สารบาญ

หน้า

บทคัดย่อ..... (3)

ABSTRACT..... (4)

กิตติกรรมประกาศ..... (5)

สารบาญ..... (6)

รายการตาราง..... (9)

รายการรูป..... (12)

บทที่

1. บทนำ..... 1

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา..... 1

1.2 วัตถุประสงค์..... 2

1.3 ขอบเขตงานวิจัย..... 2

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 3

2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 4

2.1 ยางธรรมชาติ..... 4

2.1.1 โครงสร้างทางเคมี..... 4

2.1.2 สมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติวัลคาไนซ์..... 5

2.2 ยางบิวทาไดอีน..... 7

2.2.1 โครงสร้างทางเคมี..... 7

2.2.2 สมบัติทั่วไปของยางบิวทาไดอีน..... 9

2.3 ยางอีพีดีเอ็ม..... 10

2.3.1 โครงสร้างทางเคมี..... 10

2.3.2 สมบัติทั่วไปของยางอีพีดีเอ็ม..... 12

2.4 พอลิเมอร์เบลนด์..... 14

2.4.1 การเตรียมยางเบลนด์..... 14

2.4.2 ความเข้ากันได้ของยางเบลนด์..... 15

2.4.2.1 ความเข้ากันได้ทางความหนืด..... 15

2.4.2.2 ความเข้ากันได้ทางเทอร์โมไดนามิกส์..... 17

สารบาญ (ต่อ)

หน้า

2.4.2.3 ความเข้ากันได้ของอัตราการวัลคาไนซ์..... 20

2.4.3 การกระจายตัวของสารเคมีในยางเบลนด์..... 20

2.4.3.1 การกระจายตัวของสารตัวเติม..... 20

2.4.3.2 การกระจายตัวของสารวัลคาไนซ์..... 21

2.4.3.3 การกระจายตัวของความหนาแน่นของการเชื่อมโยง..... 22

3 . วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย..... 23

3.1 วัสดุ..... 23

3.2 อุปกรณ์..... 26

3.3 วิธีการวิจัย..... 32

3.3.1 อิทธิพลของการเบลนด์ยางดิบชนิดต่างๆ ต่อสมบัติการไหล..... 32

3.3.2 การศึกษาสมบัติการวัลคาไนซ์และสมบัติเชิงกลของยางชนิดต่างๆ..... 33

3.3.2.1 การเตรียมคอมปาวด์ยางแต่ละชนิด..... 33

3.3.2.2 การทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์..... 34

3.3.2.3 การทดสอบหาพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยา
การวัลคาไนซ์ของยางแต่ละชนิด..... 35

3.3.3 ศึกษาอิทธิพลของการทำการวัลคาไนซ์บางส่วน (Precuring)
ต่อสมบัติของยางเบลนด์..... 35

3.3.3.1 การเตรียมยางเบลนด์แบบปกติ(Conventional)..... 35

3.3.3.2 การเตรียมยางเบลนด์แบบทำวัลคาไนซ์บางส่วน
แบบสแตติก (Static precuring technique)..... 37

3.3.3.3 การวัลคาไนซ์บางส่วนของยางอีพีดีเอ็ม
โดยเทคนิคไดนามิกส์ (Dynamic precuring technique)..... 39

3.3.4 การเตรียมชิ้นทดสอบ..... 40

3.3.5 การทดสอบสมบัติเชิงกล..... 40

3.3.5.1 การทดสอบสมบัติด้านการดึง..... 40

3.3.5.2 การทดสอบความทนทานต่อการหักงอแบบ De Mattia..... 42

3.3.5.3 การทดสอบความร้อนสะสมในยาง..... 42

3.3.5.4 การทดสอบความทนทานต่อการสึกหรอแบบอาครอน..... 43

สารบาญ (ต่อ)

