



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)

ปริญญญา

วิศวกรรมเคมี

วิศวกรรมเคมี

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การศึกษาผลกระทบของสายป้อนกลับเพื่อการแยกกลูโคสกับฟรุคโทสโดยใช้ระบบเบดเคลื่อนที่จำลอง

Effect of Recycling on the Separation of Glucose/Fructose Mixture Using Simulated Moving Bed

นามผู้วิจัย นางสาวกชกร รุ่งเรือง

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์อรรถศักดิ์ จาริย์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์ผ่องแผ้ว พรรณวุฒิ, D.Sc.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์อภิญญา ดวงจันทร์, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญจนา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาผลกระทบของสายป้อนกลับเพื่อการแยกกลูโคสกับฟรุคโทสโดยใช้
ระบบเบดเคลื่อนที่จำลอง

Effect of Recycling on the Separation of Glucose/Fructose Mixture
Using Simulated Moving Bed

โดย

นางสาวกชกร รุ่งเรือง

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)

พ.ศ. 2554

กชกร รุ่งเรือง 2554: การศึกษาผลกระทบของสายป้อนกลับเพื่อการแยกกลูโคสกับ
ฟรักโทสโดยใช้ระบบเบดเคลื่อนที่จำลอง ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
(วิศวกรรมเคมี) สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์อรรถศักดิ์ จารีย์, Ph.D. 81 หน้า

การแยกสารด้วยระบบเบดเคลื่อนที่จำลอง เป็นกระบวนการแยกสารอย่างต่อเนื่องด้วย
คอลัมน์โครมาโทกราฟีหลายคอลัมน์ ในงานวิจัยนี้ได้นำเทคนิคนี้มาใช้ในการแยกน้ำตาล
ฟรักโทสและน้ำตาลกลูโคสออกจากกันโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้งในกรณีที่มีสาย
ป้อนกลับและไม่มีสายป้อนกลับ ทั้งยังศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการแยกน้ำตาลกลูโคสและน้ำตาล
ฟรักโทส ได้แก่ ความยาวคอลัมน์ เวลาของการสลับ และจำนวนคอลัมน์ในระบบ จากการศึกษา
ผลกระทบของการมีสายป้อนกลับทั้งจากสายผลิตภัณฑ์ extract และ raffinate พบว่าการมีการ
ป้อนกลับจะส่งผลให้ปริมาณการผลิตได้มีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้การศึกษาผลกระทบของความยาว
คอลัมน์ในช่วง 0.3-1.2 เมตร และเวลาของการสลับ 68-273 วินาที โดยที่ไม่มีสายป้อนกลับ พบว่า
ผลจากความยาวของคอลัมน์และเวลาของการสลับค่าความบริสุทธิ์จะมีค่าสูงที่สุดที่ความยาว
คอลัมน์ 1.2 เมตร เวลาของการสลับ 273 วินาที ปริมาณการผลิตได้ของสารสูงที่สุดที่ความยาว
คอลัมน์ 0.3 เมตร เวลาของการสลับ 68 วินาที ตามลำดับ จากการศึกษาผลกระทบของจำนวน
คอลัมน์ในระบบ พบว่าค่าความบริสุทธิ์มีค่าสูงสุดเมื่อจำนวนคอลัมน์ในระบบมีจำนวน 12 คอลัมน์
และปริมาณการผลิตได้สูงสุดเมื่อจำนวนคอลัมน์ในระบบมีจำนวน 4 คอลัมน์

Kotchakorn Rungruang 2011: Effect of Recycling on the Separation of Glucose/Fructose Mixture Using Simulated Moving Bed. Master of Engineering (Chemical Engineering), Major Field: Chemical Engineering, Department of Chemical Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Attasak Jaree, Ph.D. 81 pages.

Simulated moving bed (SMB), a continuous multi-column chromatographic process, was used to separate glucose and fructose. Through a computational study, a recycle stream was added to the SMB in order to compare the separation performance with that of the conventional SMB. Effects of process parameters were studied including column length, switching time, and the number of columns. Results showed that both extract recycling and raffinate recycling provided higher productivity and lower product purity. For the effect of column length (0.3-1.2 m) and switching time (68-273 s) without recycling, the highest purity was obtained when the column length =1.2 m and switching time=273 s. On the other hand, the highest productivity was obtained when the column length=0.3 m and switching time=68 s. Finally, for the effect of number of columns, 4-column SMB gave the highest productivity and 12-column SMB gave the highest product purity.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.อรรถศักดิ์ จารีย์ ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ฝั่งผาย พรรณวดี กรรมการที่ปรึกษาสาขาวิชาเอก ที่ให้คำปรึกษาในการเรียน การค้นคว้าวิจัย ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ ขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.พัชรินทร์ วรชนกุล ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก และ ผศ.ดร.กานติส สุดสาคร ประธานการสอบ ที่ได้สละเวลาเพื่อเป็นกรรมการในการสอบพร้อมทั้งให้คำแนะนำต่างๆ และกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.กัญจนา ชีระกุล ผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัย ที่ได้ให้ความกรุณาตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเคมีทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนและมอบความรู้อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมเคมีทุกท่าน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำต่างๆ

ขอขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมีและวัสดุขั้นสูง ที่สนับสนุนทุนการศึกษา

ขอขอบคุณ คุณภัทราพันธ์ พันธุ์ทิมดวง และ คุณวรภัทร ศศิบุตร ที่คอยให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือเกี่ยวกับการใช้โปรแกรมต่างๆ

ขอขอบคุณ คุณรัชนิดา กุสสว่างศรี และ คุณอรนุช กังแฮ สำหรับคำปรึกษาด้านภาษาอังกฤษ และคำแนะนำต่างๆ

ขอขอบคุณ คุณศราวุฒิ เมทนีดล สำหรับกำลังใจ คำแนะนำและความช่วยเหลือที่มอบให้เสมอมา

ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแด่คุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัว ที่ได้อบรมและให้กำลังใจผู้วิจัยมาตลอดในทุกเรื่อง

กชกร รุ่งเรือง

พฤษภาคม 2554

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(9)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	37
อุปกรณ์	39
วิธีการ	39
ผลและวิจารณ์	41
สรุปและข้อเสนอแนะ	55
สรุป	55
ข้อเสนอแนะ	56
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	57
ภาคผนวก	61
ภาคผนวก ก ตัวอย่างการคำนวณ	62
ภาคผนวก ข ผลการทดลองจากการมีสายป้อนกลับจากสายผลิตภัณฑ์ raffinate	65
ภาคผนวก ค ผลการทดลองจากการมีสายป้อนกลับจากสายผลิตภัณฑ์ extract	73
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	81

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	กำลังการผลิตน้ำตาลในประเทศไทยระหว่างปี 2000 และ 2008	5
2	ค่าความหวานของน้ำตาลชนิดต่างๆ	15
3	เปรียบเทียบการแยกสารด้วยวิธีแบทช์โครมาโทกราฟี (batch chromatography) และระบบเบดเคลื่อนที่จำลอง(SMB)	27
4	ค่าสภาวะการทดสอบ (Operating Condition)	36

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 การส่งออกน้ำตาลรายใหญ่ของโลก ปีการผลิต 2541/42	4
2 กระบวนการผลิตน้ำตาล	8
3 โครงสร้างทางเคมีของน้ำตาลกลูโคส	17
4 กระบวนการผลิตกลูโคสเหลวและกลูโคสผง	19
5 การทำงานของระบบเบดเคลื่อนที่จริง (true moving-bed, TMB)	23
6 ส่วนต่างๆ ของระบบเบดเคลื่อนที่เบดจำลอง	24
7 แบบจำลองการทำงานของระบบเบดเคลื่อนที่จำลองในชั้นที่ 1	25
8 แบบจำลองการทำงานของระบบเบดเคลื่อนที่จำลองในชั้นที่ 2	25
9 แบบจำลองการทำงานของระบบเบดเคลื่อนที่จำลองในชั้นที่ 3	26
10 การทำงานของเบดเคลื่อนที่จำลองแบบมีสายป้อนกลับจากสายผลิตภัณฑ์ raffinate	38
11 การทำงานของเบดเคลื่อนที่จำลองแบบมีสายป้อนกลับจากสายผลิตภัณฑ์ extract	38
12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับเวลาที่มีสายป้อนกลับจากสาย raffinate: (ก) สายผลิตภัณฑ์ extract (ข) สายผลิตภัณฑ์ raffinate	42
13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับตำแหน่งต่างๆของคอลัมน์ที่ไม่มีสายป้อนกลับ	43
14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบริสุทธิ์และปริมาณการผลิตสารได้ที่สภาวะ $L=0.9$ เมตร, $t_r=198$ วินาที มีการป้อนกลับจากสาย raffinate (ก) น้ำตาลฟรักโทสในสาย extract (ข) น้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate	44
15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบริสุทธิ์และปริมาณการผลิตสารได้ที่สภาวะ $L=1.2$ เมตร, $t_r=198$ วินาที มีการป้อนกลับจากสาย raffinate (ก) น้ำตาลฟรักโทสในสาย extract (ข) น้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate	46

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
16	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบริสุทธิ์และปริมาณการผลิตสารได้ ที่สภาวะ $L=1.2$ เมตร, $t_s=198$ วินาที มีการป้อนกลับจากสาย raffinate (ก) น้ำตาลฟรักโทสในสาย extract (ข) น้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบริสุทธิ์และปริมาณการผลิตสารได้ที่มี สายป้อนกลับจากสายผลิตภัณฑ์ extract (ก) $L=0.6$, $t_s=198$ ของสาย ผลิตภัณฑ์ extract (ข) $L=0.6$, $t_s=198$ ของสายผลิตภัณฑ์ raffinate (ค) $L=0.6$, $t_s=273$ ของสายผลิตภัณฑ์ extract (ง) $L=0.6$, $t_s=273$ ของสายผลิตภัณฑ์ raffinate (จ) $L=0.9$, $t_s=273$ ของสายผลิตภัณฑ์ extract (ฉ) $L=0.9$, $t_s=273$ ของสายผลิตภัณฑ์ raffinate 48
17	ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของคอลัมน์ที่ค่าเวลาของการสลับต่างกัน (ก) ค่าความบริสุทธิ์ (ข) ปริมาณการผลิตได้ของน้ำตาลฟรักโทสในสาย extract 50
18	ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของคอลัมน์ที่ค่าเวลาของการสลับต่างกัน (ก) ค่าความบริสุทธิ์ (ข) ปริมาณการผลิตได้ของน้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate 51
19	ความสัมพันธ์ระหว่างความบริสุทธิ์และปริมาณการผลิตได้กับจำนวนของ คอลัมน์ (ก) สายผลิตภัณฑ์ extract (ข) สายผลิตภัณฑ์ raffinate 53
20	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบริสุทธิ์และปริมาณการผลิตสารได้ที่จำนวน คอลัมน์ 12 คอลัมน์ มีการป้อนกลับจากสาย raffinate (ก) น้ำตาลฟรักโทส ในสาย extract (ข) น้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate 54

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ก1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับเวลาในสายผลิตภัณฑ์ extract ที่มีสายป้อนกลับจากสาย raffinate	63
ข1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบริสุทธิ์และปริมาณการผลิตสารได้ที่สภาวะ $L = 0.3$ เมตร, $t_s = 68$ วินาที มีการป้อนกลับจากสาย raffinate (ก) น้ำตาลฟรักโทสในสาย extract (ข) น้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate	66
ข2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบริสุทธิ์และปริมาณการผลิตสารได้ที่สภาวะ $L = 0.3$ เมตร, $t_s = 136$ วินาที มีการป้อนกลับจากสาย raffinate (ก) น้ำตาลฟรักโทสในสาย extract (ข) น้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate	66
ข3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบริสุทธิ์และปริมาณการผลิตสารได้ที่สภาวะ $L = 0.3$ เมตร, $t_s = 198$ วินาที มีการป้อนกลับจากสาย raffinate (ก) น้ำตาลฟรักโทสในสาย extract (ข) น้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate	67
ข4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบริสุทธิ์และปริมาณการผลิตสารได้ที่สภาวะ $L = 0.3$ เมตร, $t_s = 273$ วินาที มีการป้อนกลับจากสาย raffinate (ก) น้ำตาลฟรักโทสในสาย extract (ข) น้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate	67
ข5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบริสุทธิ์และปริมาณการผลิตสารได้ที่สภาวะ $L = 0.6$ เมตร, $t_s = 68$ วินาที มีการป้อนกลับจากสาย raffinate (ก) น้ำตาลฟรักโทสในสาย extract (ข) น้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate	68
ข6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบริสุทธิ์และปริมาณการผลิตสารได้ที่สภาวะ $L = 0.6$ เมตร, $t_s = 136$ วินาที มีการป้อนกลับจากสาย raffinate (ก) น้ำตาลฟรักโทสในสาย extract (ข) น้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate	68

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ข7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบริสุทธิ์และปริมาณการผลิตสารได้ที่สภาวะ $L = 0.6$ เมตร, $t_s = 198$ วินาที มีการป้อนกลับจากสาย raffinate (ก) น้ำตาล ฟรักโทสในสาย extract (ข) น้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate	69
ข8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบริสุทธิ์และปริมาณการผลิตสารได้ที่สภาวะ $L = 0.6$ เมตร, $t_s = 273$ วินาที มีการป้อนกลับจากสาย raffinate (ก) น้ำตาล ฟรักโทสในสาย extract (ข) น้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate	69
ข9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบริสุทธิ์และปริมาณการผลิตสารได้ที่สภาวะ $L = 0.9$ เมตร, $t_s = 68$ วินาที มีการป้อนกลับจากสาย raffinate (ก) น้ำตาล ฟรักโทสในสาย extract (ข) น้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate	70
ข10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบริสุทธิ์และปริมาณการผลิตสารได้ที่สภาวะ $L = 0.9$ เมตร, $t_s = 136$ วินาที มีการป้อนกลับจากสาย raffinate (ก) น้ำตาล ฟรักโทสในสาย extract (ข) น้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate	70
ข11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบริสุทธิ์และปริมาณการผลิตสารได้ที่สภาวะ $L = 0.9$ เมตร, $t_s = 273$ วินาที มีการป้อนกลับจากสาย raffinate (ก) น้ำตาล ฟรักโทสในสาย extract (ข) น้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate	71
ข12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบริสุทธิ์และปริมาณการผลิตสารได้ที่สภาวะ $L = 1.2$ เมตร, $t_s = 68$ วินาที มีการป้อนกลับจากสาย raffinate (ก) น้ำตาล ฟรักโทสในสาย extract (ข) น้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate	71
ข13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบริสุทธิ์และปริมาณการผลิตสารได้ที่สภาวะ $L = 1.2$ เมตร, $t_s = 136$ วินาที มีการป้อนกลับจากสาย raffinate (ก) น้ำตาล ฟรักโทสในสาย extract (ข) น้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate	72
ข14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบริสุทธิ์และปริมาณการผลิตสารได้ที่สภาวะ $L = 1.2$ เมตร, $t_s = 273$ วินาที มีการป้อนกลับจากสาย raffinate (ก) น้ำตาล ฟรักโทสในสาย extract (ข) น้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate	72

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ค1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบริสุทธิ์และปริมาณการผลิตสารได้ที่สภาวะ $L=0.3$ เมตร, $t_s = 68$ วินาที มีการป้อนกลับจากสาย extract (ก) น้ำตาล ฟรักโทสในสาย extract (ข) น้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate	74
ค2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบริสุทธิ์และปริมาณการผลิตสารได้ที่สภาวะ $L=0.3$ เมตร, $t_s = 136$ วินาที มีการป้อนกลับจากสาย extract (ก) น้ำตาล ฟรักโทสในสาย extract (ข) น้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate	74
ค3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบริสุทธิ์และปริมาณการผลิตสารได้ที่สภาวะ $L=0.3$ เมตร, $t_s = 198$ วินาที มีการป้อนกลับจากสาย extract (ก) น้ำตาล ฟรักโทสในสาย extract (ข) น้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate	75
ค4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบริสุทธิ์และปริมาณการผลิตสารได้ที่สภาวะ $L=0.3$ เมตร, $t_s = 273$ วินาที มีการป้อนกลับจากสาย extract (ก) น้ำตาล ฟรักโทสในสาย extract (ข) น้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate	75
ค5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบริสุทธิ์และปริมาณการผลิตสารได้ที่สภาวะ $L=0.6$ เมตร, $t_s = 68$ วินาที มีการป้อนกลับจากสาย extract (ก) น้ำตาล ฟรักโทสในสาย extract (ข) น้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate	76
ค6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบริสุทธิ์และปริมาณการผลิตสารได้ที่สภาวะ $L=0.6$ เมตร, $t_s = 136$ วินาที มีการป้อนกลับจากสาย extract (ก) น้ำตาล ฟรักโทสในสาย extract (ข) น้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate	76
ค7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบริสุทธิ์และปริมาณการผลิตสารได้ที่สภาวะ $L=0.9$ เมตร, $t_s = 68$ วินาที มีการป้อนกลับจากสาย extract (ก) น้ำตาล ฟรักโทสในสาย extract (ข) น้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate	77
ค8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบริสุทธิ์และปริมาณการผลิตสารได้ที่สภาวะ $L=0.9$ เมตร, $t_s = 136$ วินาที มีการป้อนกลับจากสาย extract (ก) น้ำตาล ฟรักโทสในสาย extract (ข) น้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate	77

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ค9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบริสุทธิ์และปริมาณการผลิตสารได้ที่สภาวะ $L=0.9$ เมตร, $t_s=198$ วินาที มีการป้อนกลับจากสาย extract (ก) น้ำตาล ฟรักโทสในสาย extract (ข) น้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate	78
ค10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบริสุทธิ์และปริมาณการผลิตสารได้ที่สภาวะ $L=1.2$ เมตร, $t_s=68$ วินาที มีการป้อนกลับจากสาย extract (ก) น้ำตาล ฟรักโทสในสาย extract (ข) น้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate	78
ค11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบริสุทธิ์และปริมาณการผลิตสารได้ที่สภาวะ $L=1.2$ เมตร, $t_s=136$ วินาที มีการป้อนกลับจากสาย extract (ก) น้ำตาล ฟรักโทสในสาย extract (ข) น้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate	79
ค12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบริสุทธิ์และปริมาณการผลิตสารได้ที่สภาวะ $L=1.2$ เมตร, $t_s=198$ วินาที มีการป้อนกลับจากสาย extract (ก) น้ำตาล ฟรักโทสในสาย extract (ข) น้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate	79
ค13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบริสุทธิ์และปริมาณการผลิตสารได้ที่สภาวะ $L=1.2$ เมตร, $t_s=273$ วินาที มีการป้อนกลับจากสาย extract (ก) น้ำตาล ฟรักโทสในสาย extract (ข) น้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate	80

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

C	= ความเข้มข้นของของไหล (โมล/ลบ.ม.)
C^{in}	= ความเข้มข้นในตัวดูดซับ (โมล/ลบ.ม.)
$C_{\text{i,CSTR}}$	= ความเข้มข้นในถังเก็บ (โมล/ลบ.ม.)
D_C	= เส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์ (เมตร)
K	= ค่าคงที่สมดุล
K'	= ค่าคงที่สมดุลสำหรับตัวดูดซับเอกพันธ์
k_h	= สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล (วินาที ⁻¹)
k_f	= สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลบนพื้นผิวในรูพรุน (วินาที ⁻¹)
k_p	= สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในรูพรุน (วินาที ⁻¹)
k_μ	= สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในอนุภาคนาขนาดเล็ก (วินาที ⁻¹)
L_c	= ความยาวคอลัมน์ (เมตร)
$\bar{q}$	= ความเข้มข้นเฉลี่ยที่ดูดซับบนอนุภาค
$\bar{q}^*$	= ความเข้มข้นบนผิวอนุภาคที่สมดุลกับของเหลว
Q	= อัตราการไหลเชิงปริมาตรในเบดเคลื่อนที่จำลอง (ลบ.ม./วินาที)
t^*	= เวลาของการสลับ (วินาที)
U_F	= ความเร็วของของไหล (เมตร/วินาที)
U_S	= ความเร็วของของแข็ง (เมตร/วินาที)
V_c	= ปริมาตรของคอลัมน์ (ลบ.ม.)
V_{CSTR}	= ปริมาตรของถังเก็บ (ลบ.ม.)
$\mathcal{E}$	= ความพรุนของตัวดูดซับ
$\mathcal{E}_p$	= ความพรุนของอนุภาค
v	= สัดส่วนปริมาตร ของแข็ง/ของไหล
γ	= สัดส่วนความเร็ว ของไหล/ของแข็ง

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

ตัวยกและตัวห้อย

1,2,3,4	=	แต่ละส่วนในเบดเคลื่อนที่จำลอง
F,R,E,X	=	สาย สารป้อน, raffinate, eluent, และ extract ตามลำดับ
FR	=	น้ำตาลฟรักโทส
GL	=	น้ำตาลกลูโคส
i	=	สารประกอบ (ฟรักโทส หรือ กลูโคส)
in	=	ของไหลที่เข้าในถังเก็บ
out	=	ของไหลที่ออกในถังเก็บ

การศึกษาผลกระทบของสายป้อนกลับเพื่อการแยกกลูโคสกับฟรักโทสโดยใช้ระบบเบดเคลื่อนที่จำลอง

Effect of Recycling on the Separation of Glucose/Fructose Mixture Using Simulated Moving Bed

คำนำ

น้ำตาลทรายนั้นมีความสำคัญในอุตสาหกรรมค่อนข้างมากไม่ว่าจะเป็นอุตสาหกรรมยา อุตสาหกรรมอาหาร หรือเครื่องดื่ม เป็นต้น ประเทศไทยนั้นสามารถผลิตน้ำตาลทรายได้เป็นอันดับต้นๆ ของโลก เนื่องจากน้ำตาลทรายสามารถผลิตได้จากอ้อย และประเทศไทยนั้นมีพื้นที่ที่เหมาะสมต่อการปลูกอ้อย ปริมาณน้ำตาลที่ผลิตได้นั้นบางส่วนจะใช้บริโภคกันภายในประเทศส่วนที่เหลือจะส่งออกขาย แต่มูลค่าการจำหน่ายค่อนข้างจะผันผวนไม่แน่นอน เนื่องมาจากการกำหนดราคาของผู้ซื้อ และมีการแทรกแซงจากสารเพิ่มความหวานชนิดอื่น ซึ่งเป็นสาเหตุให้ราคาน้ำตาลทรายที่ผลิตได้จากอ้อยทั้งในประเทศและต่างประเทศลดลงไปอีก ด้วยเหตุนี้ทำให้ในปัจจุบันหน่วยงานวิจัยต่าง ๆ ได้พยายามผลิตน้ำตาลฟรักโทสและน้ำตาลกลูโคสแทนน้ำตาลทรายเพื่อลดปัญหาทางด้านราคาน้ำตาลที่มีการผันแปรตลอดเวลา

ในปัจจุบันมีความต้องการที่จะผลิตน้ำตาลกลูโคสและน้ำตาลฟรักโทสมาเป็นสารให้ความหวานแทนน้ำตาลทราย (น้ำตาลซูโครส) เนื่องจากร่างกายสามารถนำไปใช้ได้ดีกว่า และน้ำตาลฟรักโทสมีความหวานมากกว่าน้ำตาลทราย จึงได้รับความนิยมนำไปใช้กับอุตสาหกรรมเครื่องดื่ม อุตสาหกรรมอาหาร และอุตสาหกรรมยา จึงมีงานวิจัยจำนวนมากที่สนใจศึกษาการแยกน้ำตาลกลูโคสและน้ำตาลฟรักโทสออกจากกัน โดยใช้กระบวนการที่ค่อนข้างหลากหลาย เพื่อให้สามารถแยกสารให้ได้ความบริสุทธิ์ค่อนข้างสูงตามที่อุตสาหกรรมต้องการ และสามารถแยกสารได้อย่างต่อเนื่องเพื่อให้ได้อัตราการผลิตที่สูง

การแยกน้ำตาลกลูโคสออกจากน้ำตาลฟรักโทสทำได้หลายวิธี เช่น การใช้คอลัมน์แบบโครมาโทกราฟี (chromatography) หอดูดซับแบบไหลสวนทางกัน (counter-current adsorption) เมมเบรนของเหลว (liquid membranes) ซึ่งการแยกด้วยคอลัมน์แบบโครมาโทกราฟีได้รับความนิยมค่อนข้างสูง วิธีที่จะเสนอต่อไปนี้อาจเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการนำไปใช้เพื่อให้ได้ความบริสุทธิ์

ตามที่เราต้องการ โดยวิธีนี้เป็นการนำเทคนิคระบบเบดเคลื่อนที่จำลองซึ่งระบบนี้สามารถแยกสารผสมที่แยกออกจากกันได้ยากและเป็นระบบที่ประกอบด้วยหลายคอลัมน์และเป็นระบบตัวดูดซับและของไหลเคลื่อนที่สวนทางกัน (counter-current) มีกระบวนการแยกและการดูดซับแบบต่อเนื่องทำให้สามารถแยกได้สารที่มีความบริสุทธิ์สูง ในปริมาณที่มากกว่า และใช้ปริมาณตัวทำละลายน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการแยกสารแบบเดิม คือ การแยกแบบแบทช์โครมาโทกราฟี (batch chromatography) นอกจากนี้ยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของความสามารถของสารโดยการศึกษาอิทธิพลของสายป้อนกลับของสายผลิตภัณฑ์ทั้งสายของ extract และ raffinate เพื่อให้สารนั้นมีความบริสุทธิ์มากขึ้นโดยให้มีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้ประโยชน์ในระดับอุตสาหกรรม ซึ่งในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะเป็นอุตสาหกรรมอาหาร โดยนิยมใช้ความบริสุทธิ์ของน้ำตาลกลูโคสที่ 55 เปอร์เซ็นต์ และสำหรับน้ำตาลฟรักโทสที่ 42 เปอร์เซ็นต์ และ 55 เปอร์เซ็นต์

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาผลกระทบของสายป้อนกลับต่อการแยกกลูโคสกับฟรักโทสโดยใช้วิธีการแยกสารด้วยระบบเบดเคลื่อนที่จำลอง
2. เพื่อศึกษาค่าตัวแปรต่างๆที่มีผลกระทบมาจากสายป้อนกลับต่อการแยกกลูโคสกับฟรักโทสโดยใช้วิธีการแยกสารด้วยระบบเบดเคลื่อนที่จำลองเพื่อให้ได้ความบริสุทธิ์ตามที่ต้องการ

ขอบเขตงานวิจัย

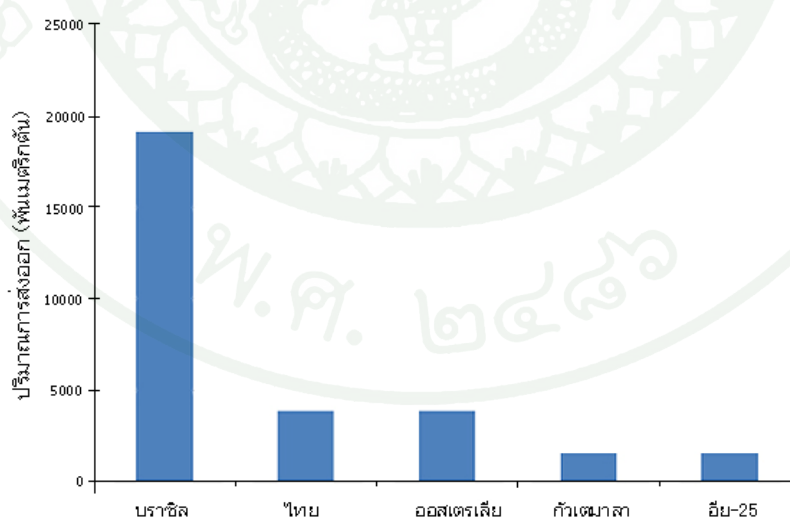
ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาการแยกน้ำตาลฟรักโทสกับน้ำตาลกลูโคสจากน้ำตาลทราย โดยใช้เทคนิคระบบเบดเคลื่อนที่จำลอง เพื่อศึกษาผลกระทบของสายป้อนกลับต่อการแยกกลูโคสกับฟรักโทสทั้งสายป้อนกลับจากสาย extract และสายป้อนกลับจากสาย raffinate ว่ามีผลต่อการปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานของระบบเบดเคลื่อนที่จำลองอย่างไร นอกจากนี้ศึกษาค่าตัวแปรต่างๆที่มีผลมาจากสายป้อนกลับต่อการแยกกลูโคสกับฟรักโทสจากน้ำตาลทรายโดยใช้วิธีการแยกสารด้วยระบบเบดเคลื่อนที่จำลอง ได้แก่

1. ค่าความยาวของคอลัมน์ 0.3 – 1.2 เมตร
2. ค่าเวลาของการสลับ (switching time) 68, 136, 198, 273 วินาที
3. จำนวนคอลัมน์ในระบบ 4, 8, 12 คอลัมน์

