

บทที่ 4

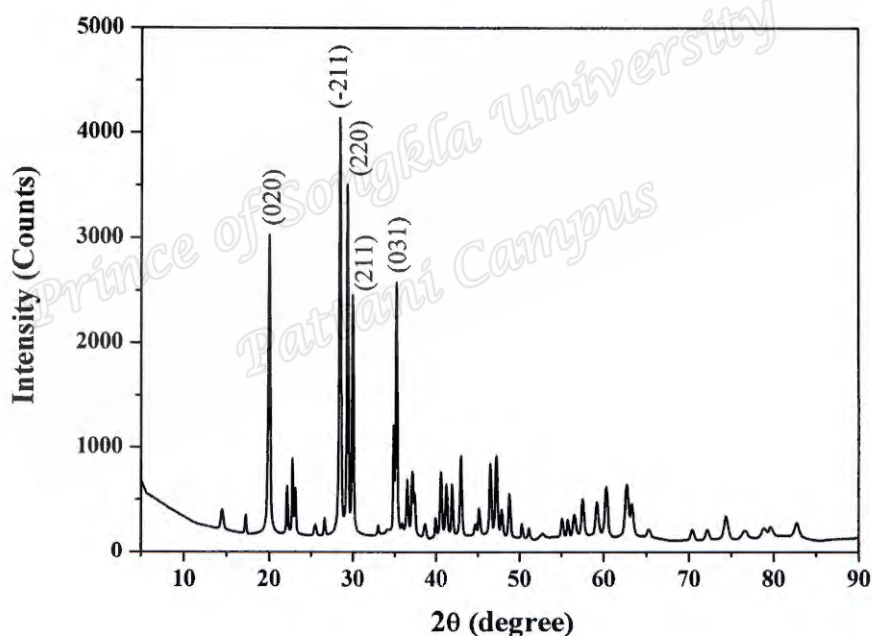
ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1. การวิเคราะห์สมบัติพื้นฐานทางกายภาพ สมบัติทางแสงและความทนทานต่อน้ำของสารฟอสฟอร์

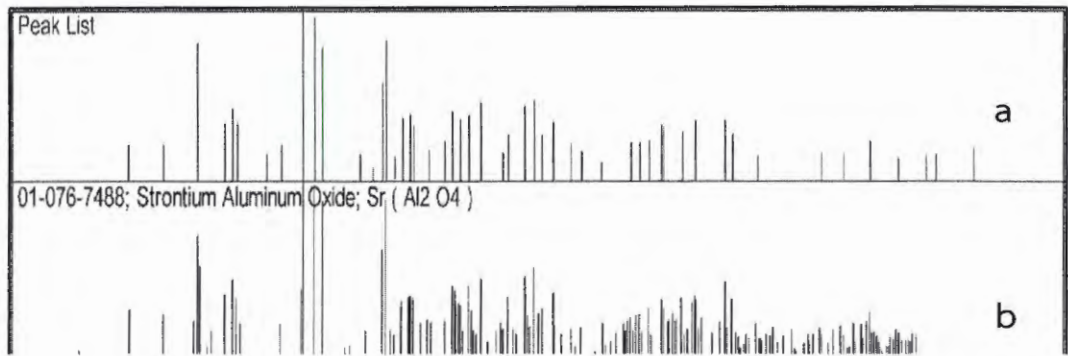
4.1.1. สมบัติทางกายภาพ (Physical properties)

4.1.1.1. การวิเคราะห์โครงสร้าง

การวิเคราะห์โครงสร้างของสารฟอสฟอร์ใช้วิธี X-ray crystallography ซึ่งอาศัยคุณสมบัติการเลี้ยวเบน (Diffraction) ของรังสีเอกซ์เมื่อส่องผ่านโครงสร้างผลึก วิธีนี้ทำให้ทราบรายละเอียดการจัดเรียงตัวของอะตอมในโครงสร้างผลึกได้อย่างละเอียดประมาณ 1 Å ซึ่งได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.1 และ 4.2



รูปที่ 4.1 X-ray diffraction pattern ของสารฟอสฟอร์ชนิด $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$

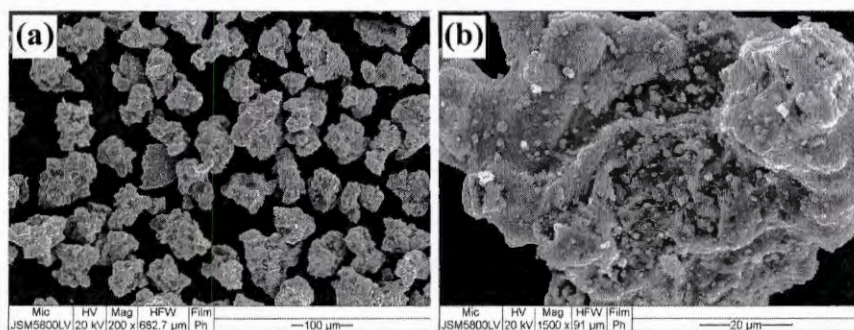


รูปที่ 4.2 X-ray diffraction pattern ของ a. สารฟอสฟอรัสชนิด SrAl₂O₄:Eu²⁺ เปรียบเทียบกับ b. ฐานข้อมูล Sr(Al₂O₄) ในแฟ้มข้อมูล JCPDS หมายเลข 01-076-7488

การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารฟอสฟอรัสชนิด SrAl₂O₄:Eu²⁺ พบว่าลักษณะของพีคที่ปรากฏในรูปที่ 4.1 ตรงกับสารเรืองแสงชนิดสโตนเทียมนอะลูมิเนียมเตเจอร์โรเปียม (SrAl₂O₄:Eu²⁺) โดยมีพีคที่ตำแหน่ง 2-theta ที่ระนาบ (020), (-211), (220), (211) และ (031) (Bem *et al.*, 2009; Bem *et al.*, 2010) ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะของพีคมาตรฐานในแฟ้มข้อมูล JCPDS หมายเลข 01-076-7488 ซึ่งเป็นของ SrAl₂O₄ ดังปรากฏในรูปที่ 4.2

4.1.1.2. สัณฐานวิทยา

จากการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของสารฟอสฟอรัสชนิด SrAl₂O₄:Eu²⁺ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงดังรูปที่ 4.3

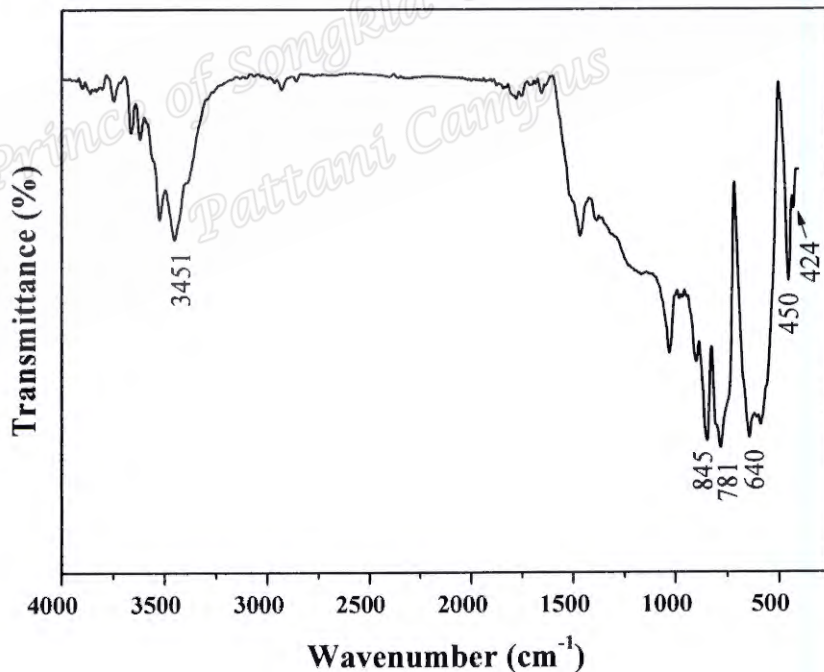


รูปที่ 4.3 สัณฐานวิทยาของสารฟอสฟอรัสชนิด SrAl₂O₄:Eu²⁺ ที่กำลังขยาย (a) 200 เท่า และ (b) 1,500 เท่า

จากการทดสอบสมบัติทางสัณฐานวิทยาของสารฟอสฟอรัสชนิด $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะให้ผลดังรูปที่ 4.3 (a) และ (b) เมื่อพิจารณารูป 4.3 (a) ที่กำลังขยาย 200 เท่า พบว่าสารฟอสฟอรัสมีรูปร่างไม่แน่นอน ขนาดอนุภาคมีการกระจายตัวค่อนข้างสม่ำเสมออยู่ที่ประมาณ 60-100 μm และเมื่อพิจารณารูปที่ 4.3 (b) ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า เป็นการดูผิวของอนุภาคสารฟอสฟอรัสพบว่า ผิวของอนุภาคสารฟอสฟอรัสมีลักษณะขรุขระและมีอนุภาคสารฟอสฟอรัสขนาดเล็กเกาะอยู่บนผิวของอนุภาคสารฟอสฟอรัสที่มีขนาดใหญ่

4.1.1.3. การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสารฟอสฟอรัสชนิด $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$ ใช้หลักการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด (Infrared radiation; IR) รังสีจะถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานของการสั่นของโมเลกุล ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง dipole moment จะตรวจพบในสเปกตรัม IR ซึ่งได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.4



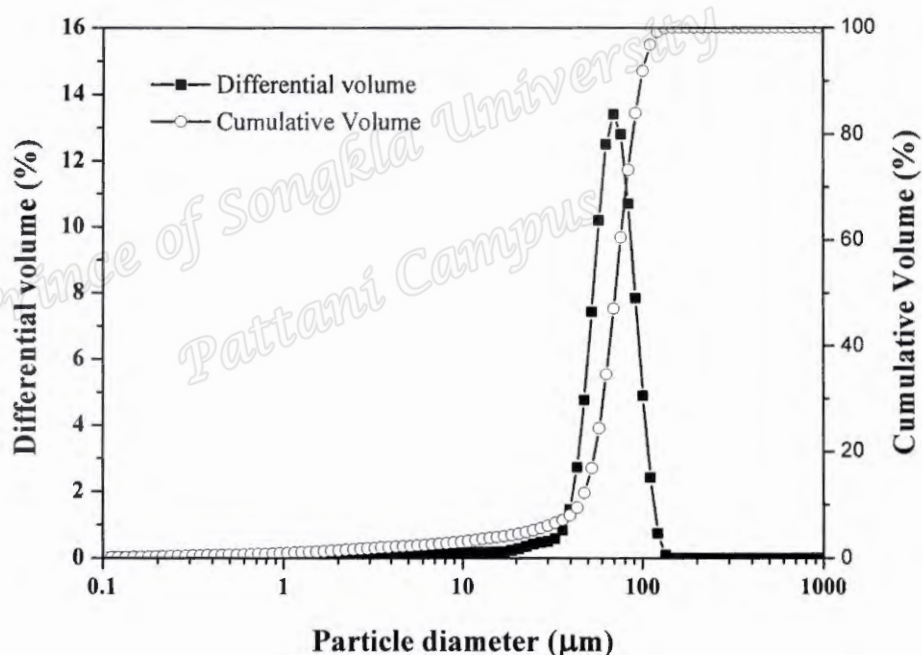
รูปที่ 4.4 สเปกตรัมอินฟราเรดของสารฟอสฟอรัสชนิด $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$

จากรูปที่ 4.4 เป็นลักษณะพีคการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของผงสารฟอสฟอรัสชนิด $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$ พบว่าสารฟอสฟอรัสดูดกลืนรังสีอินฟราเรดในช่วงเลขคลื่น 900-400 cm^{-1} ซึ่งปรากฏพีค

ที่ตำแหน่ง 845 cm^{-1} , 781 cm^{-1} , 640 cm^{-1} , 450 cm^{-1} และ 424 cm^{-1} (Zhu *et al.*, 2009b) โดยความยาวคลื่นประมาณ 781 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบยืดที่สมมาตร (Symmetric stretching) ที่ตำแหน่ง 450 cm^{-1} และ 424 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบงอที่สมมาตร (Symmetric bending) ที่ตำแหน่งช่วง 845 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบยืดอสมมาตร (Antisymmetric stretching) และที่ตำแหน่งช่วง 640 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบงออสมมาตร (Antisymmetric bending) ของ AlO_4 ใน SrAl_2O_4 (Nag and Kutty, 2003; Nag and Kutty, 2004) ทั้งนี้ยังพบพีคที่ตำแหน่ง 3451 cm^{-1} ซึ่งเป็นการสั่นของหมู่ O-H บ่งบอกถึงความชื้นที่อยู่ในสารฟอสฟอรัสดังกล่าว

4.1.1.4. การวิเคราะห์ขนาดอนุภาค

การวัดขนาดอนุภาคของผงสารฟอสฟอรัสชนิด $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$ อาศัยเทคนิคการเลี้ยวเบนของคลื่นแสง (Laser diffraction) ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.5



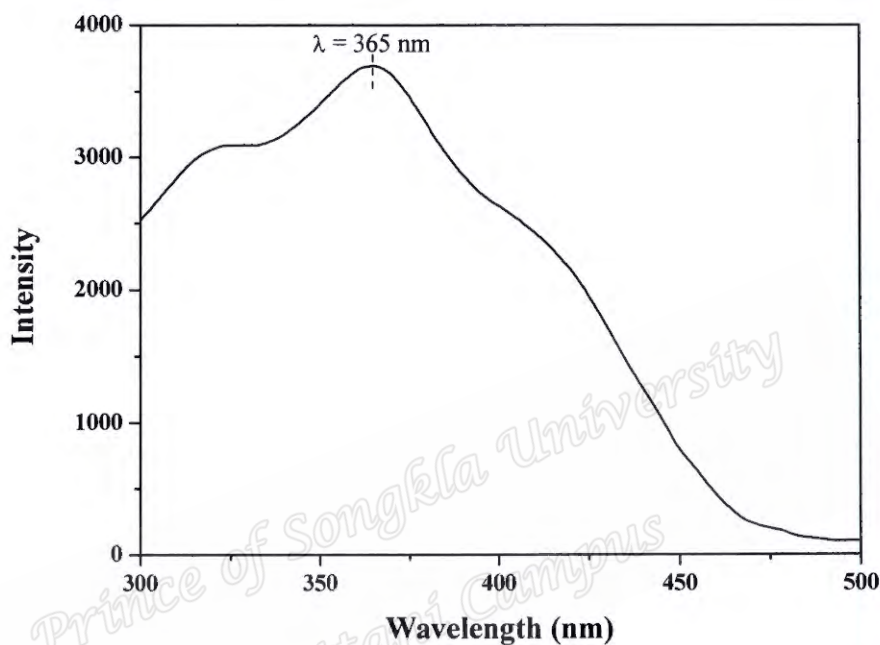
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคกับปริมาณของสารฟอสฟอรัสชนิด $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$

จากรูปที่ 4.5 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคกับปริมาณของสารฟอสฟอรัสชนิด $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$ พบว่าสารฟอสฟอรัสมีขนาดอนุภาคตั้งแต่ประมาณ $20\text{ }\mu\text{m}$ ถึง $105\text{ }\mu\text{m}$ มีการกระจายตัวค่อนข้างสม่ำเสมอ ส่วนใหญ่มีขนาดอนุภาคเท่ากับ $70.3 \pm 23.6\text{ }\mu\text{m}$

4.1.2. สมบัติทางแสง (Luminescent properties)

4.1.2.1. ความยาวคลื่นที่กระตุ้น

การหาความยาวคลื่นที่กระตุ้นเป็นการหาความยาวคลื่นที่เหมาะสมเพื่อไปกระตุ้นให้วัสดุปลดปล่อยแสงสูงสุด โดยการกำหนดความยาวคลื่นที่ตรวจวัดเท่ากับ 515 nm แล้วให้ความยาวคลื่นตั้งแต่ 300-500 nm ไปกระตุ้น ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.6

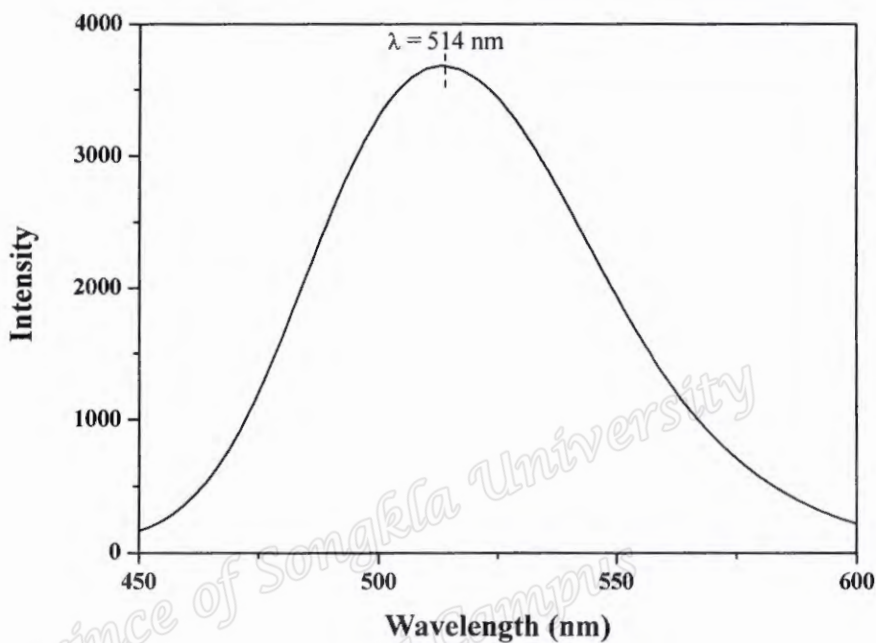


รูปที่ 4.6 สเปกตรัมของการกระตุ้นของสารฟอสฟอรัสชนิด $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$

จากรูปที่ 4.6 สเปกตรัมของการกระตุ้นของสารฟอสฟอรัสชนิด $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$ พบว่าเมื่อกระตุ้นสารฟอสฟอรัสด้วยความยาวคลื่นต่างๆ สารฟอสฟอรัสจะให้การปลดปล่อยแสงที่มีความเข้มต่างกัน โดยสารฟอสฟอรัสชนิดดังกล่าวสามารถถูกกระตุ้นได้ดีในช่วงแสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet light; UV (100-400 nm)) โดยเฉพาะช่วง UVA (315-400 nm) ซึ่งจากผลการทดลองสารฟอสฟอรัสชนิดนี้จะถูกกระตุ้นได้ดีที่สุดที่ความยาวคลื่นประมาณ 365 nm

4.1.2.2. ความยาวคลื่นที่ปลดปล่อย

การหาความยาวคลื่นที่ปลดปล่อยทดสอบโดยกำหนดความยาวคลื่นที่ไปกระตุ้นเท่ากับ 365 nm แล้วตรวจวัดความยาวคลื่นที่ปลดปล่อยออกมา ในช่วงความยาวคลื่น 450 nm ถึง 600 nm ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.7

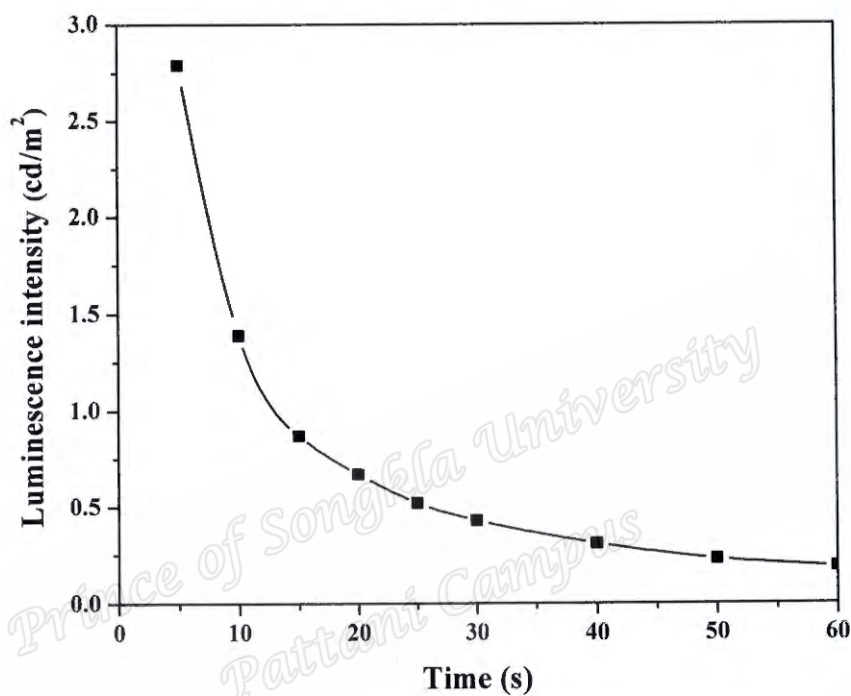


รูปที่ 4.7 สเปกตรัมของการปลดปล่อยของสารฟอสฟอรัสชนิด $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$

จากรูปที่ 4.7 สเปกตรัมของการปลดปล่อยของสารฟอสฟอรัสชนิด $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$ พบว่าเมื่อสารฟอสฟอรัสถูกกระตุ้น สารฟอสฟอรัสปลดปล่อยแสงที่มีความยาวคลื่นประมาณ 450 nm ถึง 600 nm ซึ่งมีความเข้มแตกต่างกัน โดยปลดปล่อยแสงที่มีความเข้มสูงสุดที่ความยาวคลื่นประมาณ 514 nm ซึ่งเป็นแสงสีเขียว เกิดจากอิเล็กตรอนชั้นนอกสุดของ Eu^{2+} ทรานซิชั่นที่ระดับพลังงาน $4f^65d^1 \rightarrow 4f^7$ (Clabau *et al.*, 2005; Bem *et al.*, 2011b; Chen *et al.*, 2009) กล่าวคือ เดิมอิเล็กตรอนชั้นนอกสุดของ Eu^{2+} อยู่ที่สถานะพื้นหรือที่ระดับพลังงาน $4f^7$ เมื่อถูกกระตุ้นด้วยพลังงานแสงหรือโฟตอนที่มีพลังงานเหมาะสมทำให้อิเล็กตรอนที่ชั้นพลังงาน $4f^7$ ย้ายจากตำแหน่งเดิมไปยังสถานะกระตุ้นที่ชั้นพลังงาน $4f^65d^1$ อย่างไรก็ตามอิเล็กตรอนที่สถานะกระตุ้น ($4f^65d^1$) นั้นไม่มีความเสถียรและเพื่อให้เกิดความเสถียรอิเล็กตรอนจึงปลดปล่อยพลังงานออกมาให้ตัวมันมาอยู่ที่ระดับพลังงานเดิมหรือที่สถานะพื้น ($4f^7$) ซึ่งมีความเสถียรมากกว่า

4.1.2.3. ระยะเวลาการคงอยู่ของแสงที่ปลดปล่อยหลังหยุดกระตุ้น

การทดสอบเพื่อยืนยันระยะเวลาการคงอยู่ของแสงที่สารฟอสฟอรัสปลดปล่อยหลังหยุดกระตุ้น ทำได้โดยนำสารฟอสฟอรัสไปกระตุ้นด้วยแสง UVA (315-400 nm) เป็นเวลา 5 นาที แล้ววัดการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงที่ปลดปล่อยหลังหยุดกระตุ้นที่ระยะเวลาต่างๆ ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ระยะเวลาการคงอยู่ของแสงที่ปลดปล่อยหลังหยุดกระตุ้นของสารฟอสฟอรัสชนิด $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$

จากรูปที่ 4.8 พบว่าในช่วงแรกหลังหยุดกระตุ้นสารฟอสฟอรัส แสงที่ปลดปล่อยมีความเข้มสูงและลดลงอย่างรวดเร็ว และหลังจาก 20 วินาที การปลดปล่อยแสงของสารฟอสฟอรัสมีความเข้มแสงเหลือประมาณ 20% ของความเข้มเดิม จากนั้นการลดลงของความเข้มแสงที่ปลดปล่อยช้าลงและค่อนข้างคงที่

ความเข้มแสงที่สารฟอสฟอรัสปลดปล่อยสามารถเทียบกับความสว่างในชีวิตประจำวันได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ความสว่างของวัสดุต่างๆ ในชีวิตประจำวัน (นายเอ็นจิเนียร์, 2553)

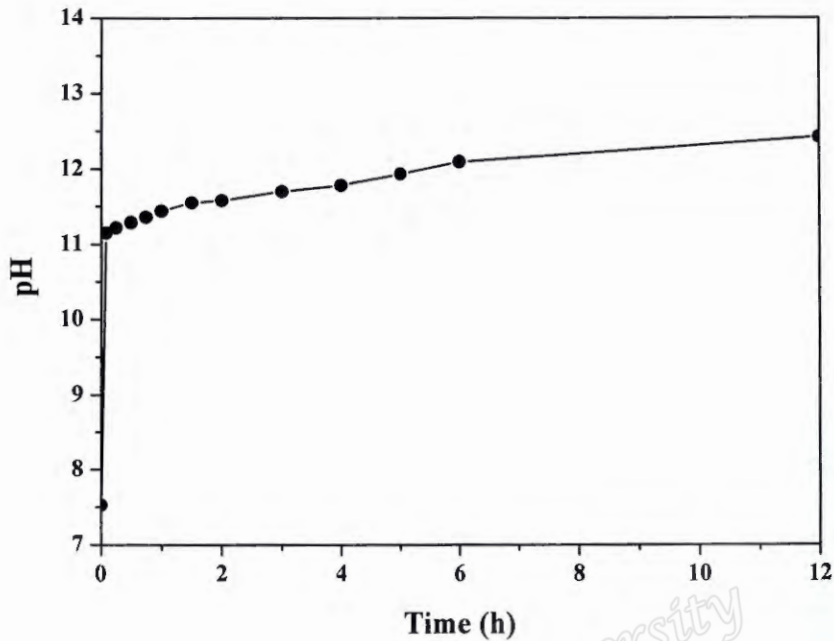
ความสว่างในชีวิตประจำวัน	cd/m ²
ไส้ของหลอดไส้แก้วใส	7,000,000
หลอดฟลูออเรสเซนต์	5,000-15,000
ผิวของพระจันทร์เต็มดวง	2,500
กระดาษสีขาว (ความสะท้อน 0.8) ภายใต้ 400 ลักซ์	100
กระดาษสีเทา (ความสะท้อน 0.8) ภายใต้ 400 ลักซ์	50
กระดาษสีดำ (ความสะท้อน 0.8) ภายใต้ 400 ลักซ์	5
พื้นผิวถนนภายใต้แสงไฟ	0.5-2

4.1.3. ความทนต่อน้ำ (Water resistance)

การศึกษาการทนต่อน้ำของสารฟอสฟอรัสเป็นการทดสอบการทนต่อความชื้นในสภาวะเร่งปฏิกิริยา โดยนำสารฟอสฟอรัสไปแช่น้ำในอัตราส่วนระหว่างสารฟอสฟอรัสกับน้ำเท่ากับ 1/20 ส่วนโดยน้ำหนัก กวนด้วยแท่งแม่เหล็ก (Magnetic bar) ในระยะเวลาต่างๆ การทดสอบการทนต่อน้ำมีรายละเอียดดังนี้

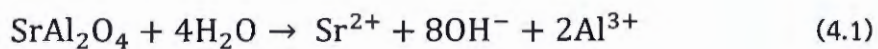
4.1.3.1. การเปลี่ยนแปลงค่า pH ของน้ำ จากการสลายตัวของสารฟอสฟอรัส

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของสารฟอสฟอรัสชนิด $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$ เมื่อนำไปแช่น้ำ โดยตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงค่า pH ของน้ำที่ระยะเวลาต่างๆ ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.9



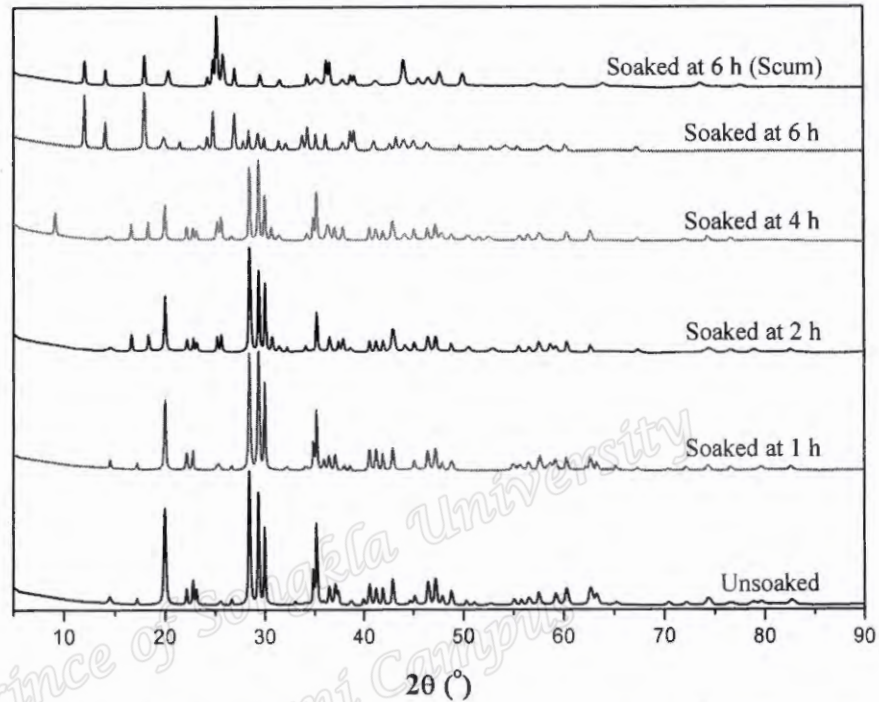
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่สารฟอสฟอรัสถูกแช่น้ำกับค่า pH ของน้ำ

จากรูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่สารฟอสฟอรัสถูกแช่น้ำกับค่า pH ของน้ำ พบว่าเมื่อนำสารฟอสฟอรัสไปแช่น้ำ ค่า pH น้ำเปลี่ยนแปลงโดยทันทีจากเดิมมีค่าประมาณ 7.5 ไปเป็น 11.0 ภายในระยะเวลา 5 วินาที และเมื่อให้ระยะเวลาแช่น้ำเพิ่มขึ้นจะเห็นว่าค่า pH ของน้ำจะเพิ่มอย่างช้าๆ เนื่องจากเมื่อสารฟอสฟอรัสทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolyzation) แสดงดังสมการที่ 4.1 (Chen *et al.*, 2008; Peng *et al.*, 2006) ไฮดรอกซิลไอออน ได้จากการสลายตัวของ SrAl_2O_4 ส่งผลต่อการปรับตัวของค่า pH ของน้ำเพิ่มสูงขึ้น



4.1.3.2. การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกของสารฟอสฟอรัส

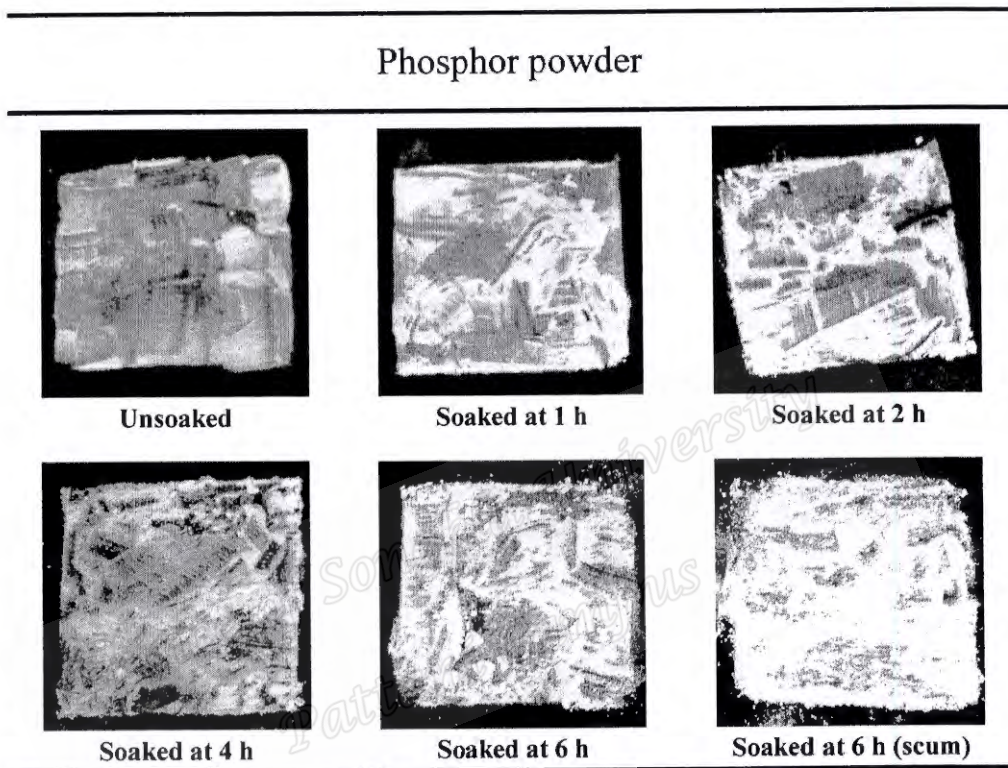
การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารฟอสฟอรัสชนิด $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$ ก่อนและหลังแช่น้ำที่ระยะเวลาต่างๆ เพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผลึกของสารฟอสฟอรัส ทดสอบโดยใช้เทคนิค X-ray Diffraction (XRD) ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 X-ray diffraction pattern ของสารฟอสฟอรัสชนิด $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$ ก่อนและหลังแช่น้ำที่ระยะเวลาต่างๆ

จากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารฟอสฟอรัสชนิด $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$ ด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD) หลังแช่น้ำ พบลักษณะพิกปรากฏดังรูปที่ 4.10 จะเห็นว่าสารฟอสฟอรัสที่แช่น้ำเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผลึก โดยยังคงปรากฏพิกของการเลี้ยวเบนแสงที่ตำแหน่งเดิม เมื่อเปรียบเทียบ X-ray diffraction pattern พิกสารฟอสฟอรัส พบว่ายังคงสอดคล้องกับพิก Monoclinic phase diffraction ของ $\text{Sr}(\text{Al}_2\text{O}_4)$ ซึ่งตรงกับแฟ้มข้อมูล JCPDS หมายเลข 01-076-7488 อยู่ (ดูรูปที่ 4.2 (b)) ส่วนสารฟอสฟอรัสที่แช่น้ำไว้นานกว่า 1 ชั่วโมง ความเข้มของพิกจะลดลงเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการแช่น้ำ โดยที่เวลา 6 ชั่วโมง สารฟอสฟอรัสทั้งส่วนที่ลอยน้ำและไม่ลอยน้ำ จะพบการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของผลึกอย่างมาก สังเกตได้จากพิกที่ปรากฏจะมีความเข้มและตำแหน่งของพิกเปลี่ยนไปจากเดิม โดยเฉพาะที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 28.47, 29.36 และ 30.02 องศา และเมื่อนำ X-ray diffraction pattern ที่วิเคราะห์ได้ไปเทียบกับแฟ้มข้อมูล JCPDS พบว่า

สอดคล้องกับสารอื่นๆ มากกว่า 10 ชนิด โดยไม่สามารถระบุได้ว่าเป็นสารใด การเปลี่ยนแปลงนี้ชี้ให้เห็นว่าสารฟอสฟอรัสมีความทนทานต่อน้ำหรือความชื้นได้ในระดับหนึ่งเท่านั้น หากสารฟอสฟอรัสอยู่ในสภาวะเสื่อมเป็นเวลานานจะทำให้สมบัติของสารฟอสฟอรัสเปลี่ยนแปลงไป จากผลการทดลองโครงสร้างผลึกเปลี่ยนแปลงไป ทำให้น้ำหนักของสารฟอสฟอรัสจะลดลง สามารถลอยเหนือน้ำได้ และสีของสารฟอสฟอรัสจะเปลี่ยนจากสีเหลืองนวลไปเป็นสีขาวลักษณะคล้ายแป้งดังรูปที่ 4.11

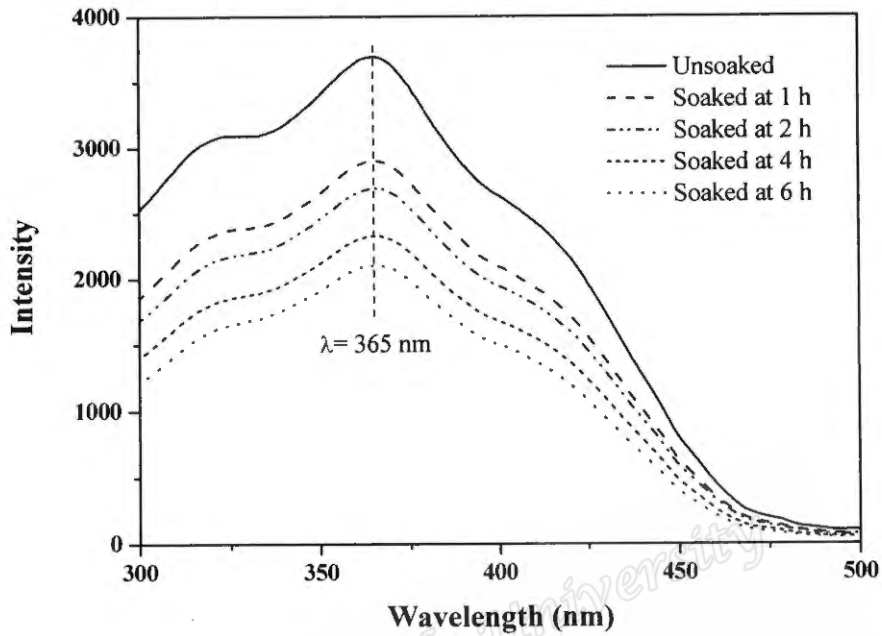


รูปที่ 4.11 ลักษณะผงสารฟอสฟอรัสชนิด $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$ ก่อนและหลังแช่น้ำที่เวลาต่างๆ

จากรูปที่ 4.11 ลักษณะผงสารฟอสฟอรัสชนิด $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$ ก่อนและหลังแช่น้ำพบว่า เมื่อนำสารฟอสฟอรัสไปแช่น้ำทำให้สีและลักษณะของสารฟอสฟอรัสเปลี่ยนไปจากเดิมคือ จากเดิมที่มีสีเหลืองนวลและมีลักษณะคล้ายเม็ดทรายละเอียด เปลี่ยนเป็นสีขาว น้ำหนักเบา และมึลักษณะเป็นก้อน เมื่อใช้แรงกดจะทำให้ส่วนที่เป็นก้อนนั้นแตกออกจะมีลักษณะคล้ายแป้งซึ่งมีเนื้อละเอียดมากกว่าสารฟอสฟอรัสที่ไม่แช่น้ำ ทั้งนี้ระยะเวลาของการแช่น้ำที่เพิ่มขึ้นทำให้สารฟอสฟอรัสเปลี่ยนไปมากขึ้น โดยส่วนที่เปลี่ยนไปส่วนใหญ่ลอยน้ำ

4.1.3.3. ความยาวคลื่นที่กระตุ้น

การตรวจสอบความยาวคลื่นที่กระตุ้นของสารฟอสฟอรัสก่อนและหลังการแช่น้ำที่ระยะเวลาต่างๆ ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.12

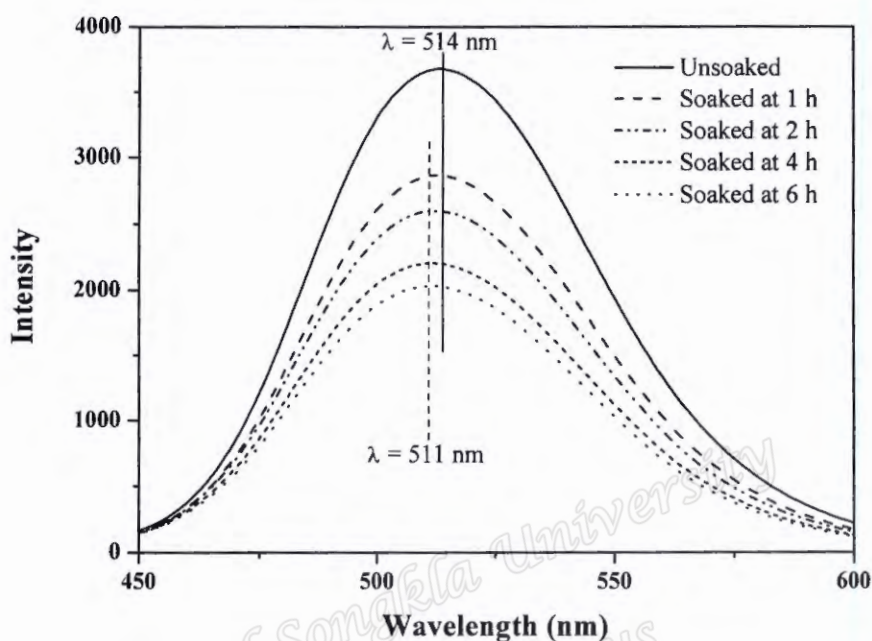


รูปที่ 4.12 สเปกตรัมของการกระตุ้นของสารฟอสฟอรัสชนิด $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$ ก่อนและหลังการแช่น้ำ

จากรูปที่ 4.12 สเปกตรัมของการกระตุ้นของสารฟอสฟอรัสชนิด $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$ ก่อนและหลังการแช่น้ำพบว่า จะให้ตำแหน่งของพีคไม่ต่างจากเดิม กล่าวคือสามารถถูกกระตุ้นได้ดีที่สุดที่ความยาวคลื่นประมาณ 365 nm อย่างไรก็ตามสารฟอสฟอรัสที่ถูกแช่น้ำจะให้ความเข้มของพีคลดลง แสดงให้เห็นว่าสารฟอสฟอรัสที่แช่น้ำสามารถปลดปล่อยแสงได้น้อยลง

4.1.3.4. ความยาวคลื่นที่ปลดปล่อย

การตรวจสอบความยาวคลื่นที่ปลดปล่อยของสารฟอสฟอรัสก่อนและหลังการแช่น้ำที่ระยะเวลาต่างๆ ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.13

