

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

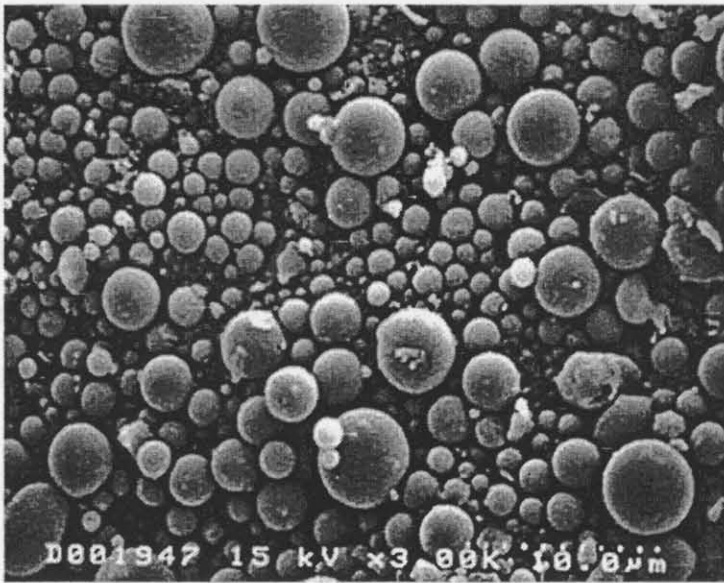
#### 4.1 การเตรียมเถ้าลอยลิกไนต์

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

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของเถ้าลอยลิกไนต์

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

เถ้าลอยลิกไนต์ที่รับมา (AF) จะมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 150  $\mu\text{m}$  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

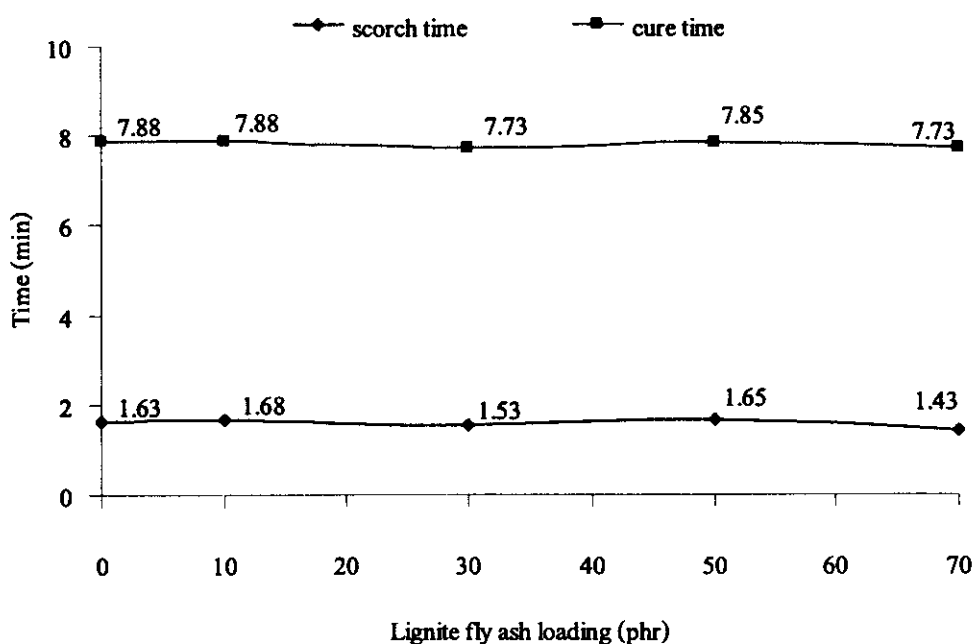
ตารางที่ 4.2 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของเส้นใยคาร์บอนทั้ง 4 ขนาด

	เส้นใยคาร์บอนที่รับมา (AF)		เส้นใยคาร์บอนหยาบ (LF)		เส้นใยคาร์บอนละเอียดปานกลาง (MF)		เส้นใยคาร์บอนละเอียดมาก (SF)	
	1	2	1	2	1	2	1	2
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย ( $\mu\text{m}$ )	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 ( $\mu\text{m}$ )	15.95		10.50		4.98		2.19	
ช่วงของขนาดอนุภาค ( $\mu\text{m}$ )	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 และระยะเวลาในการวัลคาไนซ์ของยางคอมพอสิตก่อนข้างคั่งที่เมื่อปริมาณเส้นใยคาร์บอนเพิ่มขึ้น โดยผลต่างระหว่างค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของทั้งระยะเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคง

รูปและระยะเวลาในการวัลคาไนซ์มีค่าประมาณ 10 วินาที ซึ่งถือว่าน้อยเมื่อเทียบกับระยะเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูปและระยะเวลาในการวัลคาไนซ์ และผลการทดสอบที่ออกมาสอดคล้องกับการศึกษาการเติมซิลิกาและถ่านลอยลิกไนต์ในทางธรรมชาติของ Sombatsompop, et al. (2004) ซึ่งทำการศึกษาดังผลของปริมาณซิลิกาและถ่านลอยลิกไนต์ต่อระยะเวลาในการวัลคาไนซ์ แรงบิดต่ำสุด และแรงบิดสูงสุดของยางคอมปาวด์ จากการศึกษาพบว่าเมื่อปริมาณซิลิกาเพิ่มขึ้นทำให้ระยะเวลาในการวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้น แต่ในกรณีของถ่านลอยลิกไนต์ระยะเวลาในการวัลคาไนซ์มีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณถ่านลอยลิกไนต์ที่เพิ่มขึ้น ระยะเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูปและระยะเวลาในการวัลคาไนซ์ของยางคอมโพสิตที่เติมด้วยถ่านลอยลิกไนต์ค่อนข้างคงที่ เนื่องจากสารเร่งปฏิกิริยาจะถูกดูดซับไว้ที่บริเวณผิวของ  $\text{SiO}_2$  ทำให้ระยะเวลาในการวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้น แต่โลหะออกไซด์ที่มีอยู่มากในถ่านลอยลิกไนต์ดังในตารางที่ 4.1 เช่น  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  และ  $\text{CaO}$  เป็นต้น จะทำหน้าที่เป็นเหมือนสารเร่งปฏิกิริยาและสารกระตุ้นปฏิกิริยาในกระบวนการวัลคาไนซ์ ทำให้ระยะเวลาในการวัลคาไนซ์ลดลง ดังนั้นทั้งระยะเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูปและระยะเวลาในการวัลคาไนซ์จึงค่อนข้างคงที่ ส่วนผลของขนาดอนุภาคถ่านลอยลิกไนต์ซึ่งไม่ได้ทำการศึกษา แต่จากการทำการทดลองพบว่าขนาดอนุภาคถ่านลอยลิกไนต์ไม่มีผลต่อลักษณะการวัลคาไนซ์ ส่วนการวิเคราะห์การวัลคาไนซ์พบว่ายางที่เติมถ่านลอยโดยไม่เติมกำมะถัน ไม่แสดงพฤติกรรมของการเชื่อมโยงของโมเลกุล

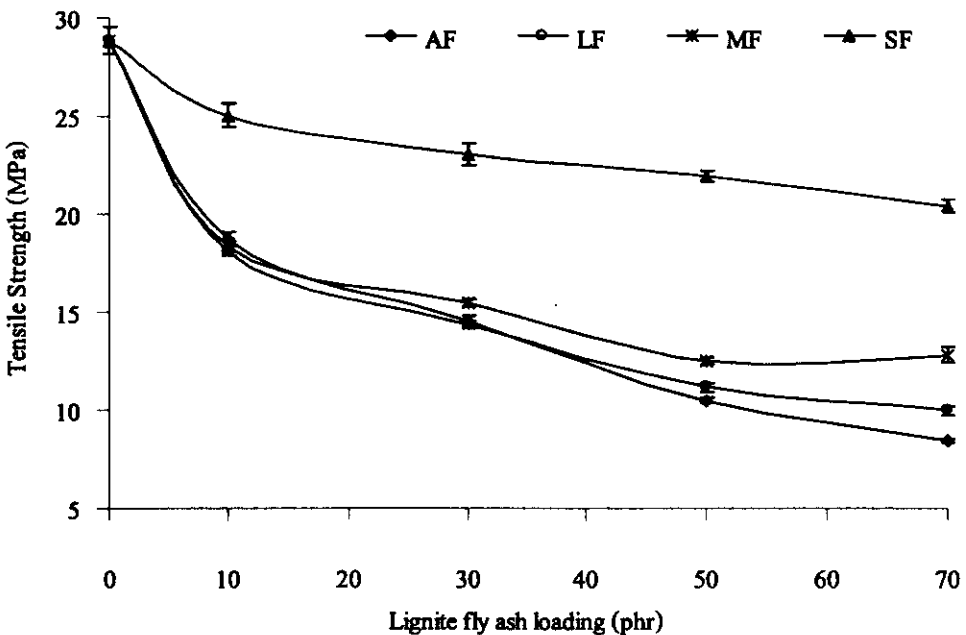


รูปที่ 4.2 ผลการทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ของยาง

### 4.3 การทดสอบสมบัติเชิงกล

#### 4.3.1 การทดสอบสมบัติการดึง

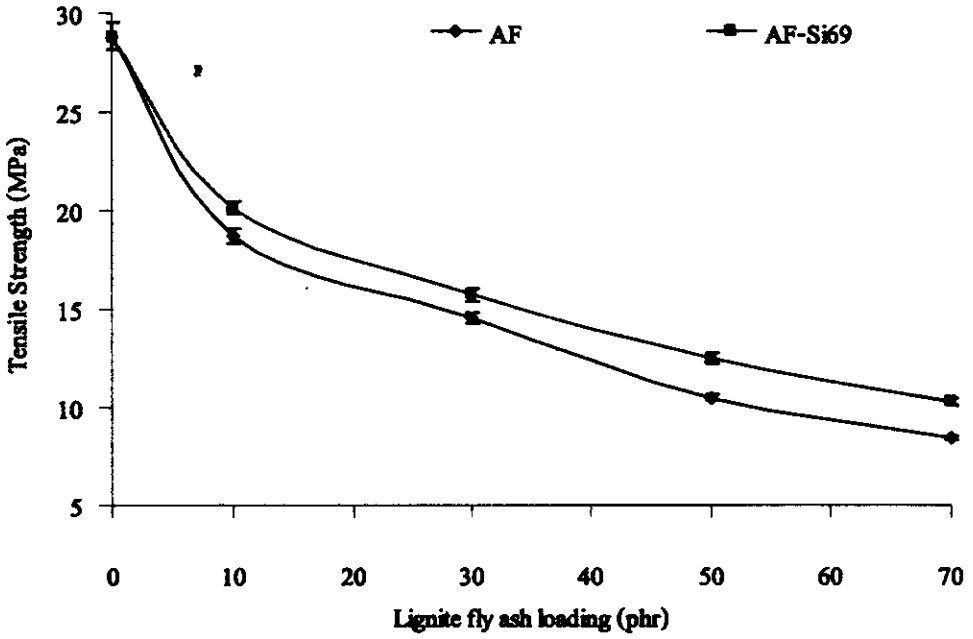
รูปที่ 4.3 แสดงผลของขนาดและปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ที่มีต่อความแข็งแรงดึงของยางคอมโพสิต จากผลการทดสอบพบว่า ความแข็งแรงดึงมีค่าลดลงตามปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ที่เพิ่มขึ้น โดยความแข็งแรงดึงของยางคอมโพสิตที่เติมเถ้าลอยลิกไนต์ที่รับมา (AF) ในปริมาณ 10 phr และ 70 phr มีค่าลดลง 35.28% และ 70.83% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีสารตัวเติม 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



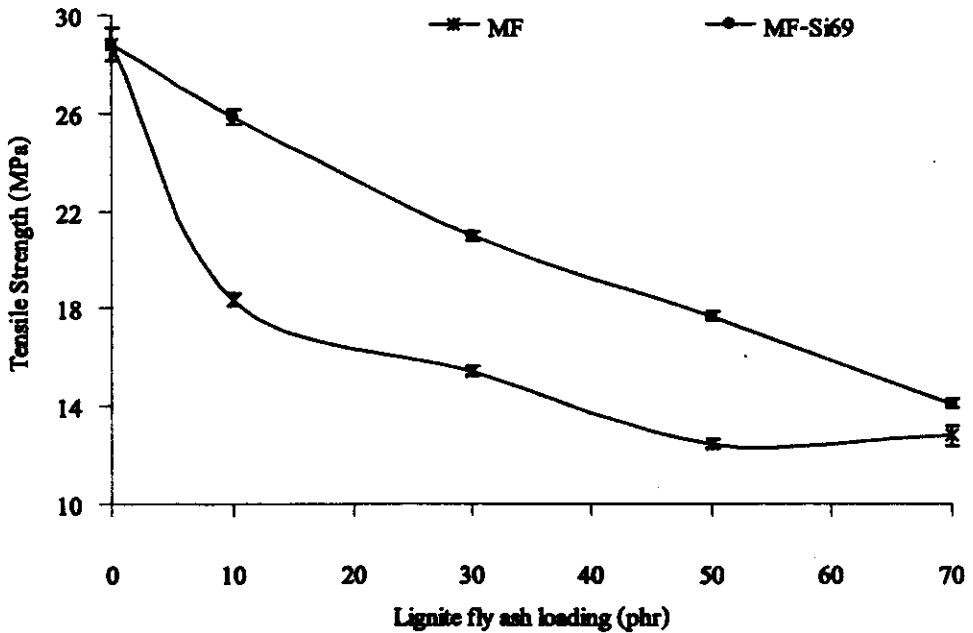
รูปที่ 4.3 ผลของขนาดและปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ต่อความแข็งแรงดึง

อย่างไรก็ตาม ในการศึกษาผลของขนาดอนุภาคเถ้าลอยลิกไนต์ต่อความแข็งแรงคิงพบว่า ในกรณีที่ใช้เถ้าลอยลิกไนต์ที่รับมา เถ้าลอยลิกไนต์หยาบ (LF) และเถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดปานกลาง (MF) ความแข็งแรงคิงมีค่าไม่แตกต่างกันมากนักเมื่อเติมในปริมาณน้อยๆ แต่ในกรณีของเถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดมาก (SF) จะมีค่าสูงกว่าเถ้าลอยลิกไนต์ขนาดอื่นๆ โดยความแข็งแรงคิงของยางคอมโพสิตที่เติมเถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดมากในปริมาณ 10 phr และ 70 phr มีค่าลดลง 13.15% และ 29.21% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการเติม และมียูทิลิตี้คิงที่เติมด้วยเถ้าลอยลิกไนต์ที่รับมาที่ส่วนผสมเดียวกัน 34.19% และ 142.7% ตามลำดับ ยางคอมโพสิตที่เติมด้วยเถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดมากมีค่าความแข็งแรงคิงสูงกว่ากรณีที่เติมด้วยเถ้าลอยลิกไนต์ขนาดอื่นๆ เนื่องจากอนุภาคที่มีขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักสูงกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ ทำให้มีพื้นที่ที่จะเกิดแรงกระทำระหว่างสารตัวเติมกับยางมากกว่า การถ่ายเทแรงจากเฟสยางไปสู่เถ้าลอยลิกไนต์จะถ่ายเทได้มากขึ้น ความแข็งแรงคิงจึงมีค่าสูงกว่า (Sombatsompop, et al. , 2004)

