดังนั้นในสารละลาย 100 มิลลิลิตร จะมีซูโครส ที่ทำปฏิกิริยาไป  $0.1 \times 15 / 342 = 0.004$  โมล จะเกิดกลูโคสและฟรุกโตส อย่างละ 0.004 โมล หรือ  $0.004 \times 180 = 0.72$  กรัม

ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบปริมาณกลูโคสและฟรุกโตสที่เกิดขึ้นจริงเทียบปริมาณกลูโคสและฟรุกโตสที่เกิดขึ้นตามทฤษฎี ที่ความเข้มข้น 16.98 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร

อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	อัตราไหล (มิลลิลิตร ต่อนาที)	ความเข้มข้น กลูโคสจาก การทดลอง (กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร)	ความเข้มข้น ฟรุกโตสจาก การทดลอง (กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร)	ความเข้มข้น กลูโคสตาม ทฤษฎี(กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร)	ความเข้มข้น ฟรุกโตสตาม ทฤษฎี(กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร)
38	6.78	0.24	0.23	0.07	0.07
	4.02	0.36	0.35	0.29	0.29
	2.58	0.60	0.56	0.73	0.73
49	6.78	0.50	0.46	0.70	0.70
	4.32	0.81	0.71	1.16	1.16
	2.88	1.18	1.14	1.47	1.47
58	6.36	1.24	1.24	1.29	1.29
	4.02	1.89	1.90	1.76	1.76
	2.52	2.75	2.73	3.07	3.07
69	6.78	2.15	2.11	1.97	1.97
	4.32	3.36	3.36	3.48	3.48
	2.76	4.41	4.34	4.70	4.70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 เปรียบเทียบปริมาณกลูโคสและฟรุกโตสที่เกิดขึ้นจริงเทียบปริมาณกลูโคสและฟรุกโตสที่เกิดขึ้นตามทฤษฎี ที่ความเข้มข้น 34.47 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร

อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	อัตราไหล (มิลลิลิตร ต่อนาที)	ความเข้มข้น กลูโคสจาก การทดลอง (กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร)	ความเข้มข้น ฟรุกโตสจาก การทดลอง (กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร)	ความเข้มข้น กลูโคสตาม ทฤษฎี(กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร)	ความเข้มข้น ฟรุกโตสตาม ทฤษฎี(กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร)
38	6.54	0.67	0.62	0.63	0.63
	3.90	0.89	0.78	0.98	0.98
	2.46	1.26	1.16	2.01	2.01
49	6.78	0.99	0.81	1.11	1.11
	4.32	1.70	1.55	1.88	1.88
	2.88	2.40	2.25	2.56	2.56
58	6.42	2.65	2.43	2.19	2.19
	4.02	4.25	4.21	3.11	3.11
	2.82	5.54	5.48	5.64	5.64
69	6.78	4.89	4.80	5.27	5.27
	4.02	7.01	6.86	7.89	7.89
	2.88	9.11	8.91	9.76	9.76

เมื่อนำค่าการแปลงผันทางเคมีของซูโครสที่ได้มาคำนวณหาปริมาณฟรุกโตสและกลูโคสที่เกิดขึ้น จากตารางที่ 4.9 และ 4.10 พบว่าปริมาณฟรุกโตสและกลูโคสที่เกิดขึ้นจริงนั้นมีค่าใกล้เคียงกันเป็นส่วนใหญ่ สาเหตุที่ปริมาณกลูโคสและฟรุกโตสที่เกิดขึ้นจริงเมื่อเปรียบเทียบกับทฤษฎีแล้วมีค่าต่างกันมากในบางสภาวะอาจเนื่องมาจาก ความผิดพลาดในบางขั้นตอน เช่น การสร้างกราฟมาตรฐานเทียบความเข้มข้นอาจคลาดเคลื่อนจากการเตรียมสารละลายกลูโคส และฟรุกโตส หรืออาจเกิดจากผลกระทบของตัวกรองเล็กน้อยในบางสภาวะ

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสของน้ำตาลซูโครสเพื่อเปลี่ยนเป็นน้ำตาลกลูโคสและฟรุกโตส โดยทำการทดลองที่สภาวะต่างๆ ได้แก่ ความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสประมาณ 16.98 และ 34.47 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง 38, 49, 58 และ 69 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของสารป้อนในช่วง 6.78 – 2.46 มิลลิลิตรต่อนาที จากการทดลองเมื่อลดอัตราการไหลของสารป้อนและเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง จะมีผลทำให้ค่าการแปลงผันทางเคมีของน้ำตาลซูโครสมีค่าเพิ่มขึ้น โดยมีค่าการแปลงผันสูงสุดที่ความเข้มข้นสารละลายซูโครสเท่ากับ 34.47 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร อัตราการไหลเท่ากับ 2.88 มิลลิลิตรต่อนาที และอุณหภูมิในการทดลอง 69 องศาเซลเซียส มีค่าการแปลงผันเท่ากับ 0.618

เมื่อนำไปทำการหาอันดับปฏิกิริยาพบว่าปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง โดยความชันของเส้นกราฟจะขึ้นกับอุณหภูมิมากที่สุด และไม่มีผลต่อความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสที่ต่างกัน โดยที่มีค่าคงที่อัตรา ( $k$ ) ซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง มีค่า ดังนี้ ที่อุณหภูมิ 38, 49, 58 และ 69 องศาเซลเซียส มีค่าคงที่อัตราอยู่ในช่วง  $0.366 \times 10^{-3}$  -  $0.378 \times 10^{-3}$ ,  $0.516 \times 10^{-3}$  -  $0.548 \times 10^{-3}$ ,  $1.324 \times 10^{-3}$  -  $1.473 \times 10^{-3}$  และ  $2.760 \times 10^{-3}$  -  $2.891 \times 10^{-3}$  ต่อวินาที ตามลำดับ มีค่าพลังงานกระตุ้นอยู่ในช่วง 60.08 – 60.11 กิโลจูลต่อโมลเคลวิน และค่าพรีเอ็กซ์โพเนนเชียลของสมการอาร์เรเนียสอยู่ในช่วง  $3.95 \times 10^6$  -  $3.98 \times 10^6$  ต่อวินาที เขียนเป็นสมการอาร์เรเนียสได้  $k = 3.95 \times 10^6 \times e^{-60106/RT}$

จากการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบจากการถ่ายโอนมวล โดยปรับให้สเปซไทม์ยังคงที่และปรับสัดส่วนของน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยากับอัตราการไหล พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาของซูโครสจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อทำการเพิ่มน้ำหนักร่างปฏิกิริยาและอัตราการไหล จึงสรุปได้ว่าปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสของซูโครส โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นเรซินแลกเปลี่ยนประจุปรอท น่าจะมีผลจากการถ่ายโอนมวลเข้ามาเกี่ยวข้อง เนื่องจากเมื่อทำการเพิ่มอัตราการไหล จะทำให้ความเข้มข้นที่ผิวของไหลมีค่าต่างกับความเข้มข้นที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยาน้อยลง ทำให้ผลจากการถ่ายโอนมวลน้อยลง จึงทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น

การทดลองเพื่อทดสอบปริมาณกลูโคสและฟรุกโตสที่เกิดขึ้นจริงเทียบปริมาณกลูโคสและฟรุกโตสที่เกิดขึ้นตามทฤษฎี กลูโคสและฟรุกโตสที่เกิดขึ้นจริงมีค่าใกล้เคียงกันมาก ปริมาณกลูโคสและฟรุกโตสที่เกิดขึ้นจริงเมื่อเปรียบเทียบกับทฤษฎีแล้ว มีค่าต่างกันมากในบางสภาวะอาจเนื่องมาจาก ความผิดพลาดในบางขั้นตอน เช่น การสร้างกราฟมาตรฐานเทียบความเข้มข้นอาจคลาดเคลื่อน จากการเตรียมสารละลายกลูโคส และฟรุกโตส หรืออาจเกิดจากผลกระทบจากตัวกรองเล็กน้อยในบางสภาวะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลจากการทดลองเพิ่มเติมได้ ดังนี้