การตรวจเอกสาร

น้ำตาล

น้ำตาลคือสารให้ความหวานชนิดหนึ่ง ตามพจนานุกรมฉบับราชบัณฑิตยสถาน พ.ศ.2542 ให้ความหมายคำว่าน้ำตาล หมายถึง “สารประกอบคาร์โบไฮเดรตประเภทโมโนแซ็กคาไรด์และไดแซ็กคาไรด์ที่มีรสหวาน นอกจากนี้น้ำตาลที่ใช้กันทั่วไปนั้นหมายถึงน้ำตาลซูโครส (sucrose) มีสูตรโมเลกุลเป็น $C_{12}H_{22}O_{11}$ ซึ่งเป็นน้ำตาลโมเลกุลคู่ (disaccharide) เกิดจากการจับตัวของน้ำตาลกลูโคสและฟรักโทส มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 342 โดยทั่วไปน้ำตาลบริสุทธิ์จะอยู่ในรูปของผลึกแบบโมโนคลินิก (monoclinic) ไม่มีสีและโปร่งแสง น้ำตาลมีความสำคัญในแง่ที่ใช้ประกอบอาหารเพื่อบริโภคภายในครัวเรือนโดยใช้เป็นสารให้ความหวาน นอกจากนี้จากคุณสมบัติเด่นของน้ำตาล เช่น ความหวาน ความหนืด ความแวววับ ทำให้น้ำตาลจัดเป็นวัตถุดิบที่สำคัญในอุตสาหกรรมอาหาร ยา และเครื่องสำอาง รวมทั้งการผลิตเพื่อส่งออกเป็นต้น น้ำตาลในประเทศไทยนั้นผลิตได้จากพืชหลายชนิดโดยเฉพาะอ้อย และพืชหัว หรือหัวบีท ซึ่งพืชเหล่านี้จะสังเคราะห์และสร้างแป้งเก็บไว้ในลำต้นหรือหัว และเนื่องจากประเทศไทยมีลักษณะพื้นที่เหมาะสมในการปลูกอ้อย ทำให้ประเทศไทยเป็นผู้ผลิตน้ำตาลอันดับต้นๆของโลก รองจากบราซิลดังแสดงในรูปที่ 1



ภาพที่ 1 การส่งออกน้ำตาลรายใหญ่ของโลก ปีการผลิต 2548/49

ที่มา: USDA กระทรวงเกษตร สหรัฐอเมริกา (2554)

ตารางที่ 1 กำลังการผลิตน้ำตาลในประเทศไทยระหว่างปี 2000 ถึง 2008

ปี	ผลผลิต(ตัน)	ปริมาณการส่งออก (ตัน)	ปริมาณการใช้ ภายในประเทศ(ตัน)	มูลค่าจำหน่าย (พันบาท)
2000	653820.35	646716.17	68035.13	4651487.27
2001	1657373.68	1273305.66	239164.18	13374353.86
2002	2020501.48	1411550.41	197602.96	11026268.84
2003	2437091.21	1204375.47	254717.05	10151141.39
2004	2316785.40	1079384.07	231886.75	7754155.25
2005	1400257.62	718419.89	183144.70	7380873.55
2006	1800422.11	640780.30	203937.53	9059125.16
2007	2536709.33	991912.08	238019.74	10171398.04
2008	2917370.54	1624139.85	223707.70	16378284.60

ที่มา: สำนักงานอ้อยและน้ำตาลทราย (2008)

จากตารางที่ 1 จะเห็นว่าประเทศไทยเป็นประเทศที่มีความสามารถผลิตน้ำตาลที่สูงมาก ปริมาณน้ำตาลที่ผลิตได้นั้นบางส่วนจะใช้บริโภคกันภายในประเทศส่วนที่เหลือจะส่งออกขายต่างประเทศ แต่มูลค่าการจำหน่ายค่อนข้างจะผันผวนไม่แน่นอนเนื่องมาจากการกำหนดราคาของผู้ซื้อ และมีการแทรกแซงจากสารเพิ่มความหวานชนิดอื่น เป็นสาเหตุให้ราคาน้ำตาลทรายที่ผลิตได้จากอ้อยทั้งในประเทศและต่างประเทศลดลงไปอีก ด้วยเหตุนี้ทำให้ในปัจจุบันหน่วยงานวิจัยต่าง ๆ ได้พยายามผลิตน้ำตาลฟรักโทสแทนน้ำตาลทรายเพื่อลดปัญหาทางด้านราคาน้ำตาลที่มีการผันแปรตลอดเวลา

ประเภทของน้ำตาล

น้ำตาลอาจแบ่งเป็น 2 ลักษณะคือ แบ่งตามลักษณะโมเลกุลและแบ่งตามลักษณะการผลิตได้ดังนี้

น้ำตาลแบ่งตามลักษณะโมเลกุล

น้ำตาลแบ่งตามลักษณะโมเลกุลได้ 3 ประเภท ได้แก่

1. น้ำตาลชั้นเดียว (monosaccharides) เป็นคาร์โบไฮเดรตที่มีโมเลกุลเล็กที่สุด มีรสหวาน ละลายน้ำได้ดี ร่างกายนำไปใช้ได้ทันทีโดยไม่ต้องย่อย น้ำตาลชั้นเดียวที่สำคัญ ได้แก่

1.1 ฟรักโทส (fructose) ในธรรมชาติพบมากในผัก ผลไม้ ธัญพืช น้ำผึ้ง และได้จากการย่อยสลายน้ำตาลซูโครส ฟรักโทสเป็นน้ำตาลที่มีรสหวานจัด

1.2 กลูโคส (glucose) พบทั่วไปในส่วนต่างๆของพืช เช่น ผลไม้สุก ดอกไม้ใบ และรากพืช กลูโคสเป็นน้ำตาลชนิดเดียวที่อยู่ในเลือดของคน

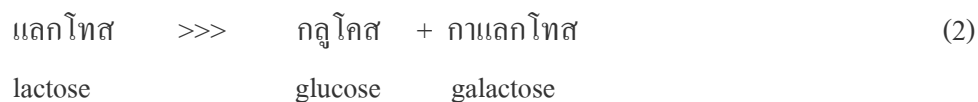
1.3 กาแล็กโทส (galactose) เป็นน้ำตาลที่ไม่พบอิสระตามธรรมชาติ แต่ได้จากการสลายตัวของแลกโทสในน้ำนม

2. น้ำตาลสองชั้น (disaccharides) เป็นคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบขึ้นจากน้ำตาลชั้นเดียว 2 โมเลกุล ตัวอย่างเช่น

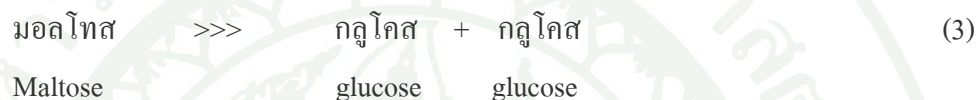
2.1 ซูโครส (sucrose) หรือน้ำตาลทราย เป็นน้ำตาลที่พบอยู่ทั่วไปในพืช โดยเฉพาะอ้อย และหัวบีท ในผลไม้สุกที่มีรสหวาน ซูโครสย่อยสลายได้เป็นน้ำตาลกลูโคสและฟรักโทส ดังสมการ



2.2 แลกโทส (lactose) เป็นน้ำตาลที่พบเฉพาะในน้ำนมของสัตว์ที่เลี้ยงลูกด้วยนมเท่านั้น จึงเรียกว่าน้ำตาลนม (milk sugar) แลกโทสย่อยสลายได้เป็นน้ำตาลกลูโคสและกาแลกโทส ดังสมการ



2.3 มอลโทส (maltose) ไม่พบอิสระตามธรรมชาติ พบมากในน้ำเชื่อมข้าวโพดหรือน้ำเชื่อมกลูโคสซึ่งได้จากกระบวนการย่อยแป้งด้วยกรดหรือเอนไซม์ มอลโทสย่อยสลายได้เป็นน้ำตาลกลูโคส ดังสมการ



3. น้ำตาลหลายชั้น (polysaccharides) หรือน้ำตาลเชิงซ้อนเป็นคาร์โบไฮเดรตที่เกิดจากน้ำตาลชั้นเดียวหลายๆ โมเลกุลรวมกัน ไม่มีรสหวาน ตัวอย่างน้ำตาลหลายชั้นที่ใช้ในอาหาร ได้แก่

3.1 แป้งสตาร์ช (starch) พบมากตามส่วนต่างๆ ของพืช เช่น หัว ราก เมล็ด ลำต้น และ ผล โดยรวมกันอยู่เป็นเม็ดสตาร์ช (starch granule) แป้งสตาร์ชเป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตในอาหารของมนุษย์ที่มีราคาถูกใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเครื่องดื่มแอลกอฮอล์และช่วยให้อาหารมีความหนืดข้นหรือเหนียวมากขึ้น

3.2 เซลลูโลส (cellulose) เป็นโครงสร้างของผัก ผลไม้ และธัญพืชไม่ละลายน้ำ เซลลูโลสช่วยเพิ่มปริมาณของอาหาร กระตุ้นการเคลื่อนไหวของกล้ามเนื้อในลำไส้ ช่วยในการขับถ่าย จึงนิยมนำมาเป็นส่วนผสมในอาหารเสริมสุขภาพ อาหารที่มีเซลลูโลสเป็นส่วนประกอบมาก ได้แก่ วุ้นน้ำมะพร้าว ถั่วแดงหลวง ถั่วเขียว มะเขือพวง สะเดา เป็นต้น

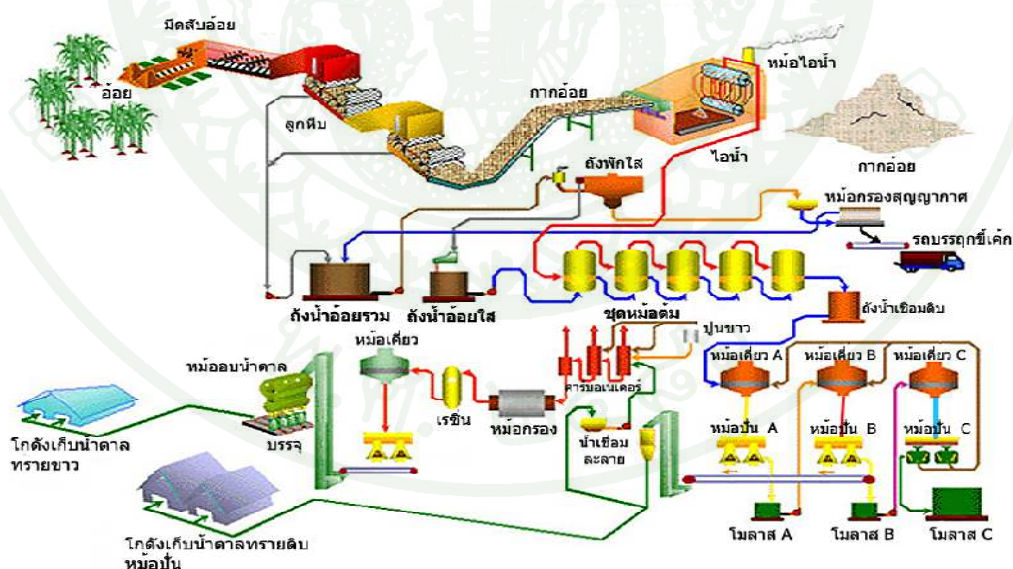
3.3 เพกติน (pectin) เป็นส่วนประกอบของผนังเซลล์ของผักและผลไม้ ละลายในน้ำจะเกิดเป็นเจล (gel) ทำให้อาหารข้นหนืดใช้ในการทำแยม เยลลี่ ไซ้เติมในน้ำผลไม้ เพื่อไม่ให้ส่วนของผลไม้ตกตะกอน ผลไม้ไทยที่มีปริมาณเพกตินสูงที่สุด 5 อันดับแรก ได้แก่ มะขามป้อม กระท้อน มะกอก ละมุด และฝรั่ง ในอุตสาหกรรมสกัดเพกตินจากเปลือกผลไม้ด้วยวิธีการย่อยด้วยกรด (hydrolysis)

น้ำตาลแบ่งตามลักษณะการผลิต

น้ำตาลแบ่งตามลักษณะการผลิตได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. **น้ำตาลที่ผลิตในระดับอุตสาหกรรม** ในอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาลจากอ้อย (ภาพที่ 2) เริ่มจากการสกัดน้ำอ้อยโดยใช้ชุดลูกหีบ น้ำอ้อยที่ได้มีค่าพีเอชประมาณ 5.5 สีเขียวคล้ำขุ่น ดังนั้นจึงต้องทำน้ำอ้อยให้บริสุทธิ์โดยกำจัดความขุ่น สี และทำให้น้ำอ้อยเป็นกลาง และกำจัดสิ่งปนเปื้อนออก ด้วยการต้มน้ำอ้อยกับปูนขาว (defecation) น้ำอ้อยใสที่ได้มีสีน้ำตาลอ่อน จากนั้นนำน้ำอ้อยใสที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์มาต้มระเหยน้ำออกด้วยหม้อต้มสูญญากาศ น้ำเชื่อมที่ได้มีความเข้มข้นประมาณ 65 บริกซ์ กรณีที่ผลิตน้ำตาลทรายขาวและน้ำตาลทรายขาวบริสุทธิ์ น้ำเชื่อมจะถูกส่งไปเข้าถังพักเพื่อผ่านกระบวนการทำน้ำเชื่อมให้บริสุทธิ์ น้ำเชื่อมที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์แล้วถูกส่งไปยังหม้อเคี่ยวเพื่อเคี่ยวให้เป็นเม็دنน้ำตาลทรายในระบบสูญญากาศได้เม็دنน้ำตาลทรายและกากน้ำตาล (molasses) ทำการปั่นแยกเม็دنน้ำตาลออกมาและนำไปอบแห้ง

กระบวนการผลิตน้ำตาลทรายดิบดังแสดงตามภาพที่ 2 มีขั้นตอนการผลิตใหญ่ 2 ขั้นตอน คือการผลิตน้ำตาลทรายดิบและการผลิตน้ำตาลทรายขาว



ภาพที่ 2 กระบวนการผลิตน้ำตาล

ที่มา: บริษัท ไทยชูการ์ มิลเลอร์ จำกัด (2552)

กระบวนการในการผลิตน้ำตาลทรายดิบ

สามารถแบ่งได้เป็น 5 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

1. กระบวนการสกัดน้ำอ้อย (juice extraction)
2. การทำความสะอาด หรือทำใส่น้ำอ้อย (juice purification)
3. การต้ม (evaporation)
4. การเคี้ยว (crystallization)
5. การปั่นแยกผลึกน้ำตาล (centrifugation)

กระบวนการสกัดน้ำอ้อย (juice extraction)

ทำการสกัดน้ำอ้อยโดยผ่านอ้อยเข้าไปในชุดลูกหีบ (4-5 ชุด) และกากอ้อยที่ผ่านการสกัดน้ำอ้อยจากลูกหีบชุดสุดท้าย จะถูกนำไปเป็นเชื้อเพลิงเผาไหม้ภายในเตาหม้อไอน้ำ เพื่อผลิตไอน้ำมาใช้ในการกระบวนการผลิตน้ำตาลทราย

การทำความสะอาด หรือทำใส่น้ำอ้อย (juice purification)

น้ำอ้อยที่สกัดได้ทั้งหมดจะเข้าสู่กระบวนการทำใส เนื่องจากน้ำอ้อยมีสิ่งสกปรกต่าง ๆ จึงต้องแยกเอาส่วนเหล่านี้ออกโดยผ่านวิธีการต่าง ๆ เช่น ผ่านเครื่องกรองต่าง ๆ และวิธีการเคมี เช่น โดยให้ความร้อน และผสมปูนขาว

การต้ม (evaporation)

น้ำอ้อยที่ผ่านการทำใสแล้วจะถูกนำเข้าสู่ชุดหม้อต้ม (multiple evaporator) เพื่อระเหยเอาน้ำออก โดยน้ำอ้อยมีความเข้มข้นประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ สิ่งที่ถูกออกมาจากหม้อต้มลูกสุดท้าย เรียกว่า น้ำเชื่อม (syrup)

การเคี้ยว (crystallization)

น้ำเชื่อมที่ได้จากการต้มจะถูกลำเลียงเข้าหม้อเคี้ยวระบบสุญญากาศ (vacuum pan) เพื่อระเหยน้ำ ออกจนน้ำเชื่อมถึงจุดอิ่มตัว ผลึกน้ำตาลจะเกิดขึ้นมาที่จุดนี้ โดยที่ผลึกน้ำตาลและกากน้ำตาลที่ได้จากการเคี้ยวนี้รวมเรียกว่า เมสเสคิวท (messecuite)

การปั่นแยกผลึกน้ำตาล (centrifugation)

เมสเสคิวทที่ได้จากการเคี้ยวจะถูกลำเลียงไปปั่นแยกผลึกน้ำตาลออกจากกากน้ำตาลโดยใช้เครื่องปั่น (centrifugals) ผลึกน้ำตาลที่ได้นี้จะเป็นน้ำตาลดิบ

กระบวนการผลิตน้ำตาลทรายขาว และน้ำตาลรีไฟน์

น้ำตาลทรายดิบถูกนำไปละลายน้ำ แล้วถูกผ่านเข้า 5 ขั้นตอนการผลิต ดังนี้

1. การปั่นละลาย (affinated centrifugation)
2. การทำความสะอาด และฟอกสี (clarification)
3. การเคี้ยว (crystallization)
4. การปั่นแยกผลึกน้ำตาล (centrifugation)
5. การอบ (drying)

การปั่นละลาย (affinated centrifugation)

น้ำตาลดิบมาผสมกับน้ำร้อน หรือน้ำเหลืองจากการปั่นละลาย (green molasses) น้ำตาลดิบที่ผสมนี้เรียกว่า แมกมา (magma) และแมกมานี้จะถูกลำเลียงไปปั่นละลายเพื่อล้างคราบน้ำเหลืองหรือกากน้ำตาลออก

การทำความสะอาด และฟอกสี (clarification)

น้ำเชื่อมที่ได้จากหม้อปั่นละลาย (affinated syrup) จะถูกลำเลียงไปละลายอีกครั้งเพื่อละลายผลึกน้ำตาลบางส่วนที่ยังละลายไม่หมดจากการปั่น และผ่านตะแกรงกรองเข้าผสมกับปูนขาว เข้าฟอกสี

โดยผ่านเข้าไปในหม้อฟอก (ปัจจุบันนิยมใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวฟอก) จากนั้นจะผ่านเข้าสู่การกรองโดยหม้อกรองแบบใช้แรงดัน (pressure filter) เพื่อแยกตะกอนออก และน้ำเชื่อมที่ได้จะผ่านไปฟอกเป็นครั้งสุดท้ายโดยกระบวนการแลกเปลี่ยนประจุ (ion exchange resin) จะได้ น้ำเชื่อมรีไฟน์ (fine liquor)

การเคี้ยว (crystallization)

น้ำเชื่อมรีไฟน์ที่ได้จะถูกนำเข้าสู่หม้อเคี้ยวระบบสุญญากาศ (vacuum pan) เพื่อระเหยน้ำออกจนน้ำเชื่อมถึงจุดอิ่มตัว

การปั่นแยกผลึกน้ำตาล (centrifugation)

เมล็ดคัทที่ได้จากการเคี้ยวจะถูกนำไปปั่นแยกผลึกน้ำตาลออกจากกากน้ำตาล โดยใช้เครื่องปั่น (centrifugals) ผลึกน้ำตาลที่ได้นี้จะเป็น น้ำตาลรีไฟน์ และน้ำตาลทรายขาว

การอบ (drying)

ผลึกน้ำตาลรีไฟน์ และน้ำตาลทรายขาวที่ได้จากการปั่นก็จะเข้าสู่หม้ออบ (dryer) เพื่อไล่ความชื้นออก แล้วบรรจุกระสอบเพื่อจำหน่าย

น้ำตาลที่ใช้บริโภคกันทุกวันนี้ คือผลึกของซูโครสที่ได้จากน้ำอ้อย น้ำตาลซูโครสอาจผลิตได้จากน้ำเชื่อม หรือได้จากต้นตาล มะพร้าว ข้าวโพด เมเปิ้ล และหัวบีท จึงทำให้น้ำตาลมีชื่อเรียกหลายอย่าง น้ำตาลที่คนไทยรู้จักทั่วไปมีดังนี้

1.1 น้ำตาลทรายดิบ (raw sugar) คือ ผลึกน้ำตาลซูโครสที่มีความบริสุทธิ์ต่ำ ลักษณะผลึกใส สีน้ำตาลอ่อนหรือเข้มตามสีของกากน้ำตาลที่หุ้มอยู่รอบๆ มีความชื้นปานกลาง เกิดน้ำตาลจับเกาะติดกัน ไม่ร่วน ผลิตจากน้ำอ้อยโดยตรง ผ่านกรรมวิธีการแยกสิ่งสกปรกออกจากน้ำอ้อยด้วยวิธีตกตะกอนโดยให้ความร้อน และฟอกสีน้ำอ้อยด้วยปูนขาว ไม่ใช้บริโภคน้ำตาลแต่ใช้เป็นวัตถุดิบผลิตน้ำตาลทรายขาวบริสุทธิ์

1.2 น้ำตาลทรายขาว (plantation or mill white sugar) คือ ผลึกน้ำตาลซูโครสที่เป็นผลึกใส สีขาวถึงเหลืองอ่อนมีกากน้ำตาลติดอยู่เป็นส่วนน้อย มีความชื้นเล็กน้อยเกล็ดน้ำตาลร่วนไม่ติดกัน มีการฟอกสีน้ำอ้อยและน้ำเชื่อมด้วยก๊าซซัลเฟอร์ ไดออกไซด์ (sulfitation) หรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (carbonation) ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตอาหารสำเร็จรูป น้ำอัดลม และใช้ในครัวเรือนทั่วไป

1.3 น้ำตาลทรายขาวบริสุทธิ์ (refined sugar) คือ ผลึกน้ำตาลซูโครสที่มีความบริสุทธิ์สูงมาก เป็นผลึกใสสีขาวสะอาดปราศจากกากน้ำตาลเกือบไม่มีความชื้นเลยเป็นน้ำตาลทรายขาวที่ใช้กันทั่วไปในร้านอาหาร ในครัวเรือน หรือในอุตสาหกรรมการผลิตอาหาร เครื่องดื่ม ขนม บางตำราเรียกว่า granulated sugar

การประกอบอาหารนอกจากใช้น้ำตาลในลักษณะเป็นผลึกหรืออยู่ในรูปของแข็งแล้วยังมีการใช้น้ำตาลในลักษณะที่เป็นของเหลวคือ น้ำเชื่อม กากน้ำตาล น้ำผึ้ง เป็นต้น

1.4 น้ำเชื่อม (syrup) คือ น้ำตาลในลักษณะของเหลว การประกอบอาหารของไทยมีการเตรียมน้ำเชื่อมจากน้ำตาลทรายขาว น้ำเชื่อมที่ได้มีการใส่ไข่ขาวหรือเปลือกไข่ลงไปในขณะที่ยวน้ำเชื่อมเพื่อให้น้ำเชื่อมใสสะอาด ในอุตสาหกรรมน้ำเชื่อมส่วนใหญ่ได้จากการย่อยแป้งด้วยกรดหรือเอนไซม์ให้เป็นน้ำตาล

1.5 น้ำเชื่อมกลูโคส (glucose syrup) ตามความหมายของสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์กระทรวงอุตสาหกรรมหมายถึง “สารละลายแซ็กคาไรด์ที่ได้จากการย่อยแป้ง ผ่านกรรมวิธีทำให้บริสุทธิ์และทำให้เข้มข้นแล้วซึ่งจะครอบคลุมน้ำเชื่อมข้าวโพดชนิดต่างๆ และน้ำเชื่อมมอลโทสที่ผลิตจากแป้งอื่นด้วย” น้ำเชื่อมกลูโคสมีลักษณะเหนียวและไม่หวานมากใช้ในการทำขนมหวาน น้ำเชื่อมผสม ผลไม้กวน ลูกกวาด แยม เยลลี่ ไอศกรีมและหมากฝรั่ง

1.6 น้ำเชื่อมฟรักโทส (fructose syrup) ปัจจุบันมีการนำน้ำเชื่อมที่มีฟรักโทสร้อยละ 42 หรือร้อยละ 55 เรียกว่า ไฮฟรักโทส

ไฮฟรักโทส ความพยายามผลิตไฮฟรักโทสเพื่อใช้ในอุตสาหกรรม เริ่มในประเทศออสเตรเลีย เมื่อปี 2438 แต่ประสบความสำเร็จครั้งแรกในประเทศญี่ปุ่น (โดยบริษัทคินตัน จำกัด) เมื่อปี 2508 ต่อมาได้พัฒนากระบวนการ isomerization โดยใช้เอนไซม์ isomerase แบบตรึงแน่น (immobilized)

สามารถผลิตได้ฟรักโทสปริมาณ 42 เปอร์เซ็นต์ กลูโคสปริมาณ 52 เปอร์เซ็นต์ และโอลิโกแซคคาไรด์ (oligosaccharides) ปริมาณ 6 เปอร์เซ็นต์

คุณสมบัติทางเคมีของน้ำตาลไฮฟรักโทส 42 เปอร์เซ็นต์

น้ำตาลไฮฟรักโทสให้รสหวานเร็วกว่า และจางเร็วกว่าน้ำตาลทราย มีรสหวานมากขึ้นเมื่ออยู่ในอุณหภูมิต่ำหรือมีความเข้มข้นสูง เมื่อใช้ร่วมกับสารให้ความหวานตัวอื่น ความหวานโดยเปรียบเทียบน้อยกว่าน้ำตาลทรายคือ 0.8-0.9 : 1 แต่สามารถหมักได้โดยตรง ขณะที่น้ำตาลทรายต้องผ่านการไฮโดรไลซ์เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวก่อน นอกจากนี้ยังคงทนต่อความเป็นกรดได้ดี

กระบวนการผลิตน้ำตาลไฮฟรักโทส 42 เปอร์เซ็นต์

เริ่มจากการย่อยแป้งโดยใช้เอนไซม์แอลฟาอะไมเลสที่อุณหภูมิ 110-120 °C นาน 4-5 นาที จะได้เป็นน้ำเชื่อมเหลวที่มีความเป็นกรด คือมีค่าพีเอช ประมาณ 4-5 และมีอุณหภูมิ 55-80 °C จากนั้นใช้เอนไซม์กลูโคอะไมเลส (glucoamylase) ย่อย 60-70 ชั่วโมง เพื่อให้ได้ปริมาณกลูโคส จากนั้นนำไปผ่านชุดคอลัมน์ที่บรรจุเอนไซม์ไอโซเมอร์เรสแบบตรงแน่น ภายใต้สภาพความเป็นกรดค่าเท่ากับ 8 และอุณหภูมิ 60 °C แล้วปล่อยให้ทำปฏิกิริยากัน 1 ชั่วโมง จะได้ปริมาณน้ำตาลไฮฟรักโทส 42 เปอร์เซ็นต์ กลูโคส 52 เปอร์เซ็นต์ และโอลิโกแซคคาไรด์ 6 เปอร์เซ็นต์

หัวมันสำปะหลัง ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์แป้งประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ จำนวน 70,000 – 80,000 ตัน สามารถผลิตน้ำเชื่อมไฮฟรักโทส 42 เปอร์เซ็นต์ ได้ประมาณ 15,000 ตันหรือการผลิตน้ำเชื่อมไฮฟรักโทส 1 ตัน ใช้แป้งมันสำปะหลัง 1 ตัน หรือเท่ากับใช้หัวมันสำปะหลัง 5 ตัน

ประโยชน์ของน้ำเชื่อมไฮฟรักโทส 42 เปอร์เซ็นต์

ปัจจุบันมีการนำเชื่อมไฮฟรักโทส 42 เปอร์เซ็นต์ ไปใช้ในอุตสาหกรรมหลายชนิด เช่น อุตสาหกรรมเครื่องดื่ม ขนมอบ อาหารนม ขนมหวาน (ที่ออฟฟี่สโตร์ได้) อาหารสำเร็จรูปประเภทเนื้อสัตว์ อาหารทะเล น้ำซอสและเครื่องปรุงรส ผลไม้กวน แซลิม น้ำปรุงรสสลัด น้ำมะเขือเทศปรุงรส และผักดองต่าง ๆ และอุตสาหกรรมผลไม้กระป๋อง

2. น้ำตาลที่ผลิตแบบพื้นบ้าน การผลิตน้ำตาลแบบพื้นบ้านของไทยเป็นภูมิปัญญาที่สืบทอดกันมาแต่โบราณ และยังคงนิยมใช้ในการปรุงอาหารไทยหลากหลายประเภท แต่ปัจจุบันน้ำตาลบาง

ชนิดชาวบ้านเลิกผลิตแล้วเพราะมีน้ำตาลทรายและสารให้ความหวานอื่นๆที่หาซื้อได้ง่าย น้ำตาลพื้นบ้านหลายชนิดจึงสูญหายไป ได้แก่ น้ำตาลปี น้ำตาลอุน เป็นต้น

คุณสมบัติที่สำคัญของน้ำตาลซูโครส

1. การแตกตัวของน้ำตาลซูโครส

น้ำตาลซูโครสเป็นน้ำตาลโมเลกุลคู่ซึ่งประกอบไปด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว 2 ชนิด คือน้ำตาลกลูโคสและฟรักโทส ในสถานะที่มีความร้อนสูงหรือสถานะความเป็นกรด-ด่างสูงจะทำให้ น้ำตาลซูโครสแตกตัวเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวทั้งสองดังแสดงในสมการที่ 4



เมื่อเกิดการแตกตัวอย่างสมบูรณ์จะเรียกว่า “inversion” และเรียกน้ำตาลที่เกิดจากการแตกตัวนี้ว่า invert sugars แต่ในทางเคมีถือว่าการแตกตัวของน้ำตาลเป็นปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ดังนั้นจึงไม่นิยมใช้คำว่า inversion นอกจากนี้ยังพบว่าการทำไฮโดรไลซิสของน้ำตาลทรายจะสามารถผลิตกลูโคสได้ร้อยละ 47 และผลิตฟรักโทสได้ถึงร้อยละ 48

2. การให้ความหวาน

ความหวาน (sweetness) น้ำตาลทั่วไปจะมีการกำหนดคุณสมบัติการให้ความหวานเป็นค่ามาตรฐาน ซึ่งปัจจุบันใช้ซูโครสเป็นมาตรฐานของความหวาน เพื่อเปรียบเทียบกับน้ำตาลชนิดอื่น ความหวานของซูโครสจะมีค่าความหวานเท่ากับ 100 หน่วย (สารละลาย 20 เปอร์เซ็นต์) เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำตาลชนิดอื่น ๆ ที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิเดียวกัน ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าความหวานของน้ำตาลชนิดต่างๆ