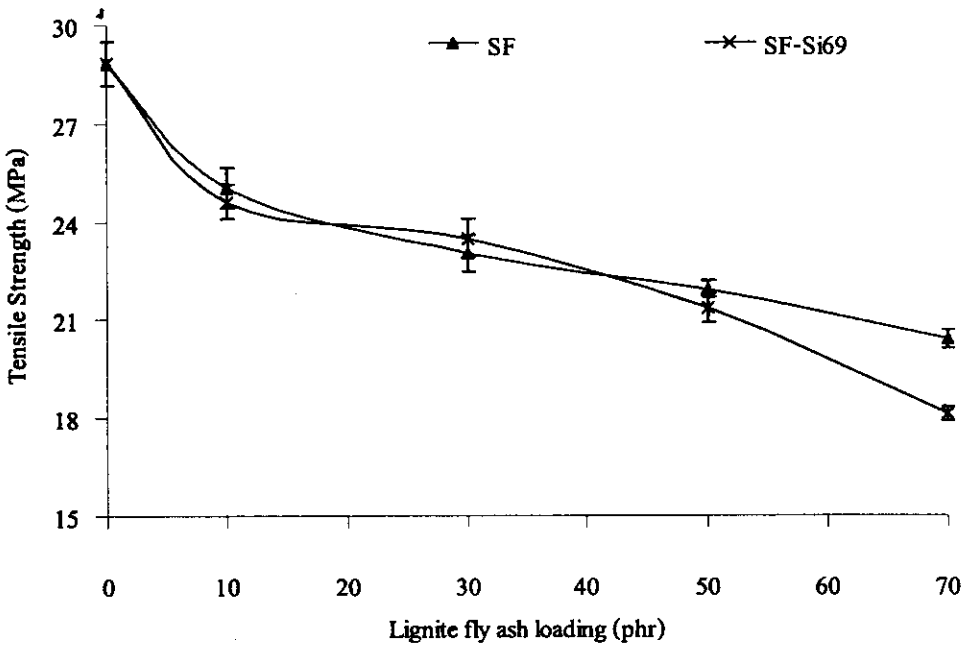
รูปที่ 4.4 - 4.6 แสดงผลของสารคู่ควบไซเลน (Silane coupling agent) ต่อความแข็งแรงคิงของยางคอมโพสิต โดยรูปที่ 4.4 เป็นกรณีที่ใช้เถ้าลอยลิกไนต์ที่รับมา รูปที่ 4.5 เป็นกรณีที่ใช้เถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดปานกลาง และรูปที่ 4.6 เป็นกรณีที่ใช้เถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดมาก จากการทดสอบพบว่า ในกรณีของยางคอมโพสิตที่เติมด้วยเถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดปานกลาง สารคู่ควบไซเลนทำให้ความแข็งแรงคิงเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากเถ้าลอยลิกไนต์มีหมู่ฟังก์ชันเคมีอินทรีย์ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาอยู่บนพื้นผิวน้อย ทำให้เถ้าลอยลิกไนต์มีความเป็นขั้วสูง เถ้าลอยลิกไนต์จึงเข้ากับยางที่ไม่มีขั้วได้ยาก สารคู่ควบไซเลนจะเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างยางและเถ้าลอยลิกไนต์ให้แข็งแรงขึ้น และช่วยให้เถ้าลอยลิกไนต์กระจายตัวได้ดีในเนื้อยาง การถ่ายเทแรงจากเฟสยางไปสู่เถ้าลอยลิกไนต์ก็จะดีขึ้น ความแข็งแรงคิงจึงมีค่าเพิ่มขึ้น (Ismail, Nasaruddin and Ishiaku, 1999; Ismail, Mega and Abdul Khalil, 2001) โดยยางคอมโพสิตที่เติมเถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดปานกลางลงไป 10 phr และ 50 phr และเติมสารคู่ควบไซเลนลงไปด้วยจะมีความแข็งแรงคิงเพิ่มขึ้น 40.63% และ 41.97% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่เติมสาร คู่ควบไซเลน แต่ที่ปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ 70 phr พบว่า สารคู่ควบไซเลนช่วยให้ความแข็งแรงคิงเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเท่านั้น ในกรณีของยางคอมโพสิตที่เติมด้วยเถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดมากพบว่า สาร คู่ควบไซเลนไม่ค่อยมีผลต่อความแข็งแรงคิงมากนักเพราะผลของขนาดอนุภาคจะมีบทบาทสำคัญมากกว่า ส่วนกรณีของยางคอมโพสิตที่เติมด้วยเถ้าลอยลิกไนต์ที่รับมา สารคู่ควบไซเลนอาจไม่ได้กระจายอยู่ที่ผิวของเถ้าลอยลิกไนต์ จึงทำให้ความแข็งแรงคิงของยางคอมโพสิตเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น



รูปที่ 4.4 ผลของสารก่อกวนโซเลนต่อความแข็งแรงดึง (กรณีของเถ้าลอยถิกไนต์ที่รับมา)



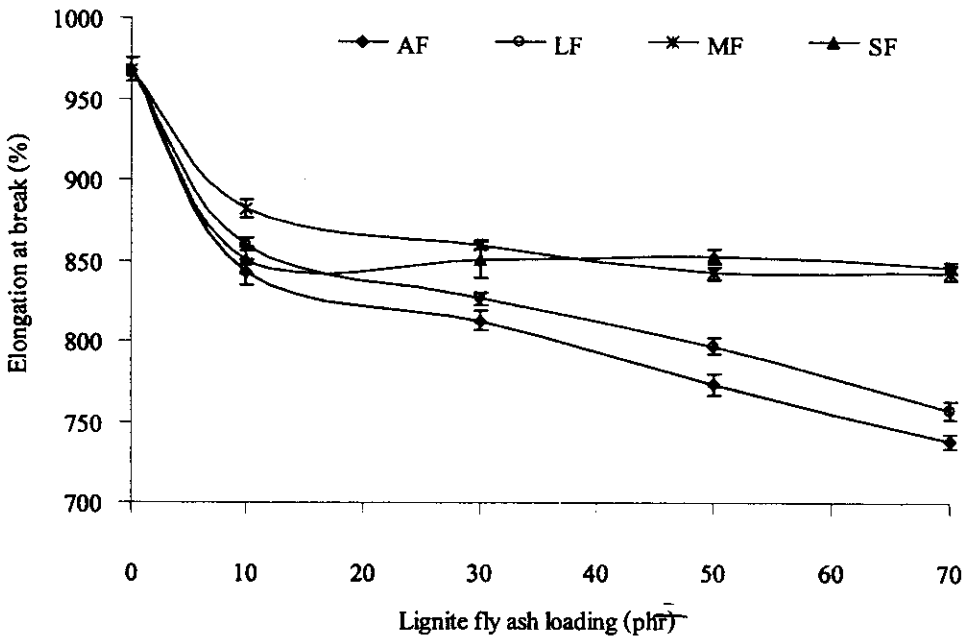
รูปที่ 4.5 ผลของสารก่อกวนโซเลนต่อความแข็งแรงดึง (กรณีของเถ้าลอยถิกไนต์ละเอียดยปานกลาง)



รูปที่ 4.6 ผลของสารก่อกวน ไชเลนต่อความแข็งแรงดึง (กรณีของถ้ำลอยลิกไนต์ละเอียดยมาก)

รูปที่ 4.7 แสดงผลของขนาดและปริมาณถ้ำลอยลิกไนต์ที่มีต่อระยะยืดเมื่อขาดของยางคอมโพสิต จากการทดสอบพบว่า ระยะยืดเมื่อขาดมีค่าลดลงเมื่อปริมาณถ้ำลอยลิกไนต์เพิ่มขึ้น โดยระยะยืดเมื่อขาดของยางคอมโพสิตที่เติมถ้ำลอยลิกไนต์ที่รับมาในปริมาณ 10 phr และ 70 phr มีค่าลดลง 12.94% และ 23.70% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีสารตัวเติม ระยะยืดเมื่อขาดมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณถ้ำลอยลิกไนต์เพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคถ้ำลอยลิกไนต์จะไปกีดขวางการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของยาง ทำให้ยางมีความแข็งแรงดึง (stiffness) และความเปราะ (brittleness) เพิ่มขึ้น เมื่อเติมลงไปปริมาณมากขึ้นก็จะทำให้ความต่อเนื่องของเฟสยางลดลงด้วย ระยะยืดเมื่อขาดของยางคอมโพสิตจึงลดลง (Ismail and Jaffri, 1999; Ismail, Shuhelmy and Edyham, 2002) ในการศึกษาผลของขนาดอนุภาคถ้ำลอยลิกไนต์ต่อระยะยืดเมื่อขาดพบว่า ในช่วงที่เติมถ้ำลอยลิกไนต์ลงไปไม่เกิน 30 phr ยางคอมโพสิตที่เติมด้วยถ้ำลอยลิกไนต์ขนาดอนุภาคต่างๆ จะมีค่าระยะยืดเมื่อขาดต่างกันน้อยมาก (ไม่เกิน 5%) แต่เมื่อเติมถ้ำลอยลิกไนต์ลงไปมากกว่า 30 phr ระยะยืดเมื่อขาดของยางคอมโพสิตที่เติมด้วยถ้ำลอยลิกไนต์ละเอียดยปานกลางและถ้ำลอยลิกไนต์ละเอียดยมากจะมีแนวโน้มคงที่ ขณะที่กรณีที่เติมด้วยถ้ำลอยลิกไนต์ที่รับมาและถ้ำลอยลิกไนต์หยาบ ระยะยืดเมื่อขาดจะมีแนวโน้มลดลง เมื่อปริมาณถ้ำลอยลิกไนต์เพิ่มขึ้น โดยระยะยืดเมื่อขาดของยางคอมโพสิตที่เติมถ้ำลอยลิกไนต์ละเอียดยมากในปริมาณ 70 phr มีค่าลดลง 12.54% เท่านั้น เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีสารตัวเติม และสูงกว่ากรณีที่เติมด้วยถ้ำลอยลิกไนต์ที่รับมา

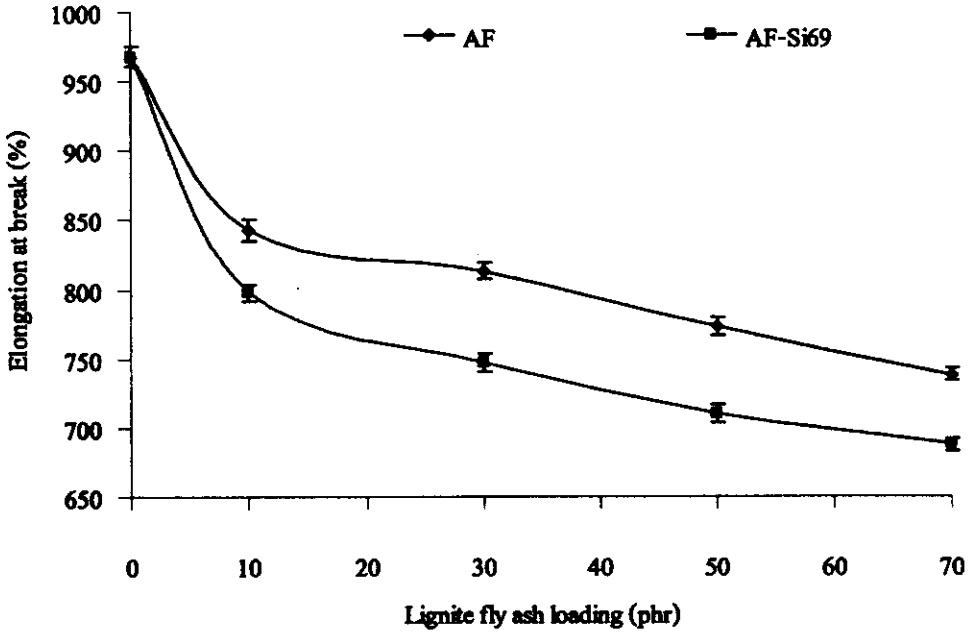
ในปริมาณ 70 phr 14.63% ยางคอมโพสิตที่เติมด้วยเถ้าลอยลิกไนต์ที่ได้รับมาจะมีระยะยืดเมื่อขาดน้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่เติมด้วยเถ้าลอยลิกไนต์ขนาดอื่นๆ



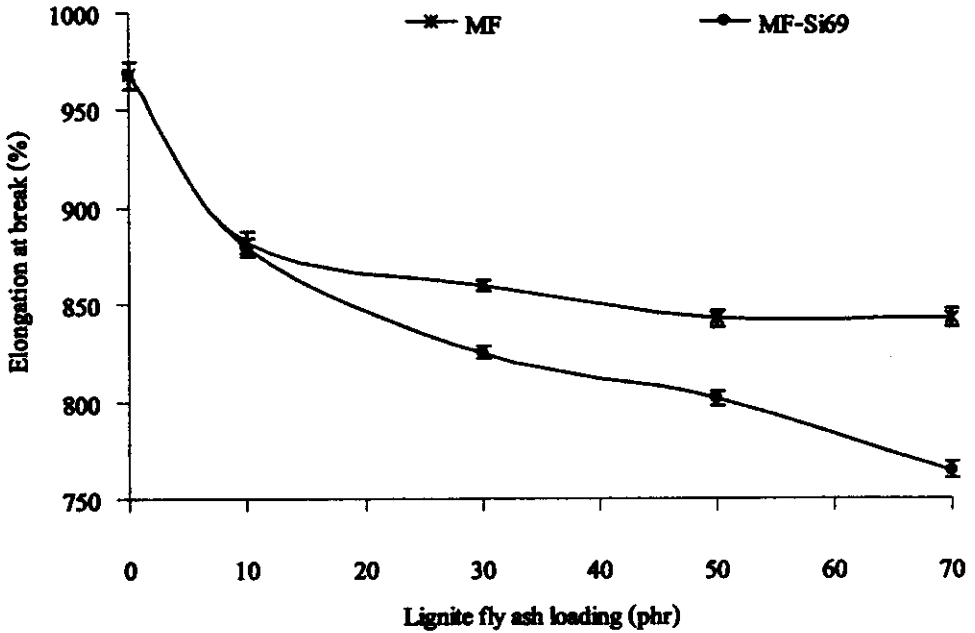
รูปที่ 4.7 ผลของขนาดและปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ต่อระยะยืดเมื่อขาด

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

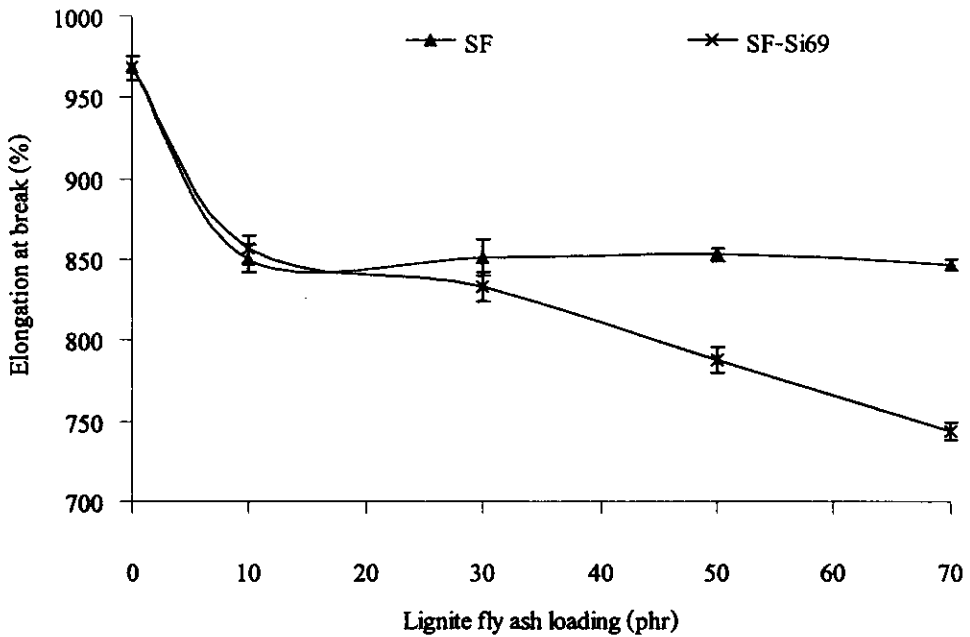




รูปที่ 4.8 ผลของสารคู่ควบไซเลนต่อระยะยืดเมื่อขาด (กรณีของเส้นลวดถักไนต์ที่รับมา)