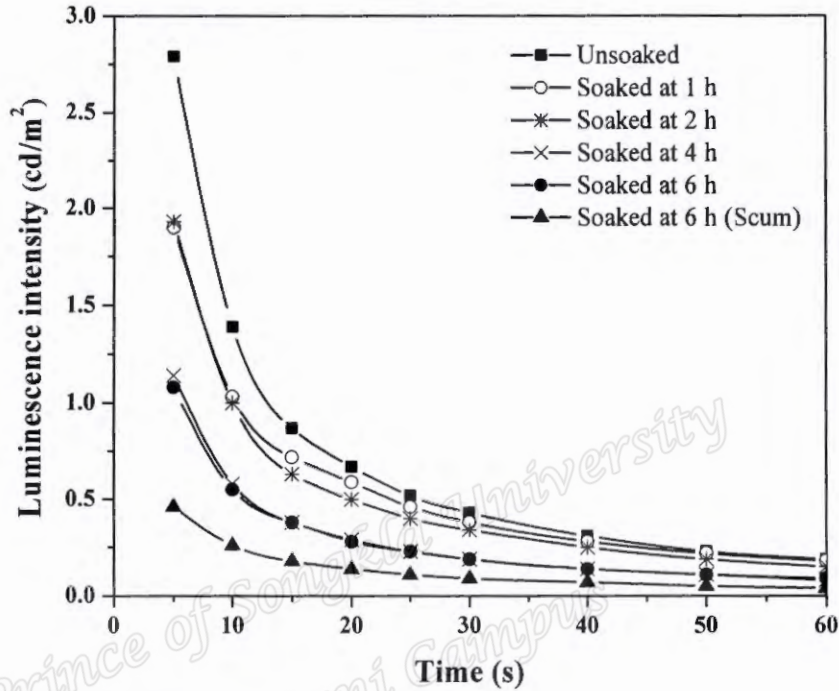


รูปที่ 4.13 สเปกตรัมของการปลดปล่อยของสารฟอสฟอรัสชนิด $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$ ก่อนและหลังการแช่น้ำ

จากรูปที่ 4.13 สเปกตรัมของการปลดปล่อยของสารฟอสฟอรัสชนิด $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$ ก่อนและหลังการแช่น้ำพบว่า สารฟอสฟอรัสเมื่อถูกกระตุ้นจะปลดปล่อยแสงที่มีความยาวคลื่นประมาณ 450 nm ถึง 600 nm โดยสารฟอสฟอรัสก่อนแช่น้ำจะปรากฏพีคการปลดปล่อยแสงที่มีความยาวคลื่น 514 nm ซึ่งเป็นแสงสีเขียว เมื่อผ่านการแช่น้ำสารฟอสฟอรัสที่ถูกแช่น้ำจะปรากฏพีคการปลดปล่อยแสงที่มีความยาวคลื่นน้อยลง (Yu *et al.*, 2008; Guo *et al.*, 2007) ซึ่งที่ระยะเวลาการแช่น้ำ 6 ชั่วโมง ปรากฏอยู่ที่ประมาณ 511 nm นอกจากนี้ยังพบว่า ความเข้มแสงของการปลดปล่อยของสารฟอสฟอรัสจะลดน้อยลงตามระยะเวลาการแช่น้ำที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากโครงสร้างผลึกของ SrAl_2O_4 มีการเปลี่ยนแปลงมากขึ้นเมื่อแช่น้ำเป็นเวลานาน (Yu *et al.*, 2008)

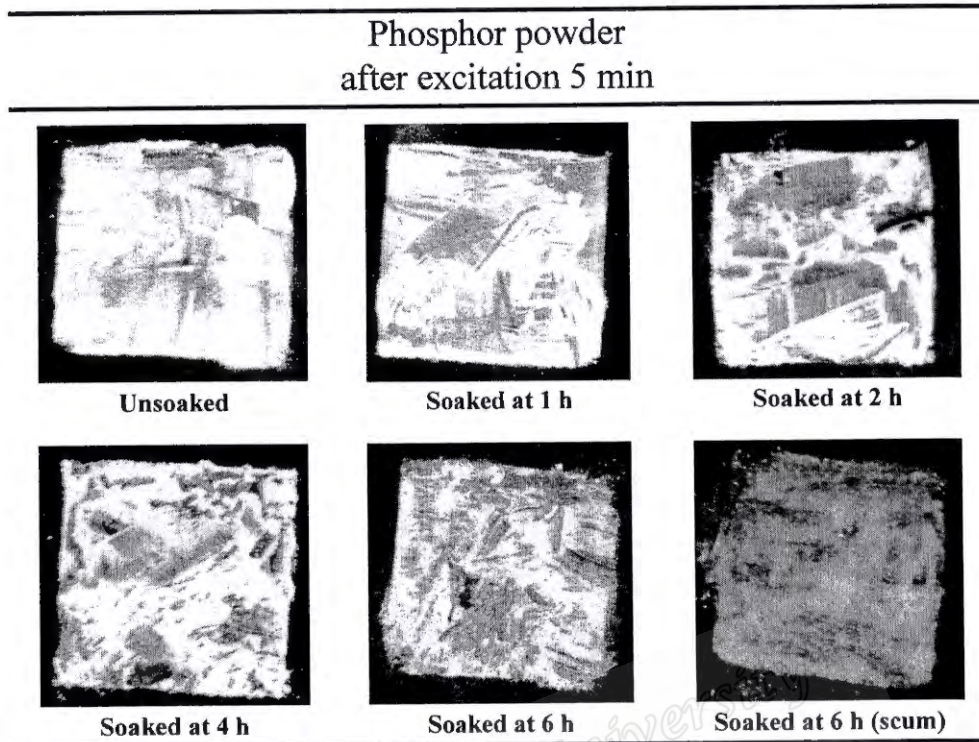
4.1.3.5. ระยะเวลาการคงอยู่ของแสงที่ปลดปล่อยหลังหยุดกระตุ้น

ระยะเวลาการคงอยู่ของแสงที่ปลดปล่อยหลังหยุดกระตุ้นของสารฟอสฟอรัส ก่อนและหลังการแช่น้ำ ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 ระยะเวลาการคงอยู่ของแสงที่ปลดปล่อยหลังหยุดกระตุ้นของสารฟอสฟอรัสชนิด $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$ ก่อนและหลังการแช่น้ำ

จากรูปที่ 4.14 ระยะเวลาการคงอยู่ของแสงที่ปลดปล่อยหลังหยุดกระตุ้นของสารฟอสฟอรัสชนิด $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$ ก่อนและหลังการแช่น้ำ เพื่อเป็นการทดสอบถึงความสามารถในการเรืองแสงของสารฟอสฟอรัสทั้งก่อนและหลังการแช่น้ำภายหลังจากหยุดกระตุ้น พบว่าสารฟอสฟอรัสที่ถูกแช่น้ำเป็นระยะเวลายาวนานจะให้ความเข้มแสงที่ปลดปล่อยและระยะเวลาการคงอยู่ของแสงที่ปลดปล่อยหลังหยุดกระตุ้นด้อยลงตามไปด้วย เมื่อเทียบกับสารฟอสฟอรัสที่ไม่แช่น้ำ (Yu *et al.*, 2008; Peng *et al.*, 2006) ลักษณะการปลดปล่อยแสงของสารฟอสฟอรัสก่อนและหลังการแช่น้ำแสดงดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 ลักษณะการปลดปล่อยแสงหลังจากหยุดกระตุ้นสารฟอสฟออร์ชนิด $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$ ก่อนและหลังการแช่น้ำ

จากรูปที่ 4.15 ลักษณะการปลดปล่อยแสงหลังจากหยุดกระตุ้นสารฟอสฟออร์ชนิด $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$ ก่อนและหลังการแช่น้ำพบว่า สารฟอสฟออร์ที่ไม่แช่น้ำจะปลดปล่อยแสงสีเขียวและให้ความเข้มแสงที่ปลดปล่อยสูงหรือมีความสว่างมาก ต่างจากสารฟอสฟออร์ที่ถูกแช่น้ำ เมื่อให้ระยะเวลาในการแช่น้ำเป็นเวลานานขึ้น สารฟอสฟออร์จะปลดปล่อยแสงที่มีความสว่างน้อยลงและปรากฏเป็นแสงสีเขียวฟ้ามากขึ้น ผลดังกล่าวจะสอดคล้องกับกราฟการปลดปล่อยในรูปที่ 4.13 ที่พบว่าความยาวคลื่นที่ปลดปล่อยและความเข้มแสงมีค่าลดลง นอกจากนี้เมื่อสังเกตสารฟอสฟออร์ที่ถูกแช่น้ำ 6 ชั่วโมงและที่ลอยน้ำ จะเห็นว่าการปลดปล่อยแสงจะไม่ค่อยมีความสม่ำเสมอ (เป็นแสงสีฟ้าสลับกับเขียว) เนื่องจากโครงสร้างผลึกของสารฟอสฟออร์ถูกไฮโดรไลซิสมากน้อยไม่เท่ากัน

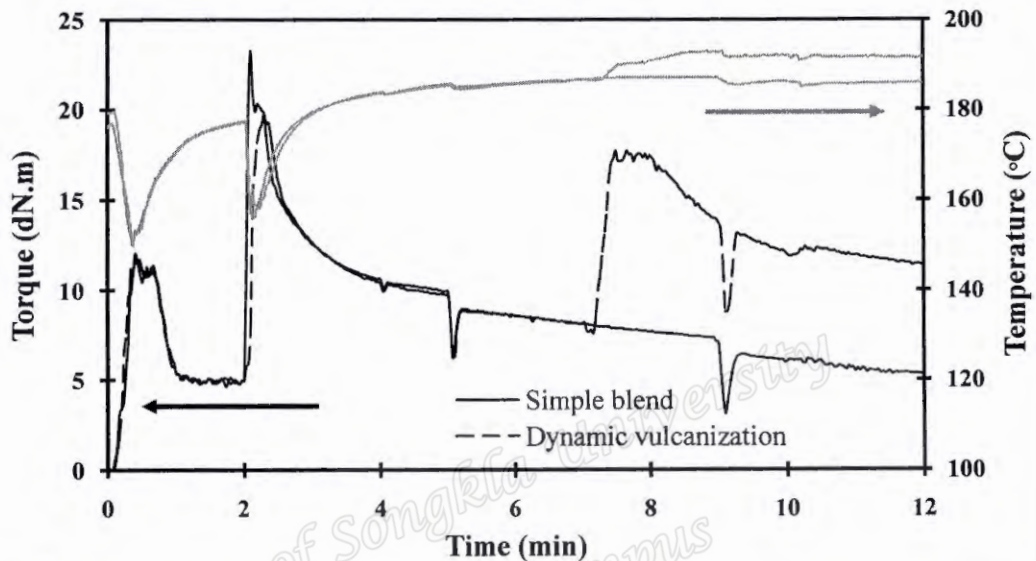
4.1.4. สรุปการวิเคราะห์สมบัติพื้นฐานทางกายภาพ สมบัติทางแสงและความทนทานต่อน้ำของสารฟอสฟอรัส

สารฟอสฟอรัสมีโครงสร้างหลักคือ SrAl_2O_4 พื้นผิวมีความขรุขระ มีขนาดอนุภาคประมาณ 70.3 μm สามารถกระตุ้นได้ดีที่ความยาวคลื่น 365 nm และปลดปล่อยแสงที่ความยาวคลื่น 514 nm นอกจากนี้ยังพบว่า สารฟอสฟอรัสจะไม่ทนทานต่อความชื้น โดยเมื่อสัมผัสกับความชื้นที่ระยะเวลาหนึ่ง สารฟอสฟอรัสจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าความยาวคลื่นที่ปลดปล่อย และความเข้มแสงที่ปลดปล่อยมีค่าน้อยลง และลักษณะของสารฟอสฟอรัสเองจะเปลี่ยนไปเป็นสีขาว

Prince of Songkla University
Pattani Campus

4.2. การศึกษาอิทธิพลของเทคนิคการเบลนด์ต่อสมบัติของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส

การเตรียมยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกระหว่าง NR/PP/PEC ที่อัตราส่วนการเบลนด์เท่ากับ 40/30/30 โดยน้ำหนัก โดยใช้เทคนิคการเบลนด์แบบปกติและเทคนิคการวัลคาไนเซชันแบบไดนามิกส์ ได้กราฟการผสมดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าทอร์กกับเวลาและอุณหภูมิการผสมกับเวลาของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกจากการเบลนด์ระหว่าง NR/PP/PEC โดยแปรเทคนิคการเบลนด์

จากรูป 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าทอร์กกับเวลาและอุณหภูมิการผสมกับเวลาของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกจากการเบลนด์ระหว่าง NR/PP/PEC โดยแปรเทคนิคการเบลนด์พบว่าในช่วงแรกค่าทอร์กการผสมมีค่าเพิ่มขึ้นถึงจุดหนึ่งแล้วจะลดลงและคงที่ เป็นผลมาจากช่วงแรกนี้เป็นช่วงที่ใส่เม็ดพลาสติก เมื่อเม็ดพลาสติกเริ่มหลอมจะทำให้ค่าทอร์กเพิ่มสูงขึ้นซึ่งมาจากความหนืดในขณะหลอม จากนั้นเมื่อเม็ดพลาสติกหลอมใกล้ที่จะสมบูรณ์ความหนืดจะลดลง และคงที่เมื่อพลาสติกหลอมสมบูรณ์ เมื่อใส่ยางคอมพาวด์ลงไปพลาสติกหลอมทำให้ค่าทอร์กเพิ่มขึ้นสูงอีกครั้งเนื่องจากความหนืดของยาง เมื่อยางถูกเข็นก็จะทำให้ความหนืดของยางลดลง นอกจากนี้การใส่สารเคมีอื่นๆ ที่มีปริมาณน้อยจะไม่ส่งผลต่อค่าทอร์กอย่างชัดเจน แต่จะเห็นได้ชัดในสารเคมีที่มีลักษณะเป็นของเหลวหรือเกิดจากการหลอมเมื่อได้รับความร้อน เช่น น้ำมันช่วยแปรรูป สารรวมวัลคาไนซ์ และสารช่วยแปรรูป ที่ทำให้ค่าทอร์กการผสมลดต่ำลงอย่างรวดเร็วดังนาฬิกาที่ 5, 7 และ 9 ตามลำดับ ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่เบลนด์ด้วยวิธีปกติและเทคนิคการวัลคาไนเซชันแบบ

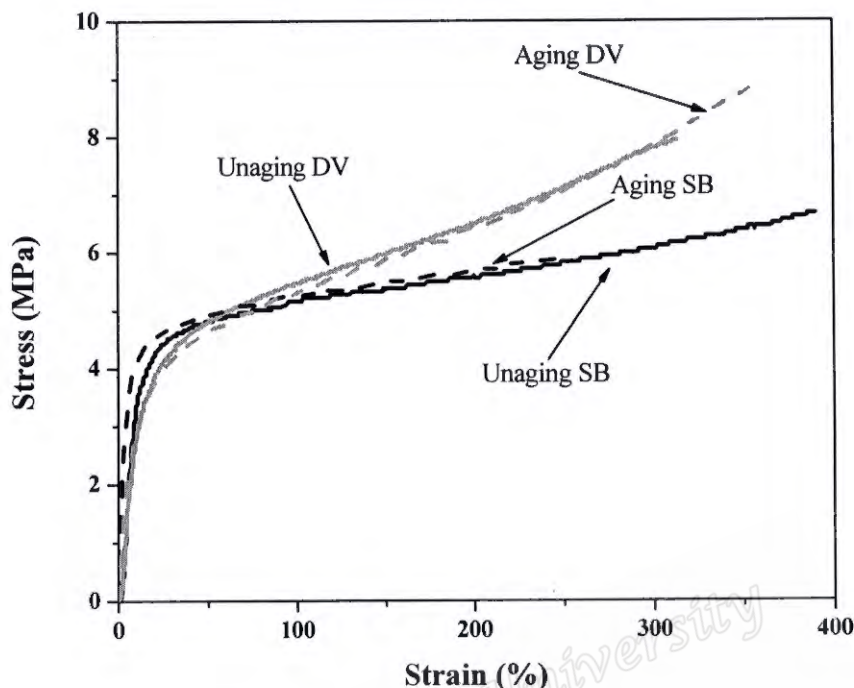
ไดนามิกส์มีทอร์คการผสมและอุณหภูมิการผสมเหมือนกันที่เวลาเริ่มต้นการผสมจนถึง 7 นาที แต่หลังจาก 7 นาทีเป็นต้นไป ค่าทอร์คการผสมและอุณหภูมิการผสมของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมด้วยวิธีการวัลคาไนเซชันแบบไดนามิกส์มีค่าสูงกว่าการเบลนด์แบบปกติ เนื่องจากการเบลนด์ด้วยวิธีการวัลคาไนเซชันแบบไดนามิกส์จะมีการเติมสารวัลคาไนซ์เข้าไป (นาที่ที่ 7) ในขณะที่การผสมทำให้ยางเกิดการวัลคาไนซ์ในขณะผสม ส่งผลให้ค่าทอร์คหรือความหนืดของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกเพิ่มขึ้น และพลังงานในการบดผสมเพิ่มขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิของการบดผสมเพิ่มขึ้น หลังจากนั้นเมื่อให้ระยะเวลาการผสมเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าทอร์คการผสมค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่อง เป็นผลมาจากในกรณีการเบลนด์แบบปกติจะทำให้โมเลกุลยางขาดออกจากกันมากขึ้น ส่วนในกรณีของการวัลคาไนเซชันแบบไดนามิกส์จะทำให้เกิดการแตกออกของอนุภาคยางวัลคาไนซ์เป็นอนุภาคที่เล็กกระจายในพลาสติกหลอม

4.2.1. สมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

เตรียมยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกจากการเบลนด์ระหว่าง NR/PP/PEC โดยแปรเทคนิคการเบลนด์ ไปทดสอบสมบัติทางด้านการดึงก่อนและหลังการบ่มแรง และการฉีดรูปถาวรแบบดึงได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.17-4.20

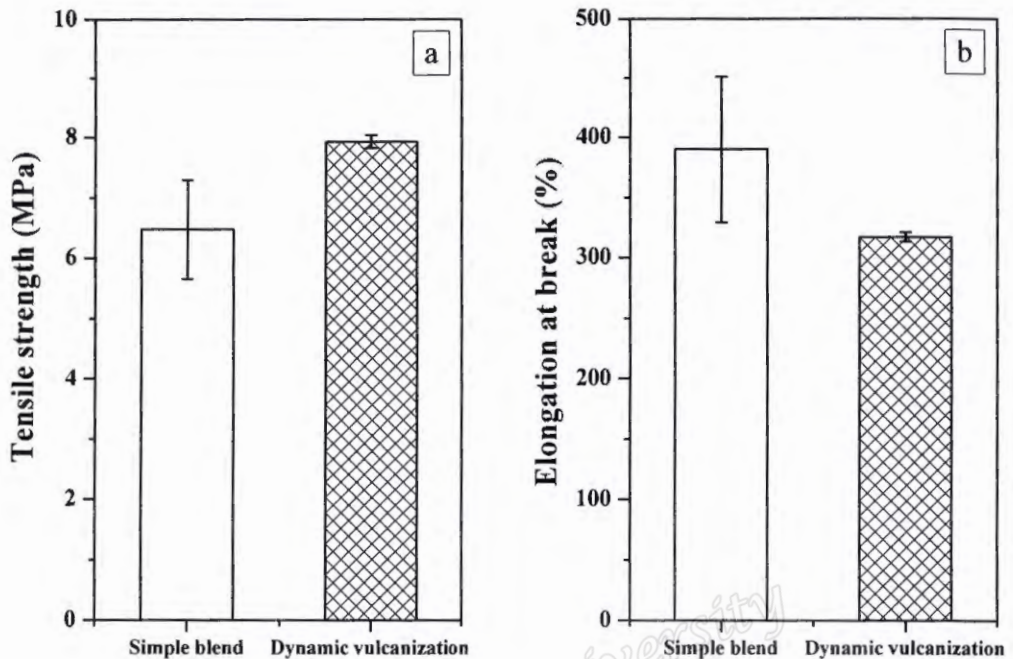
ตารางที่ 4.2 สมบัติเชิงกลก่อนและหลังการบ่มแรงของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรเทคนิคการเบลนด์

Properties	Technique	
	Simple blend	Dynamic vulcanization
Unaging		
Modulus at 50% (MPa)	4.87±0.45	4.77±0.07
Modulus at 100% (MPa)	5.10±0.40	5.43±0.07
Tensile strength (MPa)	6.47±0.82	7.93±0.11
Elongation at break (%)	390±61	317±4
Tension set (%)	52.1±3.1	28.5±7.2
Aging		
Tensile strength (MPa)	5.85±0.40	8.79±0.08
Elongation at break (%)	247±76	355±13
Retention		
Tensile strength (%)	90.4	110.9
Elongation at break (%)	63.2	112.2



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรเทคนิคการเบลนด์ ก่อนและหลังการบ่มแรง

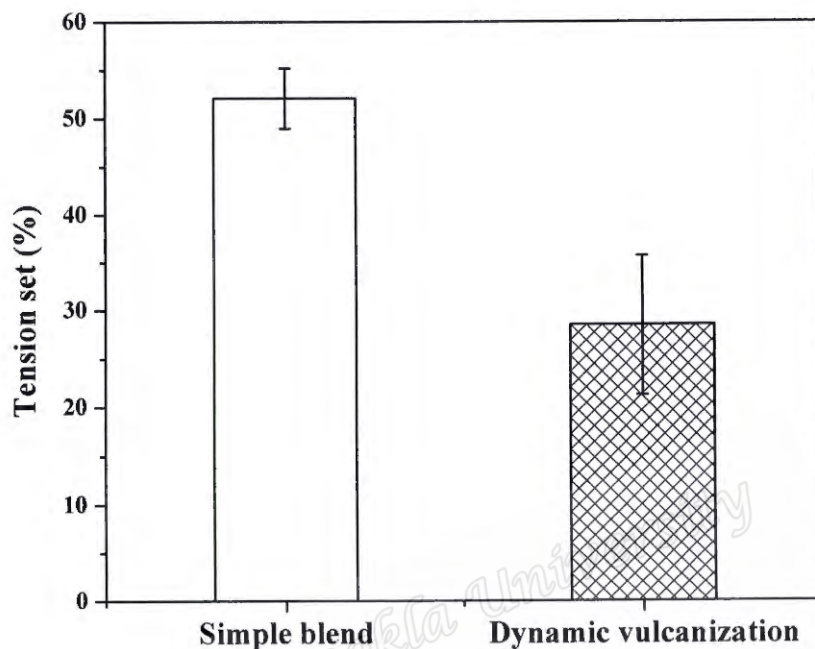
จากรูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรเทคนิคการเบลนด์ ก่อนและหลังการบ่มแรงพบว่า ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ใช้วิธีการเบลนด์แบบปกติและวัลคาไนเซชันแบบไดนามิกส์ทั้งก่อนและหลังการบ่มแรงจะมีมอดูลัสและความแข็งดิ่งสูงไม่ต่างกัน ทั้งนี้เป็นผลมาจากเฟสเทอร์โมพลาสติก เนื่องจากพอลิโพรพิลีนที่มีความแข็งแรงสูงจากผลการตกผลึกในโครงสร้างโมเลกุล นอกจากนี้วัสดุยังแสดงความเป็นอีลาสติก ได้จากระยะยืดที่จุดขาดที่มีค่าสูง เป็นผลมาจากการเติมโคพอลิเมอร์ของโพรพิลีนเอทิลีนซึ่งเป็นพลาสติกแบบที่มีความยืดหยุ่นและผลของเฟสยางที่มีสายโซ่โมเลกุลจัดเรียงตัวแบบอสัณฐานซึ่งให้ความสามารถในการยืดสูง



รูปที่ 4.18 สมบัติการดึงของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรเทคนิคการเบลนด์ (a) ความต้านทานต่อแรงดึง และ (b) ระยะยืดที่จุดขาด

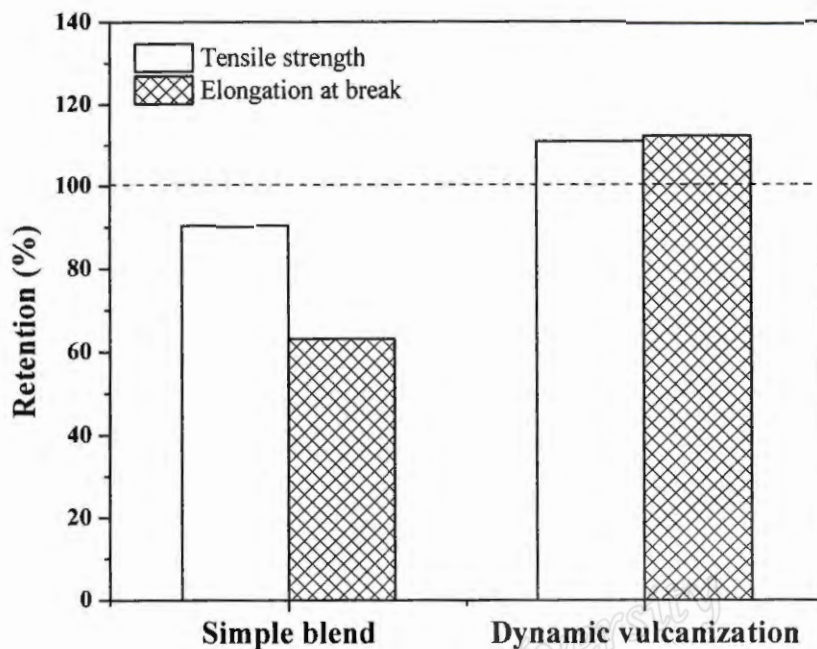
จากรูปที่ 4.18 สมบัติการดึงของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรเทคนิคการเบลนด์ (a) ความต้านทานต่อแรงดึง และ (b) ระยะยืดที่จุดขาด พบว่ายางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมด้วยเทคนิคการเบลนด์แบบปกติมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่ต่ำกว่าและความสามารถในการยืดที่สูงกว่าการเตรียมด้วยเทคนิคการวัลคาไนเซชันแบบไดนามิกส์ เนื่องจากยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมด้วยการเบลนด์แบบปกติมีสัณฐานวิทยาของเฟสยางเป็นเฟสต่อเนื่อง ทำให้มีความสามารถในการยืดได้มากกว่า แต่ความแข็งแรงจะน้อยกว่าซึ่งเป็นสมบัติของยางที่ไม่เกิดการวัลคาไนซ์ ส่วนยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมด้วยเทคนิคการวัลคาไนเซชันแบบไดนามิกส์ซึ่งมีสัณฐานวิทยาของเฟสยางกระจายตัวในพลาสติกหรือพลาสติกเป็นเมทริกซ์ทำให้สมบัติของวัสดุขึ้นอยู่กับเฟสพลาสติกเป็นหลัก อีกทั้งมีเฟสยางและโคพอลิเมอร์ของโพรพิลีนเอทิลีนที่สามารถเกิดการวัลคาไนซ์ได้ ส่งผลให้วัสดุมีความต้านทานต่อแรงดึงสูงแต่จะมีระยะยืดที่จุดขาดต่า นอกจากนี้จะเห็นว่ายางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมด้วยเทคนิคการเบลนด์แบบปกติจะให้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่มากกว่าการเตรียมด้วยเทคนิควัลคาไนเซชันแบบไดนามิกส์ เพราะการเบลนด์

แบบปกติจะส่งผลให้ยางเกิดเป็นเฟสต่อเนื่องที่ไม่สม่ำเสมอดังรูปที่ 4.22 จึงทำให้สมบัติของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกมีความแปรปรวน



รูปที่ 4.19 การฉีดรูปถาวรแบบดึงของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรเทคนิคการเบลนด์

รูปที่ 4.19 การฉีดรูปถาวรแบบดึงของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรเทคนิคการเบลนด์พบว่า ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมด้วยการเบลนด์แบบปกติจะให้ค่าการฉีดรูปถาวรแบบดึงที่สูงกว่าการเตรียมด้วยเทคนิคการวัลคาไนเซชันแบบไดนามิกส์ เนื่องจากยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมด้วยการเบลนด์แบบปกติมีเฟสยางที่ไม่วัลคาไนซ์หรือสายโซ่โมเลกุลยังไม่เกิดการเชื่อมโยง ทำให้ความทนทานต่อแรงกระทำต่ำ และเมื่อถูกแรงกระทำจะทำให้ตัววัสดุฉีดรูปได้ง่ายและกลับคืนสู่สภาวะเดิมยาก ส่วนการเตรียมด้วยเทคนิคการวัลคาไนเซชันแบบไดนามิกส์เฟสยางมีการวัลคาไนซ์ ซึ่งสมบัติของวัสดุจะเป็นไปตามอิทธิพลของพันธะเชื่อมโยง กล่าวคือ จุดเชื่อมโยงโมเลกุล (Crosslink point) ด้วยพันธะเคมี เปรียบเสมือนจุดความจำ (Memory point) ในการดึงกลับหรือคืนตัวกลับ ซึ่งเป็นตำแหน่งยึดส่วนของโมเลกุลที่ฉีดรูปให้กลับมาอยู่ในตำแหน่งเดิม ทำให้ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมด้วยเทคนิคการวัลคาไนเซชันแบบไดนามิกส์มีการฉีดรูปถาวรแบบดึงต่ำกว่าการเตรียมด้วยเทคนิคการเบลนด์แบบปกติ

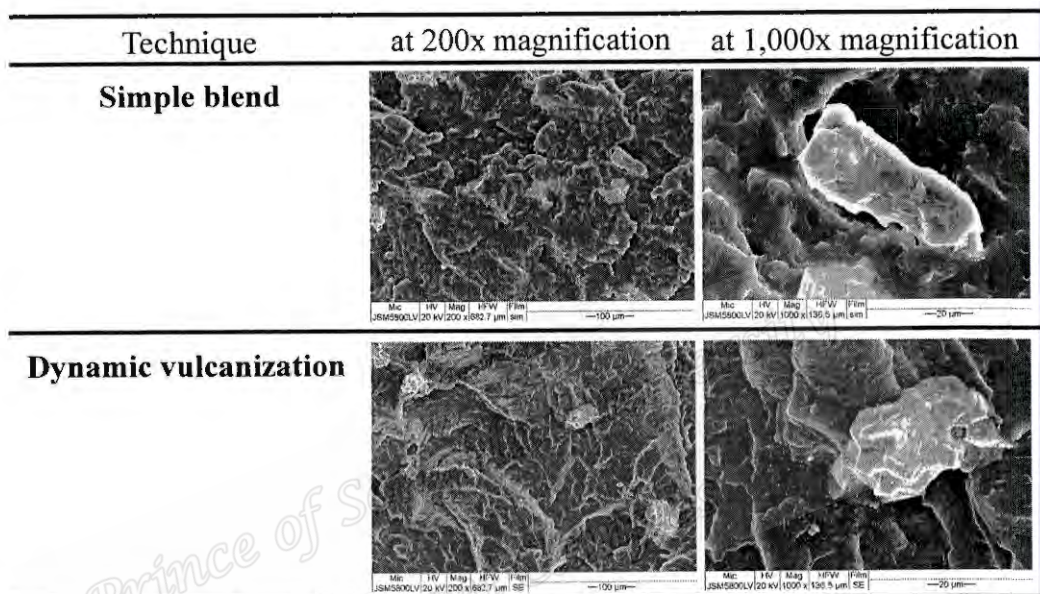


รูปที่ 4.20 เปอร์เซ็นต์การคงอยู่ของสมบัติเชิงกลหลังบ่มแรงด้วยความร้อนของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรเทคนิคการเบลนด์

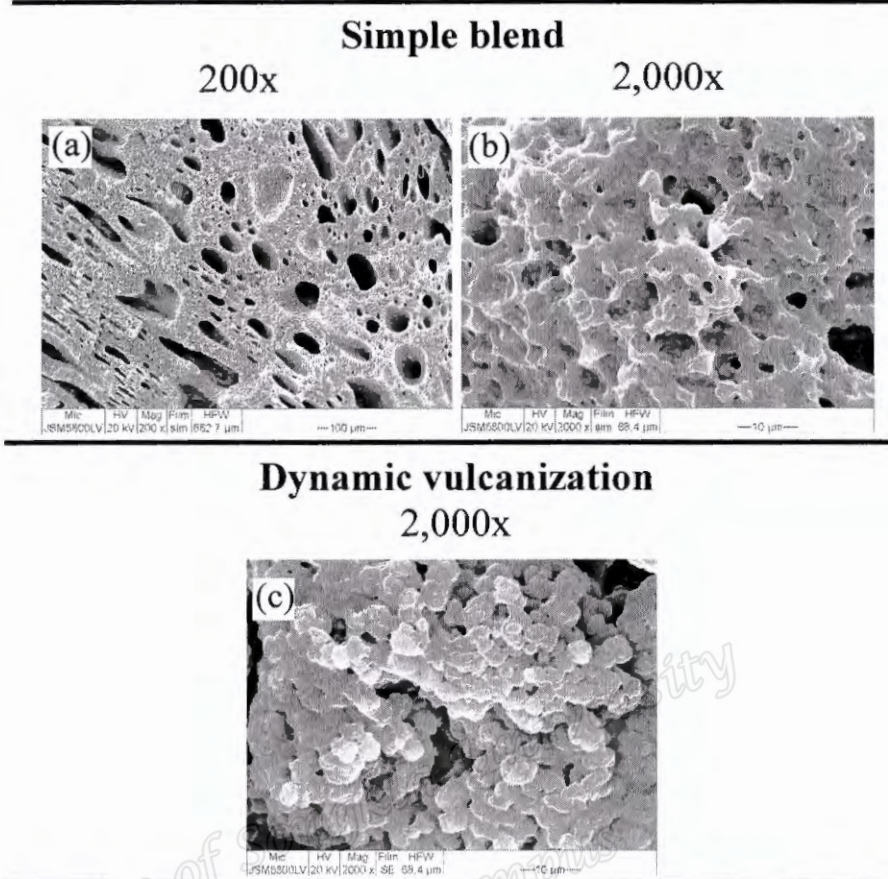
จากรูปที่ 4.20 เปอร์เซ็นต์การคงอยู่ของสมบัติเชิงกลหลังบ่มแรงด้วยความร้อนของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรเทคนิคการเบลนด์พบว่า ภายหลังจากบ่มแรงสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมด้วยการเบลนด์แบบปกติจะเปลี่ยนไปในทางด้อยลง ขณะที่การเตรียมด้วยเทคนิคการวัลคาไนเซชันแบบไดนามิกส์จะมีสมบัติเชิงกลปรับปรุงดีขึ้น ทั้งนี้เป็นผลมาจากยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมด้วยการเบลนด์แบบปกติมีสัณฐานวิทยาแบบวฏภาคต่อเนื่อง (แสดงดังรูปที่ 4.22) ทำให้เฟสยางที่โอกาสเผชิญกับสภาวะเสื่อม เช่น ออกซิเจนและความร้อน เป็นต้น ได้มากกว่าการที่เฟสยางมีสัณฐานวิทยาแบบเฟสกระจาย นอกจากนี้การที่เฟสยางไม่เกิดการวัลคาไนซ์จึงไม่มีการคงรูป สามารถเกิดการเสื่อมสภาพได้ง่ายๆ ในทางกลับกันการเตรียมแบบเทคนิคการวัลคาไนเซชันแบบไดนามิกส์การที่สมบัติเชิงกลปรับปรุงเพิ่มขึ้นภายหลังการบ่มแรงน่าจะเกิดจากการวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้นในส่วนของยางธรรมชาติและโคพอลิเมอร์ของโพรพิลีนเอทิลีน

4.2.2. สัณฐานวิทยา (Morphology)

การศึกษาสัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกผสมสารฟอสฟออร์จะแบ่งออกเป็น 2 แบบ แบบแรกคือ แบบไม่สกัดเฟส เป็นการศึกษาลักษณะพื้นผิวของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟออร์และความเข้ากันได้ระหว่างยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกกับสารฟอสฟออร์ และแบบที่ 2 คือ แบบสกัดเฟส เป็นการศึกษาการกระจายตัวของเฟสภายในเทอร์โมพลาสติก ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.21 และ 4.22 ตามลำดับ



รูปที่ 4.21 สัณฐานวิทยาแบบไม่สกัดเฟสของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกผสมสารฟอสฟออร์ โดยแปรเทคนิคการเบลนด์ ที่กำลังขยาย 200 เท่า และ 1,000 เท่า



รูปที่ 4.22 สัณฐานวิทยาแบบสกัดเฟสของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกผสมสารฟอสฟอร์ โดยแปรเทคนิคการเบลนด์ (a) และ (b) การเบลนด์แบบปกติที่กำลังขยาย 200 เท่า และ 2,000 เท่า ตามลำดับ และ (c) การวัลคาไนเซชันแบบไดนามิกส์ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า

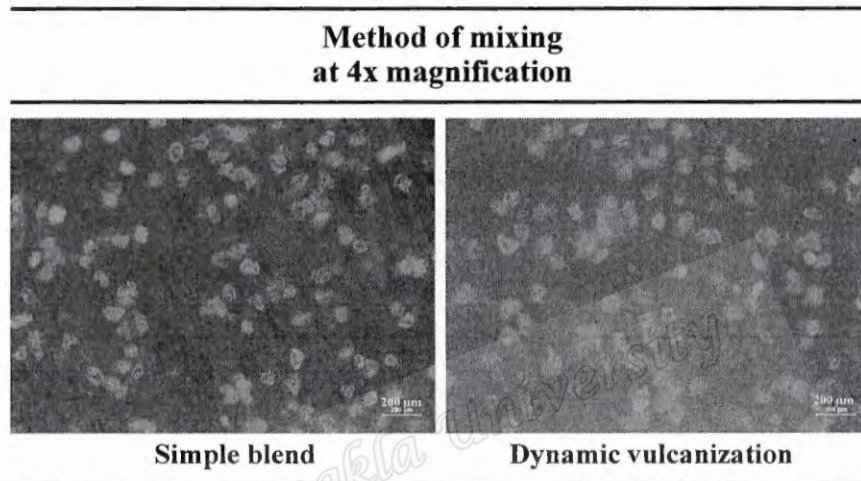
รูปที่ 4.21 สัณฐานวิทยาแบบไม่สกัดเฟสของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกผสมสารฟอสฟอร์ โดยแปรเทคนิคการเบลนด์ ที่กำลังขยาย 200 เท่า และ 1,000 เท่า พบว่าที่กำลังขยาย 200 เท่า ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมด้วยเทคนิคการเบลนด์แบบปกติมีลักษณะผิวที่หยาบกว่าการเตรียมด้วยเทคนิคการวัลคาไนเซชันแบบไดนามิกส์ เนื่องจากการเตรียมด้วยเทคนิคการเบลนด์แบบปกติมีขนาดเฟสที่ใหญ่กว่าการเตรียมด้วยเทคนิคการวัลคาไนเซชันแบบไดนามิกส์มาก โดยผิวที่เรียบส่วนใหญ่เกิดจากเฟสพลาสติก และที่กำลังขยาย 1,000 เท่า ทำให้เห็นสภาพรอยต่อระหว่างยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกกับสารฟอสฟอร์ชัดเจน ซึ่งยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมด้วยเทคนิคการเบลนด์แบบปกติและเทคนิคการวัลคาไนเซชันแบบไดนามิกส์ ให้ลักษณะที่เหมือนกันคือ พบว่ามีช่องว่างที่ผิวประจัญระหว่างสารฟอสฟอร์กับยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก

แสดงว่าสารฟอสฟอรัสไม่เข้ากับยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก เนื่องจากสารฟอสฟอรัสเป็นสารอินทรีย์ไม่เข้ากับสารอินทรีย์อย่างยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก (Chen *et al.*, 2008; Chen *et al.*, 2009)

จากรูปที่ 4.22 สันฐานวิทยาแบบสัปดาห์ของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรเทคนิคการเบลนด์พบว่า ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมด้วยเทคนิคการเบลนด์แบบปกติที่กำลังขยายที่ 200 เท่า (รูปที่ 4.22 (a)) เฟสยางจะถูกสกัดออกซึ่งจะเห็นเฟสพลาสติกมีช่องว่างทั้งเล็กและใหญ่กระจายตัวอยู่ ซึ่งเป็นส่วนของยางที่หายไปจากการสกัดด้วยโหลอื่น ส่วนยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมด้วยเทคนิคการเบลนด์แบบปกติที่กำลังขยาย 2,000 เท่า (รูปที่ 4.22 (b)) แสดงให้เห็นลักษณะผิวประจัญระหว่างยางและพลาสติก ซึ่งเฟสเทอร์โมพลาสติกจะเป็นเฟสต่อเนื่อง รูปทั้งสองที่กล่าวมาบ่งบอกถึงยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมด้วยเทคนิคการเบลนด์แบบปกติจะให้สันฐานวิทยาเป็นเฟสต่อเนื่อง ทั้งนี้เฟสยางจะเป็นเฟสต่อเนื่องมีขนาดที่ไม่สม่ำเสมอและมีพื้นผิวที่ขรุขระต่อเนื่องกับเฟสเทอร์โมพลาสติก จากรูปที่ 4.22 (c) เป็นสันฐานวิทยาของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมด้วยเทคนิคการวัลคาไนเซชันแบบไดนามิกส์ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า ซึ่งได้สกัดเฟสเทอร์โมพลาสติกออก จะพบว่ายางจะเป็นเฟสกระจายในเฟสต่อเนื่องของเทอร์โมพลาสติกที่ถูกสกัดออกไป โดยเฟสยางวัลคาไนซ์มีขนาดอนุภาคประมาณ 5 μm ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมด้วยเทคนิคการวัลคาไนเซชันแบบไดนามิกส์จะให้สันฐานวิทยาต่างจากการเบลนด์แบบปกติ เนื่องจากการเตรียมด้วยเทคนิคการวัลคาไนเซชันแบบไดนามิกส์มีการใส่สารวัลคาไนซ์ส่งผลให้ยางเกิดการวัลคาไนซ์ในขณะการผสม และเมื่อยางเกิดการวัลคาไนซ์จะทำให้ยางมีความหนืดสูงขึ้น เมื่อบดผสมต่อไปจะทำให้อนุภาคยางวัลคาไนซ์เกิดการแตกออกเป็นอนุภาคเล็กกระจายในพลาสติกหลอม (เจ๊ะซิติ, 2557; Asaethe *et al.*, 1999; John *et al.*, 2003)

4.2.3. การกระจายตัวของสารฟอสฟอริ์ในยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอริ์

การศึกษาการกระจายตัวของสารฟอสฟอริ์ในยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอริ์ โดยแปรเทคนิคการเบลนด์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์ฟลูออเรสเซนซ์ให้แสงที่ความยาวคลื่น 450-490 nm แก่ตัวอย่าง และใช้กำลังขยาย 4 เท่า ได้ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 4.23



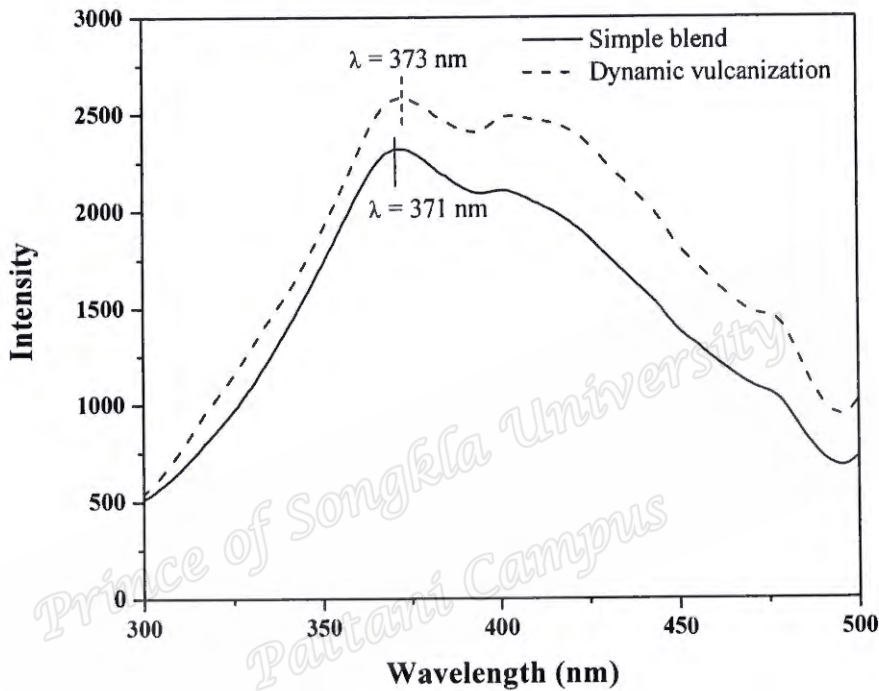
รูปที่ 4.23 ลักษณะการกระจายตัวของสารฟอสฟอริ์ในยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก โดยแปรเทคนิคการเบลนด์