ชนิดของน้ำตาล	ความหวาน(หน่วย)
น้ำตาลฟรักโทส	140-175
น้ำตาลฟรักโทสและกลูโคส (invert sugar)	100-130
น้ำตาลซูโครส	100
น้ำตาลกลูโคส (anhydrous)	70-75
น้ำตาลกลูโคส (monohydrate)	60-75
น้ำตาลมอลโทส	30
น้ำตาลแลคโทส	15
น้ำตาลกาแลคโทส	58

ที่มา : กล้าณรงค์ (2542)

จากตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่าน้ำฟรักโทสมีคุณสมบัติในการให้ความหวานที่สูงกว่าน้ำตาลชนิดอื่น ซูโครสหวานรองลงมา และหวานน้อยที่สุดคือแลคโทส ดังนั้นในปัจจุบันได้มีการผลิตน้ำตาลฟรักโทสเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมเครื่องดื่ม อุตสาหกรรมลูกกวาด และอุตสาหกรรมยาแทนที่น้ำตาลทราย ความหวานของน้ำตาลขึ้นอยู่กับการรับรสที่ต่อมลิ้นของแต่ละคน ความเข้มข้น และอุณหภูมิของสารละลาย หากอุณหภูมิสูงขึ้นจะรู้สึกหวานขึ้นตามไปด้วย

3. การละลายตัวของน้ำตาล

การละลาย (solubility) น้ำตาลละลายน้ำได้ประมาณร้อยละ 65 ความเข้มข้นหรือปริมาณของสารที่ละลายในน้ำ (soluble solid) สามารถวัดด้วยเครื่องมือที่เรียกว่ารีแฟรกโตมิเตอร์ (refractometer) ใช้หลักการวัดค่าการหักเหของแสง มีหน่วยวัดคือ บริกซ์ (brix) หมายถึงร้อยละของแข็งที่ละลายอยู่ในสารละลาย ตัวอย่างเช่นน้ำตาล 40 กรัมละลายในน้ำ 60 กรัมเป็นสารละลาย 100 กรัม วัดความเข้มข้นได้ 40 บริกซ์

ความสามารถในการละลายน้ำของน้ำตาลแต่ละชนิดแตกต่างกัน ฟรักโทสละลายดีกว่าน้ำตาลชนิดอื่น รองมาคือ ซูโครส ส่วนกลูโคสและมอลโทสละลายได้ดีพอกัน แลคโทสละลายได้

น้อยที่สุด สำหรับน้ำตาลหลายชิ้นส่วนมากไม่ละลายในน้ำ ความสามารถในการละลายน้ำของน้ำตาลขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิสูงการละลายของน้ำตาลเพิ่มมากขึ้น

4. จุดเดือดของสารละลายน้ำตาล (boiling point)

เมื่อน้ำตาลละลายในน้ำเป็นสารละลาย เรียกว่า น้ำเชื่อม น้ำเชื่อมมีจุดเดือดสูงขึ้นเรื่อยๆ ตามปริมาณน้ำตาลที่ละลาย ปกติน้ำบริสุทธิ์มีจุดเดือดที่ 100°C แต่สารละลายหรือน้ำเชื่อมมีจุดเดือดสูงกว่า 100°C จุดเดือดสูงขึ้นตามความเข้มข้นของน้ำเชื่อม ดังนั้นอาจเปรียบเทียบความเข้มข้นของน้ำเชื่อมโดยการวัดจุดเดือดของน้ำเชื่อมนั้นนอกจากนั้นน้ำเชื่อมที่จุดเดือด ณ อุณหภูมิต่างๆจะมีลักษณะเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย เช่น ที่อุณหภูมิ $105\text{--}106^{\circ}\text{C}$ สารละลายน้ำตาลมีลักษณะใส เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะเริ่มมีลักษณะเหมือนเส้นด้ายจนกระทั่งมีลักษณะเป็นก้อนแข็งที่อุณหภูมิ 130°C

5. การดูดและการเก็บรักษาความชื้น (hygroscopicity)

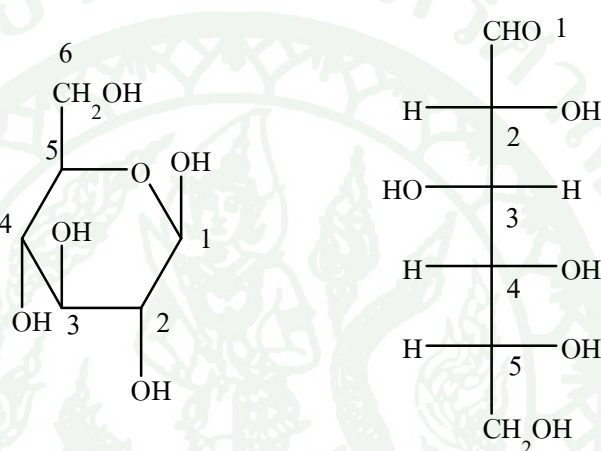
ผลึกน้ำตาลบริสุทธิ์มีสมบัติดูดความชื้นเพียงเล็กน้อย แต่ถ้าบรรยากาศมีความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity) เกินกว่าร้อยละ 75 น้ำตาลทรายจะดูดความชื้นได้เร็วและจับตัวกันเป็นก้อน น้ำตาลแต่ละชนิดมีความสามารถในการดูดและเก็บรักษาความชื้นแตกต่างกัน ฟรักโทสดูดความชื้นได้ดีมาก รองลงมาคือกลูโคส ซูโครส มอลโทส และแลคโทสตามลำดับ ฟรักโทสเป็นส่วนประกอบในน้ำตาลอินเวอร์ต น้ำผึ้ง น้ำเชื่อมข้าวโพด และกากน้ำตาล ดังนั้นอาหารที่มีฟรักโทสเป็นส่วนผสมจึงเก็บความชื้นได้นาน ทำให้อาหารมีลักษณะนุ่มและชุ่มฉ่ำน่ารับประทาน เช่น ขนมเค้ก ลูกก๊ี้ ที่ใช้ส่วนผสมของน้ำผึ้ง หรือน้ำเชื่อมข้าวโพด

6. การตกผลึก (crystallization)

เมื่อเจียน้ำเชื่อมให้เข้มข้นอิมตัวจนน้ำตาลไม่สามารถละลายได้อีก เรียกว่า สารละลายน้ำเชื่อมที่อิมตัว หรือน้ำเชื่อมอิมตัว หากปล่อยให้เย็นลงอย่างระมัดระวังโดยไม่ให้ตกผลึก น้ำเชื่อมนี้จะมีน้ำตาลละลายอยู่มากกว่าที่ควรเป็น ณ อุณหภูมินั้นจะเกิดภาวะอิมตัววยดิ่งและอาจแข็งตัวเป็นแผ่นคล้ายกระจกได้โดยไม่ตกผลึก แต่น้ำตาลส่วนเกินจะเริ่มตกผลึกเป็นผงละเอียดในภายหลัง เห็นได้จากถั่วตัด ถั่วกระจกใหม่ๆน้ำตาลอยู่ในภาวะอิมตัววยดิ่งแข็งใสไม่ตกผลึก เมื่อเก็บไว้นานๆน้ำตาลบางส่วนตกผลึกเป็นผงน้ำตาลละเอียด ถั่วกระจกมีลักษณะบูน ไม่ใส การตกผลึกขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ การทำอาหารที่ต้องการรสหวานจัด เช่น แยม เยลลี่ นิยมใช้ฟรักโทสเป็นตัวให้ความหวาน ถ้าใช้ซูโครสหรือกลูโคสทำให้เกิดผลึกของน้ำตาลเมื่อใช้ในปริมาณมาก

น้ำตาลกลูโคส

น้ำตาลกลูโคส หรือรู้จักกันในชื่อ D-Glucose หรือ dextrose เป็นน้ำตาลประเภทโมโนแซ็กคาไรด์ (monosaccharide) และพบเป็นหน่วย (unit) เล็ก ๆ ของแป้ง เซลลูโลส (cellulose) และไกลโคเจนดังรูปที่ 3 สูตรทางเคมีคือ $C_6H_{12}O_6$ มีน้ำหนักโมเลกุล 180.2 ความหนาแน่น 1.544 จุดหลอมเหลว $146^{\circ}C$ ลักษณะทางกายภาพของผลึกกลูโคสที่ปราศจากน้ำมีลักษณะเป็นรูปขนมเปียกปูนดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 โครงสร้างทางเคมีของน้ำตาลกลูโคส

น้ำตาลกลูโคสนับว่ามีความสำคัญที่สุดในกลุ่มคาร์โบไฮเดรต เนื่องจากสิ่งมีชีวิตใช้กลูโคสเป็นแหล่งพลังงาน เช่น เป็นแหล่งพลังงานสำหรับการหายใจของเซลล์ แหล่งพลังงานในการเลี้ยงร่างกายของมนุษย์ โดยทั่วไปแล้วน้ำตาลเชิงเดี่ยวทุกตัวจะต้องเปลี่ยนเป็นน้ำตาลกลูโคสที่ตับก่อนจึงนำไปใช้งานได้ ด้วยเหตุนี้น้ำตาลกลูโคสจึงเป็นน้ำตาลที่พบมากที่สุดในร่างกายโดยเฉพาะในเลือดซึ่งจะถูกเรียกว่า บลัดซูการ์ (blood sugar) และจะพบว่ากลูโคสจะถูกใช้มากในการเป็นแหล่งพลังงานของเซลล์สมองเนื่องจากเซลล์สมองใช้กลูโคสเป็นแหล่งพลังงานเพียงแหล่งเดียวดังนั้นสมองจึงจำเป็นต้องได้รับกลูโคสจากเลือดตลอดเวลา

ชนิดของน้ำตาลกลูโคส

แบ่งออกเป็น 3 ชนิดคือ

- α -glucose monohydrate หรือ dextrose monohydrate คือ ผลึก D-glucose ที่มีน้ำอยู่ 1 โมเลกุล
- α -glucose anhydrous หรือ dextrose anhydrous เป็นผลึกของ D-glucose ที่ไม่มีน้ำอยู่ในโมเลกุลเลย
- α -glucose เป็นผลึกของ D-glucose ที่ทำการตกผลึกที่อุณหภูมิสูงคือ ในช่วง 50-150 °C

แต่ในปัจจุบันกลูโคสที่รู้จักทางการค้า โดยทั่วไปจะแบ่งได้ดังนี้

1. กลูโคสเหลว (glucose syrup)

กลูโคสเหลว หมายถึงสารละลายแซคคาไรด์ ที่ได้จากการย่อยแป้งแล้วนำมาผ่านกรรมวิธีที่ทำให้บริสุทธิ์และทำให้เข้มข้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีลักษณะเป็นของเหลวใส เหนียว ไม่มีกลิ่น มีรสหวานไม่มาก ปัจจุบันมีความนิยมในการผลิตกลูโคสสูงเนื่องจากความต้องการในท้องตลาดค่อนข้างมาก ส่วนใหญ่จะใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร ลูกกวาด เครื่องดื่ม เป็นต้น

2. กลูโคสผง (glucose powder)

กลูโคสผง คือ กลูโคสเหลวที่ผ่านกระบวนการทำให้แห้งจะได้เป็นกลูโคสชนิดผง ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการผลิตเดกซ์โตรสอีกสองชนิด

2.1 เดกซ์โตรสโมโนไฮเดรต (dextrose monohydrate) หมายถึง เดกซ์โตรสที่มีความชื้นรวมอยู่ด้วย ส่วนมากนิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหารกระป๋อง

2.2 เดกซ์โตรสแอนไฮดรัส (dextrose anhydrous) หมายถึง เดกซ์โตรสที่ไม่มีความชื้นและผ่านกรรมวิธีทำให้บริสุทธิ์และตกผลึก นิยมใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตยา

3. ซอบิทอล (sorbitol)

ซอบิทอล หรือดี-กลูซิทอลเป็นสารให้ความหวานที่แปรรูปมาจากเดกซ์โทรสละลายที่มีความเข้มข้น 70 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งผลิตเพื่อทดแทนการนำเข้า ส่วนใหญ่จะนิยมใช้ในอุตสาหกรรมแช่แข็ง การทำลูกชิ้น เพื่อรักษาโปรตีนในอาหารเพื่อไม่ให้แปรสภาพและยังคงความสดใหม่ให้กับอาหาร นอกจากนี้ยังใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง เพื่อรักษาความชุ่มชื้นให้แก่ผลิตภัณฑ์

ส่วนใหญ่ใช้แป้งมันสำปะหลังนำมาผลิตกลูโคสเหลวโดยการเติมเอนไซม์และนำกลูโคสเหลวไปผลิตเป็นกลูโคสผงต่อไปดังแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 กระบวนการผลิตกลูโคสเหลวและกลูโคสผง

ที่มา: ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกลูโคสที่ผลิตในประเทศไทย (2553)

ปัจจุบันประเทศไทยมีโรงงานผลิตสารความหวาน 20 โรง และประเทศมีกำลังการผลิตกลูโคสมากกว่า 20 ล้านตันต่อวัน ส่วนใหญ่ตั้งอยู่ในเขตกรุงเทพฯ และจังหวัดใกล้เคียง โรงงานผลิตกลูโคสเหลวได้เริ่มผลิตมาตั้งแต่ปี 2493 กลูโคสผงผลิตครั้งแรกประมาณปี 2519 ส่วนซอบีคอลลเริ่มผลิตปี 2523 โดยก่อนหน้านี้ต้องนำเข้าจากต่างประเทศทั้งสิ้น

การผลิตกลูโคสในประเทศไทยใช้แป้งมันสำปะหลังชนิดดี (super grade) เป็นวัตถุดิบ ซึ่งสามารถใช้แป้งข้าวโพดแทนได้แต่ต้องใช้เครื่องจักรต่างประเภทกัน สำหรับโรงงานผลิตกลูโคสโดยทั่วไปใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบ

การผลิตน้ำตาลกลูโคส

การผลิตกลูโคสทางการค้าส่วนมากจะใช้วิธีไฮโดรไลซิสแป้ง โดยใช้เอนไซม์ช่วยเร่งปฏิกิริยา และมีแป้งเป็นสารตั้งต้น แป้งที่นำมาผลิตน้ำตาลกลูโคสจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการผลิตพืชในแต่ละพื้นที่ทั่วโลก เช่น ในประเทศสหรัฐอเมริกาแป้งส่วนใหญ่จะผลิตจากข้าวโพดเป็นหลัก ส่วนในประเทศไทยจะนิยมผลิตแป้งจากข้าว ซึ่งจะได้เป็นแป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวเหนียวและใช้เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการผลิตน้ำตาลกลูโคส

กระบวนการผลิตกลูโคสโดยใช้เอนไซม์ช่วยจะมี 2 ขั้นตอน ดังนี้

1. ขั้นตอนแรกใช้เวลาประมาณ 1-2 ชั่วโมง อุณหภูมิประมาณ 100 °C เอนไซม์เหล่านี้จะไฮโดรไลซ์แป้งให้กลายเป็นคาร์โบไฮเดรตที่เล็กลง โดยจะมีโมเลกุลของกลูโคส 5-10 หน่วย ความผิดปกติของกระบวนการจะอยู่ที่การต้มส่วนผสมของแป้งที่อุณหภูมิ 130 °C หรือร้อนกว่านี้ หนึ่งครั้งหรือมากกว่า การใช้ความร้อนระดับนี้เพื่อช่วยการละลายของแป้งในน้ำแต่ก็ทำลายฤทธิ์เอนไซม์ด้วย ทำให้ต้องเติมเอนไซม์เข้าไปใหม่ในการต้มแต่ละครั้ง

2. ขั้นตอนที่สองเรียกว่า แซ็กคาริฟิเคชัน (saccharification) ขั้นตอนนี้จะไฮโดรไลซ์แป้งบางส่วนและไฮโดรไลซ์กลูโคสอย่างสมบูรณ์โดยใช้เอนไซม์กลูโคอะไมเลส จากเชื้อราแอสเพอร์จิลลัสไนเจอร์ (aspergillus niger) สภาพของปฏิกิริยาจะต้องควบคุมให้อยู่ที่พีเอช 4.0-4.5, 60 °C, และความเข้มข้นของคาร์โบไฮเดรตจะต้องอยู่ที่ 30-35 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ภายใต้สภาวะการนี้เหล่านี้แป้งจะถูกเปลี่ยนเป็นกลูโคสประมาณ 96 เปอร์เซ็นต์ หลังจากใช้เวลา 1-4 วัน ถ้าจะให้ผลผลิตสูงกว่านี้สามารถทำได้โดยการทำให้สารละลายจางลง แต่จะต้องใช้หม้อต้มที่ใหญ่กว่าและ

ต้องการน้ำมากกว่าซึ่งสรุปแล้วไม่ประหยัดกว่า สารละลายกลูโคสที่ได้จะถูกทำให้บริสุทธิ์โดยการกรองและเคี่ยวให้งวดในเครื่องระเหยเอนกประสงค์ (multiple-effect evaporator) ดึกูลโคสที่เป็นของแข็งจะทำได้โดยการตกผลึก (crystallization)

น้ำตาลฟรักโทส

น้ำตาลฟรักโทส (fructose) หรือรู้จักกันชื่อ ดี-ฟรักโทส เป็นน้ำตาลมอโนแซคคาไรด์ชนิดคาร์บอนประกอบหกตัว (ketohexose) มีสูตรทางเคมีคือ $C_6H_{12}O_6$ และจะมีน้ำหนักโมเลกุล 180.16 ผลึกที่สมบูรณ์ของน้ำตาลฟรักโทสมีความหนาแน่น 1.598 ผลึกจะมีจุดหลอมเหลวที่ $105^{\circ}C$ นอกจากนี้ยังพบว่าน้ำตาลฟรักโทสมีค่า specific rotation เท่ากับ -92.3° และเนื่องจากค่าดังกล่าวเป็นค่าลบบางครั้งจึงเรียกน้ำตาลฟรักโทสว่าเป็น levulose จากการจัดกลุ่มการเรียกชื่อตามระบบ IUPAC น้ำตาลฟรักโทสนี้ก็จัดอยู่ในกลุ่มของ hexolose

น้ำตาลฟรักโทส หรือบางครั้งเรียกว่า น้ำตาลผลไม้ (fruit sugar) เนื่องจากเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่พบได้ตามธรรมชาติ เช่น เกสรดอกไม้ น้ำผึ้ง ผักและผลไม้เป็นต้น เมื่อพูดถึงในแง่ประโยชน์ของน้ำตาลฟรักโทสนั้นพบว่าน้ำตาลฟรักโทสเป็นน้ำตาลที่ให้ความหวานมากกว่าน้ำตาลซูโครสและน้ำตาลกลูโคส และในผู้ป่วยโรคเบาหวานอาจบริโภคน้ำตาลฟรักโทสแทนน้ำตาลกลูโคสได้เนื่องจากร่างกายสามารถดูดซึมได้ช้า ทำให้ระดับน้ำตาลในเลือดไม่เพิ่มสูงจนเป็นอันตรายต่อร่างกาย ในปัจจุบันจึงมีความพยายามที่จะผลิตน้ำตาลฟรักโทสเพิ่มขึ้นเพื่อนำไปใช้กับอุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมเครื่องดื่มอุตสาหกรรมลูกกวาด และอุตสาหกรรมยาแทนที่น้ำตาลทราย

กระบวนการผลิตน้ำตาลฟรักโทส

การผลิตน้ำตาลฟรักโทสทางการค้ามีส่วนใหญ่เริ่มต้นโดยการผลิตน้ำตาลกลูโคสจากวิธีไฮโดรไลซิสแป้ง โดยใช้เอนไซม์ช่วยเร่งปฏิกิริยาเช่นเดียวกับการผลิตกลูโคส จากนั้นนำมาผ่านกระบวนการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง (isomerization) จากน้ำตาลกลูโคสให้เป็นน้ำตาลฟรักโทส บางครั้งกระบวนการผลิตน้ำตาลฟรักโทสจึงถือว่าน้ำตาลกลูโคสเป็นสารตั้งต้นในกระบวนการน้ำตาลฟรักโทส

ขั้นตอนการผลิตน้ำตาลฟรักโทส

1. กลูโคสเหลวที่ได้จากกระบวนการผลิตกลูโคสจะถูกนำมาผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์ จากนั้นทำการระเหยเพื่อกำจัดน้ำออก
2. ขั้นตอนต่อมาคือกระบวนการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง (isomerization) คือ การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากกลูโคสเหลวไปเป็นฟรักโทสโดยใช้เอนไซม์ไอโซเมอเรสซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวสามารถเปลี่ยนกลูโคสให้เป็นฟรักโทสได้เพียง 42 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่เหลือยังคงโครงสร้างเป็นกลูโคส
3. หลังจากกระบวนการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างแล้วน้ำตาลฟรักโทสจะผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์อีกครั้งจนได้น้ำตาลฟรักโทสเหลว

เทคนิคการแยกสารด้วยระบบเบดเคลื่อนที่จำลอง (Simulated Moving Bed, SMB)

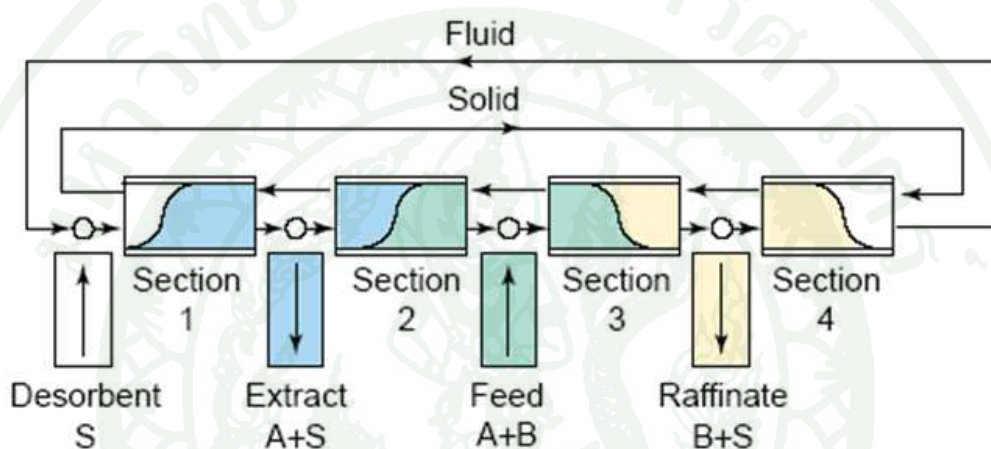
ระบบเบดเคลื่อนที่จำลองเริ่มมีการพัฒนาในช่วงต้นคริสต์ทศวรรษ 1960 โดยระบบเบดเคลื่อนที่จำลองมักถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการแยกสารที่เป็นของเหลวในอุตสาหกรรมการผลิตต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมปิโตรเคมี, การผลิตยาเพื่อใช้ในวงการแพทย์และเภสัชศาสตร์

ระบบเบดเคลื่อนที่จำลองเป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับแยกสารผสมที่แยกจากกันได้ยากให้มีประสิทธิภาพ เป็นระบบที่ประกอบด้วยหลายคอลัมน์ที่มีตัวดูดซับและเฟสเคลื่อนที่เสมือนเคลื่อนที่สวนทางกัน (counter-current) มีกระบวนการแยกและการดูดซับแบบต่อเนื่อง ทำให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการแยก ทั้งยังสามารถแยกได้สารที่มีความบริสุทธิ์สูงและได้ปริมาณที่มากกว่า และใช้ปริมาณตัวทำละลายน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการแยกสารแบบเดิม คือ การแยกแบบแบทช์โครมาโทกราฟี (batch chromatography)

หลักการแยกของระบบเบดเคลื่อนที่จำลอง

ในระบบโครมาโทกราฟีแบบใช้คอลัมน์เดี่ยว (single chromatography column) ประกอบด้วยสารผสม 2 ชนิด ซึ่งสารจะมีความสามารถในการถูกดูดซับโดยเฟสคงที่ (stationary phase) ได้ดีไม่เท่ากัน สารที่ถูกดูดซับได้ดีกว่าจะเคลื่อนที่ได้ช้ากว่าสารที่ถูกดูดซับได้ไม่ดี หากใช้ความยาวของคอลัมน์ที่เหมาะสมจะได้สารบริสุทธิ์ที่จุดหมายเดียวกันแต่ใช้เวลาต่างกัน และถ้าป้อนสารผสมเข้าที่ตรงกลางของคอลัมน์ ทำให้เฟสคงที่หรือตัวดูดซับสามารถเคลื่อนที่ได้ในทิศทางข้าม

กับตัวชะ (eluent) สารที่ถูกดูดซับได้ติดบนเฟสคงที่เรียกว่า “extract” ซึ่งสารชนิดนี้จะติดและเคลื่อนที่ไปกับตัวดูดซับ ส่วนสารอีกชนิดหนึ่งที่ดูดซับบนเฟสคงที่ได้ไม่ดีหรือไม่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับจะเรียกสารนี้ว่า “raffinate” นอกจากนี้ยังสามารถป้อนสารได้อย่างต่อเนื่องเพื่อให้เกิดการแยกสารอย่างต่อเนื่อง หลักการแยกดังกล่าวถือว่าเป็นต้นแบบของระบบเบดเคลื่อนที่จริง (True Moving Bed, TMB) ระบบนี้ประกอบด้วย 4 ส่วนหลักดังแสดงในภาพที่ 5 แต่เนื่องจากการทำให้เฟสของแข็งเคลื่อนที่ได้อย่างต่อเนื่องนั้นทำได้ค่อนข้างยาก จึงนำหลักการดังกล่าวมาพัฒนาเป็นระบบเบดเคลื่อนที่จำลอง



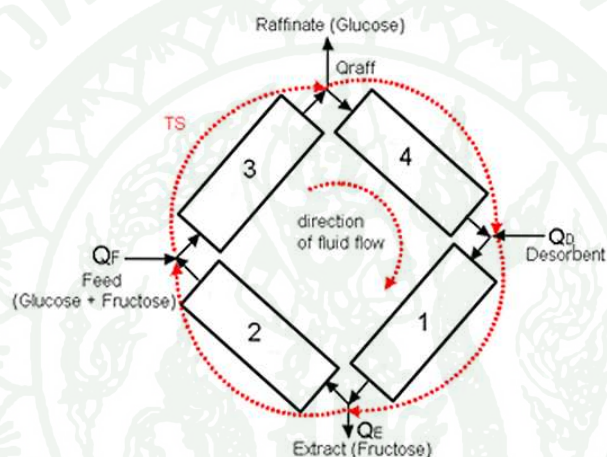
ภาพที่ 5 การทำงานของระบบเบดเคลื่อนที่จริง (true moving-bed, TMB)

ที่มา: Juza *et al.* (2000)

ระบบเบดเคลื่อนที่จำลอง (simulated moving-bed, SMB) ใช้หลักการแยกแบบเดียวกับระบบเบดเคลื่อนที่จริงแต่ต่างกันที่ตัวดูดซับหรือคอลัมน์โครมาโทกราฟฟีจะอยู่กับที่และใช้การเปิด-ปิดวาล์วของสารเข้าและสารออกสลับกันไปเป็นช่วงเวลาในทิศทางเดียวกันกับทิศทางการไหลของตัวชะ

ระบบเบดเคลื่อนที่จำลองโดยทั่วไปจะแบ่งออกเป็น 4 ส่วนหลัก ในแต่ละส่วนอาจประกอบด้วย 1 คอลัมน์ หรือมากกว่า ภายในของคอลัมน์จะบรรจุตัวดูดซับที่เป็นของแข็งไว้สำหรับในงานวิจัยนี้ศึกษาระบบเบดเคลื่อนที่จำลองที่มีเพียง 1 คอลัมน์สำหรับในแต่ละส่วน การทำงานเริ่มด้วยการป้อนสาร (ในที่นี้คือน้ำตาลฟรักโทสและน้ำตาลกลูโคส) เข้าสู่ระบบที่ตำแหน่งระหว่างส่วนที่ 2 และ 3 เมื่อสารเกิดการแยกน้ำตาลฟรักโทสจะออกที่สายผลิตภัณฑ์ extract

เนื่องจากน้ำตาลฟรักโทสถูกดูดซับในตัวดูดซับได้ดี ในทางตรงข้ามน้ำตาลกลูโคสจะออกที่สายผลิตภัณฑ์ raffinate เนื่องจากน้ำตาลกลูโคสจะถูกดูดซับในตัวดูดซับได้น้อย (Pereira *et al.*, 2008) โดยในส่วนที่ 1 จะเป็นส่วนที่อยู่ระหว่างสายสารของตัวชะกับ extract ส่วนที่ 2 เป็นส่วนที่อยู่ระหว่างสายสาร extract กับสายป้อนสารเข้า ส่วนที่ 3 เป็นส่วนที่อยู่ระหว่างสายป้อนสารเข้ากับ raffinate และส่วนที่ 4 เป็นส่วนที่อยู่ระหว่าง raffinate กับตัวชะ ซึ่งตัวชะที่ออกจากส่วนนี้จะถูกนำกลับไปใช้ใหม่ในส่วนที่ 1 พบว่าระบบนี้มีการใช้ปริมาณตัวชะหรือตัวทำละลายน้อยกว่าการแยกสารด้วยวิธีทางโครมาโทกราฟีแบบอื่นๆ โดยในส่วนที่ 2 และ 3 เป็นส่วนที่สำคัญมากเนื่องจากในบริเวณนี้จะเกิดการแยกสาร ส่วนต่างๆของระบบเบดเคลื่อนที่จำลองดังอธิบายข้างต้นแสดงดังภาพที่ 6