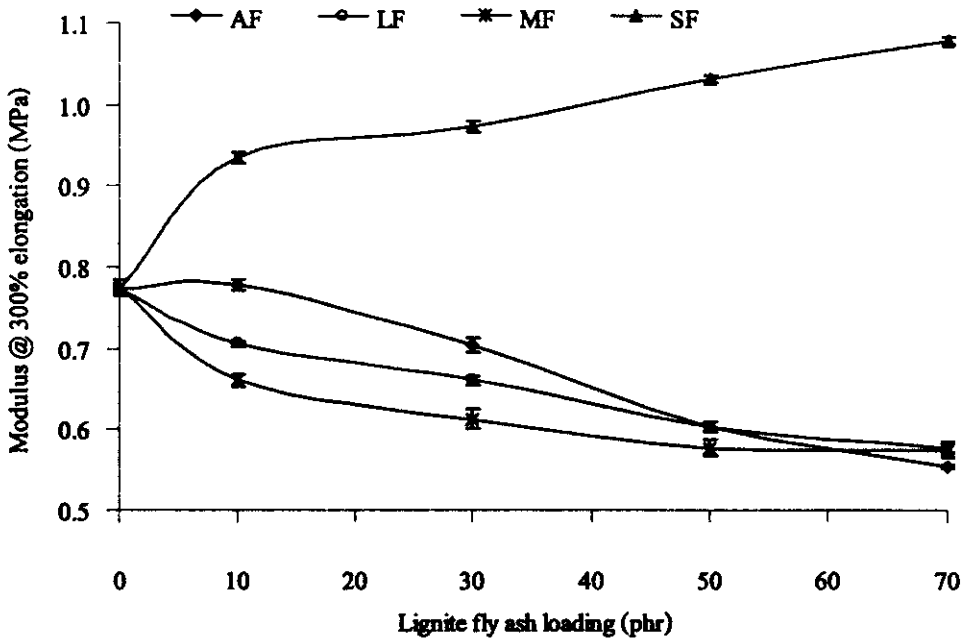
รูปที่ 4.9 ผลของสารคู่ควบไซเลนต่อระยะยืดเมื่อขาด (กรณีของเส้นลวดถักไนต์ละเอียดปานกลาง)



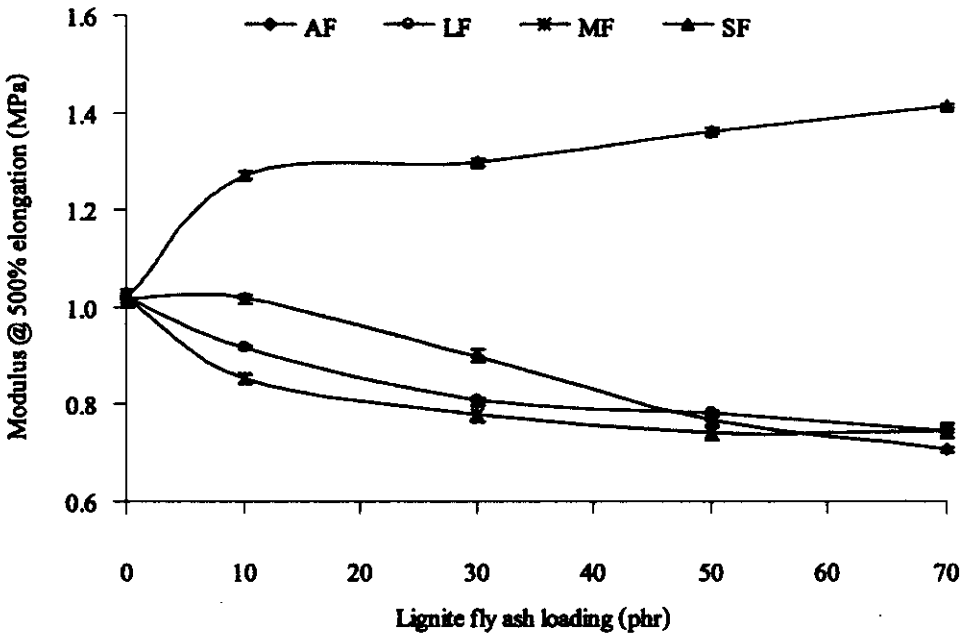
รูปที่ 4.10 ผลของสารคู่ควบ ไชเลนต่อระยะยืดเมื่อขาด (กรณีของเถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดมาก)

รูปที่ 4.11 และ 4.12 แสดงผลของขนาดและปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ที่มีต่อมอดูลัสยืดหยุ่นที่ระยะยืด 300% และ 500% ของยางคอมพอสิตตามลำดับ จากการทดสอบพบว่า มอดูลัสยืดหยุ่นของยางคอมพอสิตที่เติมด้วยเถ้าลอยลิกไนต์ที่รับมา เถ้าลอยลิกไนต์หยาบ และเถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดปานกลางมีค่าลดลงตามปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ที่เพิ่มขึ้น แต่ยางคอมพอสิตที่เติมด้วยเถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดมากมีค่ามอดูลัสยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์เพิ่มขึ้น โดยมอดูลัสยืดหยุ่นที่ระยะยืด 300% ของยางคอมพอสิตที่เติมด้วยเถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดมากในปริมาณ 10 phr และ 70 phr มีค่าเพิ่มขึ้น 20.80% และ 39.26% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีสารตัวเติม และมอดูลัสยืดหยุ่นที่ระยะยืด 500% ของยางคอมพอสิตที่เติมด้วยเถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดมากในปริมาณ 10 phr และ 70 phr มีค่าเพิ่มขึ้น 24.95% และ 38.87% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีสารตัวเติม

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



รูปที่ 4.11 ผลของขนาดและปริมาณเถ้าลอยถ่านหินต่อมอดุลัสยืดหยุ่นที่ระยะยืด 300%

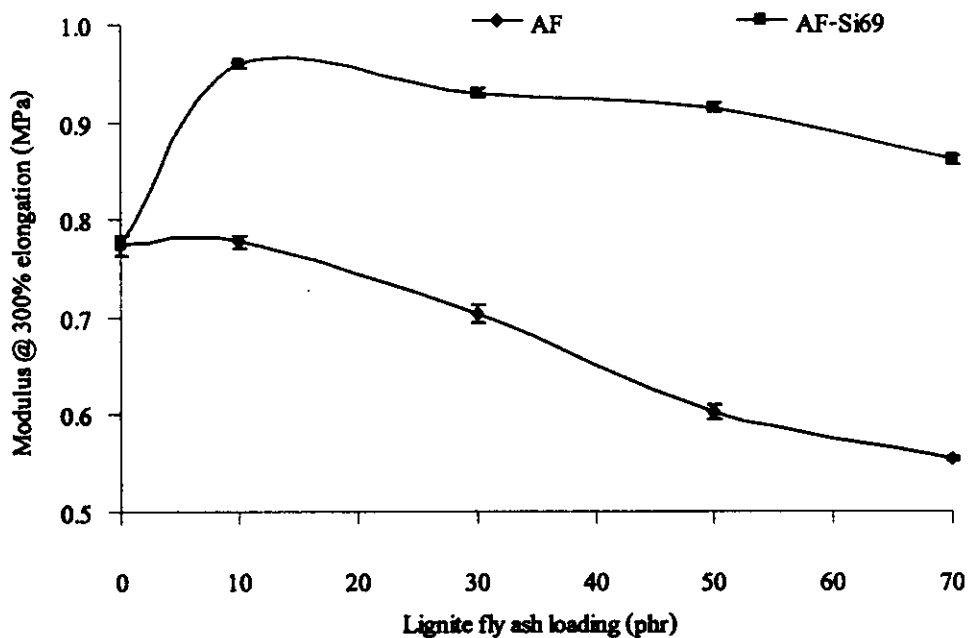


รูปที่ 4.12 ผลของขนาดและปริมาณเถ้าลอยถ่านหินต่อมอดุลัสยืดหยุ่นที่ระยะยืด 500%

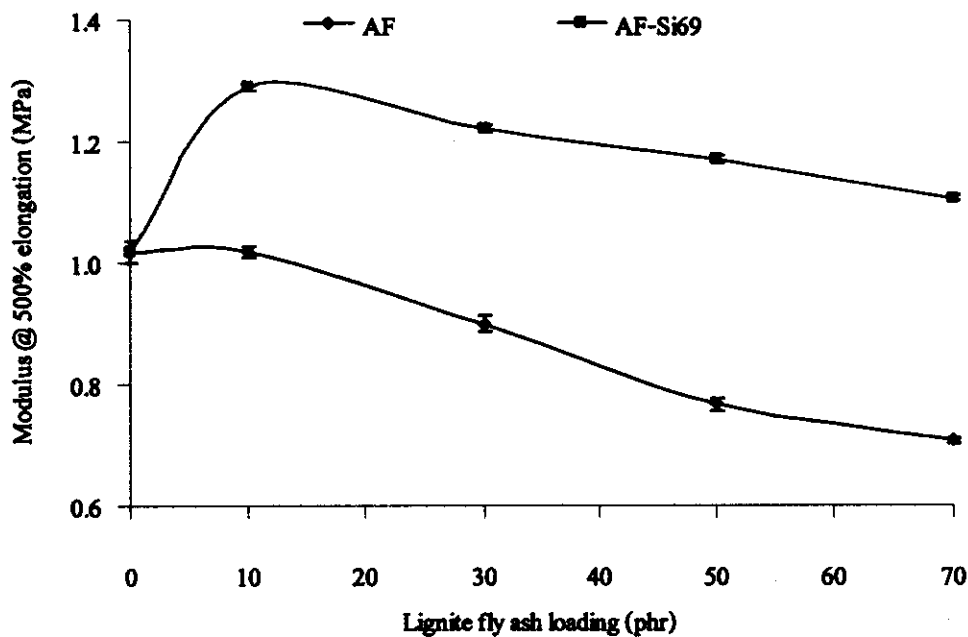
การเติมถั่วลยถิกไนต์ซึ่งเป็นสารตัวเติมที่มีอนุภาคที่แข็งลงไปในยางจะช่วยทำให้ มอดุลัสยืดหยุ่นมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของยางจะเกิดการเคลื่อนที่ได้ยากขึ้นเพราะจะถูกจำกัด การเคลื่อนที่ไว้โดยอนุภาคถั่วลยถิกไนต์ อย่างไรก็ตาม มอดุลัสยืดหยุ่นของยางคอมโพสิตที่เติม ด้วยถั่วลยถิกไนต์ที่ได้รับมา ถั่วลยถิกไนต์หยาบ และถั่วลยถิกไนต์ละเอียดปานกลางกลับมี แนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณถั่วลยถิกไนต์เพิ่มขึ้น ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากขนาดอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ พื้นที่ผิวในการเกิดพันธะกับโมเลกุลของยางจึงน้อยกว่าถั่วลยถิกไนต์ละเอียดมาก ทำให้มอดุลัส ยืดหยุ่นมีค่าน้อย (Ismail, Mega and Abdul Khalil, 2001)

รูปที่ 4.13 - 4.18 แสดงผลสารคู่ควบไซเลนต่อมอดุลัสยืดหยุ่นที่ระยะยืด 300% และ 500% ของยางคอมโพสิต โดยรูปที่ 4.13 และ 4.14 เป็นกรณีที่ใช้ถั่วลยถิกไนต์ที่รับมา รูปที่ 4.15 และ 4.16 เป็นกรณีที่ใช้ถั่วลยถิกไนต์ละเอียดปานกลาง และรูปที่ 4.17 และ 4.18 เป็นกรณีที่ใช้ถั่วลยถิกไนต์ละเอียดมาก จากการทดสอบพบว่า การเติมสารคู่ควบไซเลนทำให้มอดุลัส ยืดหยุ่นของยางคอมโพสิตเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในกรณีของยางคอมโพสิตที่เติมด้วยถั่วลยถิกไนต์ ละเอียดปานกลางและถั่วลยถิกไนต์ที่รับมา โดยมอดุลัสยืดหยุ่นที่ระยะยืด 300% ของยาง คอมโพสิตที่เติมด้วยถั่วลยถิกไนต์ที่รับมาในปริมาณ 10 phr และ 70 phr และเติมสารคู่ควบไซเลน ลงไปด้วยมีค่าเพิ่มขึ้น 23.29% และ 55.42% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่เติมสารคู่ควบ ไซเลน และมอดุลัสยืดหยุ่นที่ระยะยืด 500% ของยางคอมโพสิตที่เติมด้วยถั่วลยถิกไนต์ที่รับมา ในปริมาณ 10 phr และ 70 phr และเติมสารคู่ควบไซเลนลงไปด้วย มีค่าเพิ่มขึ้น 26.75% และ 56.29% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่เติมสารคู่ควบ ไซเลน

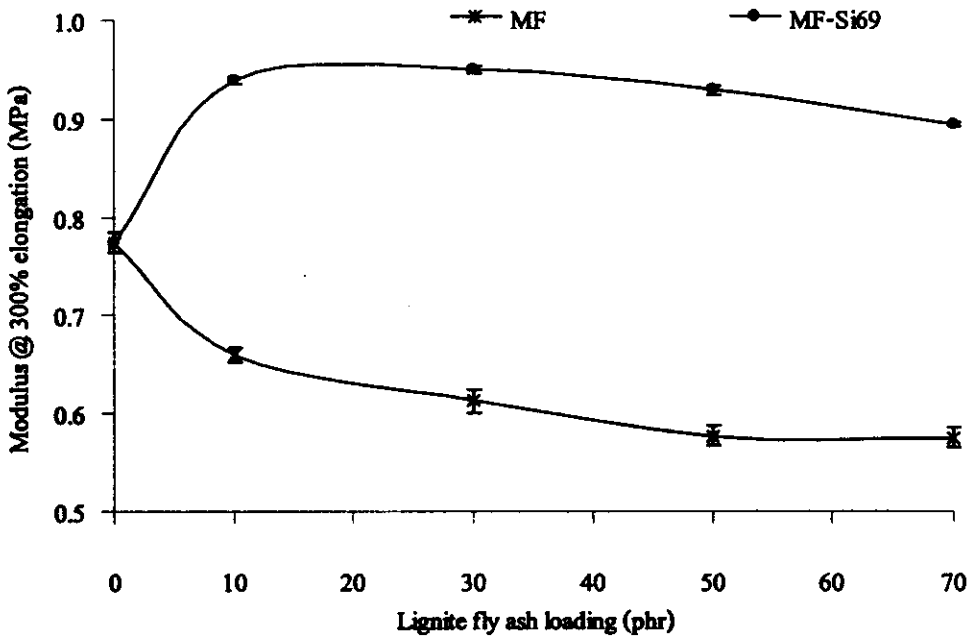
ส่วนมอดุลัสยืดหยุ่นที่ระยะยืด 300% ของยางคอมโพสิตที่เติมด้วยถั่วลยถิกไนต์ ละเอียดปานกลางในปริมาณ 10 phr และ 70 phr และเติมสารคู่ควบไซเลนลงไปด้วย มี ค่าเพิ่มขึ้น 42.12% และ 55.48% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่เติมสารคู่ควบ ไซเลน และมอดุลัส ยืดหยุ่นที่ระยะยืด 500% ของยางคอมโพสิตที่เติมด้วยถั่วลยถิกไนต์ละเอียดปานกลางในปริมาณ 10 phr และ 70 phr และเติมสารคู่ควบไซเลนลงไปด้วย มีค่าเพิ่มขึ้น 46.95% และ 52.75% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่เติมสารคู่ควบ ไซเลน



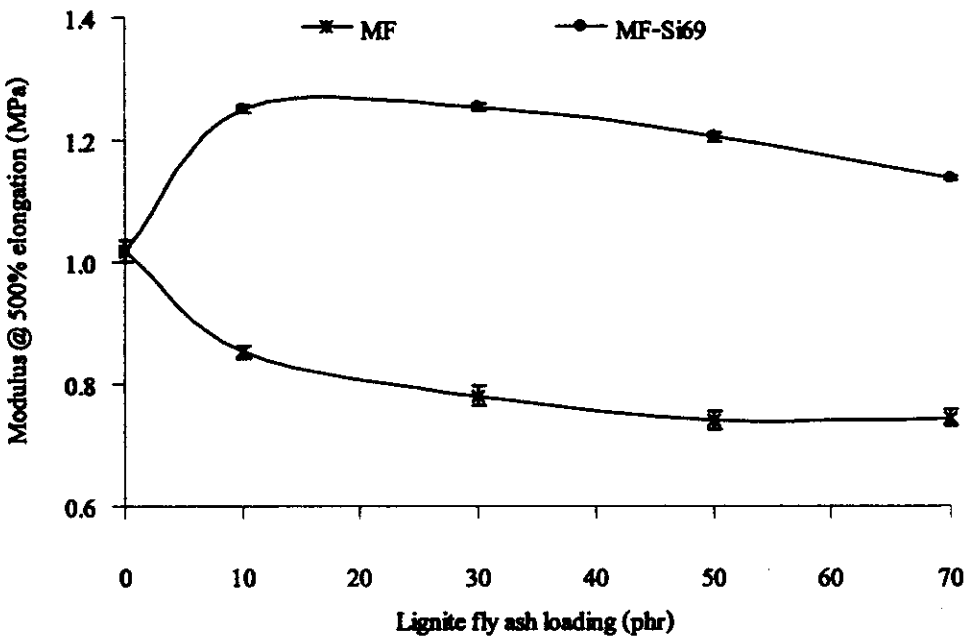
รูปที่ 4.13 ผลของสารตัวควบคุมไซเลนค่อมอดุลัสยืดหยุ่นที่ระยะยืด 300% (กรณีของเด้าลอยถิกไนต์ที่รับมา)



