

### บทที่ 3

#### วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

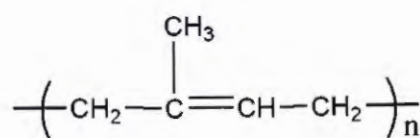
#### 3.1. สารเคมี

##### 3.1.1. ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR)

ยางธรรมชาติชนิดยางแท่ง STR 5L (Standard Thai Rubber, STR) มีความหนาแน่นประมาณ  $0.92 \text{ g/cm}^3$  มีมาตรฐานดังตารางที่ 3.1 มีสูตรโครงสร้างดังรูปที่ 3.1 ผลิตโดยบริษัท ยะลาแททเท็กซ์ จำกัด ประเทศไทย

ตารางที่ 3.1 มาตรฐานยางแท่ง STR 5L (ประกาศกระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2548)

สมบัติ	ค่าที่กำหนด
ปริมาณสิ่งสกปรกไม่เกิน (%)	0.04
ปริมาณเถ้าไม่เกิน (%)	0.40
ปริมาณไนโตรเจนไม่เกิน (%)	0.60
ปริมาณสิ่งระเหยไม่เกิน (%)	0.80
ค่าความอ่อนตัวเริ่มแรก (Po) ไม่ต่ำกว่า (%)	35
ค่าความอ่อนตัวของยาง (PRI) ไม่ต่ำกว่า	60
สีเทียบด้วยโลวิบอนต์ไม่เกิน	6.0
รหัสชั้นใช้สี	เขียวอ่อน

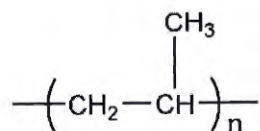


รูปที่ 3.1 สูตรโครงสร้าง ซิส 1,4-พอลิไอโซพรีน

##### 3.1.2. พอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP)

เป็นเทอร์โมพลาสติกที่ใช้ในการเตรียมยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกเกรดที่ใช้คือ Moplen HP500N เป็นโฮโมพอลิเมอร์ มีแทคติซิตีแบบไอโซแทคติก (Isotactic) ลักษณะเป็นเม็ดขาวขุ่น มีดัชนีการไหล (MFI) เท่ากับ  $12 \text{ g}/10 \text{ min}$  ( $230^\circ\text{C}/2.16 \text{ kg}$ ) ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 0.9 และ

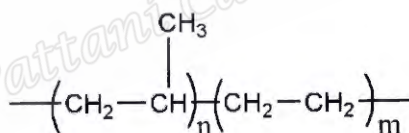
มีอุณหภูมิการอ่อนตัว (Vicat softening temperature A/50) เท่ากับ 153°C มีปริมาณผลึกประมาณ 41.2 - 62.5 % (Govorčin Bajsić *et al*, 2010; Liao and Tjong, 2010; Brzozowska-Stanuch *et al*, 2014; Tjong *et al*, 2014; Uthaipan *et al*, 2015) ผลิตโดยบริษัท HMC Polymers Co., Ltd สูตรโครงสร้างแสดงดังในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 สูตรโครงสร้างพอลิโพรพิลีน

### 3.1.3. โคพอลิเมอร์ของพอลิโพรพิลีนเอทิลีน (Propylene-Ethylene Copolymer, PEC)

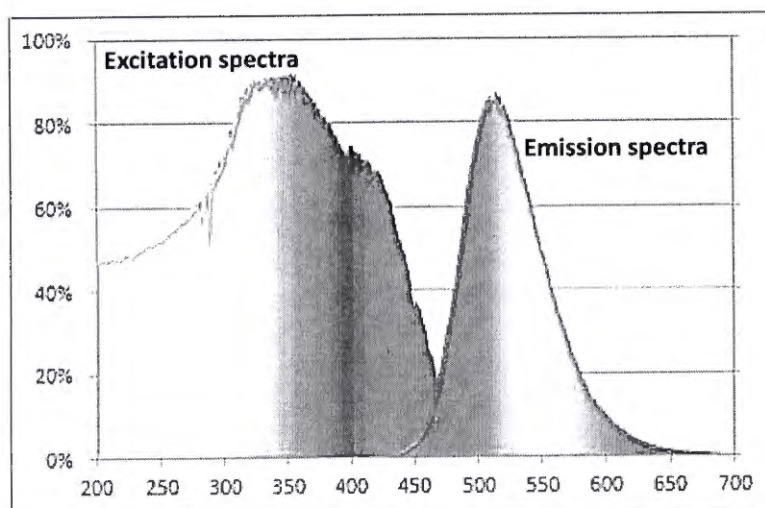
เป็นเทอร์โมพลาสติกที่ใช้ในการเตรียมยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกเกรดที่ใช้คือ Versify™ 3300 ลักษณะเป็นเม็ดใส มีปริมาณเอทิลีน 12 %wt ตกผลึกได้ 16.4% มีดัชนีการไหล (MFI) เท่ากับ 8 g/10 min (230°C/2.16Kg) อุณหภูมิคล้ายแก้ว (Tg) เท่ากับ -28°C และความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 0.866 ผลิตโดยบริษัท Dow Chemical Co., Ltd มีสูตรโครงสร้างแสดงดังในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 สูตรโครงสร้างโคพอลิเมอร์ของพอลิโพรพิลีนเอทิลีน

### 3.1.4. สารฟอสฟอรัส (Phosphor)

เป็นสารเรืองแสงชนิดสตรอนเทียมอะลูมิเนียมเตทราไฮออร์โทออร์โทโรเปียม (divalent europium ions (Eu<sup>2+</sup>) doped strontium aluminate (SrAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>); SrAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>:Eu<sup>2+</sup>) มีชื่อทางการค้าคือ PLO-8B เป็นสารประกอบอนินทรีย์ ผลิตโดยบริษัท Luming Technology Group Co., Ltd ประเทศจีน มีความยาวคลื่นที่กระตุ้นและความยาวคลื่นแสงที่ปลดปล่อยดังรูปที่ 3.4 และมีสมบัติพื้นฐานดังตารางที่ 3.2



Excitation and emission spectra of PLO

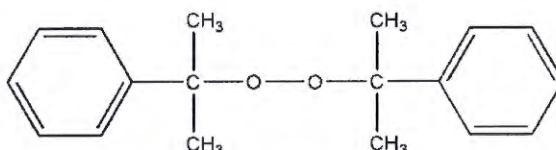
รูปที่ 3.4 สเปกตรัมของการกระตุ้นและปลดปล่อยของสารฟอสฟอรัสชนิด PLO (Luming Technology Group Co., Ltd, 2016)

ตารางที่ 3.2 สมบัติพื้นฐานของสารฟอสฟอรัสชนิด  $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$ ; PLO-8B (Luming Technology Group Co., Ltd, 2016)

Property	Values of PLO
สีของผงสารฟอสฟอรัส	เหลืองอ่อน
ปลดปล่อยแสงสี	เหลือง เขียว
องค์ประกอบทางเคมี	$\text{MeO}\cdot\text{xAl}_2\text{O}_3:\text{Eu}$ (Me=Ca, Mg, Sr; x=0.5-2.0)
ความยาวคลื่นที่กระตุ้น (nm)	200-450
ความยาวคลื่นที่ปลดปล่อย (nm)	520
ขนาดอนุภาค ( $\mu\text{m}$ )	1-100
ความสว่างหลังหยุดกระตุ้น ( $\text{mcd}/\text{m}^2$ )	100-600
ระยะเวลาการปลดปล่อยแสงหลังหยุดกระตุ้น	$\geq 12$ ชั่วโมง
ความต้านทานต่อแสง	$\geq 1000$ ชั่วโมง
ความเสถียรทางเคมี	ดีเยี่ยม และ เสื่อมสลายช้าในน้ำ (ผลิตภัณฑ์สามารถกั้นน้ำได้ดีขึ้นหากผ่านการเคลือบผิว)
ความต้านทานต่อความร้อน	ความเข้มแสงที่ปลดปล่อยจะลดลงเมื่อได้รับความร้อนตั้งแต่ $250-600^\circ\text{C}$ และเมื่อได้รับความร้อนเป็นเวลานาน
อุณหภูมิที่ใช้งาน	$\leq 250^\circ\text{C}$
ความหนาแน่น ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	3.6

### 3.1.5. ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide, DCP)

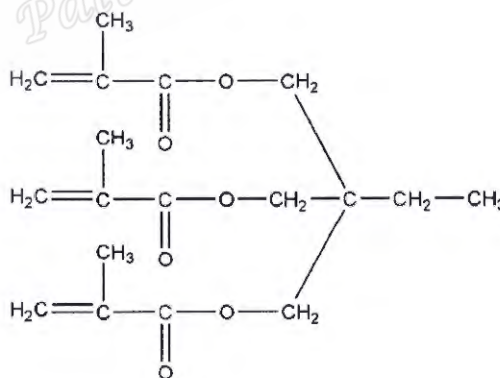
เป็นสารวัลคาไนซ์มีสูตรโมเลกุล คือ  $C_{18}H_{22}O_2$  มีลักษณะเป็นเม็ดใส น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 249.27 g/mol จุดหลอมเหลวประมาณ 39-41°C มีความบริสุทธิ์ 99% ผลิตโดยบริษัท Wouzhou International Co., Ltd ประเทศจีน มีสูตรโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 สูตรโครงสร้างของไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์

### 3.1.6. ไตรเมทิลลอลโพรเพนไตรเมทาคริเลต (Trimethylol propane trimethacrylate, TMPTMA, SR350)

เป็นสารร่วมในการวัลคาไนซ์ (Co-agent) ในระบบวัลคาไนซ์ด้วยเปอร์ออกไซด์ มีลักษณะเป็นของเหลวใส มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.06 ผลิตโดยบริษัท Sartomer Asia Co., Ltd ประเทศจีน มีสูตรโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 3.6



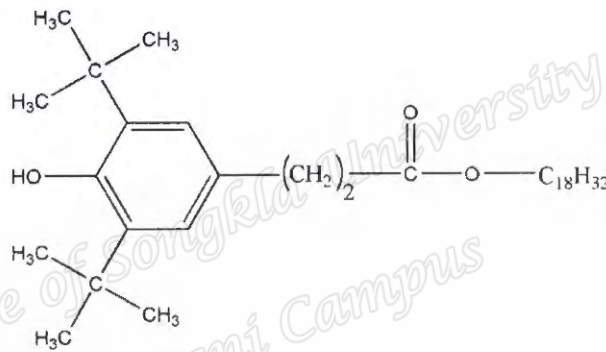
รูปที่ 3.6 สูตรโครงสร้างของไตรเมทิลลอลโพรเพนไตรเมทาคริเลต

