**สารบัญ**


| | หน้า |
|---|---|
| สารบัญ | (6) |
| รายการตาราง | (11) |
| รายการภาพประกอบ | (13) |
| บทที่ | |
| 1 บทนำ | 1 |
| บทนำต้นเรื่อง | 1 |
| ทฤษฎีและหลักการ | 3 |
| 1.1 พอลิเมอร์ | 3 |
| 1.2 ยางธรรมชาติ | 3 |
| 1.1.1 ยางแท่ง | 5 |
| 1.2.2 คุณสมบัติของยางธรรมชาติ | 9 |
| 1.2.3 ยางรีเคลม | 12 |
| 1.3 พอลิโพรพิลีน | 12 |
| 1.4 เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ | 14 |
| 1.5 การผสมยาง | 15 |
| 1.5.1 วิธีการผสม | 15 |
| 1.5.2 สารเคมีที่ใช้ในการผสม | 17 |
| 1.5.2.1 สารกระตุ้น | 17 |
| 1.5.2.2 สารตัวเร่ง | 17 |
| 1.5.2.3 สารป้องกันการเสื่อม | 17 |
| 1.5.2.4 สารตัวเติม | 19 |
| 1.5.2.5 สารวัลคาไนซ์ | 19 |
| การตรวจเอกสาร | 21 |
| วัตถุประสงค์ | 30 |
| ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ | 31 |
| 2 สารเคมี อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง | 32 |
| 2.1 สารเคมี | 32 |

2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ 33
2.3 วิธีการทดลอง 34
2.3.1 การสกัดสารยับยั้งออกจากสไตรีนมอนอเมอร์ 34

**สารบัญ (ต่อ)**

หน้า

2.3.2 การสังเคราะห์ยางธรรมชาติที่ปรับปรุงด้วยพอลิสไตรีน (SNR) 35
2.3.3 การออกสูตรเบื้องต้นเพื่อหาปริมาณสารที่เหมาะสม 36
2.3.3.1 การออกสูตรเบื้องต้นเพื่อหาปริมาณเนื้อสารหลักที่เหมาะสม 36
2.3.3.2 การออกสูตรเพื่อหาปริมาณยางรีเคลมที่เหมาะสม 37
2.3.3.3 การออกสูตรเพื่อหาปริมาณเขม่าดำที่เหมาะสม 38
2.3.3.4 การออกสูตรเพื่อหาปริมาณ SNR ที่เหมาะสม 39
2.3.3.5 การออกสูตรเพื่อหาปริมาณกำมะถันที่เหมาะสม 40
2.3.3.6 การออกสูตรเพื่อหาปริมาณ DPPD ที่เหมาะสม 41
2.3.4 การทดสอบคุณสมบัติการเชื่อมขวางและคุณสมบัติเชิงกลของของผสม 42
3 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง 45
3.1 การวิเคราะห์ผลการทดสอบคุณสมบัติการเชื่อมขวางและการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลเมื่อแปรผันปริมาณเนื้อสารหลัก 45
3.1.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติการเชื่อมขวาง (การหาค่า cure time และ scorch time) เมื่อแปรผันปริมาณเนื้อสารหลัก 45
3.1.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติความทนทานต่อแรงฉีกขาด (tear strength) เมื่อแปรผันปริมาณเนื้อสารหลัก 46
3.1.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติความกระเด้งตัว (resilience test) เมื่อแปรผันปริมาณเนื้อสารหลัก 46
3.1.4 ผลการทดสอบคุณสมบัติด้านความแข็ง (hardness test) เมื่อแปรผันปริมาณเนื้อสารหลัก 47
3.1.5 ผลการทดสอบคุณสมบัติความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) เมื่อแปรผันปริมาณเนื้อสารหลัก 47
3.1.6 ผลการคำนวณความสามารถในการรับพลังงานได้ (toughness) เมื่อแปรผันปริมาณเนื้อสารหลัก 48

3.2 การวิเคราะห์ผลการทดสอบคุณสมบัติการเชื่อมขวางและการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลเมื่อแปรผันปริมาณยางรีเคลม 49
3.2.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติการเชื่อมขวาง(การหาค่า cure time และ scorch time) เมื่อแปรผันปริมาณยางรีเคลม 49
3.2.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติความทนทานต่อแรงฉีกขาด (tear strength) เมื่อแปรผันปริมาณยางรีเคลม 50

