สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(11)
รายการภาพ	(13)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	(15)
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 บทนำต้นเรื่อง	1
1.2 ตรวจเอกสาร	2
1.) กระบวนการเมมเบรน	2
1.1) อัลตราฟิลเตรชั่น	4
1.2) ไมโครฟิลเตรชั่น	5
1.3) ข้อดีของเทคโนโลยีเมมเบรน	6
1.4) ทฤษฎีของกระบวนการเมมเบรน	6
1.5) ปรากฏการณ์คอนเซ็นเตรชั่นโพลาไรเซชั่นและฟาวลิ่ง	8
1.5.1) คอนเซ็นเตรชั่นโพลาไรเซชั่น	8
1.5.2) ฟาวลิ่ง	9
1.5.3) ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดฟาวลิ่ง	12
1.5.4) กลไกการเกิดฟาวลิ่ง	16
1.6) ค่าฟลักซ์วิกฤต	17
1.7) การประยุกต์ใช้กระบวนการเมมเบรนในอุตสาหกรรมน้ำผลไม้	19
2.) ตาลโตนด	20
2.1) แหล่งของตาลโตนด	20
2.2) การใช้ประโยชน์จากตาลโตนด	21
2.3) วิธีการเก็บเกี่ยวและผลผลิตน้ำตาลโตนด	22
2.4) องค์ประกอบของน้ำตาลโตนด	23
2.5) การป้องกันการเน่าเสียของน้ำตาลโตนด	26
1.3 วัตถุประสงค์	27

สารบัญ (ต่อ)

		หน้า
	เอกสารอ้างอิง	28
2.	**ค่าฟลักซ์, การกักกัน และฟาวลิ่งในระหว่างการกรองน้ำตาลโตนดด้วยกระบวนการไมโครฟิลเตรชั่นและอัลตราฟิลเตรชั่นระดับโรงงานทดลอง**	32
	2.1 บทนำ	32
	2.2 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	35
	2.3 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง	40
	1.) ผลของกระบวนการไมโครฟิลเตรชั่นและอัลตราฟิลเตรชั่นต่อคุณสมบัติของน้ำตาลโตนด	40
	1.1) คุณสมบัติทางกายภาพ	40
	1.2) คุณสมบัติทางเคมี	43
	1.3) คุณสมบัติทางจุลินทรีย์	47
	2.) การเปลี่ยนแปลงฟลักซ์	48
	3.) ความต้านทานเนื่องจากฟาวลิ่งและการกักกันโปรตีน	50
	3.1) ความต้านทานเนื่องจากฟาวลิ่ง	50
	3.2) การกักกันโปรตีน	53
	2.4 บทสรุป	54
	เอกสารอ้างอิง	56
3.	**ฟาวลิ่งและกลไกการเกิดฟาวลิ่งในระหว่างกระบวนการกรองน้ำตาลโตนดด้วยกระบวนการไมโครฟิลเตรชั่นและอัลตราฟิลเตรชั่น**	59
	3.1 บทนำ	59
	3.2 ทฤษฎีกลการเกิดฟาวลิ่ง	61
	3.3 วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	64
	3.4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง	68
	1.) ผลของขนาดรูพรุนเมมเบรน, ความดัน และความเร็วต่อฟลักซ์ของเพอมิเอท ประสิทธิภาพการกักกัน และความต้านทานฟาวลิ่ง	68
	1.1) ผลของขนาดรูพรุน	68

สารบัญ (ต่อ)