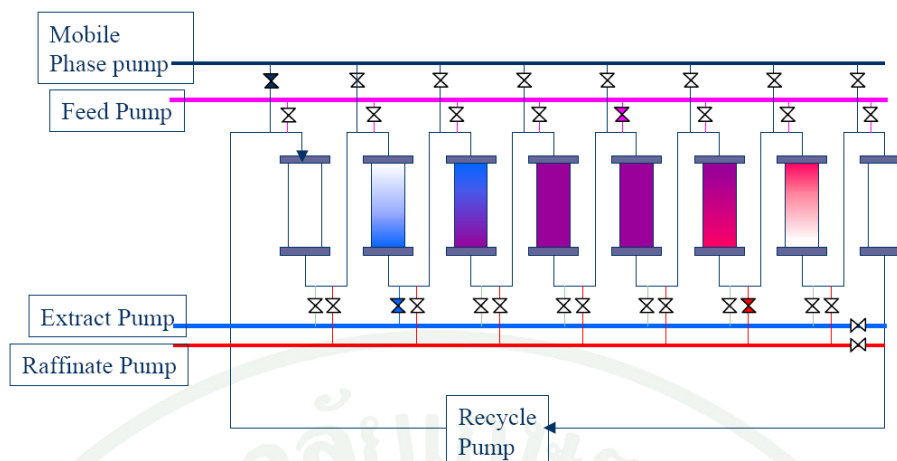


ภาพที่ 6 ส่วนต่างๆของระบบเบดเคลื่อนที่จำลอง

การจำลองการทำงานของระบบเบดเคลื่อนที่จำลอง

การทำงานของระบบเบดเคลื่อนที่จำลองเกี่ยวข้องกับการเปิด-ปิดวาล์ว ซึ่งสมมติให้การเปิด-ปิดวาล์วของสารเข้าและสารออกสลับกันไปทุก 3 นาที โดยจะมีทั้งหมด 8 คอลัมน์ ดังนั้นถ้าแบ่งคอลัมน์ออกเป็น 4 ส่วนจะพบว่าในแต่ละส่วนจะมีคอลัมน์อยู่ 2 คอลัมน์ ดังแสดงภาพที่ 7-9

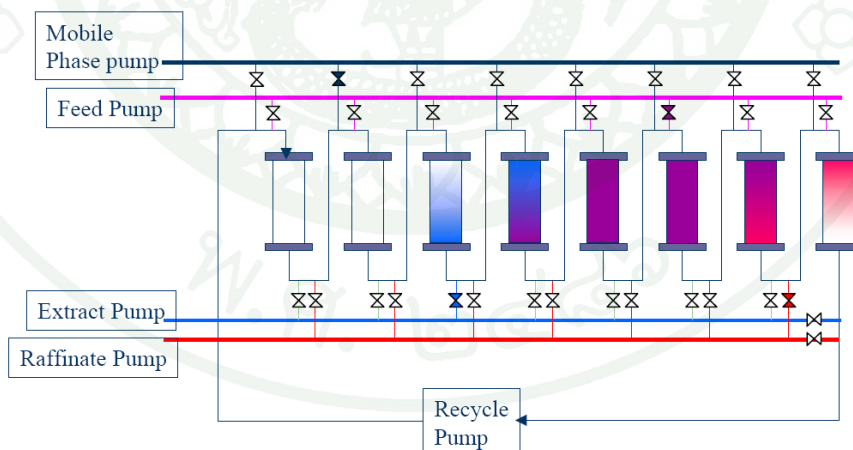
ขั้นที่ 1 เป็นขั้นเริ่มต้นโดยตัวชะ (mobile phase) และสารผสม (feed) ถูกป้อนเข้าไปในระบบ โดยสารจะป้อนเข้าไปในคอลัมน์ที่ 1 กับ 5 (ส่วนที่ 1 กับส่วนที่ 3) ตามลำดับ ตัวชะจะเคลื่อนที่ตามเข็มนาฬิกาและ ผลิตภัณฑ์ในสาย extract จะออกที่คอลัมน์ที่ 2 (ส่วนที่ 1) ผลิตภัณฑ์ในสาย raffinate จะออกที่คอลัมน์ที่ 6 (ส่วนที่ 3) ดังในภาพที่ 7



ภาพที่ 7 แบบจำลองการทำงานของระบบเบดเคลื่อนที่จำลองในขั้นที่ 1

ที่มา: Geoffrey B Cox. CHIEAL Technologies inc (2009)

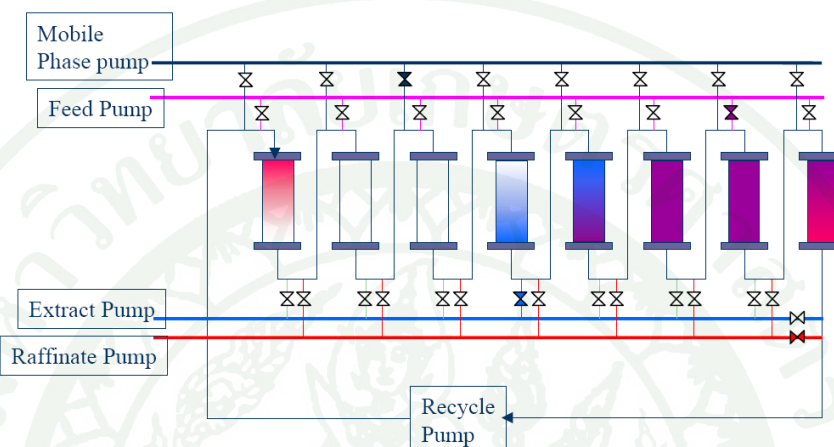
ขั้นที่ 2 เมื่อเวลาผ่านไป 3 นาที ทำการสลับสายสารครั้งที่ 1 ด้วยการเปิด-ปิดวาล์วในระบบ โดยคอลัมน์เลื่อนถัดไปทางขวา 1 ตำแหน่ง ดังนั้นตัวชะและสารผสมจะถูกป้อนเข้าไปในระบบในคอลัมน์ที่ 2 กับ 6 (ส่วนที่ 1 กับส่วนที่ 3) ตามลำดับ และผลิตภัณฑ์ในสาย extract จะออกที่คอลัมน์ 3 (ส่วนที่ 2) และผลิตภัณฑ์ในสาย raffinate จะออกที่คอลัมน์ 7 (ส่วนที่ 4) ดังแสดงในภาพที่ 8



ภาพที่ 8 แบบจำลองการทำงานของระบบเบดเคลื่อนที่จำลองในขั้นที่ 2

ที่มา: Geoffrey B Cox. CHIEAL Technologies inc (2009)

ขั้นที่ 3 เมื่อเวลาผ่านไปอีก 3 นาที ทำการสลับสายสารครั้งที่ 2 ด้วยการเปิด-ปิดวาล์วในระบบโดยคอลัมน์เลื่อนถัดไปทางขวา 1 ตำแหน่ง ดังนั้นตัวชะและสารผสมจะถูกป้อนเข้าไปในระบบในคอลัมน์ที่ 3 กับ 7 (ส่วนที่ 2 กับส่วนที่ 4) ตามลำดับ และผลิตภัณฑ์ในสาย extract จะออกที่คอลัมน์ 4 (ส่วนที่ 2) และผลิตภัณฑ์ในสาย raffinate จะออกที่คอลัมน์ 8 (ส่วนที่ 4) ดังแสดงในภาพที่ 9



ภาพที่ 9 แบบจำลองการทำงานของระบบเบดเคลื่อนที่จำลองในขั้นที่ 3

ที่มา: Geoffrey B Cox. CHIEAL Technologies inc (2009)

จากนั้นทำการสลับสายสารในทิศตามเข็มนาฬิกาไปจนครบรอบ คือ สายตัวชะและสายป้อนจะป้อนเข้าในคอลัมน์ที่ 1 กับ 5 อีกครั้ง

ถึงแม้ว่าระบบเบดเคลื่อนที่จำลองจะมีค่าใช้จ่ายในการลงทุนค่อนข้างสูงเนื่องจากต้องใช้คอลัมน์จำนวนมาก รวมถึงมีความซับซ้อนในการติดตั้งและการใช้งาน และยังมีขีดจำกัดคือสามารถแยกสารผสมออกเป็น 2 ส่วนเท่านั้น คือใช้แยกสารผสม 2 ชนิดออกจากกัน หรือใช้แยกสารชนิดหนึ่งออกจากสารอื่นๆ แต่โดยภาพรวมแล้ว การนำระบบเบดเคลื่อนที่จำลองไปใช้ประโยชน์ถือว่าคุ้มค่ากับการลงทุนระยะยาวเมื่อเทียบกับการแยกด้วยแบบทซ์โครมาโทกราฟี การเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของทั้ง 2 วิธีแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบการแยกสารด้วยวิธีแบทช์โครมาโทกราฟี (batch chromatography) และระบบเบดเคลื่อนที่จำลอง (SMB)

Batch	SMB
-ใช้เครื่องมือง่าย ไม่ซับซ้อน	-เครื่องมือมีความซับซ้อน ยุ่งยาก
-ใช้ปริมาณตัวทำละลายมาก	-ใช้ปริมาณตัวทำละลายไม่มาก
-ขั้นตอนการทำไม่ยุ่งยาก แต่ได้ผลผลิตต่ำ	-ได้ผลผลิตมากและมีความเข้มข้นสูง
-ค่าใช้จ่ายไม่สูงหากทำในปริมาณที่น้อย (small scale)	-ค่าใช้จ่ายต่ำหากทำในปริมาณมาก (large scale)

ที่มา: พัฒตรา (2552)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

น้ำตาลเป็นสารที่มีอยู่ตามธรรมชาติในผลผลิตทางการเกษตรได้แก่ ผัก ผลไม้ การผลิตน้ำตาลในระดับอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ใช้อ้อยและหัวบีทเป็นวัตถุดิบ โดยน้ำตาลที่ได้คือน้ำตาลซูโครส ในเชิงเศรษฐกิจน้ำตาลซูโครสถูกใช้เป็นสารปรุงแต่งในอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม แต่จากข้อมูลเชิงวิชาการในปัจจุบันพบว่าการใช้บริโภคน้ำตาลซูโครสในปริมาณมากส่งผลกระทบต่อสุขภาพได้แก่ ปัญหาโรคอ้วน โรคเบาหวาน ดังนั้นน้ำตาลกลูโคสและฟรักโทสจึงเข้ามามีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมอาหาร เครื่องดื่ม และยา เนื่องจากคุณสมบัติของน้ำตาลฟรักโทสมีความหวานมากกว่าน้ำตาลซูโครสอีกทั้งร่างกายสามารถดูดซึมน้ำตาลกลูโคสและน้ำตาลฟรักโทสรวมถึงการนำไปใช้ได้ดีกว่า สำหรับความเข้มข้นที่อุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่มต้องการคือ กลูโคส 52 เปอร์เซ็นต์ ฟรักโทส 42 เปอร์เซ็นต์ และ 55 เปอร์เซ็นต์ ส่วนในอุตสาหกรรมยาต้องการความเข้มข้นของน้ำตาลทั้งสองในปริมาณที่สูง ดังนั้นงานวิจัยจำนวนมากจึงต้องการศึกษาวิธีการแยกน้ำตาลทั้งสองออกจากกันเพื่อให้ได้น้ำตาลที่มีความบริสุทธิ์สูงและต่อเนื่องดังนี้

1. โครมาโทกราฟี (chromatography)

Altenhoner *et al.* (1997) ศึกษาการประมาณค่าพารามิเตอร์สำหรับการแยกสารด้วยการใช้คอลัมน์โครมาโทกราฟี ซึ่งงานวิจัยนี้ศึกษาจากสมการทางคณิตศาสตร์และการทดลองโดยจะใช้น้ำกลั่นเป็นตัวชะ ภายในคอลัมน์บรรจุด้วย ion-exchange resin เพื่อใช้เป็นตัวดูดซับ จากนั้นนำค่าพารามิเตอร์ที่ศึกษาจากโครมาโทกราฟีมาคำนวณด้วยเครื่องมือ SPEEDUP (Aspen, Cambridge, MA, USA) พารามิเตอร์ที่ถูกศึกษาในงานวิจัยนี้คือ ความสามารถของเบดในการดูดซับ กลูโคสและฟรักโทส ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับ และเวลาที่ใช้ในการดูดซับ พบว่าฟรักโทสถูกดูดซับในเบดได้ดีกว่ากลูโคส นอกจากนี้เบดจะดูดซับได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ และเบดจะดูดซับฟรักโทสจนอิ่มตัวที่เวลาประมาณ 900 วินาที

Howard *et al.* (1988) ศึกษาการแยกกลูโคสและฟรักโทสด้วยโครมาโทกราฟีแบบห่วง ซึ่งสนใจผลของอัตราการป้อนสาร ความเข้มข้นของสารที่ต้องการแยก ความเร็วของตัวชะหรือเฟสเคลื่อนที่ และอัตราการหมุนของโครมาโทกราฟีแบบวงแหวน จากการทดลองได้ทำการเปรียบเทียบกับโครมาโทกราฟีแบบธรรมดา เพื่อวิเคราะห์ความเหมาะสมสำหรับการนำโครมาโทกราฟีแบบวงแหวนไปใช้จริง โดยการทดลองจะใช้น้ำกลั่นเป็นตัวชะและเบดที่บรรจุภายในคอลัมน์คือ ion-exchange resin ผลการทดลองพบว่า การแยกสารสามารถดำเนินการได้ต่อเนื่อง การ

ติดตั้งอุปกรณ์ง่ายไม่ยุ่งยากซับซ้อน ผลผลิตอยู่ในระดับที่น่าพึงพอใจ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการแยกได้ดีกว่าโครมาโทกราฟีแบบธรรมดา ดังนั้นโครมาโทกราฟีแบบห้วงจึงเหมาะสำหรับการนำไปใช้จริง

2. ระบบหอดูดซับแบบไหลสวนทางกัน (counter-current adsorption system)

Matijasevic and Vasic-Racki (2002) ศึกษาการแยกสาร 2 ชนิดออกจากกันโดยใช้ระบบหอดูดซับแบบไหลสวนทางกันด้วยความแตกต่างของความสามารถในการดูดซับ โดยที่ระบบนี้จะประกอบด้วยคอลัมน์ 4 คอลัมน์ต่อกันแบบอนุกรมภายในบรรจุด้วยเบด Lewatit MDS 1368 โดยจะทำการสลับสายป้อนเมื่อถึงเวลาของการสลับและทำการเปลี่ยนค่าเวลาของการสลับเพื่อดูความสามารถของการแยกสาร การศึกษาความสามารถในการแยกสารโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่าสัดส่วนของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของสายป้อนกับสายของตัวชะที่เหมาะสมสำหรับการแยกน้ำตาลกลูโคสกับฟรักโทส พบว่าค่าสัดส่วนของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของสายป้อนกับสายของตัวชะและค่าเวลาของการสลับมีผลต่อความสามารถของการแยกสาร ในงานวิจัยนี้พบว่าประสิทธิภาพของการแยกสารได้ดีที่สุดที่ค่าสัดส่วนระหว่างสายของตัวชะกับสายป้อนมีค่ามาก

Nobre *et al.* (2009) ศึกษาการดูดซับของน้ำตาลกลูโคส ฟรักโทส และซูโครสที่ตัวดูดซับต่างกัน 2 ชนิด โดยทำการศึกษาภายในหอดูดซับ ตัวดูดซับที่ใช้สำหรับศึกษานั้นมี 2 ชนิด คือ โพแทสเซียม (K^+) และ โซเดียม (Na^+) โดยจะทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 25 และ 40 °C และช่วงของค่าความเข้มข้นจะใช้ที่ 5 และ 250 กรัม/ลิตร ซึ่งจะพบว่าถ้าใช้ตัวดูดซับ Na^+ ความสามารถในการดูดซับของน้ำตาลจะเป็นดังนี้คือ ฟรักโทส > กลูโคส > ซูโครส และพบว่าถ้าเราต้องการแยกกลูโคสและฟรักโทสออกจากซูโครสจะต้องใช้ตัวดูดซับ K^+ ที่อุณหภูมิ 25°C

3. เมมเบรนของเหลว (liquid membrane)

Luccio *et al.* (2000) ศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้เมมเบรนในการสกัดน้ำตาลฟรักโทสออกจากน้ำตาลที่อยู่ในน้ำหมัก เชื้อกรองที่ใช้เป็นวัสดุจากโพลีโพรพิลีนซึ่งมีความพรุนอยู่ในระดับไมโครซุ่มด้วยสารละลาย phenylboronic acid ใน 2-nitrophenyl octyl ether โดยงานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นในสายป้อนต่อการสกัดน้ำตาลฟรักโทส พบว่าการใช้เชื้อกรองแบบ hollow fiber มีความเสถียรมากกว่าการใช้เชื้อกรองแบบ flat sheet และสามารถสกัดน้ำตาล

ฟรักโทสได้สูงเมื่อค่าความเข้มข้นของสายป้อนมีค่าต่ำ นอกจากนี้ยังพบว่า hollow fiber มีความเหมาะสมกับการใช้งานในเมมเบรนของเหลว เนื่องจากสามารถสกัดน้ำตาลฟรักโทสจากน้ำหมักได้ แต่ยังคงต้องการปรับปรุงแก้ไขต่อไปเพื่อให้สามารถทนต่อการไหลและการคงทนต่อการใช้งานระยะยาว

4. ระบบเบดเคลื่อนที่จำลอง (simulated moving bed reactor)

Azevedo and Rodrigues (2001) ศึกษาการแยกน้ำตาลกลูโคสกับน้ำตาลฟรักโทสออกจากกันโดยใช้เทคนิคเบดเคลื่อนที่จำลอง ซึ่งเป็นเทคนิคที่รวมการเกิดปฏิกิริยาเคมีและระบบการแยกสารให้บริสุทธิ์ภายในเครื่องเดียว เพื่อให้สามารถแยกสารได้อย่างต่อเนื่องและได้สารที่มีความบริสุทธิ์ที่ค่อนข้างสูง งานวิจัยนี้ทำการศึกษาโดยใช้การจำลองสมการคณิตศาสตร์เพื่อหาค่าความบริสุทธิ์ของสารที่แยกได้โดยการออกแบบสภาวะที่ใช้แยกสารตามทฤษฎี “separation volumes” เพื่อหาค่าสำหรับการทดลอง และนำค่าความบริสุทธิ์ที่ได้จากการแยกด้วยระบบเบดเคลื่อนที่จำลอง เทียบกับการทดลองและผลที่ได้จากการทำการทดลองพบว่าความบริสุทธิ์ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน โดยสามารถใช้ระบบ 12 คอลัมน์แยกให้มีความบริสุทธิ์ได้สูงถึง 96 เปอร์เซ็นต์ สำหรับน้ำตาลฟรักโทส และ 92 เปอร์เซ็นต์ สำหรับน้ำตาลกลูโคส

นอกจากการใช้เทคนิคเบดเคลื่อนที่จำลองสำหรับการแยกน้ำตาลกลูโคสและน้ำตาลฟรักโทสออกจากน้ำตาลทรายแล้วยังได้รับความสนใจสำหรับการแยกสารอื่นๆอีกเนื่องจากระบบเบดเคลื่อนที่จำลองนั้นเหมาะสมกับสารที่ต้องการทั้งในส่วนของการเกิดปฏิกิริยาและการแยกสารให้เกิดความบริสุทธิ์เนื่องจากเทคนิคนี้ให้อัตราการผลิตที่สูงและต่อเนื่องทั้งยังใช้ปริมาณตัวชะต่ำ โดยจะถูกนำมาใช้ในระบบต่างๆดังนี้

Zhang *et al.* (2001) ศึกษาการสังเคราะห์ MTBE จาก methanol และ tert- butyl alcohol โดยใช้ตัวดูดซับที่ทำหน้าที่เป็นทั้งตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวดูดซับ คือ Amberlyst 15 ซึ่งจะศึกษาจากการทำการทดลองและการใช้สมการทางคณิตศาสตร์ โดยศึกษาผลกระทบของ เวลาของการสลับ, สายป้อนของสารละลาย, จำนวนของคอลัมน์ในแต่ละส่วน ซึ่งจะพบว่าความบริสุทธิ์สูงสุดคือ 85 เปอร์เซ็นต์ ของ MTBE

Pereira *et al.* (2008) ศึกษาการสังเคราะห์ dimethylacetal โดยใช้การทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเบดเคลื่อนที่จำลอง ศึกษาผลกระทบของเวลาของการสลับองค์ประกอบของสารป้อน อัตราการไหลของตัวชะ พบว่าระบบการทำงานแบบเบดเคลื่อนที่จะได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนค่าเวลาของการสลับค่อนข้างมาก และค่าที่ส่งผลต่อความบริสุทธิ์มากที่สุดคือค่าอัตราการไหลของตัวชะ ได้ความบริสุทธิ์ของ dimethylacetal สูงถึง 91.41 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณการผลิตได้เท่ากับ 5.17 Kg/L day และปริมาณการใช้ตัวชะเท่ากับ 7.11 L/Kg

Pereira *et al.* (2009) ศึกษาการสังเคราะห์ ethyl lactate โดยใช้ระบบเบดเคลื่อนที่จำลอง ซึ่งจะศึกษาจากการทำการทดลองและการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยศึกษาผลกระทบของเวลาของการสลับ องค์ประกอบของสารป้อน (feed composition) จำนวนของคอลัมน์ในแต่ละส่วน (configuration) พบว่าเมื่อเพิ่มจำนวนคอลัมน์ในส่วนของการเกิดปฏิกิริยา คือ ในคอลัมน์ที่ 2 และ 3 จะส่งผลให้การแยกสารทำได้ดีขึ้น และเมื่อลดจำนวนคอลัมน์ในส่วนที่ 4 ลงเหลือ 2 คอลัมน์จะพบว่ามีจำนวนเพียงพอที่ล้างตัวดูดซับเพื่อใช้ในรอบการทำงานถัดไป ค่าที่ดีที่สุดสำหรับการแยกสารนี้คือที่ค่าการสลับเท่ากับ 1 นาที จะให้ความบริสุทธิ์ 95 เปอร์เซ็นต์ ของ ethyl lactate และปริมาณการผลิตได้เท่ากับ 32 Kg/L.day

Kang *et al.* (2010) ศึกษาการออกแบบระบบเบดเคลื่อนที่จำลองเพื่อแยกสาร 3 ชนิด ได้แก่ 13-dehydroxybaccatin III, paclitaxel และ 10-deacetylpaclitaxel โดยการนำเบดเคลื่อนที่ที่จำลอง 2 วง มาต่อกันแบบอนุกรม โดยศึกษาอัตราการไหลสายเข้า-ออก และเวลาในการสลับสายที่เหมาะสม ภายใต้เงื่อนไขคือ แยกสารทั้ง 3 ชนิดได้ความบริสุทธิ์ 99 เปอร์เซ็นต์ ความดันลดไม่เกิน 500 psi พบว่าวิธีการต่อเบดเคลื่อนที่จำลองที่เหมาะสมสำหรับการแยกสาร 3 ชนิดนี้คือ การแยก paclitaxel ก่อนในเบดเคลื่อนที่จำลองแรก จากนั้น 13-dehydroxybaccatin III และ 10-deacetylpaclitaxel จะถูกส่งมาแยกในเบดเคลื่อนที่จำลองที่ 2 เวลาในการสลับที่เหมาะสมคือ 11.3491 นาที และ 3.8363 นาที ในวงที่ 1 และ วงที่ 2 ตามลำดับ

งานวิจัยนี้มีความสนใจที่จะศึกษาการมีสายป้อนกลับ จากทฤษฎีเกี่ยวกับสัดส่วนของสารซึ่งก็คือการมีสายป้อนกลับกล่าวไว้ว่า ถ้ามีปริมาณของสารมากขึ้น เวลาในกระบวนการมีค่าสั้น จะส่งผลให้ปริมาณการผลิตสารได้มีค่าสูงมากขึ้น Heuer (1995)

Lee and Wankat (2009) ศึกษาการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการทำงานแบบ คอลัมน์เดียวในโครมาโทกราฟีที่มีสายป้อนกลับ กับการทำงานในเบดเคลื่อนที่จำลองแบบที่มี จำนวนคอลัมน์ในระบบ 4 และ 8 คอลัมน์ ที่ไม่มีสายป้อนกลับ จากผลการทดลองพบว่าในคอลัมน์ เดียวของโครมาโทกราฟีที่มีสายป้อนกลับ จะสามารถปรับปรุงค่าปริมาณการผลิตได้และใช้ ปริมาณของตัวชะน้อยกว่าเมื่อเทียบกับแบบเคลื่อนที่จำลองที่มี 4 คอลัมน์ แต่เมื่อเทียบกับเบด เคลื่อนที่จำลองที่มี 8 คอลัมน์ในระบบจะพบว่า คอลัมน์เดียวในโครมาโทกราฟีที่มีสายป้อนกลับ จะมีค่าปริมาณการผลิตได้ต่ำกว่า และมีการใช้ปริมาณตัวชะสูงกว่าการใช้แบบเคลื่อนที่จำลอง 8 คอลัมน์



แบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์

การศึกษาการทำงานและผลกระทบของสายป้อนกลับสำหรับการแยกน้ำตาลกลูโคสกับน้ำตาลฟรักโทสในถังปฏิกรณ์แบบเบดเคลื่อนที่จำลองจะศึกษาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สมการที่ใช้อธิบายการทำงานของถังปฏิกรณ์แบบเบดเคลื่อนที่จำลองสำหรับการแยกกลูโคสกับฟรักโทสออกจากกันนำมาจากผลงานของ (Azevedo and Rodrigues, 2001) โดยสมการที่ใช้อธิบายเป็นสมการสมดุลมวลสารของของแข็งและของไหลในสารประกอบ i และคอลัมน์ k ดังนี้

$$\frac{\partial C_{i,k}}{\partial \theta} + v \frac{\partial \bar{q}_{i,k}}{\partial \theta} = \frac{\psi_k}{Pe_k} \frac{\partial^2 C_{i,k}}{\partial X^2} - \psi_k \frac{\partial C_{i,k}}{\partial X} \quad (5)$$

$$\frac{\partial \bar{q}_{i,k}}{\partial \theta} = \alpha i \frac{Bi_{m_k}}{5 + Bi_{m_k}} [\bar{q}_{i,k}^* - \bar{q}_{i,k}] \quad (6)$$

$$\bar{q}_{i,k}^* = K'_l C_{i,k} \quad (7)$$

ซึ่ง $X = z / L_{col}$ และ $\theta = t / t_s$

สถานะขอบเขตที่ศึกษาคือ

$$C_{i,k}^{in} = C_{i,k}(0, \theta) - \frac{1}{Pe_k} \frac{\partial C_{i,k}}{\partial X} \quad (8)$$

$$\frac{\partial C_{i,k}}{\partial X}(1, \theta) = 0 \quad (9)$$

สถานะเริ่มต้นที่ใช้ศึกษาคือ

$$C_{i,k}(X, 0) = C_{i,k}^0(X) \quad \bar{q}_{i,k}(X, 0) = \bar{q}_{i,k}^0(X) \quad (10)$$

ตัวแปรในทอมไร้หน่วยที่ใช้ในสมการข้างบน

$$\psi_k = \frac{U_{F_z} t_s}{L_{col}} \quad : \alpha i = k_{h_z} t_s \quad (11)$$

$$k_{h_z} = \left(\frac{K + \varepsilon_p}{k_p} + \frac{K}{k_\mu (K + \varepsilon_p)} \right)^{-1} \quad : K' = K + \varepsilon_p \quad (12)$$

$$Pe_k = U_{F_z} \frac{L_{col}}{D_{ax_k}} \quad (13)$$

$$Bi_{m_k} = \frac{k_{h_z} R_p}{D_{pe}} \quad (14)$$

สมการสมดุลมวลที่จุดของสายเข้าและสายออก

Desorbent node:

$$C_{i,k(X=1)}^{in} = \frac{Q_4}{Q_1} C_{i,k-1(X=0)} \quad (15)$$

Extract (j=2) และ raffinate (j=4) nodes:

$$C_{i,k(X=0)}^{in} = C_{i,k-1(X=1)} \quad (16)$$

Feed node:

$$C_{i,k(X=0)}^{in} = \frac{Q_2}{Q_3} C_{i,k-1(X=1)} + \frac{Q_F}{Q_3} C_{i,F} \quad (17)$$

สมดุลของถังผสม

การศึกษาผลกระทบของการมีสายป้อนกลับจะมีอุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาเพิ่มเติมคือถังผสม เพื่อเก็บผลิตภัณฑ์ไว้รอการป้อนกลับที่ไปผสมกับสายป้อนบริสุทธิ์ การเปลี่ยนแปลงสมดุลมวลสารภายในถังผสมสามารถอธิบายได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{dC_{i,CSTR}}{dt} = \frac{RQ}{V_{CSTR}} [C_{i,CSTR,in} - C_{i,CSTR,out}] \quad (18)$$

R คือ อัตราส่วนของการป้อนสารกลับ

หมายเหตุ : กรณีการป้อนกลับของสาย extract : $Q = Q_X$

กรณีการป้อนกลับของสาย raffinate : $Q = Q_R$

สมการที่ใช้หาค่าเวลาของการสลับ (switching time)

สมการนี้ใช้เพื่อหาค่าเวลาของการสลับที่เหมาะสมสำหรับที่ความยาวคอลัมน์ขนาดต่างๆ เพื่อใช้ศึกษาผลกระทบในส่วนของความยาวของคอลัมน์และเวลาของการสลับ (Azevedo and Rodrigues, 2001)

$$\gamma_4 = 0.7vK'_{GL} = \frac{Q_4 t^*}{\varepsilon V_C} - 1 \quad (19)$$

พารามิเตอร์บ่งชี้สมรรถนะ (performance parameter)

สมการนี้เป็นสมการที่ใช้บอกถึงประสิทธิภาพการทำงานของระบบเบดเคลื่อนที่จำลอง คือ ค่าความบริสุทธิ์ของสาร (ทั้งในสายผลิตภัณฑ์ทั้ง extract และ raffinate) ค่าความบริสุทธิ์ของการแยกสารในสายผลิตภัณฑ์ของสาย extract หาได้จากความบริสุทธิ์ของน้ำตาลฟรักโทสเนื่องจากในสายนี้จะมีปริมาณน้ำตาลฟรักโทสอยู่ปริมาณมาก ค่าความบริสุทธิ์ของการแยกสารในสายผลิตภัณฑ์ของสาย raffinate หาได้จากความบริสุทธิ์ของน้ำตาลกลูโคสเนื่องจากในสายนี้จะมีปริมาณน้ำตาลกลูโคสอยู่ในปริมาณมาก (Subramani *et al.*, 2003)

$$\text{ความบริสุทธิ์ของสาร : } Pur_F = \frac{\text{kg of fructose}}{\text{kg of glucose and fructose}} \text{ (at the extract port)} \quad (20)$$

$$Pur_G = \frac{\text{kg of glucose}}{\text{kg of glucose and fructose}} \text{ (at the raffinate port)} \quad (21)$$

$$\text{ปริมาณการผลิตได้ (kg/m}^3 \cdot \text{h) : } PR_F = \frac{\text{kg of fructose at the extract port}}{(\text{m}^3 \text{ adsorbent})(\text{hour})} \quad (22)$$

$$PR_G = \frac{\text{kg of glucose at the raffinate port}}{(\text{m}^3 \text{ adsorbent})(\text{hour})} \quad (23)$$