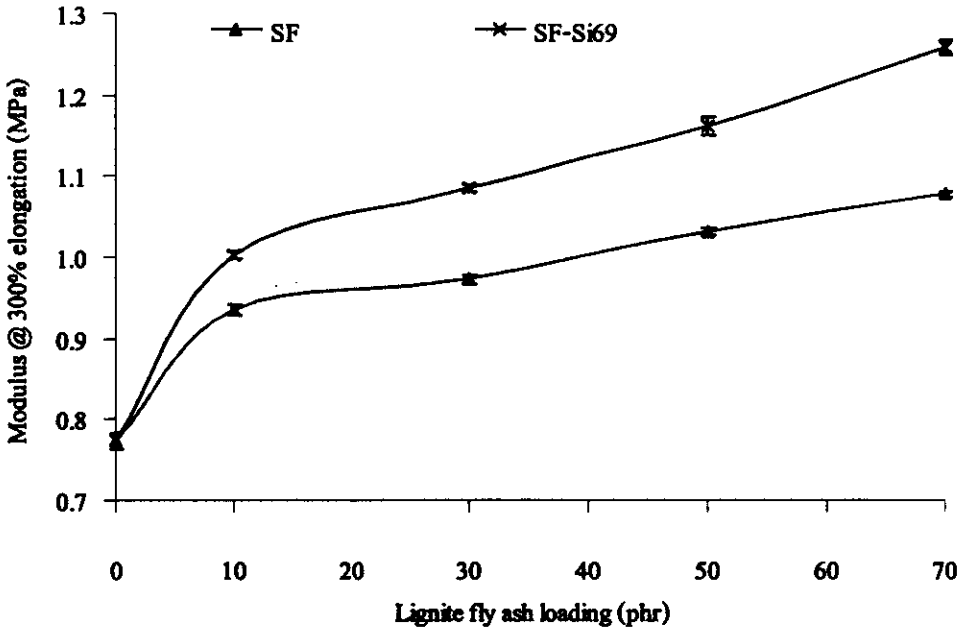
รูปที่ 4.14 ผลของสารตัวควบคุมไซเลนค่อมอดุลัสยืดหยุ่นที่ระยะยืด 500% (กรณีของเด้าลอยถิกไนต์ที่รับมา)



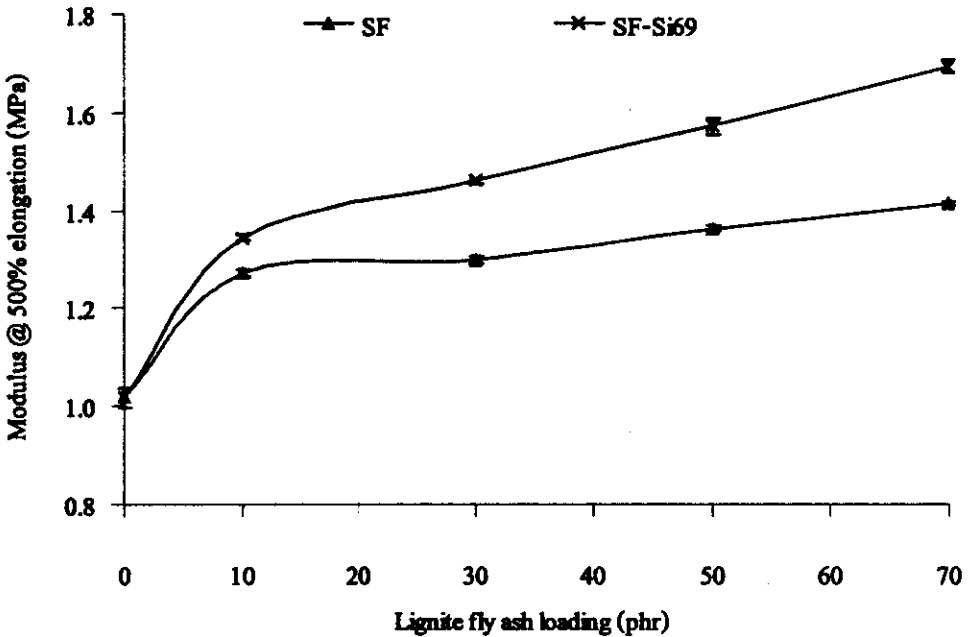
รูปที่ 4.15 ผลของสารคู่ควบไฮดรอกซิมอดุลัสอีพอกซีที่ระยะยืด 300% (กรณีของเจ้าลอยลิกไนต์ ตะเข็บปานกลาง)



รูปที่ 4.16 ผลของสารคู่ควบไฮดรอกซิมอดุลัสอีพอกซีที่ระยะยืด 500% (กรณีของเจ้าลอยลิกไนต์ ตะเข็บปานกลาง)

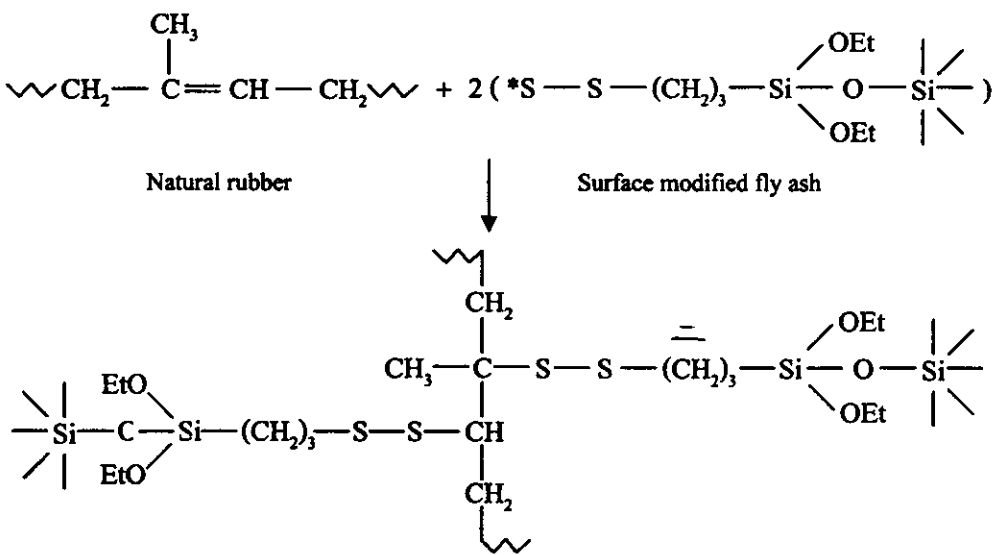


รูปที่ 4.17 ผลของสารคู่ความไวเลนต่อมอดูลัสยืดหยุ่นที่ระยะยืด 300% (กรณีของถ่านล้อยลิกไนต์ ละเยือกมาก)

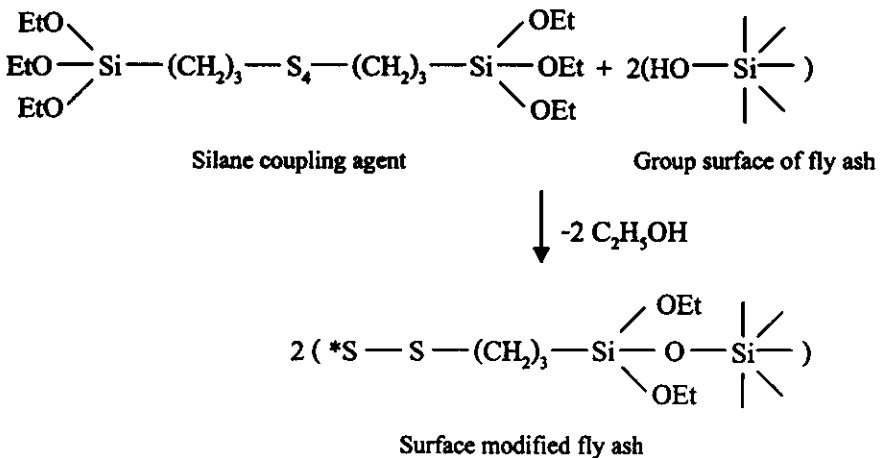


รูปที่ 4.18 ผลของสารคู่ความไวเลนต่อมอดูลัสยืดหยุ่นที่ระยะยืด 500% (กรณีของถ่านล้อยลิกไนต์ ละเยือกมาก)

การเติมสารคู่ควบไซเลนช่วยให้มอดูลัสยืดหยุ่นของยางคอมพอสิตเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารคู่ควบไซเลนจะช่วยปรับปรุงพันธะระหว่างยางและเส้นใยลิกไนต์ให้มีความแข็งแรงมากขึ้น และช่วยให้ยางมีความต่อเนื่องของเฟสดีขึ้น การถ่ายเทแรงจากเฟสยางไปสู่เส้นใยลิกไนต์ได้ดีขึ้น ทำให้มอดูลัสยืดหยุ่นของยางคอมพอสิตมีค่าเพิ่มขึ้น (Ismail, Mega and Abdul Khalil, 2001; Alkadasi, Hundiwale and Kapadi, 2004) ซึ่งโครงสร้างทางเคมีของปฏิกิริยาระหว่างสารคู่ควบไซเลนกับเส้นใยลิกไนต์ และปฏิกิริยาระหว่างเส้นใยลิกไนต์ที่ปรับปรุงพื้นผิวแล้วกับยางธรรมชาติได้แสดงในรูปที่ 4.19 และ 4.20



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



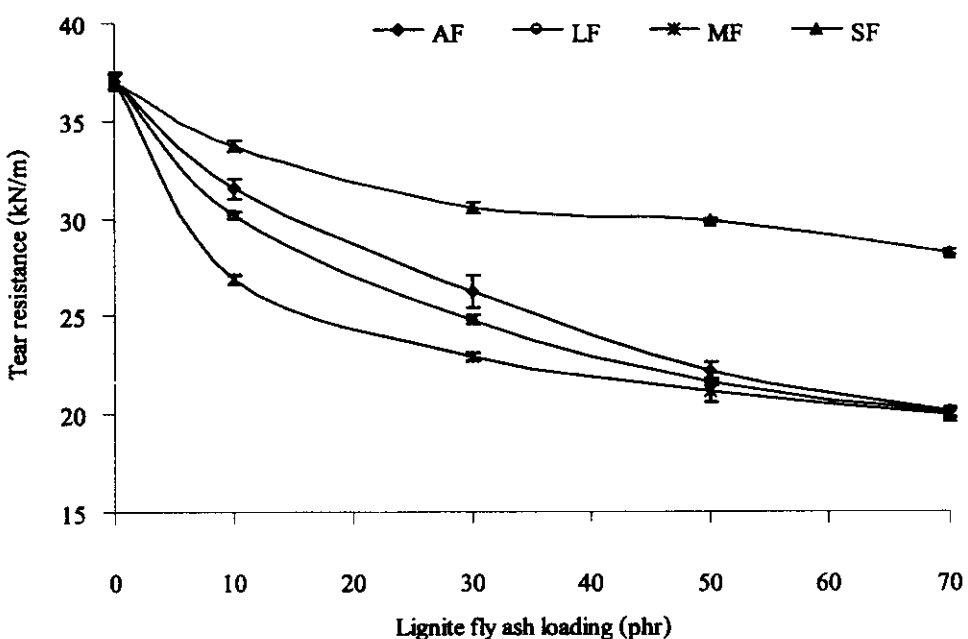
รูปที่ 4.20 ปฏิกิริยาระหว่างพื้นผิวที่ปรับปรุงแล้วของเส้นใยลิกไนต์และยางธรรมชาติ (Ismail, Mega and Abdul Khalil, 2001; Alkadasi, Hundiwale and Kapadi, 2004)



#### 4.3.2 การทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาด

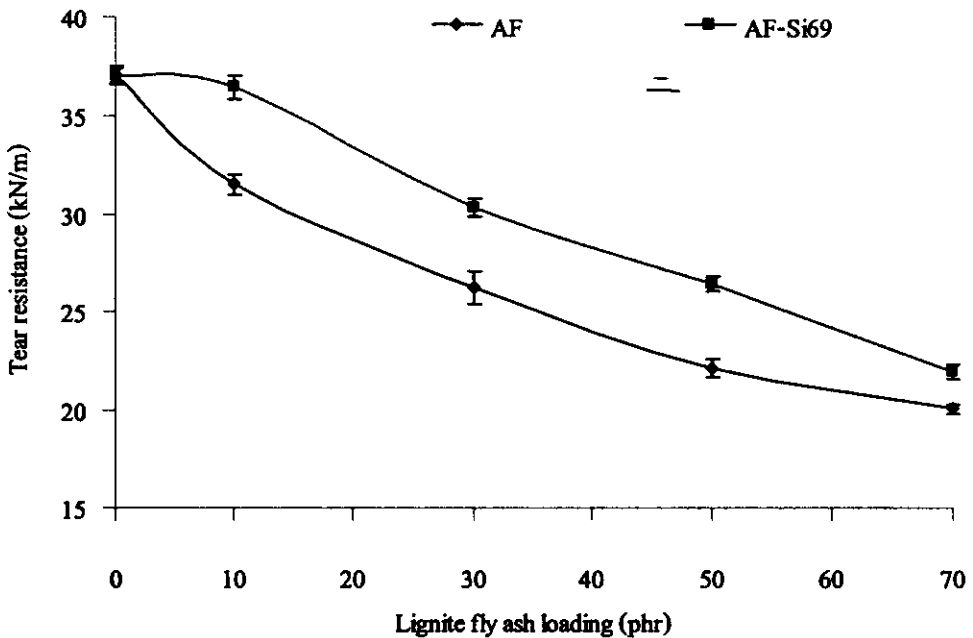
รูปที่ 4.21 แสดงผลของขนาดและปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ที่มีต่อความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางคอมโพสิต จากการทดสอบพบว่า ความต้านทานต่อการฉีกขาดมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์เพิ่มขึ้น โดยความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางคอมโพสิตที่เติมเถ้าลอยลิกไนต์ที่รับมาในปริมาณ 10 phr และ 70 phr มีค่าลดลง 14.88% และ 45.80%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

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

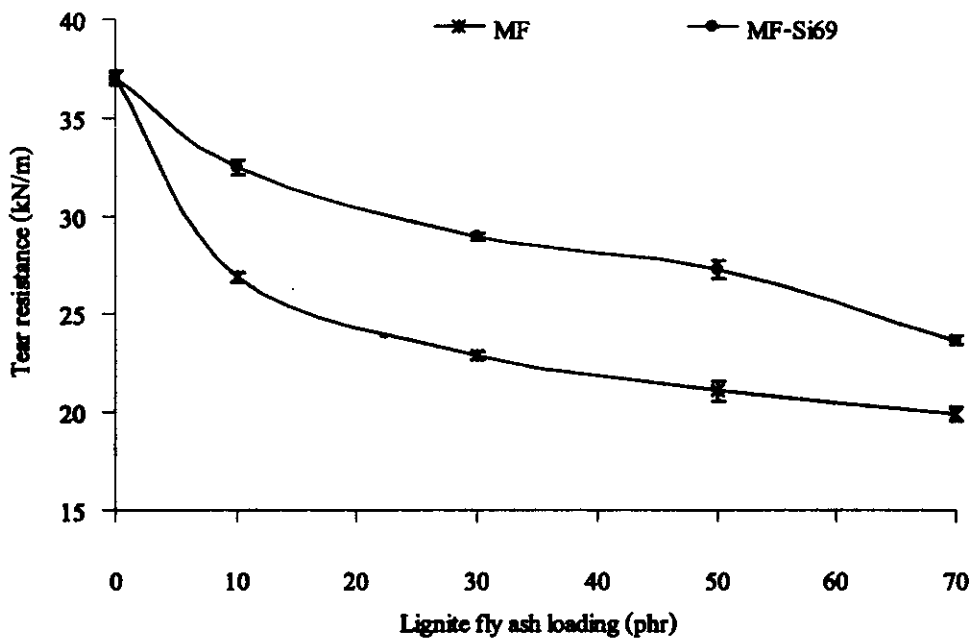


รูปที่ 4.21 ผลของขนาดและปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ต่อความต้านทานต่อการฉีกขาด

