

บทที่ 4

ผลการทดลอง

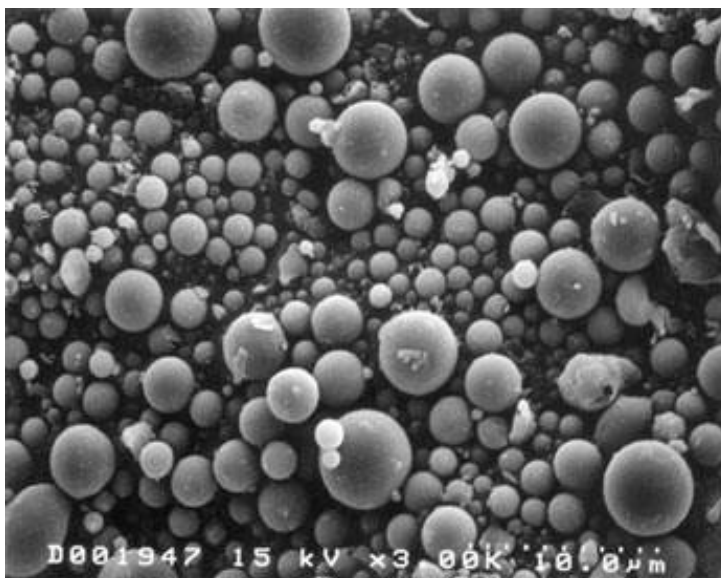
4.1 การเตรียมเถ้าลอยลิกไนต์

งานวิจัยนี้มีการศึกษาผลของขนาดอนุภาคเถ้าลอยลิกไนต์ที่มีต่อสมบัติเชิงกลและเชิงพลวัตของยางคอมโพสิต ดังนั้นจึงต้องมีการเตรียมเถ้าลอยลิกไนต์เพื่อให้มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยต่างกัน ก่อนทำการวิจัยได้นำเถ้าลอยลิกไนต์ไปทดสอบหาองค์ประกอบด้วยเครื่อง X-ray Fluorescence Spectrometer (XRF) ได้ผลดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของเถ้าลอยลิกไนต์

สารประกอบ	ความเข้มข้น (% by weight)	สารประกอบ	ความเข้มข้น (% by weight)
Na ₂ O	1.67	K ₂ O	5.38
MgO	3.60	CaO	17.21
Al ₂ O ₃	13.96	TiO ₂	0.71
SiO ₂	24.72	Fe ₂ O ₃	29.14
SO ₃	3.51	SrO	0.08

เถ้าลอยลิกไนต์ที่รับมา (AF) จะมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 150 μm มีรูปทรงดังแสดงในรูปที่ 4.1 เถ้าลอยลิกไนต์ส่วนหนึ่งจะถูกนำไปผ่านกระบวนการเตรียมต่างๆ กันจนมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยต่างกัน 3 ขนาดคือ เถ้าลอยลิกไนต์หยาบ (large size fly ash, LF) เถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดปานกลาง (medium size fly ash, MF) และเถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดมาก (small size fly ash, SF) รวมกับเถ้าลอยลิกไนต์ที่รับมา (as-received fly ash, AF) เป็นทั้งหมด 4 ขนาด เมื่อนำเถ้าลอยลิกไนต์ทั้ง 4 ขนาดมาหาขนาดอนุภาคเฉลี่ยด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาค (Laser Particle Size Analyzer) จะได้ผลดังตารางที่ 4.2 ซึ่งขนาดอนุภาคเฉลี่ยของเถ้าลอยลิกไนต์หยาบ เถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดปานกลาง และเถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดมากที่วัดได้มีขนาดเล็กกว่าเมื่อเทียบกับขนาดอนุภาคเฉลี่ยของเถ้าลอยลิกไนต์ที่รับมา 34.17% 68.78% และ 86.27% ตามลำดับ กราฟแสดงการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของเถ้าลอยลิกไนต์ขนาดต่างๆ แสดงอยู่ในภาคผนวก จ.



รูปที่ 4.1 ภาพถ่าย SEM แสดงอนุภาคเส้นใยคาร์บอน

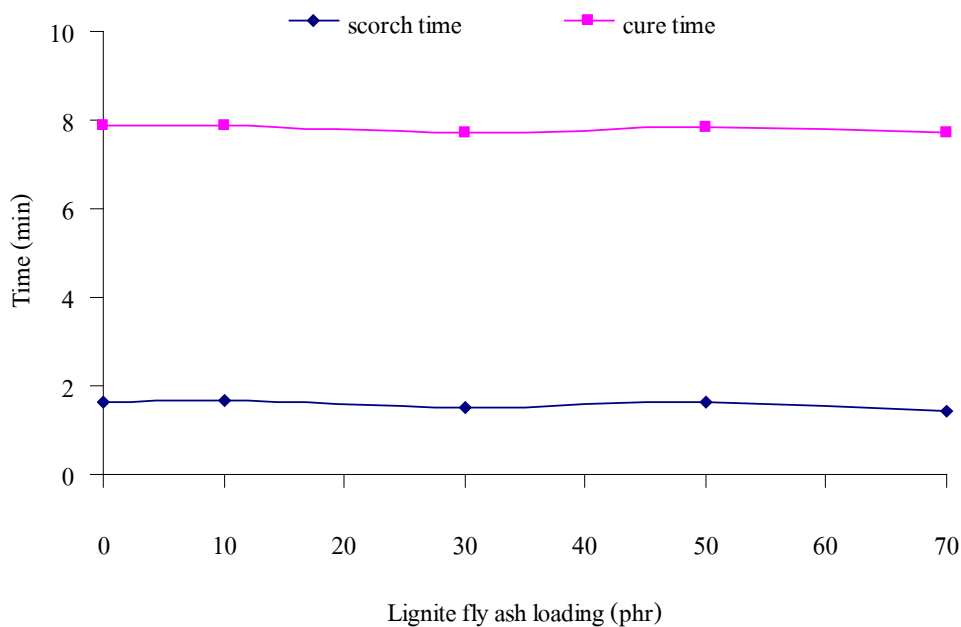
ตารางที่ 4.2 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของเส้นใยคาร์บอนทั้ง 4 ขนาด

	เส้นใยคาร์บอนที่รับมา (AF)		เส้นใยคาร์บอนหยาบ (LF)		เส้นใยคาร์บอนละเอียดปานกลาง (MF)		เส้นใยคาร์บอนละเอียดมาก (SF)	
	1	2	1	2	1	2	1	2
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (μm)	16.72	15.17	10.82	10.17	4.85	5.10	2.15	2.24
S.D.	5.45	5.25	3.70	3.60	4.13	4.21	3.40	3.43
ค่าเฉลี่ย (μm)	15.95		10.50		4.98		2.19	
ช่วงของขนาดอนุภาค (μm)	0.04 – 150		0.04 – 75		0.04 – 38		0.04 – 30	

4.2 การทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของปริมาณเส้นใยคาร์บอนที่มีต่อลักษณะการวัลคาไนซ์ คือ ระยะเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป (scorch time) และระยะเวลาในการวัลคาไนซ์ (cure time) โดยใช้เส้นใยคาร์บอนที่รับมาในการศึกษา ซึ่งผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.2 จะเห็นว่าทั้งระยะเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป และระยะเวลาในการวัลคาไนซ์ของยางคอมพอสิตก่อนข้างคงที่เมื่อปริมาณเส้นใยคาร์บอนเพิ่มขึ้น โดยผลต่างระหว่างค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของทั้งระยะเวลาที่ยางเริ่มเกิดการ

คงรูปและระยะเวลาในการวัลคาไนซ์มีค่าประมาณ 10 วินาที ซึ่งถือว่าน้อยเมื่อเทียบกับระยะเวลาที่ ยางเริ่มเกิดการคงรูปและระยะเวลาในการวัลคาไนซ์ และผลการทดสอบที่ออกมาสอดคล้องกับการ ศึกษาการเติมซิลิกาและเถ้าลอยลิกไนต์ในยางธรรมชาติของ [Sombatsompop, et al. \(2004\)](#) ซึ่งทำ การศึกษาถึงผลของปริมาณซิลิกาและเถ้าลอยลิกไนต์ต่อระยะเวลาในการวัลคาไนซ์ แรงบิดต่ำสุด และแรงบิดสูงสุดของยางคอมปาวด์ จากการศึกษาพบว่า เมื่อปริมาณซิลิกาเพิ่มขึ้นทำให้ระยะเวลา ในการวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้น แต่ในกรณีของเถ้าลอยลิกไนต์ ระยะเวลาในการวัลคาไนซ์มีค่าคงที่ ไม่ เปลี่ยนแปลงตามปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ที่เพิ่มขึ้น ระยะเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูปและระยะเวลาใน การวัลคาไนซ์ของยางคอมโพสิตที่เติมด้วยเถ้าลอยลิกไนต์ค่อนข้างคงที่ เนื่องจาก สารเร่งปฏิกิริยา จะถูกดูดซับไว้ที่บริเวณผิวของ SiO_2 ทำให้ระยะเวลาในการวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้น แต่โลหะออกไซด์ที่มี อยู่มากในเถ้าลอยลิกไนต์ดังในตารางที่ 4.1 เช่น Al_2O_3 , Fe_2O_3 และ CaO เป็นต้น จะทำหน้าที่เป็น เหมือนสารเร่งปฏิกิริยาและสารกระตุ้นปฏิกิริยาในกระบวนการวัลคาไนซ์ ทำให้ระยะเวลาในการ วัลคาไนซ์ลดลง ดังนั้นทั้งระยะเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูปและระยะเวลาในการ วัลคาไนซ์จึงค่อนข้างคงที่ ส่วนผลของขนาดอนุภาคเถ้าลอยลิกไนต์ซึ่งไม่ได้ทำการศึกษา แต่จากการทำการทดลอง พบว่า ขนาดอนุภาคเถ้าลอยลิกไนต์ไม่มีผลต่อลักษณะการวัลคาไนซ์ด้วย

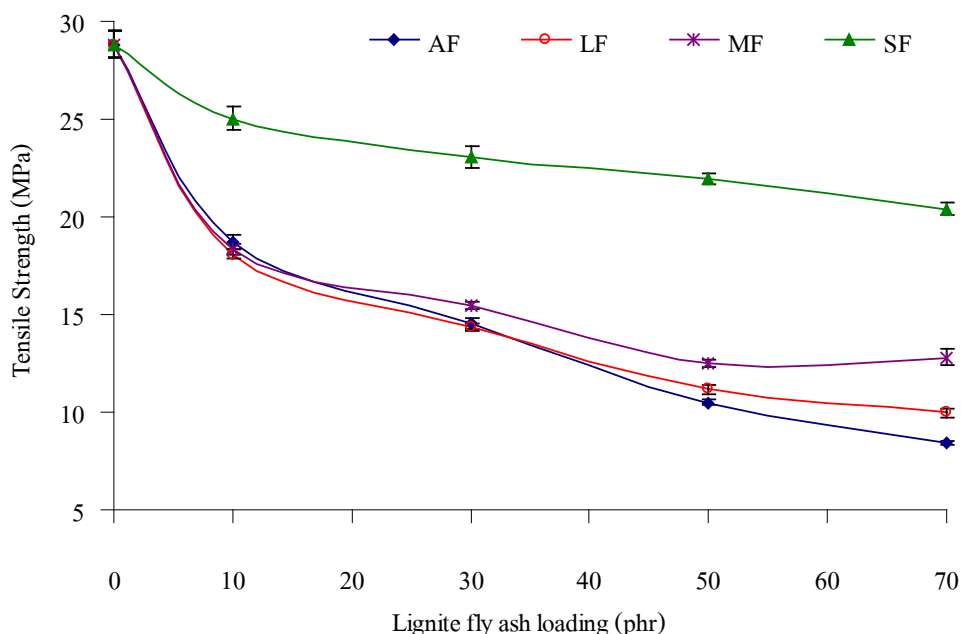


รูปที่ 4.2 ผลการทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ของยาง

4.3 การทดสอบสมบัติเชิงกล

4.3.1 การทดสอบสมบัติการดึง

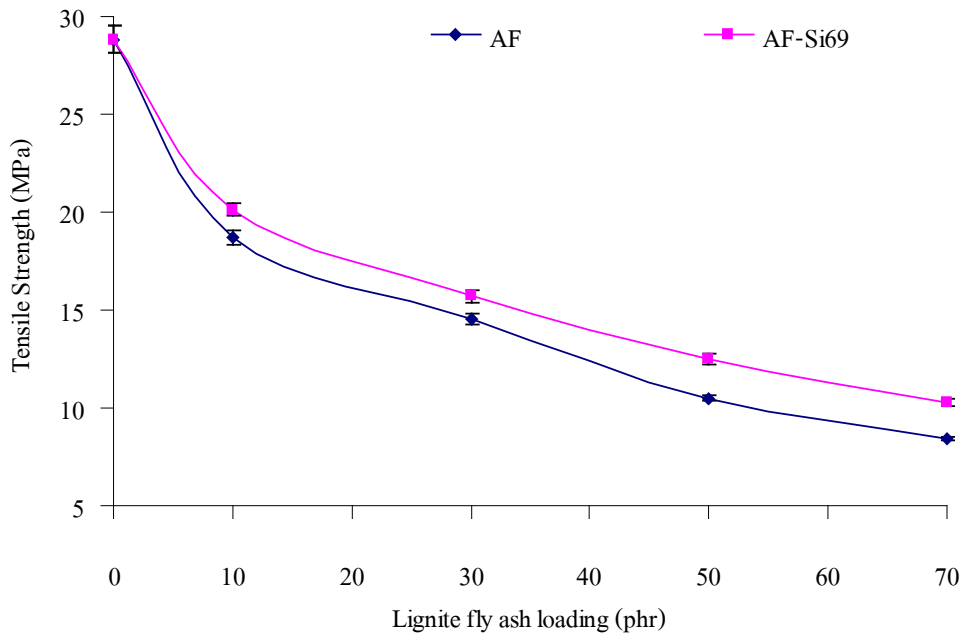
รูปที่ 4.3 แสดงผลของขนาดและปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ที่มีต่อความแข็งแรงดึงของยางคอมโพสิต จากผลการทดสอบพบว่า ความแข็งแรงดึงมีค่าลดลงตามปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ที่เพิ่มขึ้น โดยความแข็งแรงดึงของยางคอมโพสิตที่เติมเถ้าลอยลิกไนต์ที่รับมา (AF) ในปริมาณ 10 phr และ 70 phr มีค่าลดลง 35.28% และ 70.83% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการเติม ความแข็งแรงดึงของยางคอมโพสิตมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์เพิ่มขึ้น เนื่องจากอันตรกิริยาหรือแรงกระทำระหว่างอนุภาคเถ้าลอยลิกไนต์และยางที่มีความแข็งแรงต่ำ และการขาดหมู่ฟังก์ชันที่ทำปฏิกิริยาบริเวณผิวของอนุภาคเถ้าลอยลิกไนต์ เช่น หมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) (Sae-oui, Rakdee and Thanmathorn, 2002; Sombatsompop, et al. , 2004) นอกจากนี้ การเติมเถ้าลอยลิกไนต์ลงไปปริมาณมากๆ ทำให้ยางมีความต่อเนื่องของเฟสยาง (rubber phase) น้อยลง และอาจเกิดการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอของเถ้าลอยลิกไนต์ ความแข็งแรงดึงของยางในส่วนดังกล่าวก็จะลดลง (Da Costa, et al. , 2002) ดังนั้นเมื่อปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์เพิ่มขึ้น ความแข็งแรงดึงของยางคอมโพสิตจะมีค่าลดลง



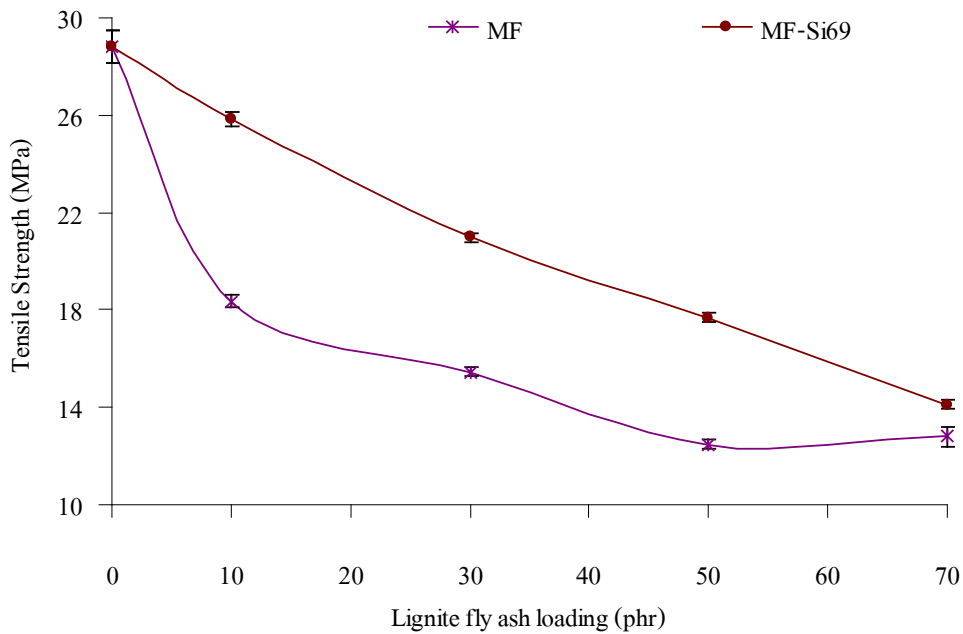
รูปที่ 4.3 ผลของขนาดและปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ต่อความแข็งแรงดึง