จากรูปที่ 4.23 ลักษณะการกระจายตัวของสารฟอสฟอริ์ในยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก ที่แปรเทคนิคการเบลนด์พบว่า เมื่อเราให้แสงสีน้ำเงิน (450-490 nm) แก่ตัวอย่าง สารฟอสฟอริ์ที่อยู่ในตัวอย่างจะถูกกระตุ้นทำให้ปลดปล่อยแสงออกมา ซึ่งจะเป็นอนุภาคที่สว่างสีเขียวอ่อน โดยมีสีต่างจากเมทริกซ์ที่มีสีที่ทึบกว่า ขนาดอนุภาคของสารฟอสฟอริ์ในยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมด้วยเทคนิคการเบลนด์แบบปกติมีขนาดประมาณ $71.2 \pm 16.5 \mu\text{m}$ และการเตรียมด้วยเทคนิคการวัลคาไนเซชันแบบไดนามิกมีขนาดประมาณ $72.9 \pm 16.2 \mu\text{m}$ ซึ่งจะเห็นว่าการเบลนด์ทั้งสองเทคนิคจะมีขนาดของสารฟอสฟอริ์ที่ไม่ต่างกัน ทั้งนี้ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมด้วยเทคนิคทั้งสอง จะให้การกระจายตัวของสารฟอสฟอริ์อยู่ทั่วทั้งแผ่นยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก บ่งบอกถึงสารฟอสฟอริ์มีการกระจายตัวดีในยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก และเทคนิคการเตรียมยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอริ์จะไม่ส่งผลต่อขนาดของอนุภาคสารฟอสฟอริ์ที่กระจายตัว

4.2.4. สมบัติทางแสง (Luminescent properties)

4.2.4.1. ความยาวคลื่นที่กระตุ้น

การทดสอบความยาวคลื่นที่กระตุ้นของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอร์ โดยแปรเทคนิคการเบลนด์ ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.24



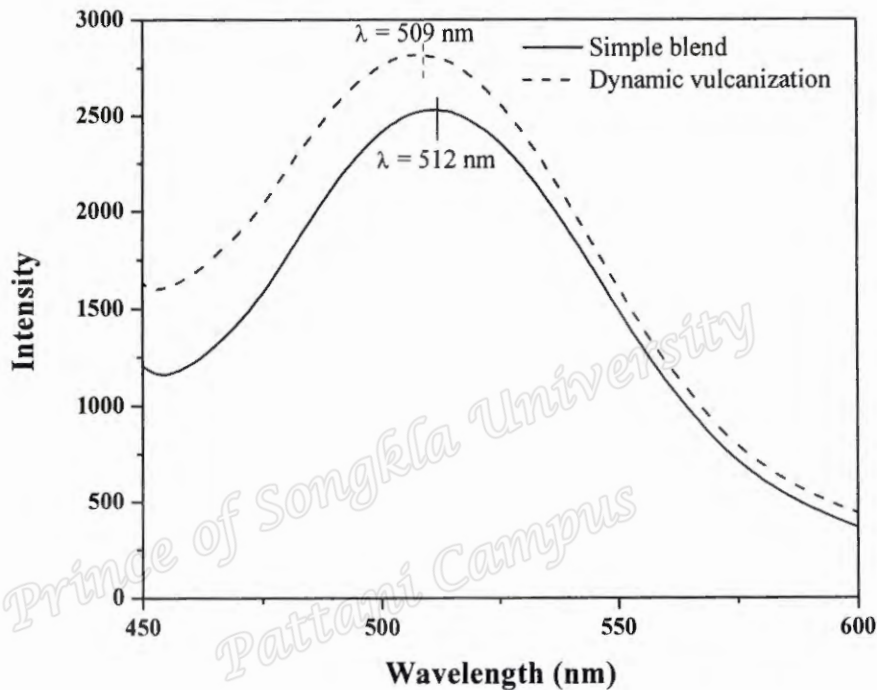
รูปที่ 4.24 สเปกตรัมของการกระตุ้นของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก โดยแปรเทคนิคการเบลนด์

จากรูปที่ 4.24 สเปกตรัมของการกระตุ้นของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก โดยแปรเทคนิคการเบลนด์พบว่า เมื่อกระตุ้นยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกด้วยแสงที่มีความยาวคลื่นที่ต่างกันจะให้ความเข้มแสงที่ปลดปล่อยแตกต่างกัน โดยยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมด้วยเทคนิคการเบลนด์แบบปกติและเทคนิคการวัลคาไนเซชันแบบไดนามิกส์จะให้ลักษณะของพีคที่ปรากฏคล้ายคลึงกัน ซึ่งสามารถถูกกระตุ้นได้ดีในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 360-440 nm (ดูจากความเข้มแสงที่สูงกว่า 70% ของความเข้มแสงเริ่มต้น) โดยยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมด้วยเทคนิคการเบลนด์แบบปกติและเทคนิคการวัลคาไนเซชันแบบไดนามิกส์จะปรากฏพีคสูงสุดที่ความยาวคลื่น 371 nm และ 373 nm ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าความยาวคลื่นที่กระตุ้นสารฟอสฟอร์เดิม (365 nm) (ดูผล

การทดลองได้ดังรูปที่ 4.6) ซึ่งอาจเกิดจากการหักเหแสงในเมทริกซ์ โดยเมทริกซ์ที่มียางวัลคาไนซ์ต้องใช้ความยาวคลื่นในการกระตุ้นที่สูงกว่าเมทริกซ์ที่ไม่มียางวัลคาไนซ์

4.2.4.2. ความยาวคลื่นที่ปลดปล่อย

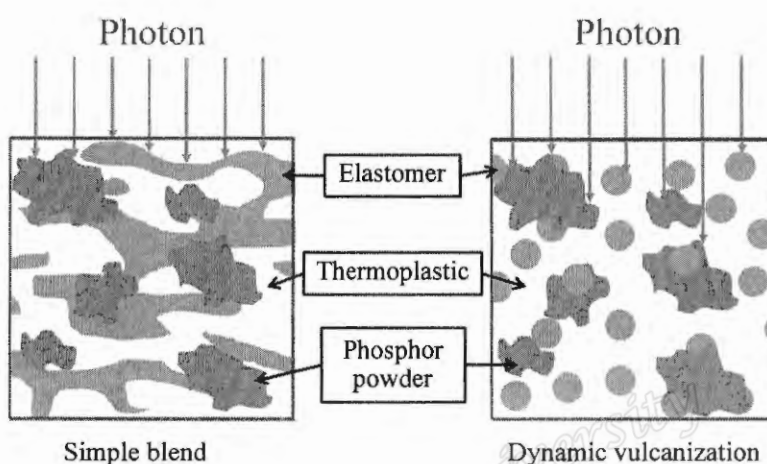
การทดสอบความยาวคลื่นที่ปลดปล่อยของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอร์ โดยแปรเทคนิคการเบลนด์ ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.25 สเปกตรัมของการปลดปล่อยพลังงานของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก โดยแปรเทคนิคการเบลนด์

จากรูปที่ 4.25 สเปกตรัมของการปลดปล่อยพลังงานของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก โดยแปรเทคนิคการเบลนด์พบว่า เมื่อกระตุ้นยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกด้วยความยาวคลื่น 375 nm ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมด้วยเทคนิคการเบลนด์แบบปกติและเทคนิคการวัลคาไนซ์แบบไดนามิกส์ให้การปลดปล่อยแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 512 nm และ 509 nm ตามลำดับ ซึ่งความยาวคลื่นที่ปลดปล่อยแสงสูงสุดต่ำกว่าของสารฟอสฟอร์เดิม (514 nm) (ดูได้จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.7) การลดลงของความยาวคลื่นที่ปลดปล่อยของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก อาจจะเกิดจากการหักเหแสงที่เกิดขึ้นจากเมทริกซ์ โดยเมทริกซ์ที่มียางวัลคาไนซ์จะให้ความยาวคลื่นเปลี่ยนไปมากกว่าเมทริกซ์ที่ไม่มียางวัลคาไนซ์ นอกจากนี้พบว่ายางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมด้วย

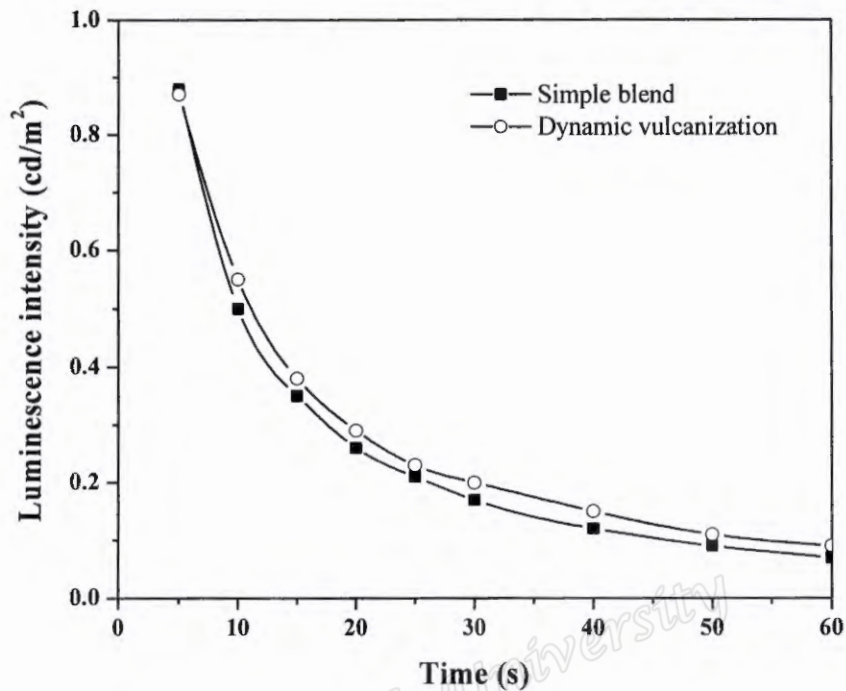
เทคนิคการวัลคาไนเซชันแบบไดนามิกส์จะให้ความเข้มแสงที่ปลดปล่อยสูงกว่าการเบลนด์แบบปกติ อาจเกิดจากการเบลนด์แบบปกติให้สัณฐานวิทยาเป็นเฟสต่อเนื่อง ซึ่งเฟสยางจะมีขนาดใหญ่ทำให้มีการบดบังแสงที่เข้าไปกระตุ้นและแสงที่ปลดปล่อยมากกว่าเทคนิคการวัลคาไนเซชันแบบไดนามิกส์ที่เฟสยางเป็นเฟสกระจายดังแสดงในรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.26 ลักษณะของแสงที่เข้าไปกระตุ้นยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่มีสัณฐานวิทยาต่างกัน

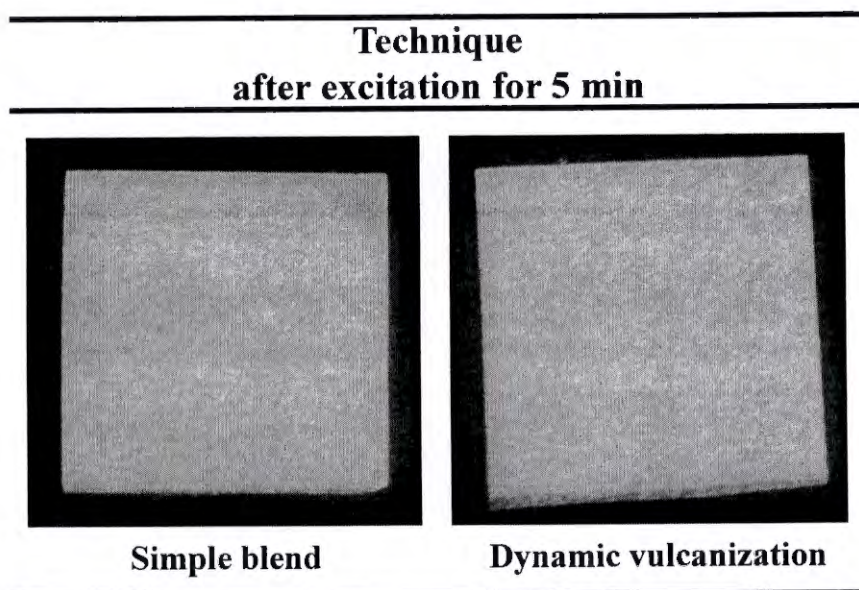
4.2.4.3. ระยะเวลาการคงอยู่ของแสงที่ปลดปล่อยหลังหยุดกระตุ้น

ระยะเวลาการคงอยู่ของแสงที่ปลดปล่อยหลังจากหยุดกระตุ้นของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอร์ โดยแปรเทคนิคการเบลนด์ ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.27 ระยะเวลาการคงอยู่ของแสงที่ปลดปล่อยหลังหยุดกระตุ้นของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรเทคนิคการเบลนด์

รูปที่ 4.27 ระยะเวลาการคงอยู่ของแสงที่ปลดปล่อยหลังหยุดกระตุ้นของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรเทคนิคการเบลนด์พบว่า ในช่วงแรกหลังจากหยุดกระตุ้น ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัสที่เตรียมด้วยเทคนิคการเบลนด์ทั้ง 2 แบบ จะให้ความเข้มแสงสูงและมีการลดลงของความเข้มแสงอย่างรวดเร็ว และหลังจากหยุดกระตุ้น 30 วินาที ความเข้มแสงจะลดเหลือประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ของความเข้มเดิม จากนั้นการลดลงของความเข้มแสงจะช้าลงและค่อนข้างคงที่ นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบความเข้มแสงของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมด้วยเทคนิคที่ต่างกันพบว่า ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมด้วยเทคนิควัลคาไนเซชันแบบไดนามิกมีความเข้มแสงที่ปลดปล่อยสูงกว่าการเตรียมด้วยเทคนิคการเบลนด์แบบปกติเล็กน้อย โดยลักษณะการปลดปล่อยแสงหลังจากหยุดกระตุ้นของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรเทคนิคการเบลนด์สามารถดูได้จากรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.28 ลักษณะการปลดปล่อยแสงหลังจากหยุดกระตุ้นของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรเทคนิคการเบลนด์

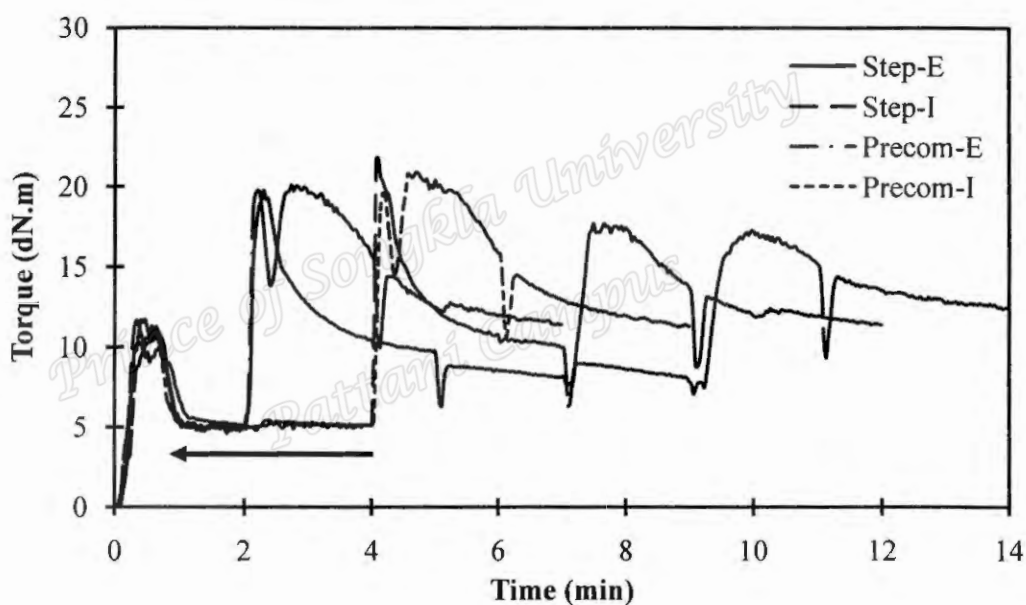
จากรูปที่ 4.28 ลักษณะการปลดปล่อยแสงหลังจากหยุดกระตุ้นของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรเทคนิคการเบลนด์พบว่า วิธีการเบลนด์ทั้งสองวิธีจะให้ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกปลดปล่อยแสงสีเขียว โดยเทคนิคการวัลคาไนเซชันแบบไดนามิกส์จะให้ลักษณะการปลดปล่อยแสงของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกมีความเข้มและสม่ำเสมอมากกว่าการเตรียมด้วยเทคนิคการเบลนด์แบบปกติ ซึ่งเป็นผลมาจากสัณฐานวิทยาที่แสดงในรูปที่ 4.26

4.2.5. สรุปผลการศึกษาอิทธิพลของเทคนิคการเบลนด์ต่อสมบัติของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส

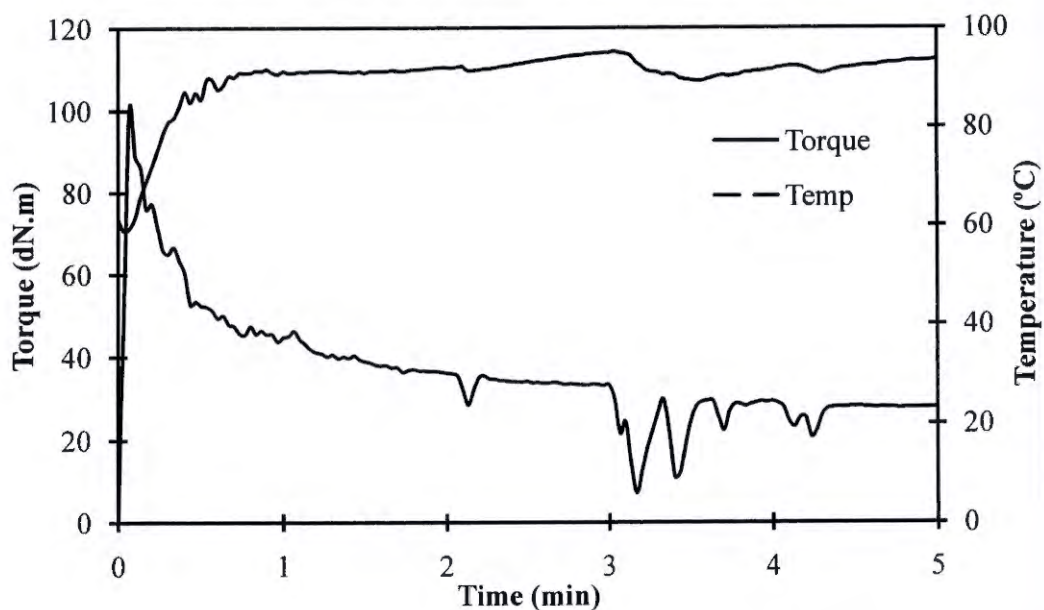
การเตรียมยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัสด้วยเทคนิคการเบลนด์แบบปกติและเทคนิคการวัลคาไนเซชันแบบไดนามิกส์ให้สมบัติของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัสดังนี้คือ ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมด้วยเทคนิคการวัลคาไนเซชันแบบไดนามิกส์จะให้สมบัติเชิงกล สมบัติหลังการบ่มเร่ง การผิดรูปถาวรแบบดึง และสมบัติทางแสงดีกว่าการเตรียมด้วยเทคนิคการเบลนด์แบบปกติ ซึ่งเป็นผลมาจากสัณฐานวิทยา ส่วนการกระจายตัวของสารฟอสฟอรัสของทั้งสองเทคนิคการเตรียมให้การกระจายตัวที่ไม่ต่างกัน

4.3. การศึกษาอิทธิพลของวิธีการผสมต่อสมบัติของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส

การเตรียมยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกระหว่าง NR/PP/PEC ที่อัตราส่วนการเบลนด์เท่ากับ 40/30/30 โดยน้ำหนัก โดยใช้วิธีการผสมที่ต่างกัน 4 วิธี คือ Step mixing-E, Step mixing-I, Precompound-E และ Precompound-I โดยวิธีแบบ Step mixing จะเป็นการเตรียมยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกในขั้นตอนเดียว ซึ่งจะใส่สารลงไปผสมทีละชนิดและวิธีแบบ Precompound จะเป็นการเตรียมยางคอมพาวนด์ก่อนที่จะเตรียมเป็นยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก ส่วน E และ I จะเป็นการผสมสารฟอสฟอรัส โดย E จะเป็นการเติมสารฟอสฟอรัสในขั้นตอนสุดท้าย และ I จะเป็นการเติมสารฟอสฟอรัสในขั้นตอนแรกหลังจากใส่เม็ดพลาสติก การผสมทั้ง 4 วิธี ได้กราฟการผสมดังรูปที่ 4.29



รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าทอร์กกับเวลาของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกจากการเบลนด์ระหว่าง NR/PP/PEC โดยแปรวิธีการผสม



รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าทอร์กกับเวลาและอุณหภูมิการผสมกับเวลาในการเตรียมยางคอมพาวนด์

จากรูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าทอร์กกับเวลาและอุณหภูมิการผสมกับเวลาของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกจากการเบลนดระหว่าง NR/PP/PEC โดยแปรวิธีการผสมพบว่า ค่าทอร์กการผสมของการผสมทั้ง 4 วิธี จะประกอบด้วย 3 พีค พีคแรกปรากฏที่ตำแหน่งเดียวกันคือ ประมาณนาที่ที่ 1 ซึ่งเกิดขึ้นจากความหนืดของพลาสติกที่เริ่มหลอม ส่วนพีคที่ 2 เกิดจากการเติมยางหรือยางคอมพาวนด์ลงไปผสม ซึ่งปรากฏที่นาที่ที่ 2 หรือ 4 ขึ้นอยู่กับแต่ละวิธีการผสม ส่วนพีคสุดท้ายนั้นเกิดจากการวัลคาไนซ์ในเฟสยางเมื่อใส่สารวัลคาไนซ์หรือยางคอมพาวนด์ที่มีส่วนผสมของสารวัลคาไนซ์ลงไป ส่งผลให้ความหนืดขณะผสมของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกเพิ่มสูงขึ้น เมื่อให้เวลาในการบดผสมเพิ่มขึ้นจะเห็นว่าความหนืดหรือค่าทอร์กของการบดผสมมีค่าลดลง เนื่องจากอนุภาคยางวัลคาไนซ์เกิดการแตกออกเป็นอนุภาคที่เล็กลง นอกจากนี้จะเห็นว่าการผสมแบบ Step mixing กับ Precompound พบว่าวิธีแบบ Precompound จะให้ค่าทอร์กขณะยางเกิดการวัลคาไนซ์ที่สูงกว่าแบบ Step mixing เนื่องจากวิธีแบบ Precompound สารวัลคาไนซ์จะถูกบดผสมในยางคอมพาวนด์โดยตรง เฟสยางจึงสามารถเกิดการวัลคาไนซ์ได้เร็วกว่าและมากกว่าการผสมแบบ Step mixing นอกจากนี้การเตรียมยางคอมพาวนด์เพื่อใช้ในการเตรียมยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก ดูกราฟการผสมได้ดังรูปที่ 4.30 จะเห็นว่าเมื่อใส่ยางลงไปผสมค่าทอร์กจะขึ้นสูงเนื่องจากความหนืดของยาง และเมื่อให้ระยะเวลาการบดผสมต่อไปค่าทอร์กจะลดลงเกิดจากสายโซ่โมเลกุลของยางเกิด

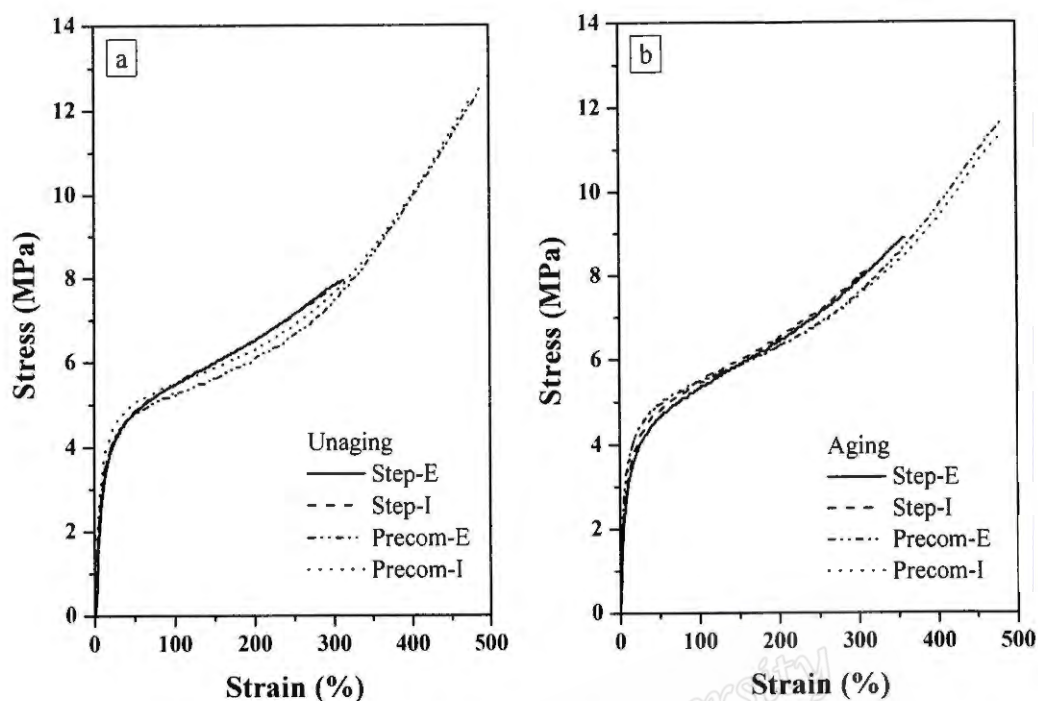
การตัดขาด นอกจากนี้จะเห็นค่าทอร์กที่เปลี่ยนไปเป็นช่วงๆนั้นเกิดจากการใส่สารเคมีในระหว่างเตรียมยางคอมพาวนด์

4.3.1. สมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

เตรียมยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกจากการเบลนดระหว่าง NR/PP/PEC โดยแปรวิธีการผสม 4 วิธีคือ Step mixing-E, Step mixing-I, Precompound-E และ Precompound-I ไปทดสอบสมบัติทางด้านการดึงก่อนและหลังการบ่มเร่ง และการฉีดรูปถาวรแบบดึง ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.31-4.34

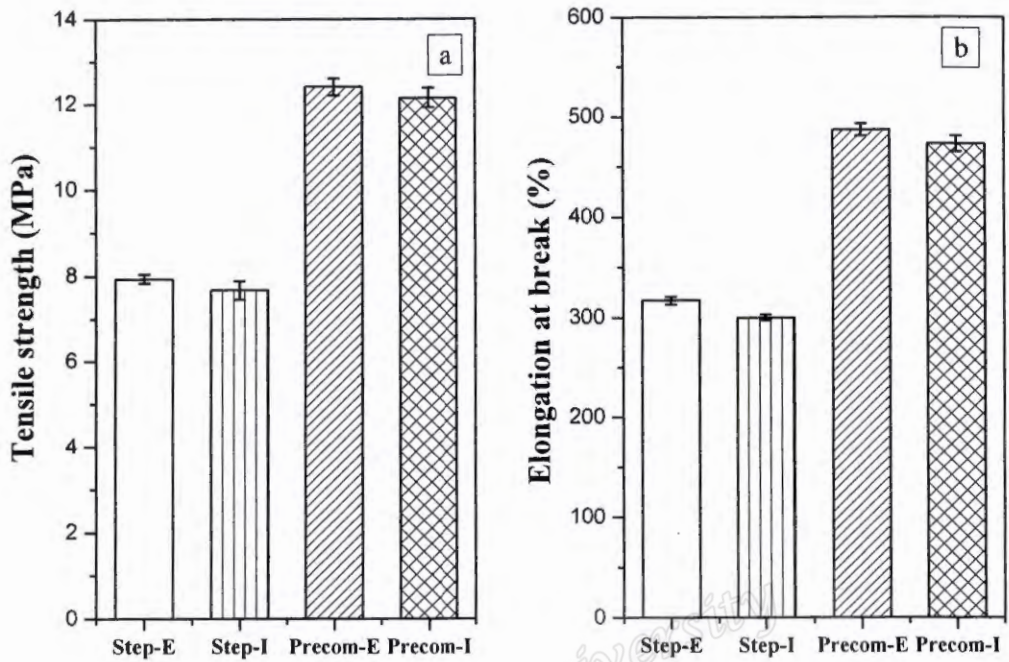
ตารางที่ 4.3 สมบัติเชิงกลก่อนและหลังการบ่มเร่งของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรวิธีการผสม

Properties	Method of mixing			
	Step-E	Step-I	Precom-E	Precom-I
Unaging				
Modulus at 50% (MPa)	4.77±0.07	4.77±0.08	4.85±0.20	4.95±0.08
Modulus at 100% (MPa)	5.43±0.07	5.42±0.07	5.32±0.21	5.45±0.07
Tensile strength (MPa)	7.93±0.11	7.67±0.22	12.41±0.20	12.15±0.23
Elongation at break (%)	317±4	300±3	487±6	473±8
Tension set (%)	28.5±7.2	25.4±2.9	24.5±2.9	29.5±2.4
Aging				
Tensile strength (MPa)	8.79±0.08	8.21±0.23	11.72±0.25	11.28±0.32
Elongation at break (%)	356±13	320±2	488±4	477±18
Retention				
Tensile strength (%)	110.9	107.1	94.4	92.8
Elongation at break (%)	112.2	106.7	100.2	100.9



รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรวิธีการผสมก่อน (a) และหลังการบ่มเร่ง (b)

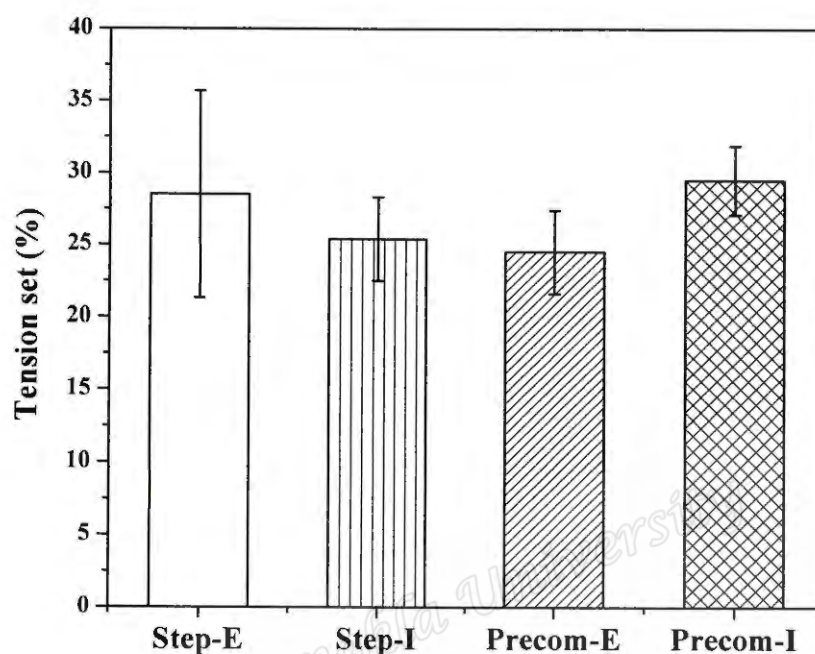
จากรูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรวิธีการผสมพบว่า ความเค้นกับความเครียดทั้งก่อนและหลังการบ่มเร่งของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัสทั้ง 4 วิธี จะให้ลักษณะการผิดรูปไม่ต่างกันคือ วัสดุจะมีมอดุลัสและความแข็งที่สูง ทั้งนี้เป็นผลมาจากเฟสของโพลีโพรพิลีนที่จะเกิดผลึกได้และมีความแข็งแรงสูง นอกจากนี้วัสดุยังแสดงความเป็นออสติก ดูได้จากระยะยืดที่จุดขาดที่มีค่าสูง ซึ่งเป็นสมบัติของเฟสยางวัลคาไนซ์และโคพอลิเมอร์ของโพรพิลีนเอทิลีน



รูปที่ 4.32 สมบัติการดึงของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรวิธีการผสม (a) ความต้านทานต่อแรงดึง และ (b) ระยะยืดที่จุดขาด

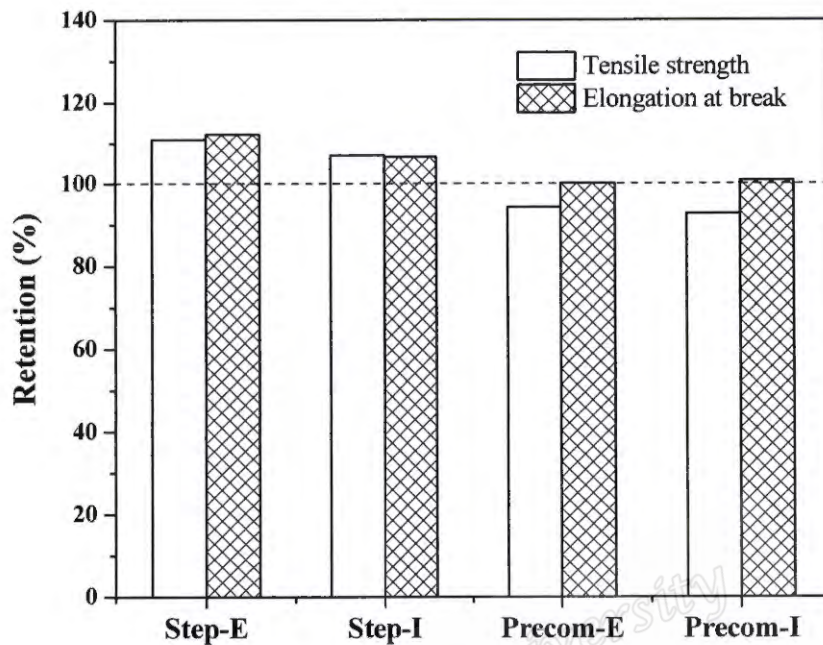
รูปที่ 4.32 สมบัติการดึงของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรวิธีการผสม (a) ความต้านทานต่อแรงดึง และ (b) ระยะยืดที่จุดขาด พบว่าการเตรียมยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก โดยใส่สารฟอสฟอรัสก่อนหรือหลัง (I หรือ E) ใส่ยางธรรมชาติจะไม่ส่งผลต่อค่าความต้านทานต่อแรงดึงและระยะยืดที่จุดขาด นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการเตรียมแบบ Step และ Precompound จะเห็นว่าวิธีการเตรียมแบบ Step จะให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและระยะยืดที่จุดขาดของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกต่ำกว่าการเตรียมด้วยวิธี Precompound อย่างชัดเจน เนื่องจากยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมแบบ Precompound สารวัลคาไนซ์ส่วนใหญ่จะอยู่ในเฟสยางธรรมชาติทำให้ยางธรรมชาติสามารถเกิดการวัลคาไนซ์ได้สูง กว่ายางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมแบบ Step ซึ่งมีการกระจายตัวของสารวัลคาไนซ์ในพอลิเมอร์ทั้งสามชนิด ส่งผลให้ความเข้มข้นของสารวัลคาไนซ์ในเฟสยางธรรมชาติซึ่งเกิดการวัลคาไนซ์ได้เร็วมีปริมาณน้อยจึงเกิดการวัลคาไนซ์ได้น้อย สมบัติเชิงกลจึงด้อย (ปริมาณการวัลคาไนซ์ดูได้จากค่าทอร์คการผสมในรูปที่ 4.29 ณ เวลาหลังจากการใส่สารวัลคาไนซ์ ซึ่งความแตกต่างของค่าทอร์คมากจะสื่อถึงการวัลคาไนซ์ที่

เกิดขึ้นมีปริมาณมากและหากความแตกต่างของค่าทอร์คน้อยจะสื่อถึงการวัลคาไนซ์ที่เกิดขึ้นมีปริมาณน้อย)



รูปที่ 4.33 การมิดรูปถาวรแบบดึงของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรวิธีการผสม

จากรูปที่ 4.33 การมิดรูปถาวรแบบดึงของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรวิธีการผสมพบว่า ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมด้วยวิธีการผสมทั้ง 4 วิธี จะให้ค่าการมิดรูปถาวรแบบดึงไม่ต่างกัน ซึ่งอยู่ที่ประมาณ 27 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่าวิธีการผสมไม่ส่งผลต่อสมบัติด้านการมิดรูป นอกจากนี้ยังบ่งบอกถึงยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมได้จากทั้ง 4 วิธี มีสมบัติอิลาสติกที่ดี

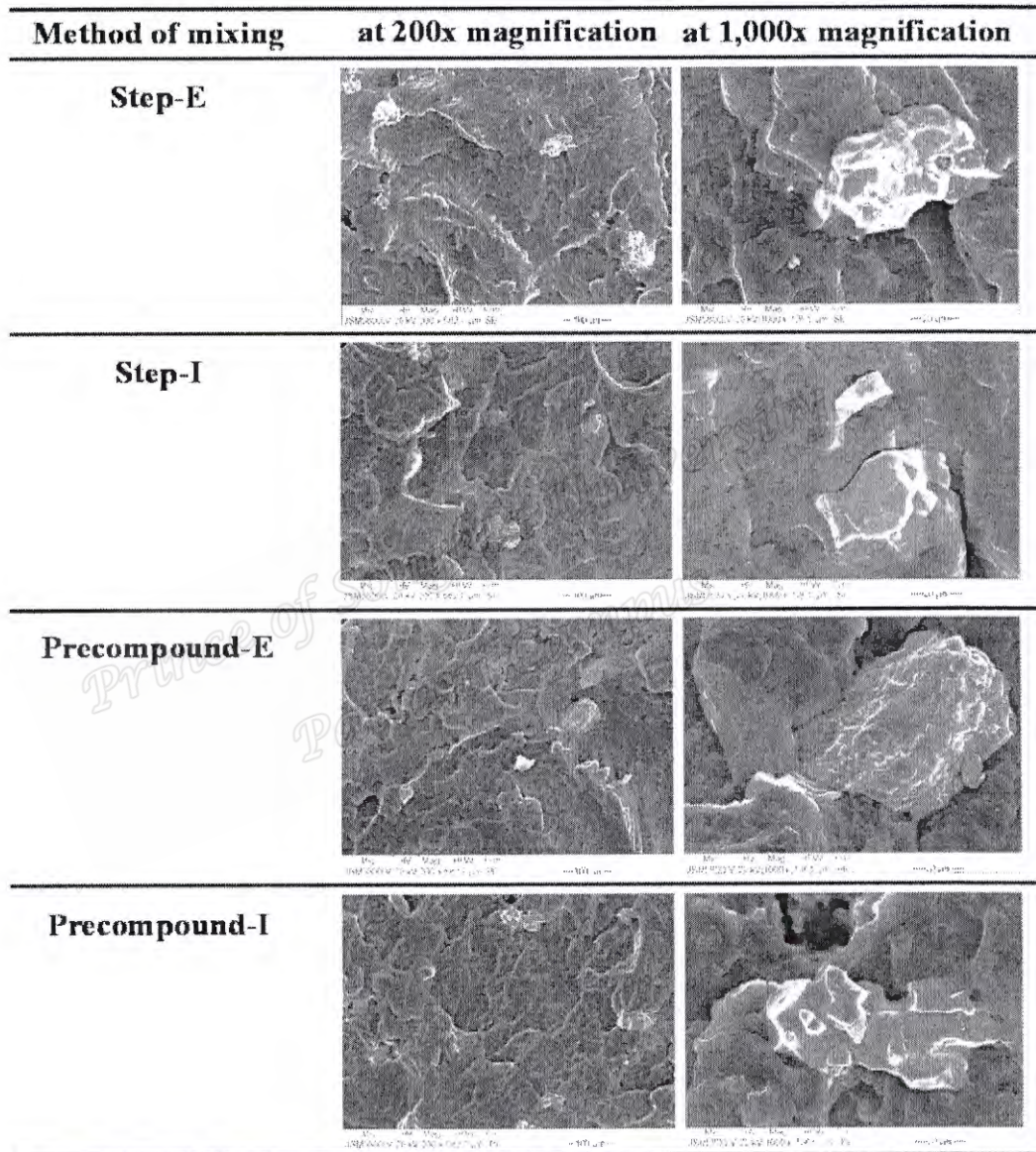


รูปที่ 4.34 เปอร์เซ็นต์การคงอยู่ของสมบัติเชิงกลหลังบ่มแรงด้วยความร้อนของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรวิธีการผสม

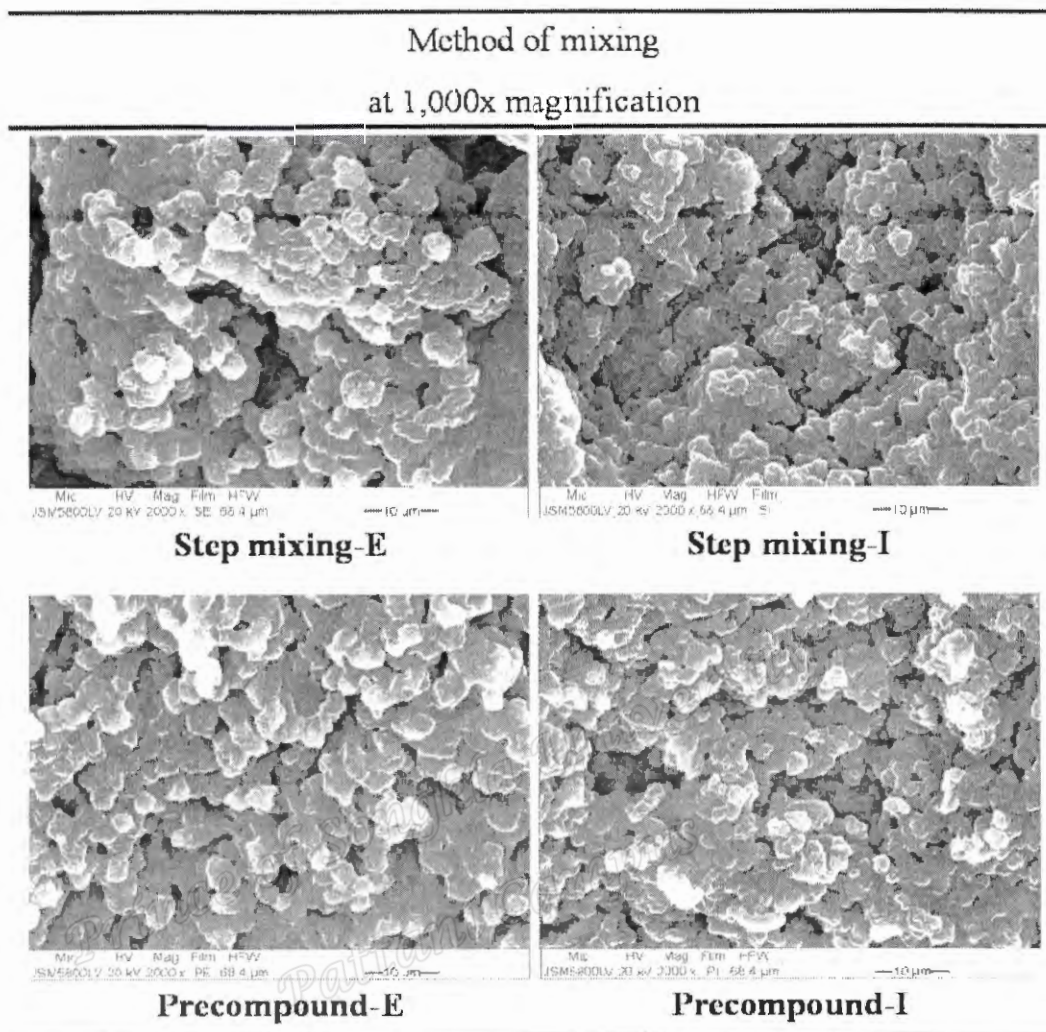
รูปที่ 4.34 เปอร์เซ็นต์การคงอยู่ของสมบัติเชิงกลหลังบ่มแรงด้วยความร้อนของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรวิธีการผสมพบว่า ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมด้วยวิธีแบบ Step จะให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและระยะยืดที่จุดขาดเปลี่ยนไปในทางเพิ่มขึ้น เนื่องจากยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่มีขั้นตอนการผสมแบบ Step ทำการเติมสารวัลคาไนซ์ในระหว่างการผสม NR/PP/PEC ทำให้สารวัลคาไนซ์สามารถกระจายตัวได้ในทั้งสามเฟสเมื่อนำยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกไปบ่มแรง สารวัลคาไนซ์ที่หลงเหลืออยู่ในยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก โดยเฉพาะในเฟสของโคพอลิเมอร์ของโพรพิลีนเอทิลีนที่ซึ่งเกิดการวัลคาไนซ์ในขั้นตอนการวัลคาไนซ์แบบไดนามิกส์ได้ช้ากว่ายางธรรมชาติสามารถเกิดการวัลคาไนซ์ต่อได้ ทำให้สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เพิ่มสูงขึ้นหลังบ่มแรง ส่วนยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมด้วยวิธีแบบ precompound จะให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงเปลี่ยนไปในทางลดลงเล็กน้อยและระยะยืดที่จุดขาดที่ไม่เปลี่ยนแปลง นอกจากนี้พบว่าขั้นตอนการผสมสารฟอสฟอรัส (I หรือ E) ลงในยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกไม่ส่งผลต่อความแตกต่างของสมบัติเชิงกลหลังบ่มแรง

4.3.2. สัณฐานวิทยา (Morphology)

การศึกษาสัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกผสมสารฟอสฟออร์ โดยแปรวิธีการผสม 4 วิธี คือ Step mixing-E, Step mixing-I, Precompound-E และ Precompound-I ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.35 และ 4.36



รูปที่ 4.35 สัณฐานวิทยาแบบไม่สกัดเฟสของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกผสมสารฟอสฟออร์ โดยแปรวิธีการผสม ที่กำลังขยาย 200 เท่า และ 1,000 เท่า



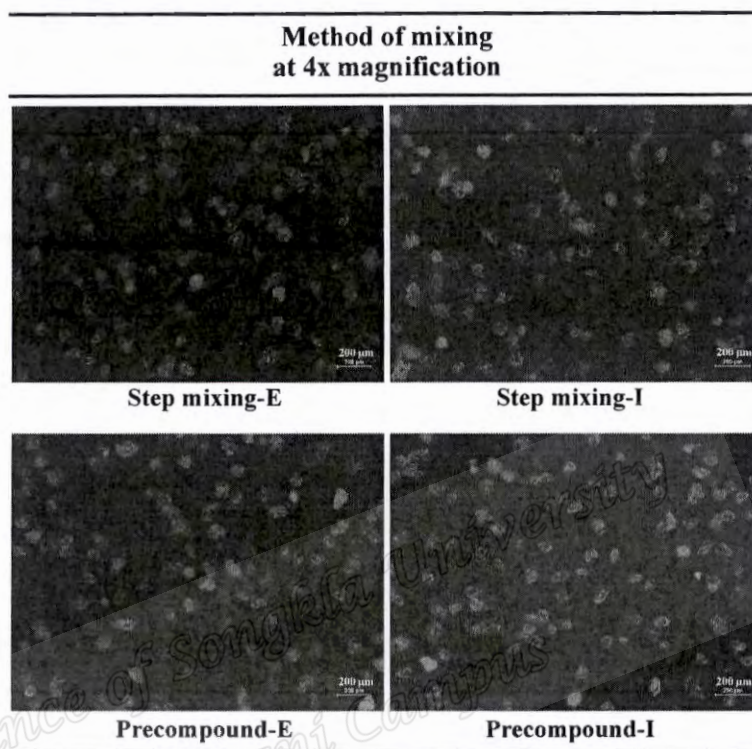
รูปที่ 4.36 สัณฐานวิทยาแบบสกัดเฟสของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกผสมสารฟอสฟอรั โดยแปรวิธีการผสม ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า

จากรูปที่ 4.35 สัณฐานวิทยาแบบไม่สกัดเฟสของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกผสมสารฟอสฟอรั โดยแปรวิธีการผสม ที่กำลังขยาย 200 เท่า และ 1,000 เท่า พบว่ายางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมด้วยวิธีการผสมทั้ง 4 วิธี จะให้ลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่ไม่ต่างกันทั้งที่ กำลังขยาย 200 เท่า และที่ กำลังขยาย 1,000 เท่า โดยที่ กำลังขยาย 200 เท่า สัณฐานวิทยาจะมีลักษณะผิวที่ขรุขระและมีรอยหยัก โดยรอยหยักเกิดจากการแตกออกของพลาสติกโพลีโพรพิลีน และที่ กำลังขยาย 1,000 เท่า จะเห็นว่ามีช่องว่างระหว่างสารฟอสฟอรักับยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก แสดงว่าสารฟอสฟอรัไม่เข้ากับยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก เนื่องจากสารฟอสฟอรัเป็นสารอนินทรีย์ซึ่งไม่เข้ากับ

สารอินทรีย์อย่างยวธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก นอกจากนี้เมื่อพิจารณาขนาดของสารฟอสฟอรัสที่ปรากฏพบว่า ขนาดของสารฟอสฟอรัสมีขนาดอยู่ที่ 50-100 μm (วัดตามแนวยาว) ซึ่งตรงกับขนาดของสารฟอสฟอรัสเริ่มต้น (ประมาณ 70 μm) แสดงให้เห็นถึงการบดผสมไม่ส่งผลต่อขนาดของสารฟอสฟอรัส

จากรูปที่ 4.36 สันฐานวิทยาแบบสเกตเฟสของยวธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรวิธีการผสม ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า พบว่ายวธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมด้วยวิธีการผสมทั้ง 4 วิธี ให้สันฐานวิทยาของเฟสยวมีลักษณะอนุภาคกลมกระจายในเฟสเทอร์โมพลาสติก เนื่องจากมีการใส่สารวัลคาไนซ์ ส่งผลให้ยวเกิดการวัลคาไนซ์ในขณะการผสม และเมื่อเฟสยววัลคาไนซ์จึงทำให้มีความหนืดสูงขึ้น เมื่อบดผสมต่อไปจะทำให้เฟสยววัลคาไนซ์เกิดการแตกออกเป็นอนุภาคที่เล็กลงกระจายในพลาสติกหลอม (เจ๊ะซิติ, 2557; Asaethe *et al.*, 1999; John *et al.*, 2003) นอกจากนี้เมื่อพิจารณายวธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่มีการเตรียมด้วยวิธีการผสมแบบ Step และ Precompound ที่มีลำดับการใส่สารฟอสฟอรัสเหมือนกันพบว่า ยวธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกมีขนาดของอนุภาคยวไม่แตกต่างกัน และเมื่อพิจารณาขั้นตอนการผสมสารฟอสฟอรัสที่ต่างกัน (E และ I) พบว่ายวธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่มีการเติมสารฟอสฟอรัสไปในขั้นตอนแรก (I) ก่อนที่จะเติมยวหรือยวคอมพาวนด์ จะทำให้เฟสยวที่กระจายตัวในเฟสพลาสติกมีขนาดเล็กกว่าการเติมสารฟอสฟอรัสในขั้นตอนสุดท้าย (E) เนื่องจากสารฟอสฟอรัสเป็นโลหะ มีความแข็งและความหนาแน่นสูง เมื่อนำไปผสมกับยวธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกทำให้เกิดแรงเฉือนมากขึ้นในขั้นตอนการผสม ซึ่งการผสมสารฟอสฟอรัสลงในเทอร์โมพลาสติกในขั้นตอนแรก (I) จะทำให้เทอร์โมพลาสติกมีความหนืดเพิ่มสูงขึ้นใกล้เคียงกับความหนืดของยวมากขึ้น สันฐานวิทยาเกิดเป็นวัฏภาคต่อเนื่อง เมื่อยวเกิดการวัลคาไนซ์จะให้ขนาดอนุภาคยววัลคาไนซ์เป็นแบบเนื้อละเอียดหรือมีขนาดอนุภาคเล็ก อีกทั้งการผสมสารฟอสฟอรัสลงในเทอร์โมพลาสติกในขั้นตอนแรก (I) มีระยะเวลาที่สารฟอสฟอรัสถูกบดผสมในยวธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกนานกว่าการเติมสารฟอสฟอรัสในขั้นตอนสุดท้าย (E)

4.3.3. การกระจายตัวของสารฟอสฟอริในยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอริ
 การศึกษาการกระจายตัวของสารฟอสฟอริในยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสาร
 ฟอสฟอริ โดยแปรเทคนิคการเบลนด์ ได้ผลการศึกษาดังรูปที่ 4.37



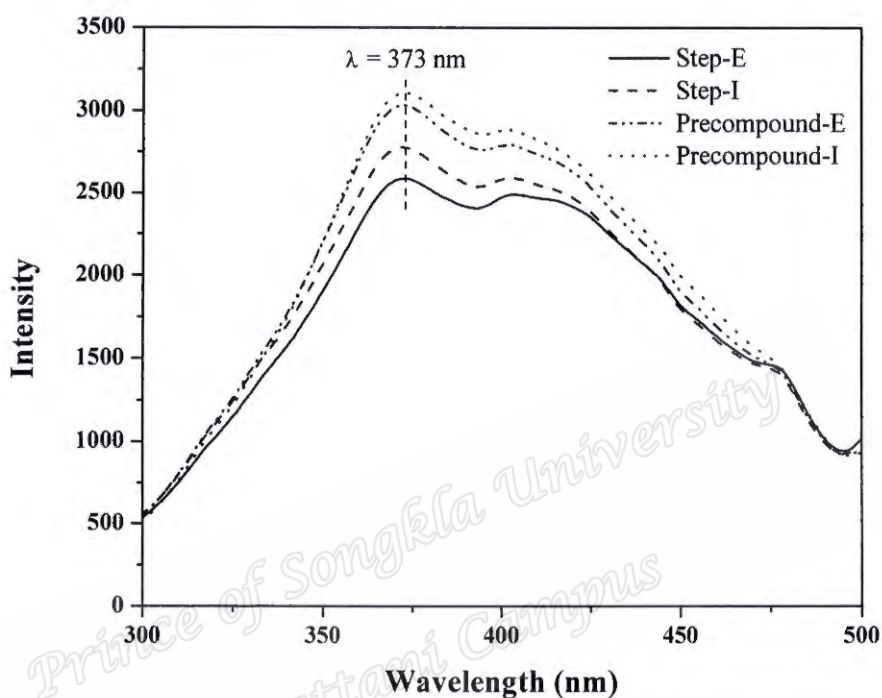
รูปที่ 4.37 ลักษณะการกระจายตัวของสารฟอสฟอริในยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก โดยแปรวิธีการผสม

จากรูปที่ 4.37 ลักษณะการกระจายตัวของสารฟอสฟอริในยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก โดยแปรวิธีการผสมพบว่า ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่มีการเตรียมแตกต่างกัน 4 วิธี จะให้ลักษณะของการกระจายตัวของสารฟอสฟอริไม่ต่างกันคือ เมื่อให้แสงที่มีความยาวคลื่น 450 - 490 nm ไปกระตุ้นชิ้นตัวอย่างยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก สารฟอสฟอริก็จะถูกกระตุ้นทำให้มีการปลดปล่อยแสงออกมา ซึ่งจะเป็นอนุภาคสว่างเป็นสีเขียวอ่อน มีสีต่างจากยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่มีสีที่ทึบกว่า ขนาดอนุภาคของสารฟอสฟอริในเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมด้วยวิธี Step-E, Step-I, Precompound-E และ Precompound-I มีขนาดประมาณ 72.9 ± 16.2 , 78.1 ± 18.5 , 73.7 ± 21.9 และ 73.9 ± 15.3 μm ตามลำดับ (วัดด้วยโปรแกรม ImageJ) ซึ่งจะเห็นว่าวิธีการผสมไม่ส่งผลต่อขนาดอนุภาคสารฟอสฟอริ และสารฟอสฟอริมีการกระจายตัวอยู่ทั่วทั้งแผ่นยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกโดยไม่เกาะกลุ่มกัน

4.3.4. สมบัติทางแสง (Luminescent properties)

4.3.4.1. ความยาวคลื่นที่กระตุ้น

การทดสอบความยาวคลื่นที่กระตุ้นของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอร์ โดยแปรวิธีการผสม ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.38



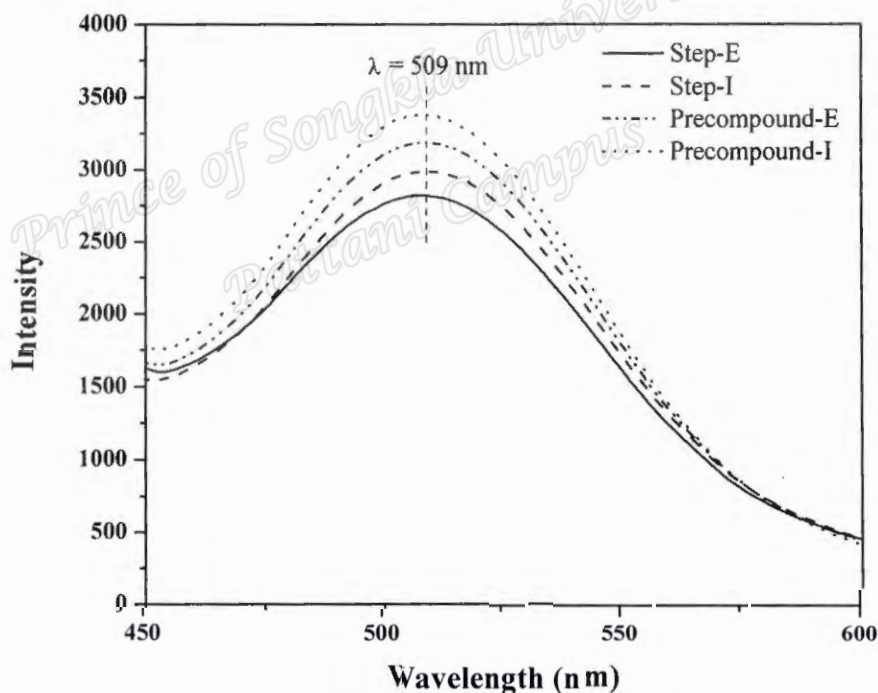
รูปที่ 4.38 สเปกตรัมของการกระตุ้นของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก โดยแปรวิธีการผสม

จากรูปที่ 4.38 สเปกตรัมของการกระตุ้นของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก โดยแปรวิธีการผสมพบว่า เมื่อกระตุ้นยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกด้วยความยาวคลื่นที่ต่างกันจะให้ความเข้มแสงที่ปลดปล่อยต่างกัน โดยวิธีการเตรียมยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอร์ทั้ง 4 วิธี มีพีคที่ปรากฏคล้ายคลึงกัน ซึ่งสามารถกระตุ้นได้ดีในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 360-440 nm (ดูจากความเข้มแสงที่สูงกว่า 70% ของความเข้มแสงเริ่มต้น) และมีความยาวคลื่นที่สามารถกระตุ้นได้ดีที่สุดอยู่ที่ 373 nm นอกจากนี้เมื่อพิจารณาความเข้มแสงที่ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกปลดปล่อยพบว่ายางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมด้วยวิธี Precompound-I ถูกกระตุ้นได้ดีที่สุด รองลงมาคือ Precompound-E, Step-I และ Step-E ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการผสมวิธีแบบ Precompound จะทำให้สารฟอสฟอร์ถูกกระตุ้นได้ง่ายกว่าการผสมแบบ Step เนื่องจากวิธีแบบ Precompound มีการใส่น้ำมันในยางคอมพาวนด์ ซึ่งน้ำมันจะไปแทรกกระหว่างสายโซ่โมเลกุลยางทำให้สายโซ่โมเลกุล

อย่างต่างกันมากขึ้นจึงมีความโปร่งแสงเพิ่มขึ้น และในขั้นตอนการผสมสารฟอสฟอรัสการเติมสารฟอสฟอรัสลงไปในขั้นตอนแรก (I) จะทำให้สารฟอสฟอรัสถูกกระตุ้นได้ง่ายกว่าหรือแสงสามารถเข้าไปกระตุ้นได้มากกว่าการเติมสารฟอสฟอรัสลงไปในขั้นตอนสุดท้าย (E) ซึ่งเกิดจากการเติมสารฟอสฟอรัสลงไปในขั้นตอนแรก (I) จะทำให้ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกมีขนาดของอนุภาคยางวัลคาไนซ์เล็กกว่าการเติมสารฟอสฟอรัสลงไปในขั้นตอนสุดท้าย (I) (สามารถดูสูตรงานวิจัยได้ในรูปที่ 4.36) ซึ่งอธิบายเพิ่มเติมได้จากรูปที่ 4.26 ที่อธิบายกลไกการทำงานของแสงที่ตกกระทบสารฟอสฟอรัส จะพบว่าหากเฟสยางมีขนาดใหญ่จะบดบังการส่องทะลุผ่านของแสงไปยังจุดอื่น ทำให้สารฟอสฟอรัสได้รับการกระตุ้นน้อยลงจึงปลดปล่อยแสงได้น้อยลง

4.3.4.2. ความยาวคลื่นที่ปลดปล่อย

การทดสอบความยาวคลื่นที่ปลดปล่อยของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรวิธีการผสม ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.39

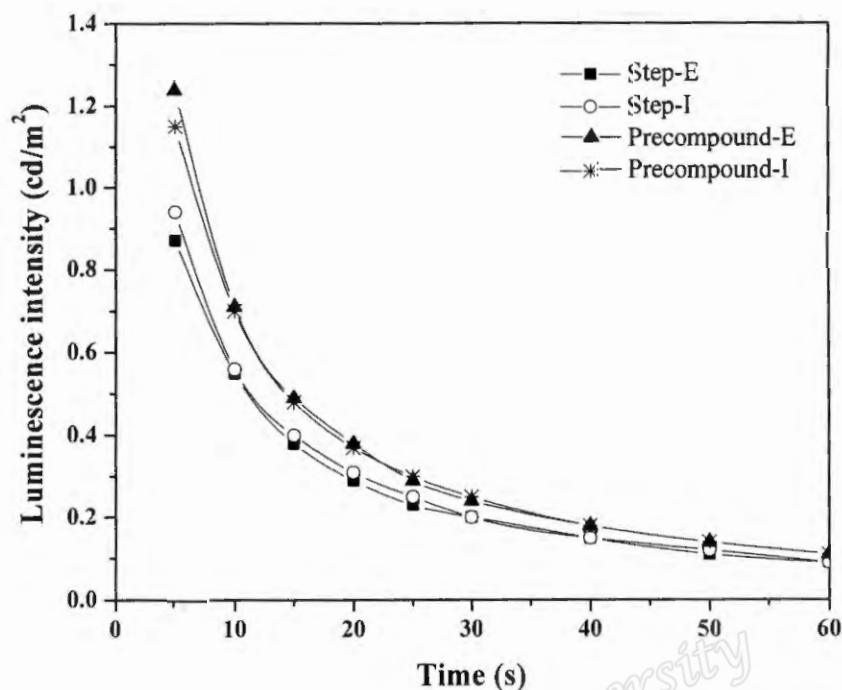


รูปที่ 4.39 สเปกตรัมของการปลดปล่อยพลังงานของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก โดยแปรวิธีการผสม

จากรูปที่ 4.39 สเปกตรัมของการปลดปล่อยพลังงานของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก โดยแปรวิธีการผสมพบว่า เมื่อกระตุ้นยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกด้วยความยาวคลื่น 375 nm ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัสจะให้การปลดปล่อยแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่นประมาณ 509 nm ซึ่งเป็นความยาวคลื่นใกล้เคียงกับที่สารฟอสฟอรัสบริสุทธิ์ปลดปล่อย เนื่องมาจากการทรานซิชันของอิเล็กตรอนของ Eu^{2+} ที่ระดับพลังงาน $4f^65d^1 \rightarrow 4f^7$ ที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 4.1.2.2 นอกจากนี้จะเห็นว่ายางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมด้วยวิธี Precompound-I ให้ความเข้มแสงที่สูงสุด รองลงมาคือ การเตรียมด้วยวิธี Precompound-E, Step-I และ Step-E ตามลำดับ ซึ่งบอกถึงวิธีการผสมแบบ Precompound จะให้การปลดปล่อยแสงสูงกว่าวิธีการผสมแบบ Step เนื่องจากวิธีแบบ Precompound จะมีการใส่น้ำมันในยางคอมพาวนด์ก่อนที่จะนำไปเตรียมยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก ซึ่งน้ำมันจะไปแทรกระหว่างสายโซ่โมเลกุลยาง ทำให้สายโซ่โมเลกุลยางห่างกันมากขึ้นจึงส่งผลให้ยางมีความโปร่งแสงเพิ่มขึ้นกว่าวิธีแบบ Step ที่มีการใส่น้ำมันไปหลังจากที่ผสมยางและพลาสติกแล้ว โดยในการผสมแบบ Step จะทำให้น้ำมันที่ผสมไปอยู่ในเฟสพลาสติกมากกว่าเฟสยาง เพราะเฟสยางมีความหนืดสูงน้ำมันจึงเข้าไปแทรกตัวได้ยาก ในส่วนของลำดับการผสมสารฟอสฟอรัส จะเห็นว่าการผสมแบบ I (ใส่สารฟอสฟอรัสก่อนใส่ยาง) ให้การปลดปล่อยแสงสูงกว่าการผสมแบบ E (ใส่สารฟอสฟอรัสหลังจากใส่ยาง) เนื่องจากการใส่แบบ I จะให้สัดส่วนวิทยาของอนุภาคยางที่มีขนาดเล็กกว่าแบบ E

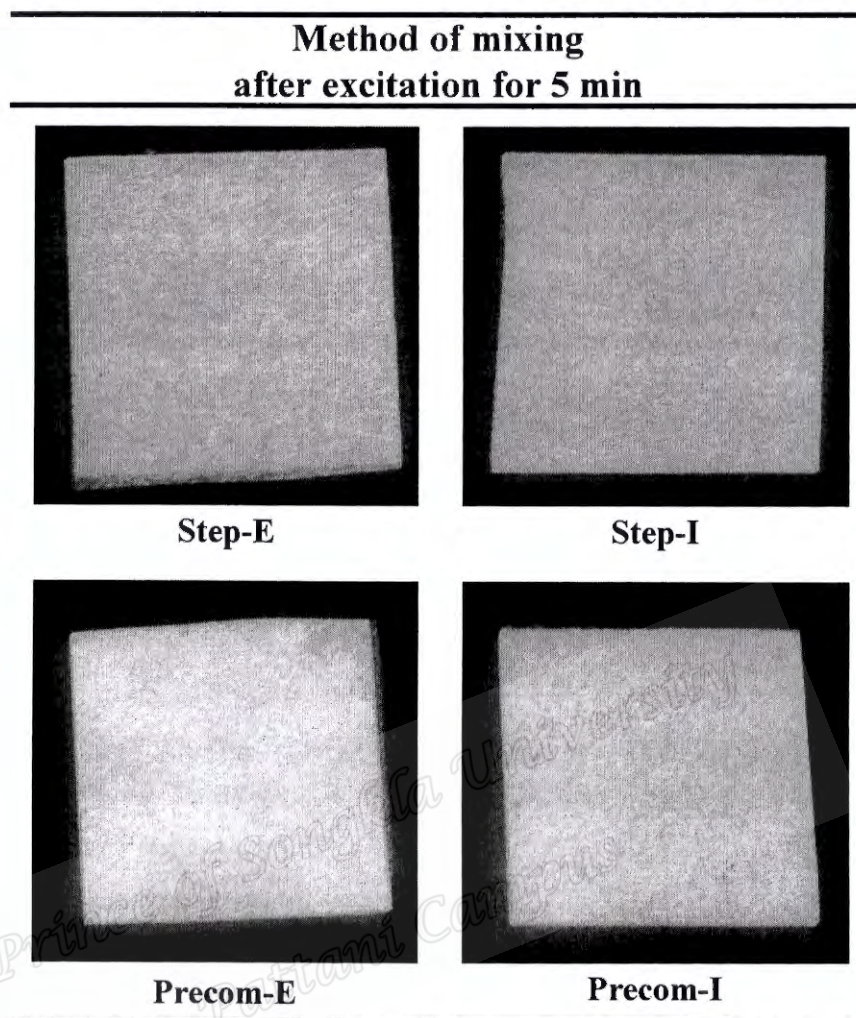
4.3.4.3. ระยะเวลาการคงอยู่ของแสงที่ปลดปล่อยหลังหยุดกระตุ้น

ระยะเวลาการคงอยู่ของแสงที่ปลดปล่อยหลังจากการกระตุ้นของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรวิธีการผสม ทดสอบโดยใช้แสง UVA ไปกระตุ้นตัวอย่างเป็นเวลา 5 นาที แล้วตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงที่ปลดปล่อยหลังจากหยุดกระตุ้น ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.40



รูปที่ 4.40 ระยะเวลาการคงอยู่ของแสงที่ปลดปล่อยหลังหยุดกระตุ้นของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอร์ โดยแปรวิธีการผสม

รูปที่ 4.40 ระยะเวลาการคงอยู่ของแสงที่ปลดปล่อยหลังหยุดกระตุ้นของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอร์ โดยแปรวิธีการผสมพบว่า ในช่วงแรกหลังจากหยุดกระตุ้น ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอร์ ที่เตรียมโดยวิธีการผสมทั้ง 4 วิธี มีการลดลงของความเข้มแสงอย่างรวดเร็ว จนมาถึงเวลาหลังจากหยุดกระตุ้น 20 วินาที จากนั้นความเข้มแสงจะค่อยๆ ลดลงจนเกือบจะคงที่ นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบความเข้มแสงที่ปลดปล่อยของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมจากวิธีที่แตกต่างกันพบว่า ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมด้วยวิธี Precompound ให้ความเข้มแสงที่ปลดปล่อยสูงกว่าวิธี Step ดังเหตุผลที่ได้กล่าวมาในหัวข้อที่ 4.3.4.2. และเมื่อเปรียบเทียบขั้นตอนการผสมสารฟอสฟอร์ (I และ E) พบว่า ขั้นตอนการผสมจะให้ระยะเวลาการคงอยู่ของแสงที่ปลดปล่อยหลังหยุดกระตุ้นไม่ต่างกัน โดยลักษณะการปลดปล่อยแสงหลังจากหยุดกระตุ้นของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอร์ โดยแปรวิธีการผสมสามารถดูได้จากรูปที่ 4.4:1



รูปที่ 4.41 ลักษณะการปลดปล่อยแสงหลังจากหยุดกระตุ้นของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรวิธีการผสม

จากรูปที่ 4.41 ลักษณะการปลดปล่อยแสงหลังจากหยุดกระตุ้นของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรวิธีการผสมพบว่า ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมด้วยวิธี Precompound ให้การปลดปล่อยแสงมีความสม่ำเสมอและมีความเข้มแสงสูงกว่าวิธีแบบ Step นอกจากนี้เมื่อพิจารณาขั้นตอนการใส่สารฟอสฟอรัสระหว่าง Precompound-E กับ Precompound-I และ Step-E กับ Step-I จะไม่เห็นความแตกต่างกันของลักษณะการปลดปล่อยแสงหลังจากหยุดกระตุ้นของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก

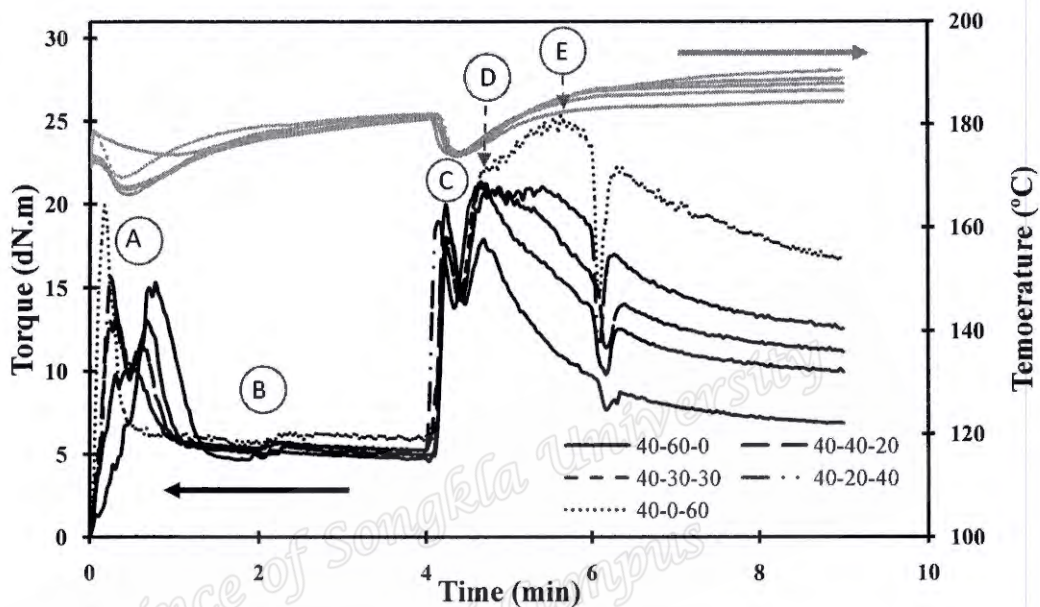
4.3.5. สรุปผลของการศึกษาอิทธิพลของวิธีการผสมต่อสมบัติของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส

การเตรียมยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยใช้วิธีการผสมที่แตกต่างกัน 4 วิธี คือ Step mixing-E, Step mixing-I, Precompound-E และ Precompound-I พบว่าการผสมแบบ Precompound จะให้สมบัติเชิงกล สมบัติเชิงกลหลังการบ่มเร่ง และสมบัติทางแสงของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกดีกว่าการผสมแบบ Step ส่วนของขั้นตอนการผสมสารฟอสฟอรัส ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่มีลำดับการผสมสารฟอสฟอรัสแบบ I ให้สมบัติทางแสงดีกว่าและสัญญาณวิทยาของอนุภาคยางที่เล็กกว่าการใช้ลำดับการผสมสารฟอสฟอรัสแบบ E

Prince of Songkla University
Pattani Campus

4.4. การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนการเบลนด์ต่อสมบัติของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส

การเตรียมยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์ระหว่าง NR/PP/PEC ที่อัตราส่วนการเบลนด์เท่ากับ 40/60/0, 40/40/20, 40/30/30, 40/20/40 และ 40/0/60 โดยน้ำหนัก ได้กราฟการผสมดังรูปที่ 4.42



รูปที่ 4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างทอร์กกับเวลาและอุณหภูมิการผสมกับเวลาของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกจากการเบลนด์ระหว่าง NR/PP/PEC โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์ของ NR/PP/PEC

จากรูปที่ 4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างทอร์กกับเวลาและอุณหภูมิการผสมกับเวลาของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกจากการเบลนด์ระหว่าง NR/PP/PEC โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์พบว่า ในช่วงเริ่มต้นการผสม (เวลา A) การหลอมเทอร์โมพลาสติกระหว่างพอลิโพรพิลีนกับโคพอลิเมอร์ของพอลิโพรพิลีนเอทิลีนที่มีอัตราส่วนการเบลนด์ที่ต่างกันจะมีระยะเวลาในการหลอมและความหนืดขณะหลอมที่ต่างกัน โดยที่อัตราส่วนการเบลนด์ 40/0/60 (ไม่มีพอลิโพรพิลีน) จะใช้ระยะเวลาในการหลอมน้อยที่สุดและพีคของความหนืดขณะหลอมมีค่าสูงที่สุด (ตามสมบัติพื้นฐานของวัสดุ พอลิโพรพิลีน มี MFI 12 g/min (230°C/2.16 kg) และโคพอลิเมอร์ของพอลิโพรพิลีนเอทิลีนมี MFI 8 g/min (230°C/2.16 kg)) ตามด้วยอัตราส่วนการเบลนด์ 40/20/40 และ 40/30/30 ตามลำดับ เมื่อเพิ่มพอลิโพรพิลีนที่อัตราส่วนมากกว่า 30% ก็จะทำให้เวลาในการหลอมนั้นเพิ่มขึ้นตามปริมาณพอลิโพรพิลีนที่เพิ่มขึ้น และความหนืดขณะหลอมจะเพิ่มขึ้นด้วยแต่น้อยกว่าโคพอลิเมอร์ของพอลิโพรพิลีน

เอทิลีนที่อัตราส่วนเท่ากัน เมื่อพิจารณาความหนืดของเทอร์โมพลาสติกที่หลอมสมบูรณ์ (1.5-2.0 นาที) จะพบว่ากรรมวิธีโคพอลิเมอร์ของพอลิโพรพิลีนเอทิลีนปริมาณมากในอัตราส่วนการเบลนด์จะทำให้ความหนืดขณะหลอมสูงตามไปด้วย

ในนาทีที่ 2 (เวลา B) เป็นการใส่สารฟอสฟอรัสลงในเทอร์โมพลาสติกหลอมพบว่า การเติมสารฟอสฟอรัสจะส่งผลให้ความหนืดของเทอร์โมพลาสติกหลอมเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

ในนาทีที่ 4 เป็นการเติมยางคอมพาวนด์พบว่า จะพบพีคปรากฏขึ้น 2 พีคด้วยกันคือ พีคแรกใช้เวลาประมาณ 4.2 นาที (เวลา C) ซึ่งเกิดจากความหนืดของยางคอมพาวนด์ที่นำไปผสม จะเห็นว่าอัตราส่วนการเบลนด์ต่างๆ จะให้ความหนืดที่ไม่ต่างกันมาก ส่วนพีคที่ 2 เกิดที่เวลาประมาณ 4.7 นาที (เวลา D) เกิดจากยางคอมพาวนด์เกิดการวัลคาไนซ์ขึ้นในระหว่างการผสม จะเห็นว่าอัตราส่วนการเบลนด์ที่ 40/60/0 จะให้พีคต่ำที่สุด ส่วนอัตราส่วนอื่นๆที่ตำแหน่งนี้จะมีค่าใกล้เคียงกัน น่าจะเป็นผลจากโคพอลิเมอร์ของพอลิโพรพิลีนเอทิลีนสามารถเกิดการวัลคาไนซ์ร่วมกับยางได้

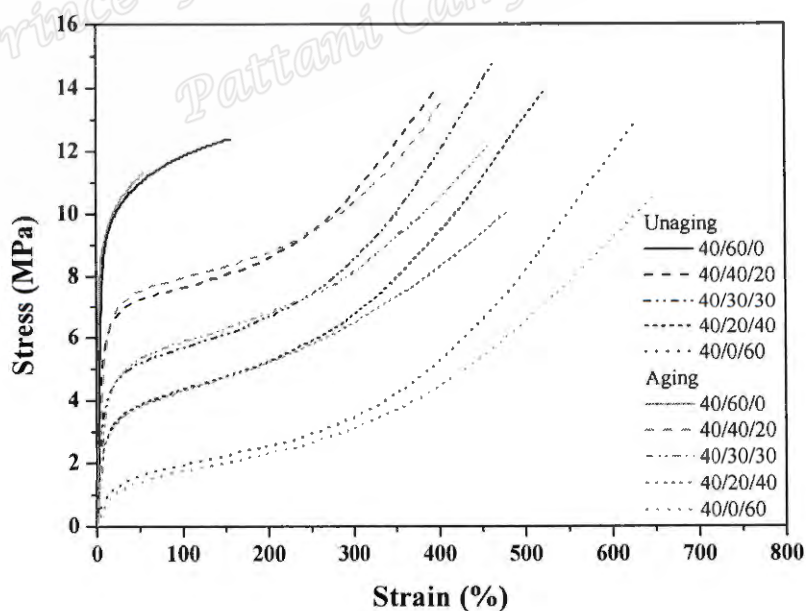
นอกจากนี้การมีโคพอลิเมอร์ของพอลิโพรพิลีนเอทิลีนในอัตราส่วนการเบลนด์ในปริมาณมาก จะทำให้การวัลคาไนซ์เกิดต่อเนื่องไปได้อีกระยะหนึ่งซึ่งเห็นได้หลังจากนาทีที่ 4.7 ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่มีอัตราส่วนโคพอลิเมอร์ของพอลิโพรพิลีนเอทิลีนต่างกันจะให้ลักษณะพีคที่เกิดการวัลคาไนซ์ต่างกัน ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนที่อัตราส่วน 40/0/60 โดยน้ำหนัก เป็นอัตราส่วนที่ไม่มีพอลิโพรพิลีน พบว่า หลังจากนาทีที่ 4.7 การวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงนาทีที่ 5.7 (เวลา E) ซึ่งมีค่าทอร์คต่างจากของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมโดยการใช้อัตราส่วน 40/60/0 โดยน้ำหนัก อย่างชัดเจน การวัลคาไนซ์ของโคพอลิเมอร์ของพอลิโพรพิลีนเอทิลีนที่เกิดขึ้นหลังจากการวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติ เนื่องจากการแพร่ของสารวัลคาไนซ์จากยางคอมพาวนด์มาสู่โคพอลิเมอร์ของพอลิโพรพิลีนเอทิลีน ความหนืดสุดท้ายของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกพบว่า ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่มีโคพอลิเมอร์ของพอลิโพรพิลีนเอทิลีนในปริมาณมากก็จะให้ความหนืดสุดท้ายมากตามไปด้วย ซึ่งเป็นอิทธิพลของพันธะเชื่อมโยงในโครงสร้าง

4.4.1. สมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

เตรียมยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกจากการเบลนด์ระหว่าง NR/PP/PEC โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์ไปทดสอบสมบัติการดึงก่อนและหลังการบ่มแรง และการมิดรูปลาวรรแบบดึง ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.43 - 4.46

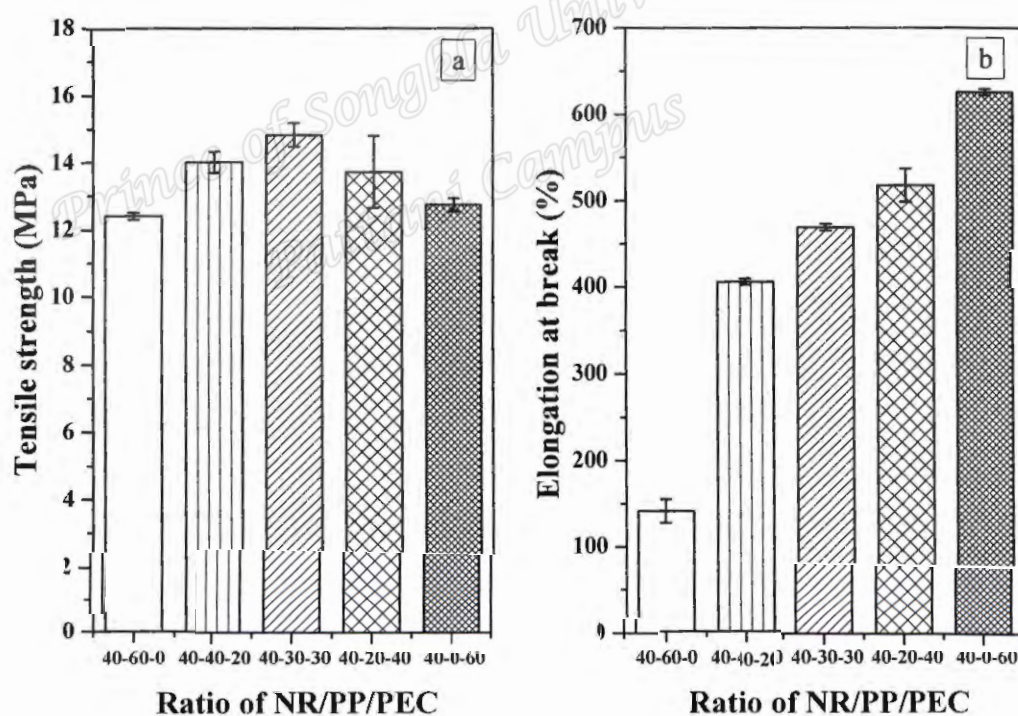
ตารางที่ 4.4 สมบัติเชิงกลก่อนและหลังการบ่มแรงของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟออร์ โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์ของ NR/PP/PEC

Properties	Blend ratio of NR/PP/PEC				
	40/60/0	40/40/20	40/30/30	40/20/40	40/0/60
Unaging					
Modulus at 100% (MPa)	11.94±0.08	7.63±0.05	5.74±0.11	4.29±0.07	1.93±0.03
Modulus at 300% (MPa)	-	8.61±0.12	6.69±0.08	5.20±0.05	2.54±0.06
Tensile strength (MPa)	12.41±0.11	14.02±0.31	14.83±0.35	13.73±1.08	12.75±0.19
Elongation at break (%)	142±14	406±4	469±4	518±19	626±4
Tension set (%)	40.6±2.0	27.1±0.3	21.7±3.4	16.1±2.1	7.8±0.6
Aging					
Tensile strength (MPa)	11.36±0.17	13.04±1.19	12.51±0.69	10.81±0.62	10.63±0.47
Elongation at break (%)	54±6	399±53	462±23	498±24	671±32
Retention					
Tensile strength (%)	91.6	93.0	84.4	78.8	83.4
Elongation at break (%)	38.2	98.2	98.4	96.1	107.3