### 3.1.7. อัลตราพลาสติก ทีพี 01 (Ultra-plast TP01)

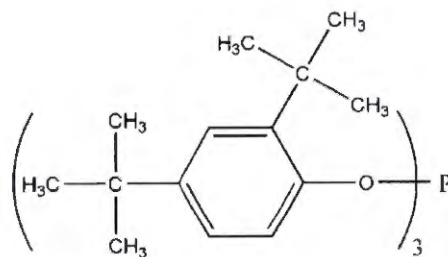
เป็นสารช่วยผสมในการเตรียมยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก มีองค์ประกอบเป็นกรดไขมันและเอไมด์ ลักษณะเป็นเม็ดสีเหลืองขุ่น มีความหนาแน่น 0.98 g/cm<sup>3</sup> อุณหภูมิหลอมเท่ากับ 105°C ผลิตโดยบริษัท Performance Additives Sdn. Bhd. ประเทศมาเลเซีย

### 3.1.8. สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Antioxidants)

สารป้องกันการเสื่อมสภาพมี 2 ชนิดด้วยกัน ชนิดแรกคือ IRGANOX 1076 เป็นสารป้องกันการเสื่อมปฏิกิริยาอนุมูลอิสระในกลุ่มฟีนอลิกซึ่งมีชื่อทางเคมีว่า Octadecyl-3-(3,5-di-tert.butyl-4-hydroxyphenyl)-propionate มีลักษณะเป็นผงสีขาว มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.02 อุณหภูมิในการหลอมอยู่ในช่วง 50-55°C มีสูตรโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 3.7 และชนิดที่ 2 คือ IRGAFOS 168 เป็นสารป้องกันการเสื่อมปฏิกิริยาอนุมูลอิสระในกลุ่มฟีนอลิกซึ่งมีชื่อทางเคมีว่า Tris(2,4-ditert-butylphenyl) phosphite มีลักษณะเป็นผงสีขาว มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.03 อุณหภูมิในการหลอมอยู่ในช่วง 183-186°C มีสูตรโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 3.8 ทั้งสองผลิตโดยบริษัท Ciba Specialty Chemicals Inc. ประเทศสวิตเซอร์แลนด์



รูปที่ 3.7 โครงสร้างของสาร IRGANOX 1076



รูปที่ 3.8 โครงสร้างของสาร IRGAFOS 168

### 3.1.9. น้ำมันขาว (White oil)

เป็นน้ำมันช่วยในการแปรรูปยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก ได้จากปิโตรเลียมมีองค์ประกอบส่วนใหญ่คือ สารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดแนฟทีนิกและพาราฟินิก ถูกออกซิเดชันได้น้อยมาก จึงไม่เปลี่ยนสี และกลั่นขณะเก็บและใช้งาน มีลักษณะเป็นของเหลวใส น้ำมันขาวที่ใช้

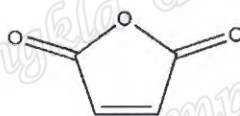
หมายเลข 15 (Grade A) มีความหนืดไคเนมาติก (kinematic viscosity) เท่ากับ  $18.86 \text{ mm}^2/\text{s}$  มีจุดวาบไฟเท่ากับ  $208^\circ\text{C}$  มีจุดไหลเทเท่ากับ  $-10^\circ\text{C}$  มีสีเซย์โบลต์ (Saybolt color) +30 มีการกักความร้อน ( $100^\circ\text{C}$ , 3Hr) เกรด 1 ผลิตโดยบริษัท Maoming Fulida Chemicals Co., Ltd ประเทศจีน

### 3.1.10. ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide, $\text{TiO}_2$ )

มีความบริสุทธิ์ 93 % มีลักษณะเป็นผงสีขาว มีความหนาแน่น  $4.0 \text{ g/cm}^3$  มีขนาดอนุภาคประมาณ  $0.405 \mu\text{m}$  มีจุดหลอมเหลวเท่ากับ  $1,843^\circ\text{C}$  เกรดที่ใช้คือ Ti-Pure™ R-902+ ผลิตโดยบริษัท Chemours Co., Ltd ประเทศจีน

### 3.1.11. มาลิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride, MA)

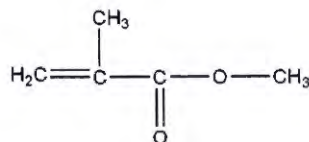
ใช้สำหรับปรับปรุงผิวสารฟอสฟอรัส เป็นเกรดวิเคราะห์ (AR-grade) มีความบริสุทธิ์  $\geq 99.0\%$  มีสูตรโมเลกุลคือ  $\text{C}_4\text{H}_2\text{O}_3$  มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ  $98.06 \text{ g/mol}$  ลักษณะเป็นเกล็ดสีขาว ชุ่น มีความหนาแน่นเท่ากับ  $1.314 \text{ g/cm}^3$  มีจุดหลอมเหลวอยู่ในช่วง  $52-54^\circ\text{C}$  ผลิตโดยบริษัท Sigma-Aldrich Pte Ltd. มีสูตรโครงสร้างโมเลกุลดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 โครงสร้างของมาลิกแอนไฮไดรด์

### 3.1.12. เมทิลเมทาคริเลต (Methyl methacrylate, MMA)

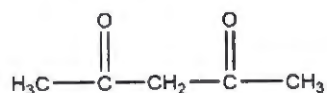
ใช้เป็นสารปรับปรุงผิวสารฟอสฟอรัส มีลักษณะเป็นของเหลวใส มีสูตรโมเลกุลคือ  $\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_2$  น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ  $100.12 \text{ g/mol}$  ความบริสุทธิ์เท่ากับ  $99.0\%$  มีจุดเดือด  $100^\circ\text{C}$  ( $760 \text{ mmHg}$ ) และมีความหนาแน่นเท่ากับ  $0.943 \text{ g/cm}^3$  ผลิตโดยบริษัท Fluka chemical Co., Ltd ประเทศสวิตเซอร์แลนด์ มีโครงสร้างโมเลกุลดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 โครงสร้างของเมทิลเมทาคริเลต

### 3.1.13. อะซีติลอะซีโตน (Acetyl acetone, ACAC)

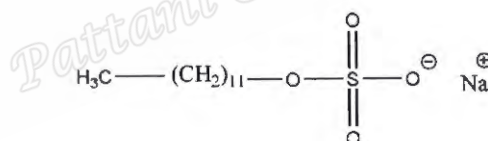
ใช้เป็นสารปรับปรุงผิวสารฟอสฟอรัส มีลักษณะเป็นของเหลวใส ยี่ห้อ QRèC เกรดสังเคราะห์ (synthesis grade) มีสูตรโมเลกุลคือ  $C_5H_8O_2$  น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 100.12 g/mol ความบริสุทธิ์เท่ากับ  $\geq 99\%$  และมีความหนาแน่นเท่ากับ 0.972-0.974 g/cm<sup>3</sup> ผลิตจาก Quality Reagent Chemical ประเทศนิวซีแลนด์ มีสูตรโครงสร้างโมเลกุลดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 โครงสร้างของอะซีติลอะซีโตน

### 3.1.14. โซเดียม ลอริล ซัลเฟต (Sodium lauryl sulfate, SLS)

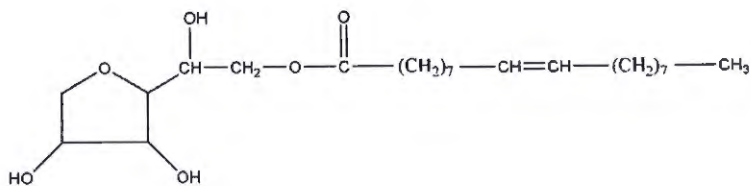
เป็นสารลดแรงตึงผิวประเภทมีประจุลบ (Anionic surfactant) ใช้ในขั้นตอนการปรับปรุงสภาพผิวสารฟอสฟอรัสด้วย MA มีลักษณะเป็นเม็ดสีขาว มีสูตรโมเลกุล คือ  $NaC_{12}H_{25}SO_4$  น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 288.372 g/mol มีความบริสุทธิ์ 96% จุดหลอมเหลวเท่ากับ 206°C และความหนาแน่นเท่ากับ 1.01 g/cm<sup>3</sup> ผลิตโดยบริษัท Thermo Fisher Scientific Inc. ประเทศออสเตรเลีย มีสูตรโครงสร้างโมเลกุลดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 โครงสร้างของโซเดียม ลอริล ซัลเฟต

### 3.1.15. ซอร์บิแทน โมโนโอลีเอท (Sorbitan monooleate, Span 80)

เป็นสารลดแรงตึงผิวประเภทไม่มีประจุ (Nonionic surfactant) ใช้ในขั้นตอนการปรับปรุงสภาพผิวสารฟอสฟอรัสด้วย MMA และ ACAC มีลักษณะเป็นของเหลวหนืดสีเหลืองอัมพัน มีสูตรโมเลกุลคือ  $C_{24}H_{44}O_6$  น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 428.6 g/mol จุดหลอมเหลวเท่ากับ -12.5°C มีค่า pH เท่ากับ 6 และมีความหนาแน่นเท่ากับ 0.99 g/cm<sup>3</sup> มีชื่อทางการค้าคือ RHEODOL SP-O10 ผลิตโดยบริษัท Kao Industrial (Thailand) Co., Ltd ประเทศไทย มีสูตรโครงสร้างโมเลกุลดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 โครงสร้างของซอร์บิแทน โมโนโอเลอเทอ

### 3.1.16. คลอโรฟอร์ม (Chloroform)

เป็นตัวทำละลาย MA ในขั้นตอนการปรับปรุงสภาพผิวสารฟอสฟอรัส ซึ่งใช้เกรดวิเคราะห์ มีลักษณะเป็นของเหลวใส มีสูตรโมเลกุลคือ  $\text{CHCl}_3$  น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 119.38 g/mol ความบริสุทธิ์เท่ากับ 99.1% และมีความหนาแน่นเท่ากับ 1.479 g/cm<sup>3</sup> ผลิตโดยบริษัท VWR International, Pty Ltd. สหภาพยุโรป

### 3.1.17. เอทานอล (Ethanol)

เป็นตัวทำละลาย MMA และ ACAC ในขั้นตอนการปรับปรุงสภาพผิวสารฟอสฟอรัส มีลักษณะเป็นของเหลวใส เกรดวิเคราะห์ มีสูตรโมเลกุลคือ  $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$  น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 46.07 g/mol ความบริสุทธิ์เท่ากับ 95.9% และมีความหนาแน่นเท่ากับ 0.789 g/cm<sup>3</sup> ผลิตโดยบริษัท Avantor Performance Materials Sdn Bhd. ประเทศมาเลเซีย

