

## บทที่ 5 สรุปผลวิจัย และข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาโครงสร้างและสมบัติต่างๆ วัสดุผสมของยางธรรมชาติกับอนุภาคซิงค์ออกไซด์ รวมถึงการตรวจลักษณะของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ และการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่นำมาใช้ในการเตรียมวัสดุผสมของยางธรรมชาติ ซึ่งมีผลสรุปดังนี้

#### 5.1.1 การตรวจสอบกระบวนการเพิ่มประสิทธิภาพของอนุภาคซิงค์ออกไซด์

- จากการตรวจสอบการแขวนลอยของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่ทรีทเมนต์ด้วย 10 wt% SSS และ 5 wt% CTAB จะมีความเสถียร และการกระจายตัวของอนุภาคแขวนลอยในน้ำดีที่สุดใน

- จากค่า Zeta potential ( $\zeta$ ) จะเห็นว่า SSS และ CTAB มีความแตกต่างในการเปลี่ยนประจุที่ผิวของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ โดย SSS มีค่า  $\Delta\zeta \sim 20$  ผลต่อการเปลี่ยนแปลงประจุที่ผิวเป็นลบ ส่วน CTAB มีค่า  $\Delta\zeta \sim 60$  ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงประจุที่ผิวเป็นบวก เมื่อเปรียบเทียบการกระจายตัวและการแขวนลอยในสารละลายน้ำ SSS จะส่งผลต่อการกระจายตัวและการแขวนลอยของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ได้ดีกว่า CTAB เนื่องจากมีค่า  $\zeta$  เฉลี่ยสูงกว่า

- การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ ที่ผ่านกระบวนการเพิ่มประสิทธิภาพ ด้วย FT-IR spectra สำหรับอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่ทรีทเมนต์ด้วย SSS พบพิคการดูดกลืนที่ช่วง  $1018 \text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นช่วงการดูดกลืนที่เกิดจากกลุ่มพันธะของซิลิเกต (silicate species) ส่วนอนุภาค ซิงค์ออกไซด์ที่ทรีทเมนต์ด้วย CTAB พบพิคการดูดกลืนที่ช่วง 2922 และ  $2850 \text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นช่วงการดูดกลืนที่เกิดจากกลุ่มโซ่เมทิลลีน (methylene chains) ทำให้สรุปได้ว่า SSS และ CTAB มีการดูดซับบนอนุภาคซิงค์ออกไซด์ และสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการกระจายรวมทั้งการแขวนลอยตัวให้กับอนุภาคซิงค์ออกไซด์ในสารละลายน้ำได้

### 5.1.2 ศึกษาลักษณะวัสดุผสมของยางธรรมชาติกับอนุภาคซิงค์ออกไซด์

- การศึกษาลักษณะวัสดุผสมของยางธรรมชาติกับอนุภาคซิงค์ออกไซด์ว่าอนุภาคซิงค์ออกไซด์มีลักษณะการกระจายตัวในเนื้อยางธรรมชาติแตกต่างกันโดยเป็นผลมาจากการเปลี่ยนประจุที่ผิวของอนุภาค ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนยิ่งขึ้นเมื่อใช้เทคนิค BEI-SEM

- ลักษณะการรวมตัวของวัสดุผสมยางธรรมชาติกับ Tetrapod shaped ZnO Whisker หลังผ่านกระบวนการเพิ่มประสิทธิภาพแล้ว ในกรณีของการทรีทเมนต์ด้วย CTAB (NR-TT-CTAB) จะเห็นว่า T-ZnO ยึดเกาะกับเนื้อของยางธรรมชาติได้ดีมาก ดังเกตได้จากปลายเข็มที่ทะลุออกมาจากเนื้อวัสดุผสมซึ่งมุมผิวสัมผัส (contact angle) มีน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับกรทรีทเมนต์ด้วย SSS (NR-TT-SSS) จะเห็นว่า T-ZnO กับยางธรรมชาติยังมีมุมผิวสัมผัสที่ค่อนข้างมาก ซึ่งชี้ให้เห็นถึงการรวมตัวยังไม่ค่อยดีมากนัก และอาจเป็นผลเนื่องมาจากการมีประจุที่ผิวของอนุภาคสูงนั่นเอง

### 5.1.3 สมบัติทางกลวัสดุผสมของยางธรรมชาติกับอนุภาคซิงค์ออกไซด์

ตาราง 5.1 ตารางสรุปสมบัติทางกลวัสดุผสมของยางธรรมชาติกับอนุภาคซิงค์ออกไซด์

mixtures	Tensile stress at % Modulus (Mpa)					Tensile Strength at Yield (Mpa)	Hardness (shore A)
	20%	50%	100%	200%	300%		
NR	2.00	2.70	3.00	3.00	3.30	3.25	48.09
NR+UP	2.00	2.30	2.70	2.70	3.70	2.50	39.82
NR+UT	2.00	2.70	3.00	3.00	4.00	2.88	40.82
NR+TP+1.0CTAB+3DSi69	2.70	3.70	4.00	4.00	5.00	3.76	41.74
NR+TT+1.0CTAB+3DSi69	3.00	3.70	4.00	4.30	5.30	3.82	42.14
NR+TP+10SSS+3DSi69	1.70	2.70	3.00	3.00	4.80	2.85	46.82
NR+TT+10SSS+3DSi69	3.00	4.00	4.00	4.30	6.00	4.06	48.71

### 5.1.4 สมบัติทางความร้อนวัสดุผสมของยางธรรมชาติกับอนุภาคซิงค์ออกไซด์

- การวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักของวัสดุผสมของยางธรรมชาติเมื่อได้รับความร้อน (Thermogravimetric Analysis: TGA) จากช่วงอุณหภูมิ 240-380°C วัสดุผสมยางธรรมชาติกับอนุภาค Tetrapod shaped ZnO Whisker ที่ผ่านการเพิ่มประสิทธิภาพด้วย CTAB (NR-TT-CTAB) และ SSS (NR-TT-SSS) พบการสูญเสียน้ำหนักน้อยกว่ายางธรรมชาติ (NR) 10.473% และ 5.598% ตามลำดับ จากข้อมูลนี้ทำให้ทราบว่าวัสดุผสมยางธรรมชาติมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีขึ้น

จากการศึกษาอิทธิพลของกระบวนการเพิ่มประสิทธิภาพอนุภาคซิงค์ออกไซด์ด้วย SSS และ CTAB พบว่าช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกลของวัสดุผสมยางธรรมชาติได้ โดย CTAB จะช่วยให้อนุภาคตัวเติมสามารถกระจายตัวในเนื้อวัสดุผสมยางธรรมชาติได้ดีขึ้น ในกรณีของ SSS สามารถช่วยลดการจับตัวกันเป็นกลุ่ม (agglomeration) ของอนุภาคตัวเติมได้ดีกว่า CTAB แต่อนุภาคจะแยกตัวออกเป็นชั้นในเนื้อวัสดุผสม นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติเด่นช่วยให้วัสดุผสมยางธรรมชาติมีความแข็ง (hardness) ดีขึ้น

ซึ่งจากข้อมูลพบว่าการเกิดจากการเปลี่ยนประจุที่ผิวของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ จากปัจจัยนี้ทำให้การยึดติดกันระหว่างโครงข่ายยางธรรมชาติกับอนุภาคตัวเติมเปลี่ยนแปลง เนื่องจากอนุภาคตัวเติมกับยางธรรมชาติยึดเหนี่ยวกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ซึ่งเป็นแรงอย่างอ่อน เมื่อเติมสารคู่ควบไซเลน SI-69 ที่เหมาะสมซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมระหว่างโมเลกุลของอนุภาคตัวเติมกับยางธรรมชาติ (filler-rubber) ด้วยพันธะทางเคมีที่แข็งแรงขึ้น ทำให้สมบัติเชิงกลของวัสดุผสมยางธรรมชาติโดยรวมดีขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของกระบวนการเพิ่มประสิทธิภาพอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่ใช้ในการผลิตยางธรรมชาติทั่วไป และอนุภาคซิงค์ออกไซด์เตตราพอด ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุผสมยางธรรมชาติพบว่า วัสดุผสมยางธรรมชาติกับอนุภาคซิงค์ออกไซด์เตตราพอดโดยรวมมีสมบัติเชิงกลดีกว่าวัสดุผสมยางธรรมชาติกับอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่ใช้ในการผลิตยางธรรมชาติทั่วไป

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การอบชิ้นงานควรอบในเตาอบที่มีอุณหภูมิเฉลี่ยคงที่และสม่ำเสมอทั่วชิ้นงานทดสอบ
2. ในการนำชิ้นงานไปทดสอบควรทดสอบทันทีหลังจากเตรียมชิ้นงานเสร็จ เนื่องจากหากปล่อยทิ้งไว้นานปริมาณน้ำในวัสดุผสมยางธรรมชาติอาจไม่เท่ากันซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อสมบัติต่างๆ ได้
3. การทดสอบ TGA ควรควบคุมขนาด และมวลของชิ้นงานทดสอบให้ใกล้เคียงกันมากที่สุด
4. การเตรียมความเข้มข้นของสารแขวนลอยเพื่อนำไปทดสอบ Zeta Potential ควรโปร่งแสงเนื่องจากการทดสอบต้องอาศัยหลักการวัดการอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของอนุภาคเมื่อทำให้อยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าโดยใช้ Laser Doppler Velocimetry (LDV)
5. การศึกษาการเตรียมวัสดุผสมยางธรรมชาติเสริมแรงด้วยอนุภาคซิงค์ออกไซด์ควรหาแนวทางในการทำให้วัสดุผสมเซทตัวก่อนที่จะเกิดการตกตะกอนของอนุภาคเสริมแรง
6. ในการเตรียมสารแขวนลอยอนุภาคซิงค์ออกไซด์อาจเตรียมโดยใช้สารละลายตัวอื่นที่มีความเข้ากันกับยางธรรมชาติได้ดีเช่น โทลูอิน เป็นต้น