		หน้า
	1.2) ผลของความดันขับ	71
	1.3) ผลของความเร็วตามขวาง	75
2.)	ผลของขนาดรูพรุนเมมเบรน, ความดันขับ และความเร็วตามขวางต่อกลไกการเกิดฟาวลิ่ง	78
	2.1) ผลของรูพรุน/MWCOต่อกลไกการเกิดฟาวลิ่ง	84
	2.2) ผลของความดันขับต่อกลไกการเกิดฟาวลิ่ง	86
	2.3) ผลของความเร็วตามขวางต่อกลไกการเกิดฟาวลิ่ง	88
3.5 บทสรุป		90
เอกสารอ้างอิง		92
4.	**ค่าฟลักซ์วิกฤตกระบวนการไมโครฟิลเตรชั่นและอัลตราฟิลเตรชั่นของการกรองน้ำตาลโตนด**	95
4.1 บทนำ		95
4.2 วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย		100
4.3 ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลอง		102
	1.) ผลของรูพรุน/MWCOต่อค่าฟลักซ์วิกฤต	102
	2.) ผลของความเร็วต่อค่าฟลักซ์วิกฤต	106
	3.) การทดสอบการทำนายค่าฟลักซ์วิกฤตโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์	111
4.4 บทสรุป		112
เอกสารอ้างอิง		114
5.	**บทสรุป ข้อจำกัด ปัญหาและข้อเสนอแนะ**	116
ภาคผนวก		118
ประวัติผู้เขียน		130

รายการตาราง

ตารางที่		หน้า
1-1	กระบวนการอัลตราฟิลเตรชั่น	4
1-2	กระบวนการไมโครฟิลเตรชั่น	5
1-3	ปริมาณของน้ำตาลโตนดและปริมาณองค์ประกอบของแข็งที่ละลายได้ในน้ำตาลโตนดที่เก็บในประเทศกัมพูชา	23
1-4	เปรียบเทียบปริมาณน้ำตาลโตนดและปริมาณองค์ประกอบของแข็งที่ละลายได้ในน้ำตาลโตนดแต่ละเพศ	23
1-5	คุณสมบัติทางเคมีของน้ำตาลโตนดที่ใส่และไม่ใส่เปลือกไม้พะยอม	24
1-6	สมบัติทางเคมีของน้ำตาลโตนด	25
1-7	เปรียบเทียบองค์ประกอบของน้ำตาลโตนดสด	27
2-1	ตัวอย่างของการใช้เมมเบรนกับน้ำผลไม้	34
2-2	คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำตาลโตนดสดและเพอมิเอท (ไมโครฟิลเตรชั่น ขนาดรูพรุน 0.2 และ 0.1 μm ที่ความดันขับขับ 100 kPa และอัลตราฟิลเตรชั่น MWCO 300 และ 50 kDa ที่ความดันขับขับ 250 kPa ความเร็วตามขวาง 3.5 m/s อุณหภูมิ 50 ± 1°C)	41
2-3	คุณสมบัติทางเคมีของน้ำตาลโตนดสดและเพอมิเอท (ไมโครฟิลเตรชั่นรูพรุนขนาด 0.2 และ 0.1 μm ที่ความดันขับ 100 kPa และอัลตราฟิลเตรชั่น MWCO ขนาด 300 และ 50 kDa ที่ความดันขับ 250 kPa ความเร็วตามขวาง 3.5 m/s อุณหภูมิ 50 ± 1 °C	45
2-4	จำนวนจุลินทรีย์ในน้ำตาลโตนดสดและส่วนเพอมิเอท (ไมโครฟิลเตรชั่น ขนาดรูพรุน 0.2 และ 0.1 μm ที่ความดันขับ 100 kPa และอัลตราฟิลเตรชั่น MWCO 300 และ 50 kDa ที่ความดันขับ 250 kPa ความเร็วตามขวาง 3.5 m/s อุณหภูมิ 50 ± 1°C	48
2-5	ความต้านทานเมมเบรนและความต้านทานเนื่องจากฟาวลิ่งของกระบวนการกรองน้ำตาลโตนดด้วยเมมเบรนระดับไมโครฟิลเตรชั่นและอัลตราฟิลเตรชั่น ความดันขับ 100 และ 250 kPa ตามลำดับ ความเร็วตามขวาง 3.5 m/s อุณหภูมิ 50±1 °C	51

รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
3-1	การศึกษาฟาวลิ่งและกลไกการเกิดฟาวลิ่ง	60
3-2	ผลของรูพรุน/MWCOต่อค่าความต้านทานเมมเบรน และความต้านทานฟาวลิ่ง ที่ความดันขับ 1.5 bar ความเร็วตามขวาง 3.5m/s อุณหภูมิ 50 ±1 ºC.	71
3-3	ผลของความดันขับต่อค่าความต้านทานเมมเบรน และความต้านทานฟาวลิ่ง เมมเบรนขนาดรูพรุน 0.14 μm และ MWCO 50 kDa ความเร็วตามขวาง 3.5 m/s อุณหภูมิ 50±1 °C	74
3-4	ผลของความเร็วตามขวางต่อค่าความต้านทานเมมเบรนและความต้านทานฟาวลิ่ง เมมเบรนขนาดรูพรุน 0.14 μm และ MWCO 50 kDa ความดันขับ 1.5 bar อุณหภูมิ 50±1 °C	78
3-5	ค่าคงที่ของกลไกการเกิดฟาวลิ่ง ปริมาตรเริ่มต้นและสิ้นสุดในแต่ละกลไกการเกิดฟาวลิ่งระหว่างกระบวนการไมโครฟิลเตรชั่นและอัลตราฟิลเตรชั่น ที่ความดันขับ 1.5 bar ความเร็วตามขวาง 3.5 m/s อุณหภูมิ 50±1 °C	86
3-6	ค่าคงที่ของกลไกการเกิดฟาวลิ่ง ปริมาตรเริ่มต้นและสิ้นสุดในแต่ละกลไกการเกิดฟาวลิ่งเนื่องจากผลของความดันขับระหว่างกระบวนการไมโครฟิลเตรชั่นและอัลตราฟิลเตรชั่น ที่ความเร็วตามขวาง 3.5 m/s อุณหภูมิ 50±1 °C	88
3-7	ค่าคงที่ของกลไกการเกิดฟาวลิ่ง ปริมาตรเริ่มต้นและสิ้นสุดในแต่ละกลไกการเกิดฟาวลิ่งเนื่องจากผลของความเร็วตามขวางระหว่างกระบวนการไมโครฟิลเตรชั่นและอัลตราฟิลเตรชั่น ความดันขับ 1.5 bar อุณหภูมิ 50±1 °C	90
4-1	การศึกษาฟลักซ์วิกฤต	97
4-2	ค่าฟลักซ์วิกฤต ของรูพรุน/MWCOระดับต่างๆ ที่ความเร็วตามขวาง 3.5 m/s อุณหภูมิ 50±1 °C	102