1. การทดลองเพื่อวิเคราะห์ผลจากตัวกรอง พบว่ามีการเกิดปฏิกิริยาขึ้นที่ตัวกรองค่อนข้างน้อย โดยทำการทดลองที่อัตราการไหลต่ำที่สุด พบว่าเกิดปฏิกิริยาขึ้นเล็กน้อย โดยมีค่าการแปลงผันทางเคมีของซูโครสเท่ากับ 0.004 ที่อัตราไหล 2.52 มิลลิลิตรต่อนาที ซึ่งถือว่ามีผลน้อยมาก จึงสามารถคิดได้ว่าไม่เกิดปฏิกิริยา ณ ตัวกรองนี้ได้
2. การทดลองเพื่อทดสอบการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา ในการเปรียบเทียบการทดลองในครั้งแรกและครั้งสุดท้ายที่เวลาต่างกันประมาณ 3 เดือน พบว่าที่อัตราไหลและอุณหภูมิใกล้เคียงกัน การแปลงผันทางเคมีของซูโครสมีค่าใกล้เคียงกันมาก จึงสรุปได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาในการทดลองนี้มีการเสื่อมสภาพน้อยมาก

### วิจารณ์การทดลองและข้อเสนอแนะ

1. การทดลองอาจมีค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากการสร้างกราฟมาตรฐาน ควรจะทำการกราฟมาตรฐานทุกครั้ง ในการวิเคราะห์ด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีเหลวแบบสมรรถนะสูง ซึ่งจะช่วยให้ได้ผลการทดลองที่แม่นยำยิ่งขึ้น
2. การวิเคราะห์ด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีเหลวแบบสมรรถนะสูงจะต้องรอให้เส้นกราฟวิเคราะห์คงที่ และควรฉีดสารเพื่อทำการวิเคราะห์ 2 ครั้งเป็นอย่างน้อย เพื่อเปรียบเทียบผลจากการวิเคราะห์
3. การเตรียมสารละลายซูโครส เตรียมได้ไม่เท่ากันในทุกครั้งที่ทำการทดลอง การผสมสารละลายซูโครสควรจะทำที่เดียวในครั้งละหลายๆ แล้วทำการทดลองในทีเดียว เพราะจะทำให้ได้ความเข้มข้นเริ่มต้นที่เท่ากันในทุกสถานะ
4. การทดลองนี้ใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาน้อยเกินไป ซึ่งทำให้สามารถทดลองในช่วงอัตราการไหลที่ไม่มากนัก
5. การศึกษาผลจากการถ่ายโอนมวลสารได้ ควรจะคำนวณค่าพลังงานกระตุ้นที่เป็นค่าหักผลจากการถ่ายโอนมวลสารมาเปรียบเทียบกับ หรือลองใช้สมการการเกิดปฏิกิริยาในเม็ครูพุนมาลองคำนวณ

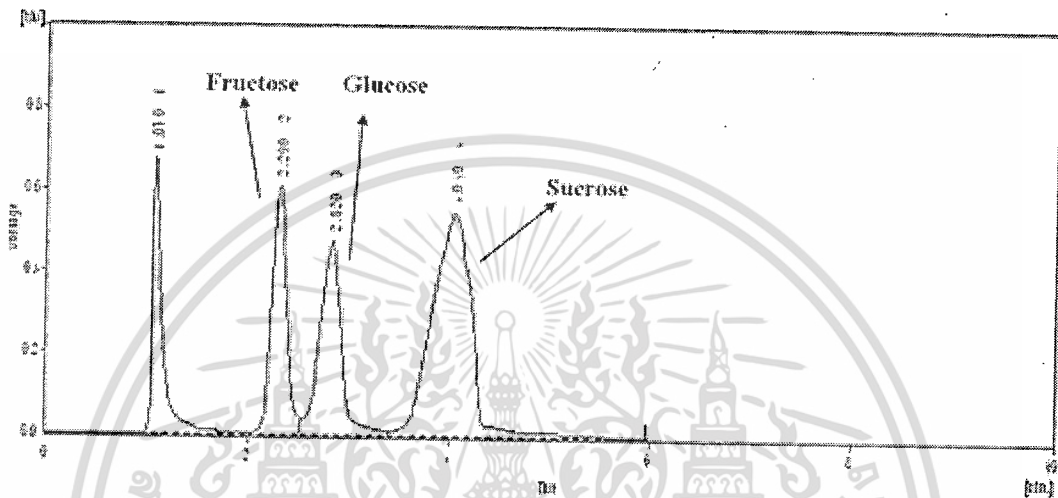
## เอกสารอ้างอิง

- [1] วิชาการ.คอม การย่อยคาร์โบไฮเดรต  
[Online]. Available : <http://www.vcharkarn.com/include/vcafe/showkratoo.php?Pid=120496>, 2008.
- [2] C. Luengratanakorn and B. Siriwongwichain, **Kinetics of Sucrose Hydrolysis Catalyzed by Acidic Ion Exchange Resin**, The Chemical Engineering Faculty of Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, 1988, 3 - 27
- [3] คุณสมบัติของน้ำตาล.  
[Online]. Available : [www.techno.msu.ac.th/bt/pdfdocxls/sugar333.ppt](http://www.techno.msu.ac.th/bt/pdfdocxls/sugar333.ppt), 2008.
- [4] Fred W. Schenck, Ronald E. Hebeda, **Starch hydrolysis product : production and applications** , New York :VCH. 1992
- [5] จตุพร วิทยาคุณ และ นุรักษ์ กฤษดานุรักษ์, **การเร่งปฏิกิริยา : พื้นฐานและการประยุกต์**, โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2547
- [6] H.Scott Fogler, **Elements of Chemical Reaction Engineering 4<sup>th</sup> edition**, Prentice Hall international series in the Physical and chemical engineering, 2006.
- [7] ผศ.ดร.ดวงกมล ณ ระนอง, **พื้นฐานวิศวกรรมปฏิกิริยาและการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์เคมี**, โรงพิมพ์ อักษรสยามการพิมพ์, 2550
- [8] George Bodamer, Robert Kunin, **Heterogeneous Catalytic Inversion of Sucrose with Cation Exchange Resins**, Ind. Eng. Chem., 1951, 1082-1085
- [9] E. W. Reed, J. S. Dranoff, **Ion Exchange Resin Catalysis of Sucrose Inversion in Fixed Beds**, Ind. Eng. Chem. Fundam., 1964, 304-307
- [10] Norman Lifshutz, J. S. Dranoff, **Inversion of Concentrated Sucrose Solutions in Fixed Beds of Ion Exchange Resin**, Ind. Eng. Chem. Proc. Des. Dev, 1968, 266-269
- [11] S. H. Khan and K. Rahman, **Inversion of sucrose solution by ion exchange: Evaluation of reaction rate and diffusivity**, The Chemical Engineering Journal and the Biochemical Engineering Journal, 61(1), 1996, 7-12

## ภาคผนวก

### ก.ตัวอย่างการวิเคราะห์ปริมาณสารละลายที่ได้จากการทดลองโดยใช้เครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวแบบสมรรถนะสูง (HPLC)

การวิเคราะห์ปริมาณสารละลายด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวแบบสมรรถนะสูงได้ผลออกมาในรูปแบบของกราฟและตารางบอกปริมาณพื้นที่พีคของสารแต่ละชนิด



รูปที่ ก1. ตัวอย่างกราฟแสดงพื้นที่พีคเมื่อทำการวิเคราะห์สารละลายหลังทำปฏิกิริยา

ตารางที่ ก1. แสดงค่าตัวอย่างพื้นที่พีคของสารละลายที่วิเคราะห์ได้จากเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวแบบสมรรถนะสูง

reten.time(min)	area(mV.s)	% area
1.07	4574.58	14.00
2.29	6208.76	19.00
2.82	7025.57	21.50
4.04	14795.99	45.50
Total	32604.90	100

ค่า Retention time จะแสดงถึงชนิดของสารต่าง โดยสามารถตรวจสอบชนิดของสารละลายได้จากจากหนังสือคู่มือการใช้งานเครื่องมือ HPLC ซึ่งค่าสารที่สนใจมีค่า Retention time ดังนี้  
ในช่วงค่าสารละลายซูโครสเริ่มต้นประมาณ 15 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร