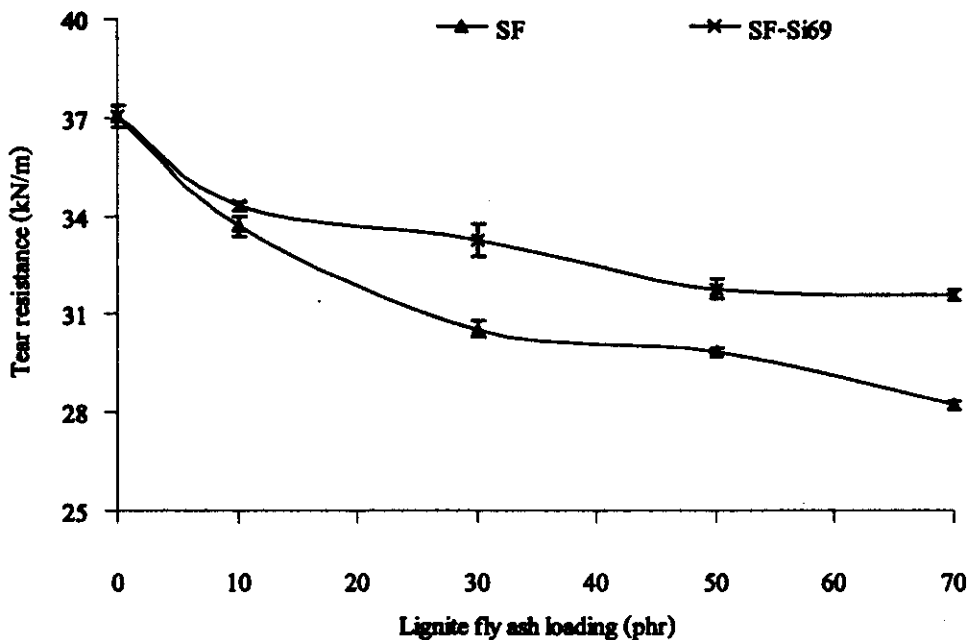
รูปที่ 4.22 - 4.24 แสดงผลของสารคู่ควบไซเลนต่อความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางคอมโพสิต โดยรูปที่ 4.22 เป็นกรณีที่ใช้เถ้าลอยลิกไนต์ที่รับมา รูปที่ 4.23 เป็นกรณีที่ใช้เถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดปานกลาง และรูปที่ 4.24 เป็นกรณีที่ใช้เถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดมาก จากการทดสอบพบว่า สารคู่ควบไซเลนจะทำให้ความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางคอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้น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



รูปที่ 4.22 ผลของสารคู่ควบไซเลนต่อความต้านทานต่อการฉีกขาด (กรณีของเถ้าลอยลิกไนต์ที่รับมา)



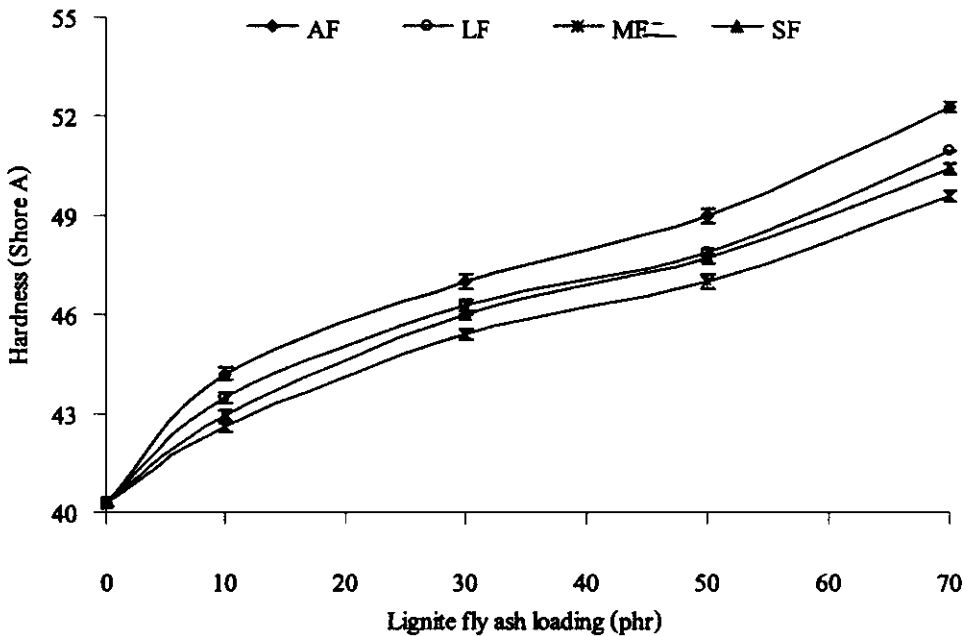
รูปที่ 4.23 ผลของสารก่อกวนโซเลนต่อความต้านทานต่อการฉีกขาด (กรณีของเจ้าถอยติกไนต์ ละเอียคปานกลาง)



รูปที่ 4.24 ผลของสารก่อกวนโซเลนต่อความต้านทานต่อการฉีกขาด (กรณีของเจ้าถอยติกไนต์ ละเอียคมาก)

### 4.3.3 การทดสอบความแข็ง

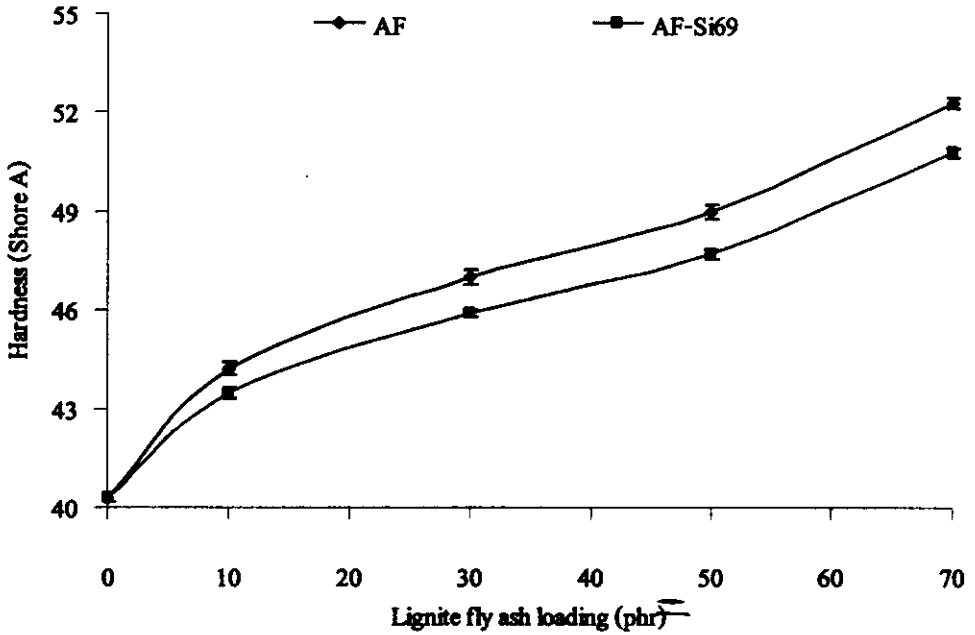
รูปที่ 4.25 แสดงผลของขนาดและปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ที่มีต่อความแข็งของยางคอมพอสิต จากการทดสอบพบว่า ความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์เพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคเถ้าลอยลิกไนต์ไปกีดขวางการเคลื่อนที่ของโซ่โพลีเมอร์ยาง เมื่อปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์เพิ่มขึ้น ความยืดหยุ่นของยางก็จะน้อยลง ทำให้ยางมีความแข็งเพิ่มขึ้น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



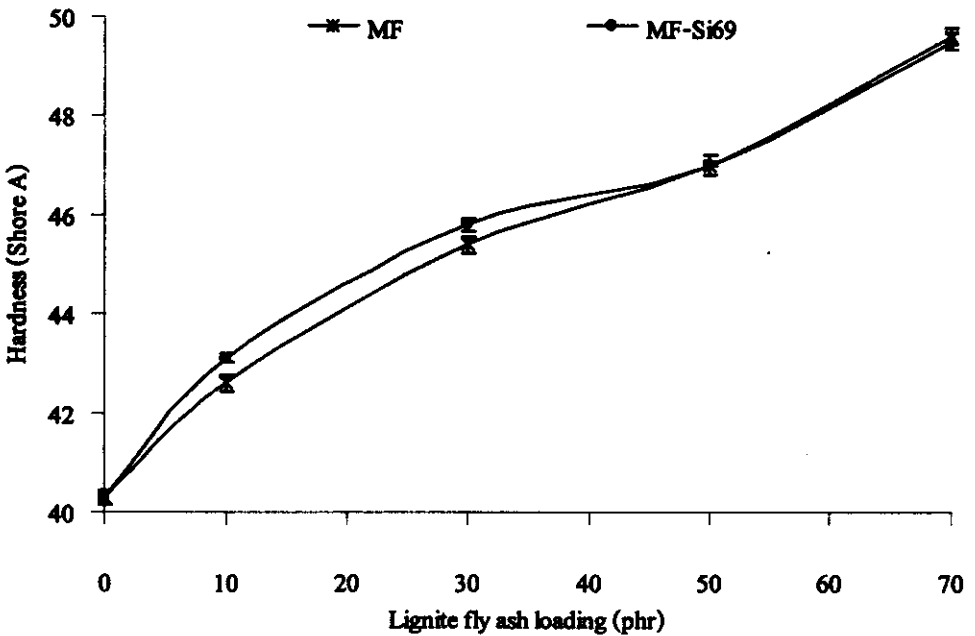
รูปที่ 4.25 ผลของขนาดและปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ต่อความแข็ง

รูปที่ 4.26 - 4.28 แสดงผลของสารก่อกวนโซ่เลนต่อความแข็งของยางคอมพอสิต โดยรูปที่ 4.26 เป็นกรณีที่ใช้เถ้าลอยลิกไนต์ที่ได้รับมา รูปที่ 4.27 เป็นกรณีที่ใช้เถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดปานกลาง และรูปที่ 4.28 เป็นกรณีที่ใช้เถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดมาก จากการทดสอบพบว่า ความแข็งของยางคอมพอสิตที่เติมและไม่เติมสารก่อกวนโซ่เลนมีค่าไม่แตกต่างกัน เนื่องจากสาร

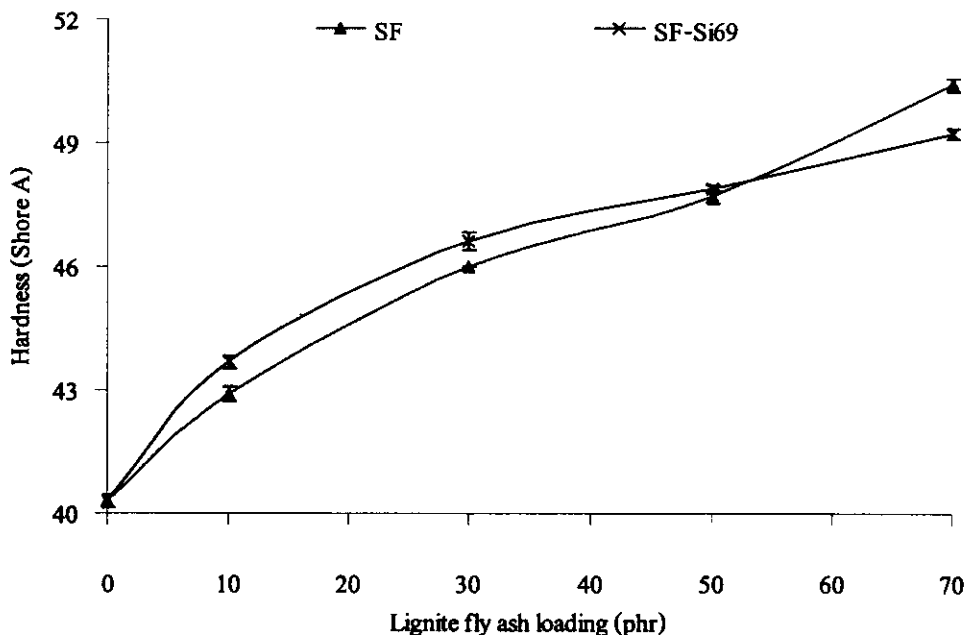
คู่ควบไซเลนมีสถานะเป็นของเหลวและเค็มลงไปปริมาณที่น้อยมาก จึงไม่มีผลต่อความแข็งของยางคอมพอสิต (Alkadasi, Hundiwale and Kapadi, 2004)



รูปที่ 4.26 ผลของสารคู่ควบไซเลนต่อความแข็ง (กรณีของถ่านล้อยลิกไนต์ที่รับมา)



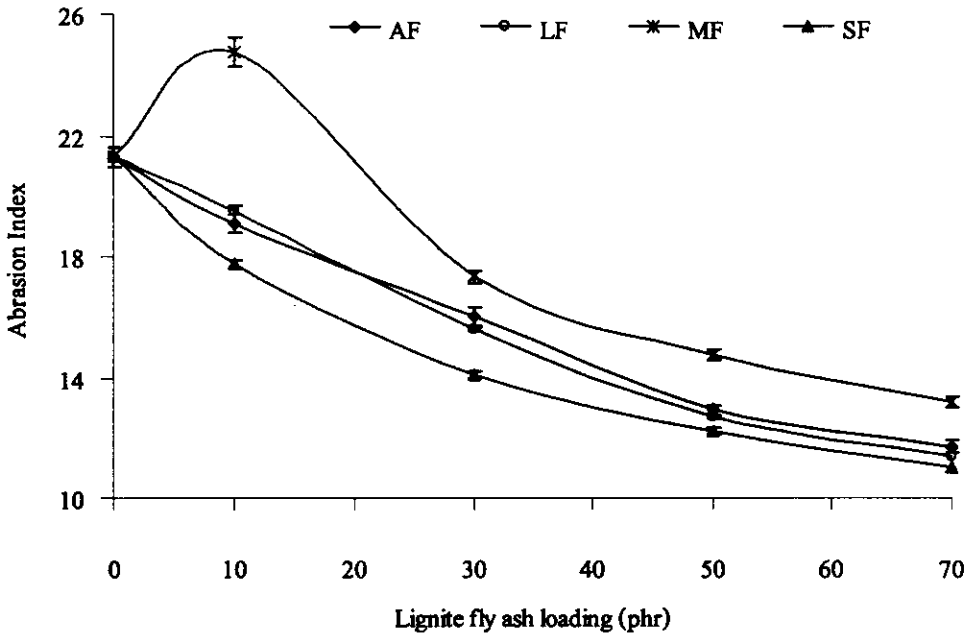
รูปที่ 4.27 ผลของสารคู่ควบไซเลนต่อความแข็ง (กรณีของถ่านล้อยลิกไนต์ละเยือกปานกลาง)



รูปที่ 4.28 ผลของสารก่อกวนไขเลนต่อความแข็ง (กรณีของถ้ำลอยลิกไนต์ละเอียดยมาก)

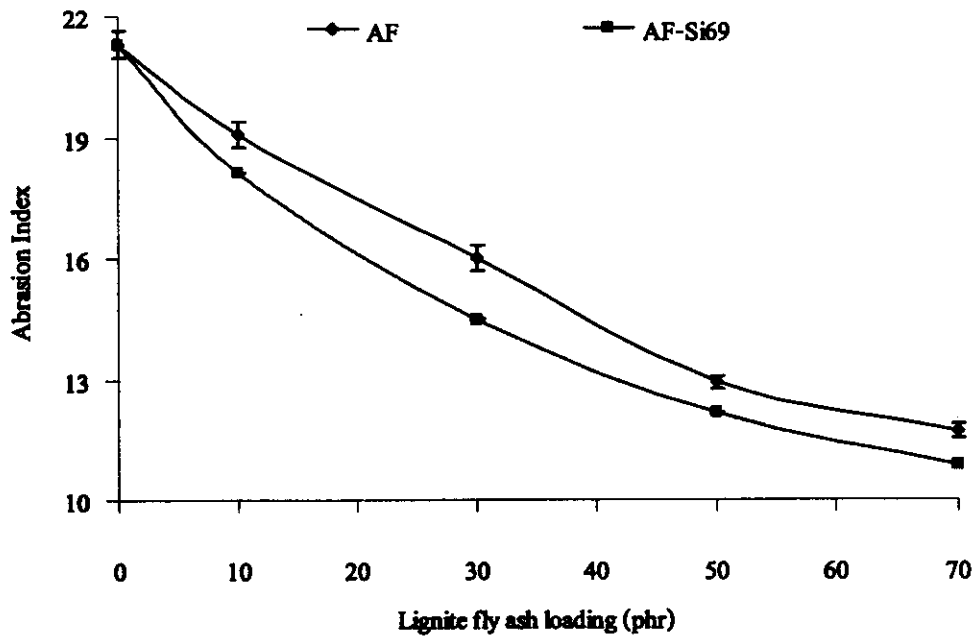
#### 4.3.4 การทดสอบความต้านทานต่อการสึกหรอ

รูปที่ 4.29 แสดงผลของขนาดและปริมาณถ้ำลอยลิกไนต์ที่มีต่อค่าดัชนีการสึกหรอ (Abrasion Index) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงความต้านทานต่อการสึกหรอของยางคอมโพสิต จากการทดสอบพบว่า กรณีของถ้ำลอยลิกไนต์ที่รับมา ถ้ำลอยลิกไนต์หยาบ และถ้ำลอยลิกไนต์ละเอียดยมาก ค่าดัชนีการสึกหรอมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณถ้ำลอยลิกไนต์เพิ่มขึ้น โดยค่าดัชนีการสึกหรอของยางคอมโพสิตที่เติมถ้ำลอยลิกไนต์ที่รับมาในปริมาณ 10 phr และ 70 phr มีค่าลดลง 10.43% และ 45.00% ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีสารตัวเติม ส่วนค่าดัชนีการสึกหรอของยางคอมโพสิตที่เติมด้วยถ้ำลอยลิกไนต์ละเอียดยปานกลางมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเติมถ้ำลอยลิกไนต์ลงไป ในปริมาณ 10 phr หลังจากนั้นจะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณถ้ำลอยลิกไนต์เพิ่มขึ้น โดยค่าดัชนีการสึกหรอของยางคอมโพสิตที่เติมถ้ำลอยลิกไนต์ละเอียดยปานกลางในปริมาณ 10 phr มีค่าเพิ่มขึ้น 16.20% เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีสารตัวเติม ค่าดัชนีการสึกหรอจะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณถ้ำลอยลิกไนต์เพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อปริมาณถ้ำลอยลิกไนต์เพิ่มขึ้น ความต่อเนื่องของเฟสของยาง (rubber phase) ก็จะลดลง ค่าดัชนีการสึกหรอจึงมีค่าลดลงด้วย (Sombatsompop, et al. , 2004)

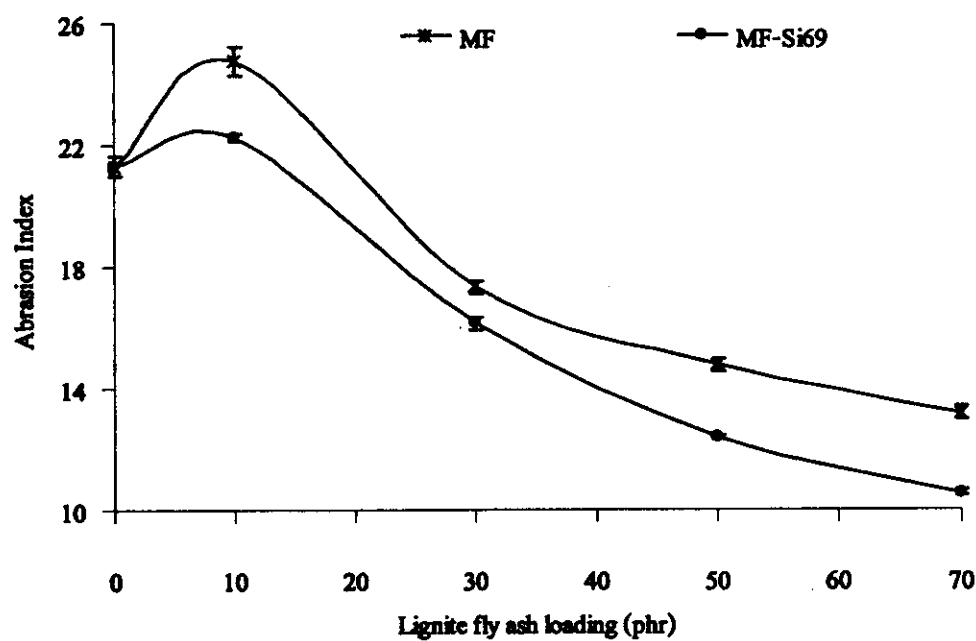


รูปที่ 4.29 ผลของขนาดและปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ต่อค่าดัชนีการสึกหรอ

รูปที่ 4.30 - 4.32 แสดงผลของสารคู่ควบไซเลนต่อความต้านทานต่อการสึกหรอของยางคอมโพสิต โดยรูปที่ 4.30 เป็นกรณีที่ใช้เถ้าลอยลิกไนต์ที่ได้รับมา รูปที่ 4.31 เป็นกรณีที่ใช้เถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดปานกลาง และรูปที่ 4.32 เป็นกรณีที่ใช้เถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดมาก จากการทดสอบพบว่า ความต้านทานต่อการสึกหรอของยางคอมโพสิตที่เติมและไม่เติมสารคู่ควบไซเลนมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก (ไม่เกิน 10%) โดยในกรณีของเถ้าลอยลิกไนต์ที่รับมาและเถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดปานกลาง ค่าดัชนีการสึกหรอมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่เติมสารคู่ควบไซเลน ส่วนในกรณีของเถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดมากพบว่า ค่าดัชนีการสึกหรอมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่เติมสารคู่ควบไซเลน ยางคอมโพสิตที่เติมและไม่เติมสารคู่ควบไซเลน มีค่าดัชนีการสึกหรอที่ไม่ค่อยแตกต่างกันเนื่องจากอนุภาคเถ้าลอยลิกไนต์มีขนาดค่อนข้างใหญ่ ซึ่งจัดอยู่ในประเภทสารตัวเติมกึ่งเสริมแรง (semi reinforcing filler) จึงส่งผลต่อค่าดัชนีการสึกหรอออกมาอย่างเด่นชัด ทำให้สารคู่ควบไซเลนไม่สามารถแสดงผลของการปรับปรุงสมบัติออกมาได้

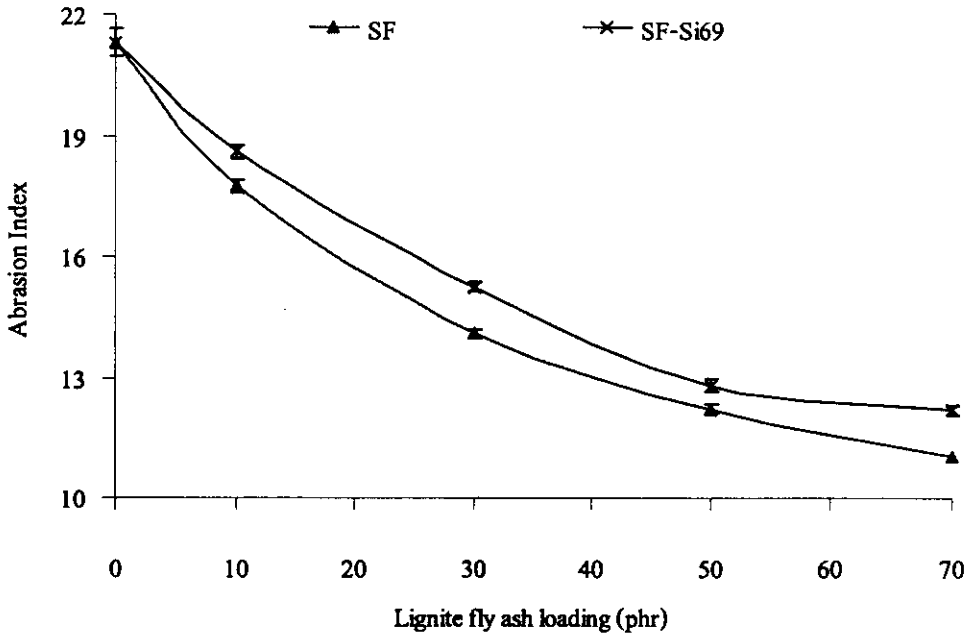


รูปที่ 4.30 ผลของสารตัวควบไหลดนต่อค่าดัชนีการสึกหรอ (กรณีของเถ้าลอยถิกไนต์ที่รับมา)



รูปที่ 4.31 ผลของสารตัวควบไหลดนต่อค่าดัชนีการสึกหรอ (กรณีของเถ้าลอยถิกไนต์ละเอียคปานกลาง)

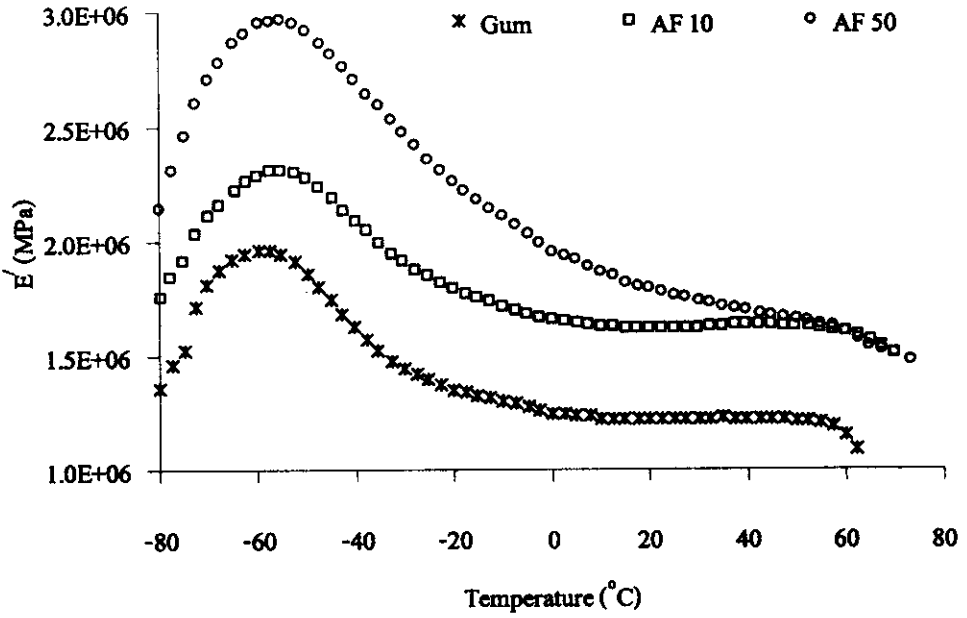




รูปที่ 4.32 ผลของสารคู่ควบ ไซเลนต่อค่าดัชนีการสึกหรอ (กรณีของเถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดมาก)

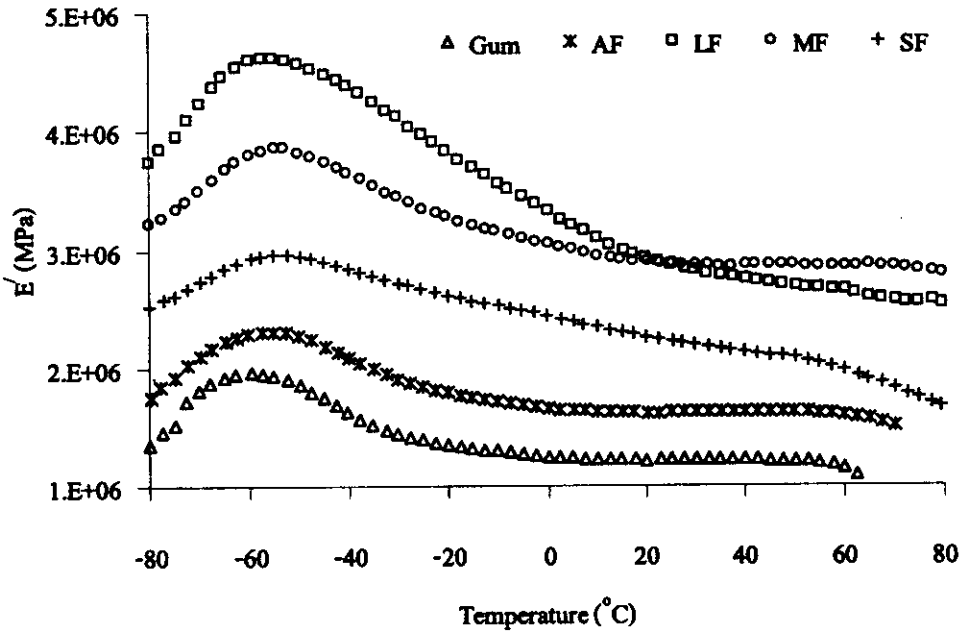
#### 4.4 การทดสอบสมบัติเชิงพลวัต

รูปที่ 4.33 แสดงผลของปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ต่อค่ามอดุลัสสะสม (storage modulus,  $E'$ ) ของยางคอมโพสิตที่อุณหภูมิต่างๆ โดย Gum หมายถึงยางคอมโพสิตที่ไม่มีสารตัวเติม จากการทดสอบพบว่า ค่ามอดุลัสสะสมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์เพิ่มขึ้น อนุภาคเถ้าลอยลิกไนต์จะอยู่รวมกันเป็นกลุ่มก้อน ยางจะแทรกเข้าไปอยู่ในช่องว่างระหว่างอนุภาคเถ้าลอยลิกไนต์ ในการทดสอบจะเป็นการทดสอบที่มีการเปลี่ยนรูปต่ำมาก (strain 0.5%) อนุภาคเถ้าลอยลิกไนต์จึงยังจับกลุ่มกันอยู่ได้ โมเลกุลของยางที่แทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างกลุ่มเถ้าลอยลิกไนต์จึงถูกดึงไว้ ทำให้สามารถเคลื่อนที่ได้ยาก ส่งผลให้ค่ามอดุลัสสะสมมีค่าสูงขึ้น (Da Costa, et al. , 2000) รูปที่ 4.34 แสดงผลของขนาดอนุภาคเถ้าลอยลิกไนต์ต่อค่ามอดุลัสสะสมของยางคอมโพสิต ในกรณีที่เติมเถ้าลอยลิกไนต์ลงไป 10 phr จากการทดสอบพบว่า ค่ามอดุลัสสะสมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเถ้าลอยลิกไนต์มีขนาดอนุภาคเล็กลง จนกระทั่งมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 10 ไมครอน ค่ามอดุลัสสะสมจะมีค่าสูงสุด หลังจากนั้นเมื่ออนุภาคเถ้าลอยลิกไนต์มีขนาดเล็กลงไปอีกค่ามอดุลัสสะสมจะมีค่าลดลง ขนาดอนุภาคเถ้าลอยลิกไนต์ที่เล็กลงจะทำให้ช่องว่างระหว่างอนุภาคมีขนาดเล็กด้วย โมเลกุลของยางที่ถูกรั้งไว้ในช่องว่างนี้จึงลดลง โมเลกุลของยางจะเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น ค่ามอดุลัสสะสมจึงลดลง



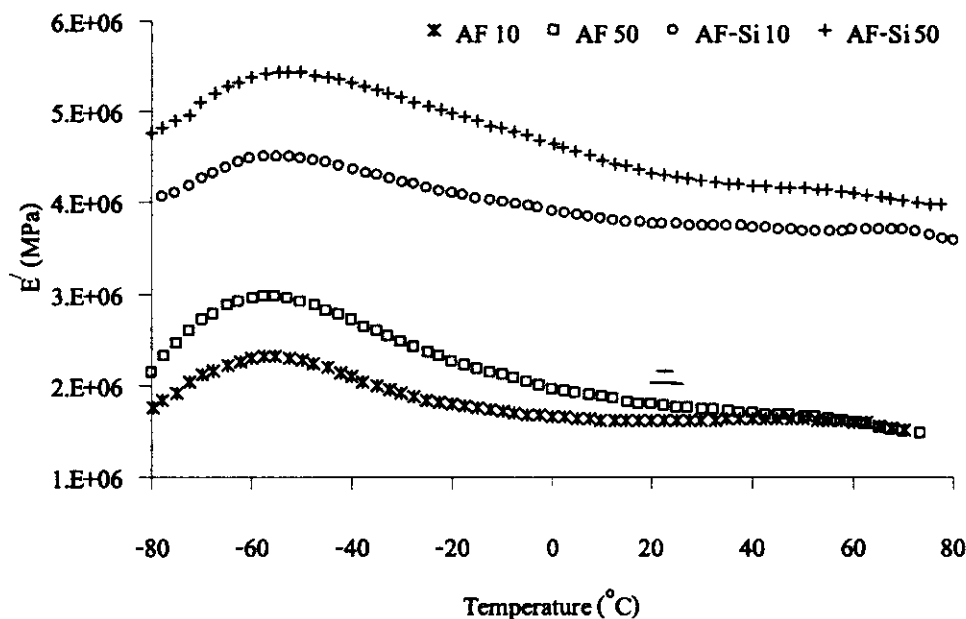
รูปที่ 4.33 ผลของปริมาณเส้นใยลิกไนต์ต่อค่ามอดุลัสสะสม