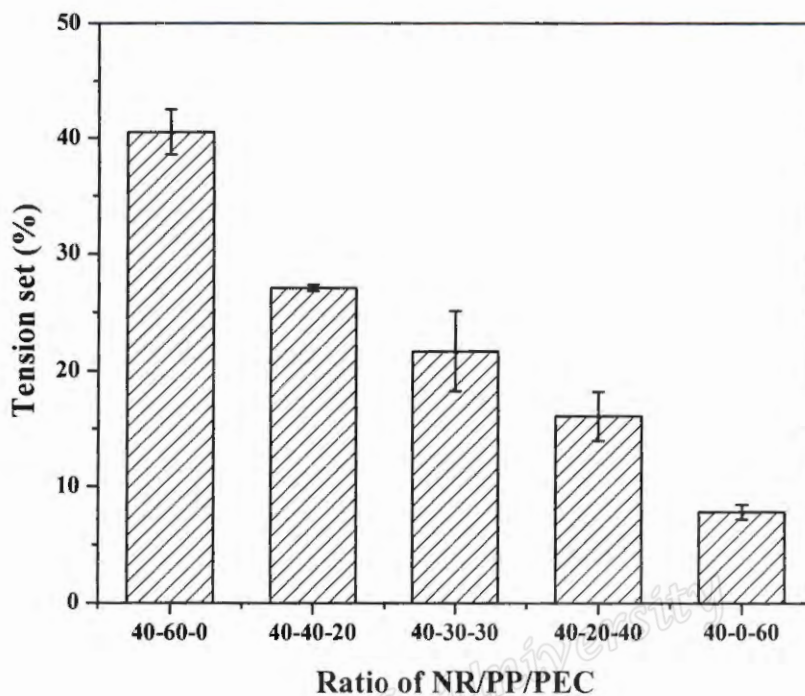
รูปที่ 4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟออร์ โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์ของ NR/PP/PEC ก่อนและหลังการบ่มแรง

จากรูปที่ 4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์ ก่อนและหลังการบ่มแรง เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนการเบลนด์พบว่า ทั้งก่อนและหลังการบ่มแรงของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่มีอัตราส่วนของพอลิโพรพิลีนในปริมาณมากจะให้ค่าความเค้นที่ความเครียดใดๆ สูงกว่ายางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่มีอัตราส่วนของพอลิโพรพิลีนน้อยหรือไม่มี โดยอัตราส่วน 40/60/0 มีลักษณะการผิดรูปแบบแข็งเปราะ ซึ่งปกติพอลิโพรพิลีนจะให้สมบัติการผิดรูปแบบแข็งเหนียว แต่เนื่องจากการทดสอบทำที่อัตราเร็ว 500 มิลลิเมตรต่อนาที จึงส่งผลให้เฟสพอลิโพรพิลีนไม่สามารถจัดเรียงตัวภายใต้ความเค้นได้ทันเวลา จึงเกิดการขาดออกได้เร็วจึงแสดงลักษณะการผิดรูปแบบแข็งเปราะ นอกจากนี้ยังพบว่า การแทนที่เฟสโพรพิลีนด้วยโคพอลิเมอร์ของโพรพิลีนเอทิลีนจะส่งผลให้ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกมีสมบัติด้านอิลาสติกที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณของโคพอลิเมอร์ของโพรพิลีนเอทิลีน โดยพิจารณาจากระยะยืดที่จุดขาด และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังการบ่มแรงจะพบว่า หลังบ่มแรงยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกมีค่าความเค้นที่ลดลงจากเดิม เนื่องจากการออกซิเดชันของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก



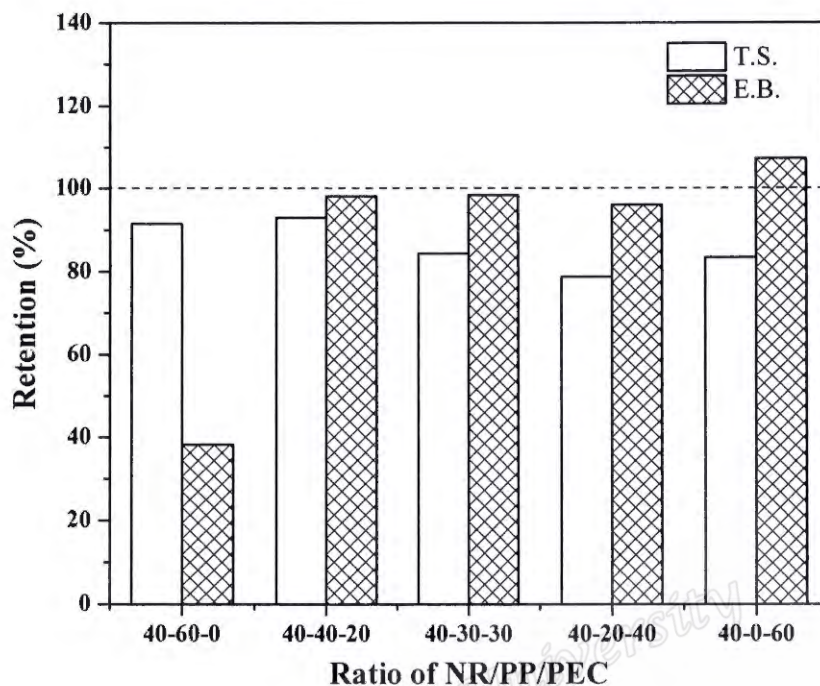
รูปที่ 4.44 สมบัติการดึงก่อนและหลังการบ่มแรงของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์ของ NR/PP/PEC: (a) ความต้านทานต่อแรงดึง และ (b) ระยะยืดที่จุดขาด

จากรูปที่ 4.44 สมบัติการดึงก่อนและหลังการบ่มเร่งของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์ (a) ความต้านทานต่อแรงดึง และ (b) ระยะเวลาที่จุดขาดพบว่า ความต้านทานต่อแรงดึงของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่มีสามองค์ประกอบจะให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงไม่ต่างกันในแต่ละอัตราส่วนและมีค่ามากกว่ายางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่มีสององค์ประกอบคือ NR/PP (40/0/60) และ NR/PEC (40/60/0) เนื่องจากยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิโพรพิลีน ให้ความสามารถในการตกผลึกสูงกว่ายางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมด้วยอัตราส่วนอื่นๆ ซึ่งเป็นผลมาจากการตกผลึกในพอลิโพรพิลีน ที่สามารถตกผลึกได้สูงประมาณ 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) เมื่อให้แรงดึงชิ้นงานด้วยอัตราเร็ว 500 มิลลิเมตรต่อนาที โมเลกุลของโพรพิลีนที่มีปริมาณผลึกสูงจะไม่สามารถเกิดการจัดเรียงตัวภายใต้ความเค้นได้ทันเวลาจึงเกิดการขาดออกอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ระยะยืดที่จุดขาดต่ำมาก ขณะที่ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมระหว่างยางธรรมชาติกับโคพอลิเมอร์ของโพรพิลีนเอทิลีนนั้นจะมีความเป็นอสัณฐานมากที่สุด (ตกผลึกได้น้อยที่สุด) โดยโคพอลิเมอร์ของโพรพิลีนเอทิลีนนั้นสามารถตกผลึกได้ประมาณ 12% จึงให้ระยะยืดที่จุดขาดสูงและมีความแข็งแรงต่ำ ส่วนยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ใช้พอลิเมอร์ร่วมกันสามชนิดคือ ยางธรรมชาติ พอลิโพรพิลีน และโคพอลิเมอร์ของโพรพิลีนเอทิลีนนั้นจะให้ความต้านทานต่อแรงดึงและระยะยืดที่จุดขาดเพิ่มสูงขึ้นจากการให้สมบัติที่เสริมกันระหว่างส่วนที่เป็นผลึกของพอลิโพรพิลีน และส่วนที่เป็นอสัณฐานของโคพอลิเมอร์ของโพรพิลีนเอทิลีนในองค์ประกอบเบลนด์ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Uthaipan *et al*. (2016) ที่ได้เตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่างเทอร์พอลิเมอร์ของเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน (Ethylene propylene diene terpolymer, EPDM) โคพอลิเมอร์ของเอทิลีนออกทีน (Ethylene octene copolymer, EOC) และพอลิโพรพิลีน พบว่าโคพอลิเมอร์ของเอทิลีนออกทีนจะช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างเฟสยางเทอร์พอลิเมอร์ของเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนกับเฟสเทอร์โมพลาสติกพอลิโพรพิลีน



รูปที่ 4.45 การผิดรูปถาวรแบบดึงของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์ของ NR/PP/PEC

รูปที่ 4.45 การผิดรูปถาวรแบบดึงของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์พบว่า สมบัติด้านการผิดรูปถาวรแบบดึงของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกจะด้อยลงเมื่อมีฟอสฟอรัสปริมาณมากขึ้นในอัตราส่วนการเบลนด์ เนื่องจากฟอสฟอรัสมีความเป็นผลึกในโครงสร้างสูงหรือสายโซ่โมเลกุลเคลื่อนไหวได้ยาก เมื่อยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกถูกดึงยืดจะทำให้การคืนรูปเป็นไปได้น้อย การเพิ่มปริมาณโครงสร้างแบบอสัณฐานในยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก โดยเพิ่มปริมาณโคพอลิเมอร์ของโพรพิลีนเอทิลีนจะทำให้ความเป็นผลึกในโครงสร้างของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกลดลง สายโซ่โมเลกุลเคลื่อนไหวได้มากขึ้น ดังนั้นยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกจึงมีสมบัติเป็นอีลาสติกที่ดีขึ้น



รูปที่ 4.46 เปอร์เซ็นต์การคงอยู่ของสมบัติเชิงกลหลังการบ่มแรงของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์ของ NR/PP/PEC

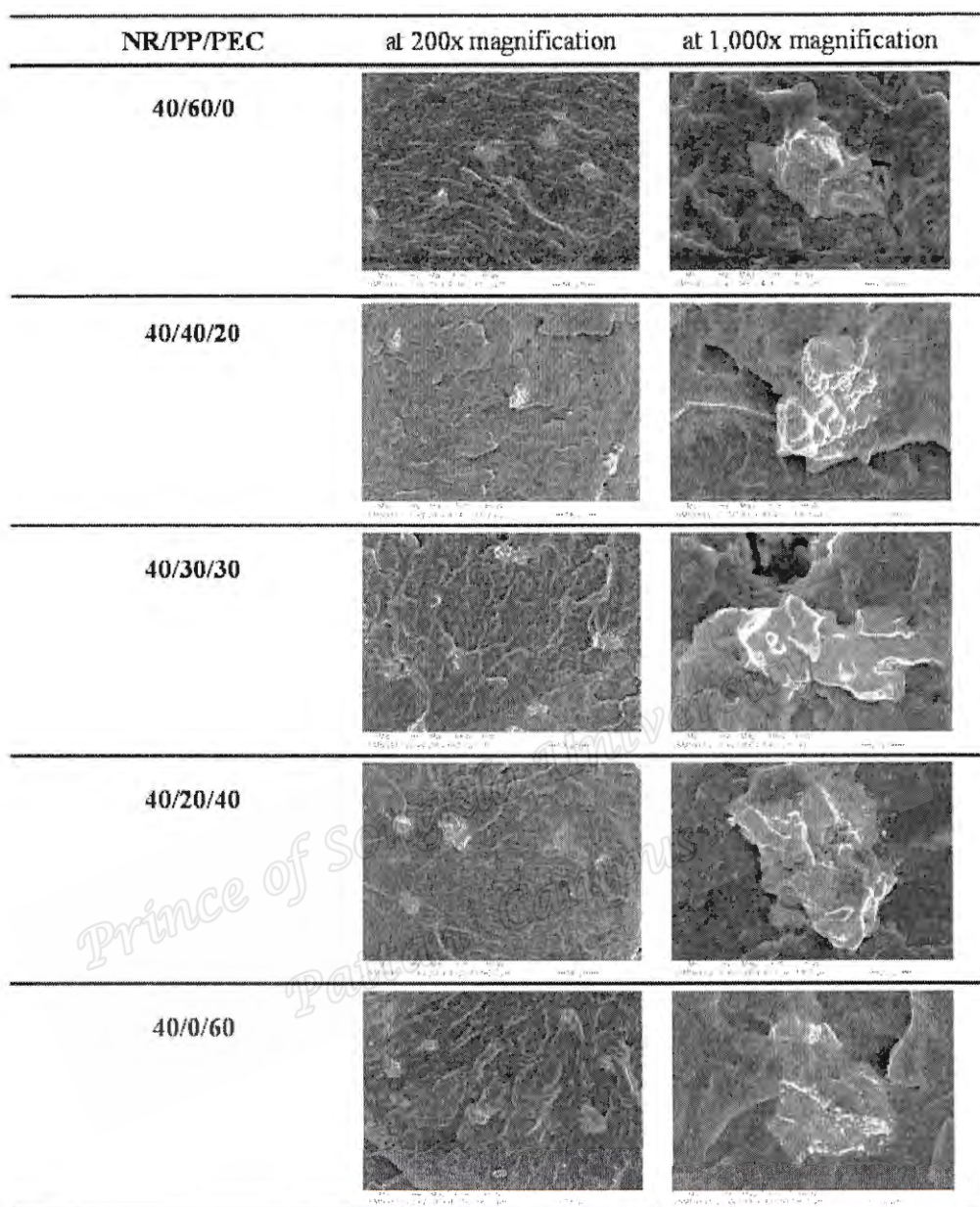
จากรูปที่ 4.46 เปอร์เซ็นต์การคงอยู่ของสมบัติเชิงกลหลังการบ่มแรงของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์พบว่า สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกภายหลังการบ่มแรงมีค่าลดลงประมาณ 10-20% จากค่าเดิมในทุกอัตราส่วนเบลนด์ เนื่องจากยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกถูกออกซิไดซ์ เกิดการตัดขาดของสายโซ่โมเลกุล ส่งผลให้ความต้านทานต่อแรงดึงภายหลังบ่มแรงของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกลดลง ในส่วนของระยะยืดที่จุดขาดของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกภายหลังการบ่มแรงพบว่า ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมโดยใช้อัตราส่วน 40/60/0 โดยน้ำหนัก มีระยะยืดขาดลดลงอย่างมาก หลังจากผ่านการบ่มแรง เนื่องจากโครงสร้างทางเคมีของพอลิโพรพิลีนสามารถเกิดการตัดขาดของสายโซ่โมเลกุลจากอนุมูลเปอร์ออกไซด์ และถูกออกซิไดซ์จากออกซิเจนและความร้อน ได้ง่ายกว่าโครงสร้างของโคพอลิเมอร์ของโพรพิลีนเอทิลีน ที่ซึ่งการมีส่วนร่วมของพอลิเอทิลีนในโครงสร้างช่วยลดปัญหาข้างต้นได้ กล่าวคือพอลิเอทิลีนเมื่อได้รับอนุมูลอิสระแล้วการสิ้นสุดของปฏิกิริยาส่วนใหญ่จะเป็นการรวมตัวกันของสายโซ่โมเลกุล (Peterson *et al.*, 2001) ซึ่งเห็นได้จากยางธรรมชาติเทอร์โม

พลาสติกที่มีโคพอลิเมอร์ของโพรพิลีนเอทิลีนเป็นองค์ประกอบจะมีการเปลี่ยนแปลงของระยะยืดที่จุดขาดภายหลังจากการบ่มเรงน้อยมากไม่เกิน 10% ของระยะยืดที่จุดขาดเดิม ประกอบกับการที่โคพอลิเมอร์ของโพรพิลีนเอทิลีนสามารถเกิดการวัลคาไนซ์ได้ขณะบ่มเรงจากสารวัลคาไนซ์ที่หลงเหลืออยู่ ทำให้อย่างธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่มีโคพอลิเมอร์ของโพรพิลีนเอทิลีนเป็นองค์ประกอบทนต่อสภาวะเสื่อมโดยรวมเพิ่มขึ้น

4.4.2. สัณฐานวิทยา (Morphology)

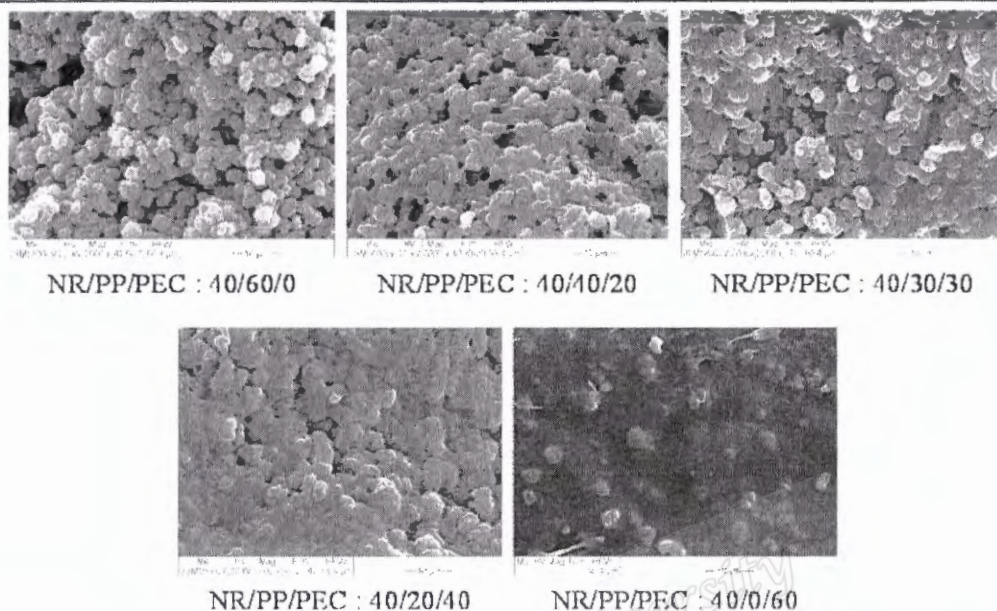
การศึกษาสัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์ ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.47 และ 4.48

Prince of Songkla University
Pattani Campus



รูปที่ 4.47 สัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกผสมสารฟอสฟอร์ โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์ ที่กำลังขยาย 200 เท่า และ 1,000 เท่า

Blend ratio
at 2,000x magnification



รูปที่ 4.48 สัณฐานวิทยาแบบสกัดเฟสของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์ของ NR/PP/PEC ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า

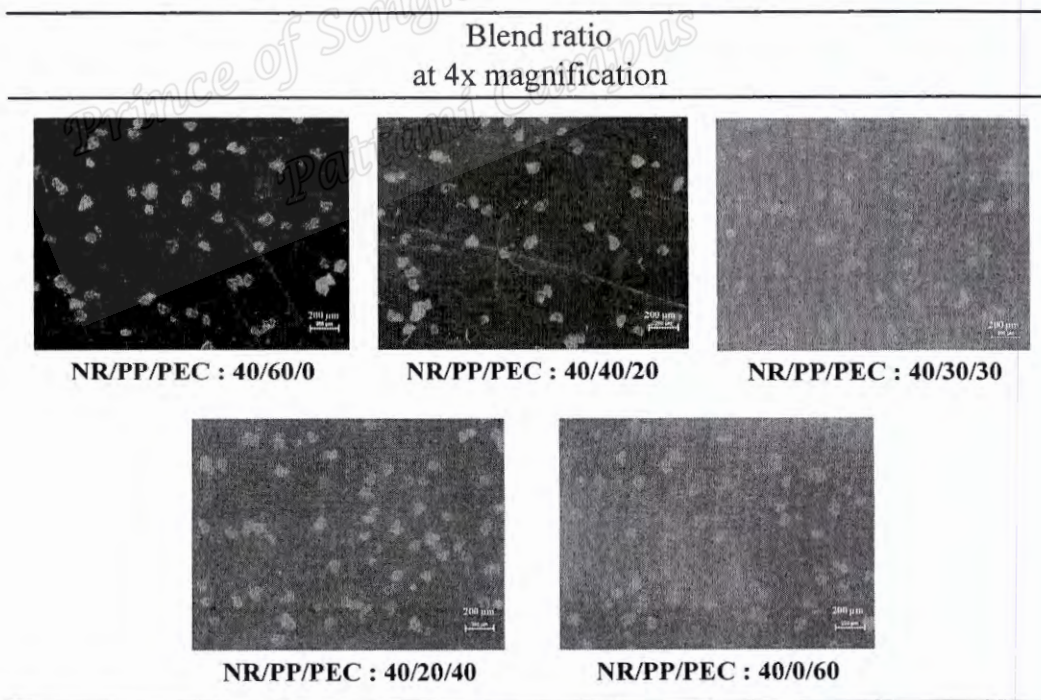
จากรูปที่ 4.47 สัณฐานวิทยาแบบไม่สกัดเฟสของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์ ที่กำลังขยาย 200 เท่า พบว่าที่อัตราส่วนการเบลนด์ที่มีพอลิโพรพิลีนในปริมาณมากมีลักษณะผิวที่ขรุขระและมีรอยหยักมาก เนื่องจากพอลิโพรพิลีนมีความแข็งแรงสูง ส่วนการใช้กำลังขยายที่สูงขึ้นที่ 1,000 เท่า ทำให้เห็นสภาพรอยต่อระหว่างยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกกับสารฟอสฟอรัสชัดเจน ซึ่งที่อัตราส่วนการเบลนด์ที่มีโคพอลิเมอร์ของพอลิโพรพิลีนเอทิลีนปริมาณมากให้ลักษณะรอยต่อที่เรียบ (มีความเข้ากัน) มากกว่าธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่อัตราส่วนการเบลนด์มีพอลิโพรพิลีนในปริมาณมาก ทั้งนี้จะเป็นผลมาจากความเป็นออสติกของเฟสโคพอลิเมอร์ของพอลิโพรพิลีนเอทิลีนและการเกิดการวัลคาไนซ์ร่วมระหว่างเฟสบริเวณผิวรอยต่อ (Uthaipan *et al.*, 2016) ทำให้ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกเข้ากับสารฟอสฟอรัสได้ดีขึ้น นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบสารฟอสฟอรัสก่อนการผสมลงในยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก (รูปที่ 4.3 กำลังขยาย 1,500 เท่า) กับสารฟอสฟอรัสที่ผสมลงในยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก (รูปที่ 4.47 กำลังขยาย 1,000 เท่า) พบว่าผิวของอนุภาคสารฟอสฟอรัสมีลักษณะขรุขระไม่ต่างจากเดิม แต่พบอนุภาคสารฟอสฟอรัสขนาดเล็กที่เกาะอยู่บนผิวของอนุภาคสารฟอสฟอรัสที่มีขนาดใหญ่ น้อยลงหรือไม่พบเลยหลังการผสมสารฟอสฟอรัสลงในยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก เนื่องจากแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในขณะผสมทำ

ให้อนุภาคขนาดเล็กหลุดออกจากอนุภาคสารฟอสฟอรัสขนาดใหญ่ไปผสมอยู่กับยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกแทน

จากรูปที่ 4.48 สันฐานวิทยาแบบสัปดาห์ของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์พบว่า ที่กำลังขยายที่ 2,000 เท่า อย่างเป็นเฟสกระจายในเทอร์โมพลาสติก ดังเหตุผลที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 4.3.2 ซึ่งยางวัลคาไนซ์มีขนาดอนุภาคประมาณ 3-4 μm ใกล้เคียงกันในทุกอัตราส่วนการเบลนด์ เนื่องจากแรงเฉือนในการผสมจะมีความใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ยังพบว่า อัตราส่วนการเบลนด์ที่มีพอลิโพรพิลีนในปริมาณมากจะเห็นขนาดอนุภาคอย่างชัดเจน ส่วนที่มีโคพอลิเมอร์ของพอลิโพรพิลีนเอทิลีนเป็นองค์ประกอบเบลนด์ในปริมาณมากนั้น จะเห็นโคพอลิเมอร์ของพอลิโพรพิลีนเอทิลีนไม่ถูกสกัดออกจากรอบอนุภาคยางวัลคาไนซ์ ทำให้เห็นอนุภาคอย่างไม่ชัดเจน ซึ่งเป็นเช่นนี้เพราะโคพอลิเมอร์ของพอลิโพรพิลีนเอทิลีนได้ถูกวัลคาไนซ์ในขณะการขึ้นรูปขึ้นทดสอบ ทำให้การสกัดโคพอลิเมอร์ของพอลิโพรพิลีนเอทิลีนออกทำได้ยากขึ้น

4.4.3. การกระจายตัวของสารฟอสฟอรัสในยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส

การศึกษาการกระจายตัวของสารฟอสฟอรัสในยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์ ได้ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 4.49



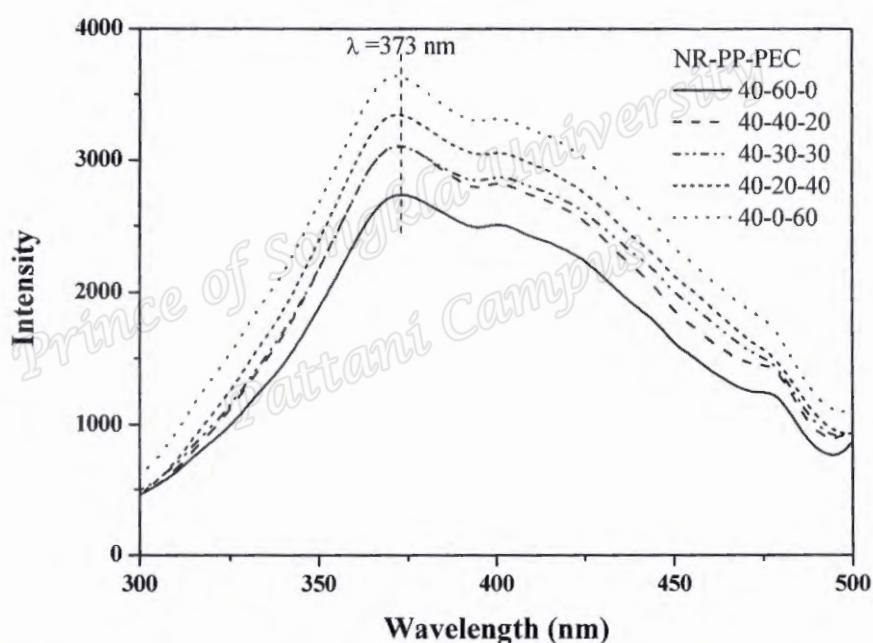
รูปที่ 4.49 ลักษณะการกระจายตัวของสารฟอสฟอรัสในยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์ของ NR/PP/PEC

จากรูปที่ 4.49 ลักษณะการกระจายตัวของสารฟอสฟอรัในยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์ พบว่าอัตราส่วนการเบลนด์ที่ผสมสารฟอสฟอรัสแตกต่างกันทั้ง 4 อัตราส่วน จะให้ลักษณะของการกระจายตัวของสารฟอสฟอรัสอยู่ทั่วทั้งแผ่นยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกโดยไม่เกาะกลุ่มกันและมีขนาดของสารฟอสฟอรัสไม่ต่างกัน บ่งบอกถึงสารฟอสฟอรัสมีการกระจายตัวดีในยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก

4.4.4. สมบัติทางแสง (Luminescent properties)

4.4.4.1. ความยาวคลื่นที่กระตุ้น

การทดสอบความยาวคลื่นที่กระตุ้นของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์ ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.50



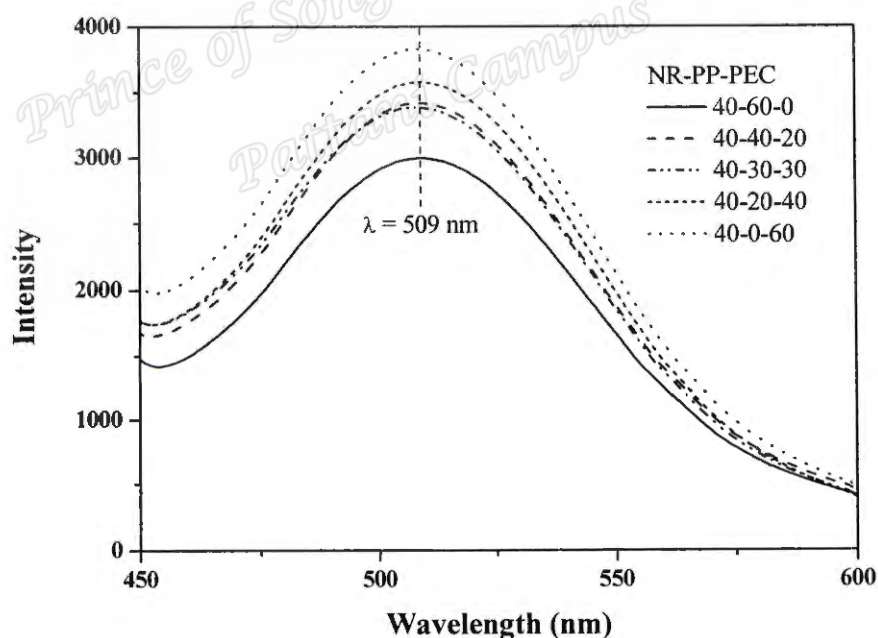
รูปที่ 4.50 สเปกตรัมของการกระตุ้นของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์ของ NR/PP/PEC

จากรูปที่ 4.50 สเปกตรัมของการกระตุ้นของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์พบว่า การกระตุ้นที่ความยาวคลื่นต่างกันจะให้ความเข้มแสงที่ปลดปล่อยที่แตกต่างกัน โดยอัตราส่วนการเบลนด์ทั้ง 5 อัตราส่วน มีพีคที่ปรากฏคล้ายคลึงกัน ซึ่งสามารถกระตุ้นได้ดีที่สุดที่ความยาวคลื่น 373 nm ซึ่งเป็นความยาวคลื่นที่สูงกว่าความยาวคลื่นที่กระตุ้นสารฟอสฟอรัส

บริสุทธิ์ (365 nm) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะอิทธิพลของสมบัติฟลูออเรสเซนซ์ของเมทริกซ์ ซึ่งได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.5.4.1 นอกจากนี้เมื่อพิจารณาความเข้มแสงที่วางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกปลดปล่อยพบว่าที่อัตราส่วนการเบลนด์ที่มีโคพอลิเมอร์ของโพรพิลีนเอทิลีนในปริมาณมากจะถูกกระตุ้นได้ดีกว่าวางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่มีอัตราส่วนพอลิโพรพิลีนมาก ทั้งนี้เป็นผลมาจากโคพอลิเมอร์ของโพรพิลีนเอทิลีนที่มีส่วนออสัญฐานสูงและมีความหนาแน่นต่ำ (0.866 g/cm^3) ทำให้แสงสามารถทะลุผ่านเมทริกซ์ไปกระตุ้นสารฟอสฟอไรต์ได้ดีกว่าพอลิโพรพิลีนซึ่งสามารถตกผลึกได้สูงและมีความหนาแน่นสูง (0.9 g/cm^3) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Mishra *et al.* (2009) ที่ได้ศึกษาชนิดของพอลิเมอร์ต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสมสารฟอสฟอไรต์พบว่า พอลิโพรพิลีนให้ความเข้มแสงที่ปลดปล่อยสูงกว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ เนื่องจากพอลิโพรพิลีนมีความหนาแน่นต่ำและตกผลึกได้น้อยกว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

4.4.4.2. ความยาวคลื่นที่ปลดปล่อย

การทดสอบความยาวคลื่นที่ปลดปล่อยของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอไรต์ โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์ ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.50

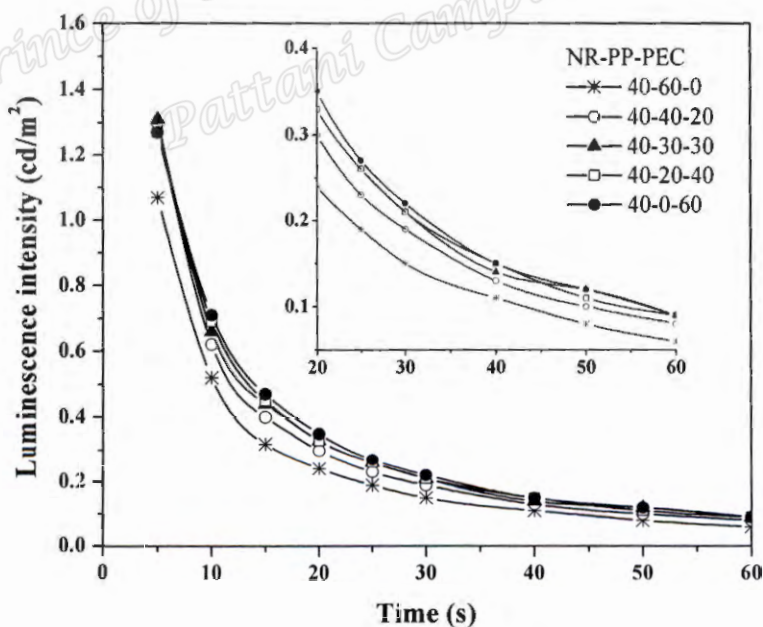


รูปที่ 4.51 สเปกตรัมของการปลดปล่อยพลังงานของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์ของ NR/PP/PEC

จากรูปที่ 4.51 สเปกตรัมของการปลดปล่อยพลังงานของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์พบว่า เมื่อกระตุ้นยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกด้วยความยาวคลื่น 375 nm ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์ต่างๆ จะให้การปลดปล่อยแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่นประมาณ 509 nm ซึ่งต่ำกว่าความยาวคลื่นที่สารฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อย เนื่องจากอิทธิพลของสมบัติฟลูออเรสเซนซ์ของเมทริกซ์ (ดูได้จากผลการทดลองในหัวข้อ 4.5.4.2) การปลดปล่อยแสงที่มีความยาวคลื่นประมาณ 509 nm ของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก เนื่องมาจากการทรานซิชันของอิเล็กตรอนของ Eu^{2+} ที่ระดับพลังงาน $4f^65d^1 \rightarrow 4f^7$ ที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 4.1.2.2 นอกจากนี้จะเห็นว่า ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่มีปริมาณของโคพอลิเมอร์ของโพรพิลีนเอทิลีนในอัตราส่วนการเบลนด์มาก จะให้ความเข้มแสงที่สูงกว่ายางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่มีพอลิโพรพิลีนผสมอยู่ในปริมาณมาก เนื่องจากโคพอลิเมอร์ของโพรพิลีนเอทิลีนที่มีส่วนอณูฐานสูงทำให้แสงสามารถทะลุผ่านเมทริกซ์ไปกระตุ้นสารฟอสฟอรัสและปลดปล่อยออกมาได้ดีกว่าพอลิโพรพิลีนซึ่งสามารถตกผลึกได้สูง

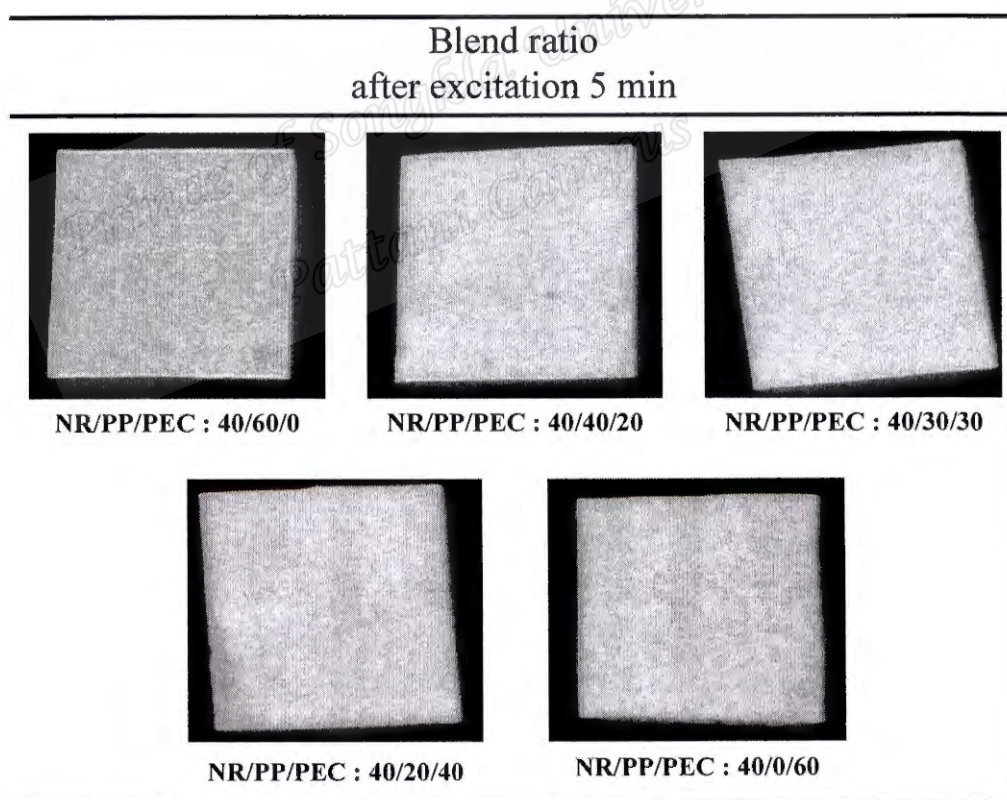
4.4.4.3. ระยะเวลาการคงอยู่ของแสงที่ปลดปล่อยหลังหยุดกระตุ้น

ระยะเวลาการคงอยู่ของแสงที่ปลดปล่อยหลังจากหยุดกระตุ้นของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์ ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.52



รูปที่ 4.52 ระยะเวลาการคงอยู่ของแสงที่ปลดปล่อยหลังหยุดกระตุ้นของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์ของ NR/PP/PEC

รูปที่ 4.52 ระยะเวลาการคงอยู่ของแสงที่ปลดปล่อยหลังหยุดกระตุ้นของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรั โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์พบว่า ในช่วงแรกหลังจากหยุดกระตุ้นยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัที่มีอัตราส่วนการเบลนด์ต่างกัน 5 อัตราส่วน ให้ความเข้มแสงสูงและมีการลดลงของความเข้มแสงอย่างรวดเร็ว จนมาถึงเวลาหลังจากหยุดกระตุ้น 20 วินาที จากนั้นความเข้มแสงจะค่อยๆ ลดลงและค่อนข้างคงที่ นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบระยะเวลาการคงอยู่ของแสงที่ปลดปล่อยหลังหยุดกระตุ้นและความเข้มแสงที่ปลดปล่อยของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมด้วยอัตราส่วนการเบลนด์ที่แตกต่างกันพบว่า ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่มีปริมาณของโคพอลิเมอร์ของโพรพิลีนเอทิลีนในอัตราส่วนการเบลนด์มาก ทำให้ระยะเวลาการคงอยู่ของแสงที่ปลดปล่อยหลังหยุดกระตุ้นและความเข้มแสงที่ปลดปล่อยสูงกว่ายางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่มีปริมาณของโพรพิลีนเอทิลีนในอัตราส่วนการเบลนด์มาก ดังเหตุผลที่ได้กล่าวมาในหัวข้อที่ 4.4.4.2. โดยลักษณะการปลดปล่อยแสงหลังจากหยุดกระตุ้นของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์สามารถดูได้จากรูปที่ 4.53



รูปที่ 4.53 ลักษณะการปลดปล่อยแสงหลังจากหยุดกระตุ้นของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรั โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์ของ NR/PP/PEC

จากรูปที่ 4.53 ลักษณะการปลดปล่อยแสงหลังจากหยุดกระตุ้นของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรั โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์พบว่า อัตราส่วนการเบลนด์ที่มีปริมาณโคพอลิเมอร์ของโพรพิลีนเอทิลีนมาก จะให้การปลดปล่อยแสงที่มีความสม่ำเสมอและมีความเข้มสูงกว่าอัตราส่วนการเบลนด์ที่มีปริมาณพอลิโพรพิลีนมาก ดังเหตุผลที่ได้กล่าวมาข้างต้น

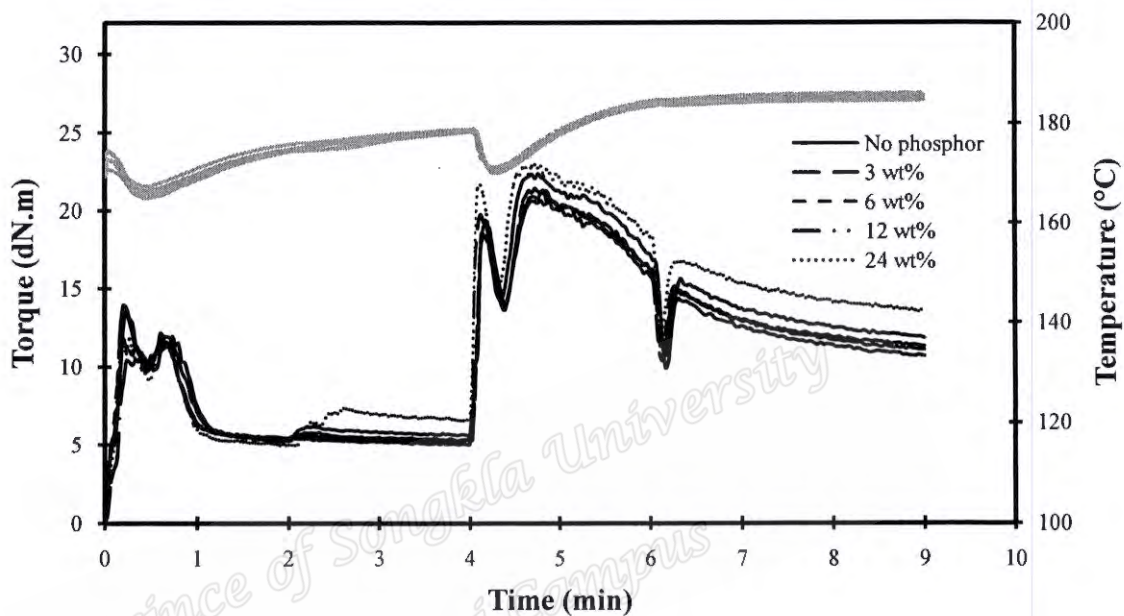
4.4.5 สรุปผลของการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนการเบลนด์ต่อสมบัติของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรั

การเตรียมยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรั โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์ของ NR/PP/PEC ให้สมบัติของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัดังนี้คือ ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมด้วยพอลิเมอร์ 3 ชนิด (NR/PP/PEC) ให้สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงสูงกว่าการใช้พอลิเมอร์ 2 ชนิด (NR/PP หรือ NR/PEC) และการมีปริมาณพอลิโพรพิลีนในองค์ประกอบเบลนด์ในสัดส่วนที่สูงจะส่งผลให้ความสามารถในการยืด ความสามารถในการคืนรูป และการปลดปล่อยแสงต่ำลง นอกจากนี้การเตรียมยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมด้วย NR/PP มีการคงอยู่ของสมบัติหลังบ่มแรงที่ด้อยกว่าการเตรียมด้วย NR/PEC หรือ NR/PP/PEC

Prince of Songkla University
Pattani Campus

4.5. การศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารฟอสฟอรัสต่อสมบัติของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส

การเตรียมยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกระหว่าง NR/PP/PEC ที่อัตราส่วนการเบลนด์เท่ากับ 40/30/30 โดยน้ำหนัก ใช้วิธีการผสมแบบ Precompound-I โดยแปรปริมาณสารฟอสฟอรัสที่ปริมาณ 0, 3, 6, 12 และ 24 wt% of the mixture ได้กราฟการผสมดังรูปที่ 4.54



รูปที่ 4.54 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าทอร์กกับเวลาและอุณหภูมิการผสมกับเวลาของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกจากการเบลนด์ระหว่าง NR/PP/PEC โดยแปรปริมาณสารฟอสฟอรัส

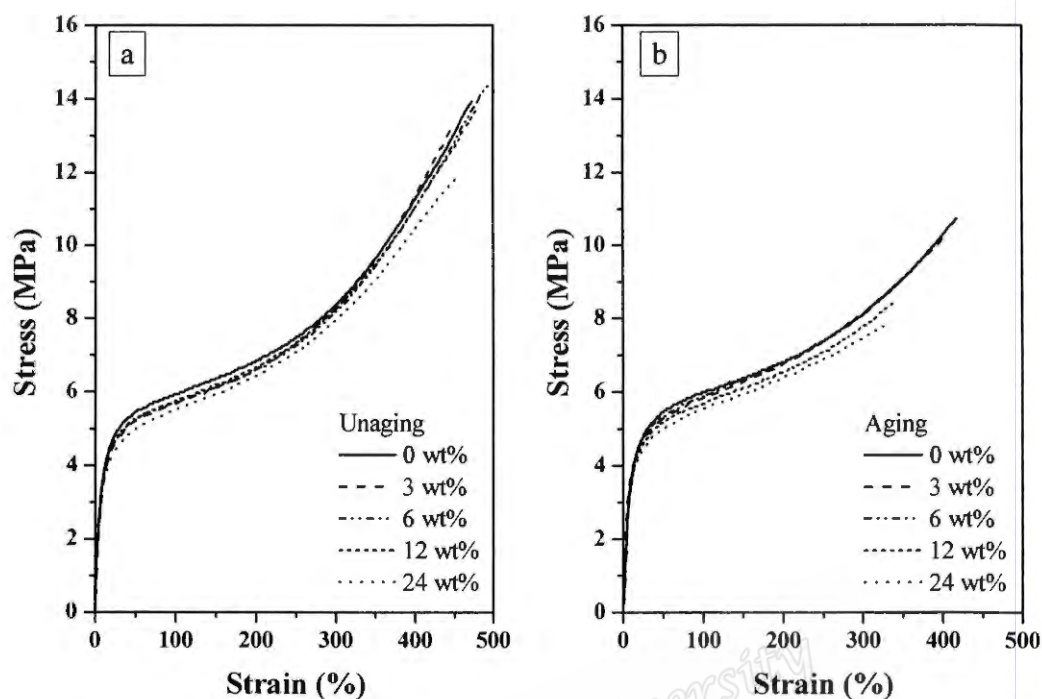
จากรูปที่ 4.54 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าทอร์กกับเวลาและอุณหภูมิการผสมกับเวลาของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกจากการเบลนด์ระหว่าง NR/PP/PEC โดยแปรปริมาณสารฟอสฟอรัสพบว่า ทอร์กการผสมของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารฟอสฟอรัสที่เพิ่มขึ้น ซึ่งในการทดลองนี้จะเห็นได้ชัดเจนที่ปริมาณของสารฟอสฟอรัสที่มากกว่า 12 wt% of the mixture เนื่องจากสารฟอสฟอรัสเป็นสารอนินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงและไม่หลอมภายใต้อุณหภูมิผสมจึงขัดขวางการไหลของสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก ส่งผลให้ค่าทอร์กการผสมของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกสูงขึ้นตามปริมาณสารฟอสฟอรัส

4.5.1. สมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

การเตรียมยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกจากการเบลนดระหว่าง NR/PP/PEC โดยแปรปริมาณสารฟอสฟอรัสที่ปริมาณ 0, 3, 6, 12 และ 24 wt% of the mixture ไปทดสอบสมบัติทางด้าน การดึงก่อนและหลังบ่มแรง การผิดรูปถาวรแบบดึง และความแข็ง ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.55-4.59

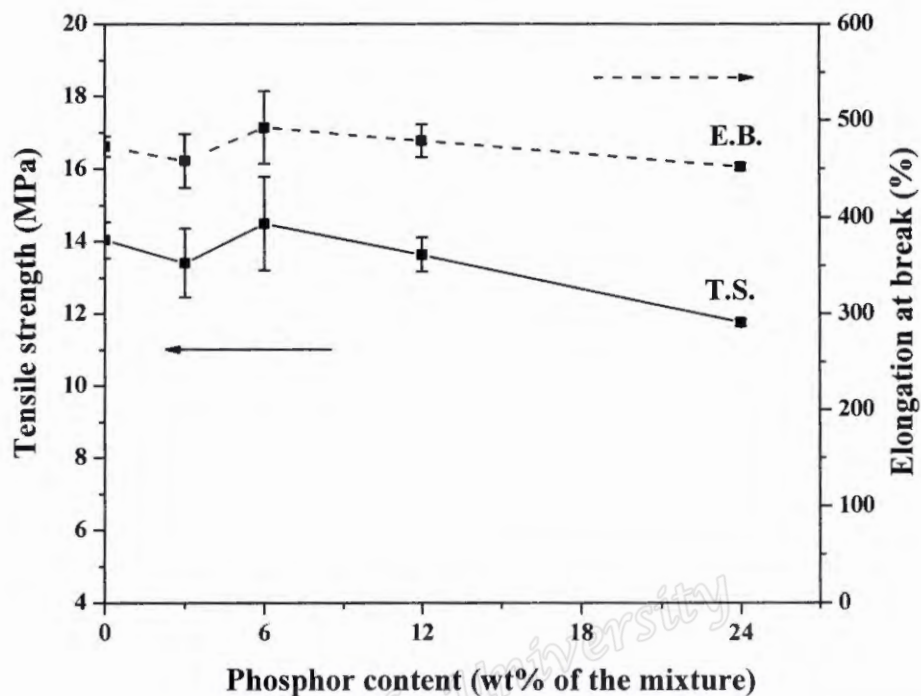
ตารางที่ 4.5 สมบัติเชิงกลก่อนและหลังบ่มแรงของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรปริมาณสารฟอสฟอรัส

Properties	Phosphor content (wt% of the mixture)				
	0	3	6	12	24
Unaging					
Modulus at 100% (MPa)	5.86±0.08	5.70±0.11	5.72±0.16	5.72±0.06	5.45±0.08
Modulus at 300% (MPa)	8.34±0.05	8.27±0.02	8.22±0.03	8.19±0.05	7.91±0.02
Tensile strength (MPa)	14.04±0.49	13.41±0.95	14.49±1.29	13.64±0.47	11.75±1.0
Elongation at break (%)	473±11	458±28	493±38	479±17	452±4
Tension set (%)	24.1±0.8	23.8±1.1	25.2±0.5	24.7±1.2	24.5±1.0
Hardness (Shore A)	84.8±0.6	86.0±0.5	86.2±0.3	85.8±0.8	85.8±1.0
Aging					
Tensile strength (MPa)	10.77±0.37	10.12±0.38	10.13±0.27	8.47±0.43	7.82±0.22
Elongation at break (%)	419±19	402±15	402±14	331±24	324±21
Retention					
Tensile strength (%)	76.71	75.49	69.91	62.11	66.53
Elongation at break (%)	88.45	87.71	81.66	69.08	71.68



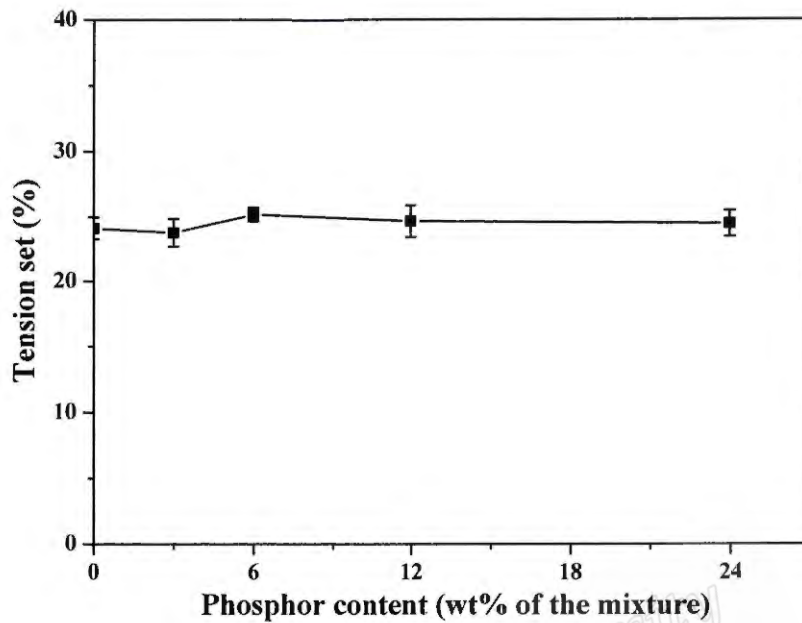
รูปที่ 4.55 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรปริมาณสารฟอสฟอรัส (a) ก่อนบ่มแรง และ (b) หลังบ่มแรง

จากรูปที่ 4.55 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส ที่แปรปริมาณสารฟอสฟอรัสพบว่า ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกมีพฤติกรรมการผิดรูปคล้ายกันทั้งก่อนและหลังบ่มแรง คือวัสดุจะมีมอดุลัสและความแข็งตึงสูงและมีความเป็นอีลาสติก นอกจากนี้เมื่อผสมสารฟอสฟอรัสลงไปปริมาณมากขึ้นทำให้ความเค้นและความเครียดของวัสดุลดลง เนื่องจากสารฟอสฟอรัสที่ผสมลงไปปริมาณมากจะไปขัดขวางการตกผลึกของพอลิโพรพิลีนและทำให้มีจุดบกพร่องในชิ้นงานมากขึ้น



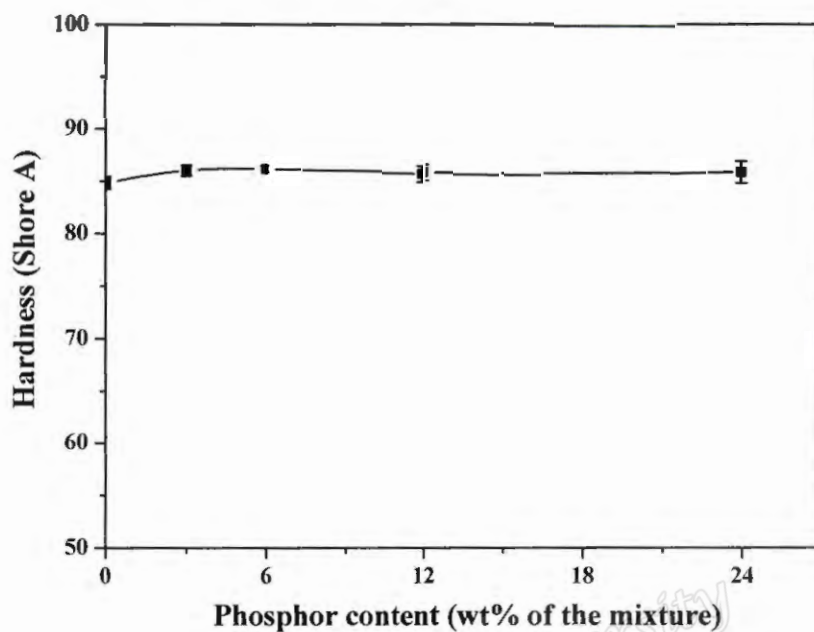
รูปที่ 4.56 สมบัติการดึงของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรปริมาณสารฟอสฟอรัส

รูปที่ 4.56 สมบัติการดึงของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรปริมาณสารฟอสฟอรัสพบว่า ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่มีการผสมสารฟอสฟอรัสในปริมาณที่ต่ำกว่า 12 wt% of the mixture ไม่พบการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานต่อแรงดึงและระยะยืดที่จุดขาดอย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อผสมสารฟอสฟอรัสในปริมาณที่สูงขึ้นที่ 24 wt% of the mixture จะทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและระยะยืดที่จุดขาดลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากสารฟอสฟอรัสเป็นสารอนินทรีย์ที่ไม่เข้ากันกับสารอินทรีย์อย่างเฟสยางและพลาสติก เมื่อใส่ในปริมาณมากจะส่งผลให้เกิดรอยต่อระหว่างเฟสที่มากขึ้น การส่งผ่านแรงเค้นระหว่างรอยต่อไม่เกิดเป็นจุดสะสมความเค้น (stress concentration) ได้ ทำให้วัสดุมีจุดบกพร่องในเนื้อวัสดุมากขึ้น เช่นเดียวกับการศึกษาของ Wong *et al.* (2006) ที่ได้เตรียมพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่ผสมสารฟอสฟอรัสพบว่า พอลิเมทิลเมทาคริเลตที่ผสมสารฟอสฟอรัสในปริมาณที่สูงขึ้นจะให้สมบัติเชิงกลลดลง



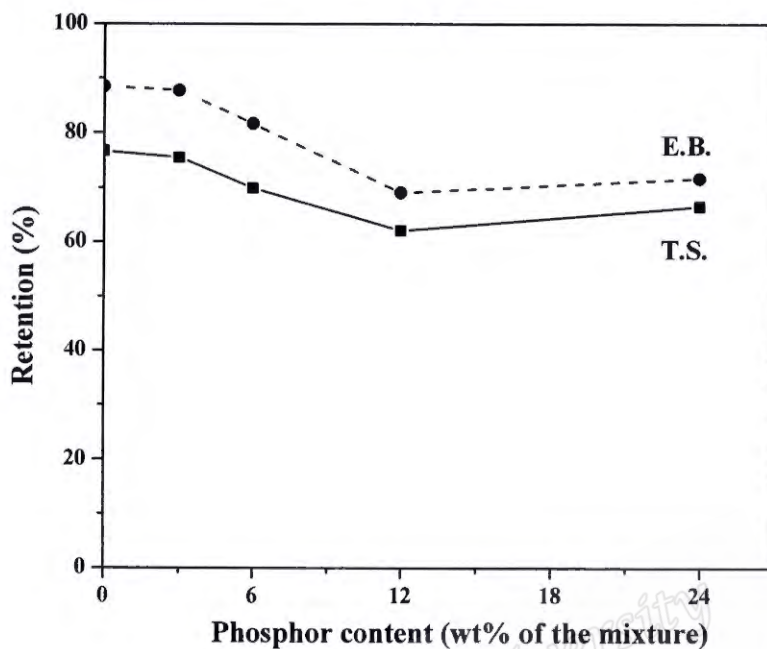
รูปที่ 4.57 การมิดรูปถาวรแบบดิ่งของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรปริมาณสารฟอสฟอรัส

จากรูปที่ 4.57 การมิดรูปถาวรแบบดิ่งของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรปริมาณสารฟอสฟอรัสพบว่า การเพิ่มปริมาณสารฟอสฟอรัสไม่ส่งผลต่อสมบัติด้านการมิดรูปแต่อย่างใด แม้จะเติมสารฟอสฟอรัสไปถึง 24 wt% of the mixture ซึ่งแตกต่างจากผลการทดสอบระยะยืดขาด ทั้งนี้ น่าจะเป็นผลมาจากรูปแบบการทดสอบการมิดรูปถาวรแบบดิ่งที่วัดที่เปอร์เซ็นต์การมิดรูปต่ำๆ จึงยังไม่เห็นผลของความแตกต่างระหว่างมิดรอยต่อของเฟสพอลิเมอร์กับสารฟอสฟอรัส



รูปที่ 4.58 ความแข็งของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรปริมาณสารฟอสฟอรัส

รูปที่ 4.58 ความแข็งของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรปริมาณสารฟอสฟอรัสพบว่า ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัสในปริมาณน้อยกว่าหรือเท่ากับ 24 wt% of the mixture มีค่าความแข็งไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งความแข็งอยู่ที่ประมาณ 85 Shore A เนื่องจากความแข็งของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกมาจากเฟสของพลาสติกเป็นหลัก เพราะพอลิโพรพิลีนและโคพอลิเมอร์ของโพรพิลีนเอทิลีนสามารถตกผลึกได้ (พอลิโพรพิลีนตกผลึกได้ 41.2–62.5% และโคพอลิเมอร์ของโพรพิลีนเอทิลีนตกผลึกได้ 12 %) และเป็นโครงสร้างหลักของวัสดุ

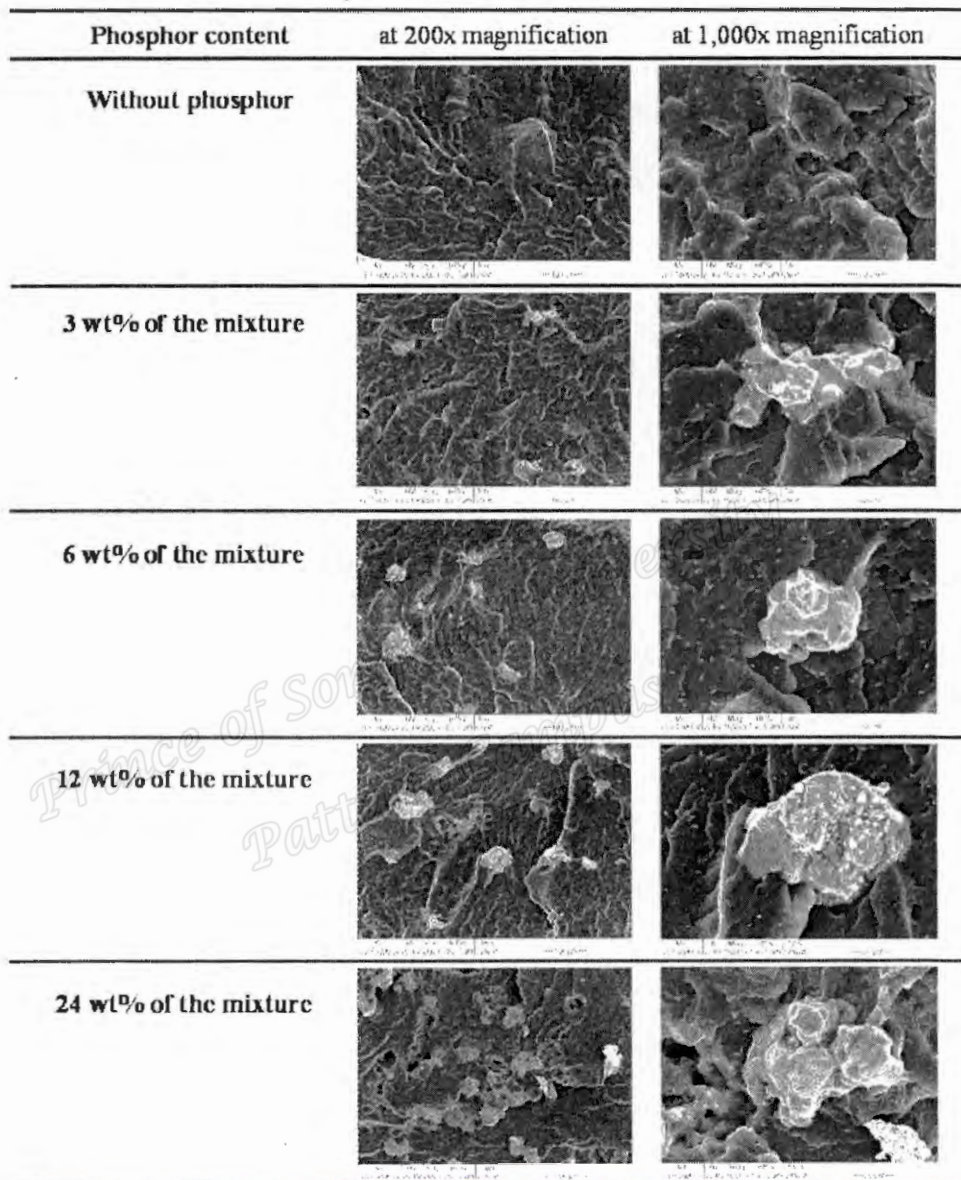


รูปที่ 4.59 เปอร์เซ็นต์การคงอยู่ของสมบัติเชิงกลหลังบ่มเร่งด้วยความร้อนของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรปริมาณสารฟอสฟอรัส

จากรูปที่ 4.59 เปอร์เซ็นต์การคงอยู่ของสมบัติเชิงกลหลังบ่มเร่งด้วยความร้อนของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรปริมาณสารฟอสฟอรัสพบว่า ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผ่านการบ่มเร่งจะให้เปอร์เซ็นต์การคงอยู่ของสมบัติเชิงกลหลังบ่มเร่งลดลงและลดลงมากขึ้นเมื่อผสมสารฟอสฟอรัสในปริมาณที่สูงขึ้น ซึ่งเป็นผลจากสมบัติในด้านการนำความร้อนที่ดีของสารฟอสฟอรัส (Ben et al., 2009) การมีปริมาณสารฟอสฟอรัสมากขึ้นส่งผลให้ความร้อนแพร่เข้าไปในยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกได้รวดเร็วขึ้น ซึ่งส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกดังกล่าว

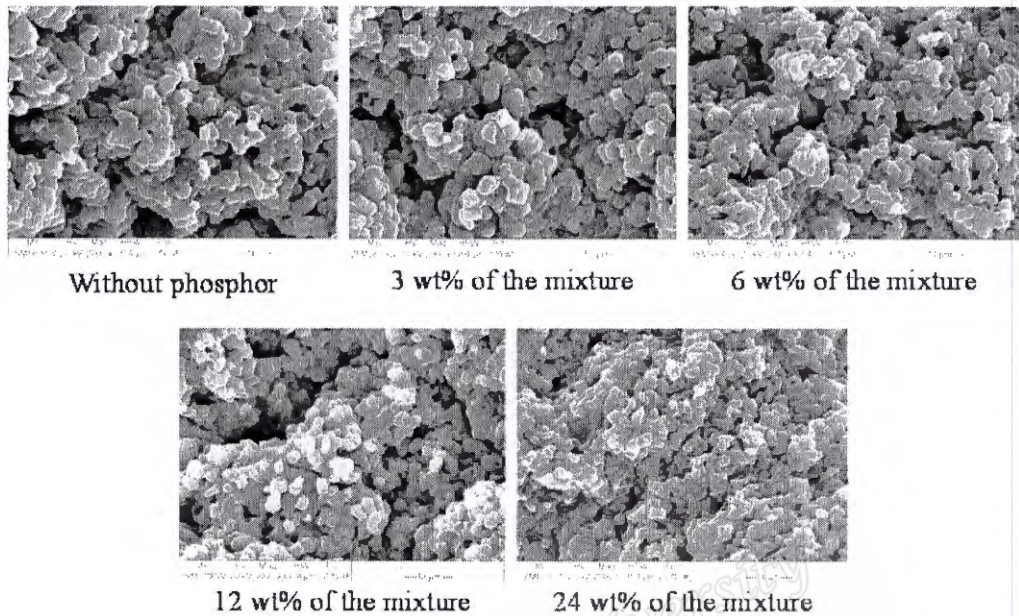
4.5.2. สัณฐานวิทยา (Morphology)

การศึกษาสัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรปริมาณสารฟอสฟอรัส ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.60 และ 4.61



รูปที่ 4.60 สัณฐานวิทยาแบบไม่สกัดเฟสของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรปริมาณสารฟอสฟอรัส ที่กำลังขยาย 200 เท่า และ 1,000 เท่า

**Phosphor content
at 2,000x magnification**



รูปที่ 4.61 สัณฐานวิทยาแบบสกัดเฟสของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรปริมาณสารฟอสฟอรัส ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า

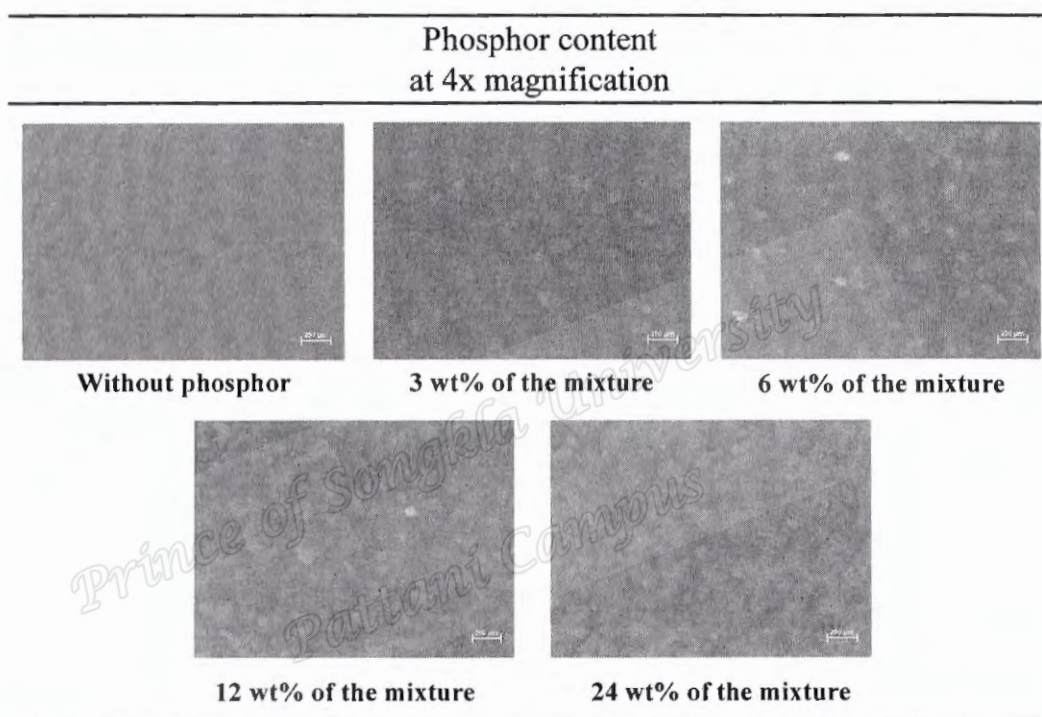
รูปที่ 4.60 สัณฐานวิทยาแบบไม่สกัดเฟสของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรปริมาณสารฟอสฟอรัส ที่กำลังขยาย 200 เท่า และ 1,000 เท่า พบว่าสัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่กำลังขยาย 200 เท่า ปรากฏอนุภาคของสารฟอสฟอรัสกระจายตัวใน เมทริกซ์เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มปริมาณสารฟอสฟอรัสในองค์ประกอบเบลนด์และที่กำลังขยาย 1,000 เท่า พบว่าลักษณะสัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกไม่แตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.61 สัณฐานวิทยาแบบสกัดเฟสของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรปริมาณสารฟอสฟอรัส ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า พบว่ายางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่มีปริมาณสารฟอสฟอรัสมากจะให้ลักษณะสัณฐานวิทยาของอนุภาคที่มีขนาดเล็กลงเนื่องจากสารฟอสฟอรัสเป็นโลหะ มีความแข็งและความหนาแน่นสูง เมื่อผสมลงในเทอร์โมพลาสติกจะทำให้เฟสเทอร์โมพลาสติกมีความหนืดเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับความหนืดของเฟสยางมากขึ้น ความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ขณะเบลนด์จึงมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการพัฒนาสัณฐานวิทยาเป็นวัฏภาคแบบต่อเนื่องที่ละเอียดได้ดี ก่อนที่จะเกิดการวัลคาไนซ์และเกิดการเชื่อมเป็นอนุภาคกระจายตัวในเฟส

เมทริกซ์ โดยการได้สัดส่วนวิทยาเป็นวิภาคแบบต่อเนื่องที่ละเอียดมากขึ้นเมื่อเกิดการวัลคาไนซ์ จะให้ขนาดอนุภาคยางวัลคาไนซ์ที่มีขนาดอนุภาคเล็กมากขึ้นด้วย

4.5.3. การกระจายตัวของสารฟอสฟอรัในยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรั

การศึกษาการกระจายตัวของสารฟอสฟอรัในยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรั โดยแปรปริมาณสารฟอสฟอรั ได้ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 4.62



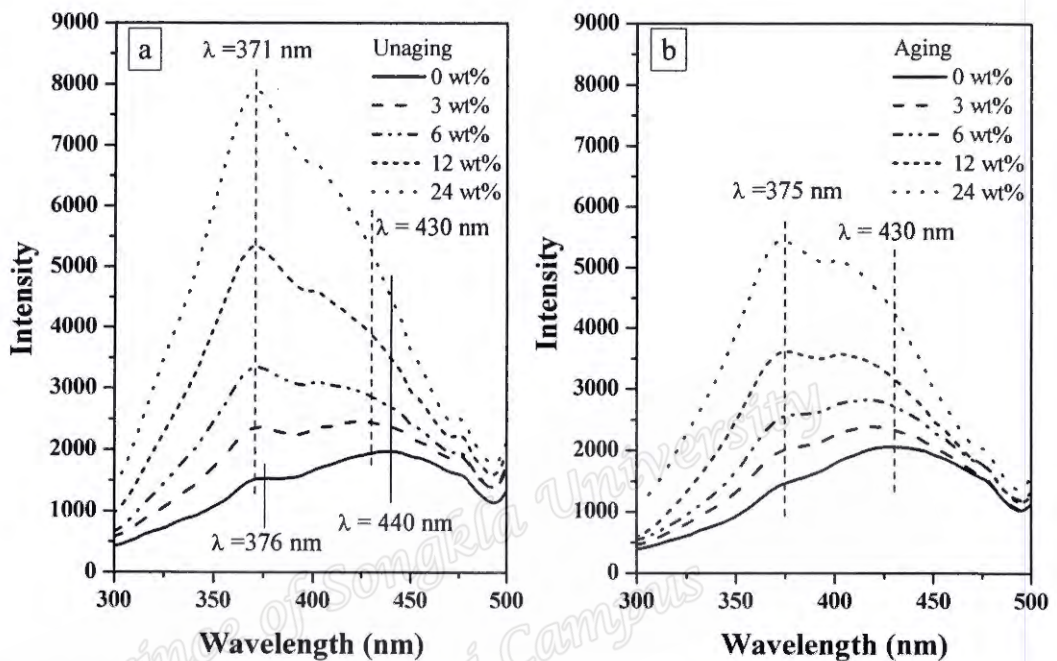
รูปที่ 4.62 ลักษณะการกระจายตัวของสารฟอสฟอรัในยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก โดยแปรปริมาณสารฟอสฟอรั

จากรูปที่ 4.62 ลักษณะการกระจายตัวของสารฟอสฟอรัในยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก โดยแปรปริมาณสารฟอสฟอรั พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารฟอสฟอรัในยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก ส่งผลให้มีความหนาแน่นของสารฟอสฟอรัในยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกเพิ่มขึ้น แต่ยังคงมีการกระจายตัวสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่นยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก

4.5.4. สมบัติทางแสง (Luminescent properties)

4.5.4.1. ความยาวคลื่นที่กระตุ้น

การทดสอบความยาวคลื่นที่กระตุ้นของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอร์ โดยแปรปริมาณสารฟอสฟอร์ ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.63



รูปที่ 4.63 สเปกตรัมของการกระตุ้นของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก โดยแปรปริมาณสารฟอสฟอร์

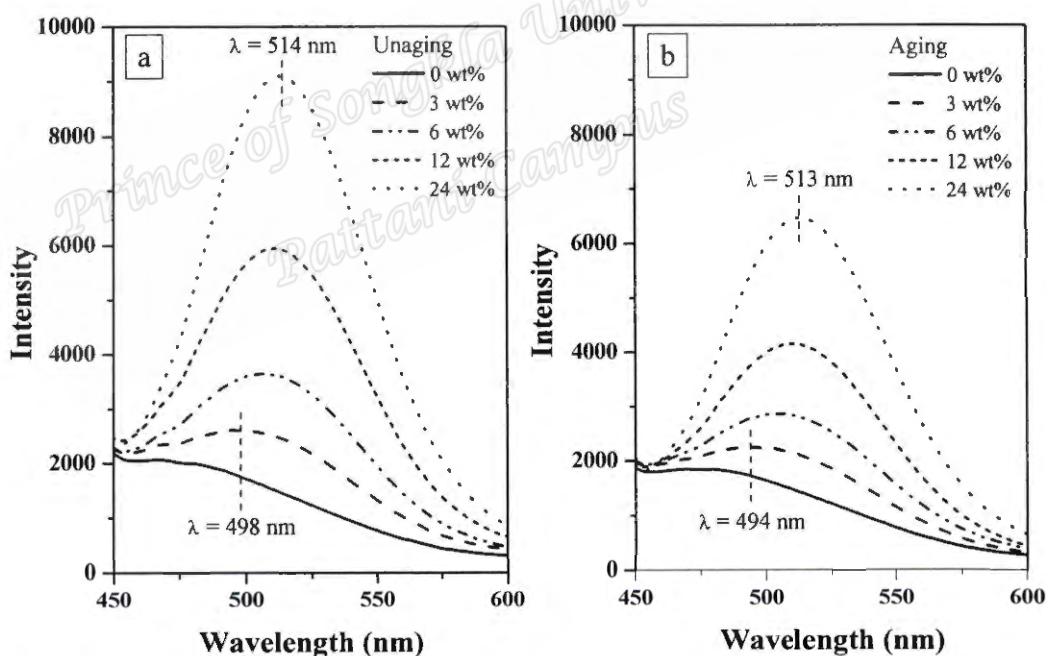
จากรูปที่ 4.63 สเปกตรัมของการกระตุ้นของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก โดยแปรปริมาณสารฟอสฟอร์ ก่อนการบ่มแรงพบว่า 1) ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอร์ปริมาณเพิ่มขึ้นส่งผลให้การกระตุ้นทำได้ง่ายขึ้น จึงมีความเข้มแสงที่ปลดปล่อยสูงขึ้น 2) การกระตุ้นยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอร์สามารถกระตุ้นได้ดีที่ความยาวคลื่น 371 nm ซึ่งสูงกว่าการกระตุ้นสารฟอสฟอร์บริสุทธิ์ (365 nm) (ดูผลการทดลองดังรูปที่ 4.6) และ 3) พีคที่ประมาณ 430 nm จะปรากฏเด่นชัดขึ้นเมื่อมีปริมาณสารฟอสฟอร์น้อย เนื่องจากได้รับอิทธิพลของสมบัติฟลูออเรสเซนซ์ของเมทริกซ์ (ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก) ซึ่งจะปรากฏพีคการกระตุ้นที่ความยาวคลื่นประมาณ 376 nm และ 440 nm

และภายหลังการบ่มแรงพบว่า 1) ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผ่านการบ่มแรงจะกระตุ้นได้ยากมากขึ้น เห็นได้จากการลดลงของความเข้มของการปลดปล่อยแสงของยางธรรมชาติเทอร์โม

พลาสติกเมื่อผ่านการบ่มเร่ง 2) ความยาวคลื่นที่กระตุ้นยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัสที่ผ่านการบ่มเร่งได้ดี คือ 375 nm ซึ่งมีค่าสูงกว่าก่อนการบ่มเร่ง และ 3) พิกที่ตำแหน่งประมาณ 430 เด่นชัดขึ้น (สังเกตได้ว่าจะขึ้นมาเกือบเสมอกับความสูงของพิกที่ความยาวคลื่น 375 nm) เนื่องจากการเสื่อมสภาพของเมทริกซ์ กล่าวคือเมื่อยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกผ่านการบ่มเร่ง จะทำให้ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกถูกออกซิไดซ์ เกิดการตัดขาดของสายโซ่โมเลกุล โดยเฉพาะในส่วนของพอลิโพรพิลีนที่สามารถเกิดการตัดขาดของสายโซ่โมเลกุลมากที่สุดจากสมบัติของโครงสร้างทางเคมี สัดส่วนที่สูงของพอลิโพรพิลีนในองค์ประกอบเบลนด์ และการทำหน้าที่เป็นเมทริกซ์ในโครงสร้าง ซึ่งสัมผัสกับความร้อนและออกซิเจนได้ดี จึงทำให้ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกมีความขุ่นเพิ่มขึ้นและการหักเหแสงเปลี่ยนไปมากขึ้น

4.5.4.2. ความยาวคลื่นที่ปลดปล่อย

การทดสอบความยาวคลื่นที่ปลดปล่อยของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรปริมาณสารฟอสฟอรัส ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.64

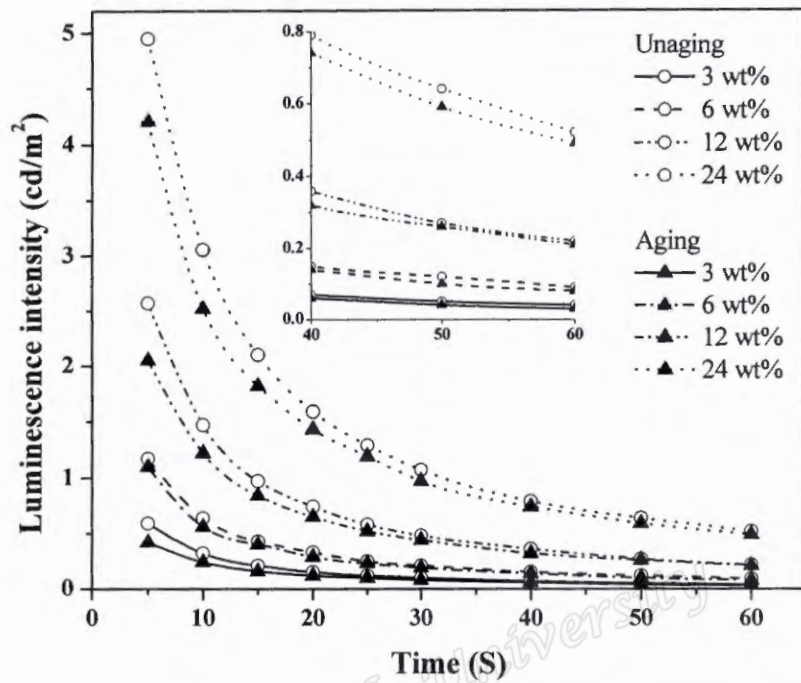


รูปที่ 4.64 สเปกตรัมของการปลดปล่อยพลังงานของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก โดยแปรปริมาณสารฟอสฟอรัส

จากรูปที่ 4.64 สเปกตรัมของการปลดปล่อยพลังงานของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก โดยแปรปริมาณสารฟอสฟอรัส พบว่าความเข้มแสงที่ปลดปล่อยของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกจะแปรผันตรงกับปริมาณสารฟอสฟอรัส (Wong *et al.*, 2006; Bem *et al.*, 2009; Bem *et al.*, 2010; Bem *et al.*, 2011a; Bem *et al.*, 2011b) และหากใส่สารฟอสฟอรัสในปริมาณน้อยอิทธิพลของเมทริกซ์จะส่งผลให้ความยาวคลื่นที่ปลดปล่อยมีค่าน้อยลง (Bem *et al.*, 2009; Bem *et al.*, 2010; Bem *et al.*, 2011b) กล่าวคือยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่มีการผสมสารฟอสฟอรัสในปริมาณมากกว่าหรือเท่ากับ 12 wt% of the mixture จะให้ความยาวคลื่นที่ปลดปล่อยของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกใกล้เคียงกับสารฟอสฟอรัสบริสุทธิ์คือที่ 514 nm ซึ่งเป็นแสงสีเขียวของการทรานซิชันของ Eu^{2+} ที่ระดับพลังงาน $4f^6 5d^1 \rightarrow 4f^7$ ขณะที่ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่มีการผสมสารฟอสฟอรัสในปริมาณที่น้อยกว่า 12 wt% of the mixture จะให้ความยาวคลื่นที่ปลดปล่อยเบี่ยงไปทางความยาวคลื่นที่น้อยลงหรือต่ำกว่า 514 nm เนื่องจากได้รับอิทธิพลของสมบัติฟลูออเรสเซนซ์ของเมทริกซ์ นอกจากนี้ยังพบว่า การบ่มเร่งยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกทำให้ความเข้มแสงที่ปลดปล่อยและความยาวคลื่นที่ปลดปล่อยของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกลดลงจากเดิมที่ปรากฏในตำแหน่ง 514 nm เนื่องจากการเสื่อมสภาพของเมทริกซ์ดังที่กล่าวไว้เช่นเดียวกับในหัวข้อ 4.5.4.1

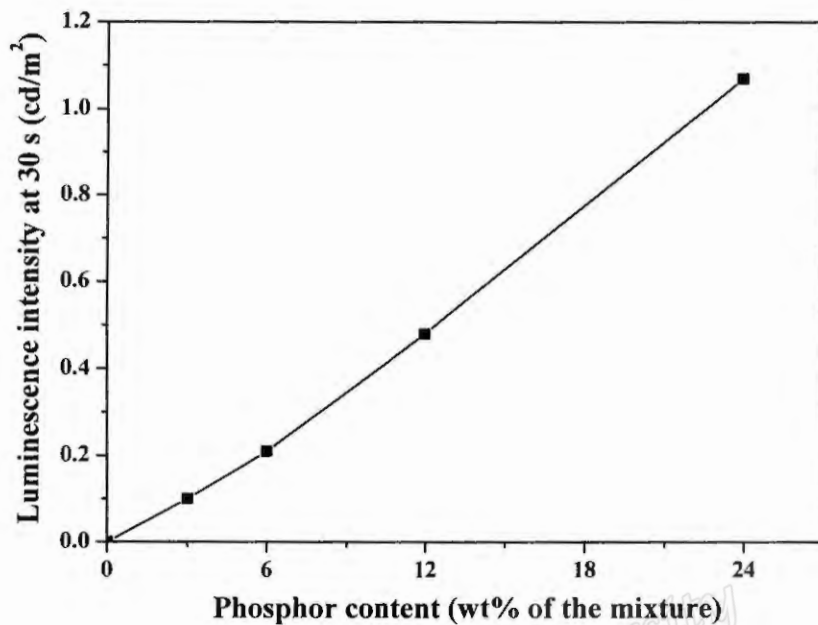
4.5.4.3. ระยะเวลาการคงอยู่ของแสงที่ปลดปล่อยหลังหยุดกระตุ้น

ระยะเวลาการคงอยู่ของแสงที่ปลดปล่อยหลังจากการหยุดกระตุ้นของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรปริมาณสารฟอสฟอรัส ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.65 (ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ไม่ผสมสารฟอสฟอรัสไม่สามารถวัดค่าได้จึงไม่แสดงในรูปที่ 4.65)



รูปที่ 4.65 ระยะเวลาการคงอยู่ของแสงที่ปลดปล่อยหลังหยุดกระตุ้นของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรปริมาณสารฟอสฟอรัส

จากรูปที่ 4.65 ระยะเวลาการคงอยู่ของแสงที่ปลดปล่อยหลังหยุดกระตุ้นของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรปริมาณสารฟอสฟอรัสพบว่า ในช่วงแรกหลังจากหยุดกระตุ้นยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัสในปริมาณต่างกันให้ความเข้มแสงลดลงอย่างรวดเร็ว และหลังจากหยุดกระตุ้น 20 วินาที การลดลงของความเข้มแสงจะช้าลงและค่อนข้างคงที่ เมื่อเปรียบเทียบความเข้มแสงที่ปลดปล่อยของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมโดยมีปริมาณสารฟอสฟอรัสที่แตกต่างกันพบว่า ความเข้มแสงที่ปลดปล่อยและระยะเวลาการคงอยู่ของแสงที่ปลดปล่อยหลังหยุดกระตุ้นของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกจะแปรผันตรงกับปริมาณสารฟอสฟอรัส (Bem *et al.*, 2011a) ดังความสัมพันธ์ของปริมาณสารฟอสฟอรัสกับความเข้มแสงที่ระยะเวลาหลังหยุดกระตุ้น 30 วินาที ในรูปที่ 4.66 นอกจากนี้ยังพบว่า ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกภายหลังการบ่มแรงจะให้ความเข้มแสงที่ปลดปล่อยและระยะเวลาการคงอยู่ของแสงที่ปลดปล่อยหลังหยุดกระตุ้นลดลง ซึ่งมีเหตุผลดังได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 4.5.4.1

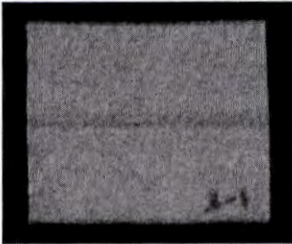
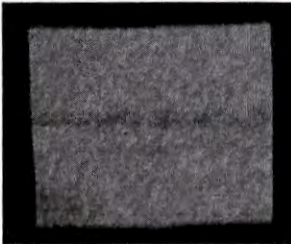
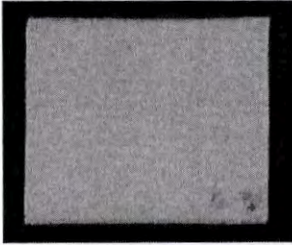
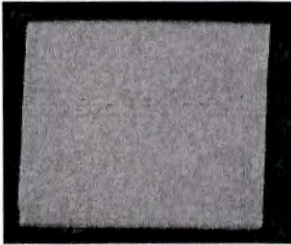
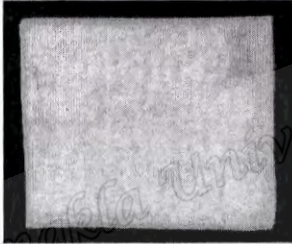
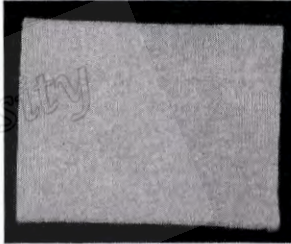




รูปที่ 4.66 ความสัมพันธ์ของปริมาณสารฟอสฟอรัสกับความเข้มแสงที่ระยะเวลาหลังหยุดกระตุ้น 30 วินาที

จากรูปที่ 4.66 สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ของปริมาณสารฟอสฟอรัสกับความเข้มแสงที่ระยะเวลาหลังหยุดกระตุ้น 30 วินาที ได้ดังสมการที่ 4.2

$$y = 0.0467x - 0.06 \quad \dots\dots\dots (4.2)$$

ลักษณะการปลดปล่อยแสงหลังจากหยุดกระตุ้นของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่แปรปริมาณสารฟอสฟอรัสแสดงดังรูปที่ 4.67

Phosphor content	Before aging	After aging
3 wt% of the mixture		
6 wt% of the mixture		
12 wt% of the mixture		
24 wt% of the mixture		

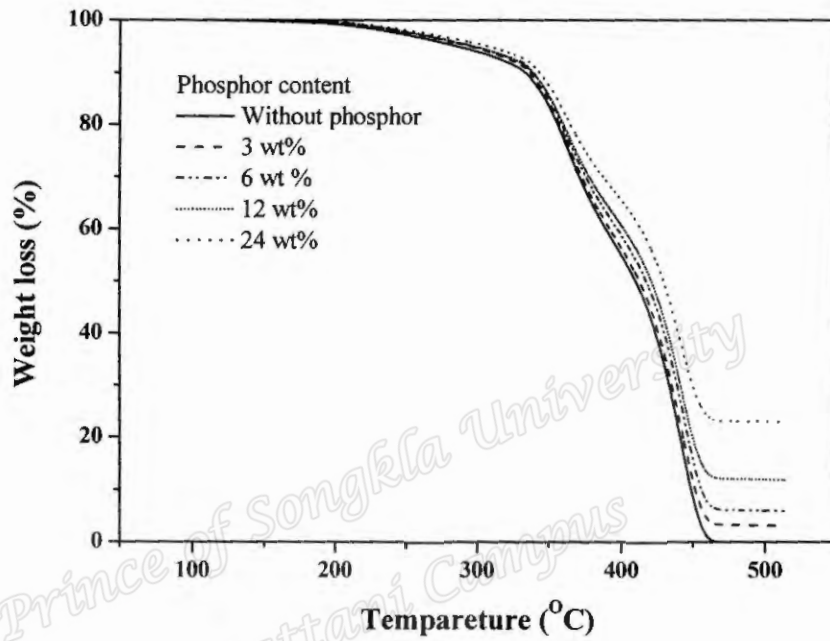
รูปที่ 4.67 ลักษณะการปลดปล่อยแสงหลังจากหยุดกระตุ้นของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรปริมาณสารฟอสฟอรัส

จากรูปที่ 4.67 ลักษณะการปลดปล่อยแสงหลังจากหยุดกระตุ้นของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรปริมาณสารฟอสฟอรัสพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณสารฟอสฟอรัสจะทำให้ชั้นทดสอบมีความเข้มแสงที่ปลดปล่อยเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด และชั้นทดสอบที่ผ่านการบ่มแรงจะให้ความเข้มแสงที่ปลดปล่อยลดลงจากเดิมเล็กน้อย เนื่องจากความเสื่อมสภาพของเมทริกซ์ ส่วนยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ไม่ผสมสารฟอสฟอรัส พบว่าไม่มีการปลดปล่อยแสงออกมา จึงไม่นำมาแสดงในรูปที่ 4.67

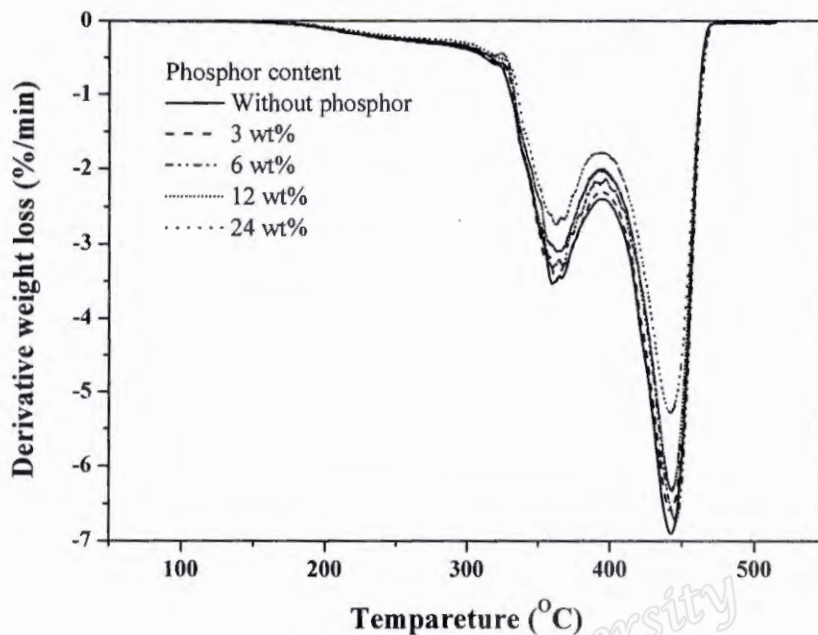
4.5.5. สมบัติเชิงความร้อน (Thermal properties)

4.5.5.1. ความเสถียรทางความร้อน

การวิเคราะห์หาอุณหภูมิการสลายตัวของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรปริมาณสารฟอสฟอรัส ด้วยเทคนิค TGA ภายใต้สภาวะไนโตรเจน โดยอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเท่ากับ $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.68 และ 4.69



รูปที่ 4.68 ค่าเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักภายใต้อุณหภูมิของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกผสมสารฟอสฟอรัสที่แปรปริมาณสารฟอสฟอรัส

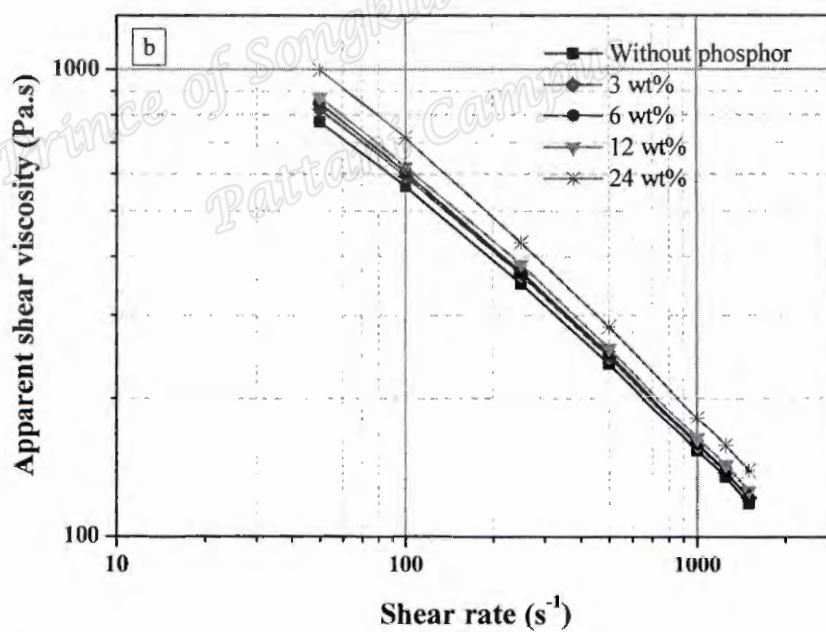
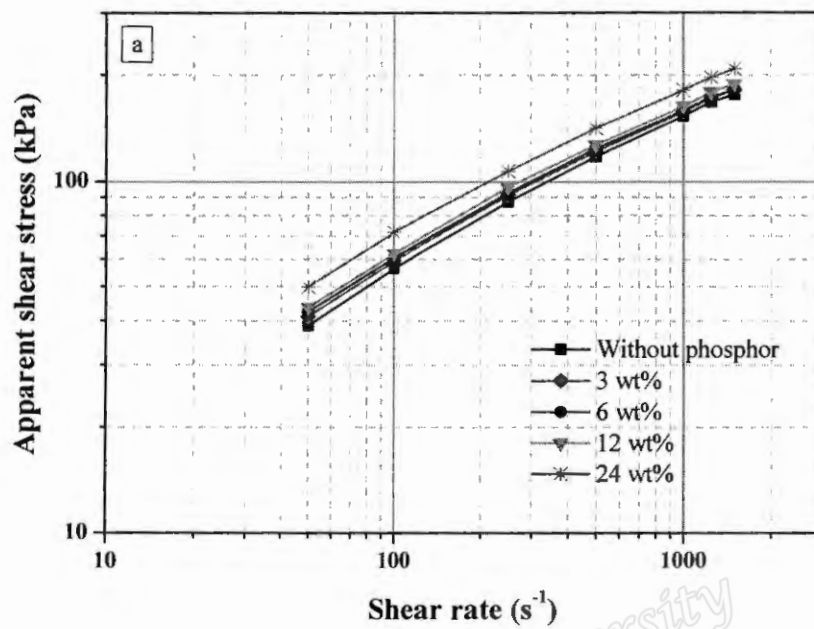


รูปที่ 4.69 อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูงภายใต้อุณหภูมิของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกผสมสารฟอสฟอรัสที่แปรปริมาณสารฟอสฟอรัส

จากรูปที่ 4.68 และ 4.69 พบว่าการสลายตัวของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกผสมสารฟอสฟอรัสจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบเบลนด์ โดยมีการสลายตัว 3 ช่วงด้วยกัน ช่วงแรกที่อุณหภูมิ 180-320°C ซึ่งเป็นการสลายตัวของสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เช่น น้ำมัน สารช่วยแปรรูป และสารโมเลกุลเล็กอื่นๆ ช่วงที่ 2 ที่อุณหภูมิประมาณ 320-395°C เป็นการสลายตัวของเฟสยาง และช่วงที่ 3 ที่อุณหภูมิประมาณ 395-455°C เป็นการสลายตัวของพลาสติก และเหลือองค์ประกอบที่ไม่สลายตัวได้แก่ สารฟอสฟอรัสตามปริมาณที่มีในยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกนอกจากนี้จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารฟอสฟอรัสจะส่งผลให้การสลายตัวของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกเกิดขึ้นได้ช้าลง เนื่องจากสารฟอสฟอรัสมีความจุความร้อนสูง (Bem *et al.*, 2009; Bem *et al.*, 2010; Bem *et al.*, 2011b)

4.5.6. สมบัติการไหล (Rheological properties)

การวิเคราะห์สมบัติการไหลของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรปริมาณสารฟอสฟอรัส ด้วยเครื่อง Capillary rheometer ทดสอบที่อุณหภูมิ 200°C โดยมีอัตราการเฉือนเท่ากับ 50, 100, 250, 500, 1,000, 1,250 และ 1,500 s^{-1} ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.70



รูปที่ 4.70 ความสัมพันธ์ระหว่าง Apparent shear stress กับ Shear rate (a) และ Apparent shear viscosity กับ Shear rate (b) ของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกผสมสารฟอสฟอรัสที่แปรปริมาณสารฟอสฟอรัส

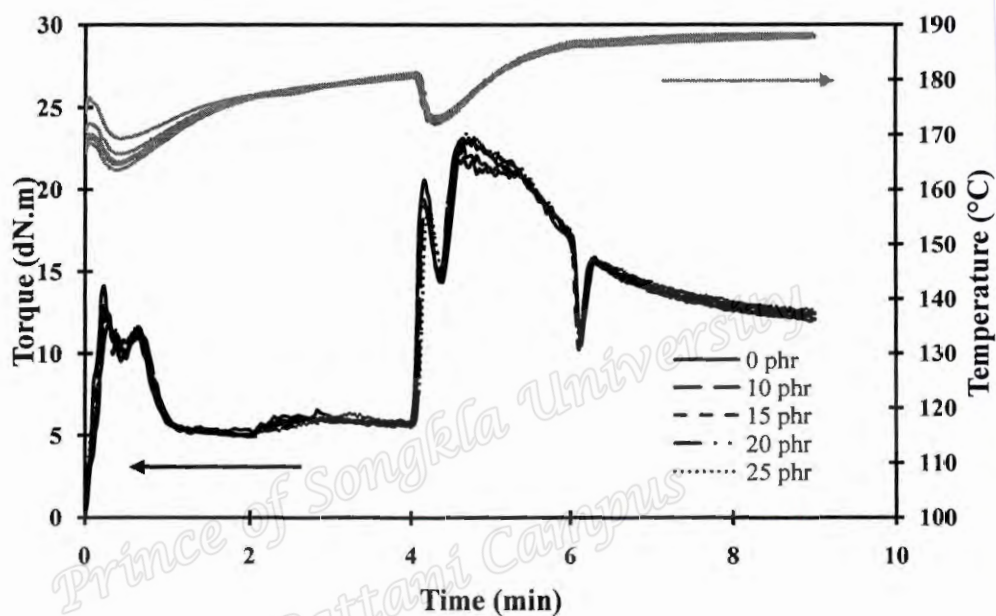
จากรูปที่ 4.70 ความสัมพันธ์ระหว่าง Apparent shear stress กับ Shear rate (a) และ Apparent shear viscosity กับ Shear rate (b) พบว่ายางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรปริมาณสารฟอสฟอรัส แสดงพฤติกรรมแบบเชียร์ทินนิง (Shear-thinning behavior) โดยมีการเพิ่มขึ้นของความเค้นเฉือนปรากฏและการลดลงของความหนืดเฉือนปรากฏเมื่อเพิ่มอัตราเฉือน เมื่อพิจารณาค่าทดสอบที่อัตราเฉือนคงที่ค่าหนึ่ง ค่าความเค้นเฉือนปรากฏและความหนืดเฉือนปรากฏของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกมีการเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารฟอสฟอรัส เนื่องจากสารฟอสฟอรัสไปขัดขวางการไหลของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ เมื่อมีสารฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้น ทำให้การขัดขวางการไหลของสายโซ่โมเลกุลเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

4.5.7. สรุปผลการศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารฟอสฟอรัสต่อสมบัติของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส

การเตรียมยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัสโดยแปรปริมาณสารฟอสฟอรัส ให้สมบัติของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัสดังนี้คือ เมื่อเพิ่มปริมาณสารฟอสฟอรัสทำให้ความหนืดของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกในขณะผสม การเปลี่ยนแปลงของสมบัติเชิงกล การปลดปล่อยแสงทั้งก่อนและหลังบ่มแรง การคงอยู่ของแสงหลังหยุดกระตุ้น อุณหภูมิการสลายตัวของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก ความเค้นเฉือนปรากฏและความหนืดเฉือนปรากฏมีค่าเพิ่มขึ้น ขณะที่สัญญาณวิทยาของขนาดอนุภาคยางลดลง แต่ไม่ส่งผลต่อการเกิดรูปถาวรแบบดึงและความแข็งแรง นอกจากนี้ยังพบว่า การใส่สารฟอสฟอรัสมากกว่า 12 wt% of the mixture จะส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลง

4.6. การศึกษาอิทธิพลของปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อสมบัติของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส

การเตรียมยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกระหว่าง NR/PP/PEC ที่อัตราส่วนการเบลนด์เท่ากับ 40/30/30 โดยน้ำหนัก ใช้สารฟอสฟอรัส 12 wt% of the mixture มีวิธีการผสมแบบ Precompound-I โดยแปรปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ 0, 10, 15, 20 และ 25 phr ได้กราฟการผสมดังรูปที่ 4.71



รูปที่ 4.71 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าทอร์กกับเวลาและอุณหภูมิการผสมกับเวลาของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกจากการเบลนด์ระหว่าง NR/PP/PEC โดยแปรปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์

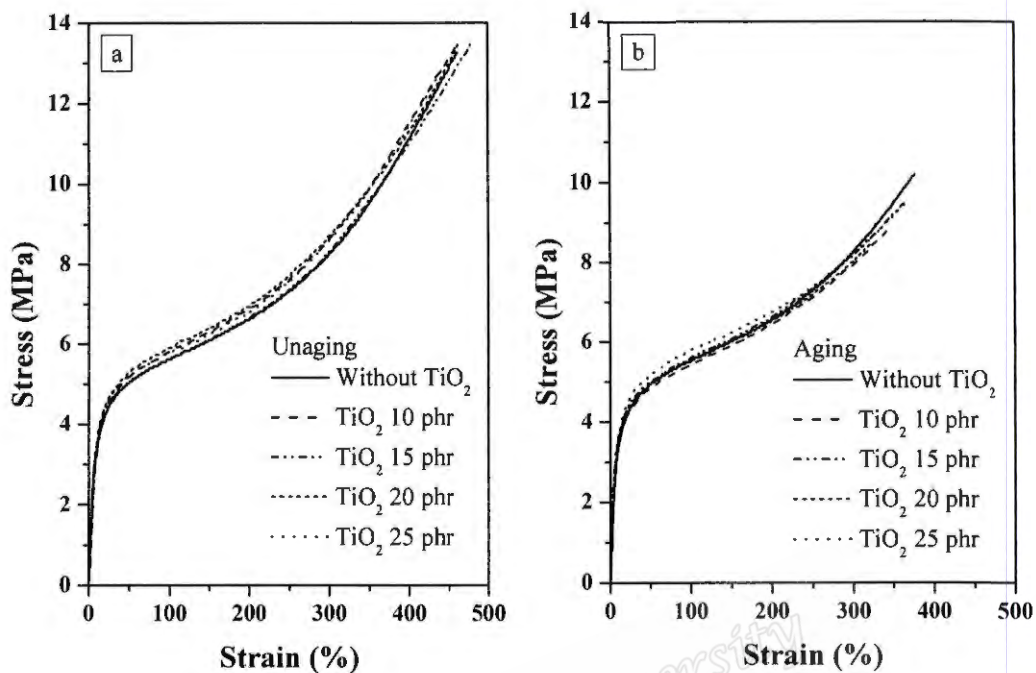
จากรูปที่ 4.71 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าทอร์กกับเวลาและอุณหภูมิการผสมกับเวลาของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกจากการเบลนด์ระหว่าง NR/PP/PEC โดยแปรปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์พบว่า การเติมไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณน้อยกว่าหรือเท่ากับ 25 phr (≤ 7.6 %wt) จะไม่ส่งผลต่อค่าทอร์กการผสมและอุณหภูมิการผสม เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์มีขนาดอนุภาคเล็ก ($0.4 \mu\text{m}$) และมีปริมาณน้อยจึงมีการกระจายตัวดีในยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก

4.6.1. สมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

การเตรียมยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกจากการเบลนด์ระหว่าง NR/PP/PEC โดยแปรปริมาณสารไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณ 0, 10, 15, 20 และ 25 phr ไปทดสอบสมบัติทางด้านการดึงก่อนและหลังบ่มแรง การผิครูปถาวรแบบดึง และความแข็ง ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.72-4.76

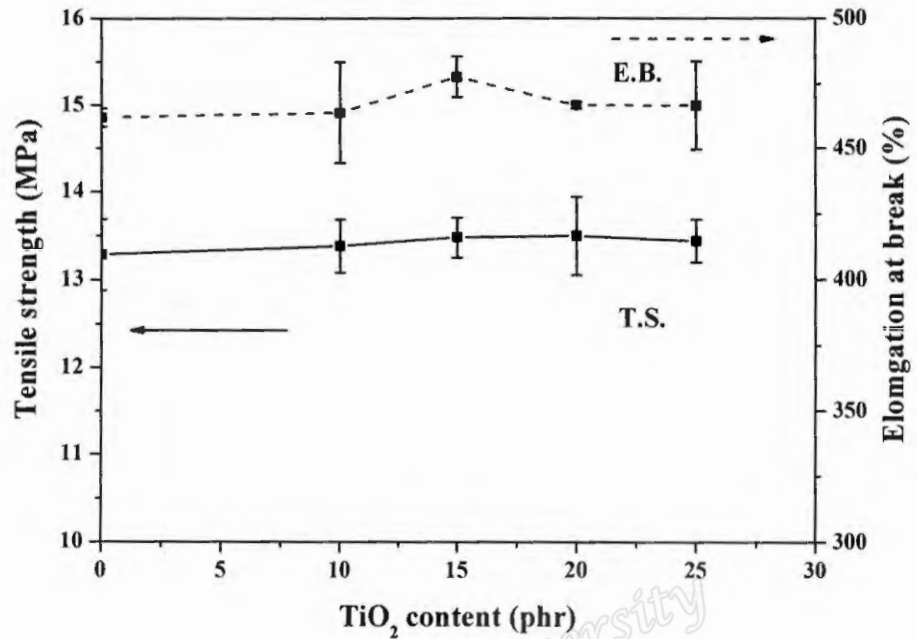
ตารางที่ 4.6 สมบัติเชิงกลก่อนและหลังบ่มแรงของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรปริมาณสารไทเทเนียมไดออกไซด์

Properties	TiO ₂ content (phr)				
	0	10	15	20	25
Unaging					
Modulus at 100% (MPa)	5.56±0.06	5.67±0.12	5.65±0.06	5.80±0.09	5.77±0.14
Modulus at 300% (MPa)	8.27±0.10	8.52±0.22	8.31±0.15	8.57±0.15	8.50±0.23
Tensile strength (MPa)	13.28±0.40	13.38±0.30	13.48±0.23	13.50±0.45	13.44±0.24
Elongation at break (%)	462±4	464±19	478±8	467±1	466±17
Tension set (%)	24.8±1.4	24.3±1.2	24.6±1.4	24.7±0.8	24.4±0.5
Hardness (Shore A)	84.8±0.3	84.2±0.3	84.3±0.3	83.8±0.6	84.7±0.8
Aging					
Tensile strength (MPa)	10.11±0.46	8.87±0.38	9.49±0.28	8.58±0.52	8.85±0.29
Elongation at break (%)	378±2	348±6	369±3	314±32	372±21
Retention					
Tensile strength (%)	76.08	66.26	70.39	63.53	65.85
Elongation at break (%)	81.84	75.01	77.32	67.28	79.83



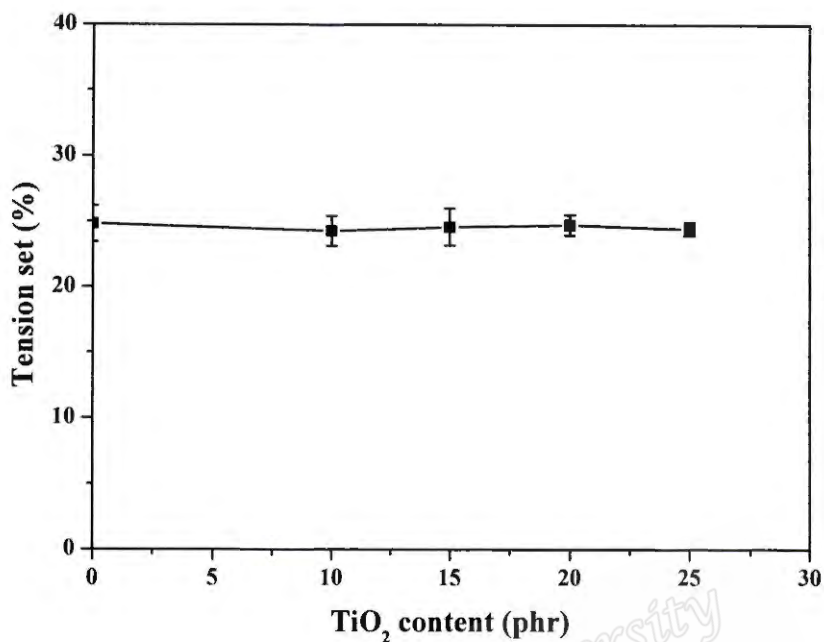
รูปที่ 4.72 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรปริมาณสารไทเทเนียมไดออกไซด์ (a) ก่อนบ่มแรง และ (b) หลังบ่มแรง

จากรูปที่ 4.72 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรปริมาณสารไทเทเนียมไดออกไซด์พบว่า ความเค้นกับความเครียดของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกผสมสารไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณต่างกัน มีพฤติกรรมการผิดรูปคล้ายกันทั้งก่อนและหลังบ่มแรง คือวัสดุจะมีมอดุลัสและความแข็งดิ่งสูง และมีความเป็นอีลาสติก



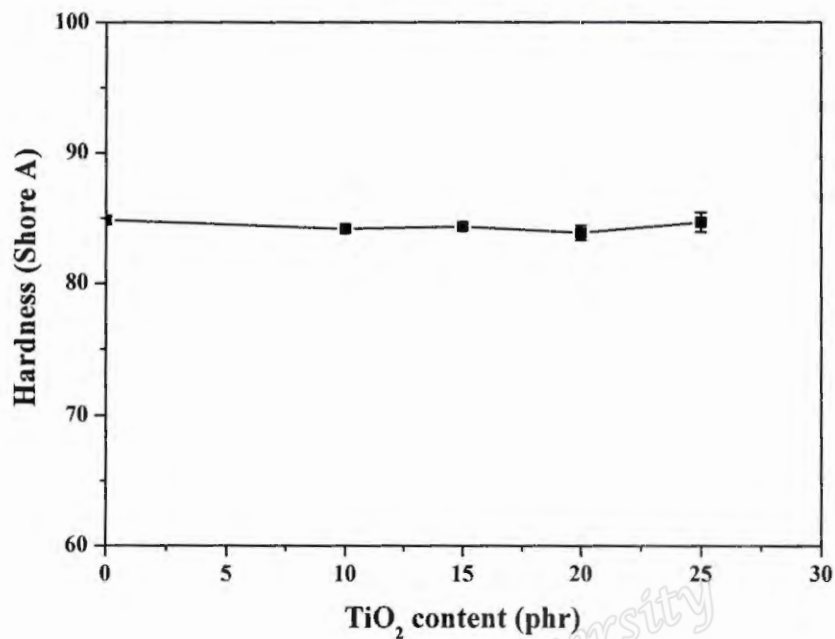
รูปที่ 4.73 สมบัติการดึงของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรปริมาณสารไทเทเนียมไดออกไซด์

จากรูปที่ 4.73 สมบัติการดึงของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์พบว่า การเตรียมยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารไทเทเนียมไดออกไซด์ในปริมาณน้อยกว่าหรือเท่ากับ 25 phr จะไม่ส่งผลต่อค่าความต้านทานต่อแรงดึงและระยะยืดที่จุดขาด เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์มีขนาดอนุภาคเล็ก (0.4 μm) และมีปริมาณน้อย (≤ 7.6 %wt) จึงมีการกระจายตัวดีในยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก



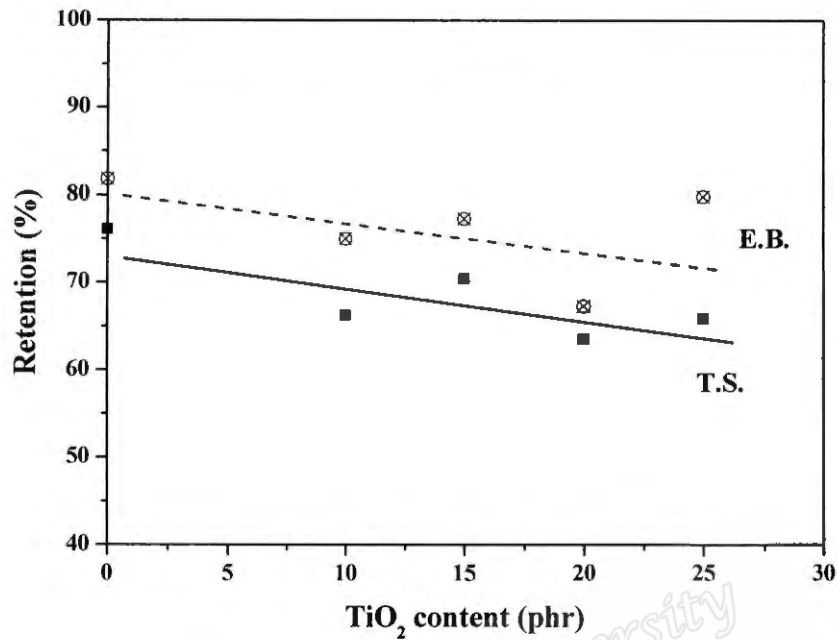
รูปที่ 4.74 การผิดรูปถาวรแบบดึงของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรปริมาณสารไทเทเนียมไดออกไซด์

จากรูปที่ 4.74 การผิดรูปถาวรแบบดึงของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรปริมาณสารไทเทเนียมไดออกไซด์พบว่า การผสมสารไทเทเนียมไดออกไซด์ลงในยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกไม่มีผลต่อค่าการผิดรูปถาวรแบบดึง นอกจากนี้ยังบ่งบอกถึงเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมได้มีสมบัติเป็นอีลาสติกที่ดี



รูปที่ 4.75 ความแข็งของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรปริมาณสารไทเทเนียมไดออกไซด์

จากรูปที่ 4.75 ความแข็งของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรปริมาณสารไทเทเนียมไดออกไซด์พบว่า ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารไทเทเนียมไดออกไซด์ในปริมาณน้อยกว่าหรือเท่ากับ 25 phr มีค่าความแข็งไม่ต่างกัน อยู่ที่ประมาณ 85 Shore A ซึ่งมาจากเฟสของพอลิโพรพิลีนที่มีการตกผลึกในโครงสร้างและทำหน้าที่เป็นเมทริกซ์

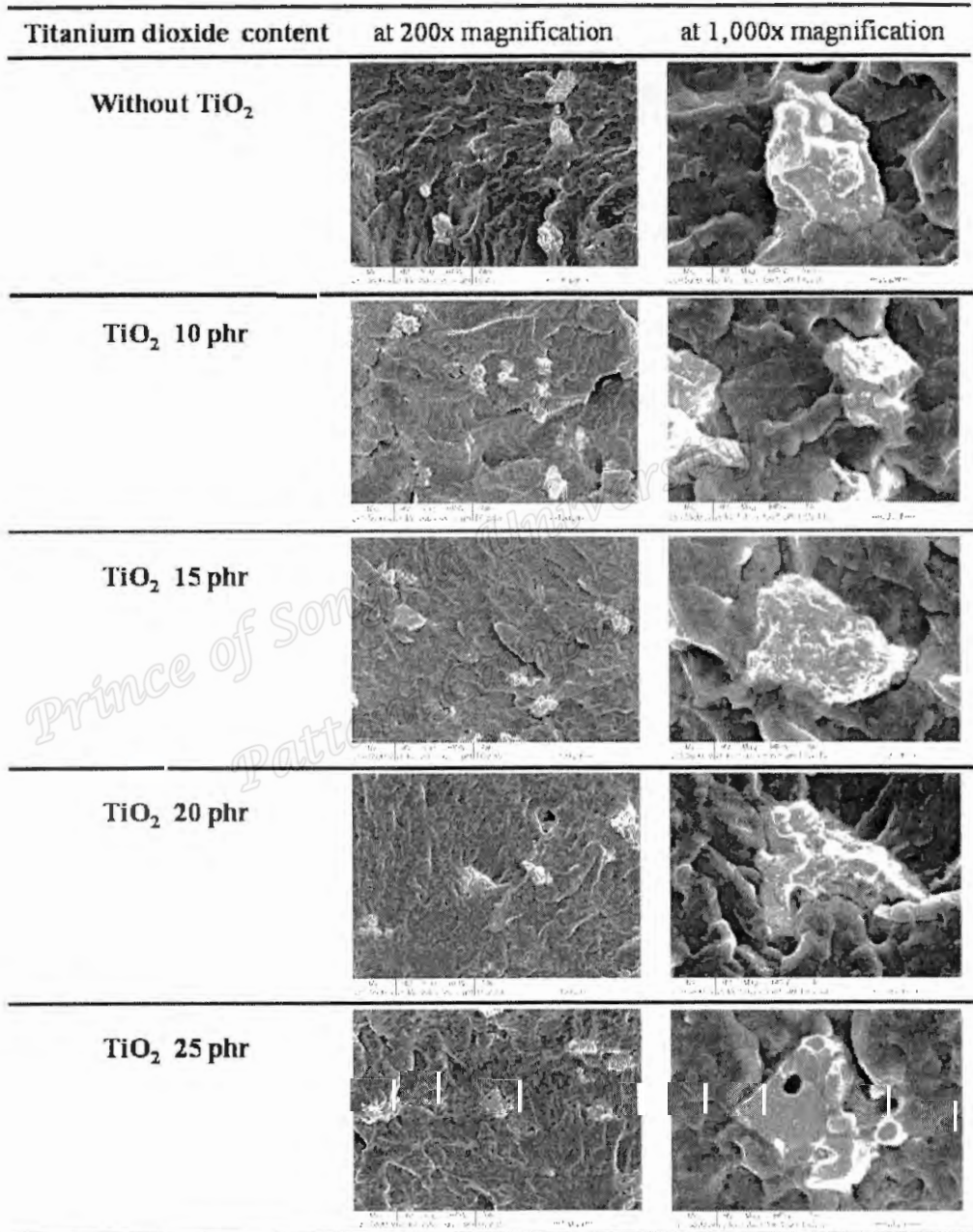


รูปที่ 4.76 เปอร์เซ็นต์การคงอยู่ของสมบัติเชิงกลหลังบ่มเร่งด้วยความร้อนของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรปริมาณสารไทเทเนียมไดออกไซด์

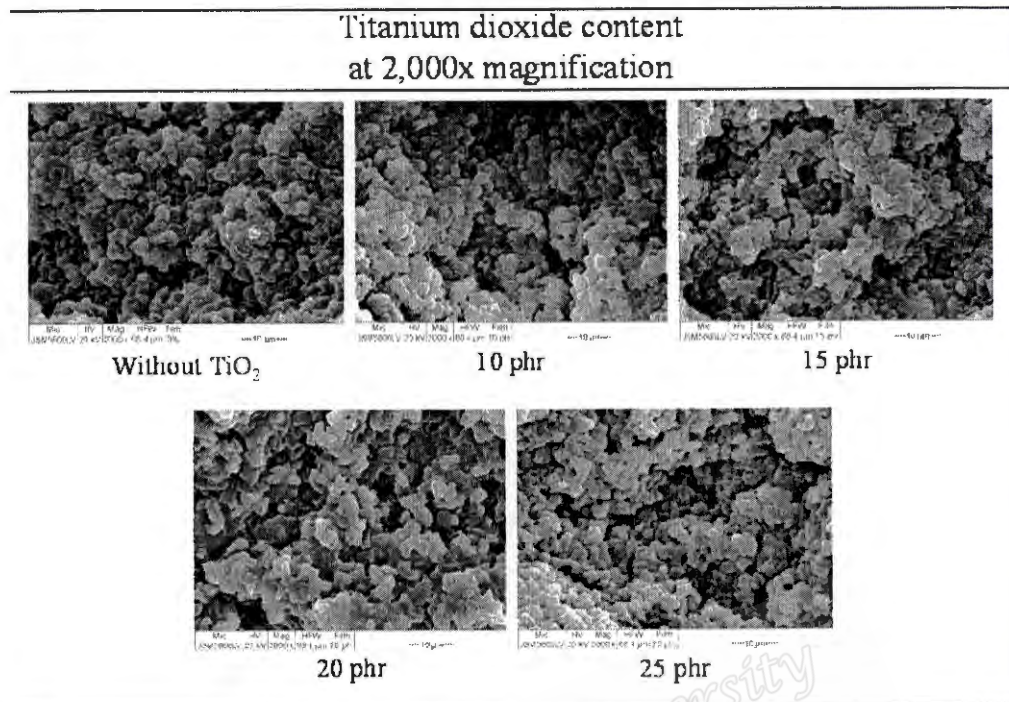
จากรูปที่ 4.76 เปอร์เซ็นต์การคงอยู่ของสมบัติหลังบ่มเร่งของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณสารไทเทเนียมไดออกไซด์ เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์มีสมบัติเป็นโฟโตคะตะไลซิส (Photocatalysis) มีหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ (พรนภา, 2548; ชวิศร์, 2549) และสมบัติโฟโตคะตะไลซิสจะมีประสิทธิภาพสูงขึ้นเมื่อผสมร่วมกับสารฟอสฟอรัส (Yoon and Kim, 2010) เนื่องจากแสงที่สารฟอสฟอรัสปลดปล่อยจะไปกระตุ้นการทำงานของไทเทเนียมไดออกไซด์ในเชิงโฟโตคะตะไลซิสมากขึ้น

4.6.2. สัณฐานวิทยา (Morphology)

การศึกษาสัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกผสมสารฟอสฟออร์ โดยแปรปริมาณสารไทเทเนียมไดออกไซด์ ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.77 และ 4.78



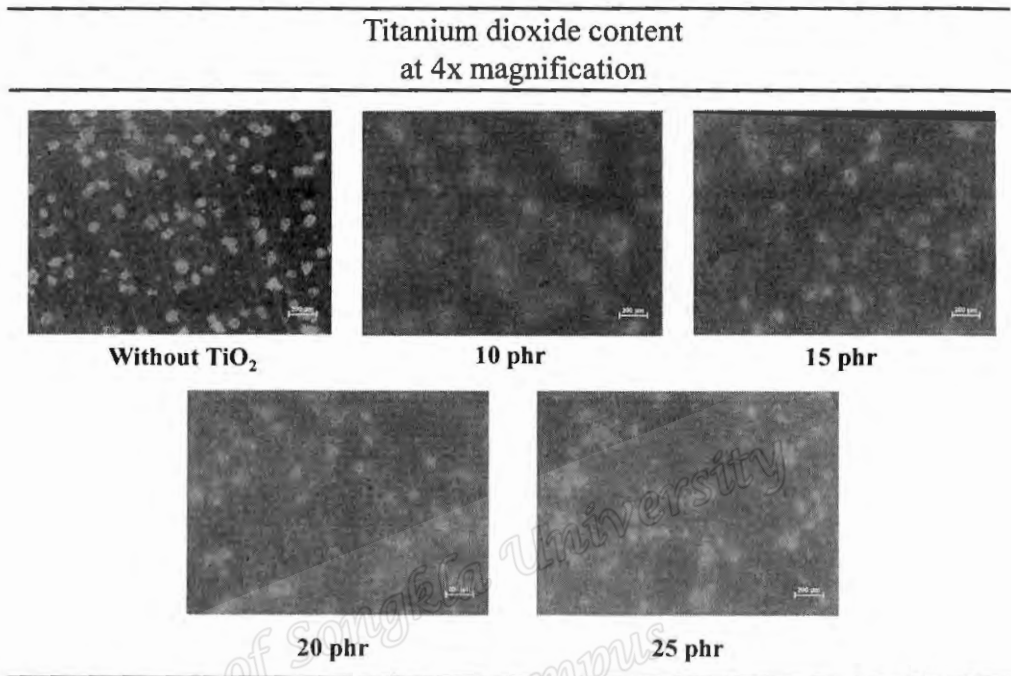
รูปที่ 4.77 สัณฐานวิทยาแบบไม่สกัดเฟสของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกผสมสารฟอสฟออร์ โดยแปรปริมาณสารไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่กำลังขยาย 200 เท่า และ 1,000 เท่า



รูปที่ 4.78 สัณฐานวิทยาแบบสกัดเฟสของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรปริมาณสารไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า

จากรูปที่ 4.77 และ รูปที่ 4.78 สัณฐานวิทยาแบบสกัดเฟสและไม่สกัดเฟสของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรปริมาณสารไทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่าสัณฐานวิทยาไม่แตกต่างกัน

4.6.3. การกระจายตัวของสารฟอสฟอรัในยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรั
 การศึกษาการกระจายตัวของสารฟอสฟอรัในยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสาร
 ฟอสฟอรั โดยแปรปริมาณสารไทเทเนียมไดออกไซด์ ได้ผลการศึกษาดังรูปที่ 4.79