สภาวะทดสอบที่ใช้ในการศึกษาการแยกน้ำตาลกลูโคสและน้ำตาลฟรักโทสออกจากกัน โดยศึกษาถึงผลกระทบของสายป้อนกลับดังในตารางที่ 4

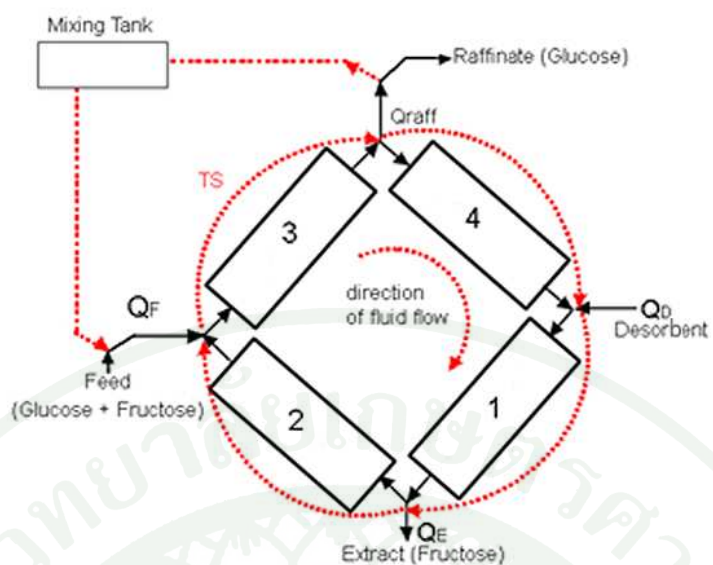
ตารางที่ 4 แสดงค่าสภาวะการทดสอบ (Operating Conditions)

พารามิเตอร์	ค่า	
N_c	4	
$L_c(m)$	0.9	
$D_c(m)$	0.026	
	กลูโคส	ฟรักโทส
Pe	500	500
Bi_m	300	300
ε	0.4	0.4
K	0.17	0.43
K'	0.27	0.53
$k_h(S^{-1})$	3.15×10^{-2}	2.214×10^{-2}
$k_p(S^{-1})$	4.17×10^{-2}	4.17×10^{-2}
$Q_1(m^3/s)$	1.773×10^{-6}	
$Q_2(m^3/s)$	1.395×10^{-6}	
$Q_3(m^3/s)$	1.563×10^{-6}	
$Q_4(m^3/s)$	1.2×10^{-6}	
$Q_{Ex}(m^3/s)$	3.78×10^{-7}	
$Q_{raff}(m^3/s)$	3.63×10^{-7}	
$Q_{des}(m^3/s)$	5.73×10^{-7}	
$Q_F(m^3/s)$	1.68×10^{-7}	

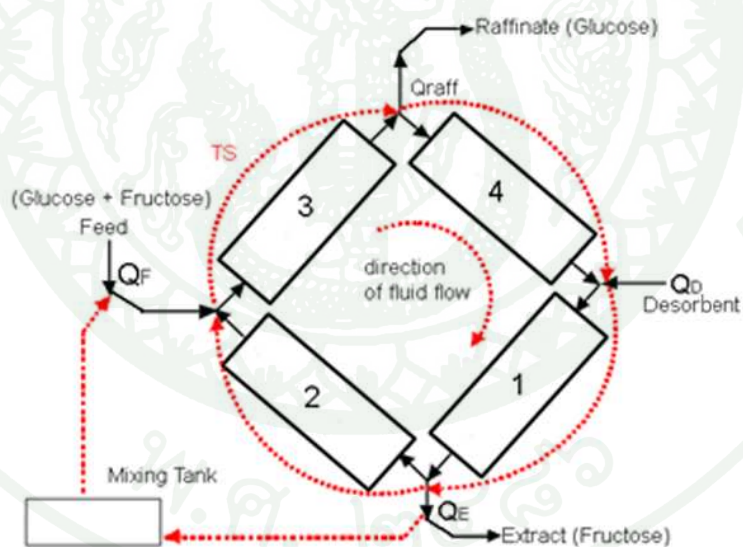
อุปกรณ์และวิธีการ

การศึกษาผลกระทบของสายป้อนกลับสำหรับการแยกน้ำตาลกลูโคสกับน้ำตาลฟรักโทส ในถึงปฏิกรณ์แบบเบดเคลื่อนที่จำลอง จะศึกษาจากแบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ในรูปของระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (partial differential equations) ซึ่งสามารถหาคำตอบได้จากโปรแกรมสำเร็จรูปคือ FlexPDE (PDE Solutions Inc., Antioch, CA) โปรแกรมนี้จะหาคำตอบด้วยวิธีเชิงตัวเลข โดยมีความละเอียด 200 จุด ในแต่ละคอลัมน์เพื่อความแม่นยำของผลเฉลย สำหรับผลกระทบของสายป้อนกลับต่อการแยกกลูโคสกับน้ำตาลฟรักโทสนั้นแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ สายป้อนกลับจากสาย extract และสายป้อนกลับจากสาย raffinate ตัวแปรต่างๆที่ศึกษา ได้แก่ ความยาวของคอลัมน์ เวลาของการสลับ และอัตราส่วนการป้อนกลับ จากนั้นนำความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสและน้ำตาลฟรักโทสทั้งในสายผลิตภัณฑ์ extract และ raffinate ไปวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำงานของระบบเบดเคลื่อนที่จำลอง คือค่าความบริสุทธิ์ของสาร และค่าอัตราการผลิตได้ของน้ำตาลกลูโคสและน้ำตาลฟรักโทสทั้งในสายผลิตภัณฑ์ extract และ raffinate

ระบบเบดเคลื่อนที่จำลองโดยทั่วไปมีการทำงานดังแสดงในภาพที่ 6 สามารถนำมาประยุกต์เพื่อศึกษาผลจากการมีสายป้อนกลับโดยการติดตั้งถังเก็บเพื่อให้สามารถผลิตสารได้อย่างต่อเนื่อง ภาพที่ 10 แสดงลักษณะการทำงานของสายป้อนกลับสำหรับการแยกน้ำตาลกลูโคสกับน้ำตาลฟรักโทส โดยมีสายป้อนกลับจากสายผลิตภัณฑ์ raffinate เมื่อปล่อยให้เกิดการแยกสารจนถึงเวลาของการสลับ จะมีการนำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากสายผลิตภัณฑ์ raffinate มาผสมกับสายป้อนใหม่ตามสัดส่วนของการนำกลับของสายผลิตภัณฑ์ และในภาพที่ 11 เป็นการแสดงการทำงานสำหรับระบบเบดเคลื่อนที่จำลองที่มีสายป้อนกลับจากสายผลิตภัณฑ์ extract



ภาพที่ 10 การทำงานของเบดเคลื่อนที่จำลองแบบมีสายป้อนกลับจากสายผลิตภัณฑ์ raffinate



ภาพที่ 11 การทำงานของเบดเคลื่อนที่จำลองแบบมีสายป้อนกลับจากสายผลิตภัณฑ์ extract

อุปกรณ์

1. ชุดเครื่องคอมพิวเตอร์บุคคูล (core 2 quad CPU 2.88 GHz)
2. โปรแกรมระบบปฏิบัติการ Window 7
3. โปรแกรมสำเร็จรูป Flex PDE version 6.15
4. โปรแกรม origin 8
5. โปรแกรม Excel

ตัวแปรที่ทำการศึกษา

1. ความยาวคอลัมน์ (L_c)
2. เวลาของการสลับ (t_s)
3. จำนวนคอลัมน์ (N_c)
4. สายผลิตภัณฑ์ที่มีการป้อนกลับ (สาย extract และ สาย raffinate)

วิธีการ

ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่เกิดจากสมดุลมวลสาร โดยเริ่มการจำลองการทำงานจนระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว (cyclic steady state) แล้วคำนวณความเข้มข้นเฉลี่ยในช่วงของสภาวะคงตัวเพื่อนำไปคำนวณความบริสุทธิ์ของสาร และปริมาณการผลิตได้ของสาร

1. การวิเคราะห์หาผลของความยาวของคอลัมน์กับเวลาของการสลับ (Switching time)

- 1.1 สร้างระบบสมการของเบดเคลื่อนที่จำลอง
- 1.2 แปลงแบบจำลองเป็นรหัสคอมพิวเตอร์สำหรับโปรแกรม Flex PDE
- 1.3 ศึกษาสภาวะทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4 โดยกำหนดความยาวคอลัมน์เป็น 0.3, 0.6, 0.9, 1.2 เมตร และเวลาของการสลับ 68, 136, 198, 273 วินาที ตามลำดับ
- 1.4 นำผลที่ได้มาวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการแยก

2. การวิเคราะห์จำนวนของคอลัมน์ในระบบ

ศึกษาอิทธิพลของจำนวนคอลัมน์ในระบบที่มีผลต่อการแยกกลูโคส-ฟรักโทส โดยให้ความยาวในแต่ละส่วนมีค่าเท่ากันคือ 0.9 เมตร ในงานวิจัยนี้จะศึกษาระบบเบดเคลื่อนที่จำลองที่มีจำนวนคอลัมน์เท่ากับ 4, 8, 12 ในกรณีที่จำนวนคอลัมน์เท่ากับ 4 ความยาวของแต่ละคอลัมน์จะเท่ากับ 0.9 เมตร กรณีที่จำนวนคอลัมน์เท่ากับ 8 จะมีความยาวคอลัมน์เท่ากับ 0.45 เมตร ส่วนกรณีที่จำนวนคอลัมน์เท่ากับ 12 จะมีความยาวของแต่ละคอลัมน์เท่ากับ 0.3 เมตร และอัตราการไหลของสารในแต่ละสายสามารถเทียบสัดส่วนได้จากตารางที่ 4 เพื่อปรับให้เหมาะสมกับความยาวของคอลัมน์ที่ใช้ในการแยกสารทั้ง 2 ชนิดออกจากกัน

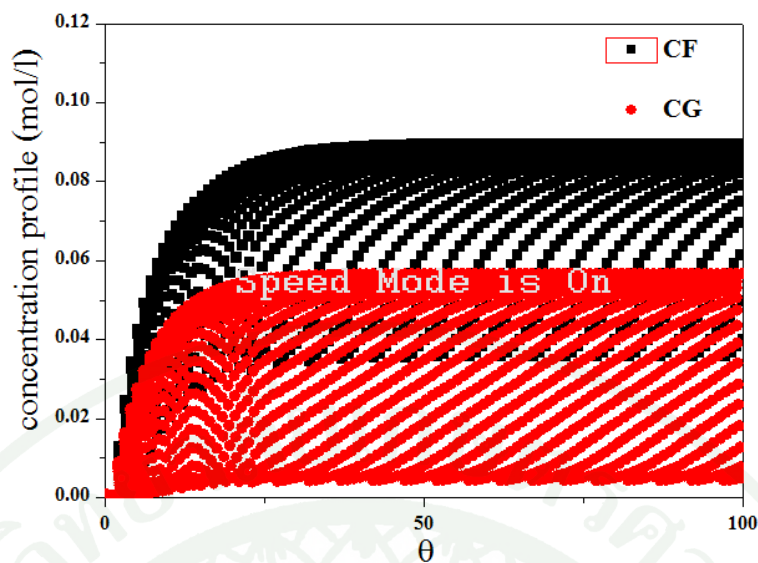
3. การวิเคราะห์หาผลกระทบจากการมีสายป้อนกลับจากสายผลิตภัณฑ์ extract และ raffinate

ศึกษาการทำงานของระบบเบดเคลื่อนที่จำลองที่สภาวะทดสอบดังในตารางที่ 4 โดยใช้ความยาวคอลัมน์ 0.3, 0.6, 0.9, 1.2 เมตร เวลาของการสลับ 68, 136, 198, 273 วินาที จำนวนของคอลัมน์ 4, 8, 12 โดยกำหนดให้มีสายป้อนกลับเป็นสายผลิตภัณฑ์ extract หรือ raffinate และเปลี่ยนค่าอัตราส่วนของการป้อนกลับของสารเป็น 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 ตามลำดับ เพื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีสายป้อนกลับของผลิตภัณฑ์เลย

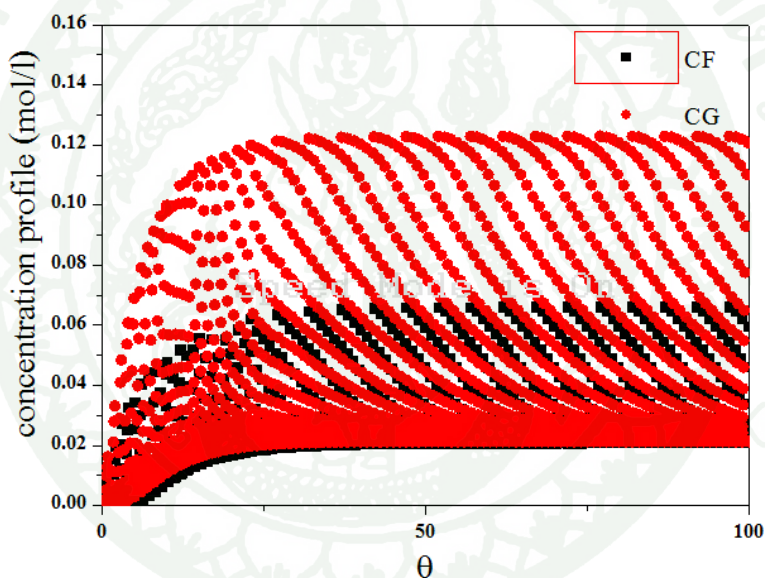
ผลและวิจารณ์

งานวิจัยนี้ศึกษากระบวนการแยกน้ำตาลกลูโคสและน้ำตาลฟรักโทสออกจากกันโดยใช้เทคนิคเบดเคลื่อนที่จำลอง โดยพิจารณาถึงผลกระทบของสายป้อนกลับต่อประสิทธิภาพของการแยกสารผสมในระบบของเบดเคลื่อนที่จำลอง ซึ่งสามารถตรวจสอบได้จากค่าพารามิเตอร์ที่บ่งชี้สมรรถนะ (performance parameter) ได้แก่ ค่าความบริสุทธิ์ของสาร ปริมาณการผลิตได้ของสาร ในงานวิจัยนี้ศึกษาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับผลกระทบของสายป้อนกลับต่อการแยกกลูโคสกับน้ำตาลฟรักโทสแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ สายป้อนกลับจากสาย extract และสายป้อนกลับจากสาย raffinate โดยศึกษาภายใต้สภาวะดังตารางที่ 4

จากการจำลองกระบวนการทำงานของระบบเบดเคลื่อนที่จำลอง โดยการป้อนกลับของสายผลิตภัณฑ์ raffinate ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับเวลาดังแสดงในภาพที่ 12 สำหรับความเข้มข้นในสายผลิตภัณฑ์ extract ได้ผลดังภาพ 12 (ก) ในสายผลิตภัณฑ์นี้มีปริมาณของน้ำตาลฟรักโทสอยู่มากกว่าน้ำตาลกลูโคสเนื่องจากน้ำตาลฟรักโทสจะถูกดูดซับในปริมาณที่มากกว่า ส่งผลให้มีน้ำตาลฟรักโทสในปริมาณมากที่สายผลิตภัณฑ์นี้ ถ้าการแยกสารเกิดขึ้นอย่างดีจะทำให้ค่าความเข้มข้นของน้ำตาลสองชนิดนี้ต่างกันมาก แสดงให้เห็นการแยกสารนั้นให้ค่าความบริสุทธิ์ของสารสูง การศึกษาด้วยเบดเคลื่อนที่จำลองจะต้องดำเนินงานจนครบรอบการทำงานคือ สลับสายป้อนและผลิตภัณฑ์จนครบ 4 คอลัมน์ ซึ่งในรอบการทำงานต้นๆระบบยังคงเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบไม่คงที่ แต่เมื่อใช้แยกสารอย่างต่อเนื่อง ระบบก็จะทำงานจนเกิดรอบการเปลี่ยนแปลงแบบคงที่ (cyclic steady state) ดังนั้นจึงคำนวณความเข้มข้นเฉลี่ยในช่วงนี้สำหรับใช้หาค่าพารามิเตอร์ที่บ่งชี้สมรรถนะ เพื่อศึกษาการทำงานของเบดเคลื่อนที่จำลองว่ามีประสิทธิภาพดีไม่น้อยเพียงใด ได้แก่ ความบริสุทธิ์ของสาร และปริมาณการผลิตสารได้ของทั้งน้ำตาลกลูโคสและน้ำตาลฟรักโทส ภาพ 12 (ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับเวลาของสายผลิตภัณฑ์ raffinate ในสายผลิตภัณฑ์นี้มีปริมาณของน้ำตาลกลูโคสอยู่มากกว่าน้ำตาลฟรักโทส เนื่องจากน้ำตาลกลูโคสถูกดูดซับได้ในปริมาณที่น้อยกว่า



(ก)

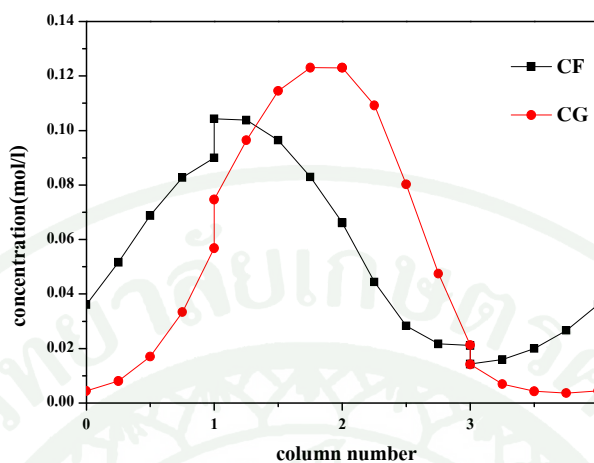


(ข)

ภาพที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับเวลาที่มิสสายป้อนกลับจากสาย raffinate: (ก) สายผลิตภัณฑ์ extract (ข) สายผลิตภัณฑ์ raffinate

ภาพที่ 13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับตำแหน่งต่างๆของคอลัมน์โดยที่ไม่มีสายป้อนกลับ พบว่าในส่วนที่ 1 เป็นส่วนที่ตัวดูดซับถูกล้าง และเกิดการคายซับน้ำตาลฟรักโทสออกมาเป็นผลิตภัณฑ์หลักของสาย extract บริเวณที่สารเกิดการแยกออกจากกันคือในส่วนที่ 2 และ 3 เนื่องจากสารที่ถูกดูดซับได้มาก (น้ำตาลฟรักโทส) จะเคลื่อนที่ไปพร้อมกับตัวดูดซับและไปออกที่

สายผลิตภัณฑ์ extract ในขณะที่สารที่ถูกดูดซับได้น้อย (น้ำตาลกลูโคส) จะเคลื่อนที่ไปออกที่สายผลิตภัณฑ์ raffinate

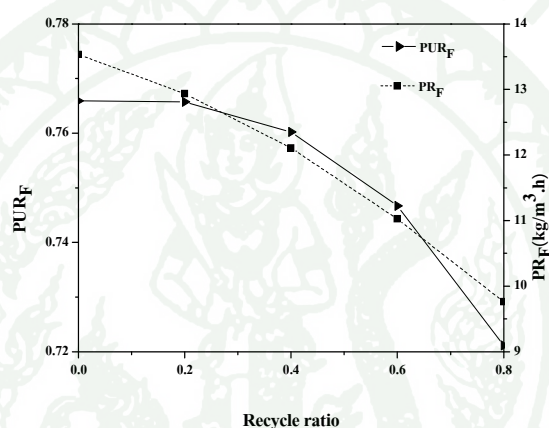


ภาพที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับตำแหน่งต่างๆของคอลัมน์ที่ไม่มีสายป้อนกลับ
การมีสายป้อนกลับจากสายผลิตภัณฑ์ raffinate

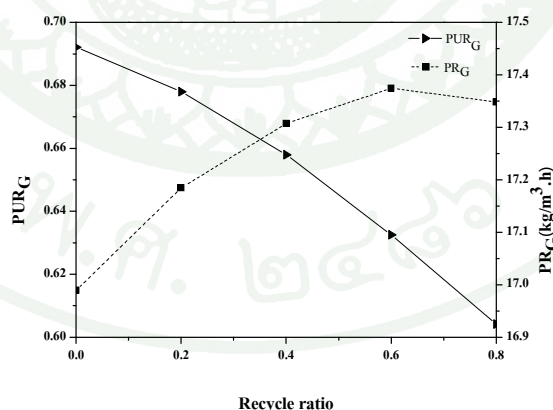
การศึกษาผลกระทบของการมีสายป้อนกลับจากสายผลิตภัณฑ์ raffinate ต่อการแยกสารผสม โดยใช้ระบบเบดเคลื่อนที่จำลอง ถ้าเลือกศึกษาสภาวะทดสอบที่สัมพันธ์ตามสมการที่ 19 พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนการป้อนกลับจะส่งผลให้ค่าความบริสุทธิ์นั้นมีค่าต่ำลง แต่ในทางตรงกันข้ามสามารถปรับปรุงปริมาณการผลิตได้ของสารให้มีค่าสูงขึ้นดังภาพที่ 14

จากภาพที่ 14 (ก) จะเห็นว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณการป้อนกลับในสัดส่วนการป้อนกลับ 0.8 จะส่งผลให้ค่าความบริสุทธิ์และค่าปริมาณการผลิตได้ของน้ำตาลฟรักโทสในสาย extract มีค่าต่ำลงประมาณ 5.61 เปอร์เซ็นต์ และ 28.15 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีการป้อนกลับของสารเลย เนื่องมาจากในสาย raffinate มีความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสอยู่มาก เมื่อมีการป้อนกลับสารผลิตภัณฑ์นี้กลับเข้าไปใหม่จะส่งผลให้โมเลกุลของน้ำตาลกลูโคสไปออกในสายผลิตภัณฑ์ extract มากขึ้นจึงทำให้ค่าความบริสุทธิ์ในสายนี้มีค่าต่ำลง และจากการมีสายป้อนกลับยังส่งผลให้น้ำตาลฟรักโทสไปออกในสายผลิตภัณฑ์ raffinate มากขึ้น ดังนั้นปริมาณการผลิตได้ของน้ำตาลฟรักโทสในสาย extract จึงมีค่าต่ำลง

จากภาพที่ 14 (ข) จะพบว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณการป้อนกลับในสัดส่วนการป้อนกลับ 0.8 จะส่งผลให้ค่าความบริสุทธิ์ ของน้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate มีค่าต่ำลงประมาณ 12 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีการป้อนกลับของสารเลย เนื่องจากการป้อนกลับสารที่สาย raffinate เป็นการเพิ่มความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate ให้มากขึ้นดังนั้นจึงส่งผลให้ค่าความบริสุทธิ์ของน้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate มีค่าต่ำลง แต่เมื่อเพิ่มปริมาณการป้อนกลับ ส่งผลให้ปริมาณการผลิตได้ของน้ำตาลกลูโคสมีค่าสูงมากขึ้น โดยที่ปริมาณการผลิตได้ของน้ำตาลกลูโคสมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีการป้อนกลับของสารเลย ดังนั้นการมีสายป้อนกลับจะไม่ได้ช่วยปรับปรุงให้ค่าความบริสุทธิ์ของสารสูงขึ้นแต่จะช่วยให้ปริมาณการผลิตได้สูงขึ้น



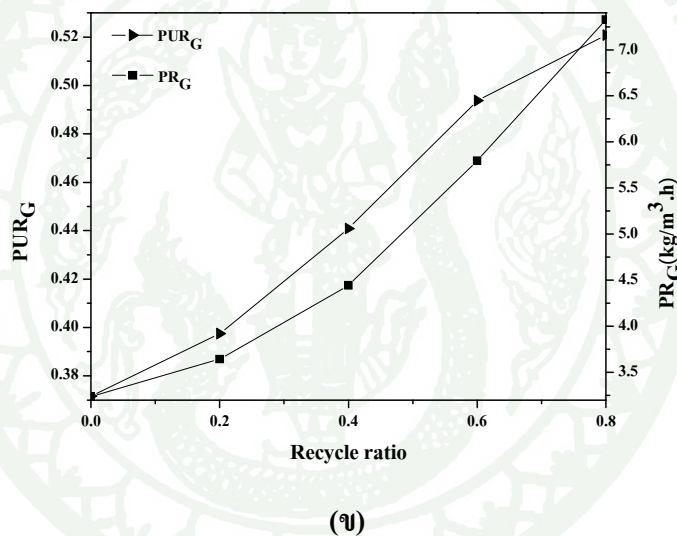
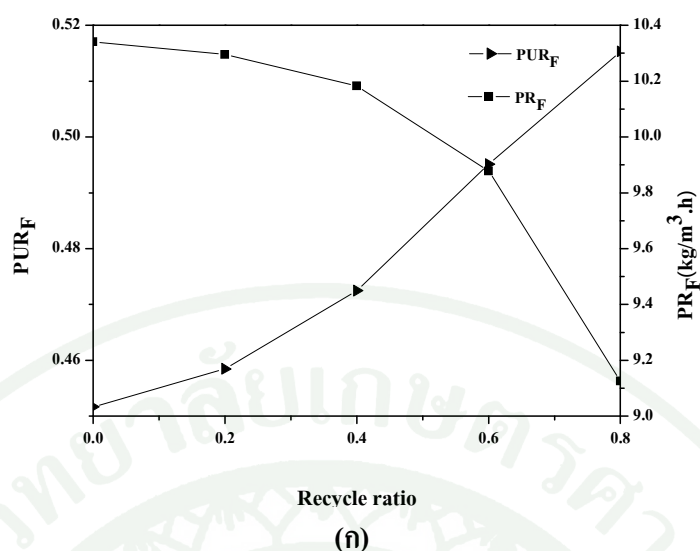
(ก)



(ข)

ภาพที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบริสุทธิ์และปริมาณการผลิตสารได้ที่สภาวะ $L=0.9$ เมตร, $t_s=198$ วินาที มีการป้อนกลับจากสาย raffinate (ก) น้ำตาลฟรักโทสในสาย extract (ข) น้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate

จากการศึกษาสภาวะที่ไม่สัมพันธ์ตามสมการที่ 19 จะพบว่าการมีสายป้อนกลับจะสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานของระบบเบดเคลื่อนที่จำลองได้ ดังเช่น การศึกษาที่สภาวะทดสอบดังในตารางที่ 4 โดยเปลี่ยนค่าความยาวเป็น 1.2 เมตร เวลาของการสลับ 198 วินาที ดังภาพที่ 15 จากภาพที่ 15 (ก) จะพบว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณการป้อนกลับจะส่งผลให้ค่าความบริสุทธิ์ของน้ำตาลฟรักโทสในสาย extract มีค่าสูงขึ้น แต่ค่าปริมาณการผลิตได้ของน้ำตาลฟรักโทสในสาย extract มีค่าต่ำลง เนื่องจากการมีสารป้อนกลับจากสายผลิตภัณฑ์ raffinate มีปริมาณน้ำตาลฟรักโทสน้อย ทำให้น้ำตาลฟรักโทสที่ออกในสาย extract น้อยลง จึงส่งผลให้ค่าความบริสุทธิ์สูงขึ้น แต่ปริมาณการผลิตได้ของน้ำตาลฟรักโทสในสาย extract มีค่าต่ำลง ในขณะที่ความบริสุทธิ์ในสาย extract มีค่าสูงมากขึ้นประมาณ 16 เปอร์เซ็นต์ที่สัดส่วนการป้อนกลับเป็น 0.8 เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีการป้อนกลับ และปริมาณการผลิตได้ในสาย extract ลดลงประมาณ 12 เปอร์เซ็นต์ที่สัดส่วนการป้อนกลับเป็น 0.8 เมื่อเทียบกับที่ไม่มีการป้อนกลับ ดังแสดงในกราฟ จากภาพที่ 15 (ข) จะพบว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณการป้อนกลับจะส่งผลให้ค่าความบริสุทธิ์ของน้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate มีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 41 เปอร์เซ็นต์ เมื่อสัดส่วนการป้อนกลับเป็น 0.8 เทียบกับกรณีที่ไม่มีการป้อนกลับของสารเลย เนื่องจากการป้อนกลับของสารที่สาย raffinate เป็นการเพิ่มความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate ให้มีค่าสูงขึ้น ดังนั้นจึงส่งผลให้ค่าความบริสุทธิ์ของน้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate มีค่าสูงขึ้น เช่นเดียวกับเมื่อเพิ่มปริมาณการป้อนกลับ ส่งผลให้ปริมาณการผลิตได้ของน้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate มีค่าสูงขึ้น โดยที่ปริมาณการผลิตได้ของน้ำตาลกลูโคสมีค่าสูงขึ้นประมาณ 121 เปอร์เซ็นต์ที่สัดส่วนการป้อนกลับเป็น 0.8 เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีการป้อนกลับของสารเลย ดังนั้นการมีสายป้อนกลับจากสายผลิตภัณฑ์ raffinate ในกรณีที่ความยาวคอลัมน์กับเวลาการสลับไม่สัมพันธ์กันตามสมการที่ 19 สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานของเบดเคลื่อนที่จำลองให้สูงขึ้น คือความบริสุทธิ์ของสารและปริมาณการผลิตได้สูงขึ้น