รายการภาพ

ภาพที่		หน้า
1-1	กระบวนการกรองแบบไหลขวางและแบบปิดตาย	3
1-2	ภาพจำลองอธิบาย (a) ปรากฏการณ์คอนเซ็นเตรชั่นโพลาไรเซชั่น และ (b) การเกิดชั้นเค้กในกระบวนการเมมเบรนแบบไหลขวาง	10
1-3	ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์สภาวะการดำเนินการกับการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์	15
1-4	ฟลักซ์วิกฤตรูปแบบระดับเข้มและแบบระดับอ่อน	18
2-1	ชุดเมมเบรนระดับโรงงานทดลองไมโครฟิลเตรชั่นและอัลตราฟิลเตรชั่น	36
2-2	น้ำตาลโตนดหลังผ่านกระบวนการเมมเบรน	40
2-3	เพอมิเอทฟลักซ์กับอัตราความเข้มข้นเชิงปริมาตรในระหว่างการกรองน้ำตาลโตนด ด้วยเมมเบรนไมโครฟิลเตรชั่น (รูพรุนขนาด 0.2 และ 0.1 μm ที่ความดันขับ 100 kPa) และอัลตราฟิลเตรชั่น (MWCOขนาด 300 และ 50 kDa ที่ความดันขับ 250 kPa) ความเร็วตามขวาง 3.5 m/s อุณหภูมิ 50±1°C	49
2-4	การกระจายตัวของอนุภาค ในน้ำตาลโตนด	52
2-5	การเปลี่ยนแปลงการกักกันโปรตีนระหว่างการกรองน้ำตาลโตนดโดยเมมเบรน ไมโครฟิลเตรชั่น (ขนาดรูพรุน 0.2 และ 0.1 μm, ความดันขับ 100 kPa) และอัลตราฟิลเตรชั่น (300 และ 50 kDa, ความดันขับ 250 kPa) ความเร็วตามขวาง 3.5 m/s อุณหภูมิ 50±1 °C	54
3-1	องค์ประกอบของระบบการกรองแบบไมโครฟิลเตรชั่นและอัลตราฟิลเตรชั่น	65
3-2	ผลของรูพรุน/MWCOต่อการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ของเพอมิเอท(ความดันขับ 1.5 bar ความเร็วตามขวาง 3.5m/s อุณหภูมิ 50±1 °C)	69
3-3	ผลของรูพรุน/MWCO ต่อการกักกันโปรตีน ที่ความดันขับ 1.5 bar ความเร็วตามขวาง 3.5 m/s อุณหภูมิ 50 ±1 °C	70
3-4	ผลของความดันขับต่อการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ของเพอมิเอท (a) 0.14 μm (b)50 kDa ที่ความเร็วตามขวาง 3.5 m/s อุณหภูมิ 50±1 °C	72
3-5	ผลของความดันขับต่อค่าการกักกันโปรตีน (a) 0.14 μm (b)50 kDa ที่ความเร็วตามขวาง 3.5 m/s อุณหภูมิ 50±1 °C	73
3-6	ผลของความเร็วตามขวางต่อการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ของเพอมิเอท (a) 0.14 μm (b) 50 kDa ที่ความดันขับ 1.5 bar อุณหภูมิ 50±1 °C	76

รายการภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
3-7	ผลของความเร็วตามขวางต่อค่ากักกันโปรตีน (a) 0.14 μm (b)50 kDa ที่ความดันขับ 1.5 bar อุณหภูมิ 50±1 °C	77
3-8	การวิเคราะห์กลไกการเกิดฟาวลิ่งของการกรองน้ำตาลโตนดด้วยเมมเบรนรูพรุนขนาด 0.14μm ความเร็วตามขวาง 3.5 m/s, ความดันขับ 1.5 bar อุณหภูมิ 50±1°C (a) SBM (b) IBM (c) CFM	80
3-9	การวิเคราะห์กลไกการเกิดฟาวลิ่งของการกรองน้ำตาลโตนดด้วยเมมเบรนMWCOขนาด 300 kDa ความเร็วตามขวาง 3.5 m/s, ความดันขับ 1.5 bar อุณหภูมิ 50±1°C (a) SBM (b) IBM (c) CFM	81
3-10	การวิเคราะห์กลไกการเกิดฟาวลิ่งของการกรองน้ำตาลโตนดด้วยเมมเบรนMWCO ขนาด 150 kDa ความเร็วตามขวาง 3.5 m/s,ความดันขับ 1.5 bar, อุณหภูมิ 50±1°C (a) SBM (b) IBM (c) CFM	82
3-11	การวิเคราะห์กลไกการเกิดฟาวลิ่งของการกรองน้ำตาลโตนดด้วยเมมเบรนMWCOขนาด 50 kDa ความเร็วตามขวาง 3.5 m/s, ความดันขับ 1.5 bar, อุณหภูมิ 50±1°C (a) SBM (b) IBM (c) CFM	83
4-1	แผนภาพระบบกรองระดับไมโครฟิลเตรชั่น และอัลตราฟิลเตรชั่น	101
4-2	ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ ความดันขับและเวลาการกรองของน้ำตาลโตนดระหว่างกระบวนการเมมเบรนรูพรุน/MWCO ขนาด (a) 0.14 μm (b) 300 kDa (c) 150 kDa (d) 50 kDa ความเร็วตามขวาง 3.5 m/s อุณหภูมิ 50±1 °C	104
4-3	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ ความดันขับและเวลาการกรองเมื่อกระทำการกรองน้ำตาลโตนดด้วยเมมเบรนรูพรุนขนาด 0.14μm ที่ระดับความเร็วตามขวาง (a) 2.0 m/s (b) 3.0 m/s (c) 3.5 m/s อุณหภูมิ 50±1°C	107
4-4	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ ความดันขับและเวลา เมื่อทำการกรองน้ำตาลโตนดด้วยเมมเบรน MWCO ขนาด 50 kDa ที่ระดับความเร็วตามขวาง (a) 2.0 m/s (b) 3.0 m/s (c) 3.5 m/s อุณหภูมิ 50±1°C	108
4-5	ค่าฟลักซ์วิกฤตของน้ำตาลโตนดกับค่าเลขเรย์โนลด์	110
4-6	เปรียบเทียบค่าฟลักซ์วิกฤตจากการทดลองกับแบบจำลอง Shear-induced diffusion และ Torque balance ของน้ำตาลโตนดเมื่อผ่านเมมเบรนรูพรุนขนาด 0.14 μm และMWCO ขนาด 50 kDa	112