—

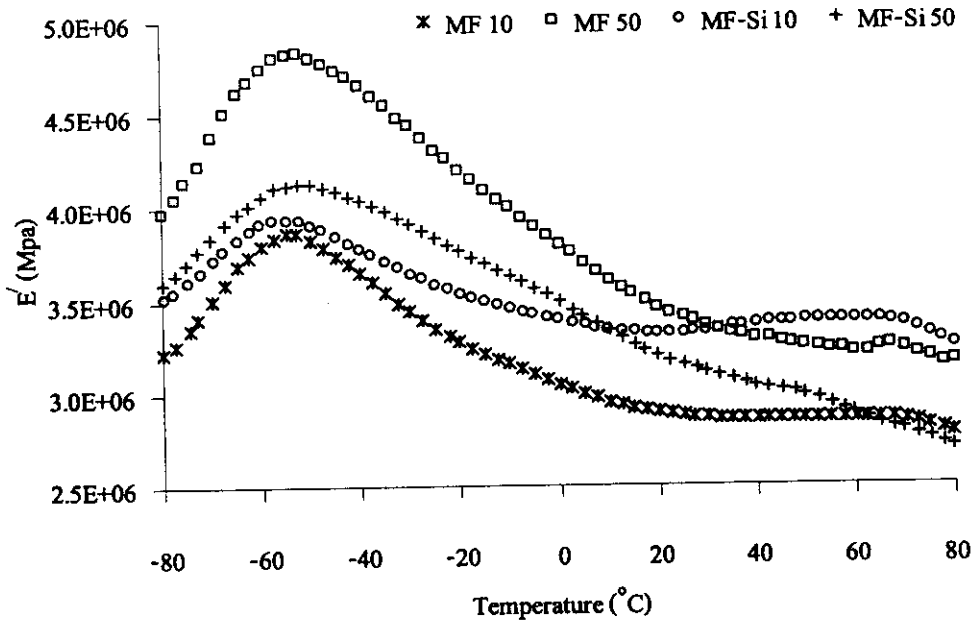


รูปที่ 4.34 ผลของขนาดอนุภาคเส้นใยลิกไนต์ต่อค่ามอดุลัสสะสม (เมื่อเติมเส้นใยลิกไนต์ลงไป 10 phr)

รูปที่ 4.35 และ 4.36 แสดงผลของสารก่อกวนไขเลนต่อค่ามอดุลัสสะสมของยางคอมโพสิต ที่เติมเส้นใยลิกไนต์ลงไป 10 และ 50 phr โดยรูปที่ 4.35 เป็นกรณีของเส้นใยลิกไนต์ที่ได้รับมา และรูปที่ 4.36 เป็นกรณีของเส้นใยลิกไนต์ละเอียดปานกลาง จากการทดสอบพบว่า ในกรณีของเส้นใยลิกไนต์ที่ได้รับมา การเติมสารก่อกวนไขเลนลงไปในยางคอมโพสิตช่วยให้มอดุลัสสะสมมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนกรณีของเส้นใยลิกไนต์ละเอียดปานกลางพบว่า เมื่อเติมเส้นใยลิกไนต์ลงไป 10 phr และเติมสารก่อกวนไขเลนลงไปด้วยจะทำให้ค่ามอดุลัสสะสมมีค่าเพิ่มขึ้น



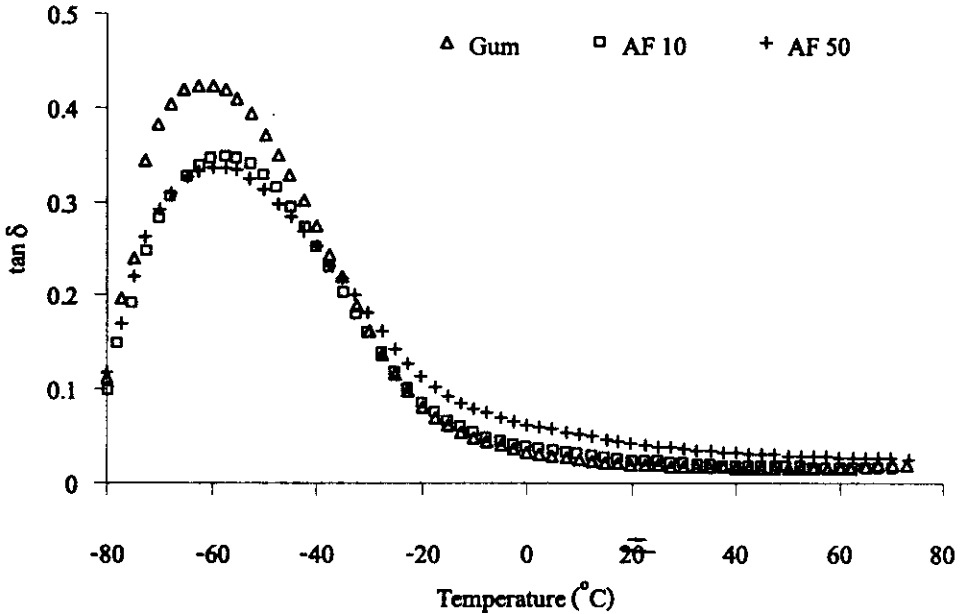
รูปที่ 4.35 ผลของสารก่อกวนไขเลนต่อค่ามอดุลัสสะสม (กรณีของเส้นใยลิกไนต์ที่ได้รับมา)



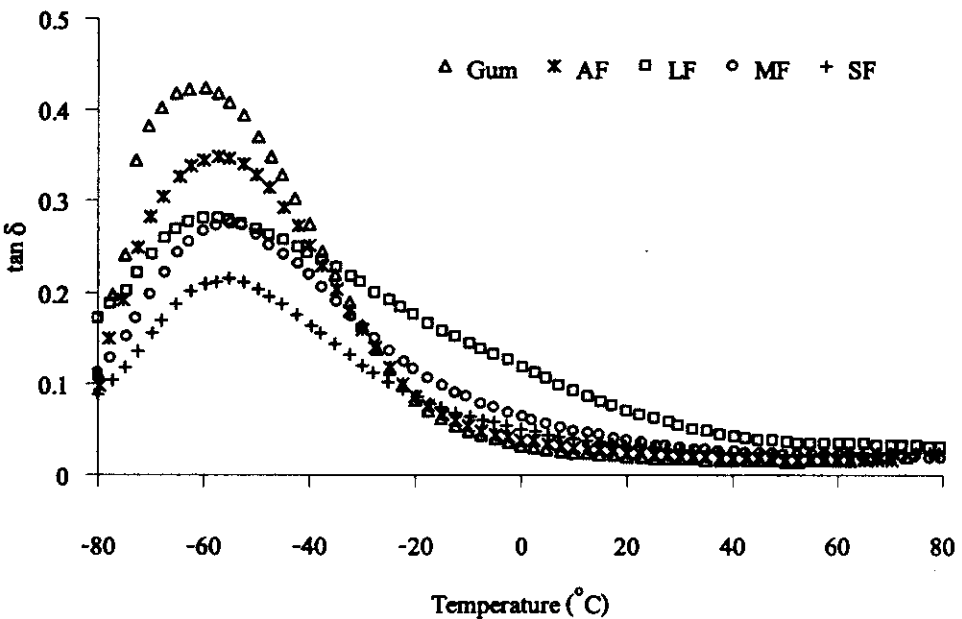
รูปที่ 4.36 ผลของสารคู่คววไซเลนต่อค่ามอดุลัสสะสม (กรณีของเถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดปานกลาง)

รูปที่ 4.37 แสดงผลของปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ต่อค่าตัวประกอบของการสูญเสีย (loss factor,  $\tan \delta$ ) จากการทดสอบพบว่า ค่าตัวประกอบของการสูญเสียสูงสุด ( $\tan \delta_{max}$ ) มีค่าลดลงเมื่อปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์เพิ่มขึ้น โดยยางคอมโพสิตที่เติมเถ้าลอยลิกไนต์ที่รับมาลงไปในปริมาณ 10 และ 50 phr มีค่าตัวประกอบของการสูญเสียลดลง 17.74% และ 20.47% เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีสารตัวเติมอันเนื่องมาจาก stiffness ที่เพิ่มขึ้น ส่วนรูปที่ 4.38 แสดงผลของขนาดอนุภาคเถ้าลอยลิกไนต์ต่อค่าตัวประกอบของการสูญเสีย จะเห็นได้ว่า ค่าตัวประกอบของการสูญเสียสูงสุดมีค่าลดลงเมื่ออนุภาคเถ้าลอยลิกไนต์มีขนาดเล็กลง โดยค่าตัวประกอบของการสูญเสียของยางคอมโพสิตที่เติมเถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดมากลงไปในปริมาณ 10 phr มีค่าลดลงประมาณ 49.41% เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีสารตัวเติม การเปลี่ยนแปลงของค่าตัวประกอบของการสูญเสียสูงสุดเนื่องจากสารตัวเติมอยู่รวมกันเป็นกลุ่มก้อนจะมีผลต่อการเคลื่อนตัวของโมเลกุลยาง การเติมเถ้าลอยลิกไนต์ลงไปในยางคอมโพสิตจะเป็นการเพิ่มโครงสร้างสารตัวเติม (filler network) ซึ่งจะไปกีดขวางการเคลื่อนตัวของโมเลกุลยางในขณะที่ยางคอมโพสิตเกิดการผิดรูปเชิงพลาสติก จึงทำให้ค่าตัวประกอบของการสูญเสียสูงสุดมีค่าลดลง (Sombatsompop, et al. , 2004) จากการศึกษาคู่ผสมสภาพแก้ว ( $T_g$ ) ซึ่งก็คือค่าอุณหภูมิที่มีค่าตัวประกอบของการสูญเสียสูงสุด พบว่า คู่ผสมสภาพแก้วมีค่าสูงขึ้น โดยในกรณีที่ไม่มีสารตัวเติม คู่ผสมสภาพแก้วมีค่าเท่ากับ  $-60.4^\circ\text{C}$  และเมื่อเติมเถ้าลอยลิกไนต์ที่รับมาลงไปในปริมาณ 10 และ 50 phr คู่ผสมสภาพแก้วจะมีค่าสูงขึ้นเป็น

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

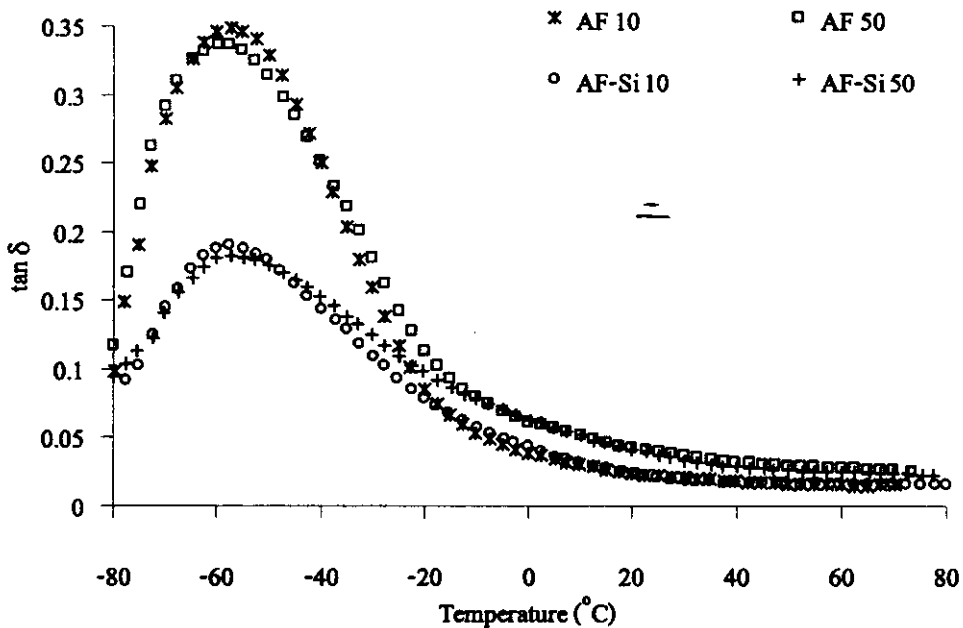


รูปที่ 4.37 ผลของปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ต่อค่าตัวประกอบของการสูญเสีย

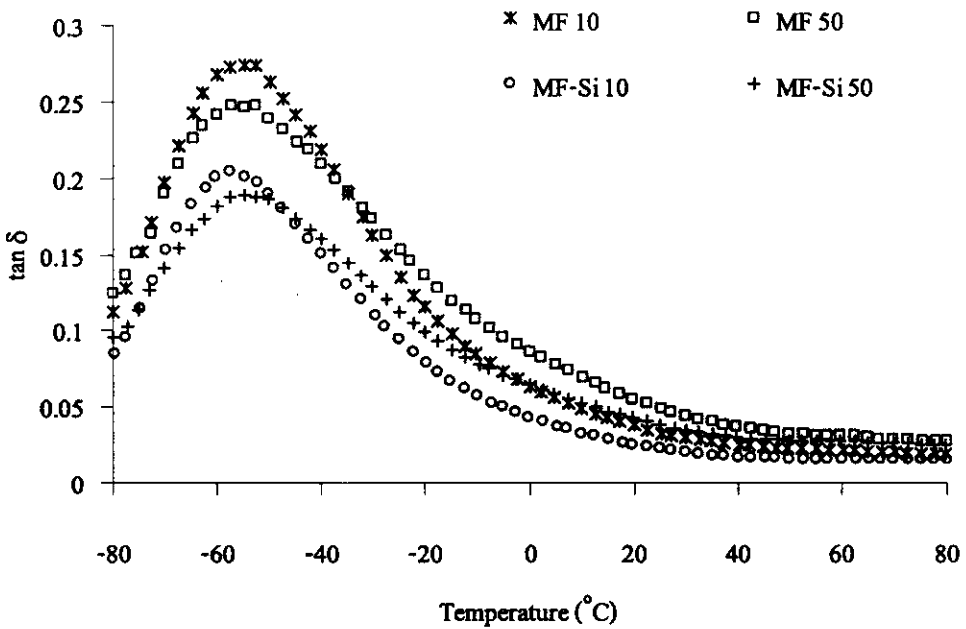


รูปที่ 4.38 ผลของขนาดอนุภาคเถ้าลอยลิกไนต์ต่อค่าตัวประกอบของการสูญเสีย (เมื่อเติมเถ้าลอยลิกไนต์ 10 phr)

รูปที่ 4.39 และ 4.40 แสดงผลของสารคู่ควบไซเลนต่อค่าตัวประกอบของการสูญเสียของยางคอมพอสิตที่เติมถั่วลันเตาในคั่งลงไป 10 และ 50 phr โดยรูปที่ 4.39 เป็นกรณีของถั่วลันเตาในคั่งที่รับมา และรูปที่ 4.40 เป็นกรณีของถั่วลันเตาในคั่งละเอียดปานกลาง จากการทดสอบพบว่า การเติมสารคู่ควบไซเลนลงไปในยางคอมพอสิตจะช่วยทำให้ค่าตัวประกอบของการสูญเสียสูงสุดมีค่าลดลง โดยในกรณีที่เติมถั่วลันเตาในคั่งที่รับมาลงไป 10 และ 50 phr ค่าตัวประกอบของการสูญเสียสูงสุดมีค่าลดลงประมาณ 45.38% และ 45.92% ตามลำดับ จากการศึกษาอุณหภูมิสภาพแก้วพบว่า อุณหภูมิสภาพแก้วของยางคอมพอสิตที่เติมสารคู่ควบไซเลนลงไปด้วย ค่าอุณหภูมิสภาพแก้ว จะมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อยประมาณ 1-2°C



รูปที่ 4.39 ผลของสารคู่ควบไซเลนต่อค่าตัวประกอบของการสูญเสีย (กรณีของถั่วลันเตาในคั่งที่รับมา)