### 3.1.18. แอมโมเนียม ไฮดรอกไซด์ (Ammonium hydroxide)

เป็นสารที่ใช้ปรับค่า pH ในขั้นตอนการปรับปรุงสภาพผิวสารฟอสฟอรัส มีลักษณะเป็นของเหลวใส ซึ่งใช้เกรดวิเคราะห์ มีสูตรโมเลกุลคือ  $\text{NH}_4\text{OH}$  น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 35.05 g/mol ความบริสุทธิ์เท่ากับ 25% และมีความหนาแน่นเท่ากับ 0.91 g/cm<sup>3</sup> ยี่ห้อ Merck KGaA ได้รับการสนับสนุนจากบริษัท เมอร์ค จำกัด ประเทศไทย

### 3.1.19. โทลูอีน (Toluene)

โทลูอีนเป็นตัวทำละลายใช้ในการสกัดเฟสของยางธรรมชาติในขั้นตอนการวิเคราะห์ สัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกด้วยเทคนิค SEM มีสูตรโมเลกุลคือ  $\text{C}_6\text{H}_5(\text{CH}_3)$  น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 92.14 g/mol ความหนาแน่นเท่ากับ 0.8669 g/mol มีจุดเดือดเท่ากับ 111°C มีค่า Solubility parameter เท่ากับ 8.9 (cal<sup>1/2</sup>.cm<sup>-3/2</sup>) ผลิตโดยบริษัท Lab Scan Asia Co., Ltd. ประเทศสาธารณรัฐไอร์แลนด์



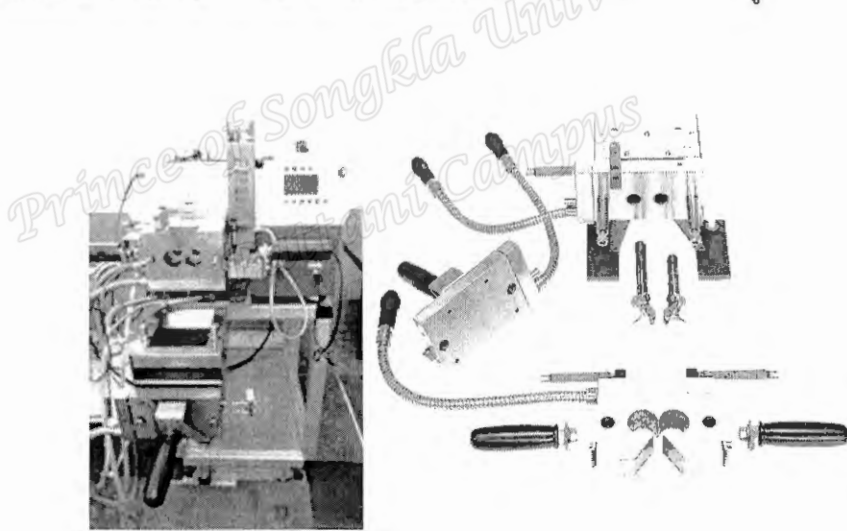
### 3.1.20. ไซลีน (Xylene)

ไซลีน เกรดวิเคราะห์ เป็นตัวทำละลายใช้ในการสกัดเฟสของพลาสติกในขั้นตอนการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกด้วยเทคนิค SEM มีสูตรโมเลกุลคือ  $C_8H_{10}$  น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 106.17 g/mol ความบริสุทธิ์เท่ากับ 99.83% มีจุดเดือดอยู่ในช่วง 138-142°C มีค่า Solubility parameter เท่ากับ 8.8 ( $cal^{1/2}.cm^{-3/2}$ ) ผลิตโดยบริษัท Fisher Scientific ประเทศสหรัฐอเมริกา

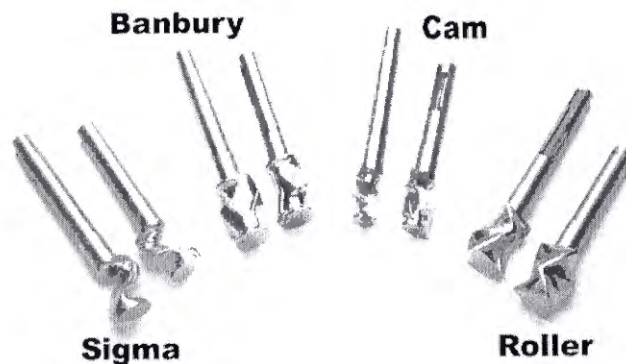
## 3.2. อุปกรณ์

### 3.2.1. เครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer)

เป็นเครื่องผสมแบบปิดยี่ห้อ Brabender/Plastograph EC PLUS ห้องผสม W 50 EHT ประกอบด้วยโรเตอร์ชนิด Roller 2 ตัว มีปริมาตรความจุของห้องผสมเท่ากับ 55  $cm^3$  สามารถควบคุมความเร็วโรเตอร์และอุณหภูมิขณะผสมได้ ความเร็วในการหมุน 0.2-150  $min^{-1}$  กำลังมอเตอร์ 3.8 Kw ช่วงในการวัดแรงบิด 0-200 Nm สามารถตั้งอุณหภูมิได้สูงสุด 250°C ผลิตโดยบริษัท Brabender® GmbH & Co. KG ประเทศเยอรมนี โดยเครื่องมือมีลักษณะดังรูปที่ 3.14 และ 3.15



รูปที่ 3.14 ลักษณะเครื่องผสมแบบปิด (Brabender/Plastograph EC PLUS; W 50 EHT)



รูปที่ 3.15 ลักษณะโรเตอร์แบบ Sigma, Banbury, Cam และ Roller

### 3.2.2. เครื่องผสมสองลูกกลิ้ง (Two roll mill)

เป็นเครื่องผสมแบบเปิด มีลูกกลิ้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว ยาว 14 นิ้ว อัตราส่วนความเร็วของลูกกลิ้งหน้าต่อลูกกลิ้งหลัง (Friction ratio) เท่ากับ 1:1.21 ผลิตโดยห้างหุ้นส่วนจำกัด ชัยเจริญการช่าง กรุงเทพฯ

### 3.2.3. เครื่องอัดขึ้นรูปยาง (Compression molding machine)

เป็นเครื่องอัดเข้ามีน้ำไหลวน (Automatic Insert cooling Platens system with LCD Touch Screen Control) โมเดล LP-S-20 สามารถตั้งอุณหภูมิได้สูงสุดถึง 300°C รับความดันได้สูงสุด 200 kN ผลิตโดยบริษัท Labtech Engineering Co., Ltd. ประเทศไทย

### 3.2.4. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine)

เป็นเครื่องทดสอบความทนทานต่อแรงดึง ยี่ห้อ Tinius Olsen โมเดล H10KS สามารถรับแรงได้สูงสุดถึง 10 kN มีช่วงความเร็วในการดึง 0.001-1,000 mm/min ตรวจวัดระยะยืดด้วยเลเซอร์ โมเดล H500L laser extensometer ผลิตโดยบริษัท Tinius Olsen, Ltd. ประเทศอังกฤษ

### 3.2.5. เครื่องวัดขนาดอนุภาคแบบใช้เลเซอร์ (Laser particle size analyzer; LPSA)

เป็นเครื่องวัดขนาดอนุภาคอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของคลื่นแสง (Laser diffraction) เมื่ออนุภาคเกิดการกระจายตัวอยู่ในตัวกลางผ่านลำแสงช่วงระยะเวลาหนึ่ง ใช้หลักการทำงานตาม

สมมติฐานของฟรอนโฮเฟอร์ (Fraunhofer approximation) คือ ความเข้มของแสงที่เกิดการเลี้ยวเบนมีความสัมพันธ์กับปริมาณของอนุภาคในแต่ละขนาด แต่มุมเลี้ยวเบนเป็นส่วนผกผันกับขนาดของอนุภาค ซึ่งสามารถวัดขนาดอนุภาคได้ตั้งแต่ 0.04 ถึง 2,000 ไมโครเมตร โดยใช้เครื่อง Laser particle size analyzer รุ่น Beckman Coulter LS 230 บริษัท Beckman Coulter, Inc. ประเทศไทย

### 3.2.6. เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrometer; FTIR)

เป็นเครื่องวิเคราะห์ตรวจหาชนิดและปริมาณของสารประกอบอินทรีย์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น Tensor 27 โดยใช้แสงอินฟราเรดในช่วง Mid-IR ครอบคลุมเลขคลื่น (Wave number) ในช่วง  $4,000 - 400 \text{ cm}^{-1}$  ผลิตโดยบริษัท Bruker Thailand ประเทศไทย

### 3.2.7. เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของลำรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer; XRD)

เป็นเครื่องวิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยอาศัยคุณสมบัติการเลี้ยวเบน (Diffraction) ของรังสีเอกซ์ เมื่อวิ่งผ่านโครงสร้างผลึกหรือตกกระทบบนพื้นผิวของวัสดุ แล้วเกิดการกระเจิง (Scattering) และเลี้ยวเบน โดยมุมเลี้ยวเบนจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของผลึกและระนาบที่รังสีตกกระทบ ดังนั้นเมื่อทราบมุมที่กระเจิงออกมา สามารถตรวจสอบได้ว่าเป็นเฟสของผลึกชนิดใด ซึ่งวิธีนี้ทำให้ทราบรายละเอียดการจัดเรียงตัวของอะตอมในโครงสร้างผลึกได้อย่างละเอียดประมาณ 1 Å นอกจากนี้ยังสามารถวิเคราะห์ที่อุณหภูมิสูง (ไม่เกิน  $1200^{\circ}\text{C}$ ) โดยสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้หลายประเภท เช่น หิน ดิน (Clay) ทราาย โลหะ แร่ประกอบหิน วัสดุชีวอุตสาหกรรม เช่น ผง  $\text{TiO}_2$  และ  $\text{CaCO}_3$  วัสดุสังเคราะห์ เซรามิกส์ เป็นต้น ในการทดลองจะใช้เครื่อง ยี่ห้อ Philips รุ่น X'Pert MPD มีแหล่งกำเนิดแสงจาก Philips high intensity ceramic sealed tube (3kW) ความยาวคลื่น คือ  $\text{Cu K}\alpha$  ( $1.5405 \text{ \AA}$ ) จากบริษัท PAN analytical B.V. ประเทศเนเธอร์แลนด์

