สารบัญ

		หน้า
กิตติกรรมประกาศ		ก
บทคัดย่อภาษาไทย		ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ		ค
สารบัญตาราง		ฉ
สารบัญภาพ		ช
คำสำคัญ		ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ		ฏ
บทที่ 1	บทนำ	
	1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
	1.2 วัตถุประสงค์	2
	1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
	1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
	1.5 กรอบแนวคิดของการวิจัย	3
บทที่ 2	ทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
	2.1 กลไกการสุกของผลไม้	7
	2.2 ระบบการหีบห่อภายใต้สภาพอากาศดัดแปลง	9
	2.3 แผ่นฟิล์มที่ก๊าซสามารถซึมผ่านได้	14
	2.4 พอลิเอทิลีน	25
	2.5 วิธีการทดสอบสมบัติของแผ่นฟิล์ม	28
	2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	32
บทที่ 3	วิธีการดำเนินการวิจัย	
	3.1 วัตถุดิบ	35
	3.2 ขั้นตอนการเตรียมส่วนผสม	36
	3.3 ขั้นตอนการผสมวัตถุดิบ	37
	3.4 ขั้นตอนการขึ้นรูปแผ่นฟิล์ม	38
	3.5 การทดสอบสมบัติของแผ่นฟิล์ม	42
บทที่ 4	ผลการวิจัยและอภิปรายผล	
	4.1 การกระจายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนตในเนื้อฟิล์ม	50

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.2 อิทธิพลของปริมาณ $CaCO_3$ และอัตราส่วนการยืดฟิล์มขณะขึ้นรูปต่อสมบัติความทนแรงดึง และการยืดตัวของฟิล์ม 52

4.3 อิทธิพลของปริมาณ $CaCO_3$ และอัตราส่วนการยืดฟิล์มขณะขึ้นรูปต่ออัตราการซึมผ่านของไอน้ำและอัตราการซึมผ่านของออกซิเจน 57

4.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายผลการทดลอง 65

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง 79

5.2 ข้อเสนอแนะ 80

บรรณานุกรม 84

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก การหาปริมาณค่าคลาดเคลื่อนจากการถดถอยเชิงเส้น 88

ภาคผนวก ข การใช้ประโยชน์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 90

ภาคผนวก ค มาตรฐานการทดสอบ 93

ประวัติและผลงานวิจัยที่สำคัญของนักวิจัย 105

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1 แสดงชนิดและสมบัติของพอลิเมอร์ที่นำมาใช้เป็นแผ่นฟิล์มสำหรับหีบห่อภายใต้สภาวะอากาศดัดแปลง 6

ตารางที่ 2.1 แสดงอัตราการซึมผ่านก๊าซของฟิล์ม ความเข้มข้นของก๊าซในหีบห่อและอายุการเก็บรักษาของผักและผลไม้ชนิดต่าง ๆ 10

ตารางที่ 2.2 แสดงชนิดและสมบัติของพอลิเมอร์ที่นำมาใช้เป็นแผ่นฟิล์มสำหรับหีบห่อภายใต้สภาวะอากาศดัดแปลง 13

ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบสมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดต่าง ๆ 26

ตารางที่ 3.1 แสดงสมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเกรด EL-Lene LD 1902FA 35

ตารางที่ 3.2 แสดงสมบัติของแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) เกรด Omyacarb 1T 36

ตารางที่ 3.3 แสดงจำนวนตัวอย่างและเงื่อนไขสภาวะการผลิตแผ่นฟิล์ม 42

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบสมบัติความทนแรงดึงและการยืดตัวของแผ่นฟิล์ม 53

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบอัตราการซึมผ่านของไอน้ำและอัตราการซึมผ่านของออกซิเจน 57

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าการเปรียบเทียบค่าสมบัติความทนแรงดึงตามแนว MD และ TD จากแบบจำลองคณิตศาสตร์และจากการทดลอง 72

ตารางที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบค่าสมบัติการยืดตัวของฟิล์มตามแนว MD และ TD จากแบบจำลองคณิตศาสตร์และจากการทดลอง 74