ภาพที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบริสุทธิ์และปริมาณการผลิตสารได้ที่สภาวะ $L = 1.2$ เมตร, $t_s = 198$ วินาที มีการป้อนกลับจากสาย raffinate (ก) น้ำตาลฟรักโทสในสาย extract (ข) น้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate

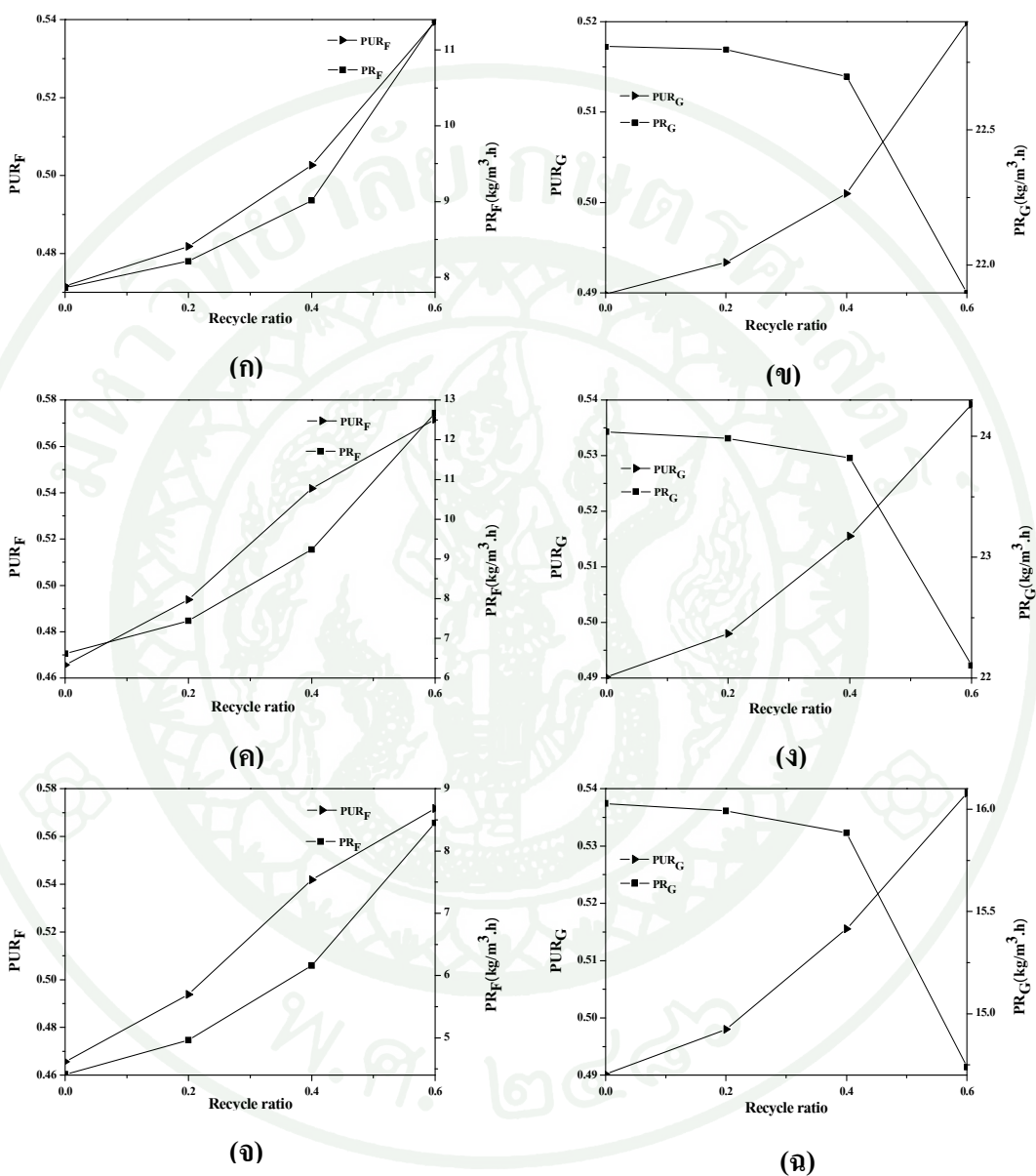
การมีสายป้อนกลับจากสายผลิตภัณฑ์ extract

การศึกษาผลกระทบของการมีสายป้อนกลับจากสายผลิตภัณฑ์ extract ต่อการแยกสารผสม โดยใช้ระบบเบดเคลื่อนที่จำลอง ถ้าเลือกศึกษาสภาวะทดสอบที่สัมพันธ์ตามสมการที่ 19 พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนการป้อนกลับจะส่งผลให้ความบริสุทธิ์นั้นมียาค่าต่ำลง แต่ในทางตรงกันข้ามเมื่อเพิ่ม

อัตราส่วนการป้อนกลับจะสามารถปรับปรุงปริมาณการผลิตได้ของสารให้มีค่าสูงขึ้น ซึ่งเป็นแนวโน้มเดียวกับผลจากการมีสายป้อนกลับจากสายผลิตภัณฑ์ raffinate

ถ้าศึกษาภาวะที่ไม่สัมพันธ์ตามสมการที่ 19 พบว่าการมีสายป้อนกลับจะสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานของระบบเบดเคลื่อนที่จำลองได้ การศึกษาที่สภาวะทดสอบในตารางที่ 4 โดยเปลี่ยนค่าความยาวเป็น 0.6 เมตร เวลาของการสลับ 198 วินาที ดังแสดงในภาพที่ 16 จากภาพที่ 16 (ก) จะเห็นว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณการป้อนกลับจะส่งผลให้ค่าความบริสุทธิ์และค่าปริมาณการผลิตได้ของน้ำตาลฟรักโทสในสาย extract มีค่าสูงขึ้น เนื่องมาจากการมีสารป้อนกลับจากสายผลิตภัณฑ์ extract จะทำให้โมเลกุลของน้ำตาลฟรักโทสที่อยู่ในสาย extract มีโอกาสที่จะออกในสาย extract สูงมากขึ้น จึงส่งผลให้ค่าความบริสุทธิ์และปริมาณการผลิตได้ของสารมีค่าสูงขึ้น ความบริสุทธิ์ในสาย extract มีค่าสูงมากขึ้นประมาณ 15 เปอร์เซ็นต์ที่สัดส่วนการป้อนกลับเป็น 0.6 เมื่อเทียบกับที่ไม่มีสายป้อนกลับ และปริมาณการผลิตได้สูงขึ้นประมาณ 47 เปอร์เซ็นต์ที่สัดส่วนการป้อนกลับเป็น 0.6 เมื่อเทียบกับที่ไม่มีสายป้อนกลับ จากภาพที่ 16 (ข) แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณการป้อนกลับจะส่งผลให้ค่าความบริสุทธิ์ของน้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate มีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 6 เปอร์เซ็นต์ที่สัดส่วนการป้อนกลับเป็น 0.6 เทียบกับกรณีที่ไม่มีการป้อนกลับของสารเลย เนื่องจากการป้อนกลับของสารที่สาย extract เป็นการลดความเข้มข้นของน้ำตาลฟรักโทสในสาย raffinate ให้มีค่าน้อยลง ดังนั้นจึงส่งผลให้ค่าความบริสุทธิ์ของน้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate มีค่าสูงขึ้น ในทางตรงกันข้ามเมื่อเพิ่มปริมาณการป้อนกลับ ส่งผลให้ปริมาณการผลิตได้ของน้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate มีค่าลดลงประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ที่สัดส่วนการป้อนกลับเป็น 0.6 เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีการป้อนกลับของสารเลย ดังนั้นการมีสายป้อนกลับในกรณีที่มีความยาวคอลัมน์กับเวลาการสลับไม่สัมพันธ์กันตามสมการจะสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานของเบดเคลื่อนที่จำลองให้สูงขึ้น คือความบริสุทธิ์ของสารและปริมาณการผลิตได้สูงขึ้น โดยที่น้ำตาลกลูโคสที่ผลิตได้จากการมีสายป้อนกลับมีความบริสุทธิ์เป็น 52 เปอร์เซ็นต์ และน้ำตาลฟรักโทสมีความบริสุทธิ์เป็น 54 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งค่าความบริสุทธิ์นี้มีความเหมาะสมตามที่อุตสาหกรรมอาหารต้องการ นอกจากนี้ยังมีภาวะที่สายป้อนกลับสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพของเบดเคลื่อนที่จำลองได้ คือ ความยาวคอลัมน์ 0.6 เมตร เวลาการสลับ 273 วินาที และความยาวคอลัมน์ 0.9 เมตร เวลาการสลับ 273 วินาที กรณีที่มีความยาวคอลัมน์ 0.6 เมตร เวลาการสลับ 273 วินาที สามารถปรับปรุงความบริสุทธิ์ในสาย extract ได้ 24 เปอร์เซ็นต์ และ ปริมาณการผลิตได้ 92 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในภาพที่ 16 (ค) ในสายผลิตภัณฑ์ raffinate สามารถปรับปรุงความบริสุทธิ์ได้ 10 เปอร์เซ็นต์ แต่ปริมาณการผลิตได้ในสายนี้ลดลง 7 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราส่วนการป้อนกลับเป็น 0.6 เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีการป้อนกลับเลย ดังแสดงในภาพที่ 16 (ง) กรณีที่ความยาวคอลัมน์ 0.9 เมตร เวลาการ

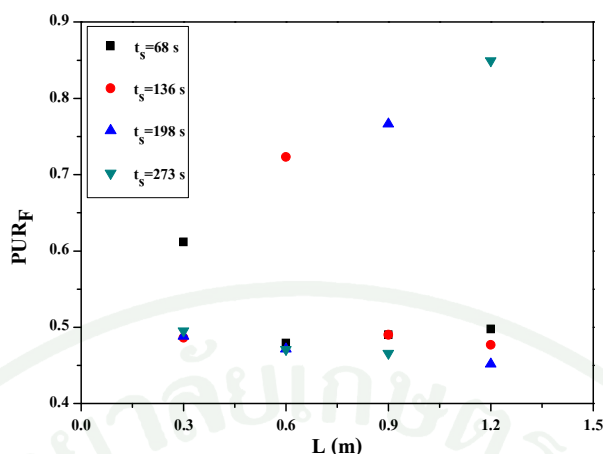
สลับ 273 วินาที สามารถปรับปรุงความบริสุทธิ์ในสาย extract ได้ 24 เปอร์เซ็นต์ และ ปริมาณการผลิตได้ 88 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในภาพที่ 16 (จ) สำหรับสายผลิตภัณฑ์ raffinate สามารถปรับปรุงความบริสุทธิ์ได้ 10 เปอร์เซ็นต์ แต่ปริมาณการผลิตได้ในสายนี้ลดลง 9 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราส่วนการป้อนกลับ 0.6 เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีการป้อนกลับเลย ดังแสดงในภาพที่ 16 (ฉ)



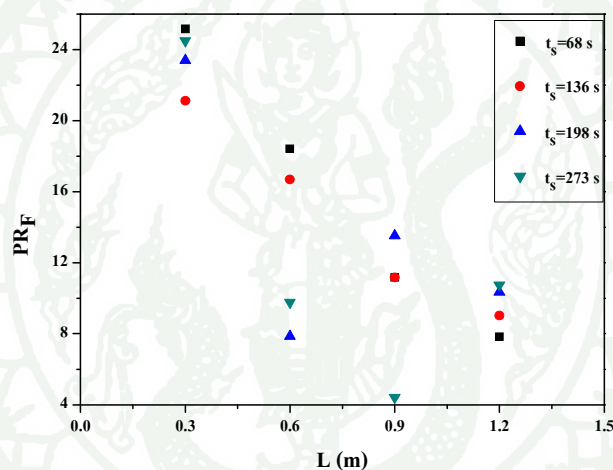
ภาพที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบริสุทธิ์และปริมาณการผลิตสารได้ที่มีสายป้อนกลับจากสายผลิตภัณฑ์ extract (ก) $L=0.6$, $t_s=198$ ของสายผลิตภัณฑ์ extract (ข) $L=0.6$, $t_s=198$ ของสายผลิตภัณฑ์ raffinate (ค) $L=0.6$, $t_s=273$ ของสายผลิตภัณฑ์ extract (ง) $L=0.6$, $t_s=273$ ของสายผลิตภัณฑ์ raffinate (จ) $L=0.9$, $t_s=273$ ของสายผลิตภัณฑ์ extract (ฉ) $L=0.9$, $t_s=273$ ของสายผลิตภัณฑ์ raffinate

ความยาวของคอลัมน์และค่าเวลาของการสลับ (switching time)

จากการศึกษาผลกระทบของความยาวคอลัมน์กับเวลาในการสลับ โดยกำหนดสภาวะทดสอบดังตารางที่ 4 สำหรับความยาวคอลัมน์เป็น 0.3, 0.6, 0.9, 1.2 เมตร ซึ่งสัมพันธ์กับค่าเวลาของการสลับ โดยสามารถคำนวณจากสมการที่ 19 พบว่าค่าเวลาการสลับที่เหมาะสมกับความยาวของคอลัมน์ คือ 68, 136, 198, 273 วินาที ตามลำดับ ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 17-18 พบว่าค่าความบริสุทธิ์และปริมาณการผลิตได้ของผลิตภัณฑ์สูงสุดที่เวลาการสลับที่เหมาะสมตามความสัมพันธ์กับความยาวคอลัมน์ คือ ความยาวคอลัมน์เท่ากับ 0.3 เมตร จะให้ค่าความบริสุทธิ์และการผลิตได้สูงที่สุดที่เวลาการสลับเท่ากับ 68 วินาที ความยาว 0.6 เมตร ให้ค่าความบริสุทธิ์และการผลิตได้สูงที่สุดที่เวลาการสลับเท่ากับ 136 วินาที ความยาว 0.9 เมตร ให้ค่าความบริสุทธิ์และการผลิตได้สูงที่สุดที่เวลาการสลับเท่ากับ 198 วินาที และความยาว 1.2 เมตร ให้ค่าความบริสุทธิ์และการผลิตได้สูงที่สุดที่เวลาการสลับเท่ากับ 273 วินาที นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่าความบริสุทธิ์จะมีค่าสูงสุดที่ความยาวของคอลัมน์มีค่าเท่ากับ 1.2 เมตร เนื่องจากที่ความยาวมากจะมีเวลาเพียงพอให้สารสามารถแยกออกจากกันได้มากขึ้นจึงส่งผลให้ความบริสุทธิ์สูงถึง 85 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในภาพที่ 17 (ก) ส่วนค่าปริมาณการผลิตได้จะมีค่าสูงสุดที่ความยาวคอลัมน์เท่ากับ 0.3 เมตร มีค่าเท่ากับ $24 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{h}$ เนื่องจากความยาวของคอลัมน์สั้นทำให้ตัวดูดซับที่ใช้บรรจุในคอลัมน์มีปริมาณน้อย เมื่อเทียบกับความยาวที่ค่าอื่นๆ ดังนั้นปริมาณการผลิตได้จึงมีค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับความยาวคอลัมน์ค่าอื่นดังแสดงในภาพที่ 17 (ข)



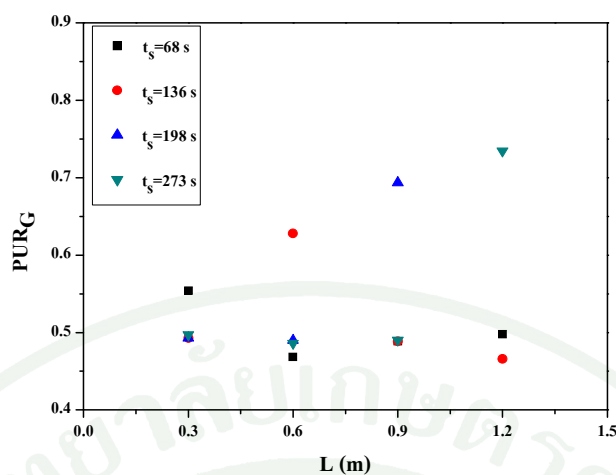
(ก)



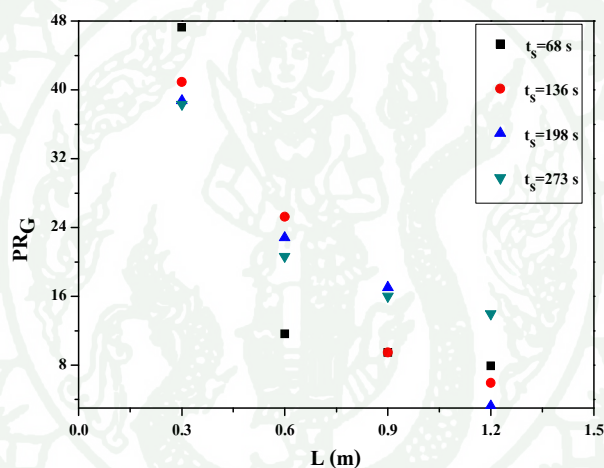
(ข)

ภาพที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของคอลัมน์ที่ค่าเวลาของการสลับต่าง ๆ กัน (ก) ค่าความบริสุทธิ์ (ข) ปริมาณการผลิตได้ของน้ำตาลฟรักโทสในสาย extract

เมื่อพิจารณาสาย raffinate พบว่ามีแนวโน้มเดียวกับในสาย extract คือความบริสุทธิ์จะมีค่าสูงสุด เมื่อความยาวของคอลัมน์ 1.2 เมตร เนื่องจากที่ความยาวคอลัมน์มาก ๆ จะมีเวลาให้สารสามารถแยกออกจากกันได้มากขึ้น จึงส่งผลให้ความบริสุทธิ์สูงถึง 75 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในภาพที่ 18 (ก) ส่วนค่าปริมาณการผลิตสารได้ จะมีค่าสูงสุดที่ความยาวคอลัมน์เท่ากับ 0.3 เมตร มีค่าเท่ากับ $47 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{h}$ เนื่องจากความยาวของคอลัมน์สั้นทำให้ตัวดูดซับที่ใช้บรรจุในคอลัมน์มีปริมาณน้อย เมื่อเทียบกับความยาวคอลัมน์ที่ค่าอื่น ดังนั้นปริมาณการผลิตได้จึงมีค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับความยาวคอลัมน์ค่าอื่นดังแสดงในภาพที่ 18 (ข)



(ก)



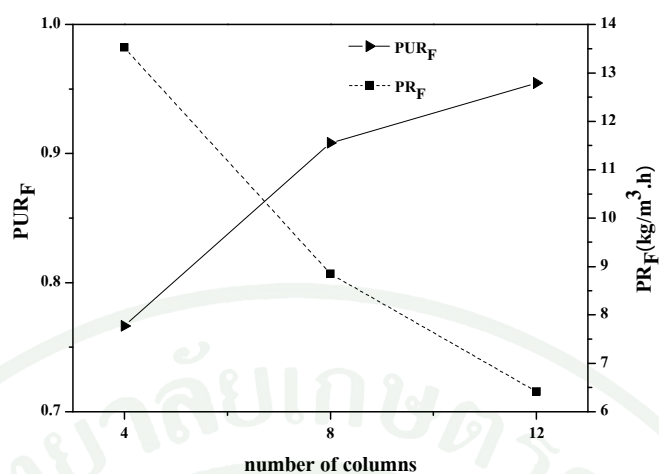
(ข)

ภาพที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของคอลัมน์ที่ค่าเวลาของการสลับต่างๆกัน (ก) ค่าความบริสุทธิ์ (ข) ปริมาณการผลิตได้ของน้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate

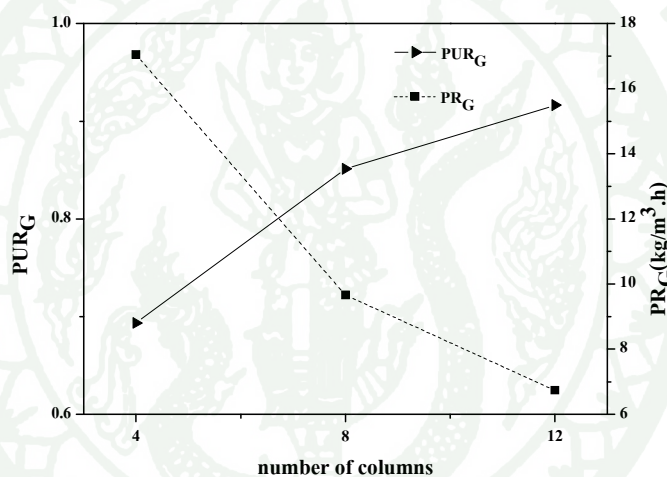
การศึกษาจำนวนของคอลัมน์ในระบบ

การศึกษาระบบการแยกสารของระบบเบดเคลื่อนที่จำลอง โดยศึกษาผลกระทบของจำนวนคอลัมน์ใน 1 รอบการทำงาน สภาวะการทดสอบดังตารางที่ 4 โดยให้ความยาวของแต่ละส่วนนั้นเท่ากันคือ 0.9 เมตร ซึ่งในตารางที่ 4 เป็นสภาวะทดสอบที่เหมาะสมสำหรับ 4 คอลัมน์ ความยาวในแต่ละคอลัมน์มีค่าเท่ากับ 0.9 เมตร เมื่อศึกษาที่ 8 คอลัมน์ จะใช้ความยาวในแต่ละคอลัมน์เท่ากับ 0.45 เมตร เมื่อศึกษาที่ 12 คอลัมน์ จะใช้ความยาวในแต่ละคอลัมน์เท่ากับ 0.3 เมตร

และอัตราการไหลของสารในแต่ละสายก็สามารถเทียบสัดส่วนได้จากตารางที่ 4 เพื่อปรับให้เหมาะสมตามความยาวของคอลัมน์ที่ใช้ในการแยกสารทั้ง 2 ชนิดออกจากกัน จากการศึกษาผลของจำนวนคอลัมน์ที่ใช้ในระบบพบว่า เมื่อจำนวนของคอลัมน์มีจำนวนมากขึ้นจะส่งผลให้ค่าความบริสุทธิ์มากขึ้นด้วย เนื่องจากการที่มีจำนวนคอลัมน์มากขึ้น เสมือนกับการที่มีความยาวของคอลัมน์ยาวมากขึ้นด้วย ทำให้สารนั้นสามารถแยกออกจากกันได้ดียิ่งขึ้น จากกราฟแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มว่า ถ้ามีจำนวนคอลัมน์ 12 คอลัมน์ (จำนวนคอลัมน์ในแต่ละส่วนคือ 3 คอลัมน์) จะให้ค่าความบริสุทธิ์สูงกว่าการมีจำนวนคอลัมน์ 8 คอลัมน์ (จำนวนคอลัมน์ในแต่ละส่วนคือ 2 คอลัมน์) และสูงกว่าการมีจำนวนคอลัมน์ 4 คอลัมน์ (จำนวนคอลัมน์ในแต่ละส่วนคือ 1 คอลัมน์) ตามลำดับ แต่จะส่งผลให้ปริมาณการผลิตได้ลดลง เมื่อจำนวนคอลัมน์มากขึ้น เนื่องจากถ้าจำนวนคอลัมน์มากขึ้นจะทำให้ปริมาณตัวดูดซับที่ใช้มากขึ้น จึงทำให้อัตราการผลิตได้นั้นลดต่ำลง เนื่องด้วยการคำนวณหาค่าการผลิตได้นั้นจะต้องคิดปริมาณตัวดูดซับที่ใช้ ซึ่งค่าการผลิตได้ของการมีจำนวนคอลัมน์ 4 คอลัมน์ มีค่ามากกว่า 6 คอลัมน์ และมีค่ามากกว่า 8 คอลัมน์ตามลำดับ โดยจะให้ผลในแนวโน้มเดียวกันทั้งในสายผลิตภัณฑ์ extract และ raffinate ดังแสดงในภาพที่ 19 (ก) และ (ข)



(ก)

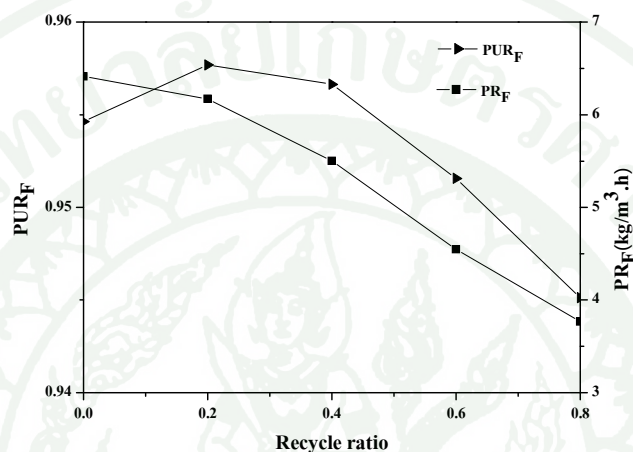


(ข)

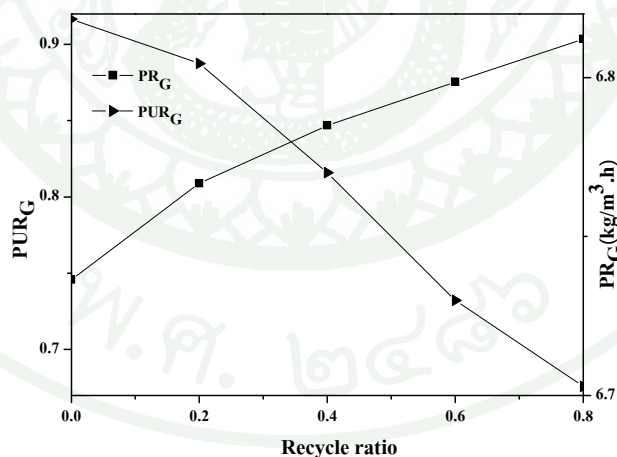
ภาพที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างความบริสุทธิ์และปริมาณการผลิตได้กับจำนวนของคอลัมน์ (ก) สายผลิตภัณฑ์ extract (ข) สายผลิตภัณฑ์ raffinate

เมื่อเพิ่มสายป้อนกลับเข้าสู่กระบวนการแยก ที่การทำงานมีประสิทธิภาพสูงมากอยู่แล้ว คือ จำนวนคอลัมน์ 12 คอลัมน์ โดยมีความบริสุทธิ์ของน้ำตาลฟรักโทส 95 เปอร์เซ็นต์ และความบริสุทธิ์ของน้ำตาลกลูโคส 92 เปอร์เซ็นต์ที่ไม่มีสายป้อนกลับ แต่เมื่อเริ่มให้มีการป้อนกลับของสายผลิตภัณฑ์ raffinate พบว่าความบริสุทธิ์และปริมาณการผลิตได้ของน้ำตาลฟรักโทสในสายผลิตภัณฑ์ extract มีค่าลดลง ส่วนความบริสุทธิ์ของน้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate มีค่าต่ำลง แต่ปริมาณการผลิตได้เพิ่มขึ้นเพียง 1 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกับการมีสายป้อนกลับใน

สถานะที่เหมาะสมตามสมการที่ 19 จึงทำให้การมีสายป้อนกลับนั้นไปลดประสิทธิภาพของการแยกสารลง ดังแสดงในภาพที่ 20 ทำให้สรุปได้ว่าสำหรับสถานะที่ทดสอบมีความเหมาะสมอยู่แล้ว ไม่ควรมีสายป้อนกลับ เพราะการมีสายป้อนกลับจะทำให้ประสิทธิภาพการทำงานในเบดเคลื่อนที่ช้าลง ลดลง สำหรับในอุตสาหกรรมที่ต้องการความบริสุทธิ์ของสารสูงๆ ควรเลือกใช้สถานะที่มีจำนวนคอลัมน์ในแต่ละส่วนจำนวนมาก ซึ่งในที่นี้คือ 12 คอลัมน์ จะให้ค่าความบริสุทธิ์สูงกว่าแบบที่มีสายป้อนกลับ



(ก)



(ข)

ภาพที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบริสุทธิ์และปริมาณการผลิตที่ได้ที่จำนวนคอลัมน์ 12 คอลัมน์ มีการป้อนกลับจากสาย raffinate (ก) น้ำตาลฟรักโทสในสาย extract (ข) น้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

การศึกษาการแยกน้ำตาลกลูโคสและน้ำตาลฟรักโทสออกจากกันโดยใช้เบดเคลื่อนที่จำลองจากการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อการแยกสารออกจากกันเพื่อให้ได้ความบริสุทธิ์ตามที่อุตสาหกรรมต้องการ ได้แก่ ผลกระทบจากการมีสายป้อนกลับทั้งสายผลิตภัณฑ์ extract และ สายผลิตภัณฑ์ raffinate ความยาวของคอลัมน์ เวลาของการสลับ และจำนวนคอลัมน์ของระบบ ซึ่งผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

กรณีที่มีความยาวคอลัมน์และเวลาของการสลับสัมพันธ์กันตามสมการที่ 19 จะให้ค่าความบริสุทธิ์และปริมาณการผลิตได้สูงที่สุดคือ ความยาวคอลัมน์ 0.3 เมตร จะให้ค่าสูงสุดที่เวลาการสลับ 68 วินาที ความยาวคอลัมน์ 0.6 เมตร จะให้ค่าสูงสุดที่เวลาการสลับ 136 วินาที ความยาวคอลัมน์ 0.9 เมตร จะให้ค่าสูงสุดที่เวลาการสลับ 198 วินาที ความยาวคอลัมน์ 1.2 เมตร จะให้ค่าสูงสุดที่เวลาการสลับ 273 วินาที และถ้าพิจารณาที่ความยาวคอลัมน์เพียงอย่างเดียว พบว่าค่าความบริสุทธิ์สูงสุดที่ค่าความยาวคอลัมน์ 1.2 เมตร และปริมาณการผลิตได้สูงที่สุดที่ค่า ความยาวคอลัมน์ 0.3 เมตร

ผลของจำนวนคอลัมน์ในระบบต่อการแยกสารในเบดเคลื่อนที่จำลอง สรุปได้ว่าความบริสุทธิ์จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อจำนวนคอลัมน์ในระบบมีจำนวนมากขึ้นและจะมีค่าสูงสุดที่จำนวนคอลัมน์ในระบบมีจำนวน 12 คอลัมน์ ส่วนปริมาณการผลิตได้มีค่าต่ำลงเมื่อจำนวนคอลัมน์ในระบบมีจำนวนมากขึ้น ดังนั้นปริมาณการผลิตได้มีค่าสูงสุดที่จำนวนคอลัมน์ในระบบมีจำนวน 4 คอลัมน์

การศึกษาผลกระทบของการมีสายป้อนกลับพบว่าการมีสายป้อนกลับทั้งจากสายผลิตภัณฑ์ extract และ raffinate ให้ผลในแนวโน้มเดียวกัน คือสามารถปรับปรุงปริมาณการผลิตได้ของสารให้ มีค่าสูงมากขึ้นแต่ไม่สามารถปรับปรุงค่าความบริสุทธิ์ได้ แต่ถ้ามีการนำสายป้อนกลับไปใช้กับสถานะที่ไม่สอดคล้องกับสมการที่ 19 แล้วจะพบว่าการมีสายป้อนกลับนั้นสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานในเบดเคลื่อนที่จำลองได้ ทั้งในส่วนของคุณภาพและความบริสุทธิ์และปริมาณการผลิตสารได้ แต่ถึงแม้ว่าจะสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพได้แต่ก็มีค่าไม่สูงเท่ากับกรณีที่มีสถานะสอดคล้องกับสมการที่ 19 ซึ่งการมีสายป้อนกลับมีความเหมาะสมที่จะใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร

และเครื่องดื่มน้ำร้อนข้างมากเนื่องจากมีความบริสุทธิ์สูงไม่มากแต่ปริมาณการผลิตได้ค่อนข้างสูง เมื่อมีการมีสายป้อนกลับไปศึกษาร่วมกับจำนวนคอแลมน์ในระบบพบว่ามีการมีสายป้อนกลับช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพด้านปริมาณการผลิตได้ของสารเพียงเท่านั้น แต่ไม่ช่วยปรับปรุงด้านความบริสุทธิ์ของสาร

ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีการศึกษาผลกระทบของการมีสายป้อนกลับ ที่มีการศึกษาในปัจจัยของความยาวคอแลมน์ เวลาของการสลับ และจำนวนคอแลมน์ในระบบ ผู้วิจัยมีความเห็นว่าควรศึกษาปัจจัยของอัตราการไหลของตัวชะเพิ่มเติม สำหรับการปรับปรุงประสิทธิภาพในเบดเคลื่อนที่จำลอง เนื่องจากความบริสุทธิ์ของสารในเบดเคลื่อนที่จำลองนั้น มีผลจากอัตราการไหลของตัวชะค่อนข้างมาก ถ้าอัตราการไหลของตัวชะมีค่าต่ำมากเกินไปก็จะส่งผลให้ตัวดูดซับถูกล้างไม่หมดจึงทำให้ความบริสุทธิ์มีค่าต่ำลง และถ้าใช้อัตราการไหลของตัวชะสูงมากเกินไปก็จะส่งผลให้สิ้นเปลืองตัวชะ

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ สหรัฐอเมริกา. 2548. การส่งออกน้ำตาลของโลก. แหล่งที่มา:

http://utcc2.utcc.ac.th/tradestrategies/Product_data/data_show_website/Sugar_Market/sugar_world_export_table.htm, 1 พฤษภาคม 2554.