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

A_0	พื้นที่ตัดขวางของเมมบรน (m^2)
a	รัศมีของอนุภาคสารป้อน (m)
bar	บาร์
BSA	โบวีนเซรั่มอัลบูมิน (Bovine serum albumin)
CA	เซลลูโลสอะซิเตต
CBM	Complete blocking model
CFM	Cake filtration model
CFV	ความเร็วตามขวาง (m/s)
CP	คอนเซ็นเตรชั่นโพลาไรเซชั่น (Concentration polarization)
C_p	ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในเพอมิเอท
C_R	ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในรีเทนเทท
DOTM	Direct Observation Through the Membrane
F	แฟคเตอร์ของสารละลายเฟลิง
F_i	แรงกระทำของอนุภาคกับเมมเบรน
g	กรัม
HAS	โปรตีนเซรั่มเลือดคน (Human serum albumin)
h	ชั่วโมง
IBM	Intermediate blocking model
J	ค่าฟลักซ์ของเพอมิเอท (permeate flux, $L/m^2.h$ หรือ $m^3/m^2.s$)
J_{cr}	ค่าฟลักซ์วิกฤต (Critical flux, $L/m^2.h$ หรือ $m^3/m^2.s$)
$J_{cr,SI}$	ค่าฟลักซ์วิกฤตตามแบบจำลอง Shear- induced diffusion (m/s)
$J_{cr,Tr}$	ค่าฟลักซ์วิกฤตของแบบจำลอง Torque balance (m/s)
J_v	ฟลักซ์ของเพอมิเอทที่เวลาใดๆ ($m^3/m^2.s$)
$J_{v,0}$	ฟลักซ์ของเพอมิเอทเริ่มต้น ($m^3/m^2.s$)
J_w	ฟลักซ์ของน้ำกรองก่อนการใช้งาน ($m^3/m^2.s$)
J'_w	ฟลักซ์ของน้ำกรองหลังจากการล้างเมมเบรน ($m^3/m^2.s$)
K	สัมประสิทธิของการเกิดฟาวลิ่ง