ซูโครสมีค่า Retention time อยู่ในช่วง 3.6 – 4.3 นาที

กลูโคสมีค่า Retention time อยู่ในช่วง 2.6 – 2.9 นาที

ฟรุคโตสมีค่า Retention time อยู่ในช่วง 2.2 – 2.3 นาที

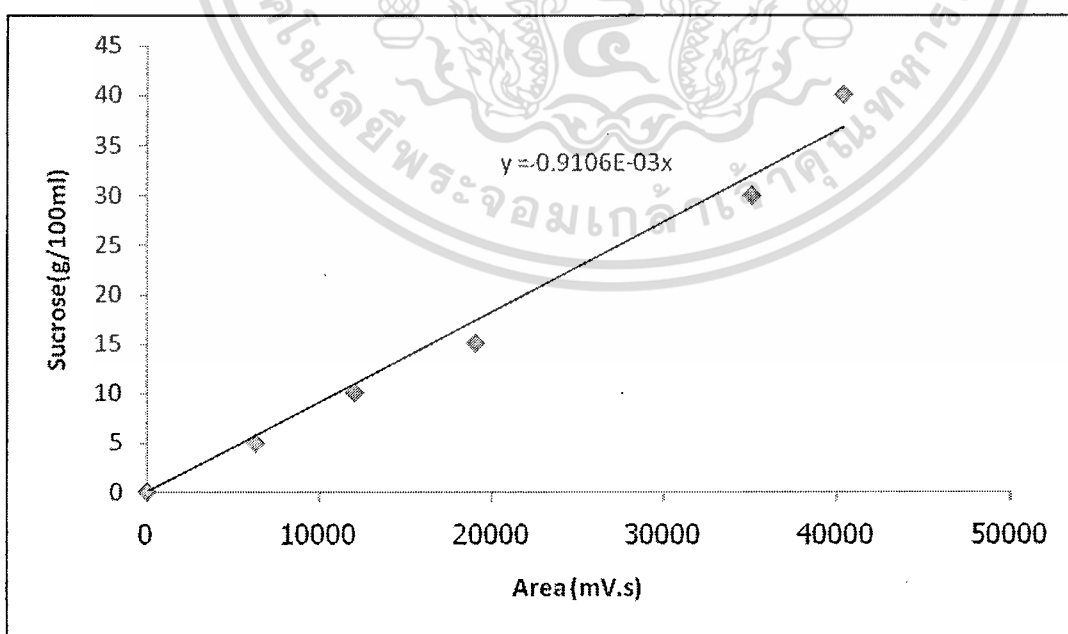
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และสงวนสิทธิ์ในเนื้อหาและข้อมูลอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ข. การเตรียมกราฟมาตรฐานวิเคราะห์ปริมาณ

ในการหาความเข้มข้นของสารละลายซูโครส สารละลายฟรุกโตส และ สารละลายกลูโคสนั้นจะต้องทำการเทียบกราฟมาตรฐานเพื่อวิเคราะห์ปริมาณโดยทำการผสมสารละลายซูโครสตามน้ำหนัก 5, 10, 15, 30, 40 และ 50 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร แล้วนำไปฉีดเข้าเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวแบบสมรรถนะสูง เพื่อวิเคราะห์ออกมาเป็นพื้นที่พีค ได้ผลดังตารางที่ ข1.

ตารางที่ ข1. เทียบปริมาณสารละลายซูโครสกับพื้นที่พีค

น้ำหนักซูโครส (กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร)	พื้นที่พีค (มิลลิโวลต์ วินาที)
0	0
5	6265
10	11985
15	19061
30	35122
40	40399
50	47875



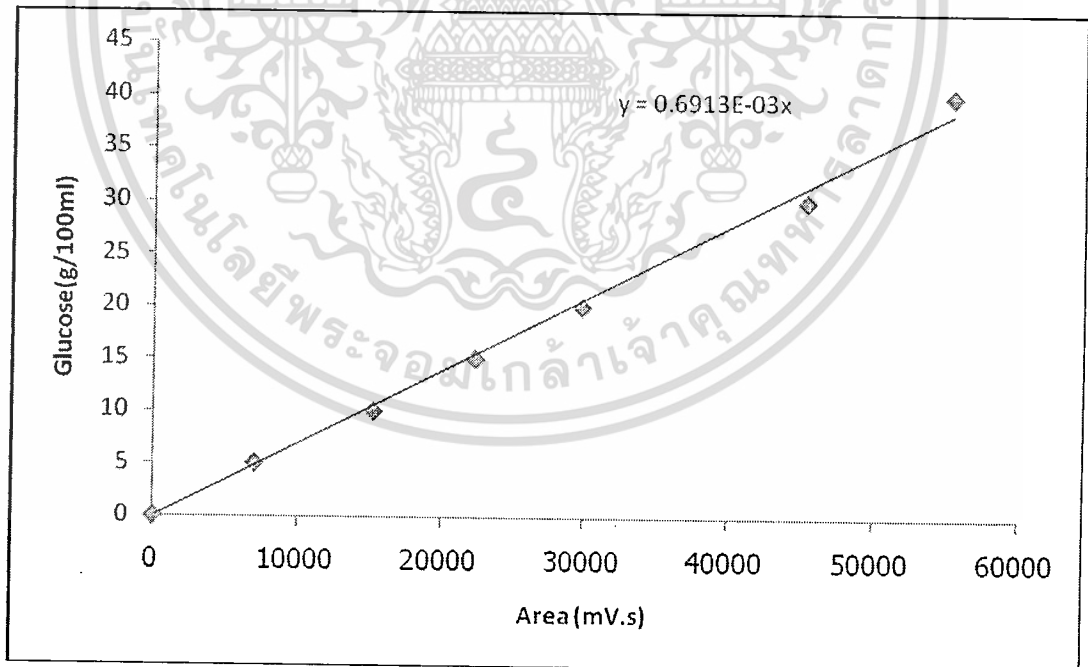
รูปที่ ข1. กราฟวิเคราะห์ปริมาณซูโครส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการผสมสารละลายกลูโคสตามน้ำหนัก 5, 10, 15, 20, 30 และ 40 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร แล้วนำไปฉีดเข้าเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวแบบสมรรถนะสูง เพื่อวิเคราะห์ออกมาเป็นพื้นที่พีค ได้ผลดังตาราง

ตารางที่ ข2. เทียบปริมาณสารละลายกลูโคสกับพื้นที่พีค

น้ำหนักกลูโคส (กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร)	พื้นที่พีค (มิลลิโวลต์ วินาที)
0	0
5	7002
10	15244
15	22346
20	29765
30	45321
40	55387



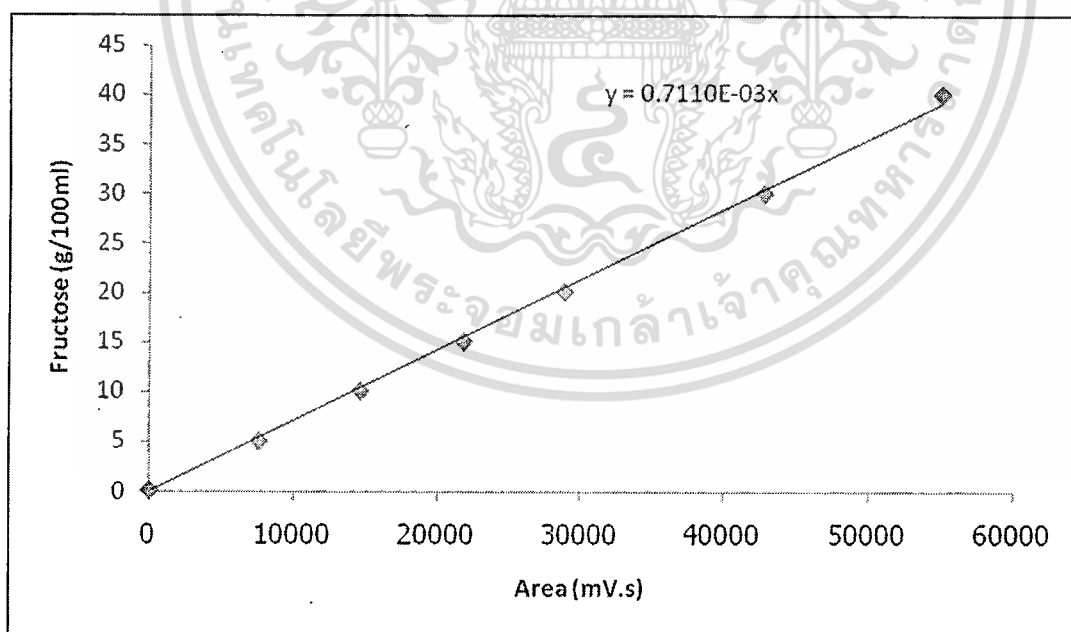
รูปที่ ข2. กราฟวิเคราะห์ปริมาณกลูโคส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการผสมสารละลายฟรุกโตสตามน้ำหนัก 5, 10, 15, 20, 30 และ 40 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร แล้วนำไปฉีดเข้าเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวแบบสมรรถนะสูง เพื่อวิเคราะห์ห่อออกมาเป็นพื้นที่พีค ได้ผลดังตารางดัง

ตารางที่ ข3. เทียบปริมาณสารละลายฟรุกโตสกับพื้นที่พีค

น้ำหนักฟรุกโตส (กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร)	พื้นที่พีค (มิลลิโวลต์ วินาที)
0	0
5	7600
10	14610
15	21822
20	28868
30	42748
40	54938



รูปที่ ข3. กราฟวิเคราะห์ปริมาณฟรุกโตส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค. ข้อมูลดิบ