**สารบัญ (ต่อ)**

หน้า

3.2.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติความกระเด้งตัว (resilience test) เมื่อแปรผันปริมาณยางรีเคลม 50
3.2.4 ผลการทดสอบคุณสมบัติด้านความแข็ง (hardness test) เมื่อแปรผันปริมาณยางรีเคลม 51
3.2.5 ผลการทดสอบคุณสมบัติความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) เมื่อแปรผันปริมาณยางรีเคลม 51
3.2.6 ผลการคำนวณความสามารถในการรับพลังงานได้ (toughness) เมื่อแปรผันปริมาณยางรีเคลม 52
3.3 การวิเคราะห์ผลการทดสอบคุณสมบัติการเชื่อมขวางและการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลเมื่อแปรผันปริมาณเขม่าดำ 53
3.3.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติการเชื่อมขวาง (การหาค่า cure time และ scorch time) เมื่อแปรผันปริมาณเขม่าดำ 53
3.3.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติความทนทานต่อแรงฉีกขาด (tear strength) เมื่อแปรผันปริมาณเขม่าดำ 53
3.3.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติความกระเด้งตัว (resilience test) เมื่อแปรผันปริมาณเขม่าดำ 54
3.3.4 ผลการทดสอบคุณสมบัติด้านความแข็ง (hardness test) เมื่อแปรผันปริมาณเขม่าดำ 55
3.3.5 ผลการทดสอบคุณสมบัติความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) และผลการคำนวณความสามารถในการรับพลังงานได้ (toughness) เมื่อแปรผันปริมาณเขม่าดำ 55

3.4 การวิเคราะห์ผลการทดสอบคุณสมบัติการเชื่อมขวางและการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลเมื่อแปรผันปริมาณ SNR 57
3.4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติการเชื่อมขวาง(การหาค่า cure time และ scorch time) เมื่อแปรผันปริมาณ SNR 57
3.4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติความทนทานต่อแรงฉีกขาด (tear strength) เมื่อแปรผันปริมาณ SNR 57

**สารบัญ (ต่อ)**

หน้า

3.4.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติด้านความแข็ง (hardness test) และผลการทดสอบคุณสมบัติความกระเด้งตัว (resilience test) เมื่อแปรผันปริมาณ SNR 58
3.4.4 ผลการทดสอบคุณสมบัติความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) เมื่อแปรผันปริมาณ SNR 59
3.4.5 ผลการคำนวณความสามารถในการรับพลังงานได้ (toughness) เมื่อแปรผันปริมาณ SNR 59
3.4.6 การทดสอบคุณสมบัติทางสัณฐานวิทยา (morphology test) เมื่อแปรผันปริมาณ SNR 60
3.5 การวิเคราะห์ผลการทดสอบคุณสมบัติการเชื่อมขวางและการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลเมื่อแปรผันปริมาณกำมะถัน 61
3.5.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติการเชื่อมขวาง (การหาค่า cure time และ scorch time) เมื่อแปรผันปริมาณกำมะถัน 61
3.5.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติความทนทานต่อแรงฉีกขาด (tear strength) เมื่อแปรผันปริมาณกำมะถัน 61
3.5.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติด้านความแข็ง (hardness test) และผลการทดสอบคุณสมบัติความกระเด้งตัว (resilience test) เมื่อแปรผันปริมาณกำมะถัน 62

3.5.4 ผลการทดสอบคุณสมบัติความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) เมื่อแปรผันปริมาณกำมะถัน 63
3.5.5 ผลการคำนวณความสามารถในการรับพลังงานได้ (toughness) เมื่อแปรผันปริมาณกำมะถัน 63
3.5.6 ผลการทดสอบคุณสมบัติความทนทานต่อการหักงอ (flex cracking resistance) เมื่อแปรผันปริมาณกำมะถัน 64
3.6 การวิเคราะห์ผลการทดสอบคุณสมบัติการเชื่อมขวางและการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลเมื่อแปรผันปริมาณ DPPD 65
3.6.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติการเชื่อมขวาง (การหาค่า cure time และ scorch time) เมื่อแปรผันปริมาณ DPPD 65

**สารบัญ (ต่อ)**

หน้า

3.6.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติความกระเด้งตัว (resilience test) และผลการทดสอบคุณสมบัติด้านความแข็ง (hardness test) เมื่อแปรผันปริมาณ DPPD 65
3.6.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) และผลการทดสอบคุณสมบัติความทนทานต่อแรงฉีกขาด (tear strength) เมื่อแปรผันปริมาณ DPPD 66
3.6.4 ผลการคำนวณความสามารถในการรับพลังงานได้ (toughness) เมื่อแปรผันปริมาณ DPPD 67
3.6.5 การทดสอบการเสื่อมสภาพของยางในสภาวะอากาศและโอโซน 68
3.6.5.1 การทดสอบด้วยสภาวะอากาศ (weathering test) 68
3.6.5.2 การทดสอบด้วยสภาวะโอโซน (ozone test) 69
4 บทสรุป 71
4.1 สรุปผลการทดลองเมื่อแปรผันปริมาณเนื้อสารหลัก 71
4.2 สรุปผลการทดลองเมื่อแปรผันปริมาณยางรีเคลม 71
4.3 สรุปผลการทดลองเมื่อแปรผันปริมาณเขม่าดำ 71