อย่างไรก็ตาม ในการศึกษาผลของขนาดอนุภาคเถ้าลอยลิกไนต์ต่อความแข็งแรงดึง พบว่า ในกรณีที่ใช้เถ้าลอยลิกไนต์ที่รับมา เถ้าลอยลิกไนต์หยาบ (LF) และเถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดปานกลาง (MF) ความแข็งแรงดึงมีค่าไม่แตกต่างกันมากนักเมื่อเติมในปริมาณน้อยๆ แต่ในกรณีของเถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดมาก (SF) จะมีค่าสูงกว่าเถ้าลอยลิกไนต์ขนาดอื่นๆ โดยความแข็งแรงดึงของยางคอมโพสิตที่เติมเถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดมากในปริมาณ 10 phr และ 70 phr มีค่าลดลง 13.15% และ 29.21% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการเติม และมีค่าสูงกว่ากรณีที่เติมด้วยเถ้าลอยลิกไนต์ที่รับมาที่ส่วนผสมเดียวกัน 34.19% และ 142.7% ตามลำดับ ยางคอมโพสิตที่เติมด้วยเถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดมากมีค่าความแข็งแรงดึงสูงกว่ากรณีที่เติมด้วยเถ้าลอยลิกไนต์ขนาดอื่นๆ เนื่องจากอนุภาคที่มีขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักสูงกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ ทำให้มีพื้นที่ที่จะเกิดแรงกระทำระหว่างสารตัวเติมกับยางมากกว่า การถ่ายเทแรงจากเฟสยางไปสู่เถ้าลอยลิกไนต์จะถ่ายเทได้มากขึ้น ความแข็งแรงดึงจึงมีค่าสูงกว่า (Sombatsompop, et al. , 2004)

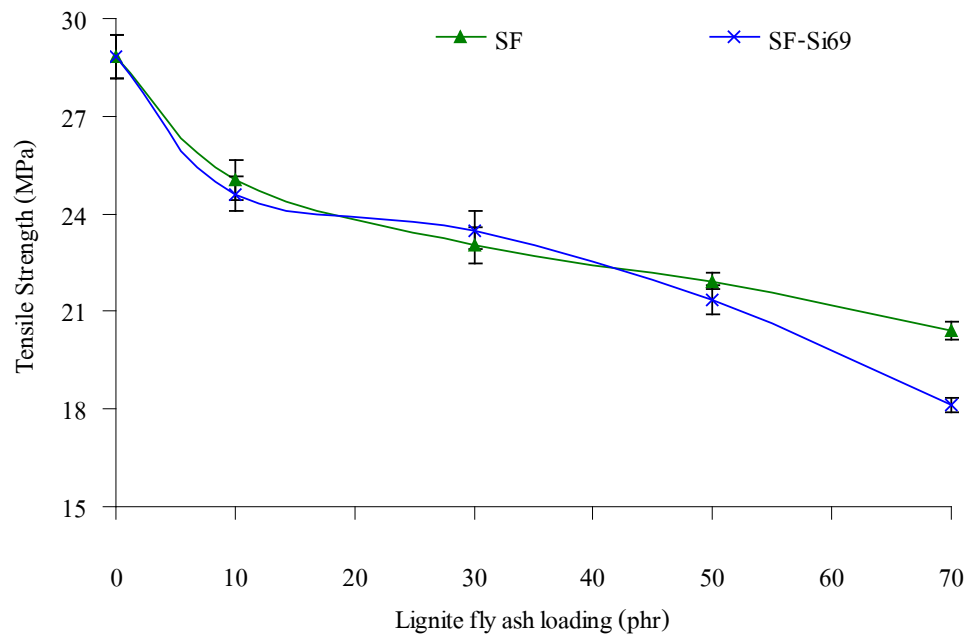
รูปที่ 4.4 - 4.6 แสดงผลของสารคู่ควบไซเลน (Silane coupling agent) ต่อความแข็งแรงดึงของยางคอมโพสิต โดยรูปที่ 4.4 เป็นกรณีที่ใช้เถ้าลอยลิกไนต์ที่รับมา รูปที่ 4.5 เป็นกรณีที่ใช้เถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดปานกลาง และรูปที่ 4.6 เป็นกรณีที่ใช้เถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดมาก จาก การทดสอบพบว่า ในกรณีของยางคอมโพสิตที่เติมด้วยเถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดปานกลาง สารคู่ควบไซเลนทำให้ความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากเถ้าลอยลิกไนต์มีหมู่ฟังก์ชันเคมีอินทรีย์ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาอยู่บนพื้นผิวน้อย ทำให้เถ้าลอยลิกไนต์มีความเป็นขั้วสูง เถ้าลอยลิกไนต์จึงเข้ากับยางที่ไม่มีขั้วได้ยาก สารคู่ควบไซเลนจะเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างยางและเถ้าลอยลิกไนต์ให้แข็งแรงขึ้น และช่วยให้เถ้าลอยลิกไนต์กระจายตัวได้ดีในเนื้อยาง การถ่ายเทแรงจากเฟสยางไปสู่เถ้าลอยลิกไนต์ก็จะดีขึ้น ความแข็งแรงดึงจึงมีค่าเพิ่มขึ้น (Ismail, Nasaruddin and Ishiaku, 1999; Ismail, Mega and Abdul Khalil, 2001) โดยยางคอมโพสิตที่เติมเถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดปานกลางลงไป 10 phr และ 50 phr และเติมสารคู่ควบไซเลนลงไปด้วยจะมีความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้น 40.63% และ 41.97% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่เติมสาร คู่ควบไซเลน แต่ที่ปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ 70 phr พบว่า สารคู่ควบไซเลนช่วยให้ความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเท่านั้น ในกรณีของยางคอมโพสิตที่เติมด้วยเถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดมากพบว่า สาร คู่ควบไซเลนไม่ค่อยมีผลต่อความแข็งแรงดึงมากนักเพราะผลของขนาดอนุภาคจะมีบทบาทสำคัญมากกว่า ส่วนกรณีของยางคอมโพสิตที่เติมด้วยเถ้าลอยลิกไนต์ที่รับมา สารคู่ควบไซเลนอาจไม่ได้กระจายอยู่ที่ผิวของเถ้าลอยลิกไนต์ จึงทำให้ความแข็งแรงดึงของยางคอมโพสิตเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น



รูปที่ 4.4 ผลของสารควบไซเลนต่อความแข็งแรงดึง (กรณีของถ่านล้อยลิกไนต์ที่รับมา)



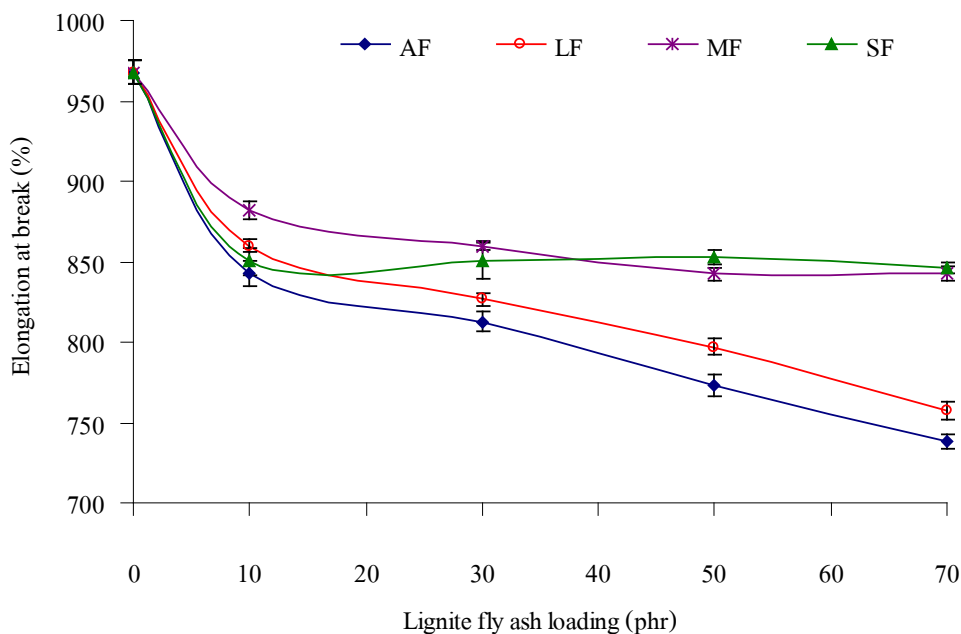
รูปที่ 4.5 ผลของสารควบไซเลนต่อความแข็งแรงดึง (กรณีของถ่านล้อยลิกไนต์ละเยียดปานกลาง)



รูปที่ 4.6 ผลของสารคู่ควบไซเลนต่อความแข็งแรงดึง (กรณีของเถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดมาก)

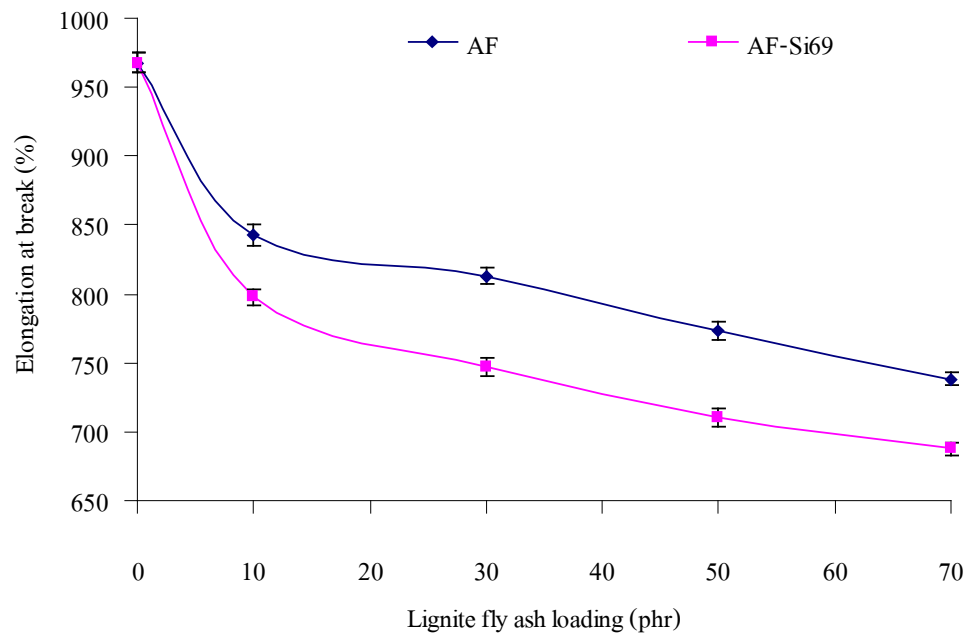
รูปที่ 4.7 แสดงผลของขนาดและปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ที่มีต่อระยะยืดเมื่อขาดของยางคอมโพสิต จากการทดสอบพบว่า ระยะยืดเมื่อขาดมีค่าลดลงเมื่อปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์เพิ่มขึ้น โดยระยะยืดเมื่อขาดของยางคอมโพสิตที่เติมเถ้าลอยลิกไนต์ที่รับมาในปริมาณ 10 phr และ 70 phr มีค่าลดลง 12.94% และ 23.70% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีสารตัวเติม ระยะยืดเมื่อขาดมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์เพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคเถ้าลอยลิกไนต์จะไปกีดขวางการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของยาง ทำให้ยางมีความแข็งแรงดึง (stiffness) และความเปราะ (brittleness) เพิ่มขึ้น เมื่อเติมลงไปปริมาณมากขึ้นก็จะทำให้ความต่อเนื่องของเฟสยางลดลงด้วย ระยะยืดเมื่อขาดของยางคอมโพสิตจึงลดลง (Ismail and Jaffri, 1999; Ismail, Shuhelmy and Edyham, 2002) ในการศึกษาผลของขนาดอนุภาคเถ้าลอยลิกไนต์ต่อระยะยืดเมื่อขาดพบว่า ในช่วงที่เติมเถ้าลอยลิกไนต์ลงไปไม่เกิน 30 phr ยางคอมโพสิตที่เติมด้วยเถ้าลอยลิกไนต์ขนาดอนุภาคต่างๆ กัน จะมีค่าระยะยืดเมื่อขาดต่างกันน้อยมาก (ไม่เกิน 5%) แต่เมื่อเติมเถ้าลอยลิกไนต์ลงไปมากกว่า 30 phr ระยะยืดเมื่อขาดของยางคอมโพสิตที่เติมด้วยเถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดปานกลางและเถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดมากจะมีแนวโน้มคงที่ ขณะที่กรณีที่เติมด้วยเถ้าลอยลิกไนต์ที่รับมาและเถ้าลอยลิกไนต์หยาบ ระยะยืดเมื่อขาดจะมีแนวโน้มลดลง เมื่อปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์เพิ่มขึ้น โดยระยะยืดเมื่อขาดของยางคอมโพสิตที่เติมเถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดมากในปริมาณ 70 phr มีค่าลดลง 12.54% เท่านั้น เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีสารตัวเติม และสูงกว่ากรณีที่เติมด้วยเถ้าลอยลิกไนต์ที่รับมา

ในปริมาณ 70 phr 14.63% ยางคอมโพสิตที่เติมด้วยเถ้าลอยลิกไนต์ที่ได้รับมาจะมีระยะยืดเมื่อขาดน้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่เติมด้วยเถ้าลอยลิกไนต์ขนาดอื่นๆ

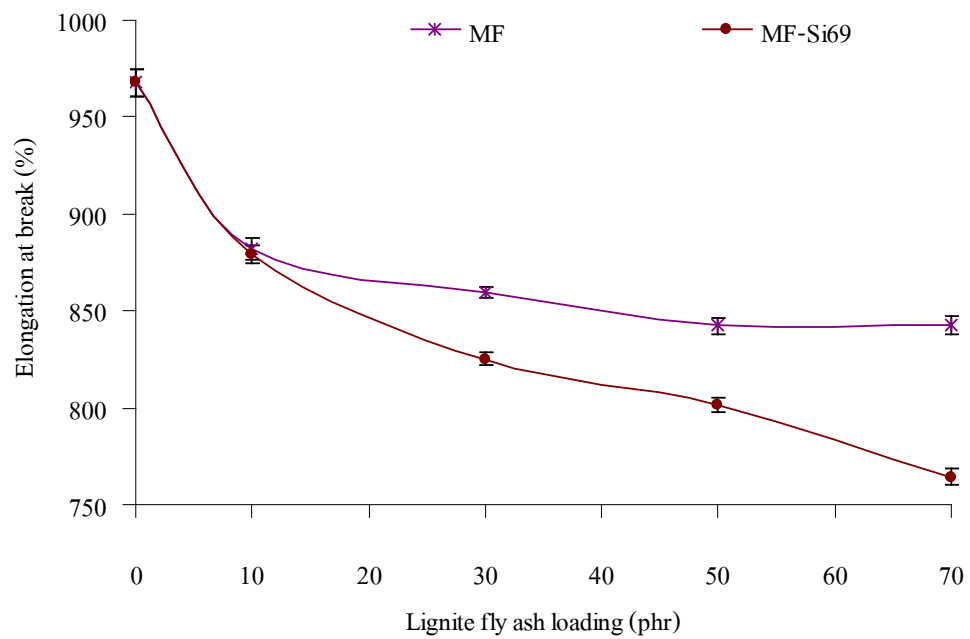


รูปที่ 4.7 ผลของขนาดและปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ต่อระยะยืดเมื่อขาด

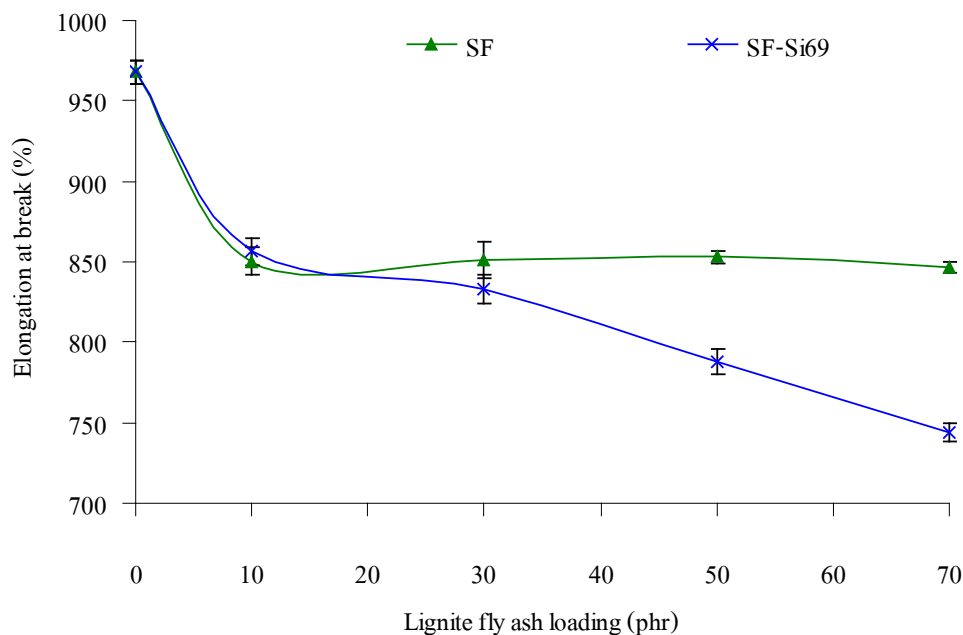
รูปที่ 4.8 - 4.10 แสดงผลของสารคู่ควบไซเลนต่อระยะยืดเมื่อขาดของยางคอมโพสิต โดยรูปที่ 4.8 เป็นกรณีที่ใช้เถ้าลอยลิกไนต์ที่รับมา รูปที่ 4.9 เป็นกรณีที่ใช้เถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดปานกลาง และรูปที่ 4.10 เป็นกรณีที่ใช้เถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดมาก จากการทดสอบพบว่า สารคู่ควบไซเลนจะทำให้ระยะยืดเมื่อขาดของยางคอมโพสิตมีค่าลดลง เนื่องจากสารคู่ควบไซเลนจะช่วยปรับปรุงพันธะระหว่างยางและเถ้าลอยลิกไนต์ ทำให้ยางคอมโพสิตมีความแข็งเกร็ง (Rigidity) มากขึ้น และความเหนียว (Ductility) ลดลง ดังนั้นยางคอมโพสิตจึงขาดที่ระยะยืดที่น้อยลง (Ismail, Mega and Abdul Khalil, 2001) โดยยางคอมโพสิตที่เติมด้วยเถ้าลอยลิกไนต์ที่รับมา เถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดปานกลาง และเถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดมากลงไปปริมาณ 70 phr เท่ากัน และเติมสารคู่ควบไซเลนลงไปด้วย จะมีค่าระยะยืดเมื่อขาดลดลง 6.89% 9.28% และ 12.16% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่เติมสารคู่ควบไซเลน แต่ยางคอมโพสิตที่เติมด้วยเถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดปานกลาง และเถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดมากลงไปปริมาณ 10 phr พบว่า ระยะยืดเมื่อขาดไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงมากนัก เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่เติมสารคู่ควบไซเลน