ตารางที่ ค1. พื้นที่ฟีกของสารต่างๆที่สภาวะคงตัว ที่สารละลายซูโครสเริ่มต้น 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	อัตราไหล (มิลลิลิตร ต่อนาที)	พื้นที่ฟีก ซูโครสเริ่มต้น (มิลลิโวลต์ วินาที)	พื้นที่ฟีก ซูโครสขาออก (มิลลิโวลต์ วินาที)	พื้นที่ฟีก กลูโคส (มิลลิโวลต์ วินาที)	พื้นที่ฟีก ฟรุกโตส (มิลลิโวลต์ วินาที)
38	6.78	19130	18955	340	325
	4.02	19130	18427	515	499
	2.58	19130	17362	873	781
49	6.78	18307	16670	726	654
	4.32	18405	15693	1171	994
	2.88	18405	14979	1711	1600
58	6.36	18427	15396	1793	1749
	4.02	18427	14320	2736	2669
	2.52	18812	11498	3978	3839
69	6.78	17033	12783	3116	2972
	4.32	19262	10762	4863	4720
	2.76	19262	7808	6378	6110

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค2. พื้นที่ปลูกของสารต่างๆที่สภาวะคงตัว ที่สารละลายซูโครสเริ่มต้น 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	อัตราไหล (มิลลิลิตร ต่อนาที)	พื้นที่ปลูก ซูโครสเริ่มต้น (มิลลิโวลต์ วินาที)	พื้นที่ปลูก ซูโครสขาออก (มิลลิโวลต์ วินาที)	พื้นที่ปลูก กลูโคส (มิลลิโวลต์ วินาที)	พื้นที่ปลูก ฟรุกโตส (มิลลิโวลต์ วินาที)
38	6.54	35493	34076	965	871
	3.90	35493	33297	1286	1097
	2.46	36306	31704	1828	1627
49	6.78	39205	36470	1435	1136
	4.32	39095	34450	2466	2174
	2.88	39095	32748	3476	3169
58	6.42	36306	31276	3828	3421
	4.02	36306	29168	6152	5925
	2.82	39227	25225	8021	7704
69	6.78	39227	26126	7078	6753
	4.02	39227	19613	10141	9647
	2.88	39227	14990	13171	12528

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค3. ความเข้มข้นของสารต่างๆที่สภาวะคงตัว ที่สารละลายซูโครสเริ่มต้น 15 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก

อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อ นาที)	ความเข้มข้น สารละลาย ซูโครสเริ่มต้น (กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร)	ความเข้มข้น สารละลาย ซูโครสขาออก (กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร)	ค่าการแปลง ผันสารตั้งต้น ไปเป็น ผลิตภัณฑ์ (X)	สเปซไทม์ (วินาที)
38	6.78	17.42	17.26	0.009	148.673
	4.02	17.42	16.78	0.037	250.746
	2.58	17.42	15.81	0.092	390.698
49	6.78	16.67	15.18	0.089	148.673
	4.32	16.76	14.29	0.147	233.333
	2.88	16.76	13.64	0.186	350.000
58	6.36	16.78	14.02	0.164	158.491
	4.02	16.78	13.04	0.223	250.746
	2.52	17.13	10.47	0.389	400.000
69	6.78	15.51	11.64	0.250	148.673
	4.32	17.54	9.80	0.441	233.333
	2.76	17.54	7.11	0.595	365.217
ความเข้มข้นสารละลาย ซูโครสเริ่มต้นเฉลี่ย ( กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร)		16.98			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค4. ความเข้มข้นของสารต่างๆที่สภาวะคงตัว ที่สารละลายซูโครสเริ่มต้น 30 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก

อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	อัตราการใช้ (มิลลิลิตรต่อ นาที่)	ความเข้มข้น สารละลาย ซูโครสเริ่มต้น (กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร)	ความเข้มข้น สารละลาย ซูโครสขาออก (กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร)	ค่าการแปลง ผันสารตั้งต้น ไปเป็น ผลิตภัณฑ์ (X)	สเปซไทม์ (วินาที)
38	6.54	32.32	31.03	0.040	154.128
	3.90	32.32	30.32	0.062	258.462
	2.46	33.06	28.87	0.127	409.756
49	6.78	35.70	33.21	0.070	148.673
	4.32	35.60	31.37	0.119	233.333
	2.88	35.60	29.82	0.162	350.000
58	6.42	33.06	28.48	0.139	157.009
	4.02	33.06	26.56	0.197	250.746
	2.82	35.72	22.97	0.357	357.447
69	6.78	35.72	23.79	0.334	148.673
	4.02	35.72	17.86	0.500	250.746
	2.88	35.72	13.65	0.618	350.000
ความเข้มข้นสารละลาย ซูโครสเริ่มต้นเฉลี่ย (กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร)		34.47			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ง.ตัวอย่างการคำนวณ

### ง1. ตัวอย่างการคำนวณหาความเข้มข้นซูโครสจากกราฟมาตรฐานวิเคราะห์ปริมาณ

การวิเคราะห์ปริมาณซูโครสโดยใช้เครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวแบบสมรรถนะสูง (HPLC) นั้นจะได้ค่าออกมาเป็นพื้นที่ฟีกโดยจะต้องนำมาเปลี่ยนเป็นค่าความเข้มข้นซูโครสในหน่วย กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร

เช่น จากตารางที่ ค1. ที่ความเข้มข้นซูโครส 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส อัตราไหล 6.78 มิลลิลิตรต่อนาที มีค่าพื้นที่ฟีกซูโครสเริ่มต้น เท่ากับ 19130 มิลลิโวลต์-วินาที พื้นที่ฟีกกลูโคส เท่ากับ 340 มิลลิโวลต์-วินาที พื้นที่ฟีกฟรุกโตส เท่ากับ 325 มิลลิโวลต์-วินาที และจากรูปที่ ข1. ข2. และ ข3. มีค่าความชันเป็น ดังนี้

$$0.9106 \times 10^{-3} \frac{\text{gSucrose}}{\text{mV.s}}, 0.6913 \times 10^{-3} \frac{\text{gGlucose}}{\text{mV.s}} \text{ และ } 0.7110 \times 10^{-3} \frac{\text{gFructose}}{\text{mV.s}}$$

จะได้ค่าความเข้มข้นซูโครสเริ่มต้น เท่ากับ

$$= 0.9106 \times 10^{-3} \frac{\text{gSucrose}}{\text{mV.s}} \times 18957 \text{ mV.s} = 0.26 \frac{\text{gSucrose}}{100 \text{ ml}}$$

จะได้ค่าความเข้มข้นกลูโคส เท่ากับ

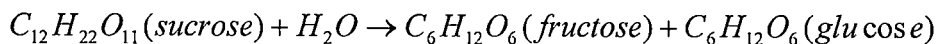
$$= 0.6913 \times 10^{-3} \frac{\text{gGlucose}}{\text{mV.s}} \times 381 \text{ mV.s} = 0.33 \frac{\text{gGlucose}}{100 \text{ ml}}$$

จะได้ค่าความเข้มข้นฟรุกโตส เท่ากับ

$$= 0.7111 \times 10^{-3} \frac{\text{gFructose}}{\text{mV.s}} \times 325 \text{ mV.s} = 0.23 \frac{\text{gFructose}}{100 \text{ ml}}$$

## ง2. ตัวอย่างการคำนวณหาค่าการแปลงผันทางเคมีของซูโครส ( $X_A$ )

จากปฏิกิริยา



ให้เป็นปฏิกิริยา  $A + B \rightarrow C + D$

เช่น ที่ที่ความเข้มข้นซูโครส 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส อัตราไหล 6.78 มิลลิลิตรต่ออนาที มีค่าความเข้มข้นซูโครสเริ่มต้น 17.42 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร และมีความเข้มข้นซูโครสที่สภาวะคงตัว 17.26 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร จะมีค่าการแปลงผันทางเคมีของซูโครส เท่ากับ

$$X_A = \frac{C_{A0} - C_A}{C_{A0}} = \frac{17.42 - 17.26 \frac{g}{100ml}}{17.42 \frac{g}{100ml}} = 0.009$$

## ง3. ตัวอย่างการคำนวณหาค่าสเปซไทม์

ในการทดลองใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ เท่ากับ 16.8 มิลลิลิตร