4.4 สรุปผลการทดลองเมื่อแปรผันปริมาณ SNR 71
4.5 สรุปผลการทดลองเมื่อแปรผันปริมาณกำมะถัน 71
4.6 สรุปผลการทดลองเมื่อแปรผันปริมาณ DPPD 72
บรรณานุกรม 73
ภาคผนวก 77
ก วิธีการใช้งานเครื่องมือ 77
ข การคำนวณปริมาณสารในการผสม 81
ค ข้อมูลจากผลการทดสอบคุณสมบัติการเชื่อมโยงและคุณสมบัติเชิงกลจากการแปรผันสารเคมีปริมาณต่างๆ 83
ง มาตรฐาน ASTM D 430-95 87
จ ตัวอย่างการคำนวณความสามารถในการรับพลังงาน (toughness) 88
ประวัติผู้เขียน 90

**รายการตาราง**

ตาราง หน้า
1 มาตรฐานการจัดชั้นคุณภาพของยางแท่งที่ผลิตในประเทศไทย 6
2 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตยางแท่งที่ผลิตในประเทศไทย 7
3 ชนิด ตัวอย่าง และหน้าที่ของสารตัวเร่งที่เป็นสารประกอบอินทรีย์ 18
4 คุณสมบัติเชิงกลของ untreated PP/NR และ ultrasonically treated PP/NR 26
5 อัตราส่วนของสารเคมีที่ใช้ในการเตรียม SNR 35
6 การออกสูตรโดยการแปรผันปริมาณเนื้อสารหลัก 36
7 การออกสูตรโดยการแปรผันปริมาณยางรีเคลม 37
8 การออกสูตรโดยการแปรผันปริมาณเขม่าดำ 38
9 การออกสูตรโดยการแปรผันปริมาณ SNR 39
10 การออกสูตรโดยการแปรผันปริมาณกำมะถัน 40
11 การออกสูตรโดยการแปรผันปริมาณ DPPD 41
12 ค่า toughness กับการแปรผันปริมาณเนื้อสารหลัก (binder) 48

13 ค่า toughness กับการแปรผันปริมาณยางรีเคลม 52
14 ค่า toughness กับการแปรผันปริมาณเขม่าดำ 56
15 ค่า toughness กับการแปรผันปริมาณ SNR 60
16 ค่า toughness กับการแปรผันปริมาณกำมะถัน 64
17 ค่าความทนทานต่อการหักงอกับการแปรผันปริมาณกำมะถัน 64
18 ค่า toughness กับการแปรผันปริมาณ DPPD 67
19 ผลการเปรียบเทียบความทนทานต่อแรงดึงก่อนและหลังทดสอบการเสื่อมด้วย
สภาวะอากาศ 68
20 ความทนทานต่อโอโซนกับการแปรผันปริมาณ DPPD 69
21 สรุปองค์ประกอบของสูตรที่เหมาะสมที่ได้จากการแปรผันปริมาณสารแต่ละชนิด 72
22 ปริมาณสารที่ใช้ในการผสม 81
23 การหาค่า volume of compound 81
24 การหาค่า total specific gravity, total mass of brabender และค่า multiplying factor 82
25 น้ำหนักของสารสำหรับการผสม 82
26 ผลการทดลองจากการทดสอบคุณสมบัติการเชื่อมขวางและการทดสอบคุณสมบัติเชิงกล
จากการแปรผันปริมาณยางธรรมชาติ 83
27 ผลการทดลองการทดสอบคุณสมบัติการเชื่อมโยงและการทดสอบคุณสมบัติเชิงกล
จากการแปรผันปริมาณยางรีเคลม 84

**รายการตาราง (ต่อ)**

ตาราง หน้า

28 ผลการทดลองการทดสอบคุณสมบัติการเชื่อมโยงและการทดสอบคุณสมบัติเชิงกล
จากการแปรผันปริมาณเขม่าดำ 84
29 ผลการทดลองการทดสอบคุณสมบัติการเชื่อมโยงและการทดสอบคุณสมบัติเชิงกล
จากการแปรผันปริมาณ SNR 85
30 ผลการทดลองการทดสอบคุณสมบัติการเชื่อมโยงและการทดสอบคุณสมบัติเชิงกล
จากการแปรผันปริมาณกำมะถัน 85
31 ผลการทดลองการทดสอบคุณสมบัติการเชื่อมโยงและการทดสอบคุณสมบัติเชิงกล
จากการแปรผันปริมาณ DPPD 86
32 Evaluation of De Mattia Bend Flexing Specimens 87