กล้าณรงค์ ศรีรอด. 2542. สารให้ความหวาน. ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

กล้าณรงค์ ศรีรอด. 2542. เทคโนโลยีของน้ำตาล. ภาควิชาวิทยาศาสตร์การอาหาร, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ไทยกู๊ดวิว. 2552. สารชีโมเลกุล. แหล่งที่มา :

<http://www.thaigoodview.com/node/21065?page=2%0C2>,
20 ธันวาคม 2552.

บริษัท ไทยชูการ์ มิลเลอร์ จำกัด. 2552. กระบวนการผลิตน้ำตาลทราย. แหล่งที่มา:

<http://www.thaisugarmillers.com/tsmc-02-02.html>, 12 ธันวาคม 2552.

บริษัท น้ำตาลมิตรผล จำกัด. 2552. กระบวนการผลิตน้ำตาลทราย. แหล่งที่มา:

<http://www.wangkanai.com>, 12 ธันวาคม 2552.

บริษัท พี สตาร์ช .ซี.เอส.โปรดักส์ จำกัด (มหาชน). 2552. ลักษณะของผลิตภัณฑ์. แหล่งที่มา:

<http://www.pscstarch.com/th/product.asp>, 12 ธันวาคม 2552.

ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมมกอุโคสที่ผลิตในประเทศไทย. 2552. แหล่งที่มา:

<http://210.246.186.28fieldcrops/cas/pro/p.003pdf> , 18 มกราคม 2553.

พัฒนาร สวัสดิ์. วารสารศูนย์เครื่องมือ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2552. การแยกสารด้วยระบบเบดเคลื่อนที่จำลอง (Simulated moving bed) แหล่งที่มา :

<http://www.strec.chula.ac.th/Thai/Services/Journal.html>, 10 พฤศจิกายน 2552

ศูนย์วิจัย มีด จอนห์สัน สหรัฐอเมริกา. 2552. บทความทางด้านการแพทย์

อาหารผู้ป่วยเบาหวาน. แหล่งที่มา:

<http://th.answers.yahoo.com/question/index?qid=20080108072744AAwBZbc>,

20 ธันวาคม 2552.

สำนักงานอ้อยและน้ำตาล. 2551. ข้อมูลกำลังการผลิตน้ำตาลทราย. แหล่งที่มา:

<http://www.ocsb.go.th>, 20 ธันวาคม 2552.

อัสวิทย์ ปัทมะเวณ. 2540. ตามรอยน้ำตาล. สำนักพิมพ์ ที.พี.พรินท์, กรุงเทพฯ.

Altenhoner, U., M. Meurer, J. Strube and H.S. Traub. 1997. Parameter estimation for the simulation of liquid chromatography. **J. Chromatogr. A.** 769: 59 –69

Azevedo, C. S. and E. Rodrigues. 2001. Fructose-Glucose Separation in a SMB Pilot Unit: Modeling, Simulation, Design, and Operation. **AIChE Journal.** 47: 2042-2051

Geoffrey B Cox. CHIEAL Technologies inc. 2008. **Simulated Moving Bed Chromatography and Chiral Compounds.** Available source:

[http://www.ispe.org/galleries/cannada-files/Simulated Moving Bed Chromatography ISPE. pdf](http://www.ispe.org/galleries/cannada-files/Simulated%20Moving%20Bed%20Chromatography%20ISPE.pdf), November 10, 2009.

Hee, K.S., K.J. Hyun and M. Sungyong. 2010. Optimal design of a tandem simulated moving bed process for separation of paclitaxel, 13-dehydroxybaccatin III, and 10-deacetylpaclitaxel. **Process Biochemistry.** 45: 1468–1476

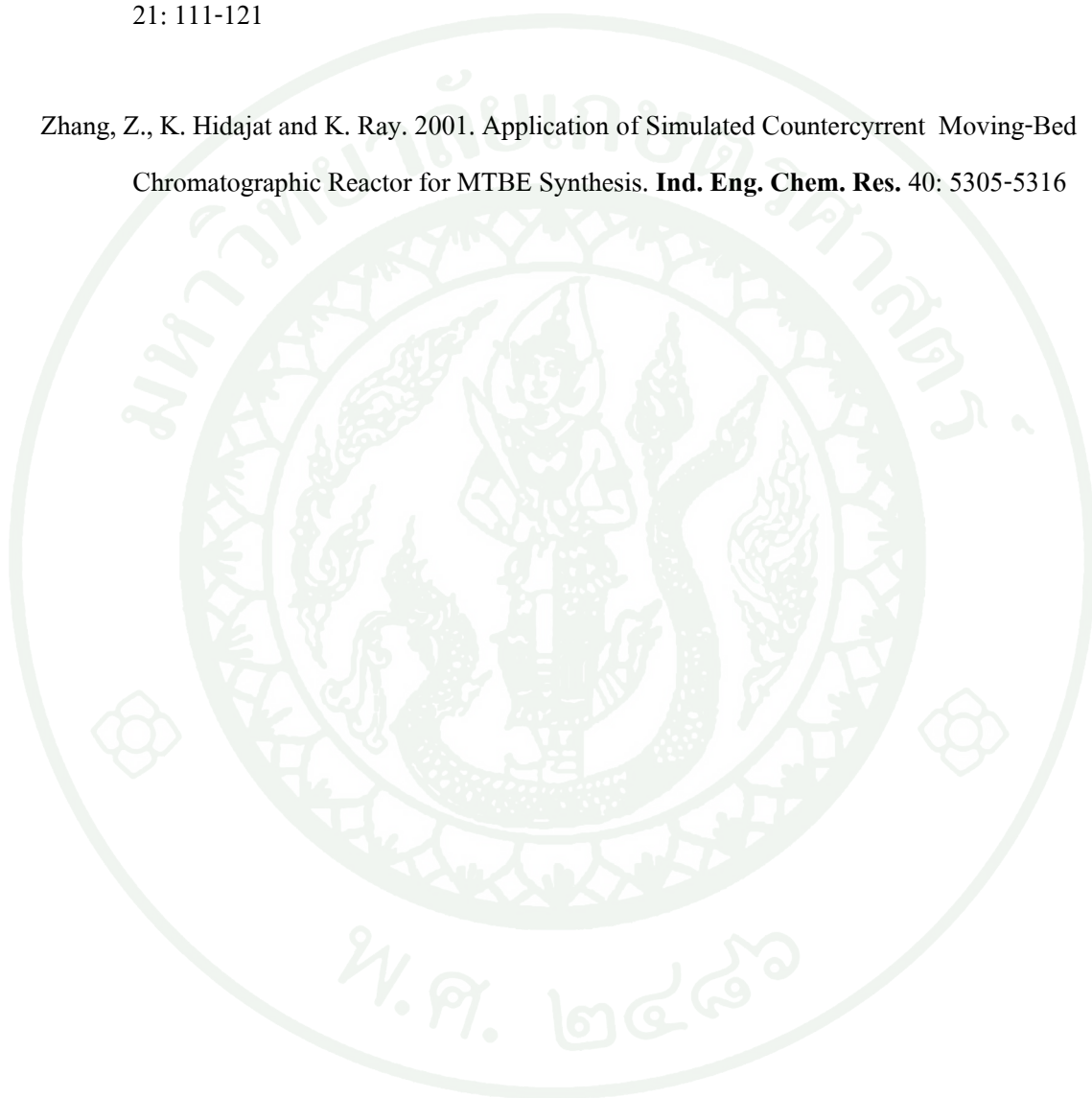
Heuer, C. and A.S. Morgenstern. 1995. Experimental investigation and modelling of closed-loop recycling in preparative chromatography. **Chem. Eng. Sci.** 50: 1115-1127

- Howard, J., G. Carta and H. Byers. 1988. Separation of Sugars by Continuous Annular Chromatography. **Ind. Eng. Chem. Res.** 27: 1873-1882
- Juza, M., M. Mazzotti and M. Morbidelli. 2000. Simulated moving-bed chromatography and its application to chirotechnology. **Trends Biotechnol.** 18: 108-118
- Lee, J. and C. Wankat. 2009. Comparison of Recycle Chromatography and Simulated Moving Bed for Pseudobinary Separations. **Ind. Eng. Chem. Res.** 48: 7724-7732
- Luccio, M.D., B.D. Smith, T. Kida, C.P. Borges and T.L.M. Alves. 2000. Separation of fructose from a mixture of sugars using supported liquid membranes. **Membrane Science.** 174: 217-224
- Matijasevic, L. and D.V. Racki. 2000. Separation of glucose/fructose mixtures: counter-current adsorption system. **Biochemical engineering.** 4: 101-106
- Nobre, C., M.J. Santos, A. Dominguez, D. Torres, O. Rocha, A.M. Peres, I. Rocha, E.C. Ferreira, J.A. Teixeira and L.R. Rodrigues. 2009. Comparison of adsorption equilibrium of fructose, glucose and sucrose on potassium gel-type and macroporous sodium ion-exchange resins. **Analytica Chimica Acta.** 654: 71-76
- Pereira, C.S.M., P.S. Gomes, G.K. Gandi and V.M.T.M. Rodrigues. 2008. Multifunctional Reactor for the Synthesis of Dimethylacetal. **Ind. Eng. Chem. Res.** 47: 3515-3524
- Pereira, C.S.M., M. Zabka, M.T.M. Silva and A. Rodrigues. 2009. A novel process for the ethyl lactate synthesis in a simulated moving bed reactor (SMBR). **Chem. Eng. Sci.** 64: 3301-3310
- Subramani, H. J., K. Hidajat and A.K. Ray. 2003. Optimization of simulated moving bed and varicol processes for glucose-fructose separation. **Ind. Eng. Chem.** 81: 549-567

Viard, V. and M.L. Lameloise. 1992. Modelling glucose-fructose separation by Adsorption Chromatography on ion exchange resins. **Food Eng.** 17: 29-48

Yan, Z., K. Hidajat and A. Ray. 2004. Optimal design and operation of SMB bioreactor: production of high fructose syrup by isomerization of glucose. **Biochemical engineering.** 21: 111-121

Zhang, Z., K. Hidajat and K. Ray. 2001. Application of Simulated Countercurrent Moving-Bed Chromatographic Reactor for MTBE Synthesis. **Ind. Eng. Chem. Res.** 40: 5305-5316

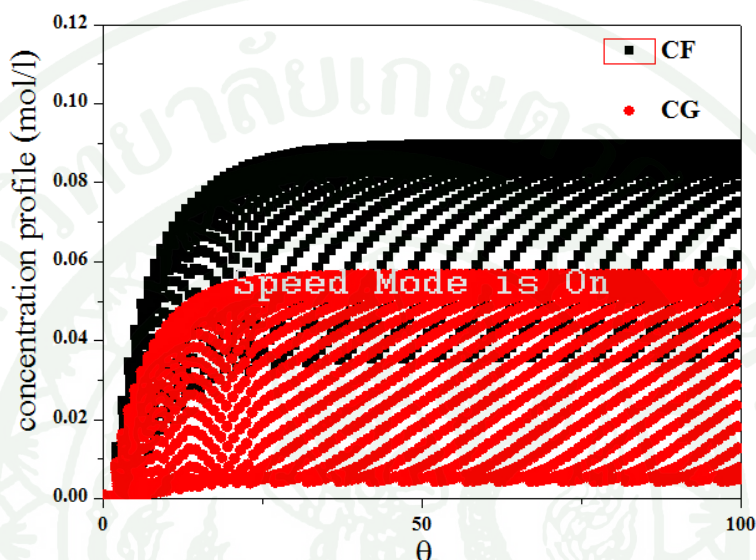






การหาพื้นที่ใต้กราฟ

เมื่อทำการทดลองจนได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับเวลา จากนั้นใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Origin pro.8 เพื่อหาพื้นที่ใต้กราฟ เนื่องจากพื้นที่ใต้กราฟนั้นหมายถึงความเข้มข้นเฉลี่ย เช่น



ภาพผนวกที่ ก1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับเวลาในสายผลิตภัณฑ์ extract ที่มีสายป้อนกลับจากสาย raffinate

จากกราฟความเข้มข้นเฉลี่ยในสาย extract คือ $C_F = 0.063375 \text{ mol/l} = 11.40747 \text{ g/l}$

$$C_G = 0.019368 \text{ mol/l} = 3.486275 \text{ g/l}$$

จากนั้นนำค่าความเข้มข้นเฉลี่ยไปหาค่าความบริสุทธิ์ และปริมาณการผลิตได้ของสาร

การคำนวณหาค่าความบริสุทธิ์ของสาร

$$\text{Pur}_F = \frac{\text{kg of fructose}}{\text{kg of glucose and fructose}} \text{ (at the extract port)}$$

ตัวอย่างการคำนวณ

$$\text{Pur}_F = \frac{0.063375}{0.063375 + 0.019368}$$

$$\text{Pur}_F = 0.7659 \text{ หรือ } 76.59\%$$

การหาค่าปริมาณการผลิตได้

$$\text{PR}_F = \frac{\text{kg of fructose at the extract port}}{(\text{m}^3 \text{ adsorbent})(\text{hour})}$$

ตัวอย่างการคำนวณ

$$V_{\text{col}} = \pi r^2 L$$

$$V_{\text{col}} = \pi \times (0.013)^2 \times (0.9) = 4.78028 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$\text{m}^3 \text{ adsorbent} = V_{\text{col}} \times N_c \times (1 - \varepsilon)$$

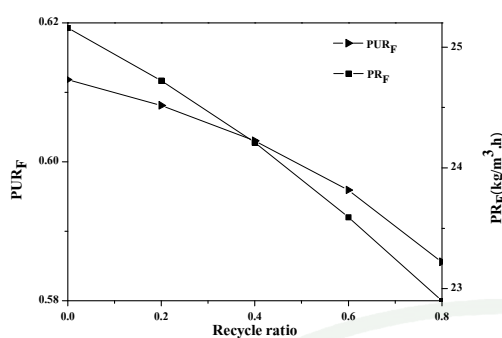
$$= (4.78028 \times 10^{-4}) \times 4 \times (1 - 0.4)$$

$$= 0.001147$$

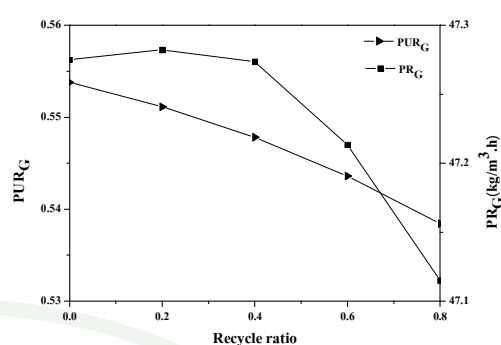
$$\text{PR}_F = \frac{11.40747 \text{ g}}{\text{L}} \left| \frac{1 \text{ Kg}}{1000 \text{ g}} \right| \left| \frac{3.78 \times 10^{-7} \text{ m}^3}{\text{s}} \right| \left| \frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} \right| \left| \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} \right| \left| \frac{1}{0.001147 \text{ m}^3} \right|$$

$$\text{PR}_F = 13.53382 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{h}$$



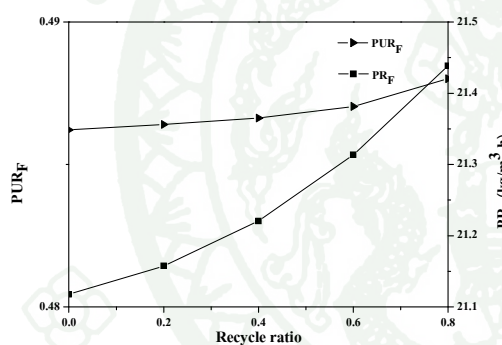


(ก)

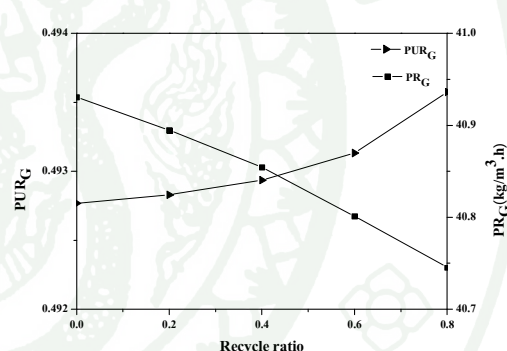


(ข)

ภาพผนวกที่ ข1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบริสุทธิ์และปริมาณการผลิตสารได้ที่สภาวะ $L=0.3$ เมตร, $t_s=68$ วินาที มีการป้อนกลับจากสาย raffinate (ก) น้ำตาลฟรักโทสในสาย extract (ข) น้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate

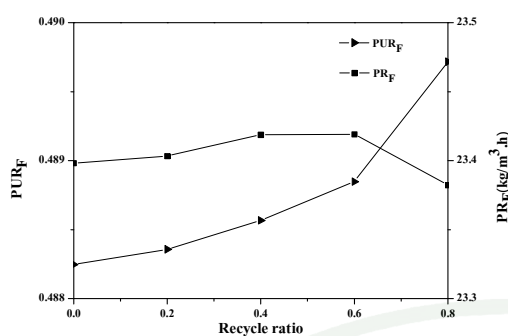


(ก)

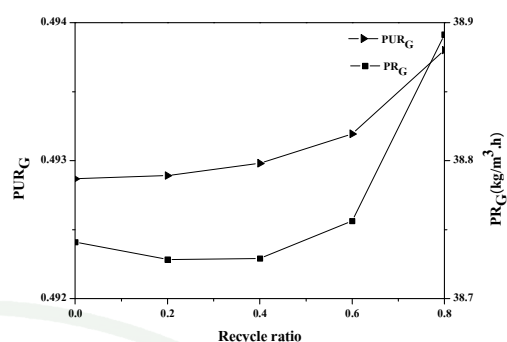


(ข)

ภาพผนวกที่ ข2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบริสุทธิ์และปริมาณการผลิตสารได้ที่สภาวะ $L=0.3$ เมตร, $t_s=136$ วินาที มีการป้อนกลับจากสาย raffinate (ก) น้ำตาลฟรักโทสในสาย extract (ข) น้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate

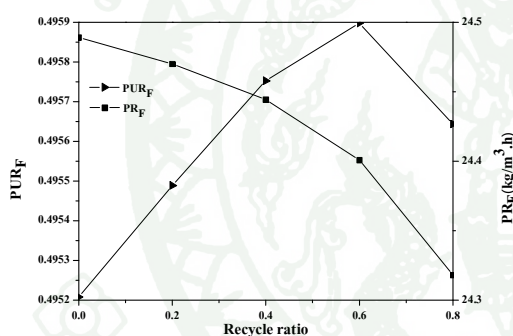


(ก)

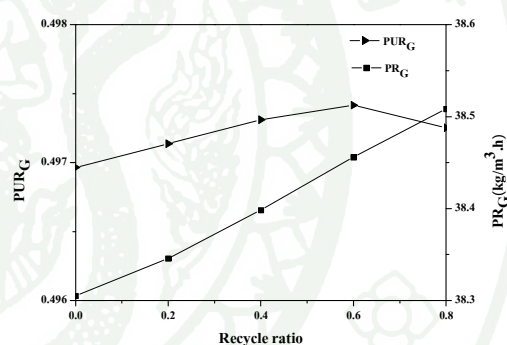


(ข)

ภาพผนวกที่ ข3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบริสุทธิ์และปริมาณการผลิตสารได้ที่สภาวะ $L=0.3$ เมตร, $t_s=198$ วินาที มีการป้อนกลับจากสาย raffinate (ก) น้ำตาลฟรักโทสในสาย extract (ข) น้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate

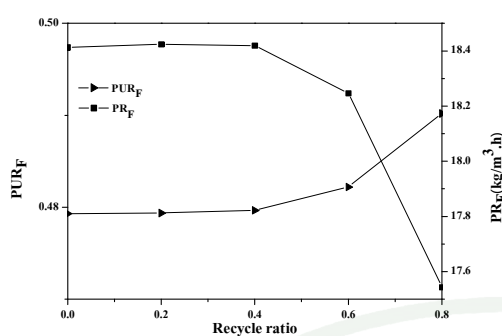


(ก)

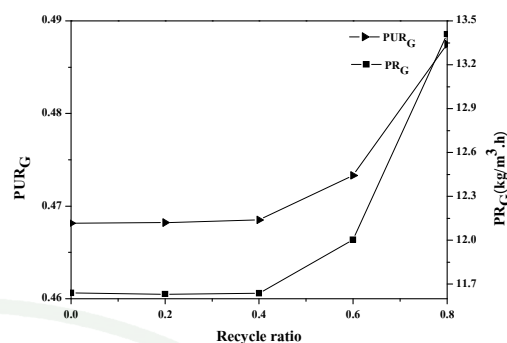


(ข)

ภาพผนวกที่ ข4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบริสุทธิ์และปริมาณการผลิตสารได้ที่สภาวะ $L=0.3$ เมตร, $t_s=273$ วินาที มีการป้อนกลับจากสาย raffinate (ก) น้ำตาลฟรักโทสในสาย extract (ข) น้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate

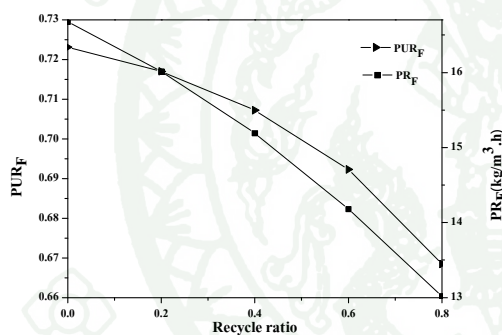


(ก)

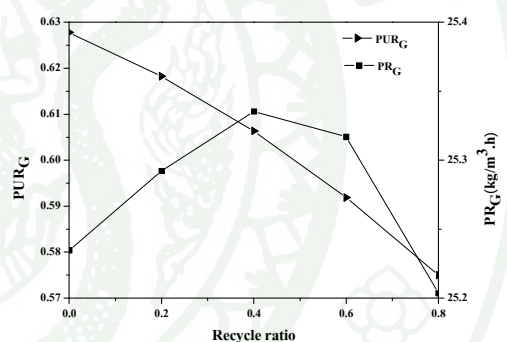


(ข)

ภาพผนวกที่ ข5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบริสุทธิ์และปริมาณการผลิตสารได้ที่สภาวะ $L = 0.6$ เมตร, $t_s = 68$ วินาที มีการป้อนกลับจากสาย raffinate (ก) น้ำตาลฟรักโทสในสาย extract (ข) น้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate

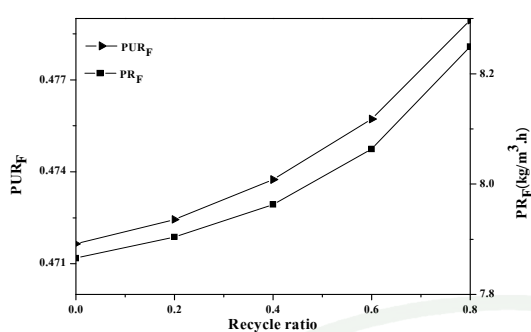


(ก)

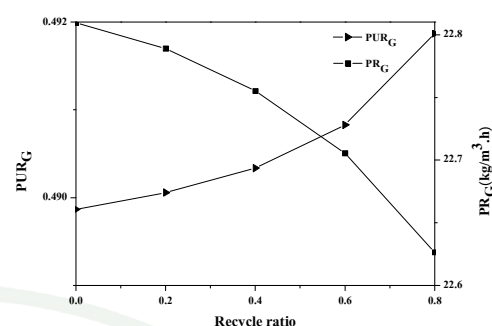


(ข)

ภาพผนวกที่ ข6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบริสุทธิ์และปริมาณการผลิตสารได้ที่สภาวะ $L = 0.6$ เมตร, $t_s = 136$ วินาที มีการป้อนกลับจากสาย raffinate (ก) น้ำตาลฟรักโทสในสาย extract (ข) น้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate

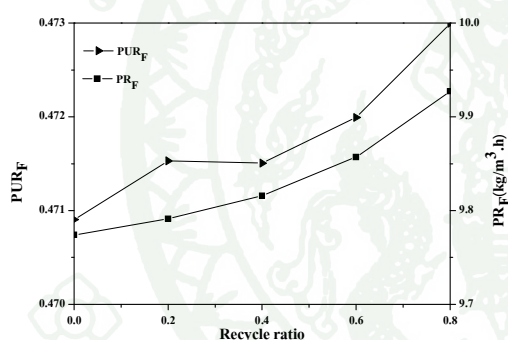


(ก)

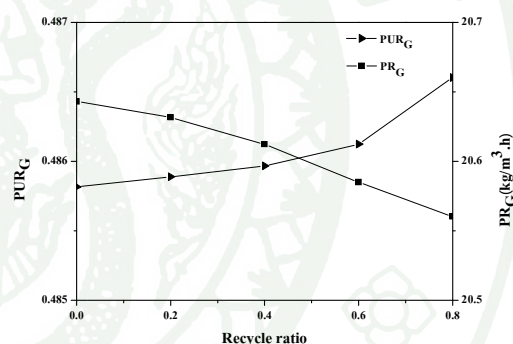


(ข)

ภาพผนวกที่ ข7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบริสุทธิ์และปริมาณการผลิตสารได้ที่สภาวะ $L = 0.6$ เมตร, $t_s = 198$ วินาที มีการป้อนกลับจากสาย raffinate (ก) น้ำตาลฟรักโทสในสาย extract (ข) น้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate

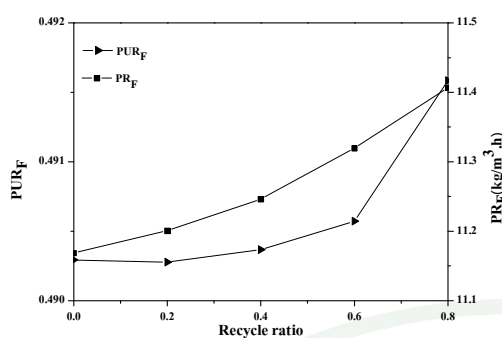


(ก)

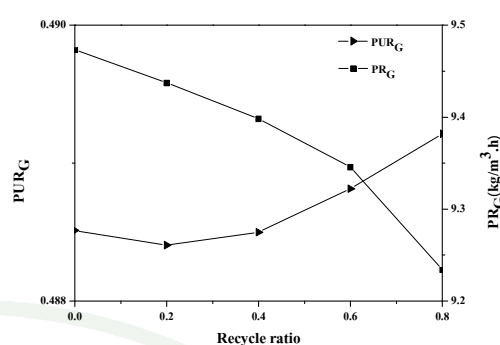


(ข)