ค่าสเปซไทม์จากสมการ  $\tau = \frac{V}{v_0}$

เช่น ใช้อัตราการไหล 6.78 มิลลิลิตรต่ออนาที จะมีค่าสเปซไทม์ เท่ากับ

$$\tau = \frac{16.8ml}{6.78 \frac{ml}{min}} \times \frac{60s}{1min} = 148.67s$$

## ง4. ตัวอย่างการคำนวณหาพลังงานกระตุ้นและค่าพรีเอ็กซ์โพเนนเชียลของสมการอาร์เรเนียส

พลังงานกระตุ้น ( $E$ ) และค่าพรีเอ็กซ์โพเนนเชียลของสมการอาร์เรเนียส ( $A$ )

สามารถหาได้จากสมการที่ (36)  $k_A = Ae^{-E/RT}$  โดยการพลอตกราฟระหว่าง  $\ln k$  กับ  $\frac{1}{T}$  ซึ่งค่า  $-\frac{E}{R}$  จะเท่ากับความชันของกราฟและค่า  $\ln A$  จุดตัดแกน  $y$  จะเท่ากับ เช่น ที่ความเข้มข้นซูโครส 16.98 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร จากกราฟที่ 3.7

- สามารถหาความชันของกราฟได้เท่ากับ  $-7229.5K = -\frac{E}{R}$
- จะได้  $E = 7229.50K \times 8.314 \frac{J}{mol.K} = 60106 \frac{J}{mol} = 60.11 \frac{kJ}{mol}$
- และหาจุดตัดแกน  $y$  ได้เท่ากับ  $15.188 = \ln A$
- จะได้  $A = e^{15.188} = 3.95 \times 10^6 \text{ sec}^{-1}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## จ. การทดลองเพิ่มเติม

### จ1. การทดลองเพื่อวิเคราะห์ผลจากตัวกรอง

เนื่องจากตัวกรองซึ่งทำหน้าที่กรองไอออนที่อาจจะมีอยู่ในสารละลาย เพื่อลดการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยานั้น เป็นเรซินแลกเปลี่ยนประจุรูปกรด เช่นเดียวกับในเครื่องปฏิกรณ์ แต่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิห้อง จึงทำการศึกษาผลกระทบจากตัวกรอง โดยตัวกรองที่ใช้มีน้ำหนักประมาณ 4 กรัม

ตารางที่ จ1. ผลการทดลองเพื่อวิเคราะห์ผลจากตัวกรอง

อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที)	ความเข้มข้นสารละลาย ซูโครสเริ่มต้น (กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร)	ความเข้มข้นสารละลาย ซูโครสขาออก (กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร)	ค่าการแปลงผัน สารตั้งต้นไปเป็น ผลิตภัณฑ์ (X)
2.52	21.54	21.46	0.004

พบว่ามีเกิดการเกิดปฏิกิริยาขึ้นที่ตัวกรองค่อนข้างน้อย โดยทำการทดลองที่อัตราการไหลต่ำที่สุด พบว่าเกิดปฏิกิริยาขึ้นเล็กน้อย โดยมีค่าการแปลงผันทางเคมีของซูโครสเท่ากับ 0.004 ที่อัตราไหล 0.042 มิลลิลิตรต่อนาที ซึ่งถือว่ามีผลน้อยมาก จึงสามารถคิดได้ว่าไม่เกิดปฏิกิริยา ณ ตัวกรองนี้

## จ2. การทดลองเพื่อวิเคราะห์ผลจากการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาอาจจะมีการเสื่อมสภาพ จึงทำการตรวจสอบเพื่อดูค่าการแปลงผันทางเคมีของซูโครสจากการทดลองในครั้งแรกแล้วครั้งสุดท้ายซึ่งมีระยะเวลาห่างกันประมาณ 3 เดือน

ตารางที่ จ2. ผลการทดลองเพื่อวิเคราะห์ผลจากการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	อัตราการใช้ ไฮล (มิลลิลิตร ต่อนาที)	การทดลอง	ความเข้มข้น สารละลาย ซูโครสเริ่มต้น (กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร)	ความเข้มข้น สารละลาย ซูโครสขาออก (กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร)	ค่าการแปลงผัน สารตั้งต้นไป เป็นผลิตภัณฑ์ (X)
49	0.067	ครั้งแรก	16.78	13.04	0.223
	0.072	ครั้งสุดท้าย	16.75	13.12	0.221

จากการทดลองพบว่าที่อัตราไฮลและอุณหภูมิใกล้เคียงกัน ค่าการแปลงผันทางเคมีของซูโครส มีค่าใกล้เคียงกันมาก จึงคิดว่าตัวเร่งปฏิกิริยานี้ไม่มีการเสื่อมสภาพในตลอดระยะเวลาการใช้งาน

**Telecommunication Engineering**

1. Resistorless First-Order All-Pass Networks with CCCIs Structure  
*N. Traittanawarapoom M. Somduyukanak and R. Piammee* 7
2. Development Efficiency of RFID System in Frame ALOHA Communication  
*S. Mangmee and S. Sittichivapak* 13

**Electronics**

3. EEPROM Test Time Reduction in Final Test Process  
*W.Nonthathit and I. Arungsaisangchai* 19

**Computer Engineering**

4. Evolving Neural Networks Topology Using Ant Colony System  
*N. Pokudom C. Pinyam and B. Attachoo* 25

**Mechanical Engineering**

5. Performance of The Diesel and Gasoline Engines Using Liquid Petroleum Gas and Compressed Natural Gas  
*K. Boonpreem and C. Charoenphonphanich* 31

**Chemical Engineering**

6. The Integrated Model for Study Fate of Air Pollutants from Wildland Fire in Southeast Asia  
*W. Watanyupaisan and N. Thongboonchoo* 37
7. Wax/Cardanol Co-precipitation in Treated Cashew Nut Shell Liquid  
*S. Promsiti and S. Areeart* 43
8. Kinetics Study of Sucrose Inversion Using Ion Exchange Resin as a Catalyst  
*W. Saksamai C. Teerasaksakulchai C. Chankhanlithiran S. Wattanasusom and D. Na-Ranong* 49

**Instrumentation Engineering**

9. Applying Embedded System to Design Programmable Logic Controller Based on Ethernet Network  
*S. Lertsaree and S. Kulpanich* 55

**Industrial Engineering**

10. The Compression Force at Sidewalls of Container of 2-D Granular Material Under Vertically Vibration  
*S. Kiangboonjiff* 61
11. Feasibility Study of a Natural Gas Station on Chalongsak Road  
*S. Permpoon and S. Pimsakul* 61

**วิศวกรรมโทรคมนาคม**

1. โครงข่ายผ่านทิวทัศน์ความถี่ขึ้นต้นที่มิได้ใช้ด้านหน้าด้วยโครงสร้างของ CCCIs  
*นพกร ไตรรัตน์วารวณ มนต์รี สมุดยุคนก ทิพนัน พรหมณี* 7
2. การพัฒนาประสิทธิภาพของระบบ RFID ที่มีการสื่อสารแบบ Frame ALOHA  
*ศรัยพัช มั่งมี สุวิมล สิริวิชฌานา* 13

**อิเล็กทรอนิกส์**

3. การลดเวลาในการทดสอบหน่วยความจำประเภท EEPROM ที่กระบวนการทดสอบขั้นสุดท้าย  
*วิภาสา นนทฤทธิ อธิติชัย อรุณศรีแสงไชย* 19

**วิศวกรรมคอมพิวเตอร์**

4. การหาค่าแบบโครงสร้างประสาทเทียมด้วยวิธีระบบเอเจนตามิต  
*นิกร ไทคุดอม เอื้อน มีนเงิน บุญวัฒน์ อติชัย* 25

**วิศวกรรมเครื่องกล**

5. ผลกระทบของเครื่องฉีดเชื้อเพลิงแบบเบนซินที่ใช้เชื้อเพลิงก๊าซปิโตรเลียมเหลว และก๊าซธรรมชาติอัด  
*ไกรสร บุญปรมรัมย์ จันดา เจริญพรพาวณีย์* 31
6. แบบจำลองแบบบูรณาการเพื่อศึกษาความเป็นไปของมลพิษทางอากาศจากไฟฟ้าในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้  
*วาทิต ขวัญใหญ่ไพศาล นริศรา ทองบุญชู* 37
7. การศึกษาลักษณะการเกิดคาร์บอนเอทาลีนในน้ำมันจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ปรีสภาพ  
*เศรษฐกร พรหมศิริ สุรัตน์ อภรัตน์* 43
8. Kinetics Study of Sucrose Inversion Using Ion Exchange Resin as a Catalyst  
*Walailat Saksamai Chalida Teerasaksakulchai Chonlasek Chankhanlithiran Sani Wattanasusom Duangkamol Na-Ranong* 49

**วิศวกรรมการวัดคุม**

9. การประยุกต์ใช้กล้องจุลทรรศน์สำหรับตรวจสอบแบบ PLC บนเครือข่ายอีเธอร์เน็ต  
*ศานดา เลิศไกร สุพรรณ กุลพาวณีย์* 55