ตารางที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบอัตราการซึมผ่านของไอน้ำและออกซิเจนจากแบบจำลองคณิตศาสตร์และจากการทดลอง 76

ตารางที่ 4.6 สรุปค่าของตัวแปรที่ได้จากการคำนวณและค่า R^2 โดยโปรแกรม Excel 78

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 แสดงลักษณะการทำงานของระบบการหีบห่อภายใต้สภาวะอากาศดัดแปลง	4
รูปที่ 2.1 แสดงกระบวนการหายใจที่เกิดขึ้นในผลไม้	7
รูปที่ 2.2 แสดงการทำงานของระบบการหีบห่อภายใต้สภาวะอากาศดัดแปลง	9
รูปที่ 2.3 แสดงการเกิดรูพรุนบนแผ่นฟิล์มพอลิเอทิลีนหลังทำการดึงฟิล์ม	14
รูปที่ 2.4 แสดงวิธีการดึงฟิล์มตามแนวเครื่องจักร	15
รูปที่ 2.5 แสดงวิธีการดึงฟิล์มตามแนวขวางโดยใช้ตัวจับยึด	16
รูปที่ 2.6 แสดงวิธีการดึงฟิล์มโดยผ่านฟิล์มเข้าไปในลูกกลิ้ง	16
รูปที่ 2.7 แสดงวิธีการเป่าฟิล์ม	17
รูปที่ 2.8 วิธีการคอมปาวน์และการตัดเม็ดพลาสติกแบบเย็น	18
รูปที่ 2.9 สกรูเดี่ยว (Single screw)	19
รูปที่ 2.10 สกรูคู่ (Twin screw) พร้อมฟันเพิ่มเติมสำหรับการอัด	19
รูปที่ 2.11 เครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว (Single screw extruder)	21
รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะของเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่	22
รูปที่ 2.13 แสดงอุปกรณ์ของเครื่องอัดรีดชนิดเป่า (Blow film extruder)	24
รูปที่ 2.14 ดายไหลเวียน (Spiral mandrel die)	24
รูปที่ 2.15 แสดงลักษณะชิ้นงานตัวอย่างที่จะถูกนำไปทดสอบ	28
รูปที่ 2.16 กราฟการทดสอบแรงดึงระหว่างความเค้นกับความเครียด	29
รูปที่ 2.17 แผนภาพแสดงอุปกรณ์ของการวัดอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ	30
รูปที่ 2.18 แสดงลักษณะการวัดความสามารถการซึมผ่านของออกซิเจน	31
รูปที่ 2.19 แสดงองค์ประกอบกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	32
รูปที่ 3.1 แสดงการชั่งวัตถุดิบโดยตาชั่งที่มีความละเอียด 0.1 กิโลกรัม	36
รูปที่ 3.2 เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin screw extruder) รุ่น DSE 25	37
รูปที่ 3.3 ส่วนผสมเม็ดพลาสติกออกจากหัวดายและไหลผ่านอ่างน้ำเย็น	37
รูปที่ 3.4 เครื่องตัดเม็ดพลาสติกของบริษัท Brabender OHG Duisburg	38
รูปที่ 3.5 ตู้อบที่ใช้ในการอบเม็ดพลาสติกที่ผสมกันแล้ว (Compound)	39
รูปที่ 3.6 เครื่องอัดรีดแบบเป่า (Blow film extruder) รุ่น AH40	39
รูปที่ 3.7 แสดงแผงควบคุมขั้นตอนการปฏิบัติงานของเครื่องอัดรีดแบบเป่า รุ่น AH40	40
รูปที่ 3.8 แสดงฟิล์มพลาสติกขณะทำการเป่าฟิล์มด้วยเครื่องอัดรีดแบบเป่า	41