### 3.2.8. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ใช้ถ่ายภาพโครงสร้างพื้นผิวภายนอกของวัสดุต่างๆ มีกำลังขยายตั้งแต่ 18 เท่า ถึง 300,000 เท่า ความละเอียดสูงถึง  $12,000 \times 9,000$  pixels สามารถตรวจหาสิ่งผิดปกติบนชิ้นงาน วิเคราะห์หาชนิดและปริมาณของธาตุในวัสดุ และแสดงแผนภาพการกระจายของธาตุชนิดต่างๆในวัสดุ วิเคราะห์ตัวอย่างประเภทวัสดุต่างๆทางโลหะ

เซรามิกส์ พอลิเมอร์ เซลล์พีซ เซลล์สัต์ว และสามารถดูตัวอย่างที่มีความชื้นต่ำๆได้ โดยใช้ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-5800LV ผลิตจากบริษัท JEOL USA, Inc. ประเทศสหรัฐอเมริกา

**3.2.9. กล้องจุลทรรศน์ชนิด 3 กระจบอกตา พร้อมเทคนิคฟลูออเรสเซนซ์ เฟสคอนทราสต์และโปรแกรม NIS-Element D (Bright field Microscope with Fluorescence, Phase contrast technique and NIS-Element D software)**

กล้องจุลทรรศน์ชนิด 3 กระจบอกตาแบบใช้แสงธรรมดา และแสงที่ช่วงความยาวคลื่นอื่นๆ เช่น 450-490 nm, 510-560 nm และ 465-495 nm เป็นต้น มีกำลังขยาย 4x, 10x, 20x, 40x, 60x และ 100x สามารถบันทึกภาพได้ ตัวเครื่องรุ่น ECLIPSE Ni ผลิตโดยบริษัท Nikon Instruments Inc.

### **3.2.10. เครื่องสเปกโทรฟลูออโรมิเตอร์ (Spectrofluorometer)**

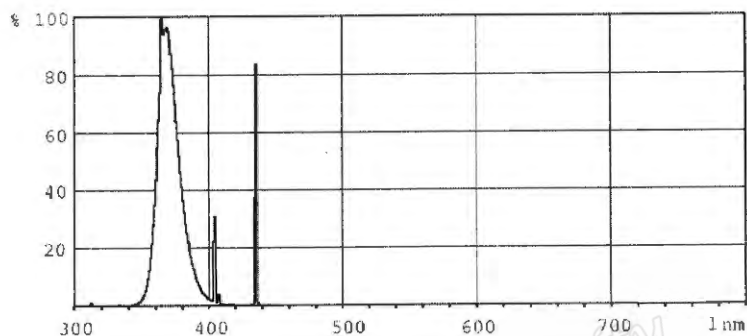
เป็นเครื่องมือสำหรับวิเคราะห์คุณสมบัติของสาร ได้แก่ วิเคราะห์หาค่าความยาวคลื่นที่กระตุ้น ความยาวคลื่นที่ปลดปล่อย ค่าคงที่ของ wavelength synchronous และการสแกนหาค่าคงที่ของพลังงาน synchronous spectral และสามารถสแกนค่าความยาวคลื่นที่กระตุ้นและค่าความยาวคลื่นที่ปลดปล่อยในรูป 3 มิติ ได้โดยการอาศัยการดูดกลืนรังสียูวีที่ส่งผลให้โมเลกุลถูกกระตุ้นและมีการสั่นภายในโมเลกุลจากระดับชั้นพลังงานสถานะพื้น (Ground state) ไปสู่ระดับชั้นพลังงานที่สูงขึ้น (Excited state) ทำให้เกิดสเปกตรัมในช่วงฟลูออเรสเซนซ์ ณ ค่าพลังงานที่กระตุ้นที่จำเพาะของสารแต่ละชนิด เครื่องสเปกโทรฟลูออโรมิเตอร์ที่ใช้ยี่ห้อ JASCO รุ่น FP-8200 วัดค่าฟลูออเรสเซนซ์ ในช่วงความยาวคลื่น 200-750 นาโนเมตร ผลิตโดยบริษัท Jasco, Inc. ประเทศญี่ปุ่น

### **3.2.11. เครื่องวัดความสว่าง (Screen brightness/luminance meter)**

เป็นเครื่องวัดความสว่าง (Luminance) ของวัสดุ โมเดล SM208 สามารถตรวจวัดความส่องสว่างตั้งแต่  $0.01 \text{ cd/m}^2$  ถึง  $39,990 \text{ cd/m}^2$  (แคนเดลาต่อตารางเมตร;  $\text{cd/m}^2$ ) ระยะห่างในการวัด  $\leq 1$  เมตร ผลิตโดยบริษัท Shenzhen Sanpo Instrument Co., Ltd. ประเทศจีน

### 3.2.12. หลอดฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescent lamps)

เป็นหลอดฟลูออเรสเซนต์ รุ่น Actinic BL กำลังไฟฟ้า 15 W ความยาวหลอดเท่ากับ 43.7 cm เส้นผ่านศูนย์กลางหลอดเท่ากับ 2.8 cm ให้แสงในช่วงความยาวคลื่น UVA (315-400 nm) และปลดปล่อยแสงได้ดีที่สุดที่ความยาวคลื่นประมาณ 370 nm ดังรูปที่ 3.16 ผลิตโดยบริษัท Philips Co., Ltd. ประเทศเนเธอร์แลนด์



รูปที่ 3.16 สเปกตรัมของการปลดปล่อยของหลอดฟลูออเรสเซนต์ รุ่น Actinic BL

### 3.2.13. เครื่องทดสอบความแข็ง (Shore Hardness tester)

เป็นเครื่องมือที่ใช้ทดสอบความแข็งของยางโดยใช้แรงกดจากสปริงซึ่งมีหน่วยวัดเป็น Shore A โดยมีสเกลจาก 0 Shore A ถึง 100 Shore A เป็นเครื่องรุ่น Digital hardness tester SA ผลิตโดยบริษัท Toyoseiki Co., Ltd ประเทศญี่ปุ่น

### 3.2.14. เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักภายใต้ความร้อน (Thermogravimetric analyzer; TGA)

เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักภายใต้ความร้อน เนื่องจากการสลายตัวขององค์ประกอบในสารตัวอย่าง รุ่น STA 6000 ผลิตโดยบริษัท Perkin Elmer ประเทศสหรัฐอเมริกา

### 3.2.15. เครื่องวัดสมบัติการไหลแบบคาปิลลารี (Capillary rheometer)

เป็นเครื่องวัดสมบัติการไหลแบบเฉือนของพอลิเมอร์ รุ่น RHEOGRAPH 20 ระบบ บาร์เรลคู่ ขนาด 2 x 12 mm มีช่วงความเร็วในการทดสอบอยู่ที่ 0.0001 mm/s (0.006 mm/min) – 40 mm/s (2,400 mm/min) สามารถควบคุมอุณหภูมิได้สูงถึง 400°C โดยมีความละเอียด 0.01°C มีทรานสดิวเซอร์วัดค่าความดันในช่วง 20–2,000 bar และมีทรานสดิวเซอร์วัดค่าแรง 20 kN ผลิตโดยบริษัท GOETTERT Inc. ประเทศเยอรมนี

### 3.2.16. ตู้อบความร้อน (Hot-air oven)

มีขนาด 40x60x48 ลูกบาศก์เซนติเมตร สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ตั้งแต่ 25-200°C มีระบบพัดลมเพื่อควบคุมความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ ผลิตโดยบริษัท Fisher Scientific Co., Ltd. ประเทศอังกฤษ

### 3.2.17. เครื่องโฮโมจิไนเซอร์ที่ใช้คลื่นความถี่สูง (Ultrasonic homogenizer)

เป็นเครื่องที่ใช้ปั่นผสม เพื่อให้เกิดการกระจายตัวของสารในตัวกลาง และผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน รุ่น sonic ruptor 400 ยี่ห้อ Omni International สามารถปรับกำลังได้ถึง 400 วัตต์ ในปริมาตร 250  $\mu$ l ถึง 1L ผลิตโดยบริษัท Homogenizer Co., Ltd สหรัฐอเมริกา

### 3.2.18. เครื่องวัดความเป็นกรดต่าง (pH meter)

เป็นเครื่องวัดความเป็นกรดต่างของของเหลว รุ่น Eutech pH 700 สามารถวัดค่าความเป็นกรดต่างในช่วง pH -2 ถึง pH 16 มีความละเอียด 0.01 และมีความแม่นยำ  $\pm 0.01$  ผลิตโดยบริษัท Eutech Instruments Pte Ltd. ประเทศสิงคโปร์

### 3.2.19. เครื่องทดสอบมุมสัมผัส (Contact angle measurement)

เครื่องทดสอบมุมสัมผัสของของเหลวบนผิววัสดุ สามารถวัดค่า มุมสัมผัสแบบคงที่ มุมสัมผัสแบบไดนามิกส์ แรงตึงผิว พลังงานพื้นผิว สมบัติความเป็นขั้ว แรงยึดเกาะ และการดูดซับของ เซรามิก แก้ว กระดาษ พลาสติก ผ้า หรือผงตัวอย่าง เครื่องทดสอบที่ใช้ โมเดล OCA-15EC มีช่วงการวัดมุมติดต่อกัน 0-180 องศา ความคลาดเคลื่อน  $\pm 0.1$  องศา ผลิตโดยบริษัท DataPhysics Instruments GmbH ประเทศเยอรมนี

### 3.3. วิธีดำเนินงานวิจัย

#### 3.3.1. การศึกษาสมบัติเบื้องต้นของสารฟอสฟอรัส

การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติของสารฟอสฟอรัส รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 การวิเคราะห์สมบัติพื้นฐานทางกายภาพ สมบัติทางแสงและความทนทานต่อน้ำของสารฟอสฟอรัส

การวิเคราะห์/การทดสอบ	เครื่องมือ
<b>■ สมบัติทางกายภาพพื้นฐาน</b>	
-การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารฟอสฟอรัส	▶ X-ray diffractometer (XRD)
-สัณฐานวิทยาของสารฟอสฟอรัส	▶ Scanning electron microscope (SEM)
-การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี	▶ Fourier transform infrared spectrometer (FTIR)
-การวิเคราะห์ขนาดอนุภาค	▶ Laser particle size analyzer (LPSA)
<b>■ สมบัติทางแสง</b>	
-ความยาวคลื่นที่กระตุ้น และความยาวคลื่นที่ปลดปล่อยของสารฟอสฟอรัส	▶ Spectrofluorometer
-ระยะเวลาการคงอยู่ของแสงที่ปลดปล่อยหลังหยุดกระตุ้นของสารฟอสฟอรัส	▶ Luminance meter
<b>■ ความทนทานต่อน้ำ</b>	
-การเปลี่ยนแปลงของค่า pH ของน้ำ จากผล การสลายตัวทางโครงสร้างของสารฟอสฟอรัส	▶ pH meter
-การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารฟอสฟอรัส	▶ X-ray diffractometer (XRD)
-ความยาวคลื่นที่กระตุ้น และความยาวคลื่นที่ปลดปล่อยของสารฟอสฟอรัส	▶ Spectrofluorometer
-ระยะเวลาการคงอยู่ของแสงที่ปลดปล่อยหลังหยุดกระตุ้นของสารฟอสฟอรัส	▶ Luminance meter