**วิศวกรรมอุตสาหกรรม**

10. แรงกดที่ผนังด้านข้างภายในของระบบบรรจุเม็ดพลาสติกชนิดกลมแข็ง 2 มิติภายใต้การสั่นแรง  
*สกนธ์ คล่องบุญจิต* 61
11. การศึกษาความเป็นไปได้ของการจัดตั้งสถานีบริการก๊าซธรรมชาติบนถนนลาดกระบัง  
*สินชัย เทียนชู สิริพิพร ทิมพิศกุล*

ฉบับนี้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

เพื่อให้ตัดแบ่งลงเพื่อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีโอกาสไม่ให้เกิด

# Kinetics Study of Sucrose Inversion Using Ion Exchange Resin as a Catalyst

Walairat Suksamai Chalida Teerasaksakulchai Chonlasek Chankhanithiran  
Santi Wattananusorn and Duangkamol Na-Ranong

Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

## Abstract

In this work, kinetics of sucrose inversion in a packed-bed reactor using an acidic cation-exchange resin as a catalyst was studied. The reaction was carried out over the temperature range of 40-70°C with the sucrose inlet concentration varied from 0.15 to 0.40 g of sucrose/ml of water. The observed rate of reaction appeared to be a first order reaction with the apparent activation energy of 60.1kJ/mol. Furthermore, the experimental result shows that it should have the effect of internal mass transfer involved in the sucrose inversion process. The estimated values of Thiele modulus at 50, 60 and 70°C are about 8.2, 11.2 and 17.9 with effectiveness factors at 50, 60 and 70°C about 0.321, 0.244 and 0.158, respectively.

**Keywords:** Ion exchange resin, Packed-bed reactor, Mass transfer, Kinetics

## 1. Introduction

The inversion of sucrose by a cation exchange resin has been investigated for more than five decades [1]. Bodamer and Kunin [2] were an early group that studied the sucrose inversion by the hydrogen form – acidic cation exchange resin in a batch-stirred reactor. They reported that sulfonic resin was much more effective in catalysing the reaction than carboxylic one. Furthermore, they found that inversion rate increased with decreasing resin particle size and porosity and explained this phenomenon by the occurrence of internal mass transfer limiting the reaction rate. Reed and Dranoff [3] investigated the sucrose inversion in a fixed-bed reactor packed with Amberlite IR-120, an acidic cation exchange resin in hydrogen form. They reported that the reaction was first-order with activation energy of 15,950 cal/mol (about 67 kJ/mol). They also reported that diffusion within resin particles influenced the observed reaction rate while the external mass transfer was not significant for the observed conditions. Lifshutz and Dranoff [4] also studied the inversion of sucrose in fixed beds of cation exchange resin. They observed that the reaction deviated from first-order because of product degradation. In addition, kinetics of sucrose inversion catalysed by various particle sizes and shapes of Amberlite and Dowex cation exchange resins was investigated by Gilliland et al [5]. Their result indicated that Dowax was slightly

more active than Amberlite because of its larger pores. Moreover, in the literature, parameters described catalytic behaviour of resins such as effectiveness factor, Thiele modulus, activation energy and sucrose diffusivity were illustrated. Effective diffusivity of sucrose in a hydrogen form – ion exchange resin was also estimated by Khan and Rahman [6]. Additionally, Khan and Rahman calculated intrinsic rate and activation energy of sucrose inversion by eliminating the effect of internal mass transfer from the observed rate and activation energy. The result showed that internal mass transfer could lower the intrinsic activation energy with respect to the chemical reaction by about 30%. They also found that external mass transfer became significant at high sucrose solution concentration.

In this paper, the kinetics of sucrose inversion using an acidic cation exchange resin, named Lewatit MonoPlus S100, are studied in terms of an order of reaction and observed activation energy. Furthermore, effectiveness factor and Thiele modulus are estimated using some required parameters from literature. A tubular reactor packed with the ion exchange resin was used in this study. The reason of using this kind of reactor is that the main advantage over other types of reactor is the higher conversion per weight of catalyst. As a result, in commercial, the sucrose inversion process via the tubular reactor using

ion exchange resin as a catalyst should have a lower capital cost. Moreover, the operating cost of this kind of reactor should be lower.

**2. Experimental**

The ion-exchange resin used as a catalyst in this study was a strongly acidic gelular cation exchange resin in the sodium form (Lewatit MonoPlus S100). Physical properties of the resin are illustrated in Table 1.

Table 1. Physical properties of the resin.

Mean bead size (mm)	0.58
Bulk density (g/l)	820
Operating pH range	0-14
Max. operating temp. (°C)	120

Before packing in the reactor, the resin was regenerated by passing 1000 ml of 8 %v/v of hydrochloric acid aqueous solution through the resin and then flowing deionised water through the resin until pH of the effluent water was about 7. After the regeneration, the resin was changed into hydrogen form and therefore capable to catalyse the sucrose inversion.

Sucrose solutions were prepared by dissolving required proportional commercial grade sugar (Mitrophol) in de-ionised water. The exact composition of the sucrose solutions were analysed by a high performance liquid chromatograph (HPLC) with a refractive index detector (RI 150).

Figure 1 shows a schematic diagram of the experimental apparatus used in this study.

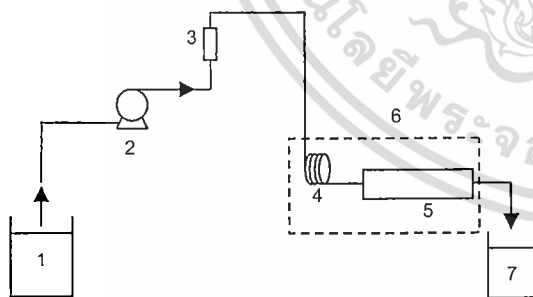


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental apparatus. (1) Reactant container, (2) Pump, (3) Reactant pretreated column, (4) Copper coil, (5) Packed-bed reactor, (6) Temperature controlled water bath, (7) Product container.

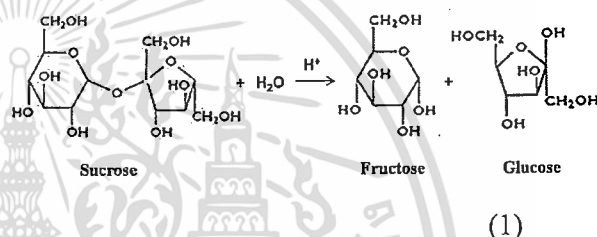
The sucrose solution was pumped through the pretreated column containing the ion-exchange resin in order to remove impurity ions in the solution. Then, the solution was passed through a copper coil immersed in a

temperature controlled water bath to heat the solution up to the required temperature. After that, the sucrose solution was fed into a packed-bed reactor made from a 1/2-inch i.d. stainless steel tube packed with the ion-exchange resin. The reactor was also immersed in the water bath. Finally, the reactor effluent was collected in a beaker.

The experiments were carried out at 40, 50, 60 and 70°C with the sucrose solution concentration of 0.17 and 0.35 g of sucrose/ml of water and feed rate varied from around 2.5 to 7 ml/min. The composition of reaction products was analysed by HPLC.

**3. Results and discussion**

The sucrose inversion reaction can be expressed as follows:



To estimate the order of reaction, the rate of reaction was assumed to be in the form of Equation (2).

$$-r_s = kC_s^n \tag{2}$$

According to Eq. (2), the relationship between the conversion of sucrose ( $X_s$ ) and space time ( $\tau$ ) with respect to zeroth-, first- and second-order kinetics ( $n = 0, 1$  and  $2$ ) can be expressed as in Eqs. (3), (4) and (5), respectively.

$$X_s = \frac{k}{C_{s0}} \tau \tag{3}$$

$$\ln \left( \frac{1}{1-X_s} \right) = k\tau \tag{4}$$

$$\frac{1}{1-X_s} = kC_{s0}\tau \tag{5}$$

Typically, an order of reaction is estimated by finding a plot of proper function of  $X_s$  versus  $\tau$  that provides linear relation.

Here, the functions of  $X_s$ , i.e.  $X_s$ ,  $\ln[1/(1-X_s)]$  and  $1/(1-X_s)$ , corresponding to zeroth-, first- and second-order, respectively, were considered. The plots of zeroth-order relation ( $X_s$  vs.  $\tau$ ), first-order relation ( $\ln[1/(1-X_s)]$  vs.  $\tau$ ) and second-order relation ( $1/(1-X_s)$  vs.  $\tau$ ) are shown in Figs. 2, 3 and 4, respectively.