สารบัญภาพ(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.9 แผนภาพแสดงเส้นทางการผ่านของแผ่นฟิล์มที่เป่าได้ 41
รูปที่ 3.10 เครื่องทดสอบสมบัติความทนแรงดึงและสมบัติการยืดตัวของแผ่นฟิล์ม 43
รูปที่ 3.11 ชิ้นงานตัวอย่างก่อนที่จะนำเข้าเครื่องทดสอบอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ 44
รูปที่ 3.12 เครื่องทดสอบอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ 44
รูปที่ 3.13 เครื่องทดสอบอัตราการซึมผ่านของออกซิเจน 45
รูปที่ 3.14 หน้าจอแสดงผลการทดสอบการซึมผ่านของออกซิเจน 45
รูปที่ 3.15 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) รุ่น S-3000N 46
รูปที่ 3.16 การติดตัวอย่างไว้บนแท่นรองรับ (Stub) 47
รูปที่ 3.17 แสดงภาพขณะทำการเคลือบทองบนผิวของตัวอย่าง 47
รูปที่ 3.18 ชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านขั้นตอนการเคลือบทองแล้ว 48
รูปที่ 3.19 ตัวอย่างที่เคลือบทองติดบนแท่นเพื่อนำไปส่องด้วยกล้อง SEM 48
รูปที่ 3.20 นำตัวอย่างใส่เข้าเครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสร่องกราด 49
รูปที่ 3.21 คอมพิวเตอร์และอุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 49
รูปที่ 4.1 แสดงการกระจายตัวของ $CaCO_3$ ในเนื้อฟิล์มพอลิเอทิลีน 50
รูปที่ 4.2 แสดงการกระจายตัวของอนุภาค $CaCO_3$ 51
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละ $CaCO_3$ กับความทนแรงดึง
ของแผ่นฟิล์มที่ขนาดแรงดึงฟิล์มขณะขึ้นรูปต่าง ๆ 54
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละ $CaCO_3$ กับสมบัติการยืดตัว
ของแผ่นฟิล์มที่ขนาดแรงดึงฟิล์มขณะขึ้นรูปต่าง ๆ 55
รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงการขาดของฟิล์ม 56
รูปที่ 4.6 แสดงการจัดเรียงตัวของพอลิเอทิลีนหลังจากทำการดึงฟิล์มขณะขึ้นรูป 56
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ $CaCO_3$
กับอัตราการซึมผ่านไอน้ำที่แรงดึงฟิล์มขณะขึ้นรูปที่ขนาดต่าง ๆ 58
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ $CaCO_3$
กับอัตราการซึมผ่านของออกซิเจนที่แรงดึงฟิล์มขณะขึ้นรูปที่ขนาดต่าง ๆ 58
รูปที่ 4.9 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของก๊าซผ่านฟิล์มที่มีลักษณะรูพรุน 61

สารบัญภาพ(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.10 แสดงลักษณะรูพรุนของแผ่นฟิล์มที่เกิดบริเวณรอบ ๆผิวสัมผัสระหว่างอนุภาค $CaCO_3$ กับพอลิเอทิลีนหลังจากทำการดึงฟิล์มขณะขึ้นรูป ส่วนผสม $CaCO_3$ 10% ด้วยแรงดึงฟิล์ม 170% 62

รูปที่ 4.11 แสดงลักษณะรูพรุนของแผ่นฟิล์มที่เกิดบริเวณรอบ ๆผิวสัมผัสระหว่างอนุภาค $CaCO_3$ กับพอลิเอทิลีนหลังจากทำการดึงฟิล์มขณะขึ้นรูป, ส่วนผสม $CaCO_3$ 25% ด้วยแรงดึงฟิล์ม 135% 63

รูปที่ 4.12 ภาพถ่าย SEM แสดงบริเวณรอบ ๆผิวสัมผัสระหว่างอนุภาค $CaCO_3$ กับพอลิเอทิลีนของฟิล์มที่ผสม $CaCO_3$ 25% 64