**รายการภาพประกอบ**


| ภาพประกอบ | หน้า |
|---|---|
| 1 สูตรโครงสร้างยางธรรมชาติ | 4 |
| 2 ขั้นตอนการผลิตยางแท่ง | 6 |
| 3 ขั้นตอนการผลิตยางแท่งจากน้ำยาง | 7 |
| 4 ขั้นตอนการผลิตยางแท่งจากก้อนยางจับตัว | 8 |
| 5 ขั้นตอนการผลิตยางแท่งหลังอบแห้ง | 8 |

6 โครงสร้างของ Isotactic polypropylene 13 7
โครงสร้างของ Syndiotactic polypropylene 13
8 โครงสร้างของ Atactic polypropylene 14
9 สัณฐานวิทยาของของผสม O-TPV 15
10 โครงสร้างการเชื่อมโยงแบบต่างๆ 20
11 รอยแตกที่ผิวหน้าของของผสม PP/NR (80/20) 23
12 ลักษณะของผลิตภัณฑ์ delineator posts ในท้องตลาด 27
13 ลักษณะของ traffic delineator ตามสิทธิบัตรของสหรัฐอเมริกาเลขที่ 6,014,941 29
14 การชนอุปกรณ์ตามการทดสอบของ NCHRP-350 30
15 ปฏิกรณ์สำหรับเตรียม SNR 35
16 พื้นที่ใต้กราฟระหว่าง stress กับ strain 43
17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า cure time และค่า scorch time กับปริมาณยางธรรมชาติ 45
18 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติความทนทานต่อแรงฉีกขาดกับปริมาณยางธรรมชาติ 46
19 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเชิงกลกับปริมาณยางธรรมชาติ 47
20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนทานต่อแรงดึงกับปริมาณยางธรรมชาติและ
พอลิโพรพิลีน 48
21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า cure time และค่า scorch time กับปริมาณยางรีเคลม 49
22 ความสัมพันธ์ระหว่างความทนทานต่อแรงฉีกขาดกับปริมาณยางรีเคลม 50
23 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเชิงกลกับปริมาณยางรีเคลม 51
24 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติความทนทานต่อแรงดึงกับปริมาณยางรีเคลม 52
25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า cure time และค่า scorch time กับปริมาณเขม่าดำ 53
26 ความสัมพันธ์ระหว่างความทนทานต่อแรงฉีกขาดกับปริมาณเขม่าดำ 54
27 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเชิงกลกับปริมาณเขม่าดำ 54
28 ลักษณะพื้นผิวของเขม่าดำ 55
29 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติความทนทานต่อแรงฉีกขาดกับปริมาณเขม่าดำ 56

**รายการภาพประกอบ (ต่อ)**

ภาพประกอบ หน้า
31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า cure time และค่า scorch time กับปริมาณ SNR 57
32 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติความทนทานต่อแรงฉีกขาดกับปริมาณ SNR 58

33 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเชิงกลกับปริมาณ SNR 59
34 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนทานต่อแรงดึงกับปริมาณ SNR 59
35 ผิวหน้าที่แตกหักที่เติม (a) SNR 0 phr และ (b) SNR 5 phr จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยาย 3000 เท่า 60
36 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า cure time และค่า scorch time กับปริมาณกำมะถัน 61
37 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติความทนทานต่อแรงฉีกขาดกับปริมาณกำมะถัน 62
38 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเชิงกลกับปริมาณกำมะถัน 62
39 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติความทนทานต่อแรงดึงกับปริมาณกำมะถัน 63
40 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า cure time และค่า scorch time กับปริมาณ DPPD 65
41 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า hardness และ resilience กับปริมาณ DPPD 66
42 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติความทนทานต่อแรงดึงกับปริมาณ DPPD 66
43 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติความทนทานต่อแรงฉีกขาดกับปริมาณ DPPD 67
44 กราฟเปรียบเทียบค่าความทนทานต่อแรงดึงก่อนและหลังจากการทดสอบการเสื่อมสภาพด้วยสภาวะอากาศเมื่อแปรผันปริมาณ DPPD 69
45 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง (load) กับระยะยืดของสูตร NR/PP/RR (30/45/25) 88
46 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง stress กับ strain ของสูตร NR/PP/RR (30/45/25) 89