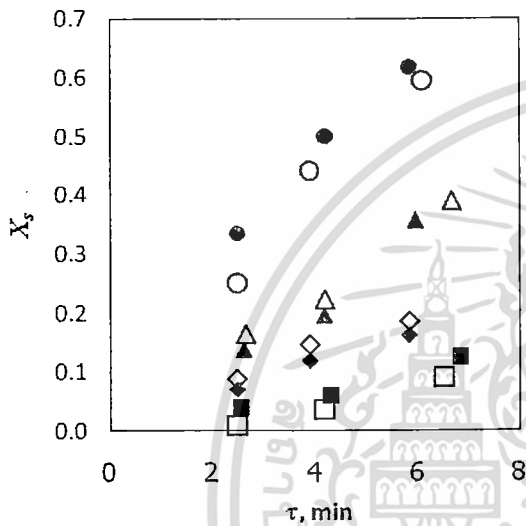


Fig. 2. Zeroth-order plot for 0.17 g of sucrose/ml of water at (o) 40°C, ( $\Delta$ ) 50°C, ( $\diamond$ ) 60°C and ( $\square$ ) 70°C and 0.35 g of sucrose/ml of water at ( $\bullet$ ) 40°C, ( $\blacktriangle$ ) 50°C, ( $\blacklozenge$ ) 60°C and ( $\blacksquare$ ) 70°C.

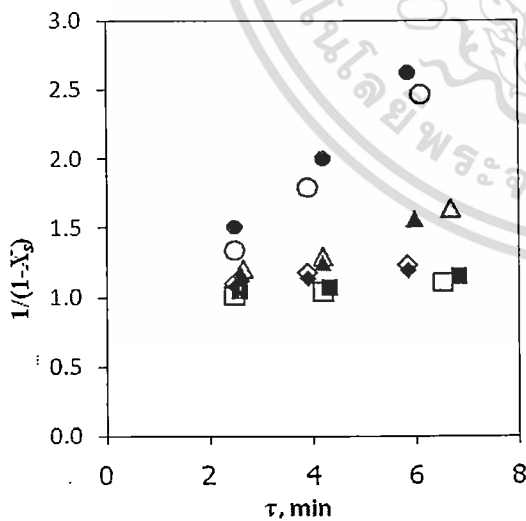


Fig. 3. First-order plot for 0.17 g of sucrose/ml of water at (o) 40°C, ( $\Delta$ ) 50°C, ( $\diamond$ ) 60°C and ( $\square$ ) 70°C and 0.35 g of sucrose/ml of water at ( $\bullet$ ) 40°C, ( $\blacktriangle$ ) 50°C, ( $\blacklozenge$ ) 60°C and ( $\blacksquare$ ) 70°C.

As seen in the figures, at each reaction temperature and sucrose inlet concentration, almost all plots corresponding to zeroth-, first-

and second-order relation seem to be linear. This means that we cannot identify the order of reaction from this method. Therefore, here in this work, the order of reaction was determined from the concept that, at each reaction temperature, the rate constant,  $k$ , must be the same even the sucrose inlet concentration is changed.

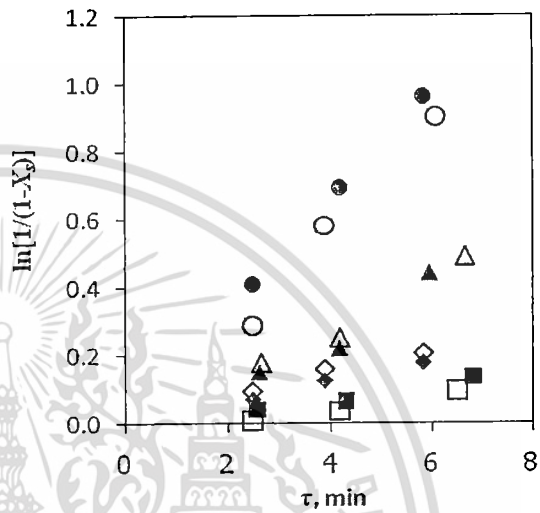


Fig. 4. Second-order plot for 0.17 g of sucrose/ml of water at (o) 40°C, ( $\Delta$ ) 50°C, ( $\diamond$ ) 60°C and ( $\square$ ) 70°C and 0.35 g of sucrose/ml of water at ( $\bullet$ ) 40°C, ( $\blacktriangle$ ) 50°C, ( $\blacklozenge$ ) 60°C and ( $\blacksquare$ ) 70°C.

Theoretically, based on Eq. (3), if we assume that the reaction is in zeroth order, the ratio of the slope of the zeroth-order plot ( $X_s$  vs.  $\tau$ ) corresponding to the sucrose inlet concentrations of  $[C_{s0}]_1$  and  $[C_{s0}]_2$  should be expressed as in Eq. (6).

$$\frac{\text{Slope of the } 0^{\text{th}} \text{ - order plot at sucrose inlet concentration of } [C_{s0}]_1}{\text{Slope of the } 0^{\text{th}} \text{ - order plot at sucrose inlet concentration of } [C_{s0}]_2} = \frac{k}{k} = \frac{[C_{s0}]_2}{[C_{s0}]_1} \quad (6)$$

In the similar way, the ratios of the slope of the first- and second-order plots of the sucrose inlet concentrations of  $[C_{s0}]_1$  and  $[C_{s0}]_2$  should follow Eqs. (7) and (8), respectively.

$$\frac{\text{Slope of the 1}^{\text{st}} - \text{order plot at sucrose inlet concentration of } [C_{s0}]_1}{\text{Slope of the 1}^{\text{st}} - \text{order plot at sucrose inlet concentration of } [C_{s0}]_2} = \frac{k}{k} = 1 \quad (7)$$

$$\frac{\text{Slope of the 2}^{\text{nd}} - \text{order plot at sucrose inlet concentration of } [C_{s0}]_1}{\text{Slope of the 2}^{\text{nd}} - \text{order plot at sucrose inlet concentration of } [C_{s0}]_2} = \frac{k[C_{s0}]_1}{k[C_{s0}]_2} = \frac{[C_{s0}]_1}{[C_{s0}]_2} = 0.49 \quad (8)$$

In this work, the experiments were performed with two sucrose inlet concentrations i.e. 0.17 and 0.35 g of sucrose/ml of water. This means that if the reaction is in zeroth order, the ratio of the slope in Eq. (6) should equal to 2.06 while the ratios in Eq. (7) for first-order assumption and Eq. (8) for second-order assumption should be equivalent to 1 and 0.49, respectively.

From the experimental results, the estimated slopes and ratios of slopes of the zeroth-, first- and second-order plots in Figs. (2) – (4) are shown in Tables 2, 3 and 4 respectively.

**Table 2.** Slopes and ratios of slopes of the zeroth-order plots.

T (°C)	Slope [ml H <sub>2</sub> O/g sucrose/min] of the zeroth-order plot at the sucrose inlet concentration of		Ratios of slopes
	0.17 g sucrose/ml H <sub>2</sub> O	0.35 g sucrose/ml H <sub>2</sub> O	
40	0.021	0.021	1.000
50	0.028	0.027	1.037
60	0.057	0.066	0.864
70	0.094	0.084	1.119

**Table 3.** Slopes and ratios of slopes of the first-order plots.

T (°C)	Slope [ml H <sub>2</sub> O/g sucrose/min] of the first-order plot at the sucrose inlet concentration of		Ratios of slopes
	0.17 g sucrose/ml H <sub>2</sub> O	0.35 g sucrose/ml H <sub>2</sub> O	
40	0.022	0.023	0.957
50	0.033	0.031	1.065
60	0.079	0.088	0.898
70	0.169	0.166	1.018

**Table 4.** Slopes and ratios of slopes of the second-order plots.

T (°C)	Slope [ml H <sub>2</sub> O/g sucrose/min] of the second-order plot at the sucrose inlet concentration of		Ratios of slopes
	0.17 g sucrose/ml H <sub>2</sub> O	0.35 g sucrose/ml H <sub>2</sub> O	
40	0.023	0.025	0.920
50	0.038	0.035	1.086
60	0.112	0.119	0.941
70	0.314	0.332	0.946

As mentioned above, the ratio of slopes of the plots obtained from the experimental data should match with the ratios of slopes calculated from Eqs. (6) – (8), i.e. the ratio of slopes of zeroth-order plot should be close to 2.06, if the reaction is in zeroth order while the ratio of slopes of first-order plot should be approximately 1, if the reaction is in first order. In the case that the reaction is in second order, the ratio of slopes of second-plots should be about 0.49.

By considering the results in Tables 2, 3 and 4, we found that the ratios of slopes of the plots that mostly match with the theoretical value are the result of the first-order plot (the ratio of slopes in every temperature is close to unity). This means this reaction should be the first-order one which is in agreement with the result of Reed and Dranoff [3].