รูปที่ 4.8 ผลของสารคู่ควบไซเลนต่อระยะยืดเมื่อขาด (กรณีของถ่านลอยลิกไนต์ที่รับมา)



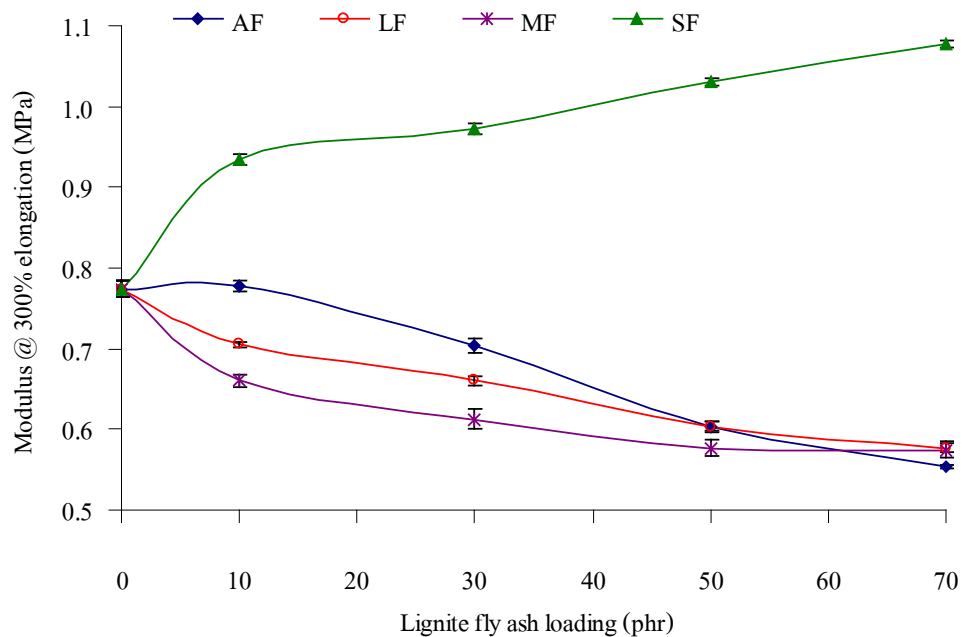
รูปที่ 4.9 ผลของสารคู่ควบไซเลนต่อระยะยืดเมื่อขาด (กรณีของถ่านลอยลิกไนต์ละเอียดยานกลาง)



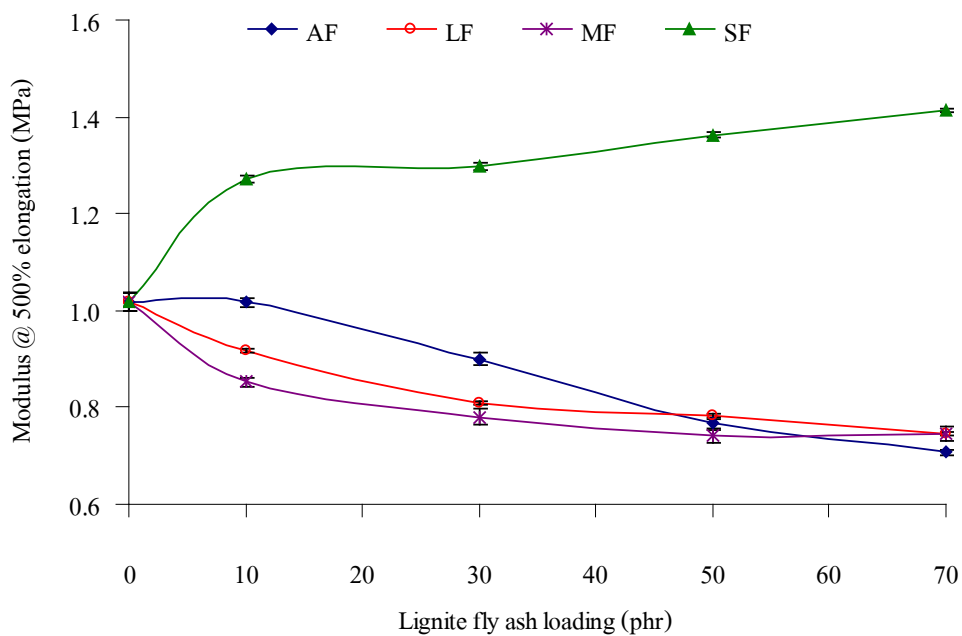
รูปที่ 4.10 ผลของสารควบไซเลนต่อระยะยืดเมื่อขาด (กรณีของเถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดมาก)

รูปที่ 4.11 และ 4.12 แสดงผลของขนาดและปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ที่มีต่อมอดูลัสยืดหยุ่นที่ระยะยืด 300% และ 500% ของยางคอมโพสิตตามลำดับ จากการทดสอบพบว่า มอดูลัสยืดหยุ่นของยางคอมโพสิตที่เติมด้วยเถ้าลอยลิกไนต์ที่รับมา เถ้าลอยลิกไนต์หยาบ และเถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดปานกลางมีค่าลดลงตามปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ที่เพิ่มขึ้น แต่ยางคอมโพสิตที่เติมด้วยเถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดมากมีค่ามอดูลัสยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์เพิ่มขึ้น โดยมอดูลัสยืดหยุ่นที่ระยะยืด 300% ของยางคอมโพสิตที่เติมด้วยเถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดมากในปริมาณ 10 phr และ 70 phr มีค่าเพิ่มขึ้น 20.80% และ 39.26% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มี สารตัวเติม และมอดูลัสยืดหยุ่นที่ระยะยืด 500% ของยางคอมโพสิตที่เติมด้วยเถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดมากในปริมาณ 10 phr และ 70 phr มีค่าเพิ่มขึ้น 24.95% และ 38.87% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีสารตัวเติม

ขณะที่มอดูลัสยืดหยุ่นที่ระยะยืด 300% ของยางคอมโพสิตที่เติมด้วยเถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดปานกลางในปริมาณ 10 phr และ 70 phr มีค่าลดลง 14.73% และ 25.71% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีสารตัวเติม และมอดูลัสยืดหยุ่นที่ระยะยืด 500% ของยางคอมโพสิตที่เติมด้วยเถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดปานกลางในปริมาณ 10 phr และ 70 phr มีค่าลดลง 16.31% และ 26.82% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีสารตัวเติม



รูปที่ 4.11 ผลของขนาดและปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ต่อมอดุลัสยืดหยุ่นที่ระยะยืด 300%

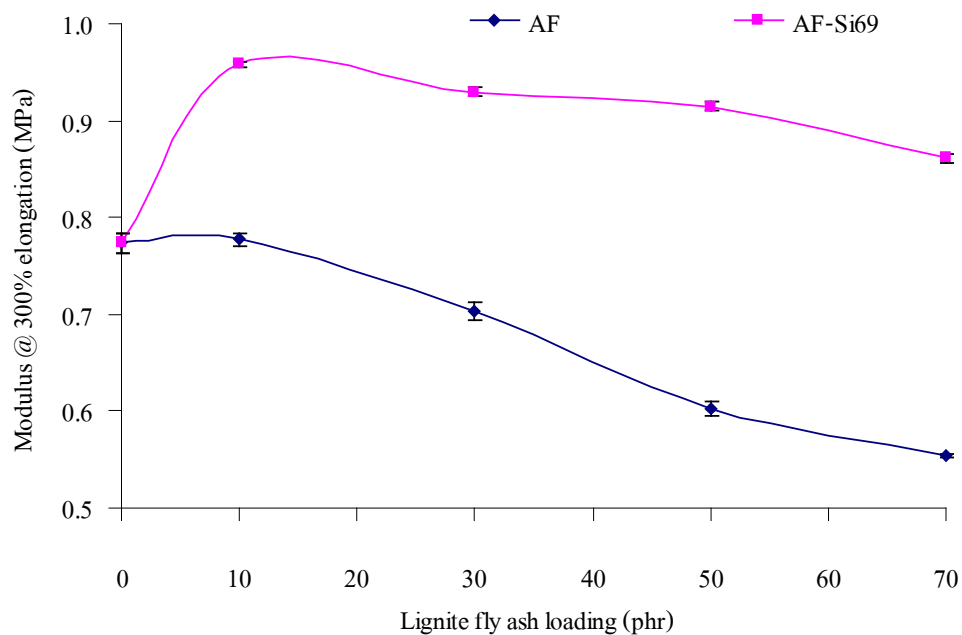


รูปที่ 4.12 ผลของขนาดและปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ต่อมอดุลัสยืดหยุ่นที่ระยะยืด 500%

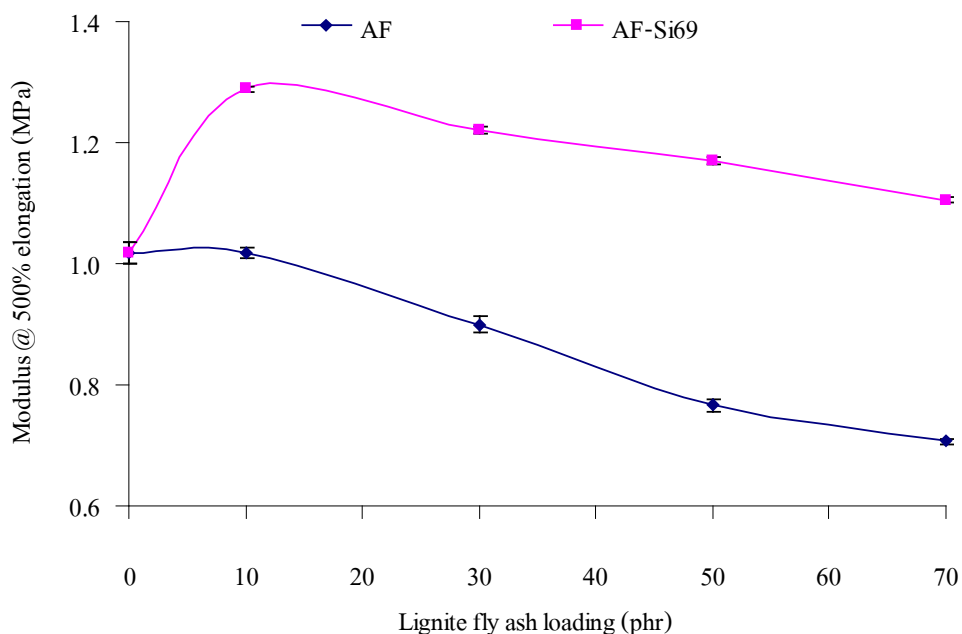
การเติมเถ้าลอยลิกไนต์ซึ่งเป็นสารตัวเติมที่มีอนุภาคที่แข็งลงไปอย่างไรจะช่วยทำให้มอดูลัสยืดหยุ่นมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของยางจะเกิดการเคลื่อนที่ได้ยากขึ้นเพราะจะถูกจำกัดการเคลื่อนที่ได้โดยอนุภาคเถ้าลอยลิกไนต์ อย่างไรก็ตาม มอดูลัสยืดหยุ่นของยางคอมพอสิตที่เติมด้วยเถ้าลอยลิกไนต์ที่ได้รับมา เถ้าลอยลิกไนต์หยาบ และเถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดปานกลางกลับมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์เพิ่มขึ้น ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากขนาดอนุภาคที่มีขนาดใหญ่พื้นที่ผิวในการเกิดพันธะกับโมเลกุลของยางจึงน้อยกว่าเถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดมาก ทำให้มอดูลัสยืดหยุ่นมีค่าน้อย (Ismail, Mega and Abdul Khalil, 2001)

รูปที่ 4.13 - 4.18 แสดงผลสารคู่ควบไซเลนต่อมอดูลัสยืดหยุ่นที่ระยะยืด 300% และ 500% ของยางคอมพอสิต โดยรูปที่ 4.13 และ 4.14 เป็นกรณีที่ใช้เถ้าลอยลิกไนต์ที่ได้รับมา รูปที่ 4.15 และ 4.16 เป็นกรณีที่ใช้เถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดปานกลาง และรูปที่ 4.17 และ 4.18 เป็นกรณีที่ใช้เถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดมาก จากการทดสอบพบว่า การเติมสารคู่ควบไซเลนทำให้มอดูลัสยืดหยุ่นของยางคอมพอสิตเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในกรณีของยางคอมพอสิตที่เติมด้วยเถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดปานกลางและเถ้าลอยลิกไนต์ที่ได้รับมา โดยมีมอดูลัสยืดหยุ่นที่ระยะยืด 300% ของยางคอมพอสิตที่เติมด้วยเถ้าลอยลิกไนต์ที่ได้รับมาในปริมาณ 10 phr และ 70 phr และเติมสารคู่ควบไซเลนลงไปด้วยมีค่าเพิ่มขึ้น 23.29% และ 55.42% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่เติมสารคู่ควบไซเลน และมีมอดูลัสยืดหยุ่นที่ระยะยืด 500% ของยางคอมพอสิตที่เติมด้วยเถ้าลอยลิกไนต์ที่ได้รับมาในปริมาณ 10 phr และ 70 phr และเติมสารคู่ควบไซเลนลงไปด้วย มีค่าเพิ่มขึ้น 26.75% และ 56.29% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่เติมสารคู่ควบไซเลน

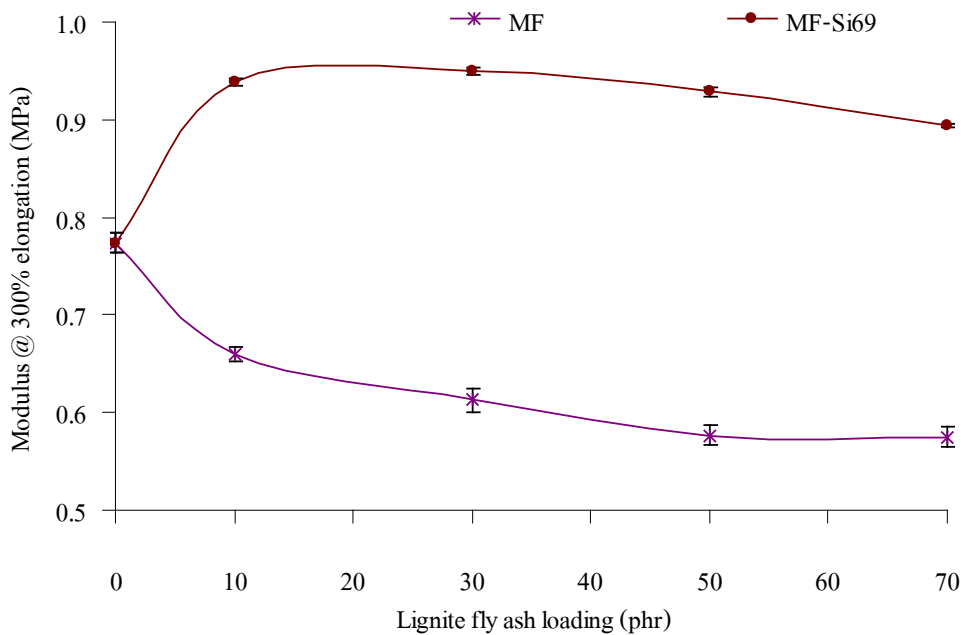
ส่วนมอดูลัสยืดหยุ่นที่ระยะยืด 300% ของยางคอมพอสิตที่เติมด้วยเถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดปานกลางในปริมาณ 10 phr และ 70 phr และเติมสารคู่ควบไซเลนลงไปด้วย มีค่าเพิ่มขึ้น 42.12% และ 55.48% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่เติมสารคู่ควบไซเลน และมีมอดูลัสยืดหยุ่นที่ระยะยืด 500% ของยางคอมพอสิตที่เติมด้วยเถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดปานกลางในปริมาณ 10 phr และ 70 phr และเติมสารคู่ควบไซเลนลงไปด้วย มีค่าเพิ่มขึ้น 46.95% และ 52.75% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่เติมสารคู่ควบไซเลน



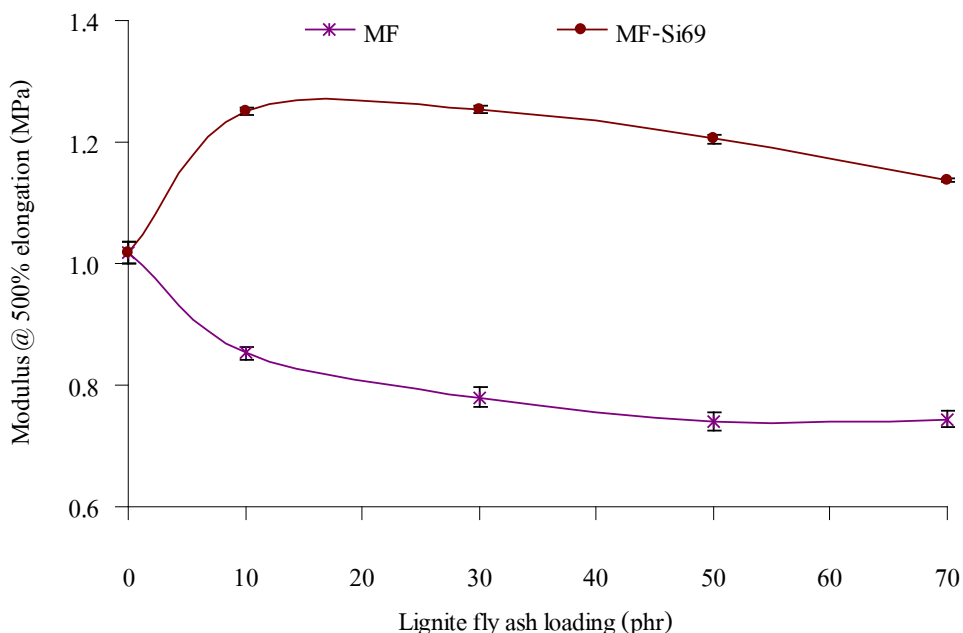
รูปที่ 4.13 ผลของสารก่อกวนไขเลนต่อมอดุลัสยืดหยุ่นที่ระยะยืด 300% (กรณีของเถ้าลอยลิกไนต์ที่รับมา)