รูปที่ 4.13 แสดงตารางที่ใช้ในการคำนวณหาแบบจำลองคณิตศาสตร์ 66

รูปที่ 4.14 แสดงสูตรและการคำนวณค่าที่ได้ลงในคอลัมน์ E แถวที่ 14 67

รูปที่ 4.15 แสดงสูตรและการคำนวณค่าที่ได้ลงในคอลัมน์ F แถวที 14 68

รูปที่ 4.16 แสดงสูตรและการคำนวณค่าที่ได้ลงใน F30 เพื่อหาผลรวมของ Error 69

รูปที่ 4.17 แสดงการเปิดคำสั่ง Solver ออกมาใช้งาน 70

รูปที่ 4.18 แสดงการใส่ค่าต่าง ๆ เพื่อทำการคำนวณหาค่าของตัวแปร a, b, c, d, e และ f 71

รูปที่ 4.19 ค่าของตัวแปรที่ได้จากคำสั่ง Solver 71

รูปที่ 4.20 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าสมบัติความทนแรงดึงจากแบบจำลองคณิตศาสตร์และจากการทดลอง 73

รูปที่ 4.21 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าสมบัติการยืดตัวของฟิล์มจากแบบจำลองคณิตศาสตร์และจากการทดลอง 75

รูปที่ 4.22 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำและออกซิเจนจากแบบจำลองคณิตศาสตร์และจากการทดลอง 77

รูปที่ 5.1 แสดงการสัมผัสของส่วนผสมที่ออกจากหัวดายผ่านเข้าอ่างน้ำเพื่อลดอุณหภูมิ 81

รูปที่ 5.2 ถังเก็บเม็ดคอมปาวน์ก่อนลำเลียงเข้าเครื่องอัดรีดชนิดเป่า 81

รูปที่ 5.3 เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ ใช้สำหรับผสมเม็ดคอมปาวน์ 82

รูปที่ 5.4 เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ภายหลังจากการนำถัง 1 และ 2 ออก 83

คำสำคัญ: พอลิเอทิลีน ฟิล์มที่มีรูพรุน แผ่นฟิล์มที่ก๊าซซึมผ่านได้

Keywords: Polyethylene, Porous film, Permeable film

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

δ	Stress (ความแค้น) คืออัตราส่วนแรงต่อพื้นที่ที่ถูกแรงกระทำ
ε	Strain (ความเครียด)
τ	Tortuosity คืออัตราส่วนของระยะทางที่โมเลกุลของก๊าซเคลื่อนที่จริงต่อความหนาของแผ่นฟิล์ม
A_o	area (พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน)
C_A	ความเข้มข้นของสาร A
$CaCO_3$	แคลเซียมคาร์บอเนต
D_{AB}	Diffusivity coefficient คือค่าคงที่ของการแพร่ของสาร A เข้าไปในตัวกลาง B
EVA	Ethylene vinyl acetate
F	Force (แรง) มีหน่วย ปอนด์ (lb_f)
J_A	Flux of specie A (ฟลักซ์ของสาร A) หมายถึงปริมาณสาร A ที่แพร่ผ่านหนึ่งหน่วยพื้ที่ใด ๆในหนึ่งหน่วยเวลา
L_o	ระยะความยาวเริ่มต้นของชิ้นงาน
L	ระยะความยาวสุดท้ายของชิ้นงาน
LDPE	Low density polyethylene (พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ)
MAP	Modified atmosphere pakaging
MD	Machine direction (ทิศทางตามแนวเครื่องจักร)
N	จำนานโมลของก๊าซมีหน่วยเป็นโมล
OTR	Oxygen transmission rate (อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน) มีหน่วยเป็น ($cc/m^2.day$)
P	ความดันของก๊าซมีหน่วยเป็น พาสคาล (Palscal, Pa)
ΔP	คือความแตกต่างระหว่างความดันระหว่างเส้นทางการเคลื่อนที่ของก๊าซ
PP	Polypropylene
PVC	Polyvinylchloride

R	ค่าคงที่ของก๊าซ
SEM	Scanning electron microscope (กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด)
T	อุณหภูมิ
TD	Transverse direction (ทิศทางตามแนวขวาง)
WVTR	Water vapor transmission rate (อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ)มีหน่วยเป็น ($g/m^2.day$)
Z	ความหนาของแผ่นฟิล์ม