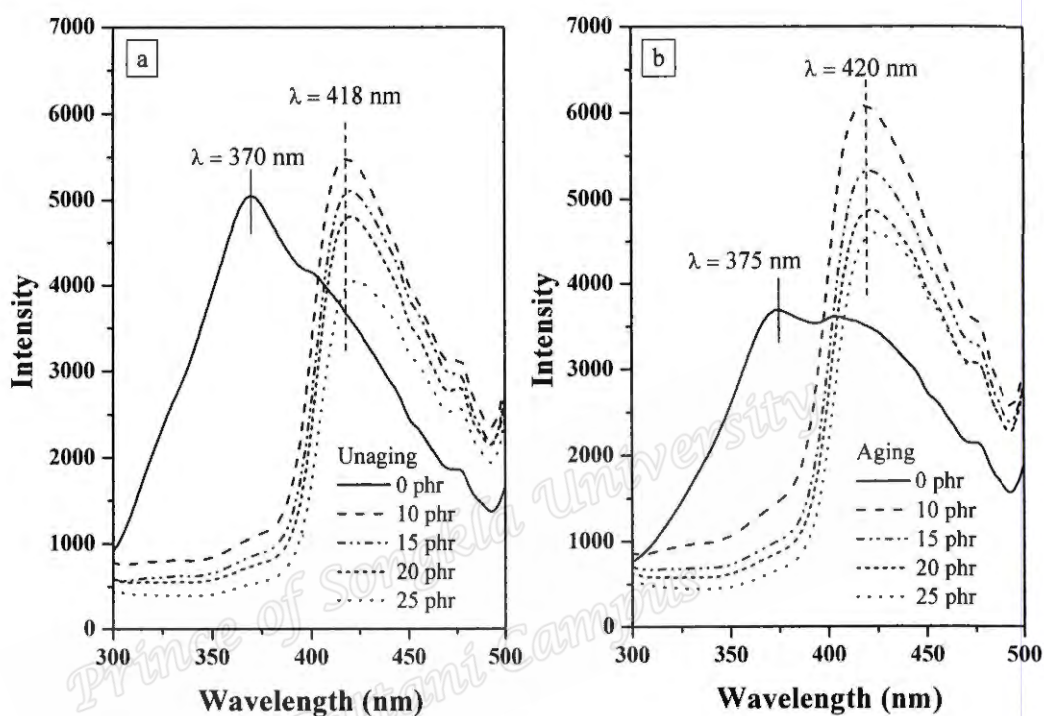
รูปที่ 4.79 ลักษณะการกระจายตัวของสารฟอสฟอรัในยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสาร
 ฟอสฟอรั โดยแปรปริมาณสารไทเทเนียมไดออกไซด์

จากรูปที่ 4.79 ลักษณะการกระจายตัวของสารฟอสฟอรัในยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก
 ผสมสารฟอสฟอรั โดยแปรปริมาณสารไทเทเนียมไดออกไซด์พบว่า การกระจายตัวของสารฟอสฟอรัมี
 ความสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่นยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก อย่างไรก็ตามการผสมสารไทเทเนียม
 ไดออกไซด์ในยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกทำให้การมองเห็นสารฟอสฟอรัลดลงและไม่ชัดเจน
 เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์มีสมบัติเป็นโฟโตคะตะไลซิส ซึ่งสามารถดูดกลืนแสงในช่วง
 อัลตราไวโอเล็ตและแสงช่วงที่มองเห็นได้ (พรนภา, 2548; ขวิศร์, 2549; Yoon and Kim, 2010) จึง
 ทำให้แสงที่จะเข้าไปกระตุ้นสารฟอสฟอรัและความเข้มแสงที่สารฟอสฟอรัปลดปล่อยลดลง

4.6.4. สมบัติทางแสง (Luminescent properties)

4.6.4.1. ความยาวคลื่นที่กระตุ้น

การทดสอบความยาวคลื่นที่กระตุ้นของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอร์ โดยแปรปริมาณสารไทเทเนียมไดออกไซด์ ก่อนและหลังบ่มแรง กำหนดความยาวคลื่นที่ตรวจวัดที่ 515 nm ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.80

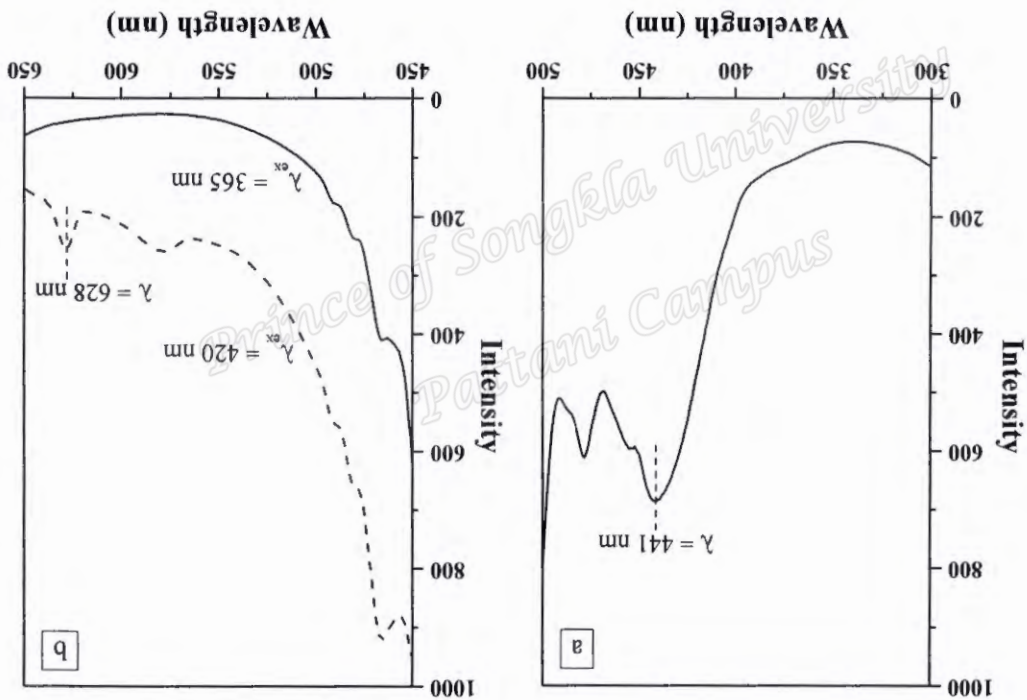


รูปที่ 4.80 สเปกตรัมของการกระตุ้นของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก โดยแปรปริมาณสารไทเทเนียมไดออกไซด์ ก่อนบ่มแรง (a) และหลังบ่มแรง (b)

จากรูปที่ 4.80 สเปกตรัมของการกระตุ้นของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอร์ โดยแปรปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ ก่อนบ่มแรง (a) และหลังบ่มแรง (b) พบว่า 1) การผสมสาร TiO_2 ลงในยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกทำให้ค่าความยาวคลื่นที่กระตุ้นยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกเปลี่ยนไปจาก 370-375 nm (ไม่ใส่สาร TiO_2) ไปอยู่ที่ 418-420 nm (เมื่อผสมสาร TiO_2) เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์มีสมบัติเป็นโฟโตคะตะไลซิสซึ่งสามารถดูดกลืนแสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ตและแสงช่วงที่มองเห็นได้ (พรนภา, 2548; ชวิศร์, 2549; Yoon and Kim, 2010) จึงทำให้แสงที่จะเข้าไปกระตุ้นเบ้ไปทางความยาวคลื่นที่กระตุ้นสาร TiO_2 (441 nm) สามารถดูความยาวคลื่นดูดกลืนและปลดปล่อยพลังงานของสาร TiO_2 ได้ที่รูป 4.81 2) การผสม TiO_2 ในปริมาณ

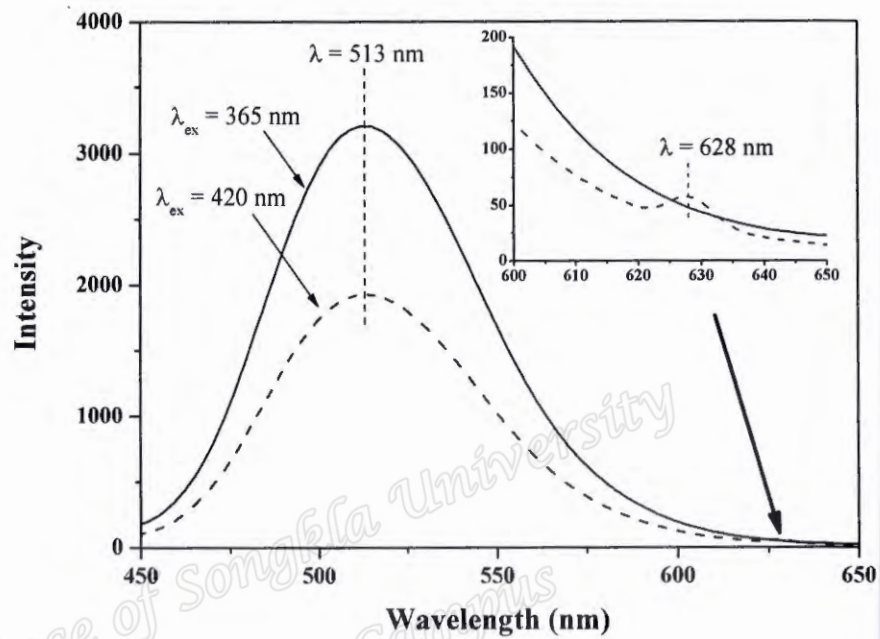
รูปที่ 4.81 (a) สเปกตรัมของการกระจายแสงที่กระจายโดยอนุภาคของสารในฟิล์มบางที่เตรียมโดยเทคนิคการเคลือบแบบหมุนที่ความเร็ว 500 rpm ขณะทำการกระจายแสงที่ความยาวคลื่น 420 nm (ซึ่งเป็นความยาวคลื่นที่สเปกตรัมการกระจายแสงโดยอนุภาคของสารในฟิล์มบางที่เตรียมโดยเทคนิคการเคลือบแบบหมุนที่ความเร็ว 365 rpm ไม่พบการกระจายแสงที่ความยาวคลื่น 420 nm) การกระจายแสงที่ความยาวคลื่น 420 nm แสดงให้เห็นว่า การกระจายแสงที่ความยาวคลื่น 420 nm นั้นเกิดจากการกระจายแสงโดยอนุภาคของสารในฟิล์มบางที่เตรียมโดยเทคนิคการเคลือบแบบหมุนที่ความเร็ว 515 rpm โดยที่สเปกตรัมของการกระจายแสงที่ความยาวคลื่น 420 nm นั้นแสดงให้เห็นว่า สารในฟิล์มบาง

รูปที่ 4.81 สเปกตรัมของการกระจายแสงที่กระจายโดยอนุภาคของสารในฟิล์มบางที่เตรียมโดยเทคนิคการเคลือบแบบหมุนที่ความเร็ว 515 rpm (a) และการกระจายแสงที่กระจายโดยอนุภาคของสารในฟิล์มบางที่เตรียมโดยเทคนิคการเคลือบแบบหมุนที่ความเร็ว 365 rpm (b)



มากจะพบการกระจายแสงที่ความยาวคลื่นที่ต่ำกว่าของอนุภาคของสารในฟิล์มบางที่เตรียมโดยเทคนิคการเคลือบแบบหมุนที่ความเร็ว 515 rpm เนื่องจากอนุภาคของสารในฟิล์มบางที่เตรียมโดยเทคนิคการเคลือบแบบหมุนที่ความเร็ว 515 rpm นั้นมีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าอนุภาคของสารในฟิล์มบางที่เตรียมโดยเทคนิคการเคลือบแบบหมุนที่ความเร็ว 365 rpm (เนื่องจากอนุภาคของสารในฟิล์มบางที่เตรียมโดยเทคนิคการเคลือบแบบหมุนที่ความเร็ว 365 rpm นั้นมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่าอนุภาคของสารในฟิล์มบางที่เตรียมโดยเทคนิคการเคลือบแบบหมุนที่ความเร็ว 515 rpm) นอกจากนี้ยังพบการกระจายแสงที่ความยาวคลื่นที่ต่ำกว่าของอนุภาคของสารในฟิล์มบางที่เตรียมโดยเทคนิคการเคลือบแบบหมุนที่ความเร็ว 515 rpm เนื่องจากอนุภาคของสารในฟิล์มบางที่เตรียมโดยเทคนิคการเคลือบแบบหมุนที่ความเร็ว 515 rpm นั้นมีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าอนุภาคของสารในฟิล์มบางที่เตรียมโดยเทคนิคการเคลือบแบบหมุนที่ความเร็ว 365 rpm

ความยาวคลื่นที่สามารถกระตุ้นอย่างธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ดี) จะให้การปลดปล่อยแสงได้ดีกว่าการกระตุ้นด้วยความยาวคลื่น 365 nm และนอกจากนี้ยังปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 628 nm ซึ่งตรงกับสารฟอสฟอร์เมื่อกระตุ้นด้วยความยาวคลื่น 420 nm (ดูได้จากผลการทดลองในรูปที่ 4.82)

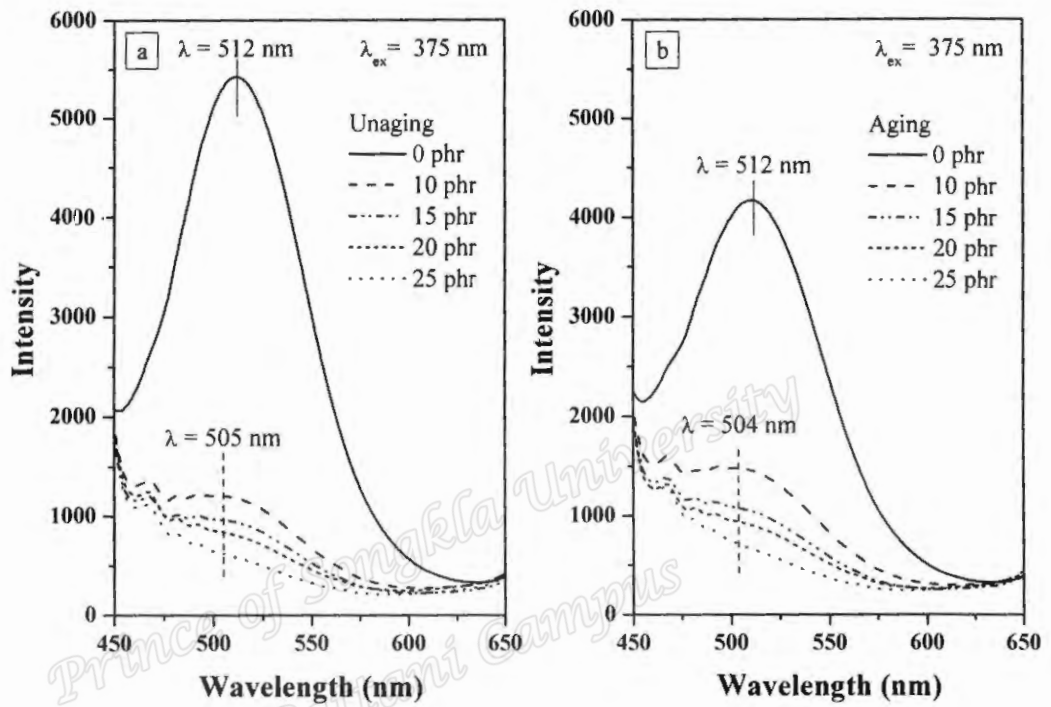


รูปที่ 4.82 สเปกตรัมของการปลดปล่อยพลังงานของสารฟอสฟอร์ที่กระตุ้นด้วยพลังงานที่ความยาวคลื่น 365 และ 420 nm

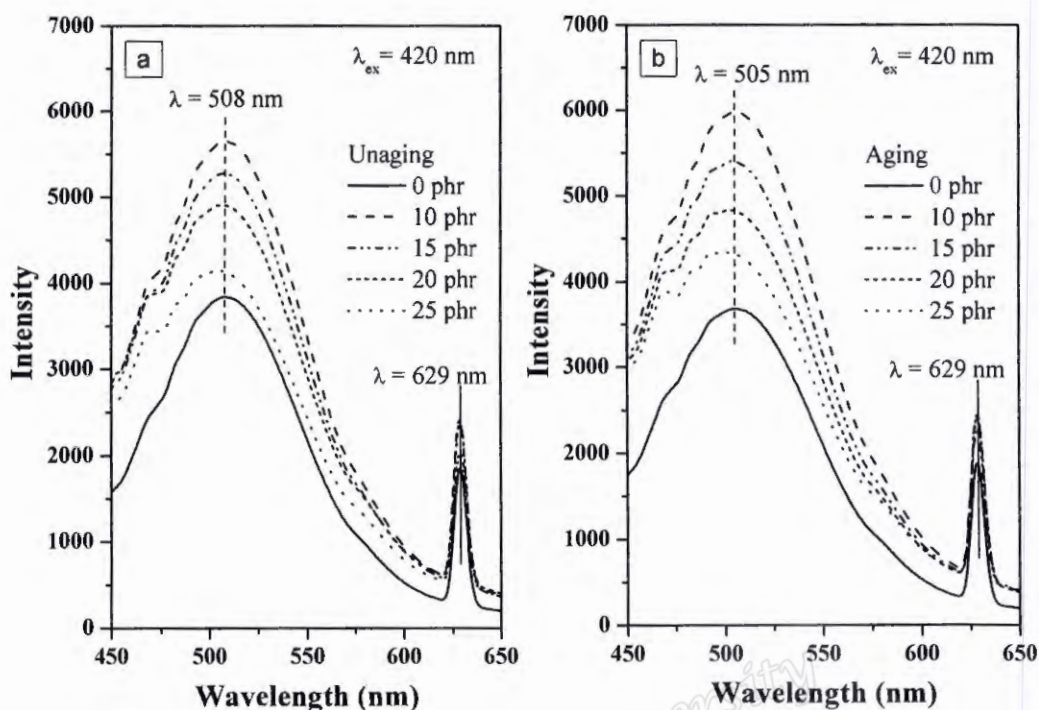
รูปที่ 4.82 สเปกตรัมของการปลดปล่อยพลังงานของฟอสฟอร์ที่กระตุ้นด้วยพลังงานที่ความยาวคลื่น 365 และ 420 nm ซึ่งได้ทำการวิเคราะห์เพื่อหาสาเหตุของการปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 629 nm ของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมและไม่ผสมสาร TiO_2 เมื่อกระตุ้นด้วยพลังงานที่ความยาวคลื่น 420 nm จากการทดลองพบว่า การกระตุ้นด้วยพลังงานที่ความยาวคลื่น 365 nm ซึ่งเป็นความยาวคลื่นที่สามารถกระตุ้นสารฟอสฟอร์ได้ดีที่สุดจะพบพีคเพียง 1 ตำแหน่งเท่านั้นที่ 513 nm ขณะที่การกระตุ้นด้วยความยาวคลื่น 420 nm สารฟอสฟอร์จะปรากฏพีค 2 ตำแหน่งด้วยกันคือที่ 513 nm และ 628 nm ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าพีคดังกล่าวเกิดจากสมบัติของสารฟอสฟอร์เป็นหลัก

4.6.4.2. ความยาวคลื่นที่ปลดปล่อย

การทดสอบความยาวคลื่นที่ปลดปล่อยของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอร์ โดยแปรปริมาณสารไทเทเนียมไดออกไซด์ ก่อนและหลังบ่มเร่ง ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.83 และ 4.84



รูปที่ 4.83 สเปกตรัมของการปลดปล่อยพลังงานของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกผสมสารฟอสฟอร์ที่แปรปริมาณสารไทเทเนียมไดออกไซด์ ก่อนบ่มเร่ง (a) และหลังบ่มเร่ง (b) โดยกระตุ้นด้วยความยาวคลื่น 375 nm



รูปที่ 4.84 สเปกตรัมของการปลดปล่อยพลังงานของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกผสมสารฟอสฟอรัสที่แปรปริมาณสารไทเทเนียมไดออกไซด์ ก่อนบ่มรัง (a) และหลังบ่มรัง (b) โดยกระตุ้นด้วยความยาวคลื่น 420 nm

จากรูปที่ 4.83 สเปกตรัมของการปลดปล่อยพลังงานของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรปริมาณสารไทเทเนียมไดออกไซด์ ก่อนบ่มรัง (a) และหลังบ่มรัง (b) ที่กระตุ้นด้วยความยาวคลื่น 375 nm (เป็นความยาวคลื่นที่เหมาะสมที่สุดในการกระตุ้นยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ไม่ผสมสาร TiO_2) พบว่า

1) ความเข้มแสงที่ปลดปล่อยจะลดลงตามปริมาณสาร TiO_2 ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจาก TiO_2 จะดูดกลืนแสงที่เข้าไปกระตุ้นและแสงที่ปลดปล่อยไว้กับตัวเองได้ดี

2) ความยาวคลื่นที่ปลดปล่อยของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกมีค่าลดลงจากเดิม 512 nm (ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกไม่ผสมสาร TiO_2) เป็น 504-505 nm (ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกผสมสาร TiO_2) เกิดจากอิทธิพลของการปลดปล่อยแสงในขณะกระตุ้นของ TiO_2 ที่สามารถปลดปล่อยแสงได้ดีในขณะกระตุ้นที่ความยาวคลื่นต่ำกว่า 500 nm (ดังรูปที่ 4.81 (b))

และ 3) ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารไทเทเนียมไดออกไซด์เมื่อผ่านการบ่มรัง จะทำให้ความเข้มแสงที่ปลดปล่อยเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจาก TiO_2 เสื่อมสภาพขณะบ่มรัง ส่งผลให้ TiO_2

ดูดกลืนแสงที่เข้าไปกระตุ้นและปลดปล่อยของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกได้ลดลง ขณะที่ในกรณีที่ไม่ใส่สาร TiO_2 จะให้ความเข้มในการปลดปล่อยลดลงเนื่องจากการเสื่อมสภาพของเมทริกซ์

จากรูปที่ 4.84 สเปกตรัมของการปลดปล่อยพลังงานของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรปริมาณสารไทเทเนียมไดออกไซด์ ก่อนบ่มแรง (a) และหลังบ่มแรง (b) ที่กระตุ้นด้วยความยาวคลื่น 420 nm (เป็นความยาวคลื่นที่เหมาะสมที่สุดในการกระตุ้นยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกผสมสาร TiO_2) พบว่า

1) ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสม TiO_2 จะมีความเข้มแสงที่ปลดปล่อยเพิ่มขึ้น เนื่องจากการปลดปล่อยแสงที่ความยาวคลื่นประมาณ 500-515 nm จะได้รับจาก 2 อิทธิพลด้วยกัน คือ 1) อิทธิพลของการปลดปล่อยแสงของสารฟอสฟอรัสที่มีอยู่เดิม และ 2) อิทธิพลของการปลดปล่อยแสงของสาร TiO_2 ที่เติมเข้าไป เมื่อกระตุ้นยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่มีการผสมสารฟอสฟอรัสและ TiO_2 จะทำให้การปลดปล่อยแสงเสริมกัน นอกจากนี้ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสม TiO_2 ยังให้ความยาวคลื่นลดลงจากเดิม เกิดจากได้รับอิทธิพลของการปลดปล่อยแสงในขณะกระตุ้นของ TiO_2 ซึ่ง TiO_2 สามารถปลดปล่อยแสงได้ดีในขณะกระตุ้นที่ความยาวคลื่นต่ำกว่า 500 nm ดังรูปที่ 4.81 (b)

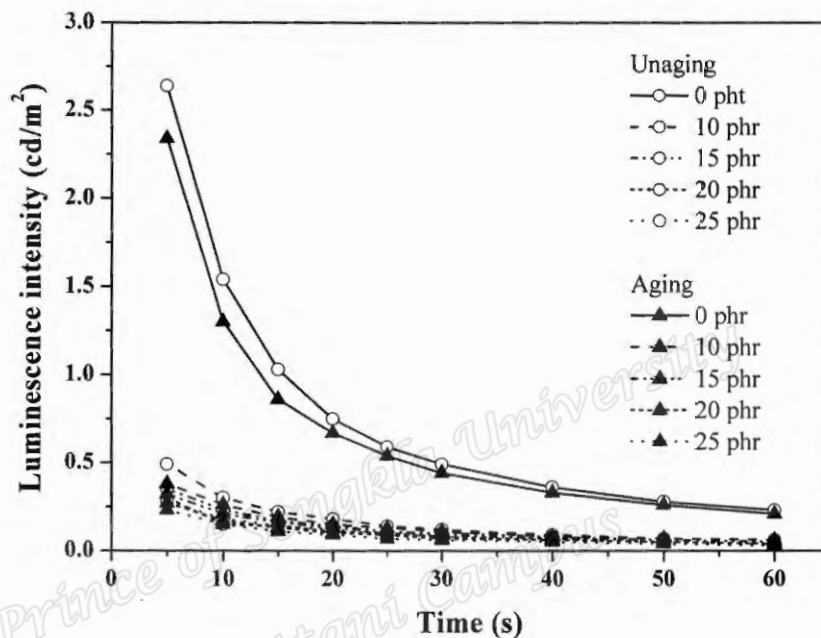
2) ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสม TiO_2 มากกว่า 10 phr (3.2 %wt) ทั้งก่อนและหลังบ่มแรงจะทำให้ความเข้มที่ปลดปล่อยของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกลดลง เนื่องจากแสงที่ปลดปล่อยถูกดูดกลืนกลับ (Reabsorption) ซึ่งคล้ายกับงานวิจัยของ Wong *et al.* (2006) ที่ได้เตรียมพอลิเมทิลเมทาคริเลตผสมสารฟอสฟอรัส เมื่อใช้สารฟอสฟอรัสมากกว่า 12.4 %vol จะทำให้การปลดปล่อยแสงของพอลิเมทิลเมทาคริเลตลดลง

3) ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการบ่มแรง จะให้ความเข้มแสงที่ปลดปล่อยเพิ่มขึ้น เนื่องจาก TiO_2 เกิดการเสื่อมสภาพทำให้ TiO_2 ดูดกลืนแสงที่สารฟอสฟอรัสปลดปล่อยน้อยลง

และ 4) การกระตุ้นยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ความยาวคลื่น 420 nm นอกจากจะปรากฏพีคที่ประมาณ 505-508 nm แล้ว ยังปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 629 nm เนื่องจากเป็นสมบัติของทั้งสารฟอสฟอรัสและ TiO_2 ที่ให้พีคปรากฏขึ้นได้เมื่อกระตุ้นด้วยความยาวคลื่น 420 nm โดยสามารถดูภาพประกอบได้ดังรูปที่ 4.81 และ 4.82 ซึ่งอิทธิพลส่วนใหญ่มาจากสารฟอสฟอรัส เนื่องจากยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัสโดยไม่ผสม TiO_2 ปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 629 nm ที่มีความเข้มสูงใกล้เคียงกับยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัสและผสม TiO_2

4.6.4.3. ระยะเวลาการคงอยู่ของแสงที่ปลดปล่อยหลังหยุดกระตุ้น

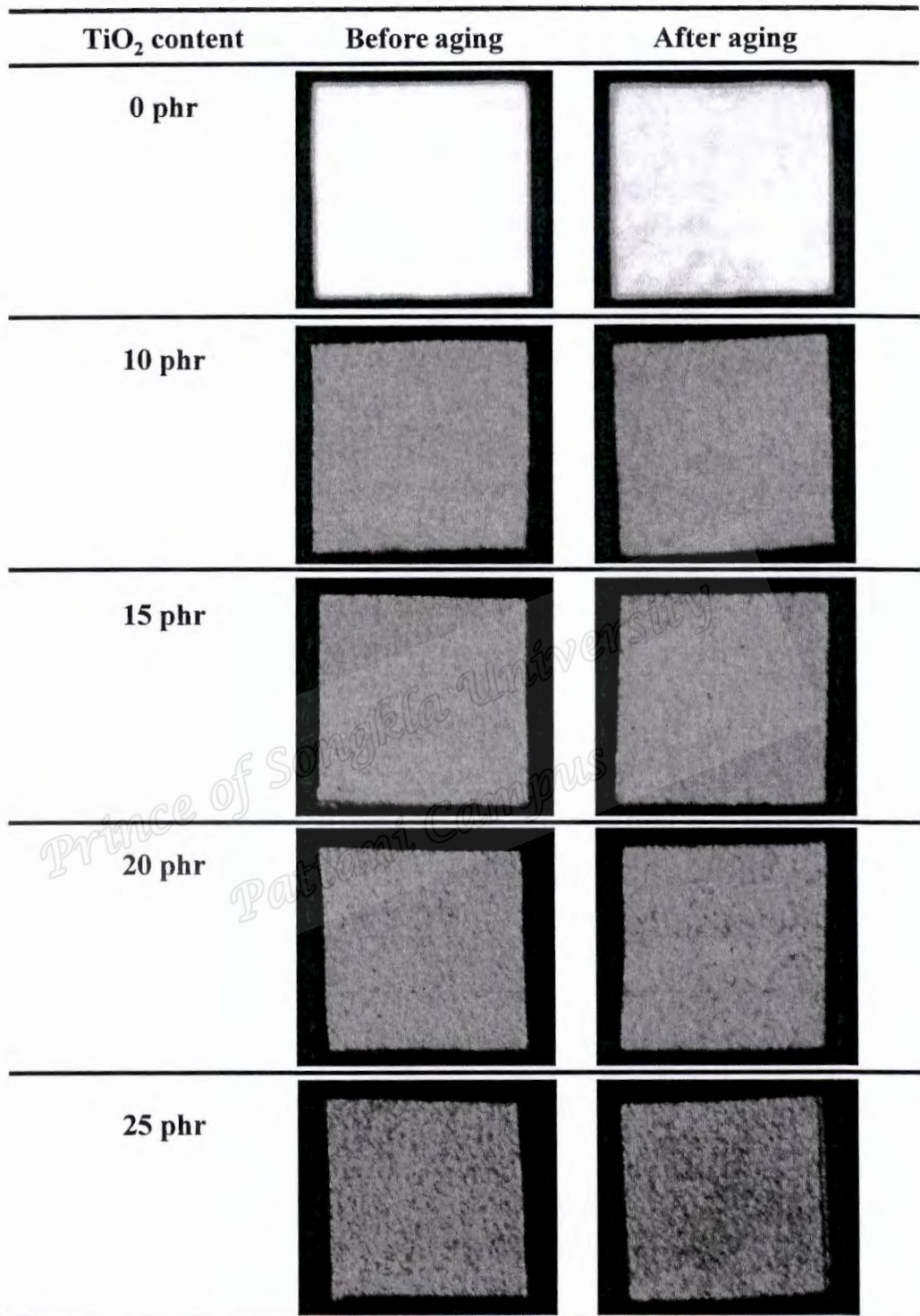
ระยะเวลาการคงอยู่ของแสงที่ปลดปล่อยหลังจากหยุดกระตุ้นของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอร์ โดยแปรปริมาณสารไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยใช้ความยาวคลื่นประมาณ 370 nm (ความยาวคลื่นช่วงที่เหมาะสมในการกระตุ้นสารฟอสฟอร์) ไปกระตุ้น ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.85



รูปที่ 4.85 ระยะเวลาการคงอยู่ของแสงที่ปลดปล่อยหลังหยุดกระตุ้นของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอร์ โดยแปรปริมาณสารไทเทเนียมไดออกไซด์ ก่อนและหลังบ่มเร่ง

จากรูปที่ 4.85 ระยะเวลาการคงอยู่ของแสงที่ปลดปล่อยหลังหยุดกระตุ้นของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอร์ โดยแปรปริมาณสารไทเทเนียมไดออกไซด์ ก่อนและหลังบ่มเร่ง พบว่า ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารไทเทเนียมไดออกไซด์ให้ความเข้มแสงลดลงอย่างมาก และปริมาณสารไทเทเนียมไดออกไซด์ในองค์ประกอบเบสจะแปรผกผันกับความเข้มแสงที่ปลดปล่อยทั้งก่อนและหลังบ่มเร่ง เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์จะดูดกลืนแสงที่เข้าไปกระตุ้นและแสงที่ปลดปล่อยของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก

สามารถดูตัวอย่างลักษณะการปลดปล่อยแสงหลังจากหยุดกระตุ้นของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่แปรปริมาณสารไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ดังรูปที่ 4.86



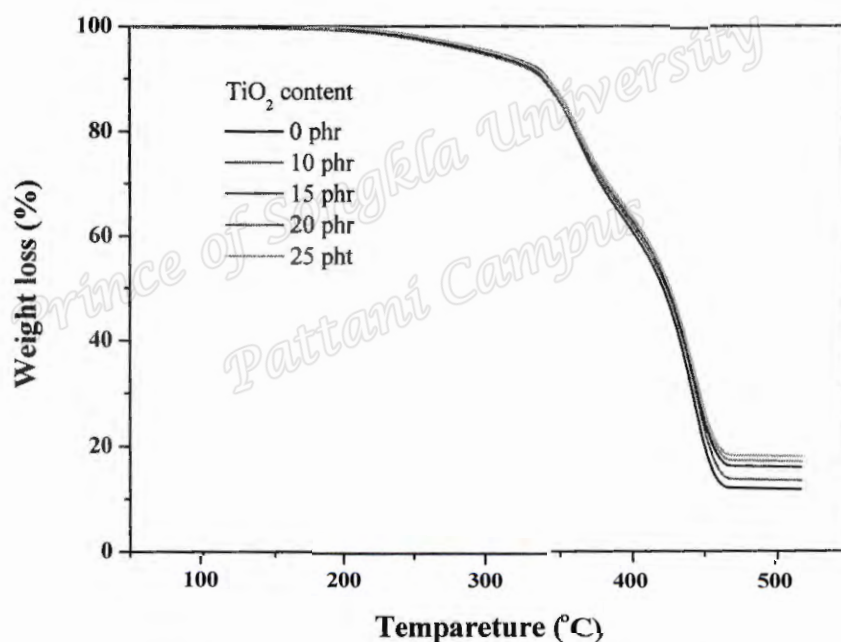
รูปที่ 4.86 ลักษณะการปลดปล่อยแสงหลังจากหยุดกระตุ้นของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรปริมาณสารไทเทเนียมไดออกไซด์ ก่อนและหลังบ่มเร่ง

จากรูปที่ 4.86 ลักษณะการปลดปล่อยแสงหลังจากหยุดกระตุ้นของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟออร์ โดยแปรปริมาณสารไทเทเนียมไดออกไซด์พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณสารไทเทเนียมไดออกไซด์จะทำให้ขึ้นทศสอบมีการปลดปล่อยแสงลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากการดูดกลืนแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ ภายหลังจากบ่มเร่งยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารไทเทเนียมไดออกไซด์ให้การปลดปล่อยแสงไม่แตกต่างกันกับก่อนบ่มเร่ง

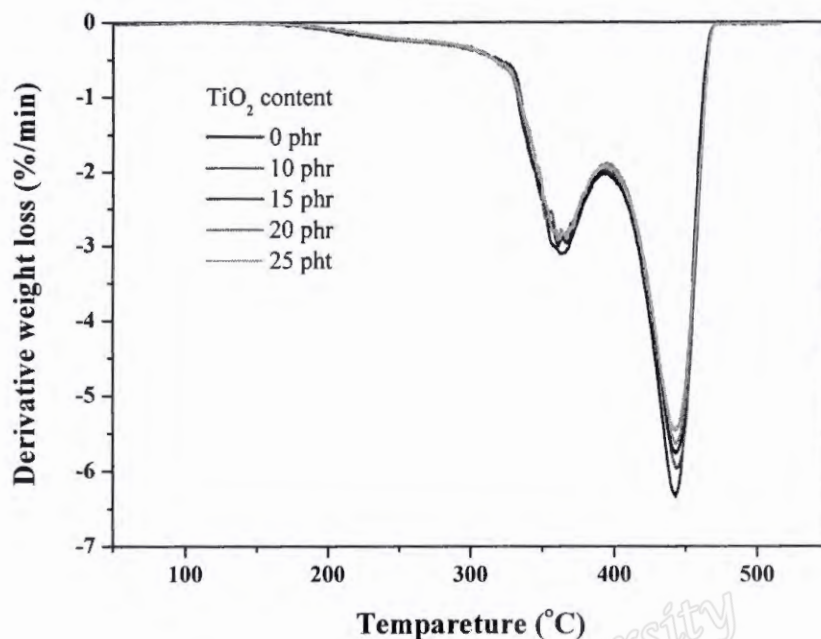
4.6.5. สมบัติเชิงความร้อน (Thermal properties)

4.6.5.1. ความเสถียรทางความร้อน

การวิเคราะห์หาอุณหภูมิการสลายตัวของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟออร์ โดยแปรปริมาณสารไทเทเนียมไดออกไซด์ ด้วยเทคนิค TGA ภายใต้อากาศไนโตรเจน โดยอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเท่ากับ $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.87 และ 4.88



รูปที่ 4.87 ค่าเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักภายใต้อุณหภูมิของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกผสมสารฟอสฟออร์ที่แปรปริมาณสารไทเทเนียมไดออกไซด์

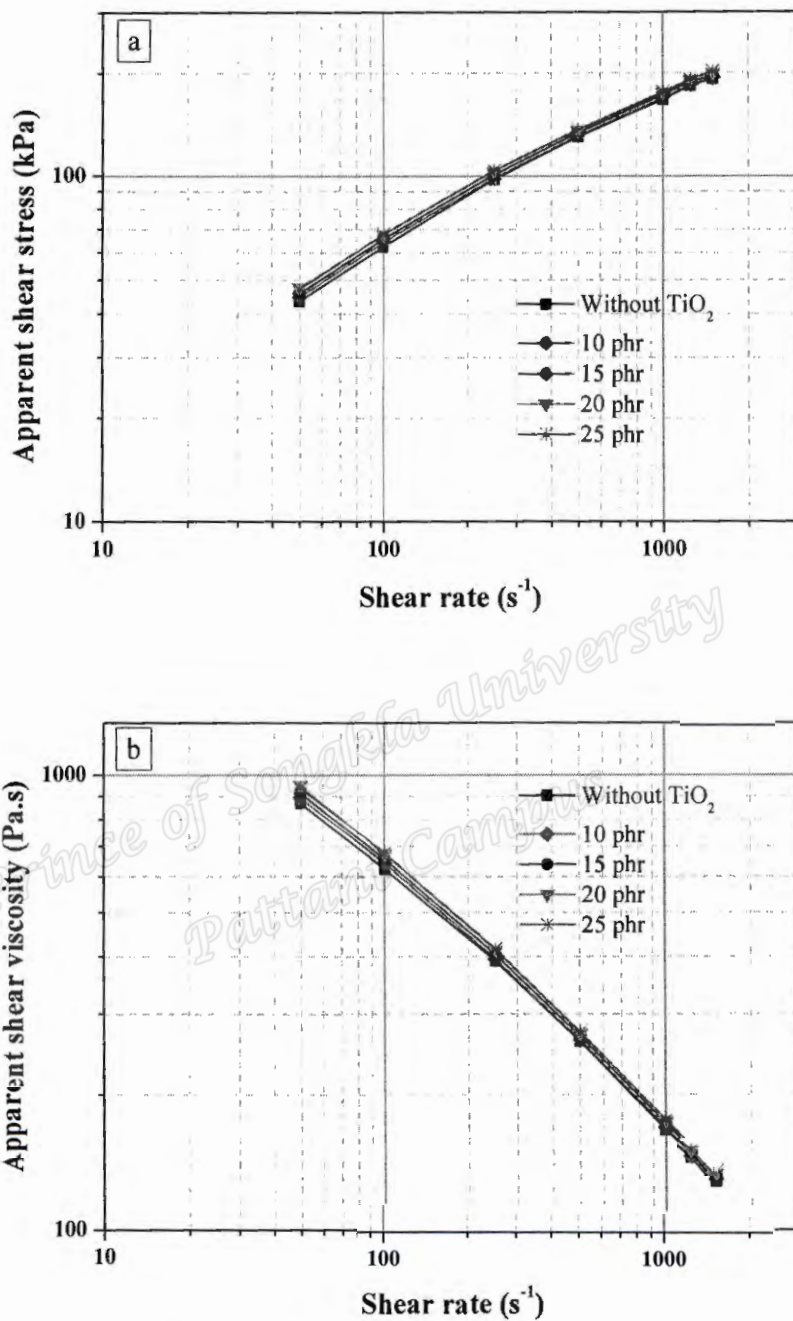


รูปที่ 4.88 อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหายภายใต้อุณหภูมิของยางธรรมชาติยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกผสมสารฟอสฟอรัสที่แปรปริมาณสารไทเทเนียมไดออกไซด์

จากรูปที่ 4.87 และ 4.88 พบว่าการสลายตัวของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกผสมสารฟอสฟอรัสจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบเบลนด์ โดยมีการสลายตัว 3 ช่วงด้วยกัน ช่วงแรกที่อุณหภูมิ 180-320°C ซึ่งเป็นการสลายตัวของสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เช่น น้ำมัน สารช่วยแปรรูป และสารโมเลกุลเล็กอื่นๆ ช่วงที่ 2 ที่อุณหภูมิประมาณ 320-395°C เป็นการสลายตัวของเฟสยาง และช่วงที่ 3 ที่อุณหภูมิประมาณ 395-455°C เป็นการสลายตัวของพลาสติก และเหลือองค์ประกอบที่ไม่สลายตัว ได้แก่ สารฟอสฟอรัสปริมาณประมาณ 12 %wt และ TiO_2 ตามปริมาณที่ผสม นอกจากนี้จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ TiO_2 จะไม่ส่งผลต่อการสลายตัวของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกเนื่องจาก TiO_2 มีปริมาณน้อยและขนาดอนุภาคเล็ก

4.6.6. สมบัติการไหล (Rheological properties)

การวิเคราะห์สมบัติการไหลของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรปริมาณสารไทเทเนียมไดออกไซด์ ด้วยเครื่อง Capillary rheometer ทดสอบที่อุณหภูมิ 200°C โดยมีอัตราการเฉือนเท่ากับ 50, 100, 250, 500, 1,000, 1,250 และ 1,500 s^{-1} ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.89



รูปที่ 4.89 ความสัมพันธ์ระหว่าง Apparent shear stress กับ Shear rate (a) และ Apparent shear viscosity กับ Shear rate (b) ของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกผสมสารฟอสฟอรั่มแปรปริมาณสารไทเทเนียมไดออกไซด์

จากรูปที่ 4.89 (a) และ (b) พบว่ายางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรปริมาณสารไทเทเนียมไดออกไซด์ แสดงพฤติกรรมแบบเชียร์ทินนิง (Shear-thinning behavior) โดยมีการเพิ่มขึ้นของความเค้นเฉือนปรากฏและการลดลงของความหนืดเฉือนปรากฏเมื่ออัตราการเฉือนเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาอัตราเฉือน ณ จุดใดจุดหนึ่งพบว่า ค่าความเค้นเฉือนปรากฏและความหนืดเฉือนปรากฏของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเพิ่มปริมาณสารไทเทเนียมไดออกไซด์ เนื่องจากสารไทเทเนียมไดออกไซด์ไปขัดขวางการไหลของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ เมื่อมีสารไทเทเนียมไดออกไซด์เพิ่มขึ้นก็จะทำให้การขัดขวางการไหลของสายโซ่โมเลกุลเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

4.6.7. สรุปผลการศึกษาอิทธิพลของปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อสมบัติของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส

การเตรียมยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัส โดยแปรปริมาณสารไทเทเนียมไดออกไซด์ ให้สมบัติของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารฟอสฟอรัสดังนี้คือ เมื่อเพิ่มปริมาณสารไทเทเนียมไดออกไซด์ทำให้ความเค้นเฉือนปรากฏและความหนืดเฉือนปรากฏเพิ่มขึ้น สมบัติเชิงกลหลังบ่มแรง การปลดปล่อยแสงทั้งก่อนและหลังบ่มแรง และการคงอยู่ของแสงหลังหยุดกระตุ้นลดลง แต่ไม่ส่งผลต่อความหนืดในขณะผสม สมบัติเชิงกล การผิดรูปถาวรแบบดึง ความแข็ง สันฐานวิทยา และอุณหภูมิการสลายตัวของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก