บทที่ 5
สรุปผล

5.1 สรุปผลการทดลอง

การศึกษาผลของปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ต่อลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางคอมโพสิต โดยทำการศึกษาระยะเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป (scorch time) และระยะเวลาในการวัลคาไนซ์ (cure time) พบว่า ปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ไม่มีผลต่อลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางคอมโพสิต

การศึกษาสมบัติเชิงกลของยางคอมโพสิต ในกรณีผลของปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ต่อสมบัติเชิงกล โดยใช้เถ้าลอยลิกไนต์ที่รับมาในการศึกษาพบว่า ความแข็งแรงดึง ระยะยืดเมื่อขาด ความต้านทานต่อการฉีกขาด มอดุลัส และความต้านทานต่อการสึกหรอมีค่าลดลงเมื่อปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์เพิ่มขึ้น แต่ความแข็งของยางคอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากพันธะระหว่างยางและเถ้าลอยลิกไนต์มีความแข็งแรงต่ำ นอกจากนี้การเติมเถ้าลอยลิกไนต์ลงไปในปริมาณมากๆ อาจจะทำให้เกิดการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอของเถ้าลอยลิกไนต์ และทำให้ความต่อเนื่องของเฟสยางลดลง สมบัติเชิงกลจึงมีค่าลดลง การศึกษาผลของขนาดอนุภาคเถ้าลอยลิกไนต์ต่อสมบัติเชิงกล พบว่า เมื่อเถ้าลอยลิกไนต์มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเล็กกว่า 5 ไมครอนจะทำให้ยางคอมโพสิตมีความแข็งแรงดึง และความต้านทานต่อการฉีกขาดสูงกว่ายางคอมโพสิตที่เติมด้วยเถ้าลอยลิกไนต์ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยตั้งแต่ 5 ไมครอนขึ้นไป มอดุลัสของยางคอมโพสิตที่เติมด้วยเถ้าลอยลิกไนต์ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเล็กกว่า 5 ไมครอน จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์เพิ่มขึ้น แต่ยางคอมโพสิตที่เติมด้วยเถ้าลอยลิกไนต์ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยตั้งแต่ 5 ไมครอนขึ้นไป มอดุลัสจะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์เพิ่มขึ้น ขณะที่ขนาดอนุภาคเถ้าลอยลิกไนต์ไม่ค่อยมีผลต่อความแข็ง ยางคอมโพสิตจะมีความต้านทานต่อการสึกหรอสูงสุดเมื่อเติมด้วยเถ้าลอยลิกไนต์ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 5 ไมครอนลงไป 10 phr

การเติมสารคู่ควบไซเลนลงไปในยางคอมโพสิต จะช่วยปรับปรุงอันตรกิริยาระหว่างเถ้าลอยลิกไนต์และยาง จึงทำให้สมบัติเชิงกลของยางคอมโพสิต โดยเฉพาะความแข็งแรงดึง มอดุลัส และความต้านทานต่อการฉีกขาดมีค่าสูงขึ้น แต่ระยะยืดเมื่อขาดมีค่าลดลง เนื่องจากยางคอมโพสิตจะมีความแข็งเกร็งมากขึ้น ยางคอมโพสิตจึงขาดที่ระยะยืดน้อยลง ขณะที่ความแข็งและความต้านทานต่อการสึกหรอของยางคอมโพสิตที่เติมสารคู่ควบไซเลนจะมีค่าไม่ค่อยแตกต่าง เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่เติมสารคู่ควบไซเลน

การศึกษาสมบัติเชิงพลวัตของยางคอมโพสิต ในกรณีผลของปริมาณและขนาดอนุภาคเถ้าลอยลิกไนต์พบว่า มอดุลัสสะสมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์เพิ่มขึ้น ในกรณีที่เติมเถ้าลอยลิกไนต์ลงไป 10 phr ค่ามอดุลัสสะสมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเถ้าลอยลิกไนต์มีขนาดอนุภาคเล็กลง จนกระทั่งมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 10 ไมครอน ค่ามอดุลัสสะสมจะมีค่าสูงสุด หลังจากนั้นเมื่ออนุภาคเถ้าลอยลิกไนต์มีขนาดเล็กลงไปอีกค่ามอดุลัสสะสมจะมีค่าลดลง ค่าตัวประกอบของการสูญเสียสูงสุด (tan δ_{max}) มีค่าลดลงเมื่อปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์เพิ่มขึ้น และจะมีค่าลดลงเมื่ออนุภาคเถ้าลอยลิกไนต์มีขนาดเล็กลงด้วย การเติมเถ้าลอยลิกไนต์ลงไปในยางคอมโพสิตจะเป็นการเพิ่มโครงสร้างสารตัวเติม (filler network) ซึ่งจะไปกีดขวางการเคลื่อนตัวของโมเลกุลยางในขณะที่ยางคอมโพสิตเกิดการผิดรูปเชิงพลวัต จึงทำให้ค่ามอดุลัสสะสมมีค่าสูงขึ้น และค่าตัวประกอบของการสูญเสียสูงสุดมีค่าลดลง นอกจากนี้อุณหภูมิสภาพแก้วยังมีค่าสูงขึ้น ทำให้สามารถใช้งานยางคอมโพสิตในอุณหภูมิที่สูงขึ้นได้ ส่วนผลของสารคู่ควบไซเลนต่อสมบัติเชิงพลวัตของยางคอมโพสิตพบว่า การเติมสารคู่ควบไซเลนลงไปในยางคอมโพสิตช่วยให้มอดุลัสสะสมมีค่าเพิ่มขึ้น และทำให้ค่าตัวประกอบของการสูญเสียสูงสุดมีค่าลดลง