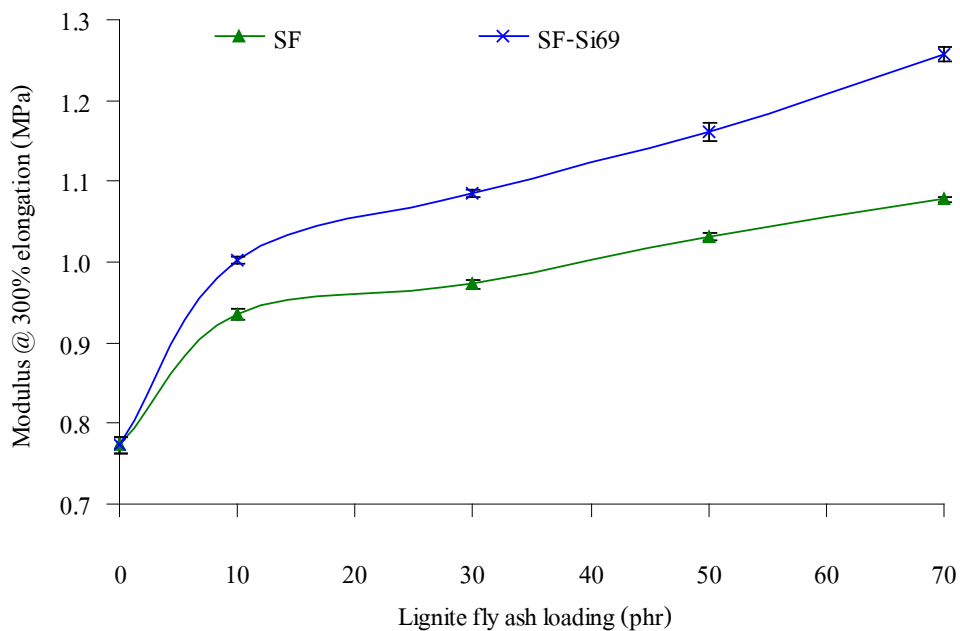
รูปที่ 4.14 ผลของสารก่อกวนไขเลนต่อมอดุลัสยืดหยุ่นที่ระยะยืด 500% (กรณีของเถ้าลอยลิกไนต์ที่รับมา)



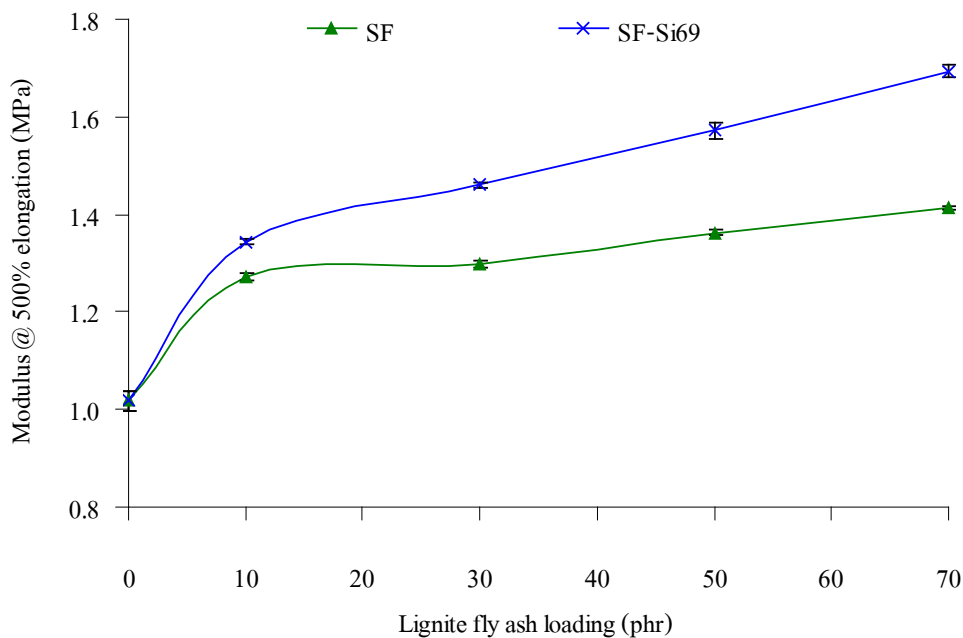
รูปที่ 4.15 ผลของสารก่อกวนไขเลนต่อมอดุลัสยืดหยุ่นที่ระยะยืด 300% (กรณีของแก้วลอยลิกไนต์ ละเอียดยปานกลาง)



รูปที่ 4.16 ผลของสารก่อกวนไขเลนต่อมอดุลัสยืดหยุ่นที่ระยะยืด 500% (กรณีของแก้วลอยลิกไนต์ ละเอียดยปานกลาง)

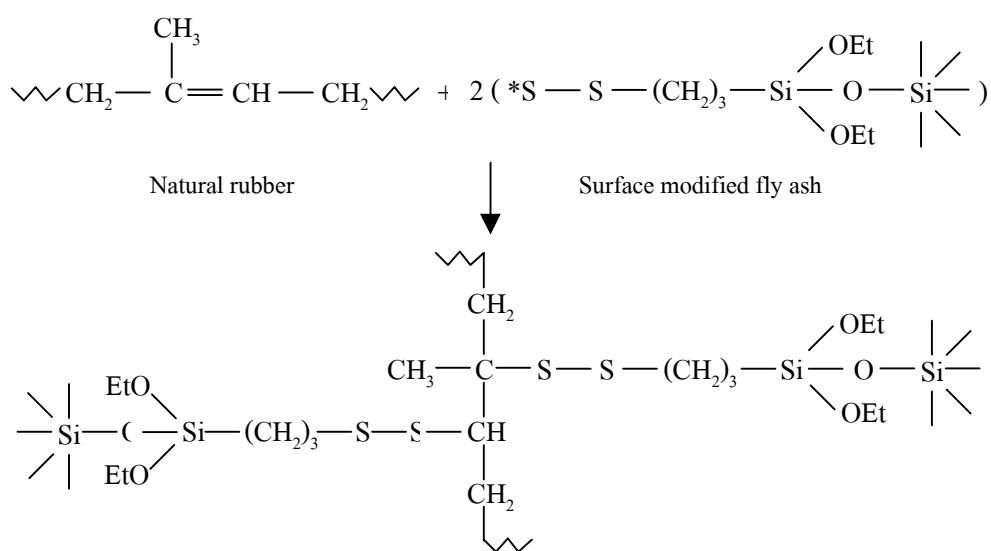


รูปที่ 4.17 ผลของสารกลุ่มควาไบเลนต่อมอดุลัสยืดหยุ่นที่ระยะยืด 300% (กรณีของเถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดมาก)

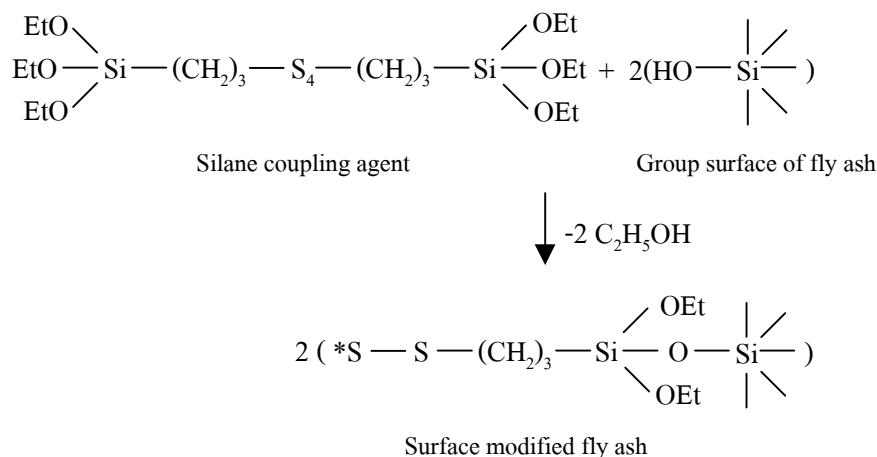


รูปที่ 4.18 ผลของสารกลุ่มควาไบเลนต่อมอดุลัสยืดหยุ่นที่ระยะยืด 500% (กรณีของเถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดมาก)

การเติมสารคู่ควบไซเลนช่วยให้ออกุศลยึดหยุ่นของยางคอมโพสิตเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารคู่ควบไซเลนจะช่วยปรับปรุงพันธะระหว่างยางและเส้นใยลิกไนต์ให้มีความแข็งแรงมากขึ้น และช่วยให้ยางมีความต่อเนื่องของเฟสดีขึ้น การถ่ายเทแรงจากเฟสยางไปสู่เส้นใยลิกไนต์ได้ดีขึ้น ทำให้ออกุศลยึดหยุ่นของยางคอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้น (Ismail, Mega and Abdul Khalil, 2001; Alkadasi, Hundiwale and Kapadi, 2004) ซึ่งโครงสร้างทางเคมีของปฏิกิริยาระหว่างสารคู่ควบไซเลนกับเส้นใยลิกไนต์ และปฏิกิริยาระหว่างเส้นใยลิกไนต์ที่ปรับปรุงพื้นผิวแล้วกับยางธรรมชาติ ได้แสดงในรูปที่ 4.19 และ 4.20



รูปที่ 4.19 ปฏิกิริยาระหว่างสารคู่ควบไซเลนและเส้นใยลิกไนต์ (บริเวณพื้นผิว) (Ismail, Mega and Abdul Khalil, 2001; Alkadasi, Hundiwale and Kapadi, 2004)

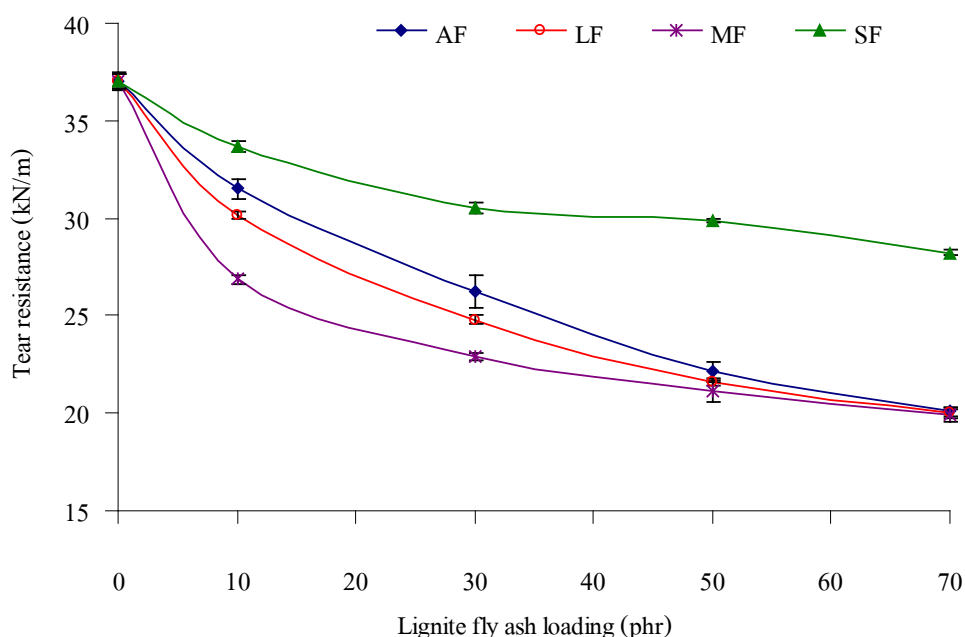


รูปที่ 4.20 ปฏิกิริยาระหว่างพื้นผิวที่ปรับปรุงแล้วของเส้นใยลิกไนต์และยางธรรมชาติ (Ismail, Mega and Abdul Khalil, 2001; Alkadasi, Hundiwale and Kapadi, 2004)

4.3.2 การทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาด

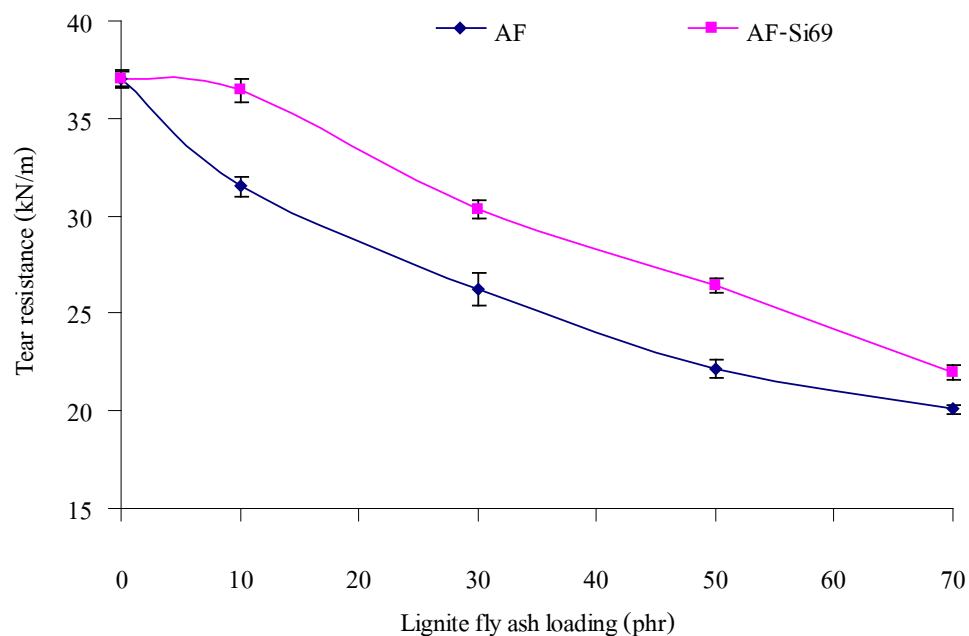
รูปที่ 4.21 แสดงผลของขนาดและปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ที่มีต่อความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางคอมโพสิต จากการทดสอบพบว่า ความต้านทานต่อการฉีกขาดมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์เพิ่มขึ้น โดยความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางคอมโพสิตที่เติมเถ้าลอยลิกไนต์ที่รับมาในปริมาณ 10 phr และ 70 phr มีค่าลดลง 14.88% และ 45.80% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีสารตัวเติม ความต้านทานต่อการฉีกขาดมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์เพิ่มขึ้น ซึ่งมีแนวโน้มคล้ายกับความแข็งแรงดึง เนื่องจากพันธะระหว่างอนุภาคเถ้าลอยลิกไนต์และโมเลกุลของยางที่ไม่ค่อยแข็งแรง และเมื่อเติมลงไปมากขึ้นก็จะทำให้ยางมีความต่อเนื่องของเฟสลดลง ทำให้ความต้านทานต่อการฉีกขาดลดลง (Sombatsompop, et al. , 2004)

ส่วนการศึกษาผลของขนาดอนุภาคเถ้าลอยลิกไนต์ต่อความต้านทานต่อการฉีกขาดพบว่า ความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางคอมโพสิตที่เติมด้วยเถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดมากมีค่าสูงกว่ายางคอมโพสิตที่เติมด้วยเถ้าลอยลิกไนต์ที่รับมา เถ้าลอยลิกไนต์หยาบ และเถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดปานกลาง ซึ่งเป็นผลมาจากขนาดของอนุภาคเถ้าลอยลิกไนต์ดังที่ได้อธิบายมาก่อนหน้านี้ โดยความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางคอมโพสิตที่เติมด้วยเถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดมากในปริมาณ 10 phr และ 70 phr มีค่าลดลง 9.05% และ 23.82% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีสารตัวเติม และมีค่าสูงกว่ากรณีของยางคอมโพสิตที่เติมด้วยเถ้าลอยลิกไนต์ที่รับมา 6.85% และ 40.56% ตามลำดับ

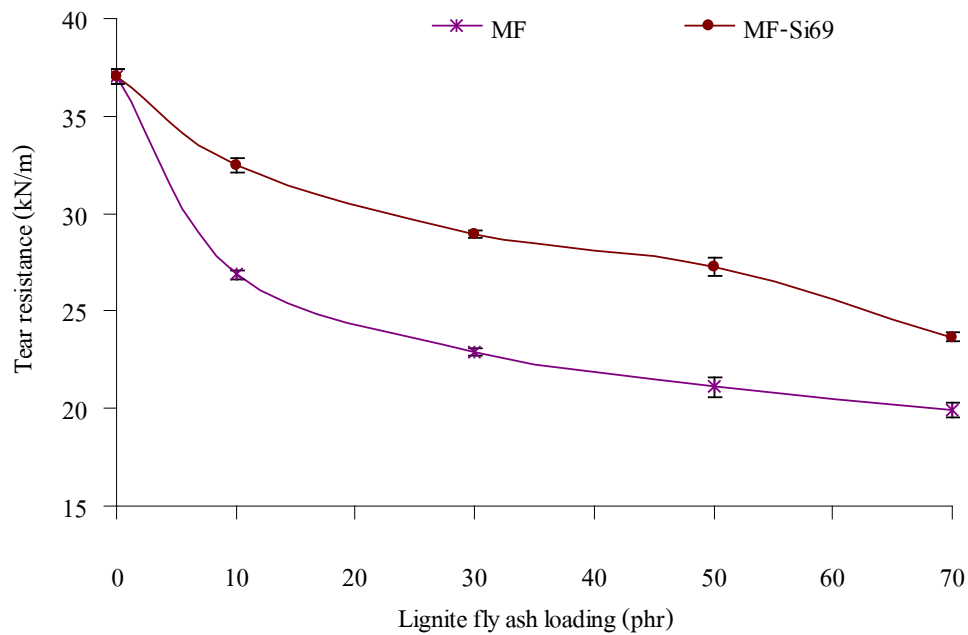


รูปที่ 4.21 ผลของขนาดและปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ต่อความต้านทานต่อการฉีกขาด