### 3.3.2. การศึกษาอิทธิพลของเทคนิคการเบลนด์ต่อสมบัติของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส

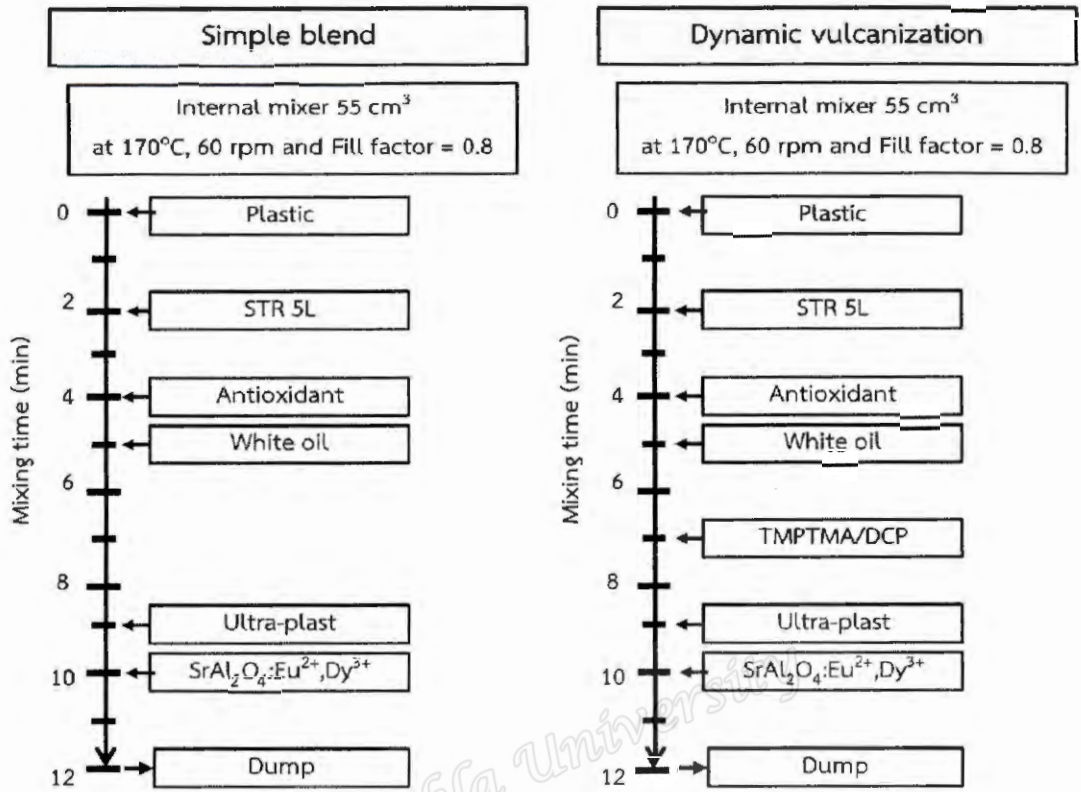
การเตรียมยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกระหว่างยางธรรมชาติ โพลีโพรพิลีนและโคพอลิเมอร์ของโพรพิลีนเอทิลีนที่อัตราส่วนการเบลนด์เท่ากับ 40/30/30 โดยน้ำหนัก ใช้เทคนิคการเบลนด์แบบปกติและเทคนิคการวัลคาไนเซชันแบบไดนามิกส์ สารเคมีและปริมาณที่ใช้แสดงดังตารางที่ 3.4 ขั้นตอนการผสมแสดงดังรูปที่ 3.17 จากนั้นวิเคราะห์และทดสอบสมบัติของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.4 สูตรการเตรียมยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส ในขั้นตอนการแปรเทคนิคการเบลนด์

Ingredients	Quantities (phr)	
	Simple blend	Dynamic vulcanization
Natural rubber	100.0	100.0
Polypropylene	75.0	75.0
Propylene-ethylene copolymer	75.0	75.0
Ultra-plast TP01 <sup>TM</sup>	5.0	5.0
IRGANOX 1076	1.0	1.0
IRGAFOS 168	1.0	1.0
White oil	10.0	10.0
SrAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> :Eu <sup>2+</sup>	16.0	16.0
	(6 wt% of the mixture)*	(6 wt% of the mixture)*
TMPTMA	-	2.0
DCP	-	2.0

\*wt% of the mixture หมายถึง เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของยางธรรมชาติ โพลีโพรพิลีนโคพอลิเมอร์ของโพรพิลีนเอทิลีน และสารฟอสฟอรัส





รูปที่ 3.17 ขั้นตอนการเตรียมยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก โดยใช้เทคนิคการเบลนด์แบบปกติและการวัลคาไนเซชันแบบไดนามิกส์

ตารางที่ 3.5 การวิเคราะห์และการทดสอบสมบัติของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส ในการศึกษาอิทธิพลของเทคนิคการเบลนด์ วิธีการผสม และอัตราส่วนการเบลนด์

การวิเคราะห์/การทดสอบ	เครื่องมือ
<p>■ สมบัติเชิงกล</p> <p>-ความต้านทานต่อแรงดึง ระยะยืดที่จุดขาดและ การผิตรูปลาวรรแบบดึง</p>	▶ Universal testing machine
<p>■ การเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกล</p> <p>-ความต้านทานต่อแรงดึงและระยะยืดที่จุดขาด</p>	▶ Universal testing machine
<p>■ สัณฐานวิทยา</p> <p>-สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ที่ผสมสารฟอสฟอรัส</p> <p>-การกระจายตัวของสารฟอสฟอรัสในพอลิเมอร์ที่ผสมสารฟอสฟอรัส</p>	▶ Scanning electron microscope (SEM) ▶ Bright field microscope with fluorescence and phase contrast technique
<p>■ สมบัติทางแสง</p> <p>-ความยาวคลื่นที่กระตุ้น และความยาวคลื่นที่ปลดปล่อย</p> <p>-ระยะเวลาการคงอยู่ของแสงที่ปลดปล่อยหลังหยุดกระตุ้น</p>	▶ Spectrofluorometer ▶ Luminance meter

### 3.3.3. การศึกษาอิทธิพลของวิธีการผสมต่อสมบัติของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส

เตรียมยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกจากการเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติ พอลิโพรพิลีน และโคพอลิเมอร์ของโพรพิลีนเอทิลีน ที่อัตราส่วนการเบลนด์เท่ากับ 40/30/30 โดยน้ำหนัก ใช้เทคนิคการวัลคาไนเซชันแบบไดนามิกส์ โดยแปรวิธีการผสม 4 วิธี ที่ต่างกัน คือ

วิธีที่ 1 Step mixing - E

วิธีที่ 2 Step mixing - I

วิธีที่ 3 Precompound mixing - E

และ วิธีที่ 4 Precompound mixing - I

โดยควบคุมปริมาณสารฟอสฟอรัสชนิด  $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$  ที่ปริมาณ 6 wt% of the mixture ดังรายการสารเคมีและปริมาณที่ใช้แสดงในตารางที่ 3.4 และลำดับขั้นตอนการผสมดังแสดงในตารางที่

3.6 ซึ่งในวิธีการผสมที่จะต้องใช้อย่างคอมพิวเตอร์ จะต้องเตรียมอย่างคอมพิวเตอร์ก่อนการเตรียมยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก วิธีการผสมอย่างคอมพิวเตอร์ดังแสดงในตารางที่ 3.7 จากนั้นทำการวิเคราะห์และทดสอบสมบัติของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.6 ขั้นตอนการเตรียมยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรวิธีการผสม

Mixing time (min)	Preparation method			
	Step mixing - E	Step mixing - I	Precompound mixing - E	Precompound mixing - I
0	Plastic	Plastic	Plastic	Plastic
1	↓	↓	↓	↓
2	STR 5L	$\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$	Compound *	$\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$
3	↓	↓	↓	↓
4	Antioxidant	STR 5L	Ultraplast	Compound *
5	↓	↓	↓	↓
6	White oil	Antioxidant	$\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$	Ultraplast
7	↓	↓	↓	↓
8	TMPTMA / DCP	White oil	Dump	↓
9	↓	↓		↓
10	Ultraplast	TMPTMA / DCP		Dump
11	↓	↓		
12	$\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$	Ultra-plast		
13	↓	↓		
14	Dump	Dump		
Total (min)	12	14	12	14

- หมายเหตุ
- ผสมในเครื่องผสมแบบปิดขนาด 55 cm<sup>3</sup> อุณหภูมิการผสมเท่ากับ 170°C ความเร็วรอบของโรเตอร์เท่ากับ 60 rpm และ Fill factor เท่ากับ 0.8
  - เมื่อผสมเสร็จแล้วให้พักยางไว้ที่อุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปทดสอบ
  - Compound\* คือ ยางผสมสารเคมี มีวิธีการเตรียมดังแสดงในตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 ขั้นตอนการเตรียมยางคอมพาวนด์

Mixing time (min)	Ingredients
0	STR 5L
1	↓
2	Antioxidant
3	↓ White oil
4	↓ TMPTMA / DCP
5	↓ Dump

หมายเหตุ

- ผสมในเครื่องผสมแบบปิดขนาด 55 cm<sup>3</sup> อุณหภูมิการผสมเท่ากับ 60°C ความเร็วรอบของโรเตอร์เท่ากับ 60 rpm และ Fill factor เท่ากับ 0.8

Prince of Songkla University  
Pattani Campus

### 3.3.4. การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนการเบลนด์ต่อสมบัติของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส

เตรียมยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกจากการเบลนด์ระหว่าง NR/PP/PEC ตามในหัวข้อ 3.3.3 มีขั้นตอนการผสมแบบ Precompound – I ทำการแปรอัตราส่วนการเบลนด์เท่ากับ 40/60/0, 40/40/20, 40/30/30, 40/20/40 และ 40/0/60 โดยน้ำหนัก โดยใช้สารเคมีดังตารางที่ 3.8 จากนั้นวิเคราะห์และทดสอบสมบัติของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.8 สูตรการเตรียมยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์