From the first-order relation in Eq. (4), the rate constant data at each reaction temperature and sucrose inlet concentration can be obtained from the slope of the plot shown in the second and third columns of Table 3. Therefore, the activation energy corresponding to the sucrose inversion can be determined from the slope of the Arrhenius plot as in Fig. 5. It can be seen that the data corresponding to the inversion of 0.17 and 0.35 g of sucrose/ml of water are not significantly different which means the activation energy is not dependent on the initial concentration of sucrose. This is in perfect agreement with theory i.e. a reaction rate constant only depends on temperature. Hence, we can say that the experimental data are reliable. The activation energy obtained from this plot is about 60.1 kJ/mol. Gilliland et al. [5] studied the kinetics of sucrose inversion using Dowex 50-X8, acidic cation exchange resin in the hydrogen form. They reported that the activation energy calculated from the overall rate constant of sucrose inversion using

the resin bead diameter of 0.55 mm as a catalyst was about 75 kJ/mol. We can see that the activation energy reported by Gilliland et al. is higher than that in this work. The lower activation energy should be explained by the difference in physical properties such as particularly resin bead size and porosity [2, 5]. However, the size of resin used in this work is not considerably different from that of the resin used in Gilliland et al. work. Therefore, we assume that, in comparison with Gilliland et al. work, the lower activation energy observed in this work may be affected by less porosity of Lewatit Mono Plus S100. To prove this assumption, the porosity of Lewatit Mono Plus S100 and Dowex 50-X8 should be further measured and compared.

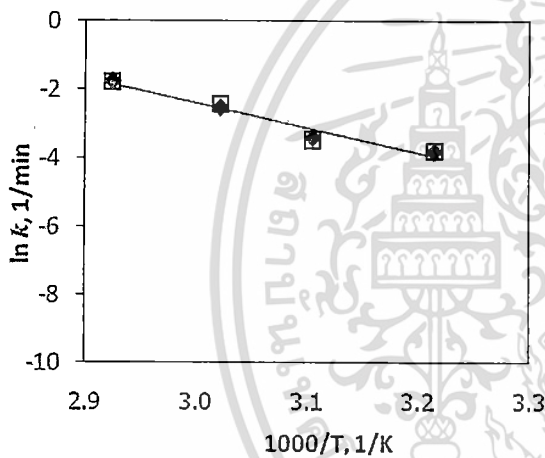


Fig. 5. Arrhenius plot of observed rate constants in the inversion of (♦) 0.17 g of sucrose/ml of water and (□) 0.35 g of sucrose/ml of water.

To verify the effect of mass transfer on the reaction as reported by many researchers [2-6], the rate of reaction was measured at different sucrose feed flowrates (varied from 2 – 6 g/min) with the fixed space time of 2.19 min. The results are illustrated in Fig. 6. It seems that the reaction rate increases with increasing the feed flowrate. This should be because over this range of mass flowrate, it still has mass transfer effect involving in the reaction rate and hence, confirming the results from literature.

Since particle Reynolds number ( $D_p u \rho / \mu$ ) with respect to this work was very low i.e. varied from 0.06 – 0.30, external mass transfer effect should not be important [3, 5]. Therefore, the majority of

mass transfer influencing the reaction rate should be by pore diffusion.

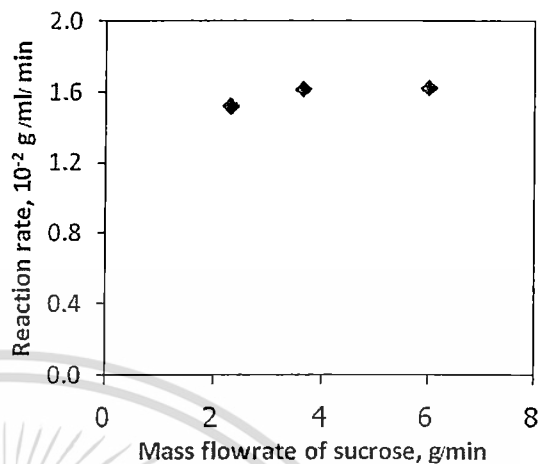


Fig. 6. Effect of mass flowrate of sucrose on observed reaction rate.

Thiele modulus ( $\phi$ ) and effectiveness factor ( $\eta$ ), the parameters that describe the catalyst behaviour can be estimated from the following equations.

$$\phi = R_p \sqrt{\frac{k_i}{D}} \quad \phi = R_p \sqrt{\frac{k_i}{D}} \quad (9)$$

$$\eta = \frac{3}{\phi} \left[ \frac{1}{\tanh \phi} - \frac{1}{\phi} \right] \quad \eta = \frac{3}{\phi} \left[ \frac{1}{\tanh \phi} - \frac{1}{\phi} \right] \quad (10)$$

However, due to a lack of data of intrinsic reaction rate constant ( $k_i$ ) and sucrose effective diffusivity ( $D$ ), Thiele modulus is unable to calculate directly from Eq. (9). According to the assumption of Gilliland et al. i.e. in the case that the effective diffusivity of sucrose with the resin as well as intrinsic rate constant are unknown and the former parameter does not depend on the resin bead size, the relationship between Thiele modulus and resin bead radius of two bead sizes can be calculated from the following equation.

$$\frac{\phi_1}{\phi_2} = \frac{R_1}{R_2} \quad (11)$$

Therefore, by using data of Dowex 50W-X8 [5], the ion exchange resin which has the functional group and physical properties close

to the resin used in this work, the Thiele modulus with respect to the resin in this work at 50, 60 and 70°C should be about 8.2, 11.2 and 17.9, respectively. With these values of Thiele modulus, the effectiveness factors calculated from Eq. (10) at 50, 60 and 70 °C are 0.321, 0.244 and 0.158, respectively.

#### 4. Conclusion

The sucrose inversion within the cation exchange resin named Lewatit Mono Plus S100 were investigated in this work. From the experimental data, the observed reaction rate appeared to be first order with the observed activation energy of 60.1 kJ/mol. The evidence of internal mass transfer effect was illustrated to support the conclusion reported by several investigators. With some required data from the literature, Thiele modulus with respect to Lewatit Mono Plus S100 at 50, 60 and 70°C were estimated to be 8.2, 11.2 and 17.9. The effectiveness factors were also estimated from Thiele modulus. At 50, 60 and 70 °C, the calculated effectiveness factors were 0.321, 0.244 and 0.158, respectively.

#### 5. Acknowledgement

The authors would like to thank the Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang for the financial support.

#### 6. Nomenclature

- $C_s$  = concentration of sucrose, g/ml  
 $C_{s0}$  = initial concentration of sucrose  
 $D$  = effective diffusivity, cm<sup>2</sup>/s  
 $D_p, D_p$  = diameter of resin bead, mm  
 $k$  = observed rate constant  
 $k_i$  = intrinsic chemical rate constant  
 $n$  = order of reaction  
 $R_p$  = radius of resin bead, mm  
 $r_s$  = observed reaction rate, g/ml/min  
 $u$  = fluid velocity, cm/s  
 $X_s$  = conversion of sucrose  
 $\tau$  = space time, min  
 $\eta$  = effectiveness factor  
 $\phi$  = Thiele modulus  
 $\mu$  = sucrose solution viscosity, P  
 $\rho$  = sucrose solution density, g/ml

#### 7. References

- [1] R. Kunin and G. Bodamer, "Ion Exchange", *Ind. Eng. Chem.*, 1959, 51(3): p. 373-377.
- [2] G. Bodamer and R. Kunin, "Heterogeneous Catalytic Inversion of Sucrose with Cation Exchange Resins", *Ind. Eng. Chem.*, 1951, 43(5): p. 1082-1085.
- [3] E.W. Reed and J.S. Dranoff, "Ion Exchange Resin Catalysis of Sucrose Inversion in Fixed Beds", *Ind. Eng. Chem. Fundamen.*, 1964, 3(4): p. 304-307.
- [4] N. Lifshutz and J.S. Dranoff, "Inversion of Concentrated Sucrose Solutions in Fixed Bed of Ion Exchange Resin", *Ind. Eng. Chem. Fundamen.*, 1968, 7(2): p. 266-269.
- [5] E.R. Gilliland, H.J. Bixler and J.E. O'Connell, "Catalysis of Sucrose Inversion in Ion-Exchange Resins", *Ind. Eng. Chem. Fundamen.*, 1971, 10(2): p. 185-191.
- [6] S.H. Khan and K. Rahman, "Inversion of Sucrose Solution by Ion Exchange: Evaluation of Reaction Rate and Diffusivity", *Chem. Eng. Journal*, 1996, 61: p. 7-12.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้