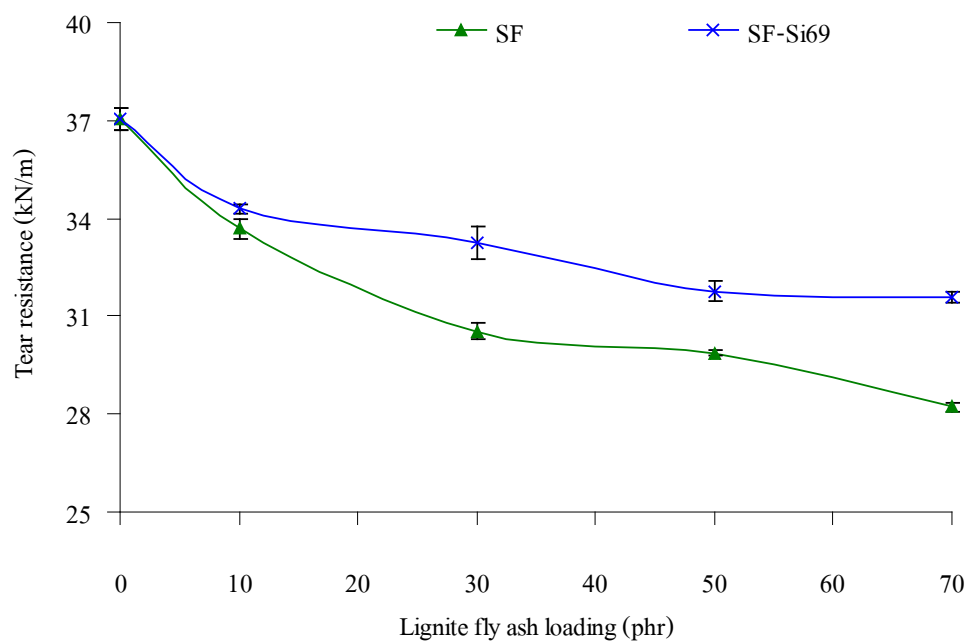
รูปที่ 4.22 - 4.24 แสดงผลของสารคู่ควบไซเลนต่อความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางคอมโพสิต โดยรูปที่ 4.22 เป็นกรณีที่ใช้เถ้าลอยลิกไนต์ที่รับมา รูปที่ 4.23 เป็นกรณีที่ใช้เถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดปานกลาง และรูปที่ 4.24 เป็นกรณีที่ใช้เถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดมาก จากการทดสอบพบว่า สารคู่ควบไซเลนจะทำให้ความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางคอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารคู่ควบไซเลนจะช่วยปรับปรุงพันธะระหว่างอนุภาคเถ้าลอยลิกไนต์กับโมเลกุลของยาง ทำให้ยางคอมโพสิตมีค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดสูงขึ้น (Da Costa, et al. , 2000; Ismail, Mega and Abdul Khalil, 2001; Alkadasi, Hundiwale and Kapadi, 2004) โดยยางคอมโพสิตที่เติมด้วยเถ้าลอยลิกไนต์ที่รับมาลงไปปริมาณ 10 phr และ 70 phr และเติมสารคู่ควบไซเลนลงไปด้วยจะมีค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดเพิ่มขึ้น 15.58% และ 9.67% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่เติมสารคู่ควบไซเลน



รูปที่ 4.22 ผลของสารคู่ควบไซเลนต่อความต้านทานต่อการฉีกขาด (กรณีของเถ้าลอยลิกไนต์ที่รับมา)



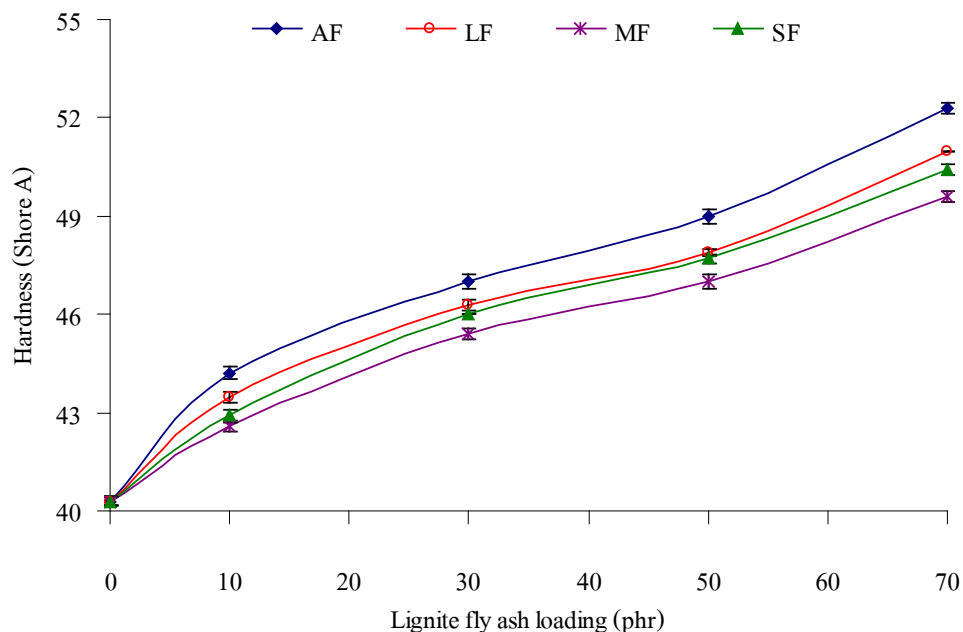
รูปที่ 4.23 ผลของสารกลุ่มควบไซเลนต่อความต้านทานต่อการฉีกขาด (กรณีของถ้ำลอยลิกไนต์ ละเอียดปานกลาง)



รูปที่ 4.24 ผลของสารกลุ่มควบไซเลนต่อความต้านทานต่อการฉีกขาด (กรณีของถ้ำลอยลิกไนต์ ละเอียดมาก)

4.3.3 การทดสอบความแข็ง

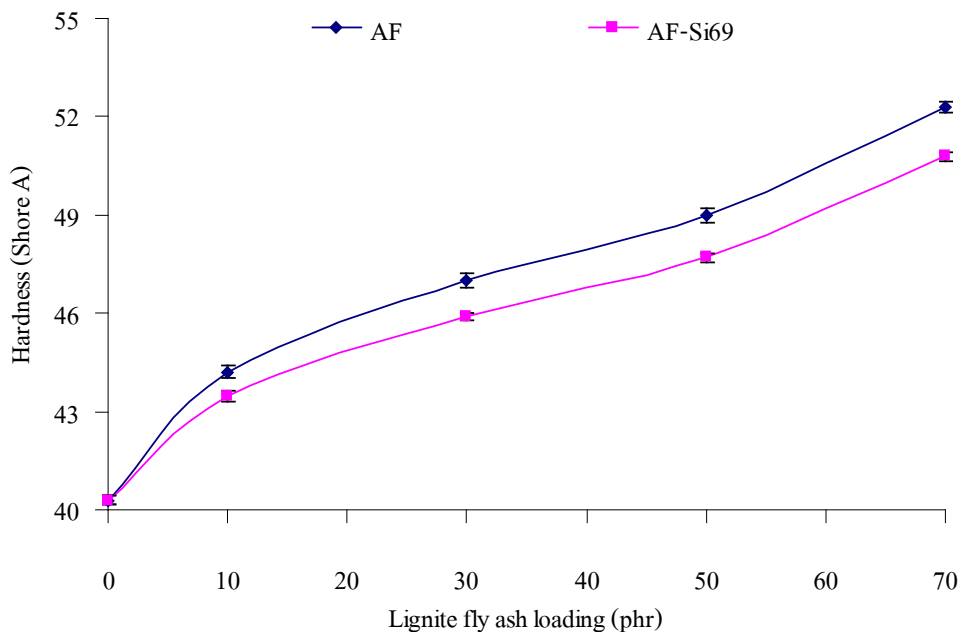
รูปที่ 4.25 แสดงผลของขนาดและปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ที่มีต่อความแข็งของยางคอมพอสิต จากการทดสอบพบว่า ความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์เพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคเถ้าลอยลิกไนต์ไปกีดขวางการเคลื่อนที่ของโซ่โพลิเมอร์ยาง เมื่อปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์เพิ่มขึ้น ความยืดหยุ่นของยางก็จะน้อยลง ทำให้ยางมีความแข็งเพิ่มขึ้น (Alkadasi, Hundiwale and Kapadi, 2004) โดยความแข็งของยางคอมพอสิตที่เติมเถ้าลอยลิกไนต์ที่รับมาในปริมาณ 10 phr และ 70 phr มีค่าเพิ่มขึ้น 9.68% และ 29.78% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการเติม ส่วนผลของขนาดอนุภาคเถ้าลอยลิกไนต์ต่อความแข็งของยางคอมพอสิตพบว่า ความแข็งมีค่าไม่ค่อยแตกต่างกันเมื่อใช้เถ้าลอยลิกไนต์ที่มีขนาดอนุภาคต่างกัน ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากขนาดอนุภาคของเถ้าลอยลิกไนต์ทั้ง 4 ประเภทมีขนาดไม่แตกต่างกันมากนัก โดยความแข็งของยางคอมพอสิตที่เติมด้วยเถ้าลอยลิกไนต์ที่รับมามีค่าสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่เติมด้วยเถ้าลอยลิกไนต์ขนาดอื่นๆ



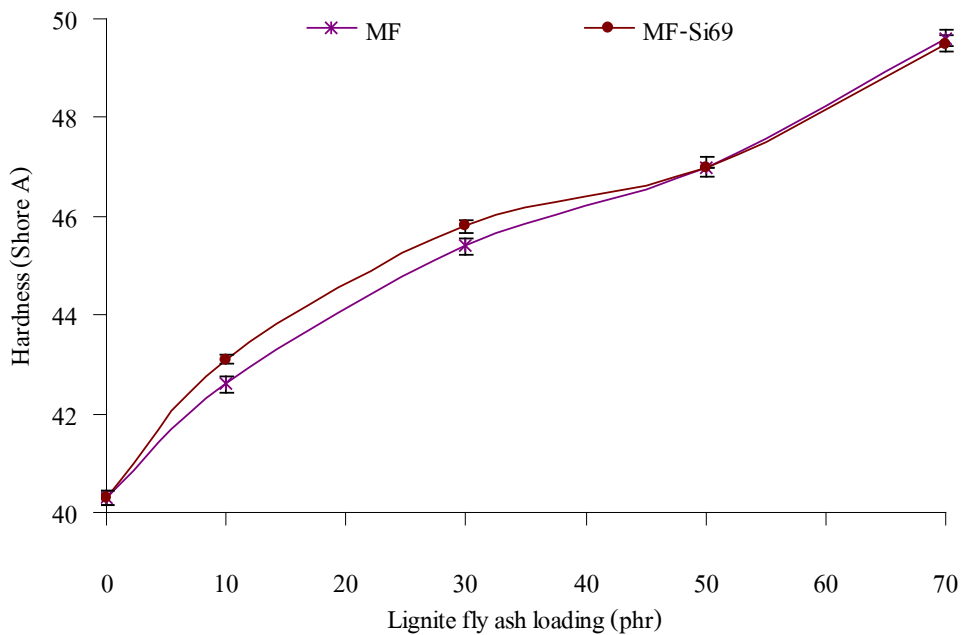
รูปที่ 4.25 ผลของขนาดและปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ต่อความแข็ง

รูปที่ 4.26 - 4.28 แสดงผลของสารคู่ควบไซเลนต่อความแข็งของยางคอมพอสิต โดยรูปที่ 4.26 เป็นกรณีที่ใช้เถ้าลอยลิกไนต์ที่รับมา รูปที่ 4.27 เป็นกรณีที่ใช้เถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดปานกลาง และรูปที่ 4.28 เป็นกรณีที่ใช้เถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดมาก จากการทดสอบพบว่า ความแข็งของยางคอมพอสิตที่เติมและไม่เติมสารคู่ควบไซเลนมีค่าไม่แตกต่างกัน เนื่องจากสาร

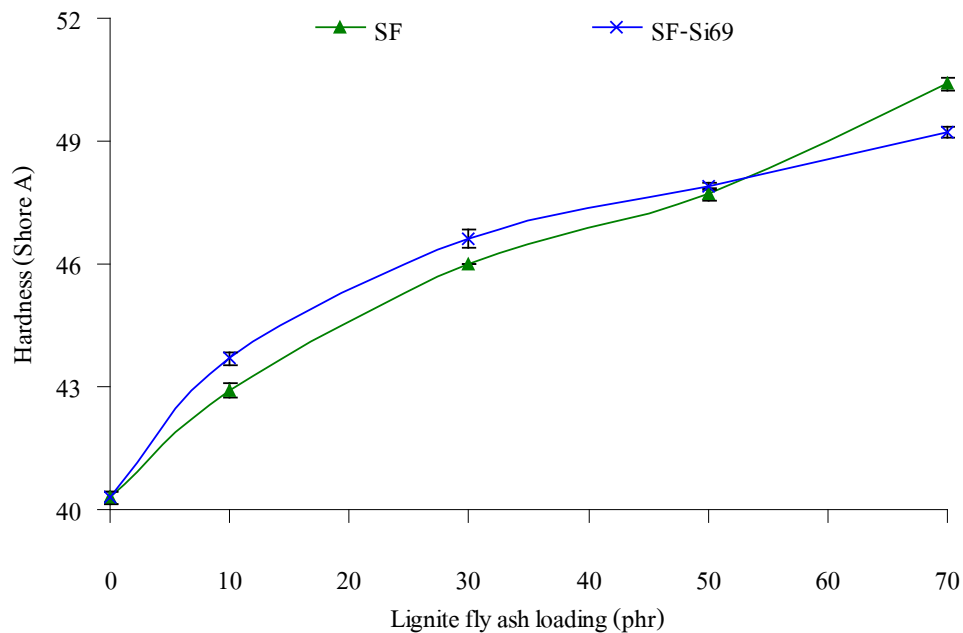
คู่ควบไซเลนมีสถานะเป็นของเหลวและเติมลงไปปริมาณที่น้อยมาก จึงไม่มีผลต่อความแข็งของยางคอมพอสิต (Alkadasi, Hundiwale and Kapadi, 2004)



รูปที่ 4.26 ผลของสารคู่ควบไซเลนต่อความแข็ง (กรณีของเก้าอลอยลิกไนต์ที่รับมา)



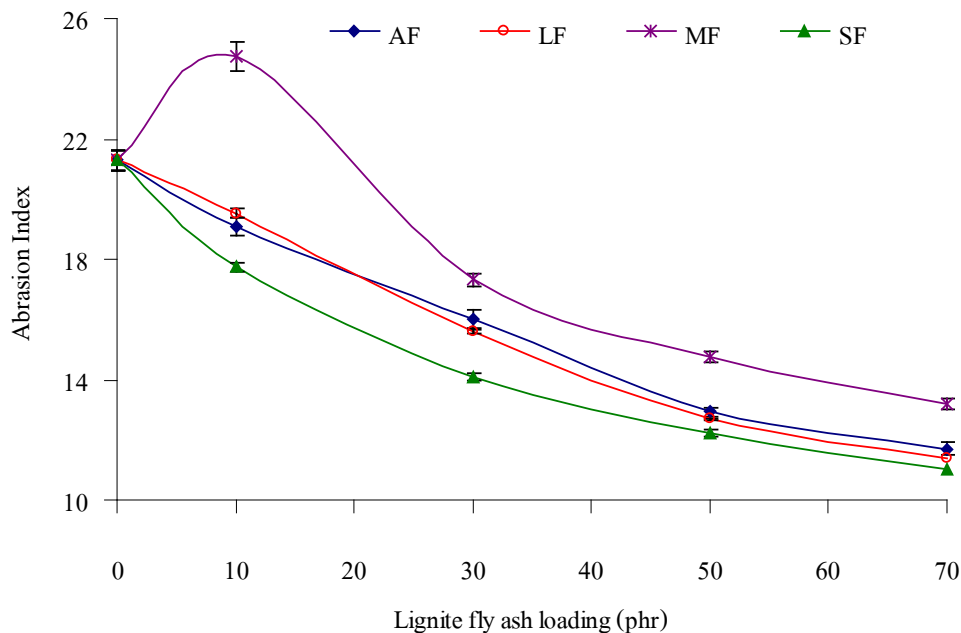
รูปที่ 4.27 ผลของสารคู่ควบไซเลนต่อความแข็ง (กรณีของเก้าอลอยลิกไนต์ละเอียดยปานกลาง)



รูปที่ 4.28 ผลของสารคู่ควบไซเลนต่อความแข็ง (กรณีของเถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดมาก)

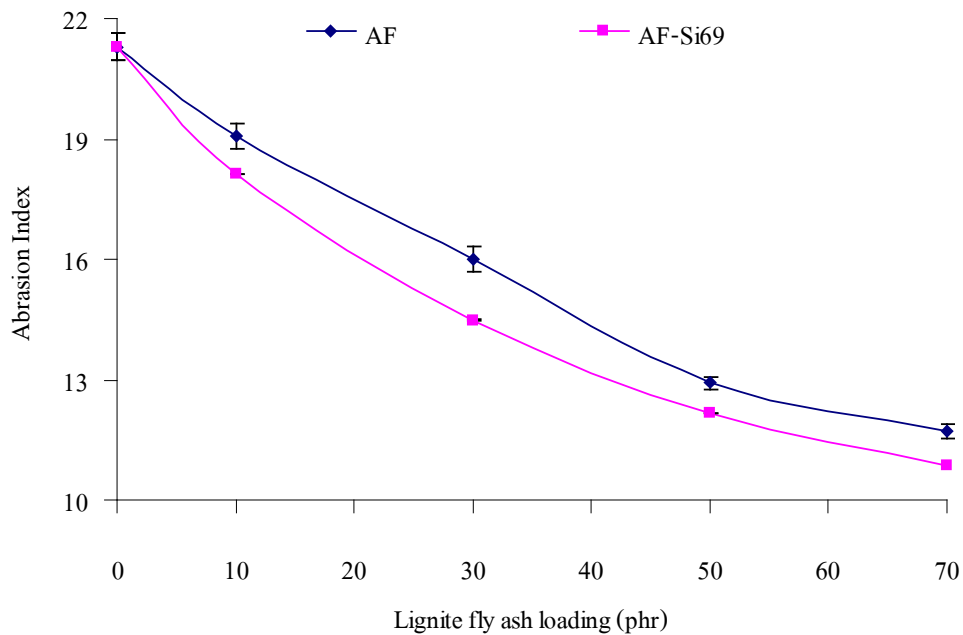
4.3.4 การทดสอบความต้านทานต่อการสึกหรอ

รูปที่ 4.29 แสดงผลของขนาดและปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ที่มีต่อค่าดัชนีการสึกหรอ (Abrasion Index) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงความต้านทานต่อการสึกหรอของยางคอมโพสิต จากการทดสอบพบว่า กรณีของเถ้าลอยลิกไนต์ที่รับมา เถ้าลอยลิกไนต์หยาบ และเถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดมาก ค่าดัชนีการสึกหรอมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์เพิ่มขึ้น โดยค่าดัชนีการสึกหรอของยางคอมโพสิตที่เติมเถ้าลอยลิกไนต์ที่รับมาในปริมาณ 10 phr และ 70 phr มีค่าลดลง 10.43% และ 45.00% ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีสารตัวเติม ส่วนค่าดัชนีการสึกหรอของยางคอมโพสิตที่เติมด้วยเถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดปานกลางมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเติมเถ้าลอยลิกไนต์ลงไป ในปริมาณ 10 phr หลังจากนั้นจะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์เพิ่มขึ้น โดยค่าดัชนีการสึกหรอของยางคอมโพสิตที่เติมเถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดปานกลางในปริมาณ 10 phr มีค่าเพิ่มขึ้น 16.20% เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีสารตัวเติม ค่าดัชนีการสึกหรอจะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์เพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์เพิ่มขึ้น ความต่อเนื่องของเฟสของยาง (rubber phase) ก็จะลดลง ค่าดัชนีการสึกหรอจึงมีค่าลดลงด้วย (Sombatsompop, et al. , 2004)