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ (ต่อ)

k_b	ค่าคงที่ของการเกิดฟาวลิ่งตามแบบจำลอง CBM (s^{-1})
k_i	ค่าคงที่ของการเกิดฟาวลิ่งตามแบบจำลอง IBM (m^{-1})
k_s	ค่าคงที่ของการเกิดฟาวลิ่งตามแบบจำลอง SBM (m^{-3})
k_c	ค่าคงที่ของการเกิดฟาวลิ่งตามแบบจำลอง CFM (s/m^6)
kPa	กิโลปาสคาล
kDa	กิโลดาลตัน (Kilodaltons)
L	ความยาวของเมมเบรน (m)
L	ลิตร (Liter)
m	เมตร
MF	ไมโครฟิลเตรชั่น (Microfiltration)
mg	มิลลิกรัม (Milligram)
min	นาที (Minutes)
ml	มิลลิลิตร (Milliliter)
mm	มิลลิเมตร (Millimeter)
MW	มวลโมเลกุล (Molecular weight)
MWCO	Molecular weight cut off (Dalton)
M1	น้ำหนักของถ้วยอลูมิเนียม (g)
M2	น้ำหนักของตัวอย่างในถ้วยอลูมิเนียมหลังอบ (g)
m^2	ตารางเมตร
N	ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
n	ตัวแปรของแบบจำลองกลไกฟาวลิ่ง (CBM=2, IBM=1, SBM=1.5, CFM= 0)
NaOH	โซเดียมไฮดรอกไซด์
NF	นาโนฟิลเตรชั่น (Nanofiltration)
nm	นาโนเมตร (Nanometer)
OD	การดูดกลืนแสง (Optical density)
Pa	ปาสคาล
pH	พีเอช

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ (ต่อ)

pI	จุดไอโซอิเล็กทริกซ์ (Isoelectric point)
P_{in}	ความดันขาเข้า หรือความดันของสารป้อน (Pa)
P_{out}	ความดันขาออก หรือความดันของรีเทนเทท (Pa)
P_p	ความดันด้านเพอมิเอท (Pa)
PVDF	โพลีไวนิลลิดีนไดฟลูออไรด์
PC	โพลีคาร์บอเนต
Re	เลขเรย์โนลด์ (Reynold number)
R_f	ความต้านทานของการเกิดฟาวลิ่ง (m^{-1})
R_{irf}	ความต้านทานฟาวลิ่งแบบผันกลับไม่ได้ (irreversible fouling) (m^{-1})
R_j	ค่าการกักกัน (Rejection coefficient, %)
R_m	ความต้านทานของแผ่นเมมเบรน (m^{-1})
$\hat{R}_m$	ความต้านทานเมมเบรนจำเพาะ (m^{-2})
RO	รีเวอร์ส ออสโมซิส (Reverse osmosis)
R_{rf}	ความต้านทานฟาวลิ่งแบบผันกลับได้ (reversible fouling) (m^{-1})
R_t	ความต้านทานรวม (m^{-1})
R^2	ค่าความสัมประสิทธิแห่งความถดถอย (Linear regression coefficient)
SBM	Standard blocking model
t	เวลา (s)
TMP	ความดันขับ (Transmembrane pressure, bar)
UF	อัลตราฟิลเตรชั่น (Ultrafiltration)
V	ปริมาตรของเพอมิเอท (m^3)
VCR	ค่าเฟคเตอร์ความเข้มข้นเชิงปริมาตร (Volume concentration factor)
W	น้ำหนักน้ำตาลโตนดสด
w	น้ำหนัก
°Brix	องศาบริกซ์
ºC	อุณหภูมิองศาเซลเซียส (Degree Celsius)
ϕ_b	สัดส่วนของปริมาตรอนุภาคใน bulk (Particle volume fraction in bulk) (-)
$\phi_{\max}$	สัดส่วนปริมาตรของอนุภาคสูงสุดที่อัดตัว (Maximum particle volume fraction)

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ (ต่อ)

μ	ความหนืดของเพอมิเอท (Pa.s)
μm	ไมโครเมตร (Micrometer)
μ_p	ความหนืดของสารละลาย (Pa.s)
μ_w	ความหนืดของน้ำกรอง (Pa.s)
τ_w	ความเค้นเฉือน (Pa)
θ	ค่ามุมของทรงกลมบนชั้นเค้ก
~	ประมาณ
>	มากกว่า
<	น้อยกว่า
≥	มากกว่าหรือเท่ากับ
≤	น้อยกว่าหรือเท่ากับ