หน้า

3.3.5.5 การทดสอบความต้านทานต่อโอโซน 44
3.3.6 ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยง..... 44
4. ผลและวิจารณ์ผลการวิจัย..... 45
4.1 สมบัติการไหลของยางดิบ..... 45
4.1.1 ความหนืดมูนนีของยางดิบ..... 45
4.1.2 สมบัติการไหลทดสอบด้วยเครื่องคาปิลลารีรีโอมิเตอร์..... 49
4.2 สมบัติการวัลคาไนซ์และสมบัติเชิงกล..... 59
4.2.1 สมบัติการวัลคาไนซ์และสมบัติเชิงกลของยางชนิดต่างๆ..... 59
4.2.2 การทดสอบหาพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์..... 66
4.2.3 สมบัติเชิงกลของยางแต่ละชนิด..... 76
4.3 ศึกษาอิทธิพลของการทำการวัลคาไนซ์บางส่วนต่อสมบัติของยางเบลนด์..... 85
4.3.1 การเบลนด์โดยใช้เทคนิคการวัลคาไนซ์บางส่วนแบบสแตติก..... 85
4.3.2 การเบลนด์โดยใช้เทคนิคการวัลคาไนซ์บางส่วนแบบไดนามิกส์ 87
4.4 อิทธิพลของเทคนิคการเบลนด์ต่อลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์..... 94
4.5 เปรียบเทียบอิทธิพลของเทคนิคการเบลนด์แบบต่างๆ
ต่อสมบัติเชิงกลของยางวัลคาไนซ์..... 101
4.5.1 สมบัติความต้านทานต่อแรงดึง..... 101
4.5.2 การทดสอบความทนทานต่อการหักงอแบบ De Mattia 105
4.5.3 การทดสอบความทนทานต่อการสึกหรอแบบอาครอน..... 106
4.5.4 การทดสอบความร้อนสะสมในยาง..... 108
4.5.5 ความหนาแน่นพันธะเชื่อมโยง..... 109
4.5.6 การทดสอบความต้านทานต่อโอโซนแบบพลวัติ 111
5. สรุปผลการวิจัย..... 114
5.1 สรุป..... 114
5.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป..... 117
บรรณานุกรม..... 118
ภาคผนวก 1 123
ภาคผนวก 2 125

รายการตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	โครงสร้างของยางบิวทาไดอีน	8
3.1	สมบัติพื้นฐานของยางบิวทาไดอีน	23
3.2	สมบัติพื้นฐานของยางอีพีดีเอ็ม	24
3.3	สูตรที่ใช้ในการเตรียมคอมปาวด์ยางแต่ละชนิด	33
3.4	ลำดับขั้นตอนการผสมยางกับสารเคมี	34
3.5	สูตรที่ใช้ในการเตรียมคอมปาวด์	36
3.6	ลำดับขั้นตอนการผสมยางกับสารเคมี	37
3.7	สูตรที่ใช้ในการเตรียมคอมปาวด์ยางอีพีดีเอ็ม	38
3.8	"Running in" และระยะเดินที่ต้องทดสอบจริง	43
3.9	สูตรยางมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบความต้านทานต่อการสึกหรอ	43
4.1	ค่าความหนืดมูนนีของยางแต่ละชนิด	45
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏของยางแต่ละชนิด	50
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนปรากฏอัตราเฉือนปรากฏของยางแต่ละชนิด	52
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏของยางเบลนด์ NR/BR/EPDM เมื่อแปรปริมาณยางอีพีดีเอ็ม 5, 10, 20, 30 และ 40%	54
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนกับอัตราเฉือนปรากฏของยางเบลนด์ NR/BR/EPDM เมื่อแปรปริมาณยางอีพีดีเอ็ม 5, 10, 20, 30 และ 40%	56
4.6	สมบัติการวัลคาไนซ์ของยางแต่ละชนิดที่อุณหภูมิ 150 °C	61
4.7	ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติที่อุณหภูมิ 150 ถึง180 องศาเซลเซียส	68
4.8	ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางบิวทาไดอีนที่อุณหภูมิ 150 ถึง 180 องศาเซลเซียส	70
4.9	ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางอีพีดีเอ็มที่อุณหภูมิ 150 ถึง 180 องศาเซลเซียส	71
4.10	ค่าคงที่อัตราการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติ ยางบิวทาไดอีน และยางอีพีดีเอ็ม	75
4.11	ค่าพลังงานกระตุ้นในการวัลคาไนซ์	76
4.12	เปรียบเทียบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงของยางแต่ละชนิดทั้งก่อนและหลังการบ่มเร่ง	77

รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4.13	ความสามารถในการยืดจนขาดของยางแต่ละชนิดทั้งก่อนและหลังการบ่มเร่ง	78
4.14	ค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 300% ของยางแต่ละชนิดทั้งก่อนและหลังบ่มเร่ง	80
4.15	ความต้านทานต่อการหักงอของยางชนิดต่างๆ	81
4.16	ความต้านทานต่อการสึกหรอของยางชนิดต่างๆ	82
4.17	ความร้อนสะสมของยางชนิดต่างๆ	84
4.18	สมบัติด้านการดึงของยางเบลนด์ NR/EPDM ที่เวลาการอบต่างๆ	85
4.19	เปอร์เซ็นต์ของค่าทอร์กสูงสุดที่เวลาต่างๆ	88
4.20	ความต้านทานต่อแรงดึงของยางเบลนด์ NR/BR/EPDM ที่ทำการวัลคาไนซ์ยางอีพีดีเอ็มบางส่วนด้วยเครื่องบราเบนเดอร์ พลาสติคอร์เดอร์ที่เปอร์เซ็นต์ของค่าทอร์กสูงสุดต่างๆ	89
4.21	ความสามารถในการยืดจนขาดของยางเบลนด์ NR/BR/EPDM ที่ทำการวัลคาไนซ์ยางอีพีดีเอ็มบางส่วนด้วยเครื่องบราเบนเดอร์ พลาสติคอร์เดอร์ที่เปอร์เซ็นต์ของค่าทอร์กสูงสุดต่างๆ	91
4.22	ค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 300% ของยางเบลนด์ NR/BR/EPDM ที่ทำการวัลคาไนซ์ยางอีพีดีเอ็มบางส่วนด้วยเครื่องบราเบนเดอร์ พลาสติคอร์เดอร์ที่เปอร์เซ็นต์ของค่าทอร์กสูงสุดต่างๆ	92
4.23	อิทธิพลของเทคนิคการเบลนด์ต่อลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ NR/BR/EPDM	96
4.24	ความต้านทานต่อแรงดึงของยางเบลนด์ NR/BR/EPDM ด้วยเทคนิคแบบต่างๆ	101
4.25	ความสามารถในการยืดจนขาดของยางเบลนด์ NR/BR/EPDM ด้วยเทคนิคแบบต่างๆ	102
4.26	ค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 300% ของยางเบลนด์ NR/BR/EPDM ด้วยเทคนิคแบบต่างๆ	104
4.27	ความต้านทานต่อการหักงอของยางเบลนด์ NR/BR/EPDM ด้วยเทคนิคแบบต่างๆ	105
4.28	ความต้านทานต่อการสึกหรอของยางเบลนด์ NR/BR/EPDM ด้วยเทคนิคแบบต่างๆ	106
4.29	ค่าความร้อนสะสมของยางเบลนด์ NR/BR/EPDM ด้วยเทคนิคแบบต่างๆ	108
4.30	ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงของยางเบลนด์ NR/BR/EPDM ด้วยเทคนิคแบบต่างๆ	110
4.31	สมบัติด้านความต้านทานต่อโอโซน	112

รายการรูป

รูปที่		หน้า
2.1	โครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติ	4
2.2	สูตรโครงสร้างโมเลกุลของยางบิวทาไดอีน	8
2.3	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของไวนิลและอุณหภูมิคล้ายแก้ว(Tg)	9
2.4	สูตรโครงสร้าง EPM	11
2.5	สูตรโครงสร้างของไดอีนที่มีอยู่ในยางอีพีดีเอ็ม	11
2.6	ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์	16
2.7	เฟสไดอะแกรมของการผสมแบบต่างๆ	18
2.8	พฤติกรรมการแยกเฟสของการเบลนด์พอลิสไตรีนกับพอลิคาร์บอเนต	19
3.1	เครื่องผสมสองลูกกลิ้ง	26
3.2	เครื่องรีโอมิเตอร์แบบแผ่นหมุน	26
3.3	เครื่องบราเบนเดอร์พลาสติคอร์เดอร์	27
3.4	เครื่องอัดเบ้า	28
3.5	เครื่องทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง	28
3.6	เครื่องรีโอมิเตอร์แบบคาปิลลารี่	29
3.7	เครื่องมูนนี่วิสโคมิเตอร์	30
3.8	เครื่องทดสอบความทนทานต่อการหักงอ	30
3.9	เครื่องกู๊ดริชเฟลกโซมิเตอร์	31
3.10	เครื่องทดสอบความทนทานต่อการสึกหรอ	31
4.1	ค่าความหนืดมูนนี่ของยางดิบ	45
4.2	ความหนืดมูนนี่ของยางดิบที่เวลาการบดต่างๆ	46
4.3	กลไกปฏิกิริยาการบดยาง	47
4.4	การแตกของพันธะขณะบดยางธรรมชาติ	47
4.5	ความหนืดของยางเบลนด์ NR/BR/EPDM ที่ปริมาณอีพีดีเอ็มต่างๆ	48
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏของยางแต่ละชนิด	51
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏของยางแต่ละชนิด	53

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏ ของยางเบลนด์ระหว่าง NR/BR/EPDM ที่อัตราส่วนต่างๆ 55

4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏ ของยางเบลนด์ระหว่าง NR/BR/EPDM ที่อัตราส่วนต่างๆ 57

4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนปรากฏกับปริมาณของยางอีพีดีเอ็ม ที่อัตราเฉือน 10, 25 และ 50 s^{-1} 58

4.11 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางชนิดต่างๆที่อุณหภูมิ 150 °C 59