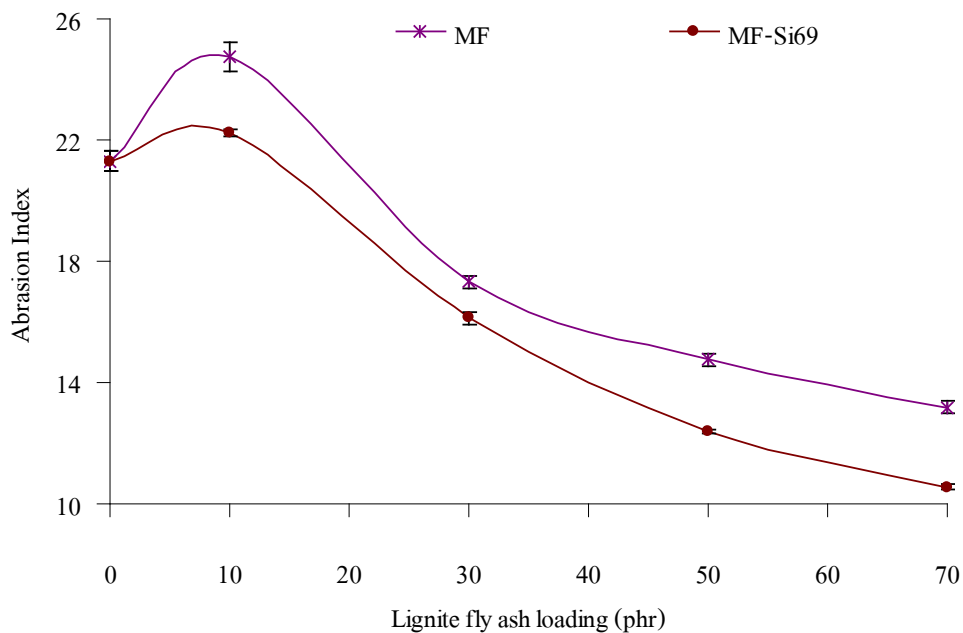


รูปที่ 4.29 ผลของขนาดและปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ต่อค่าดัชนีการสึกหรอ

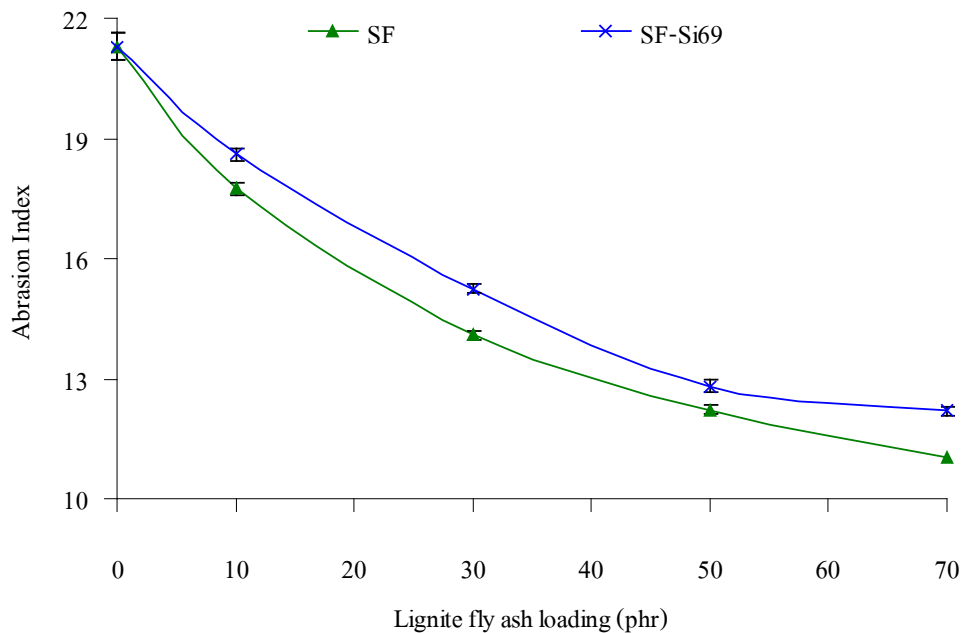
รูปที่ 4.30 - 4.32 แสดงผลของสารคู่ควบไซเลนต่อความต้านทานต่อการสึกหรอของยาง คอมโพสิต โดยรูปที่ 4.30 เป็นกรณีที่ใช้เถ้าลอยลิกไนต์ที่ได้รับมา รูปที่ 4.31 เป็นกรณีที่ใช้เถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดปานกลาง และรูปที่ 4.32 เป็นกรณีที่ใช้เถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดมาก จากการทดสอบพบว่า ความต้านทานต่อการสึกหรอของยางคอมโพสิตที่เติมและไม่เติมสารคู่ควบไซเลนมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก (ไม่เกิน 10%) โดยในกรณีของเถ้าลอยลิกไนต์ที่ได้รับมาและเถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดปานกลาง ค่าดัชนีการสึกหรอมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่เติมสารคู่ควบไซเลน ส่วนในกรณีของเถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดมากพบว่า ค่าดัชนีการสึกหรอมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่เติมสารคู่ควบไซเลน ยางคอมโพสิตที่เติมและไม่เติมสารคู่ควบไซเลน มีค่าดัชนีการสึกหรอที่ไม่ค่อยแตกต่างกันเนื่องจากอนุภาคเถ้าลอยลิกไนต์มีขนาดค่อนข้างใหญ่ ซึ่งจัดอยู่ในประเภทสารตัวเติมกึ่งเสริมแรง (semi reinforcing filler) จึงส่งผลต่อค่า ดัชนีการสึกหรอออกมาอย่างเด่นชัด ทำให้สารคู่ควบไซเลนไม่สามารถแสดงผลของการปรับปรุงสมบัติออกมาได้



รูปที่ 4.30 ผลของสารคู่ควบไซเลนต่อค่าดัชนีการสึกหรอ (กรณีของถ่านลอยลิกไนต์ที่รับมา)



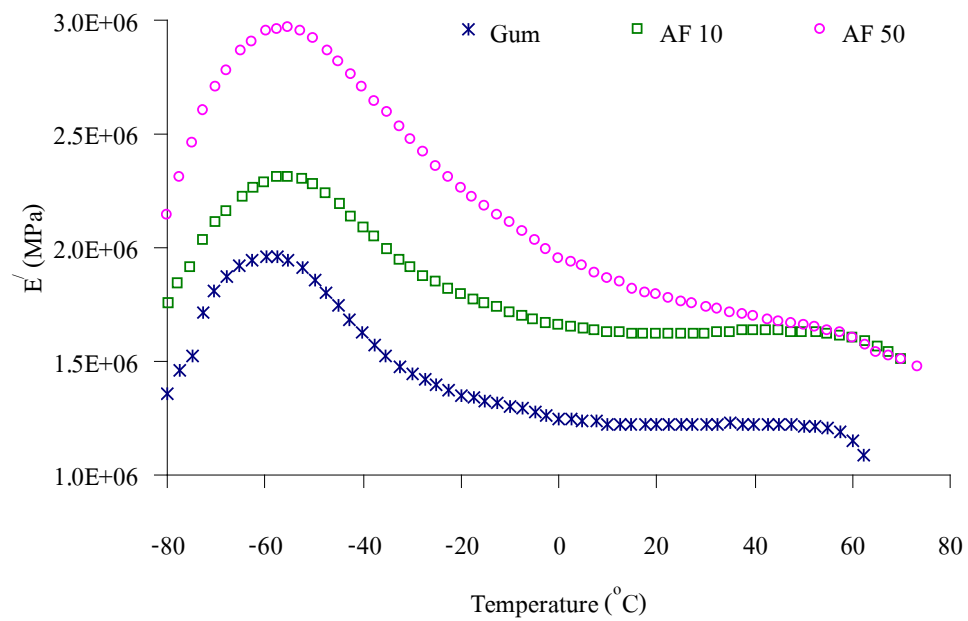
รูปที่ 4.31 ผลของสารคู่ควบไซเลนต่อค่าดัชนีการสึกหรอ (กรณีของถ่านลอยลิกไนต์ละเยียดปานกลาง)



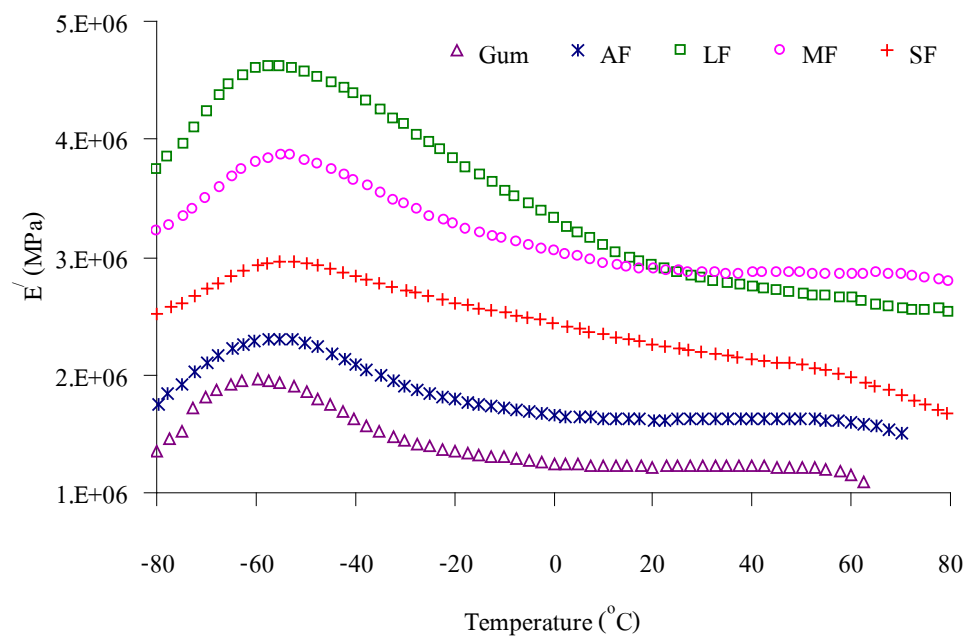
รูปที่ 4.32 ผลของสารคู่ควบไซเลนต่อค่าดัชนีการสึกหรอ (กรณีของถ้ำลอยลิกไนต์ละเอียดมาก)

4.4 การทดสอบสมบัติเชิงพลวัต

รูปที่ 4.33 แสดงผลของปริมาณถ้ำลอยลิกไนต์ต่อค่ามอดุลัสสะสม (storage modulus, E') ของยางคอมโพสิตที่อุณหภูมิต่างๆ โดย Gum หมายถึงยางคอมโพสิตที่ไม่มีสารตัวเติม จากการทดสอบพบว่า ค่ามอดุลัสสะสมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณถ้ำลอยลิกไนต์เพิ่มขึ้น อนุภาคถ้ำลอยลิกไนต์จะอยู่รวมกันเป็นกลุ่มก้อน ยางจะแทรกเข้าไปอยู่ในช่องว่างระหว่างอนุภาคถ้ำลอยลิกไนต์ ในการทดสอบจะเป็นการทดสอบที่มีการเปลี่ยนรูปต่ำมาก (strain 0.5%) อนุภาคถ้ำลอยลิกไนต์จึงยังจับกลุ่มกันอยู่ได้ โมเลกุลของยางที่แทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างกลุ่มถ้ำลอยลิกไนต์จึงถูกรั้งไว้ ทำให้สามารถเคลื่อนที่ได้ยาก ส่งผลให้ค่ามอดุลัสสะสมมีค่าสูงขึ้น (Da Costa, et al. , 2000) รูปที่ 4.34 แสดงผลของขนาดอนุภาคถ้ำลอยลิกไนต์ต่อค่ามอดุลัสสะสมของยางคอมโพสิต ในกรณีที่เติมถ้ำลอยลิกไนต์ลงไป 10 phr จากการทดสอบพบว่า ค่ามอดุลัสสะสมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อถ้ำลอยลิกไนต์มีขนาดอนุภาคเล็กลง จนกระทั่งมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 10 ไมครอน ค่ามอดุลัสสะสมจะมีค่าสูงสุด หลังจากนั้นเมื่ออนุภาคถ้ำลอยลิกไนต์มีขนาดเล็กลงไปอีกค่ามอดุลัสสะสมจะมีค่าลดลง ขนาดอนุภาคถ้ำลอยลิกไนต์ที่เล็กลงจะทำให้ช่องว่างระหว่างอนุภาคมีขนาดเล็กลงด้วย โมเลกุลของยางที่ถูกรั้งไว้ในช่องว่างนี้จึงลดลง โมเลกุลของยางจะเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น ค่ามอดุลัสสะสมจึงลดลง

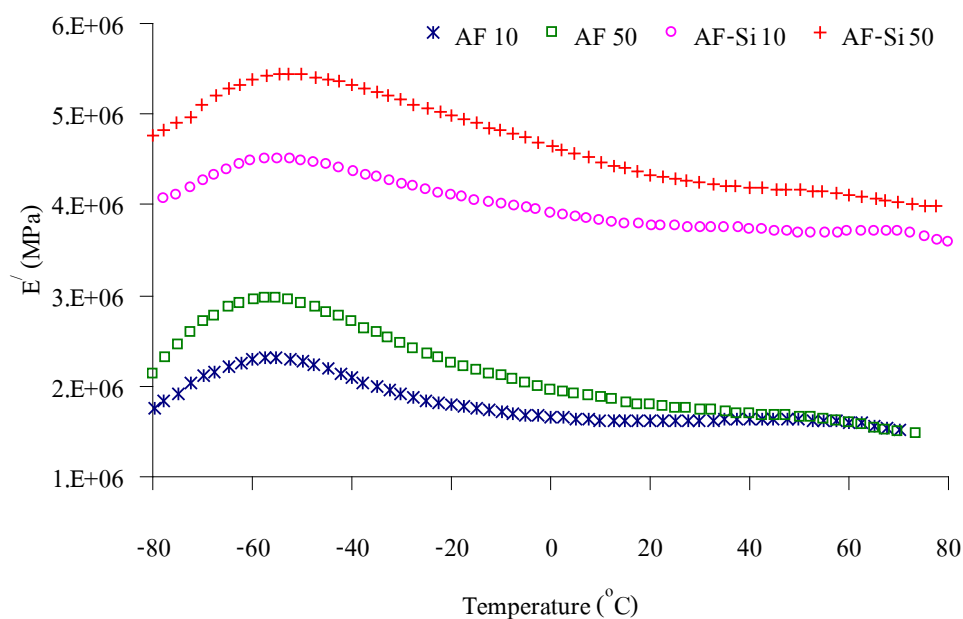


รูปที่ 4.33 ผลของปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ต่อค่ามอดูลัสสะสม

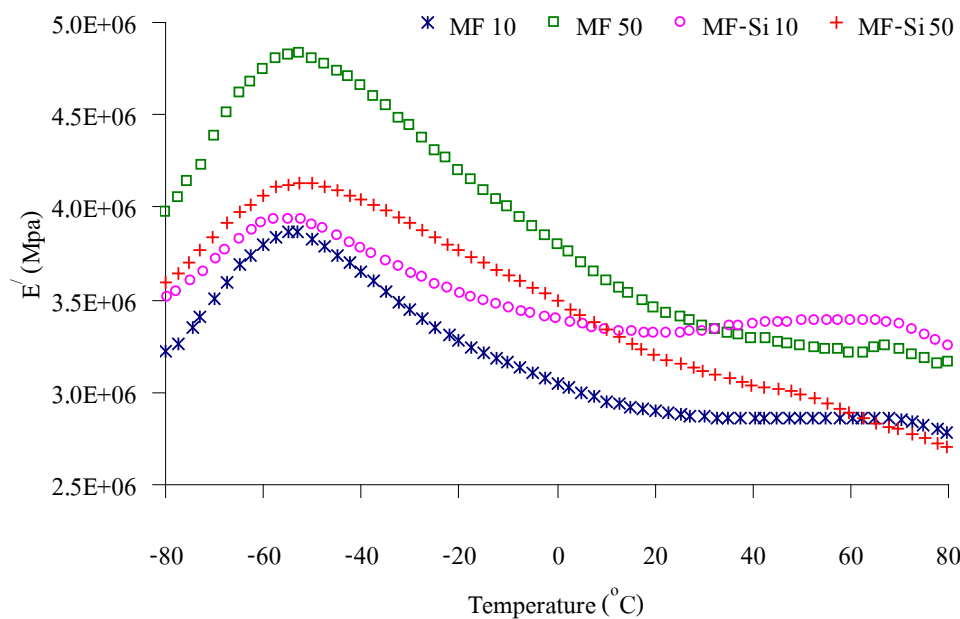


รูปที่ 4.34 ผลของขนาดอนุภาคเถ้าลอยลิกไนต์ต่อค่ามอดูลัสสะสม (เมื่อเติมเถ้าลอยลิกไนต์ลงไป 10 phr)

รูปที่ 4.35 และ 4.36 แสดงผลของสารคู่ควบไซเลนต่อค่ามอดุลัสสะสมของยางคอมโพสิต ที่เติมถั่วลยถิกไนต์ลงไป 10 และ 50 phr โดยรูปที่ 4.35 เป็นกรณีของถั่วลยถิกไนต์ที่ได้รับมา และรูปที่ 4.36 เป็นกรณีของถั่วลยถิกไนต์ละเอียดปานกลาง จากการทดสอบพบว่า ในกรณีของถั่วลยถิกไนต์ที่ได้รับมา การเติมสารคู่ควบไซเลนลงไปในยางคอมโพสิตช่วยให้มอดุลัสสะสมมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนกรณีของถั่วลยถิกไนต์ละเอียดปานกลางพบว่า เมื่อเติมถั่วลยถิกไนต์ลงไป 10 phr และเติมสารคู่ควบไซเลนลงไปด้วยจะทำให้ค่ามอดุลัสสะสมมีค่าเพิ่มขึ้น