ภาพผนวกที่ ข8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบริสุทธิ์และปริมาณการผลิตสารได้ที่สภาวะ $L = 0.6$ เมตร, $t_s = 273$ วินาที มีการป้อนกลับจากสาย raffinate (ก) น้ำตาลฟรักโทสในสาย extract (ข) น้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate

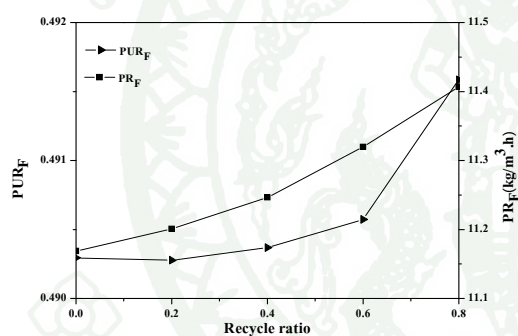


(ก)

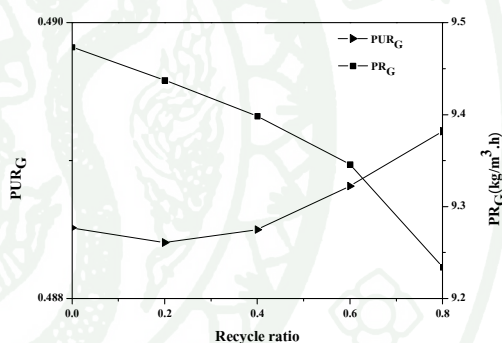


(ข)

ภาพผนวกที่ ข9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบริสุทธิ์และปริมาณการผลิตสารได้ที่สภาวะ $L=0.9$ เมตร, $t_s=68$ วินาที มีการป้อนกลับจากสาย raffinate (ก) น้ำตาลฟรักโทสในสาย extract (ข) น้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate

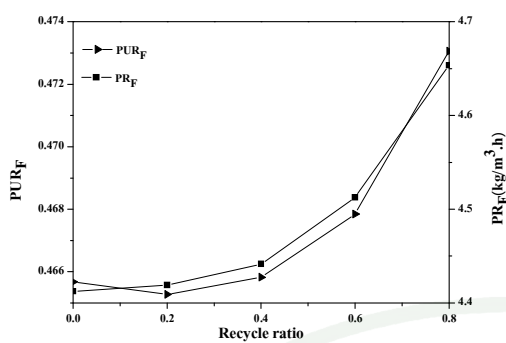


(ก)

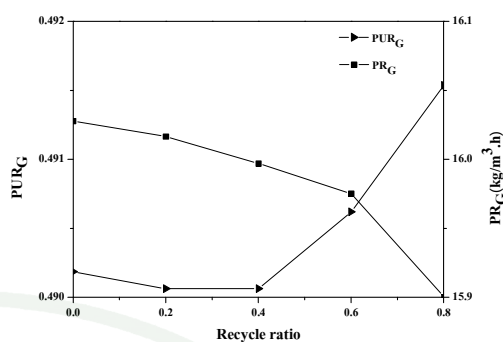


(ข)

ภาพผนวกที่ ข10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบริสุทธิ์และปริมาณการผลิตสารได้ที่สภาวะ $L=0.9$ เมตร, $t_s=136$ วินาที มีการป้อนกลับจากสาย raffinate (ก) น้ำตาลฟรักโทสในสาย extract (ข) น้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate

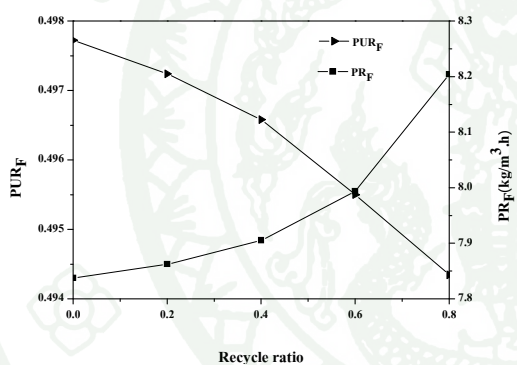


(ก)

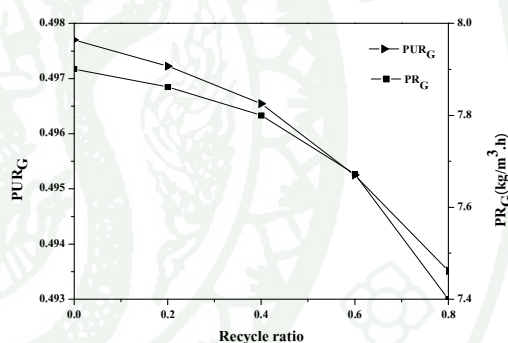


(ข)

ภาพผนวกที่ ข11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบริสุทธิ์และปริมาณการผลิตสารได้ที่สภาวะ $L=0.9$ เมตร, $t_s=273$ วินาที มีการป้อนกลับจากสาย raffinate (ก) น้ำตาลฟรักโทสในสาย extract (ข) น้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate

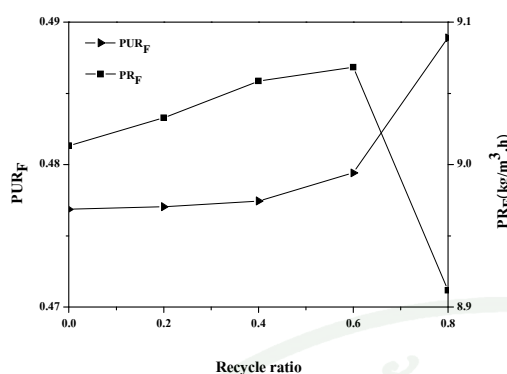


(ก)

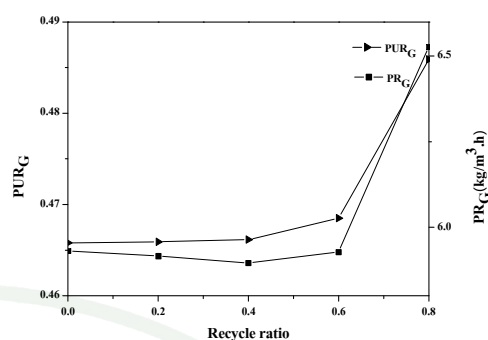


(ข)

ภาพผนวกที่ ข12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบริสุทธิ์และปริมาณการผลิตสารได้ที่สภาวะ $L=1.2$ เมตร, $t_s=68$ วินาที มีการป้อนกลับจากสาย raffinate (ก) น้ำตาลฟรักโทสในสาย extract (ข) น้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate

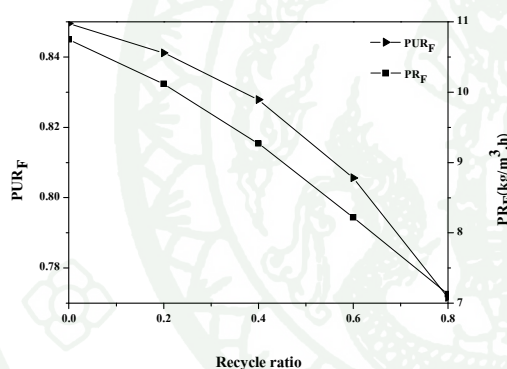


(ก)

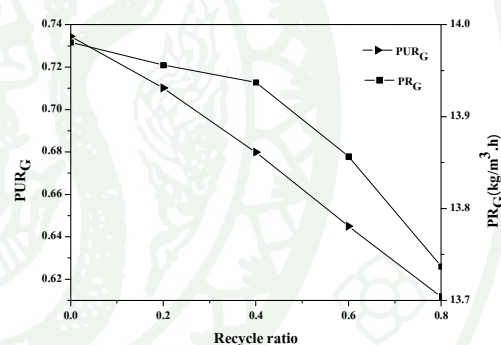


(ข)

ภาพผนวกที่ ข13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบริสุทธิ์และปริมาณการผลิตสารได้ที่สภาวะ $L=1.2$ เมตร, $t_s = 136$ วินาที มีการป้อนกลับจากสาย raffinate (ก) น้ำตาลฟรักโทสในสาย extract (ข) น้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate



(ก)



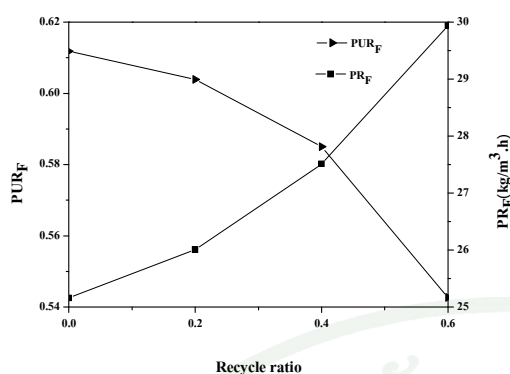
(ข)

ภาพผนวกที่ ข14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบริสุทธิ์และปริมาณการผลิตสารได้ที่สภาวะ $L=1.2$ เมตร, $t_s = 273$ วินาที มีการป้อนกลับจากสาย raffinate (ก) น้ำตาลฟรักโทสในสาย extract (ข) น้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate

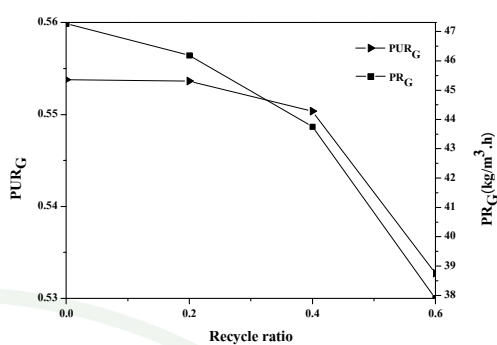


ภาคผนวก ค

ผลการทดลองจากการมีสายป้อนกลับจากสายผลิตภัณฑ์ extract

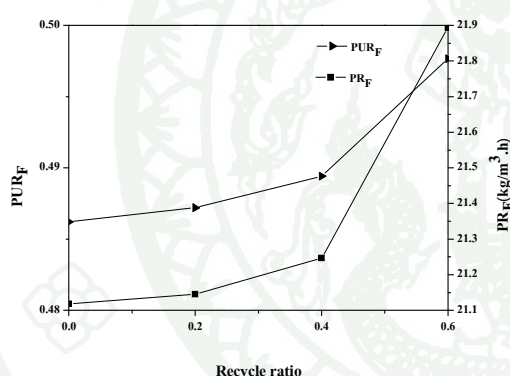


(ก)

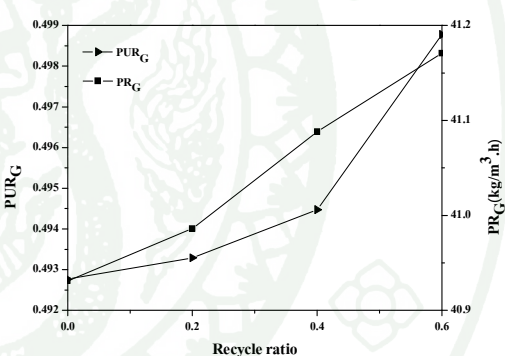


(ข)

ภาพผนวกที่ ค1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบริสุทธิ์และปริมาณการผลิตสารได้ที่สภาวะ $L=0.3$ เมตร, $t_s = 68$ วินาที มีการป้อนกลับจากสาย extract (ก) น้ำตาลฟรักโทสในสาย extract (ข) น้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate

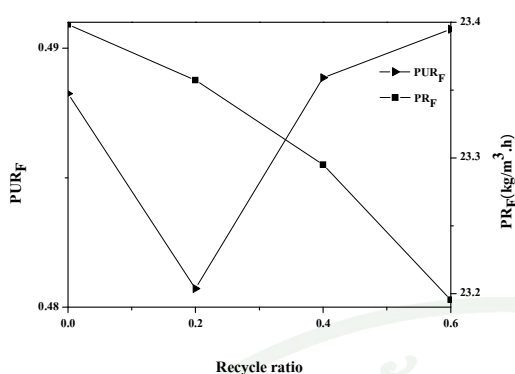


(ก)

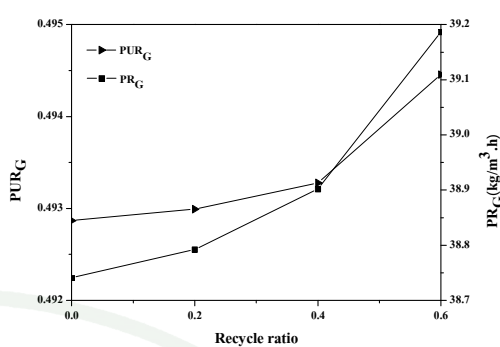


(ข)

ภาพผนวกที่ ค2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบริสุทธิ์และปริมาณการผลิตสารได้ที่สภาวะ $L=0.3$ เมตร, $t_s = 136$ วินาที มีการป้อนกลับจากสาย extract (ก) น้ำตาลฟรักโทสในสาย extract (ข) น้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate

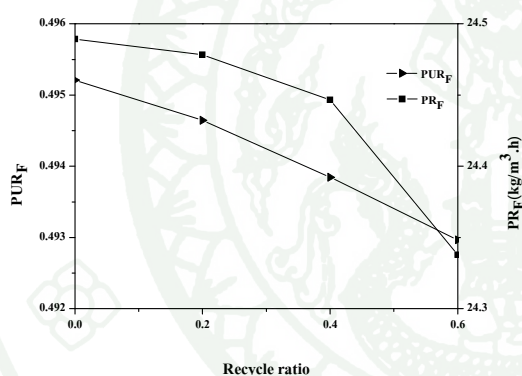


(ก)

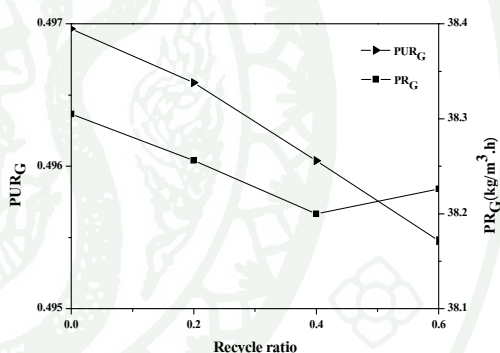


(ข)

ภาพผนวกที่ ค3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบริสุทธิ์และปริมาณการผลิตสารได้ที่สภาวะ $L=0.3$ เมตร, $t_s = 198$ วินาที มีการป้อนกลับจากสาย extract (ก) น้ำตาลฟรักโทสในสาย extract (ข) น้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate

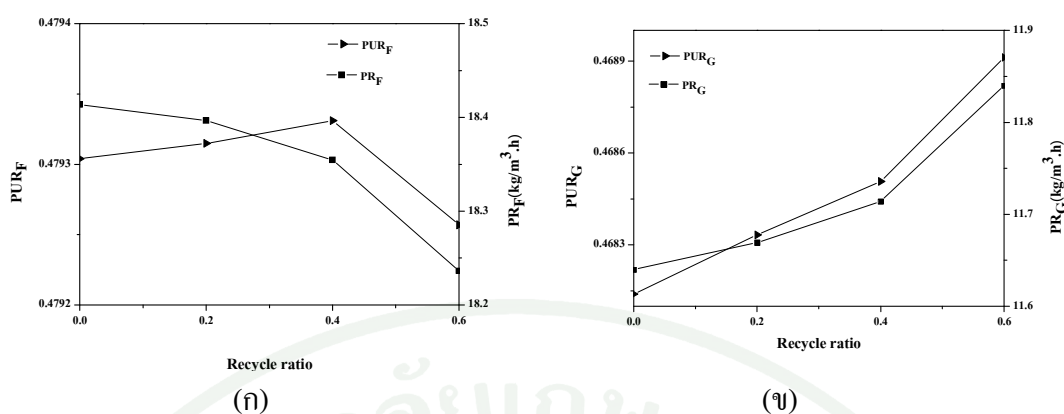


(ก)

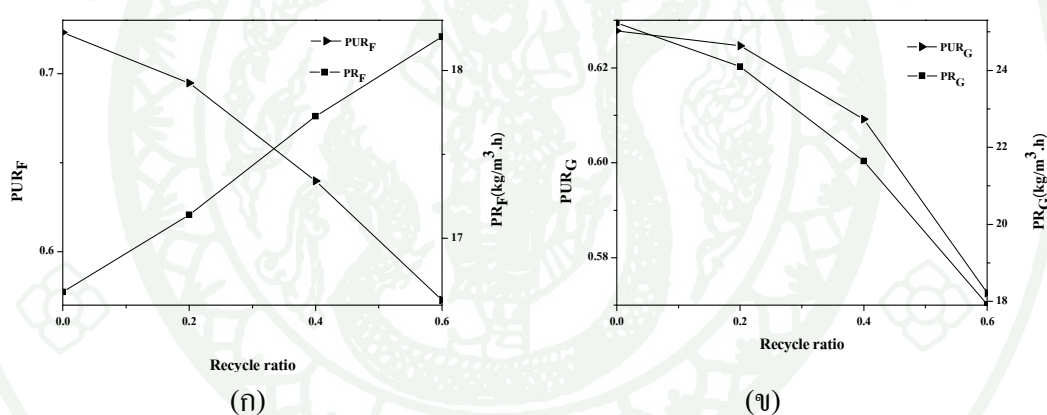


(ข)

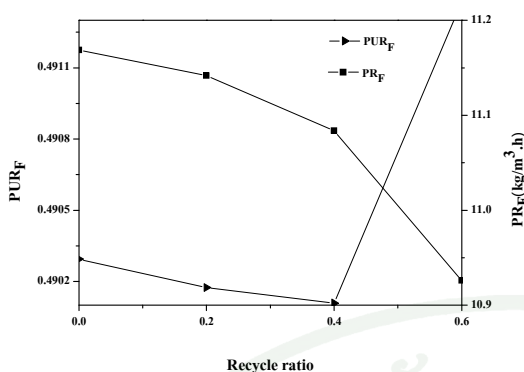
ภาพผนวกที่ ค4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบริสุทธิ์และปริมาณการผลิตสารได้ที่สภาวะ $L=0.3$ เมตร, $t_s = 273$ วินาที มีการป้อนกลับจากสาย extract (ก) น้ำตาลฟรักโทสในสาย extract (ข) น้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate



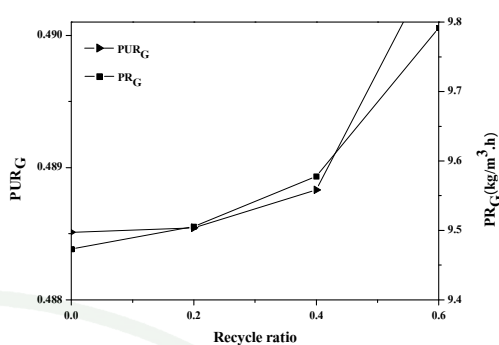
ภาพผนวกที่ ๕ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบริสุทธิ์และปริมาณการผลิตสารได้ที่สภาวะ $L=0.6$ เมตร, $t_s = 68$ วินาที มีการป้อนกลับจากสาย extract (ก) น้ำตาลฟรักโทสในสาย extract (ข) น้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate



ภาพผนวกที่ ๖ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบริสุทธิ์และปริมาณการผลิตสารได้ที่สภาวะ $L=0.6$ เมตร, $t_s = 136$ วินาที มีการป้อนกลับจากสาย extract (ก) น้ำตาลฟรักโทสในสาย extract (ข) น้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate

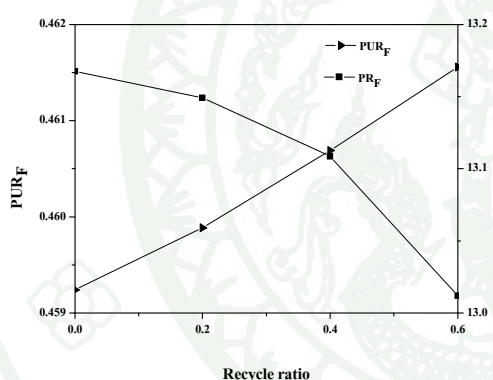


(ก)

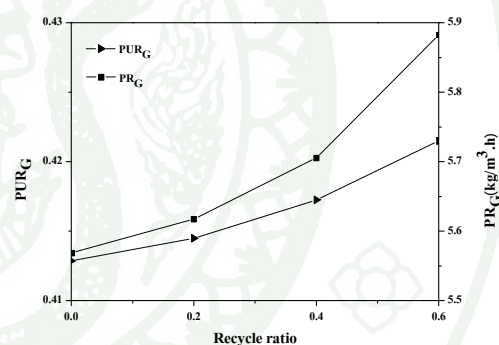


(ข)

ภาพผนวกที่ ๑๗ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบริสุทธิ์และปริมาณการผลิตสารได้ที่สภาวะ $L=0.9$ เมตร, $t_s = 68$ วินาที มีการป้อนกลับจากสาย extract (ก) น้ำตาลฟรักโทสในสาย extract (ข) น้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate

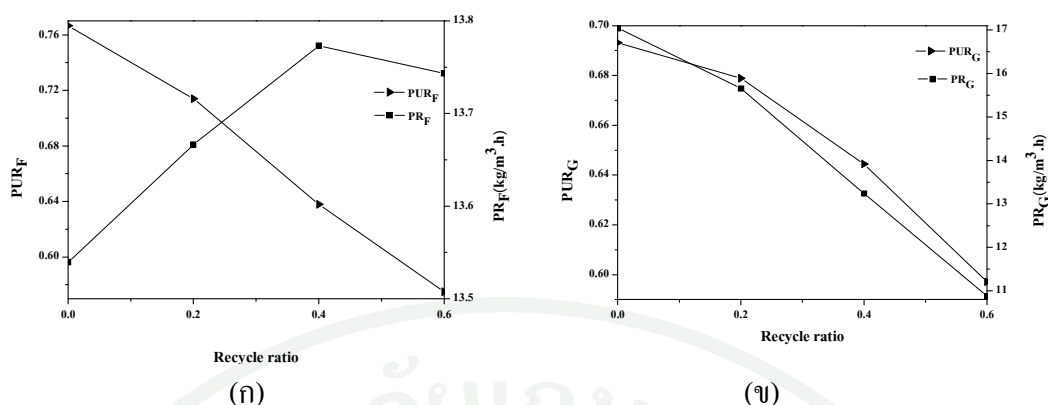


(ก)

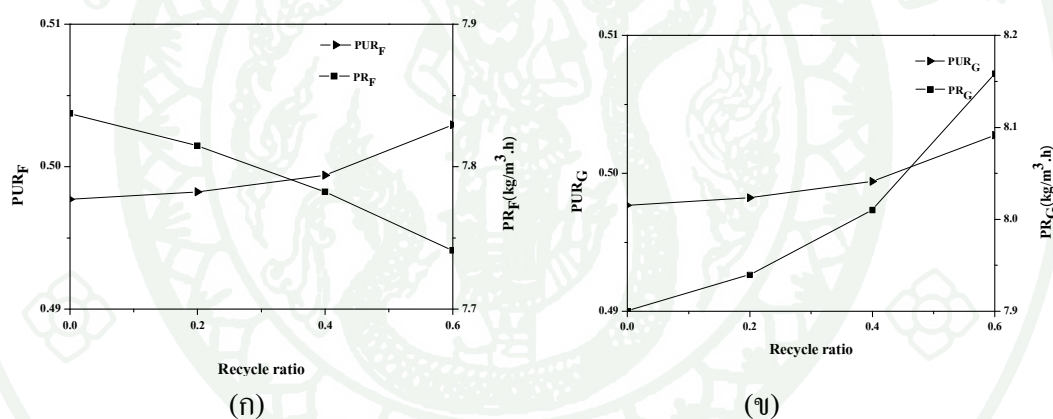


(ข)

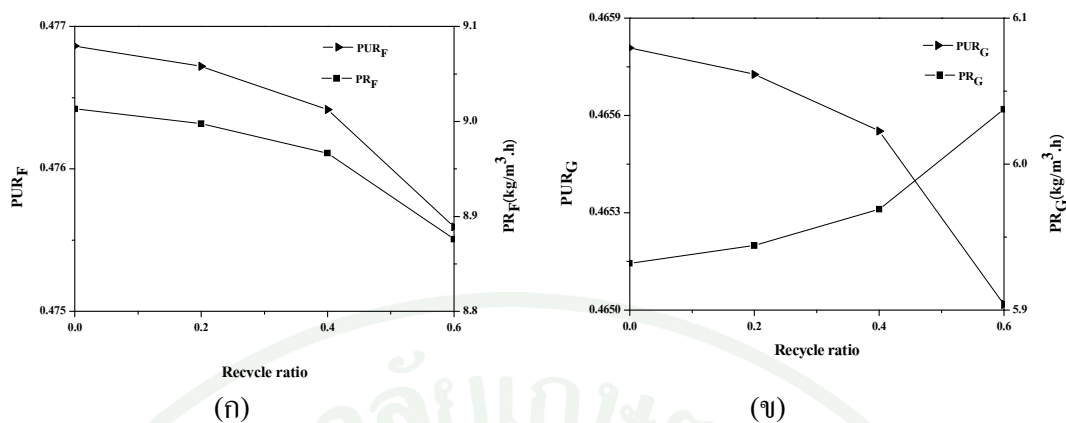
ภาพผนวกที่ ๑๘ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบริสุทธิ์และปริมาณการผลิตสารได้ที่สภาวะ $L=0.9$ เมตร, $t_s = 136$ วินาที มีการป้อนกลับจากสาย extract (ก) น้ำตาลฟรักโทสในสาย extract (ข) น้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate



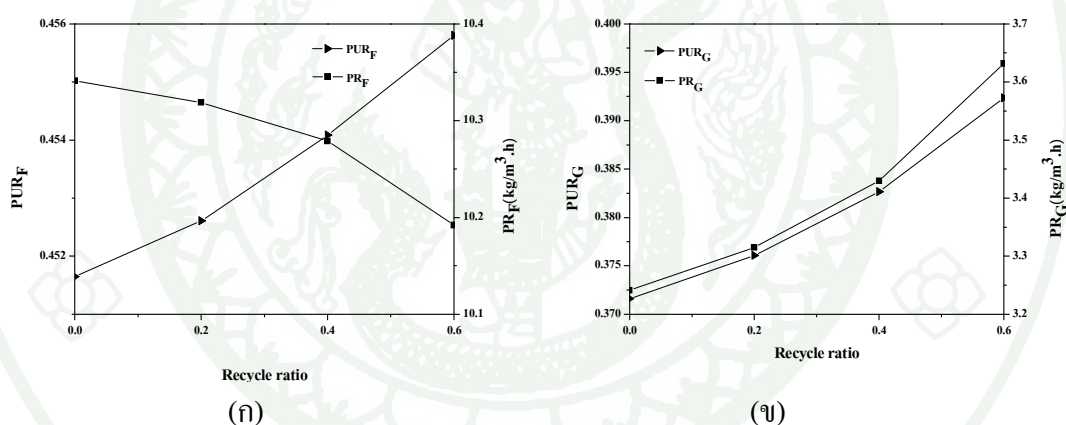
ภาพผนวกที่ ๙ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบริสุทธิ์และปริมาณการผลิตสารได้ที่สภาวะ $L=0.9$ เมตร, $t_s = 198$ วินาที มีการป้อนกลับจากสาย extract (ก) น้ำตาลฟรักโทสในสาย extract (ข) น้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate



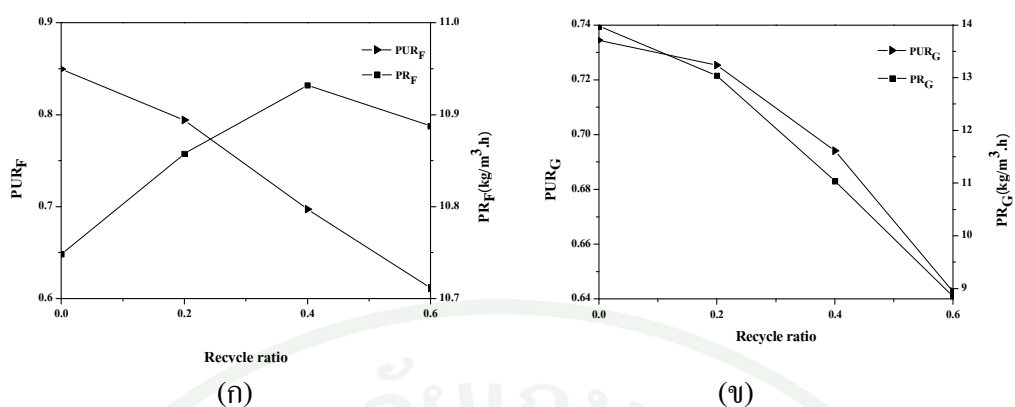
ภาพผนวกที่ ๑๐ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบริสุทธิ์และปริมาณการผลิตสารได้ที่สภาวะ $L=1.2$ เมตร, $t_s = 68$ วินาที มีการป้อนกลับจากสาย extract (ก) น้ำตาลฟรักโทสในสาย extract (ข) น้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate



ภาพผนวกที่ ค11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบริสุทธิ์และปริมาณการผลิตสารได้ที่สภาวะ $L=1.2$ เมตร, $t_s = 136$ วินาที มีการป้อนกลับจากสาย extract (ก) น้ำตาลฟรักโทสในสาย extract (ข) น้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate



ภาพผนวกที่ ค12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบริสุทธิ์และปริมาณการผลิตสารได้ที่สภาวะ $L=1.2$ เมตร, $t_s = 198$ วินาที มีการป้อนกลับจากสาย extract (ก) น้ำตาลฟรักโทสในสาย extract (ข) น้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate



ภาพผนวกที่ ค13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบริสุทธิ์และปริมาณการผลิตสารได้ที่สภาวะ $L=1.2$ เมตร, $t_s=273$ วินาที มีการป้อนกลับจากสาย extract (ก) น้ำตาลฟรักโทสในสาย extract (ข) น้ำตาลกลูโคสในสาย raffinate

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ	นางสาวกชกร รุ่งเรือง
เกิดวันที่	10 กันยายน 2529
สถานที่เกิด	จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (วิศวกรรมเคมี) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (พ.ศ.2551)
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมี และวัสดุขั้นสูง