4.12 การขาดของสายโซ่ที่เชื่อมโยงพันธะแบบโพลิซัลฟิดิก 60

4.13 ค่า M_L และ M_H ของยางชนิดต่างๆ ที่อุณหภูมิ 150 °C 61

4.14 M_H- M_L ของยาง NR, BR และ EPDM ที่อุณหภูมิ 150 °C 62

4.15 เวลาในการสกอชของยางแต่ละชนิดที่อุณหภูมิ 150 °C 64

4.16 เวลาการวัลคาไนซ์ของยางแต่ละชนิดที่อุณหภูมิ 150 °C 65

4.17 ดัชนีความเร็วในการวัลคาไนซ์ (cure rate index, CRI) ของยางแต่ละชนิด 66

4.18 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติที่อุณหภูมิต่างๆ 67

4.19 ปฏิกิริยา desulfuration และ decomposition ของ pendent group และพันธะเชื่อมโยงที่เกิดขึ้น 68

4.20 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางบิวทาไดอีนที่อุณหภูมิต่างๆ 69

4.21 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางอีพีดีเอ็มที่อุณหภูมิต่างๆ 70

4.22 Fractional modulus (K) ของยางธรรมชาติ 72

4.23 Fractional modulus (K) ของยางบิวทาไดอีน 73

4.24 Fractional modulus (K) ของยางอีพีดีเอ็ม 73

4.25 Fractional modulus (K) ของยางแต่ละชนิดที่อุณหภูมิ 150 °C 74

4.26 ความสัมพันธ์ระหว่าง log k กับส่วนกลับของอุณหภูมิสัมบูรณ์ 75

4.27 ความต้านทานต่อแรงดึงของยางแต่ละชนิด 77

4.28 ความสามารถในการยืดจนขาดยางแต่ละชนิด 79

4.29 ค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 300% ของยางแต่ละชนิด 80

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.30 ค่าความต้านทานต่อการหักงอของยางแต่ละชนิด..... 81
4.31 ความต้านทานต่อการสึกหรอของยางแต่ละชนิด..... 83
4.32 ค่าความร้อนสะสมของยางแต่ละชนิด..... 84
4.33 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของยางเบลนด์ระหว่าง NR/EPDM ที่ทำการวัลคาไนซ์ยางอีพีดีเอ็มบางส่วนแบบสแตติก..... 86
4.34 ค่าระยะยืดของยางเบลนด์ระหว่าง NR/EPDM ที่ทำการวัลคาไนซ์ยางอีพีดีเอ็มบางส่วน..... 86
4.35 ค่า 300% โมดูลัสของยางเบลนด์ระหว่าง NR/EPDM ที่ทำการวัลคาไนซ์ยางอีพีดีเอ็มบางส่วน..... 87
4.36 ค่าทอร์กจากเครื่องบราเบนเดอร์ พลาสติคอร์เดอร์..... 88
4.37 ความต้านทานต่อแรงดึงของยางเบลนด์เมื่อทำการวัลคาไนซ์ยางอีพีดีเอ็มบางส่วนด้วยเครื่องบราเบนเดอร์ พลาสติคอร์เดอร์..... 90
4.38 ความสามารถในการยืดของยางเบลนด์เมื่อทำการวัลคาไนซ์ยางอีพีดีเอ็มบางส่วนด้วยเครื่องบราเบนเดอร์ พลาสติคอร์เดอร์..... 91
4.39 ค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 300%ของยางเบลนด์แบบไดนามิกส์..... 93
4.40 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์แบบปกติที่อัตราส่วนต่างๆ..... 94
4.41 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์แบบสเตติกที่อัตราส่วนต่างๆ..... 95
4.42 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์แบบไดนามิกส์ที่อัตราส่วนต่างๆ..... 95
4.43 ค่า M_H- M_L ของยางเบลนด์ที่ใช้ยางอีพีดีเอ็มแบบต่างๆ..... 97
4.44 เวลาการสกอชของยางเบลนด์ที่ใช้ยางอีพีดีเอ็มแบบต่างๆ..... 98
4.45 เวลาการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ที่ใช้ยางอีพีดีเอ็มแบบต่างๆ..... 99
4.46 อัตราการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ที่ใช้ยางอีพีดีเอ็มแบบต่างๆ..... 100
4.47 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของยางเบลนด์ NR/BR/EPDM..... 101
4.48 ความสามารถในการยืดของยางเบลนด์ NR/BR/EPDM..... 103
4.49 ค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 300% ของยางเบลนด์ NR/BR/EPDM..... 104

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.50	ความต้านทานต่อการสึกหรอของยางที่เบลนด์เทคนิคแบบต่างๆ	107
4.51	ค่าความร้อนสะสมของยางเบลนด์	108
4.52	ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงของยางเบลนด์	110