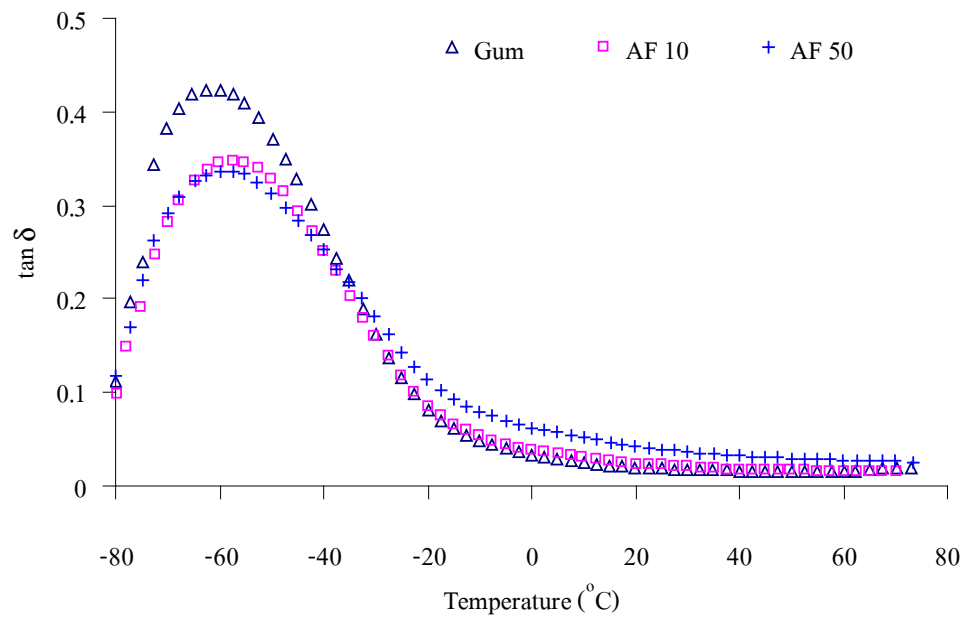
รูปที่ 4.35 ผลของสารคู่ควบไซเลนต่อค่ามอดุลัสสะสม (กรณีของถั่วลยถิกไนต์ที่ได้รับมา)



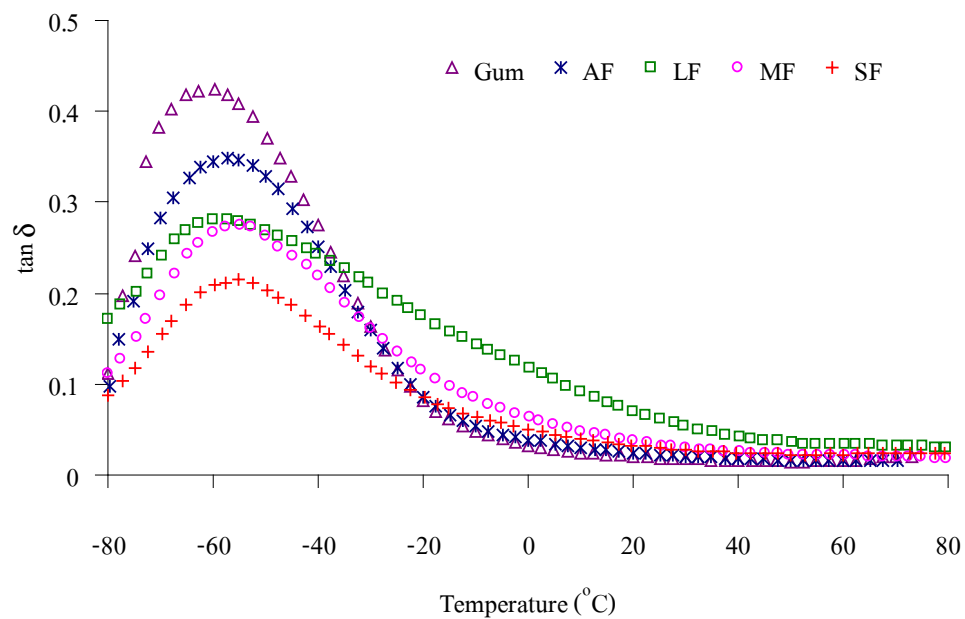
รูปที่ 4.36 ผลของสารคู่ควบไซเลนต่อค่ามอดุลัสสะสม (กรณีของแก้วลอลิกไนต์ละเอียดปานกลาง)

รูปที่ 4.37 แสดงผลของปริมาณแก้วลอลิกไนต์ต่อค่าตัวประกอบของการสูญเสีย (loss factor, $\tan \delta$) จากการทดสอบพบว่า ค่าตัวประกอบของการสูญเสียสูงสุด ($\tan \delta_{\max}$) มีค่าลดลงเมื่อปริมาณแก้วลอลิกไนต์เพิ่มขึ้น โดยยางคอมโพสิตที่เติมแก้วลอลิกไนต์ที่รับมาลงไปในปริมาณ 10 และ 50 phr มีค่าตัวประกอบของการสูญเสียลดลง 17.74% และ 20.47% เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีสารตัวเติมอันเนื่องมาจาก stiffness ที่เพิ่มขึ้น ส่วนรูปที่ 4.38 แสดงผลของขนาดอนุภาคแก้วลอลิกไนต์ต่อค่าตัวประกอบของการสูญเสีย จะเห็นได้ว่า ค่าตัวประกอบของการสูญเสียสูงสุดมีค่าลดลงเมื่ออนุภาคแก้วลอลิกไนต์มีขนาดเล็กลง โดยค่าตัวประกอบของการสูญเสียของยางคอมโพสิตที่เติมแก้วลอลิกไนต์ละเอียดมากลงไปในปริมาณ 10 phr มีค่าลดลงประมาณ 49.41% เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีสารตัวเติม การเปลี่ยนแปลงของค่าตัวประกอบของการสูญเสียสูงสุดเนื่องมาจากสารตัวเติมอยู่รวมกันเป็นกลุ่มก้อนจะมีผลต่อการเคลื่อนตัวของโมเลกุลยาง การเติมแก้วลอลิกไนต์ลงไปในยางคอมโพสิตจะเป็นการเพิ่มโครงสร้างสารตัวเติม (filler network) ซึ่งจะไปกีดขวางการเคลื่อนตัวของโมเลกุลยางในขณะที่ยางคอมโพสิตเกิดการผิดรูปเชิงพลวัต จึงทำให้ค่าตัวประกอบของการสูญเสียสูงสุดมีค่าลดลง (Sombatsompop, et al. , 2004) จากการศึกษาอุณหภูมิสภาพแก้ว (T_g) ซึ่งก็คือค่าอุณหภูมิที่มีค่าตัวประกอบของการสูญเสียสูงสุด พบว่า อุณหภูมิสภาพแก้วมีค่าสูงขึ้น โดยในกรณีที่ไม่มีสารตัวเติม อุณหภูมิสภาพแก้วมีค่าเท่ากับ -60.4°C และเมื่อเติมแก้วลอลิกไนต์ที่รับมาลงไปในปริมาณ 10 และ 50 phr อุณหภูมิสภาพแก้วจะมีค่าสูงขึ้นเป็น

-58.04°C และ -57.47°C ตามลำดับ การที่อุณหภูมิสภาพแก้วมีค่าสูงขึ้นก็หมายถึงช่วงการมีสภาพเป็นยาง (rubber region) มีการขยับไปอยู่ในช่วงของอุณหภูมิที่สูงขึ้น ทำให้ยางสามารถใช้งานในอุณหภูมิที่สูงขึ้นได้

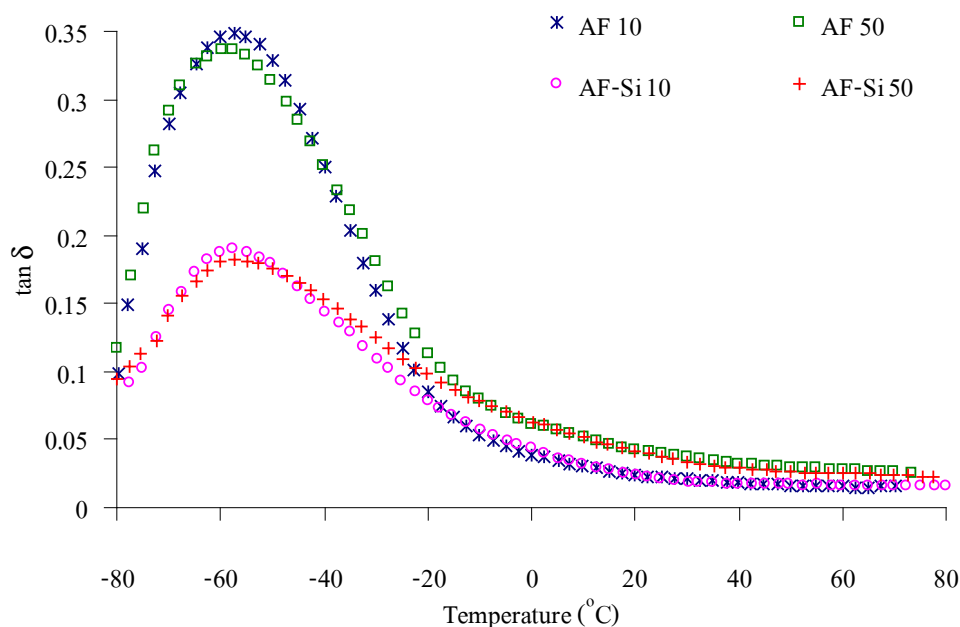


รูปที่ 4.37 ผลของปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ต่อค่าตัวประกอบของการสูญเสีย

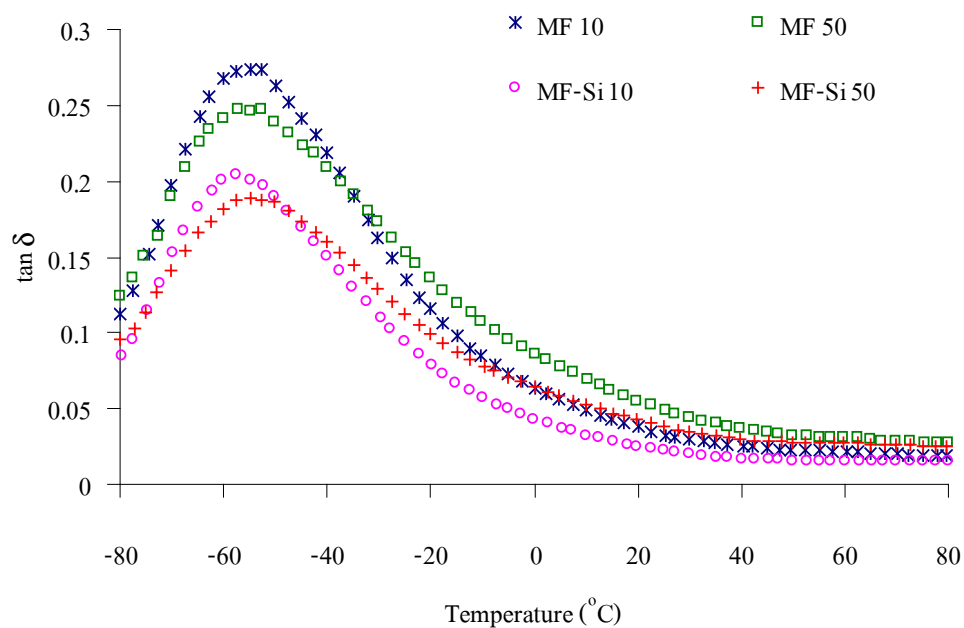


รูปที่ 4.38 ผลของขนาดอนุภาคเถ้าลอยลิกไนต์ต่อค่าตัวประกอบของการสูญเสีย (เมื่อเติมเถ้าลอยลิกไนต์ 10 phr)

รูปที่ 4.39 และ 4.40 แสดงผลของสารคู่ควบไซเลนต่อค่าตัวประกอบของการสูญเสียของยางคอมโพสิตที่เติมถั่วลยถิกไนต์ลงไป 10 และ 50 phr โดยรูปที่ 4.39 เป็นกรณีของถั่วลยถิกไนต์ที่รับมา และรูปที่ 4.40 เป็นกรณีของถั่วลยถิกไนต์ละเอียดปานกลาง จากการทดสอบพบว่า การเติมสารคู่ควบไซเลนลงไปยางคอมโพสิตจะช่วยทำให้ค่าตัวประกอบของการสูญเสียสูงสุดมีค่าลดลง โดยในกรณีที่เติมถั่วลยถิกไนต์ที่รับมาลงไป 10 และ 50 phr ค่าตัวประกอบของการสูญเสียสูงสุดมีค่าลดลงประมาณ 45.38% และ 45.92% ตามลำดับ จากการศึกษาอุณหภูมิสภาพแก้วพบว่า อุณหภูมิสภาพแก้วของยางคอมโพสิตที่เติมสารคู่ควบไซเลน ลงไปด้วย ค่าอุณหภูมิสภาพแก้ว จะมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อยประมาณ 1-2°C



รูปที่ 4.39 ผลของสารคู่ควบไซเลนต่อค่าตัวประกอบของการสูญเสีย (กรณีของถั่วลยถิกไนต์ที่รับมา)

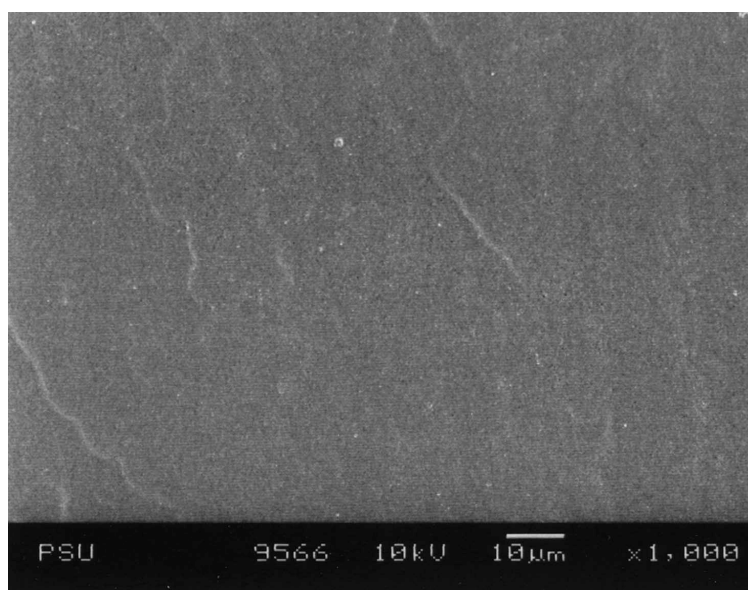


รูปที่ 4.40 ผลของสารคู่ควบไซเลนต่อค่าตัวประกอบของการสูญเสีย (กรณีของแก้วลอลิกไนต์ละเอียดปานกลาง)

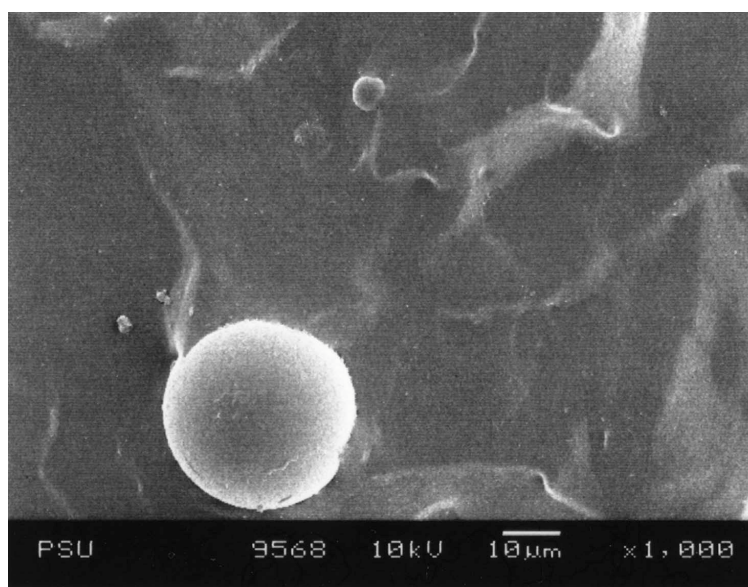
4.5 การศึกษาการกระจายตัวของอนุภาคแก้วลอลิกไนต์ในเนื้อยาง

รูปที่ 4.41 - 4.46 แสดงภาพถ่ายบริเวณพื้นที่หน้าตัดของยางคอมโพสิตที่นำไปหักในไนโตรเจนเหลวด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยรูปที่ 4.41 เป็นยางคอมโพสิตที่ไม่มีสารตัวเติม รูปที่ 4.42 และ 4.43 เป็นยางคอมโพสิตที่เติมแก้วลอลิกไนต์ที่รับมา 10 และ 50 phr ตามลำดับ รูปที่ 4.44 เป็นยางคอมโพสิตที่เติมแก้วลอลิกไนต์ละเอียดมาก 50 phr รูปที่ 4.45 เป็นยางคอมโพสิตที่เติมแก้วลอลิกไนต์ละเอียดมาก 50 phr และเติมสารคู่ควบไซเลนลงไปด้วย และรูปที่ 4.46 เป็นยางคอมโพสิตที่เตรียมจากน้ำยางข้นและเติมแก้วลอลิกไนต์ที่รับมา 30 phr จากการศึกษาพบว่า เมื่อเติมแก้วลอลิกไนต์ลงไปปริมาณน้อย การกระจายตัวของแก้วลอลิกไนต์ยังกระจายตัวได้อย่างสม่ำเสมอ แต่เมื่อเติมลงไปปริมาณที่มากขึ้น การกระจายตัวของแก้วลอลิกไนต์จะเป็นไปได้ยากขึ้น เกิดตำหนิขึ้นในเนื้อยางดังเช่นในรูปที่ 4.43 ซึ่งการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอนี้จะทำให้ความแข็งแรงดึงของยางคอมโพสิตลดลง ซึ่งสามารถนำไปช่วยอธิบายเพิ่มเติมในส่วนของสมบัติการดึงของยางคอมโพสิต เมื่อแก้วลอลิกไนต์มีขนาดอนุภาคเล็กลง แก้วลอลิกไนต์จะกระจายตัวได้ดีขึ้นสังเกตได้จากรูปที่ 4.44 ความต่อเนื่องระหว่างเฟสยางกับแก้วลอลิกไนต์จะมีความต่อเนื่องเพิ่มขึ้น สารคู่ควบไซเลนที่เติมลงไปจะช่วยปรับปรุงพันธะระหว่างยางและแก้วลอลิกไนต์ ทำให้เนื้อ