เมื่อนำยางคอมโพสิตที่เติมด้วยเถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดมาก (ขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 2 ไมครอน) 10 phr ซึ่งเป็นยางคอมโพสิตที่มีสมบัติเชิงกลในภาพรวมเด่น เมื่อเทียบกับยางคอมโพสิตสูตรอื่น มาเปรียบเทียบสมบัติกับยางคอมโพสิตที่เติมด้วยเขม่าดำ 30 phr พบว่า ระยะยืดเมื่อขาดของยางคอมโพสิตที่เติมเถ้าลอยลิกไนต์มีค่ามากกว่ายางคอมโพสิตที่เติมด้วยเขม่าดำ แต่ความแข็งแรงดึง มอดุลัส ความต้านทานต่อการฉีกขาด ความแข็ง และความต้านทานต่อการสึกหรอมีค่าน้อยกว่า เนื่องจากเขม่าดำมีขนาดอนุภาคปฐมภูมิที่เล็กกว่า จึงมีพื้นที่ผิวในการสร้างพันธะกับโมเลกุลของยางมากกว่า นอกจากนี้บริเวณผิวของเขม่าดำจะมีหมู่ฟังก์ชันเคมีต่างๆ เช่น คาร์บอกซีล (carboxyl) ไฮดรอกซีล (hydroxyl) และฟีนอลิก (phenolic) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีกับโมเลกุลของยางได้ จึงทำให้สมบัติเชิงกลของยางคอมโพสิตที่เติมเขม่าดำมีค่าสูงกว่ายางคอมโพสิตที่เติมเถ้าลอยลิกไนต์ นอกจากนี้มอดุลัสสะสมของยางคอมโพสิตที่เติมเขม่าดำมีค่าสูงกว่ามอดุลัสสะสมของยางคอมโพสิตที่เติมเถ้าลอยลิกไนต์ ทำให้ค่าตัวประกอบของการสูญเสียสูงสุดมีค่าต่ำกว่ายางคอมโพสิตที่เติมเถ้าลอยลิกไนต์

การศึกษาการกระจายตัวของเถ้าลอยลิกไนต์ในเนื้อยาง ในกรณีของการเตรียมยางคอมโพสิตจากน้ำยางข้นเมื่อเทียบกับกรณีของยางแท่งพบว่า การกระจายตัวของเถ้าลอยลิกไนต์กระจายตัวในเนื้อยางได้อย่างสม่ำเสมอเหมือนกัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

การศึกษาสมบัติของยางธรรมชาติเติมด้วยเถ้าลอยลิกไนต์ มีข้อเสนอแนะและควรปรับปรุงดังนี้

1) ในงานวิจัยครั้งนี้ใช้วิธีการกรองแยกด้วยตะแกรงที่ความละเอียดสูง (400 เมช) เพื่อให้ได้เถ้าลอยลิกไนต์ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่แตกต่างกัน เนื่องจากเถ้าลอยลิกไนต์จะเกาะกันเป็นกลุ่ม ทำให้อนุภาคเถ้าลอยลิกไนต์ผ่านช่องของตะแกรงยากขึ้น นอกจากนี้ยังเกิดการอุดตันในช่องของตะแกรง จึงต้องทำความสะอาดตะแกรงบ่อยมาก อาจจะใช้เครื่องแยกขนาดด้วยลม (air classifier) เพื่อให้สามารถแยกขนาดเถ้าลอยลิกไนต์ได้ง่ายขึ้น

2) ควรมีการศึกษาปริมาณการเชื่องขวาง (crosslink density) และปริมาณของยางบาวด์ (bound rubber) ของยางคอมโพสิต เพื่อจะได้นำมาประกอบการอธิบายผลของการเสริมแรงของสารตัวเติมให้มีความชัดเจนยิ่งขึ้น

3) ควรมีการศึกษาสมบัติหลังการบ่มเร่ง (ageing properties) ซึ่งจะทำให้ทราบว่าเมื่อยางคอมโพสิตมีอายุหรือเกิดการเสื่อมสภาพแล้ว สมบัติจะมีการเปลี่ยนไปอย่างไร เพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับการเลือกใช้ให้เหมาะกับลักษณะการใช้งานของผลิตภัณฑ์

4) ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการใช้เถ้าลอยลิกไนต์เป็นสารตัวเติมผสมระหว่างเถ้าลอยลิกไนต์กับเขม่าดำ เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เถ้าลอยลิกไนต์ทดแทนเขม่าดำได้บางส่วน และมีสมบัติไม่แตกต่างจากการใช้เขม่าดำอย่างเดียวมากนัก

ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติใกล้เคียงกับสมบัติของยางคอมโพสิตที่เติมเถ้าลอยลิกไนต์แสดงอยู่ในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติใกล้เคียงกับยางคอมโพสิตที่เติมเถ้าลอยลิกไนต์

สมบัติ	ยางคอมโพสิตที่เติมเถ้าลอยลิกไนต์ที่รับมา 10 phr	ยางคอมโพสิตที่เติมเถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดมาก 10 phr	ตัวอย่างผลิตภัณฑ์*	
			สายพานลำเลียง (conveyor belts)	ท่อยาง (rubber hose)
ความแข็งแรงดึง (MPa)	18.7	25.0	18.0	23
ระยะยืดเมื่อขาด (%)	843	850	680	740
มอดุลัสที่ระยะยืด 300% (MPa)	0.78	0.94	0.86	0.80
ความแข็ง (Shore A)	44.2	42.9	40	42

*ที่มา: Maurice Morton (1987)