Ingredients	Quantities (phr)				
	40/60/0	40/40/20	40/30/30	40/20/40	40/0/60
Natural rubber	100	100	100	100	100
Polypropylene	150	100	75	50	0
Propylene-ethylene copolymer	0	50	75	100	150
Ultra-plast TP01 <sup>TM</sup>	5	5	5	5	5
IRGANOX 1076	1	1	1	1	1
IRGAFOS 168	1	1	1	1	1
White oil	10	10	10	10	10
SrAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> :Eu <sup>2+</sup>	16	16	16	16	16
(6 wt% of the mixture)*					
TMPTMA	2	2	2	2	2
DCP	2	2	2	2	2

\*wt% of the mixture หมายถึง เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของยางธรรมชาติ โพลีโพรพิลีน โคพอลิเมอร์ของโพรพิลีนเอทิลีน และสารฟอสฟอรัส

### 3.3.5. การศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารฟอสฟอรัสต่อสมบัติของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส

การเตรียมยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกจากการเบลนดระหว่าง NR/PP/PEC ตามในหัวข้อ 3.3.3 มีขั้นตอนการผสมแบบ Precompound - I โดยทำการแปรปริมาณสารฟอสฟอรัสชนิด  $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$  ที่ปริมาณ 0, 3, 6, 12 และ 24 wt% of the mixture\* โดยใช้สารเคมีดังตารางที่ 3.9 จากนั้นวิเคราะห์และทดสอบสมบัติของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 3.10

ตารางที่ 3.9 สูตรการเตรียมยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรปริมาณสารฟอสฟอรัส

Ingredients	Quantities (phr)				
	0 wt%	3 wt%	6 wt%	12 wt%	24 wt%
Natural rubber	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
Polypropylene	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0
Propylene-ethylene copolymer	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0
Ultra-plast TP01 <sup>TM</sup>	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
IRGANOX 1076	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
IRGAFOS 168	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
White oil	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
$\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$	0.0	7.7	16.0	34.1	78.9
TMPTMA	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
DCP	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0

\*wt% of the mixture หมายถึง เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของยางธรรมชาติ โพลีโพรพิลีน โคพอลิเมอร์ของโพรพิลีนเอทิลีน และสารฟอสฟอรัส

ตารางที่ 3.10 การวิเคราะห์และการทดสอบสมบัติของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรปริมาณสารฟอสฟอรัส แปรปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ และแปรสารฟอสฟอรัสที่มีการปรับปรุงสภาพผิว

การวิเคราะห์/การทดสอบ	เครื่องมือ
<p>■ สมบัติเชิงกล</p> <p>-ความต้านทานต่อแรงดึง ระยะยืดที่จุดขาดและการผิดรูปถาวรแบบดึง</p>	▶ Universal testing machine
<p>■ ความแข็ง</p>	▶ Shore Hardness tester
<p>■ การเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกล</p> <p>-ความต้านทานต่อแรงดึงและระยะยืดที่จุดขาด</p>	▶ Universal testing machine
<p>■ สัณฐานวิทยา</p> <p>-สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ที่ผสมสารฟอสฟอรัส</p> <p>-การกระจายตัวของสารฟอสฟอรัสในพอลิเมอร์ที่ผสมสารฟอสฟอรัส</p>	<p>▶ Scanning electron microscope (SEM)</p> <p>▶ Bright field microscope with fluorescence and phase contrast technique</p>
<p>■ สมบัติทางแสง</p> <p>-ความยาวคลื่นที่กระตุ้น และความยาวคลื่นที่ปลดปล่อย</p> <p>-ระยะเวลาการคงอยู่ของแสงที่ปลดปล่อยหลังหยุดกระตุ้น</p>	<p>▶ Spectrofluorometer</p> <p>▶ Luminance meter</p>
<p>■ สมบัติทางแสงภายหลังการบ่มเร่ง</p> <p>-ความยาวคลื่นที่กระตุ้น และความยาวคลื่นที่ปลดปล่อย</p> <p>-ระยะเวลาการคงอยู่ของแสงที่ปลดปล่อยหลังหยุดกระตุ้น</p>	<p>▶ Spectrofluorometer</p> <p>▶ Luminance meter</p>
<p>■ สมบัติเชิงความร้อน</p> <p>-ความเสถียรทางความร้อน</p>	▶ Thermogravimetric analyzer (TGA)
<p>■ สมบัติการไหล</p>	▶ Capillary rheometer

### 3.3.6. การศึกษาอิทธิพลของปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อสมบัติของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส

การเตรียมยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกจากการเบลนด์ระหว่าง NR/PP/PEC ตามขั้นตอนในหัวข้อที่ 3.3.3. มีขั้นตอนการผสมแบบ Precompound – I ทำการแปรปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณ 0, 10, 15, 20 และ 25 phr โดยใช้สารเคมีดังตารางที่ 3.11 ซึ่งในขั้นตอนการเติมสารไทเทเนียมไดออกไซด์จะเติมพร้อมกับสารฟอสฟอรัส จากนั้นวิเคราะห์และทดสอบสมบัติของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 3.10

ตารางที่ 3.11 สูตรการเตรียมยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรปริมาณสารไทเทเนียมไดออกไซด์

Ingredients	Quantities (phr)				
	0	10	15	20	25
Natural rubber	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
Polypropylene	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0
Propylene-ethylene copolymer	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0
Ultra-plast TP01 <sup>TM</sup>	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
IRGANOX 1076	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
IRGAFOS 168	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
White oil	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
SrAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> :Eu <sup>2+</sup> (12 wt% of the mixture)*	34.1	34.1	34.1	34.1	34.1
TiO <sub>2</sub>	0.0	10.0	15.0	20.0	25.0
TMPTMA	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
DCP	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0

\*wt% of the mixture หมายถึง เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของยางธรรมชาติ โพลีโพรพิลีน โคโพลิเมอร์ของโพรพิลีนเอทิลีน และสารฟอสฟอรัส



### 3.4. การทดสอบสมบัติของสารฟอสฟอรัสและยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก

#### 3.4.1. วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารฟอสฟอรัส

การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารฟอสฟอรัสใช้เครื่อง X-ray diffractometer (XRD) โดยตรวจวัดที่ตำแหน่ง 2-theta ตั้งแต่ 5° ถึง 90°

#### 3.4.2. วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสารฟอสฟอรัส

การตรวจวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณของสารประกอบอินทรีย์ใช้เครื่อง Fourier transform infrared spectrometer (FTIR) เตรียมชิ้นทดสอบโดยนำสารฟอสฟอรัสไปผสมกับ KBr จากนั้นอัดเป็นแผ่น แล้วนำไปทดสอบโดยใช้เทคนิค Transmission ใช้แสงอินฟราเรดในช่วงเลขคลื่น 400-4000  $\text{cm}^{-1}$

#### 3.4.3. การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของสารฟอสฟอรัส

##### 3.4.3.1. สารฟอสฟอรัสทางการค้า

การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของสารฟอสฟอรัสใช้เครื่อง Laser particle size analyzer (LPSA) ในการทดสอบจะใช้ตัวกลางเป็นน้ำ

##### 3.4.3.2. สารฟอสฟอรัสที่ผ่านการปรับปรุงผิวหรือแช่น้ำ

การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของสารฟอสฟอรัสที่ผ่านการปรับปรุงผิวหรือแช่น้ำจะใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยมีการเตรียมตัวอย่างเช่นเดียวกับการศึกษาสัณฐานวิทยาของสารฟอสฟอรัส ใช้กำลังขยาย 100 เท่า ร่วมกับการใช้โปรแกรม ImageJ ในการวิเคราะห์

#### 3.4.4. การวิเคราะห์ค่ามุมสัมผัส

การวิเคราะห์ค่ามุมสัมผัสของน้ำกับผงสารฟอสฟอรัสใช้เครื่อง Contact angle measurement โดยการทดสอบจะต้องอัดผงสารฟอสฟอรัสให้เป็นแผ่นด้วยเครื่องอัด (Hydraulic press) ก่อนที่จะทำไปทดสอบ

#### 3.4.5. การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

##### 3.4.5.1. สารฟอสฟอรัส

การทดสอบลักษณะทางด้านสัณฐานวิทยาของสารฟอสฟอรัส โดยนำสารฟอสฟอรัสมาทำการเคลือบด้วยทองคำโดยนำตัวอย่างวางในเครื่อง Sputter coater ซึ่งภายในเครื่องเป็นสถานะสุญญากาศ ปล่อยก๊าซอาร์กอน (Ar) เข้ามาและปรับกระแสไฟฟ้า ก๊าซจะเกิดแตกตัวเป็นอิเล็กตรอน

วิ่งไปชนแผ่นทองและลงมาเคลือบที่ชิ้นตัวอย่างเป็นระยะเวลา 2 นาที แล้วส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 200 เท่า และ 1,500 เท่า

#### 3.4.5.2. ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกแบบไม่สกัดเฟส

การทดสอบลักษณะทางด้านสัณฐานวิทยาโดยการหักชิ้นตัวอย่างในไนโตรเจนเหลวเพื่อให้ได้ผิวทดสอบใหม่ หลังจากนั้นทำการเคลือบผิวหน้าที่เปิดใหม่ด้วยทองคำเป็นระยะเวลา 2 นาที แล้วส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 200 เท่า และ 1,000 เท่า

#### 3.4.5.3. ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกแบบสกัดเฟส

1) กรณีใช้เทคนิคการเบลนด์แบบปกติ การทดสอบลักษณะทางด้านสัณฐานวิทยาโดยการหักชิ้นตัวอย่างในไนโตรเจนเหลวเพื่อให้ได้ผิวทดสอบใหม่ หลังจากนั้นทำการสกัดเฟสยางออก โดยแช่ในโทลูอีน (Toluene) เป็นเวลาประมาณ 24 ชั่วโมง อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 40°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการเคลือบด้วยทองคำเป็นระยะเวลา 2 นาที แล้วส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 200 เท่า และ 2,000 เท่า

2) กรณีใช้เทคนิคการเบลนด์แบบการวัลคาไนซ์แบบไดนามิกส์ การทดสอบลักษณะทางด้านสัณฐานวิทยาโดยการหักชิ้นตัวอย่างในไนโตรเจนเหลวเพื่อให้ได้ผิวทดสอบใหม่ หลังจากนั้นทำการสกัดเฟสพลาสติกออก โดยต้มในโซลีนเต็ดเป็นเวลาประมาณ 15 นาที อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 40°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการเคลือบด้วยทองคำเป็นระยะเวลา 2 นาที แล้วส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า

### 3.4.6. สมบัติเชิงแสง

#### 3.4.6.1. สารฟอสฟอรัส

1) การศึกษาความยาวคลื่นที่กระตุ้น (Excitation spectra) เตรียมชิ้นตัวอย่างโดยใช้ผงสารฟอสฟอรัสมาอัดเป็นแผ่นด้วยเครื่องอัด (Hydraulic press) ก่อนที่จะทำไปทดสอบ การทดสอบจะใช้เครื่องสเปกโตรฟลูออโรมิเตอร์ โดยใช้พารามิเตอร์ดังตารางที่ 3.19

#### หลักการทดสอบความยาวคลื่นที่กระตุ้น

การหาความยาวคลื่นที่กระตุ้นเป็นการหาความยาวคลื่นที่เหมาะสมเพื่อไปกระตุ้นให้วัสดุปลดปล่อยแสงสูงสุด โดยการกำหนดความยาวคลื่นที่ตรวจวัดค่าหนึ่ง ในที่นี้จะใช้ความยาวคลื่นเท่ากับ 515 nm เนื่องจากเป็นความยาวคลื่นที่สารฟอสฟอรัสปลดปล่อยแสงสูงสุด แล้วให้ความยาวคลื่นในช่วงที่เราสนใจไปกระตุ้น ในที่นี้ใช้ตั้งแต่ 300-500 nm เพื่อดูว่าความยาวคลื่นใดที่กระตุ้นสารฟอสฟอรัสแล้วให้การปลดปล่อยแสงของสารฟอสฟอรัสที่ความยาวคลื่นตรวจวัด 515 nm ได้สูงที่สุด ดังนั้นการทดสอบการหาความยาวคลื่นที่กระตุ้นนี้ควรที่จะรู้ว่าสารชนิดนั้นปลดปล่อยแสงที่ความยาว

คลื่นใดก่อน เพื่อที่จะกำหนดความยาวคลื่นที่ตรวจวัดได้ถูกต้อง ดังนั้นหากไม่ทราบว่สารนั้นมีการปลดปล่อยแสงที่ความยาวคลื่นใดให้หาความยาวคลื่นที่ปลดปล่อยก่อน โดยใช้ความยาวคลื่นใดก็ได้ที่ให้สารนั้นเกิดการปลดปล่อยแสงออกมา เพราะความยาวคลื่นที่ปลดปล่อยจะเป็นลักษณะเฉพาะของสารนั้น

2) การศึกษาความยาวคลื่นที่ปลดปล่อย (Emission spectra) ใช้ขั้นตอนทดสอบเดียวกันกับการศึกษาความยาวคลื่นที่กระตุ้น การทดสอบจะใช้เครื่องสเปกโทรฟลูออโรมิเตอร์ โดยใช้พารามิเตอร์ดังตารางที่ 3.19

#### หลักการทดสอบความยาวคลื่นที่ปลดปล่อย

การหาความยาวคลื่นที่ปลดปล่อย ทำได้โดยกำหนดความยาวคลื่นที่ไปกระตุ้น ซึ่งควรที่จะเป็นความยาวคลื่นที่ทำให้การปลดปล่อยแสงได้ดี ในที่นี้จะใช้ความยาวคลื่นที่ไปกระตุ้นเท่ากับ 365 nm เนื่องจากเป็นความยาวคลื่นที่เมื่อกระตุ้นสารฟอสฟอรัสแล้วสารฟอสฟอรัสสามารถปลดปล่อยแสงได้ดีที่สุด จากนั้นกำหนดช่วงความยาวคลื่นที่สนใจเพื่อตรวจวัด ในที่นี้จะตรวจวัดที่ความยาวคลื่น 450 nm ถึง 600 nm เพราะทราบแล้วว่าสารฟอสฟอรัสปลดปล่อยแสงประมาณ 515 nm

ตารางที่ 3.17 พารามิเตอร์ในการศึกษาความยาวคลื่นที่กระตุ้นและที่ปลดปล่อยของสารฟอสฟอรัส

Parameter	Excitation spectra measurement	Emission spectra measurement
Mode	Excitation	Emission
Ex bandwidth	5 nm	5 nm
Em bandwidth	5 nm	5 nm
Response	0.1 sec	0.1 sec
Sensitivity	Very low	Very low
Measurement range	300 - 500 nm	450 - 600 nm
Data interval	1 nm	1 nm
Em wavelength	515.0 nm	-
Ex wavelength	-	365.0 nm
Scan speed	500 nm/min	500 nm/min
Auto gain	Off	Off
Light source	Xe lamp	Xe lamp
Filter	Not used	Not used
Blank correction	Off	Off

3) ระยะเวลาการคงอยู่ของแสงที่ปลดปล่อยหลังหยุดกระตุ้นโดยนำผงสารฟอสฟอร์ น้ำหนัก  $0.0840 \pm 0.0020$  g ไปกระตุ้นด้วยแสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ (UVA, 315-400 nm) เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นวัดการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงที่ปลดปล่อยหลังหยุดกระตุ้นที่ระยะเวลาต่างๆ ด้วยเครื่อง luminance meter

#### ที่มาของน้ำหนักผงสารฟอสฟอร์ที่ใช้ในการทดสอบ

- ปริมาตรชิ้นทดสอบ (ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก) เท่ากับ  $1.6 \text{ cm}^3$   
 ความถ่วงจำเพาะของชิ้นทดสอบเท่ากับ 0.94  
 ดังนั้น น้ำหนักของชิ้นทดสอบเท่ากับ  $1.504 \text{ g} (1.6 \times 0.94)$
- phr รวม (ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก) เท่ากับ 287  
 phr ของสารฟอสฟอร์ เท่ากับ 16  
 ดังนั้น น้ำหนักของสารฟอสฟอร์ในชิ้นทดสอบ (ที่ใช้สารฟอสฟอร์ 6 wt% of the polymer) เท่ากับ  $0.084 \text{ g} (16 \times 1.504 / 287)$

#### 3.4.6.2. ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก

1) การศึกษาความยาวคลื่นที่กระตุ้น (Excitation spectra) และเตรียมชิ้นตัวอย่างผิวเรียบขนาด  $17 \times 40 \text{ mm}$  หนาประมาณ  $1 \text{ mm}$  โดยใช้เครื่องสเปกโทรฟลูออโรมิเตอร์ โดยใช้พารามิเตอร์ดังตารางที่ 3.20

2) การศึกษาความยาวคลื่นที่ปลดปล่อย (Emission spectra) และใช้ชิ้นทดสอบเดียวกันกับการศึกษาความยาวคลื่นที่กระตุ้น โดยใช้เครื่องสเปกโทรฟลูออโรมิเตอร์ โดยใช้พารามิเตอร์ดังตารางที่ 3.20

ในหัวข้อการศึกษาอิทธิพลของปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ การกระตุ้น (Ex wavelength) ใช้ 2 ความยาวคลื่น คือ  $375 \text{ nm}$  และ  $420 \text{ nm}$  และตรวจวัดความยาวคลื่นที่ปลดปล่อยในช่วง (Measurement range)  $450\text{-}650 \text{ nm}$  โดยพารามิเตอร์อื่นๆยังคงเดิม

ตารางที่ 3.18 พารามิเตอร์ในการศึกษาความยาวคลื่นที่กระตุ้นและที่ปลดปล่อยของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก

Parameter	Excitation spectra measurement	Emission spectra measurement
Mode	Excitation	Emission
Ex bandwidth	5 nm	5 nm
Em bandwidth	5 nm	5 nm
Response	0.1 sec	0.1 sec
Sensitivity	Low	Low
Measurement range	300 - 500 nm	450 - 600 nm
Data interval	1 nm	1 nm
Em wavelength	515.0 nm	-
Ex wavelength	-	375.0 nm
Scan speed	500 nm/min	500 nm/min
Auto gain	Off	Off
Light source	Xe lamp	Xe lamp
Filter	Not used	Not used
Blank correction	Off	Off

3) ระยะเวลาการคงอยู่ของแสงที่ปลดปล่อยหลังหยุดกระตุ้น โดยเตรียมชิ้นตัวอย่างผิวเรียบขนาดประมาณ 40 x 40 mm หนาประมาณ 1 mm ไปกระตุ้นด้วยแสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ (UVA, 315-400 nm) เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นวัดการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงที่ปลดปล่อยหลังหยุดกระตุ้นที่ระยะเวลาต่างๆ ด้วยเครื่อง luminance meter

### 3.4.7. ความทนทานต่อน้ำของสารฟอสฟอรัส

#### 3.4.7.1. การเปลี่ยนแปลงของค่า pH

การเปลี่ยนแปลงของค่า pH นำจากผลการสลายตัวทางโครงสร้างของสารฟอสฟอรัส โดยนำสารฟอสฟอรัสไปแช่ในน้ำ ซึ่งมีอัตราส่วนระหว่างสารฟอสฟอรัสต่อน้ำเท่ากับ 1:20 ขณะแช่น้ำให้ใช้แท่งแม่เหล็กกวนเบาๆ (Magnetic bar) ตลอดเวลา ในการวัดค่า pH ของน้ำที่เปลี่ยนไปหลังการแช่น้ำจะใช้เครื่องวัดความเป็นกรดต่าง (pH meter) วัดค่า pH ในช่วงเวลาต่างๆ ที่สนใจ

### 3.4.7.2. สมบัติพื้นฐานทางกายภาพ

สมบัติทางแสง โครงสร้างผลึก สัณฐานวิทยา และการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของ สารฟอสฟอรัสที่ผ่านการแช่น้ำ เตรียมตัวอย่างโดยนำสารฟอสฟอรัสไปแช่ในน้ำ ซึ่งมีอัตราส่วนระหว่าง สารฟอสฟอรัสต่อน้ำเท่ากับ 1:20 ขณะแช่น้ำให้ใช้แท่งแม่เหล็กกวนเบาๆ ตลอดเวลา เมื่อครบเวลาที่ กำหนดให้นำสารฟอสฟอรัสมากรอง แล้วไปอบให้แห้ง จากนั้นนำสารฟอสฟอรัสที่ได้ไปทดสอบสมบัติ ข้างต้น

### 3.4.8. สมบัติการดึง (Tensile properties)

การเตรียมชิ้นทดสอบเพื่อทดสอบสมบัติการดึง ใช้แผ่นยางวัลคาไนซ์ที่มีความหนา 1 มิลลิเมตร นำมาตัดเป็นชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ Die D ตามมาตรฐาน ASTM D412 ซึ่งมีขนาดความ ยาว 100 มิลลิเมตร กว้าง  $3 \pm 0.05$  มิลลิเมตร ชิ้นทดสอบทุกชิ้นต้องวัดความหนาที่บริเวณกึ่งกลาง 3 จุดแล้วหาค่ากลาง พร้อมทั้งกำหนดระยะเริ่มต้นของการทดสอบ เพื่อติดตามระยะการยืดของชิ้น ทดสอบ

การทดสอบจะใช้เครื่องทดสอบสมบัติการดึง (Universal testing machine) โดยชิ้น ทดสอบถูกติดตั้งเข้ากับเครื่องทดสอบ และถูกดึงด้วยความเร็ว  $500 \pm 5$  มิลลิเมตร/นาที ค่าที่ตรวจวัด คือ มอดูลัสที่ระยะยืด X% ความต้านทานต่อแรงดึง และระยะยืดที่จุดขาด โดยใช้สมการดังต่อไปนี้ การคำนวณ

$$\text{Modulus at X\% strain (MPa)} = F/A \quad (3.1)$$

โดยที่ F คือ แรงที่ใช้ดึงที่ระยะยืด X เปอร์เซ็นต์ (นิวตัน)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบเริ่มต้น (ตารางมิลลิเมตร)

X คือ ระยะยืด (%)

$$\text{Tensile strength (MPa)} = F/A \quad (3.2)$$

โดยที่ F คือ แรงที่ใช้ดึงยางจนขาด (นิวตัน)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบขณะไม่ได้ยืด (ตารางมิลลิเมตร)

$$\text{Elongation at break (\%)} = [(L_1 - L_0) / L_0] \times 100 \quad (3.3)$$

โดยที่  $L_1$  คือ ระยะห่างระหว่างเส้นที่ขีดบนชิ้นทดสอบเมื่อยืดจนขาด (เซนติเมตร)

$L_0$  คือ ระยะห่างระหว่างเส้นที่ขีดบนชิ้นทดสอบก่อนการทดสอบ (เซนติเมตร)

### 3.4.9. การผิดรูปถาวรแบบดึง (Tension set)

การทดสอบสมบัติการผิดรูปถาวรแบบดึงโดยใช้มาตรฐาน ASTM D412 (2005) ใช้ชิ้นทดสอบตามข้อ 3.4.7 มาจับยึดออกให้ได้ระยะ 100% โดยยึดในระยะนี้เป็นเวลานาน 10 นาที เมื่อครบระยะเวลา 10 นาที ให้ปล่อยตัวจับ และให้ระยะเวลาชิ้นทดสอบกลับคืนรูปเป็นเวลา 10 นาที เมื่อครบกำหนดเวลา 10 นาที ให้วัดระยะห่างระหว่างเส้นที่ขีดไว้ตั้งแต่ต้น การคำนวณเปอร์เซ็นต์การผิดรูปจะใช้สมการที่ 3.4

การคำนวณ

$$\text{Tension set (\%)} = [(L - L_0) / L_0] \times 100 \quad (3.4)$$

โดยที่  $L$  คือ ระยะห่างระหว่างเส้นที่ขีดบนชิ้นทดสอบหลังจากตั้งไว้ 10 นาที (มิลลิเมตร)

$L_0$  คือ ระยะห่างระหว่างเส้นที่ขีดบนชิ้นทดสอบเริ่มต้น (มิลลิเมตร)

### 3.4.10. สมบัติความแข็ง (Hardness)

ทดสอบสมบัติด้านความแข็งโดยใช้ Durometer แบบ Shore A ตามมาตรฐาน ASTM D2240 ตัวอย่างที่ทดสอบชิ้นทดสอบมีความหนาประมาณ 8-10 มิลลิเมตร กว้างไม่น้อยกว่า 20 มิลลิเมตร กดให้แบนของเครื่องทดสอบสัมผัสหน้ายางโดยตลอด ทำการวัด 5 จุด ใช้ค่ากลางของข้อมูล (Median) เป็นความแข็งของตัวอย่างที่ทดสอบ

### 3.4.11. สมบัติหลังการบ่มแรงด้วยความร้อน (Aging properties) ของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก

#### 3.4.11.1. สมบัติเชิงกล

ทำการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อการบ่มแรงตามมาตรฐาน ASTM D573 โดยใช้ชิ้นตัวอย่างแบบเดียวกับที่ใช้ทดสอบการดึงในหัวข้อที่ 3.4.7 เตรียมยางตัวอย่าง 2 ชุด คือ ชุดแรกไม่บ่มแรงเพื่อใช้เปรียบเทียบสมบัติของพอลิเมอร์เบลนด์ที่เปลี่ยนแปลงไป ส่วนชุดที่ 2 ทำการบ่มแรงด้วยตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง หลังจากการบ่มแรงให้พักชิ้นตัวอย่างไว้เป็นเวลา 1 วัน ก่อนที่จะนำไปทดสอบสมบัติการดึงและความสามารถในการยืด แล้วคำนวณร้อยละการคงอยู่ของสมบัติไป ดังสมการที่ 3.6

## การคำนวณ

$$\text{การคงอยู่ของสมบัติ (\%)} = (X_b/X_a) \times 100 \quad (3.6)$$

โดยที่  $X_a$  คือ สมบัติก่อนการบ่มเร่ง

$X_b$  คือ สมบัติหลังการบ่มเร่ง

### 3.4.11.2. สมบัติเชิงแสง

ทำการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อการบ่ม โดยใช้ชิ้นตัวอย่างแบบเดียวกับที่ใช้ทดสอบสมบัติทางแสงในหัวข้อที่ 3.4.6.2 ทำการบ่มเร่งด้วยตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง หลังจากการบ่มเร่งให้พักชิ้นตัวอย่างไว้เป็นเวลา 1 วัน ก่อนที่จะนำไปทดสอบสมบัติทางแสงในหัวข้อที่ 3.4.6.2

### 3.4.12. ลักษณะการกระจายตัวของสารฟอสฟอรัส

การศึกษาลักษณะการกระจายตัวของสารฟอสฟอรัสใช้กล้องจุลทรรศน์ชนิด 3 กระบอกตา เตรียมตัวอย่างให้เป็นแผ่นบางประมาณ 0.1-0.2 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปยาง จากนั้นทำความสะอาดชิ้นตัวอย่าง แล้วนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิด 3 กระบอกตา ที่กำลังขยาย 4 เท่า โดยใช้แสงที่มีความยาวคลื่น 450-490 nm

### 3.4.13. สมบัติความเสถียรต่อความร้อนด้วยเทคนิค TGA

การวิเคราะห์สมบัติความเสถียรต่อความร้อนโดยใช้เครื่อง Thermogravimetric analyzer โดยใช้ชิ้นตัวอย่างที่มีน้ำหนักอยู่ในช่วง 12-16 mg ทดสอบในสภาวะก๊าซ ไนโตรเจนซึ่งเป็นการสลายตัวของตัวอย่างจากอิทธิพลของความร้อน (Thermal degradation) โดยกำหนดสภาวะการทดสอบดังนี้ อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนเท่ากับ 20 ml/min ทดสอบในช่วง อุณหภูมิ 50-550°C ใช้อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเท่ากับ 5°C/min รายงานผลเป็นค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักภายใต้ อุณหภูมิและอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหายภายใต้อุณหภูมิ

### 3.4.14. สมบัติการไหลด้วยเครื่อง Capillary rheometer

ทำการทดสอบสมบัติการไหลของชิ้นทดสอบด้วยเครื่อง Capillary rheometer ที่อุณหภูมิ 200°C และตั้งค่าอัตราการเฉือนเท่ากับ 50, 100, 250, 500, 1,000, 1,250 และ 1,500 s<sup>-1</sup> โดยใช้สายที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 mm ความยาว 32 mm และมุมไหลเข้า 180°



### 3.4.15. การหาประสิทธิภาพของสารฟอสฟอรัสภายหลังการปรับปรุงผิว

การหาประสิทธิภาพของสารฟอสฟอรัสภายหลังการปรับปรุงผิวได้จากกราฟระยะเวลาการคงอยู่ของแสงที่ปลดปล่อยหลังหยุดกระตุ้น การรายงานจะรายงานเป็นค่าเฉลี่ย โดยมีการคำนวณดังนี้

การคำนวณ

$$\text{Efficiency (\%)} = [(I_c - I_0) / I_0] \times 100 \quad (3.7)$$

โดยที่  $I_0$  คือ ความเข้มแสงหลังหยุดกระตุ้นที่ระยะเวลา  $\times$  วินาที ของสารฟอสฟอรัสก่อนการปรับปรุงผิว

$I_c$  คือ ความเข้มแสงหลังหยุดกระตุ้นที่ระยะเวลา  $\times$  วินาที ของสารฟอสฟอรัสที่ผ่านการปรับปรุงผิว

### 3.4.16. อัตราการลดลงของความเข้มแสงหลังหยุดกระตุ้น

อัตราการลดลงของความเข้มแสงหลังหยุดกระตุ้นหาได้จากความชันของกราฟระยะเวลาการคงอยู่ของแสงที่ปลดปล่อยหลังหยุดกระตุ้นที่เขียนในแกน Logarithm การคำนวณ

$$\text{อัตราการลดลงของความเข้มแสง (Slope)} = (y_2 - y_1) / (x_2 - x_1) \quad (3.8)$$

### 3.4.17. เปอร์เซนต์การคงอยู่ของความเข้มแสงของสารฟอสฟอรัส

เปอร์เซนต์การคงอยู่ของความเข้มแสงของสารฟอสฟอรัสที่ผ่านการแช่น้ำหาได้จากกราฟระยะเวลาการคงอยู่ของแสงที่ปลดปล่อยหลังหยุดกระตุ้น การรายงานจะรายงานเป็นค่าเฉลี่ย โดยมีการคำนวณดังนี้

การคำนวณ

$$\text{การคงอยู่ของสมบัติ (\%)} = (X_b / X_a) \times 100 \quad (3.9)$$

โดยที่  $X_a$  คือ ความเข้มแสงหลังหยุดกระตุ้นที่ระยะเวลา  $\times$  นาที ของสารฟอสฟอรัสก่อนการแช่น้ำ

$X_b$  คือ ความเข้มแสงหลังหยุดกระตุ้นที่ระยะเวลา  $\times$  นาที ของสารฟอสฟอรัสหลังการแช่น้ำ