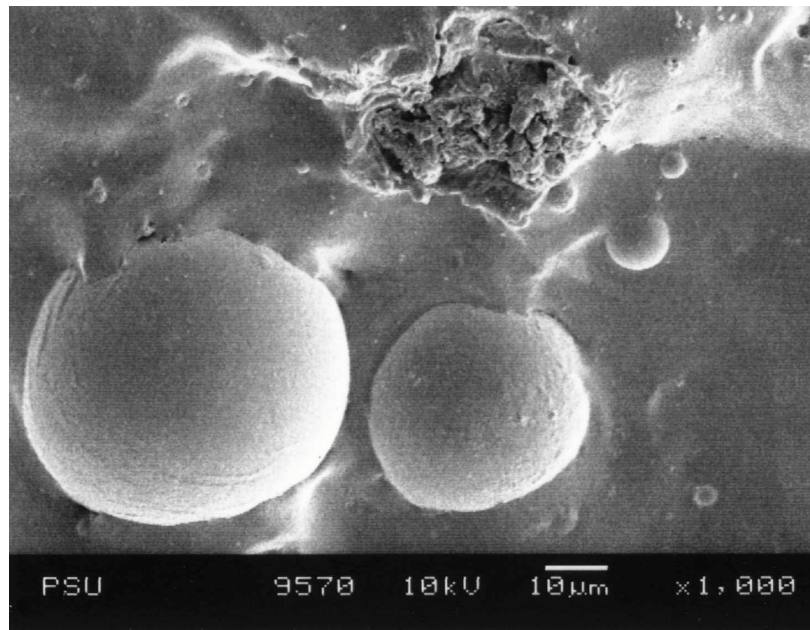
ยางมีความต่อเนื่องมากขึ้น การส่งถ่ายแรงจากเฟสยางไปสู่เส้นลวดไนล่อนดีขึ้น ทำให้สมรรถนะดีขึ้น การศึกษาการกระจายตัวของเส้นลวดไนล่อนของยางคอมพอสิตที่เตรียมจากน้ำยางข้น (รูปที่ 4.46) เมื่อเปรียบเทียบกับยางคอมพอสิตที่เตรียมจากยางแห้งพบว่า การกระจายตัวของเส้นลวดไนล่อนในเนื้อยางมีความสม่ำเสมอใกล้เคียงกัน เนื่องจากยางจะถูกนำมาผสมกับสารเคมีอื่นๆ บนเครื่องผสมยางสองลูกกลิ้งด้วย จึงทำให้เส้นลวดไนล่อนกระจายตัวได้ดี



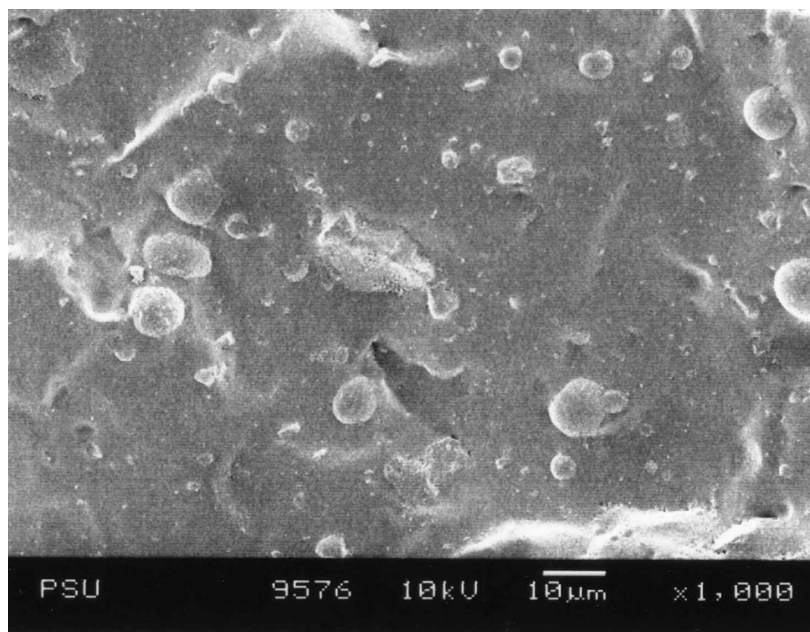
รูปที่ 4.41 ภาพถ่ายด้วยกล้อง SEM ของยางคอมพอสิตที่ไม่มีสารตัวเติม



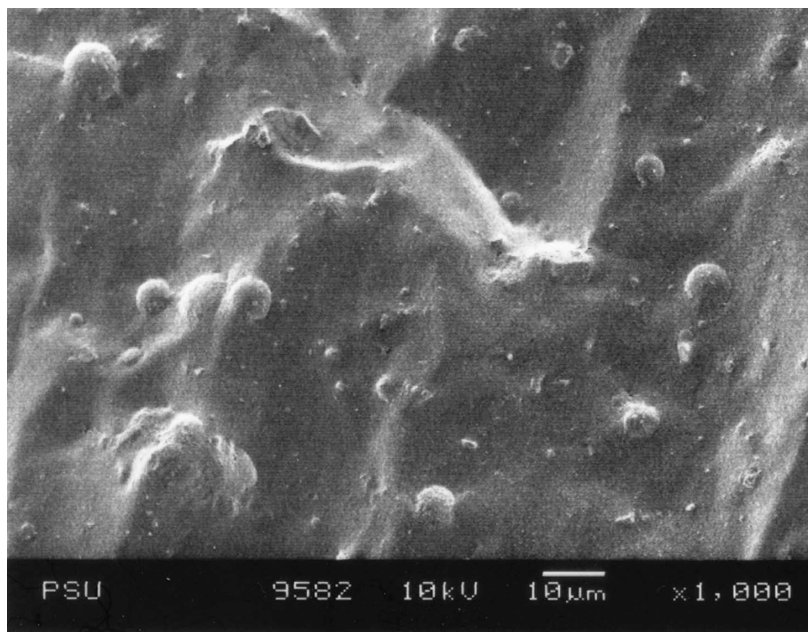
รูปที่ 4.42 ภาพถ่ายด้วยกล้อง SEM ของยางคอมพอสิตที่เติมเส้นลวดไนล่อนที่รับมา 10 phr



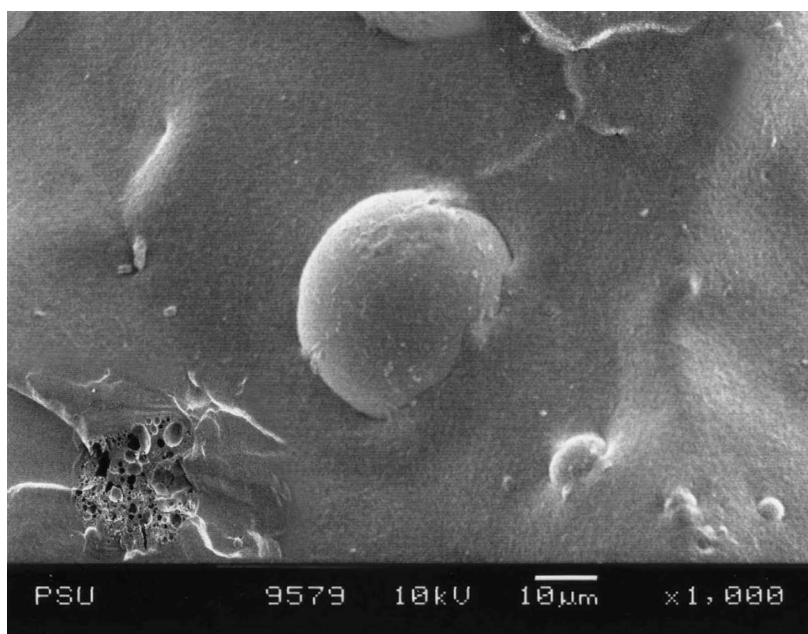
รูปที่ 4.43 ภาพถ่ายด้วยกล้อง SEM ของยางคอมพอสิตที่เติมแก้วลอยลิกไนต์ที่รับมา 50 phr



รูปที่ 4.44 ภาพถ่ายด้วยกล้อง SEM ของยางคอมพอสิตที่เติมแก้วลอยลิกไนต์ละเอียดมาก 50 phr



รูปที่ 4.45 ภาพถ่ายด้วยกล้อง SEM ของยางคอมพอสิตที่เติมถั่วลยลิกไนต์ละเอียดมาก 50 phr และเติมสารกุ่มวบไซเลนด้วย



รูปที่ 4.46 ภาพถ่ายด้วยกล้อง SEM ของยางคอมพอสิตที่เติมถั่วลยลิกไนต์ที่รับมา 30 phr โดยใช้ น้ำยางชั้นในการเตรียมยางคอมพอสิต

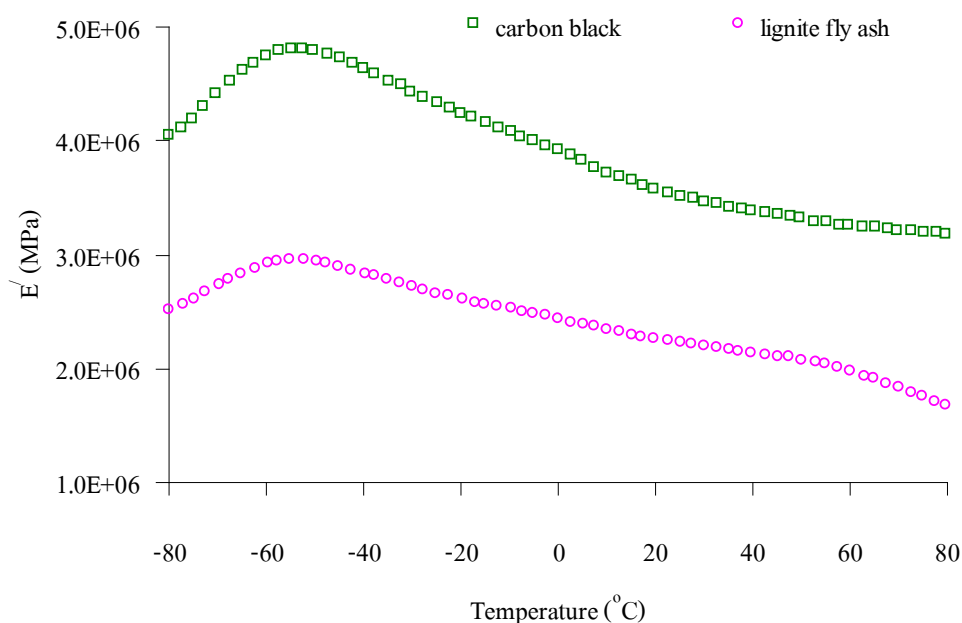
4.6 การเปรียบเทียบสมบัติกับยางที่เติมด้วยเขม่าดำ

ตารางที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลระหว่างยางคอมพอสิตที่ไม่มีสารตัวเติม ยางคอมพอสิตที่เติมถั่วลยถิกไนต์ละเอียดมาก 10 phr และยางคอมพอสิตที่เติมเขม่าดำ 30 phr เนื่องจากการเติมถั่วลยถิกไนต์ละเอียดมาก 10 phr จะทำให้มีสมบัติเชิงกลในภาพรวมเด่นเมื่อเทียบกับยางคอมพอสิตสูตรอื่นๆ ส่วนการเติมเขม่าดำ 30 phr จะทำให้เขม่าดำแสดงประสิทธิภาพของการเสริมแรงออกมาอย่างเด่นชัด จึงเลือกยางทั้งสองสูตรมาเปรียบเทียบกัน จากการทดสอบพบว่า ระยะเวลาเมื่อขาดของยางคอมพอสิตที่เติมถั่วลยถิกไนต์มีค่ามากกว่ายางคอมพอสิตที่เติมด้วยเขม่าดำประมาณ 41.29% แต่สมบัติด้านอื่นๆ มีค่าน้อยกว่า โดยความแข็งแรงดึงมีค่าน้อยกว่าประมาณ 21.97% โมดูลัสที่ระยะยืด 300% และ 500% มีค่าน้อยกว่า 61.20% และ 59.10% ตามลำดับ ความต้านทานต่อการฉีกขาดมีค่าน้อยกว่า 23.33% ความแข็งมีค่าน้อยกว่า 19.21% และดัชนีการสึกหรอมีค่าน้อยกว่า 68.02% สมบัติของยางคอมพอสิตที่เติมด้วยถั่วลยถิกไนต์ดี้อยกว่ากรณีที่เติมด้วยเขม่าดำ เนื่องจากเขม่าดำมีขนาดอนุภาคปฐมภูมิที่เล็กกว่า จึงมีพื้นที่ผิวในการสร้างพันธะกับโมเลกุลของยางมากกว่า นอกจากนี้บริเวณผิวของเขม่าดำจะมีหมู่ฟังก์ชันเคมีต่างๆ เช่น คาร์บอกซิล (carboxyl) ไฮดรอกซิล (hydroxyl) และฟีนอลิก (phenolic) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีกับโมเลกุลของยางได้ (พงษ์ธร แซ่ฮุย, 2548)

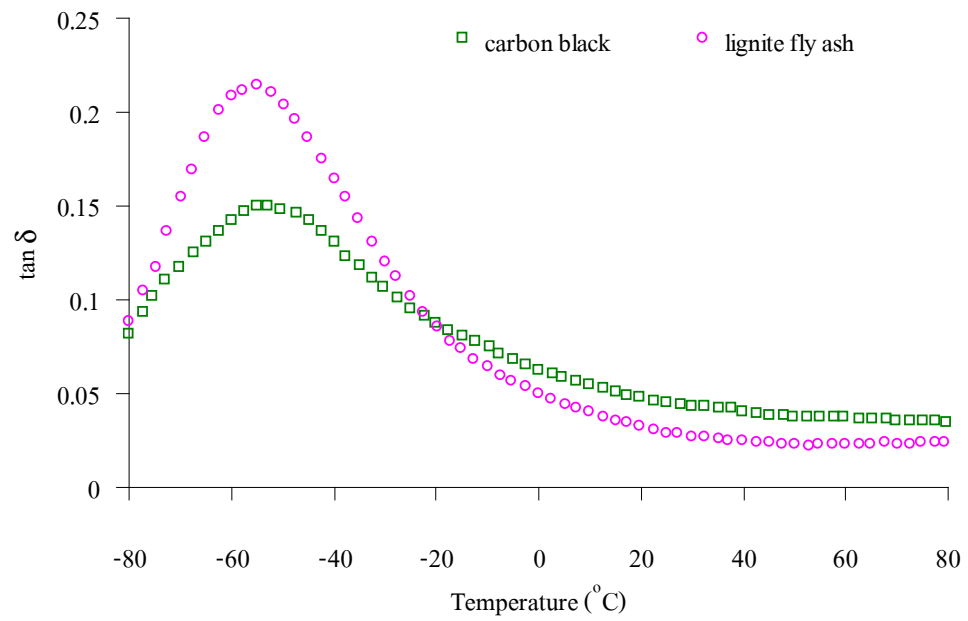
ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลระหว่างยางคอมพอสิตที่ไม่มีสารตัวเติมเติมด้วยถั่วลยถิกไนต์ละเอียดมาก และเติมด้วยเขม่าดำ

สมบัติ	ยางคอมพอสิตที่ไม่มีสารตัวเติม	ยางคอมพอสิตที่เติมถั่วลยถิกไนต์ละเอียดมาก	ยางคอมพอสิตที่เติมเขม่าดำ
ความแข็งแรงดึง (MPa)	28.8	25.0	32.1
ระยะเวลาเมื่อขาด (%)	968	850	602
โมดูลัสที่ระยะยืด 300% (MPa)	0.774	0.935	2.41
โมดูลัสที่ระยะยืด 500% (MPa)	1.018	1.272	3.11
ความต้านทานต่อการฉีกขาด (kN/m)	37.0	33.7	43.9
ความแข็ง (Shore A)	40.3	42.9	53.1
ดัชนีการสึกหรอ	21.29	17.74	55.5

รูปที่ 4.47 และ 4.48 แสดงผลการเปรียบเทียบสมบัติเชิงพลวัตระหว่างยางคอมโพสิตที่เติมถ่านลิกไนต์ละเอียดมาก 10 phr กับยางคอมโพสิตที่เติมเขม่าดำ 30 phr โดยรูปที่ 4.47 เป็นการเปรียบเทียบค่ามอดุลัสสะสม และรูปที่ 4.48 เป็นการเปรียบเทียบค่าตัวประกอบของการสูญเสีย พบว่า มอดุลัสสะสมของยางคอมโพสิตที่เติมเขม่าดำมีค่าสูงกว่ามอดุลัสสะสมของยางคอมโพสิตที่เติมถ่านลิกไนต์ และยางคอมโพสิตที่เติมเขม่าดำมีค่าตัวประกอบของการสูญเสียสูงสุดต่ำกว่ายางคอมโพสิตที่เติมถ่านลิกไนต์ ยางคอมโพสิตที่เติมเขม่าดำจะมีค่ามอดุลัสสะสม ที่สูงเนื่องจาก โครงสร้างของโพลีซัลไฟด์จะสั้นและมีเสถียรภาพ (จำนวน x ที่น้อยในโครงสร้าง R-S-S_x-S-R') ทำให้สมบัติเชิงกลดีขึ้น มีหมูฟกัซันเคมีที่ว่องไวทางปฏิกิริยาอยู่บนพื้นผิว ซึ่งจะ ทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างยางกับพื้นผิวเขม่าดำในช่วงของการผสม (Da Costa, et al. , 2000)



รูปที่ 4.47 การเปรียบเทียบค่ามอดุลัสสะสมระหว่างยางคอมโพสิตที่เติมเขม่าดำและเติมถ่านลิกไนต์ละเอียดมาก



รูปที่ 4.48 การเปรียบเทียบค่าตัวประกอบของการสูญเสียระหว่างยางคอมพโพลิตที่เติมเขม่าดำและเติมถ้ำลอยลิกไนต์ละเอียดมาก