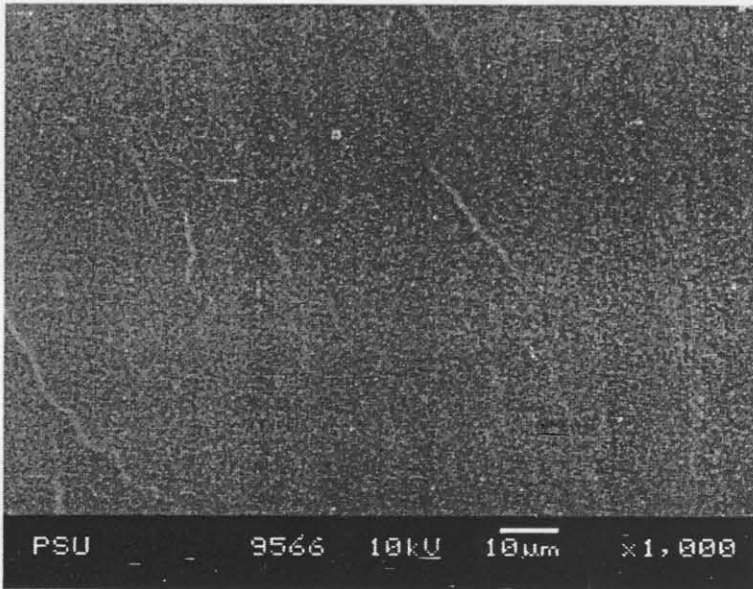


รูปที่ 4.40 ผลของสารคู่ควบไซเลนต่อค่าตัวประกอบของการสูญเสีย (กรณีของเถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดปานกลาง)

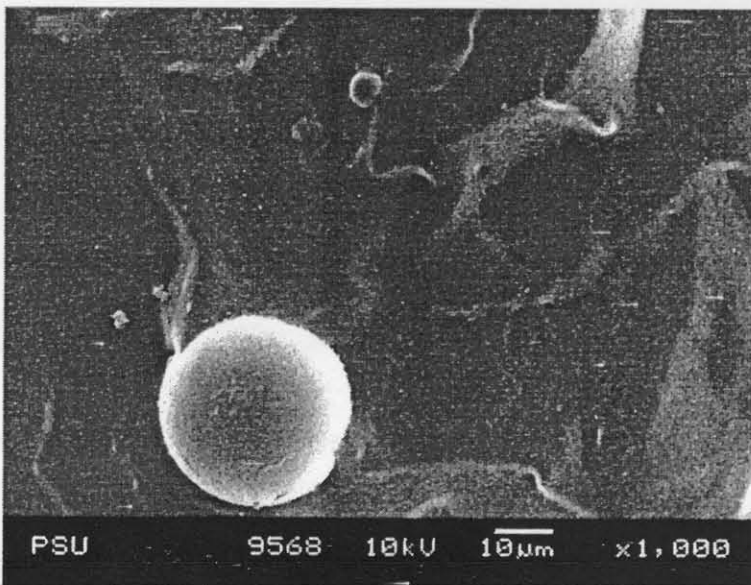
#### 4.5 การศึกษาการกระจายตัวของอนุภาคเถ้าลอยลิกไนต์ในเนื้อยาง

รูปที่ 4.41 - 4.46 แสดงภาพถ่ายบริเวณพื้นที่หน้าตัดของยางคอมโพสิตที่นำไปหักในไมโครเจนเหลวด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยรูปที่ 4.41 เป็นยางคอมโพสิตที่ไม่มีสารตัวเติม รูปที่ 4.42 และ 4.43 เป็นยางคอมโพสิตที่เติมเถ้าลอยลิกไนต์ที่รับมา 10 และ 50 phr ตามลำดับ รูปที่ 4.44 เป็นยางคอมโพสิตที่เติมเถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดมาก 50 phr รูปที่ 4.45 เป็นยางคอมโพสิตที่เติมเถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดมาก 50 phr และเติมสารคู่ควบไซเลนลงไปด้วย และรูปที่ 4.46 เป็นยางคอมโพสิตที่เตรียมจากน้ำยางข้นและเติมเถ้าลอยลิกไนต์ที่รับมา 30 phr จากการศึกษาพบว่า เมื่อเติมเถ้าลอยลิกไนต์ลงไปปริมาณน้อย การกระจายตัวของเถ้าลอยลิกไนต์ยังกระจายตัวได้อย่างสม่ำเสมอ แต่เมื่อเติมลงไปปริมาณที่มากขึ้น การกระจายตัวของเถ้าลอยลิกไนต์จะเป็นไปได้ยากขึ้น เกิดค้ำหนึ้นในเนื้อยางดังเช่นในรูปที่ 4.43 ซึ่งการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอนี้จะทำให้ความแข็งแรงดึงของยางคอมโพสิตลดลง ซึ่งสามารถนำไปช่วยอธิบายเพิ่มเติมในส่วนของสมบัติการดึงของยางคอมโพสิต เมื่อเถ้าลอยลิกไนต์มีขนาดอนุภาคเล็กลง เถ้าลอยลิกไนต์จะกระจายตัวได้ดีขึ้นสังเกตได้จากรูปที่ 4.44 ความต่อเนื่องระหว่างเฟสยางกับเถ้าลอยลิกไนต์จะมีความต่อเนื่องเพิ่มขึ้น สารคู่ควบไซเลนที่เติมลงไปจะช่วยปรับปรุงพันธะระหว่างยางและเถ้าลอย

ลิกไนต์ ทำให้เนื้อเยื่อมีความต่อเนื่องมากขึ้น การส่งถ่ายแรงจากเฟสยางไปสู่เส้นลิกไนต์ดีขึ้น ทำให้สมเชิงกลดีขึ้น การศึกษาการกระจายตัวของเส้นลิกไนต์ของยางคอมพอสิตที่เตรียมจากน้ำยางข้น (รูปที่ 4.46) เมื่อเปรียบเทียบกับยางคอมพอสิตที่เตรียมจากยางแห้งพบว่า การกระจายตัวของเส้นลิกไนต์ในเนื้อเยื่อมีความสม่ำเสมอใกล้เคียงกัน เนื่องจากยางจะถูกนำมาผสมกับสารเคมีอื่นๆ บนเครื่องผสมยางสองลูกกลิ้งด้วย จึงทำให้เส้นลิกไนต์กระจายตัวได้ดี

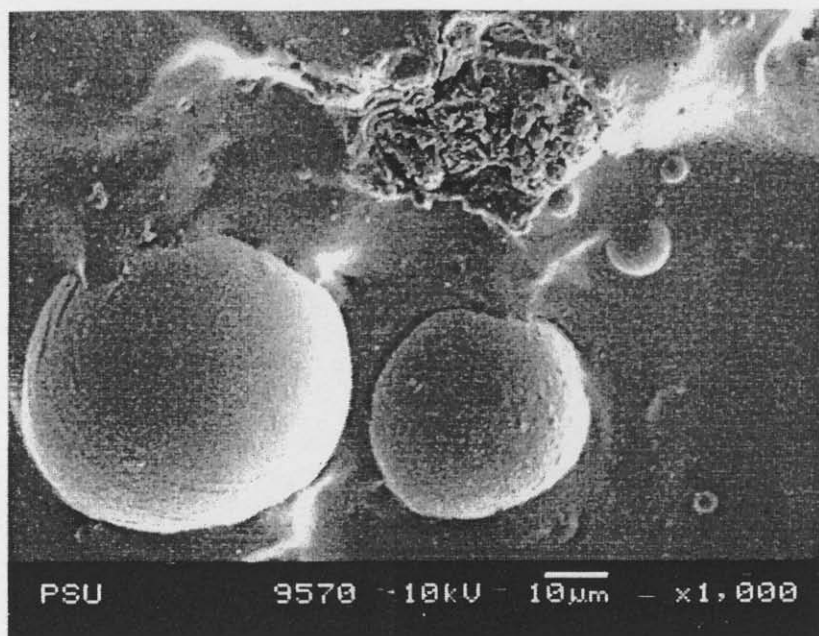


รูปที่ 4.41 ภาพถ่ายด้วยกล้อง SEM ของยางคอมพอสิตที่ไม่มีสารตัวเติม

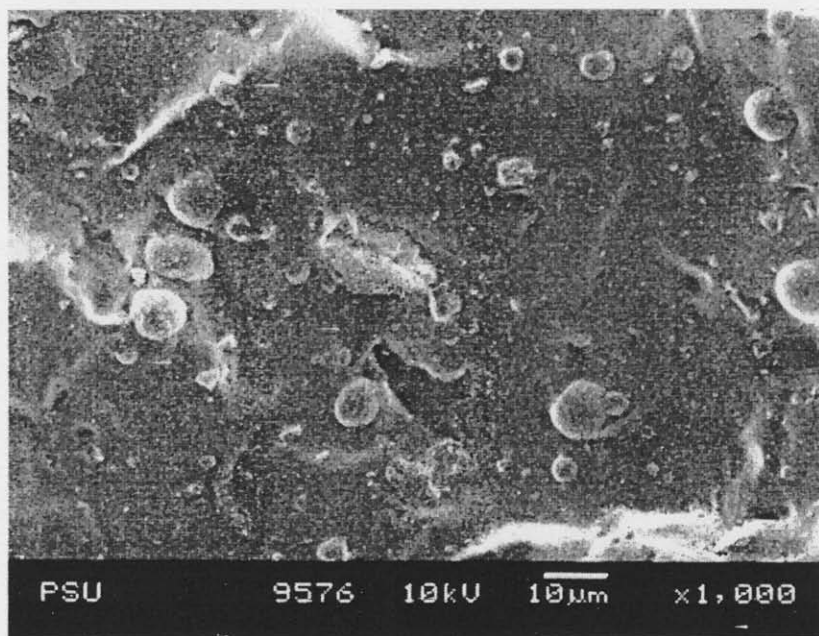


รูปที่ 4.42 ภาพถ่ายด้วยกล้อง SEM ของยางคอมพอสิตที่เติมเส้นลิกไนต์ที่รับมา 10 phr

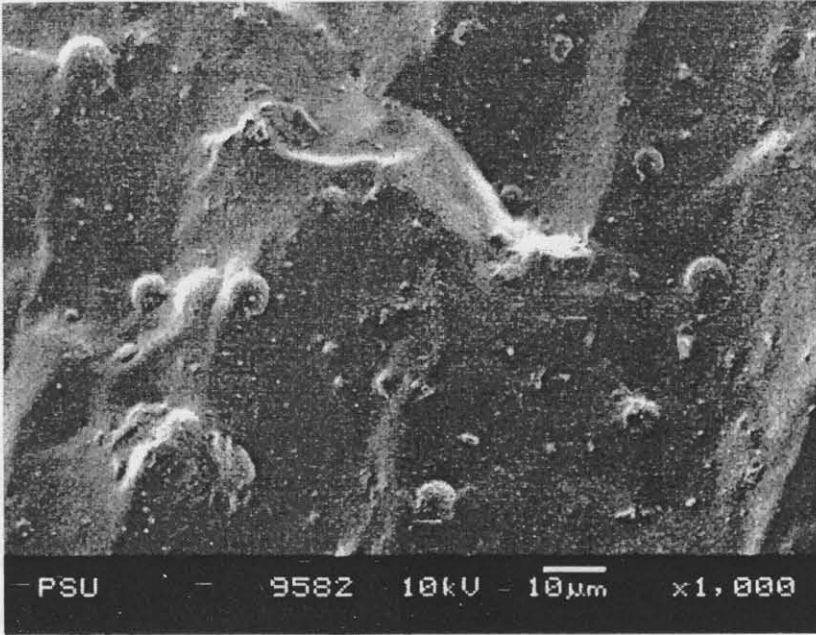




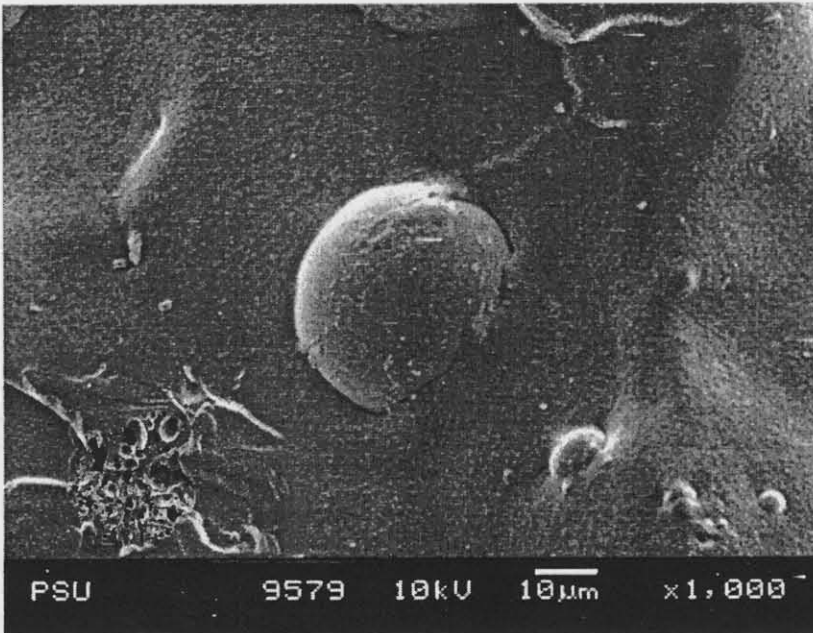
รูปที่ 4.43 ภาพถ่ายด้วยกล้อง SEM ของยางคอม โพลีไคทีที่เติมเ้าลอยลิกไนต์ที่รับมา 50 phr



รูปที่ 4.44 ภาพถ่ายด้วยกล้อง SEM ของยางคอม โพลีไคทีที่เติมเ้าลอยลิกไนต์ละเอียดมาก 50 phr



รูปที่ 4.45 ภาพถ่ายด้วยกล้อง SEM ของยางคอมพอสิตที่เติมถั่วลยถิกไนต์ละเอียดยมาก 50 phr และเติมสารกู่คววไซเลนด้วย



รูปที่ 4.46 ภาพถ่ายด้วยกล้อง SEM ของยางคอมพอสิตที่เติมถั่วลยถิกไนต์ที่รับมา 30 phr โดยใช้น้ำยางชั้นในการเตรียมยางคอมพอสิต

#### 4.6 การเปรียบเทียบสมบัติกับยางที่เติมด้วยเขม่าดำ

ตารางที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลระหว่างยางคอมพอสิตที่ไม่มีสารตัวเติม ยางคอมพอสิตที่เติมถั่วลยถิกไนต์ละเอียดมาก 10 phr และยางคอมพอสิตที่เติมเขม่าดำ 30 phr เนื่องจากการเติมถั่วลยถิกไนต์ละเอียดมาก 10 phr จะทำให้มีสมบัติเชิงกลในภาพรวมเด่นเมื่อเทียบกับยางคอมพอสิตสูตรอื่นๆ ส่วนการเติมเขม่าดำ 30 phr จะทำให้เขม่าดำแสดงประสิทธิภาพของการเสริมแรงออกอย่างเด่นชัด จึงเลือกยางทั้งสองสูตรมาเปรียบเทียบกัน จาก การทดสอบพบว่า ระยะยืดเมื่อขาดของยางคอมพอสิตที่เติมถั่วลยถิกไนต์มีค่ามากกว่ายางคอมพอสิตที่เติมด้วยเขม่าดำประมาณ 41.29% แต่สมบัติด้านอื่นๆ มีค่าน้อยกว่า โดยความแข็งแรงดึงมีค่าน้อยกว่าประมาณ 21.97% มอดุลัสที่ระยะยืด 300% และ 500% มีค่าน้อยกว่า 61.20% และ 59.10% ตามลำดับ ความต้านทานต่อการฉีกขาดมีค่าน้อยกว่า 23.33% ความแข็งมีค่าน้อยกว่า 19.21% และ คัดชนีการสึกหรอมีค่าน้อยกว่า 68.02% สมบัติของยางคอมพอสิตที่เติมด้วยถั่วลยถิกไนต์คือดีกว่า กรณีที่เติมด้วยเขม่าดำ เนื่องจากเขม่าดำมีขนาดอนุภาคปฐมภูมิที่เล็กกว่า จึงมีพื้นที่ผิวในการสร้างพันธะกับ โมเลกุลของยางมากกว่า นอกจากนี้บริเวณผิวของเขม่าดำจะมีหมู่ฟังก์ชันเคมีต่างๆ เช่น คาร์บอกซิล (carboxyl) ไฮดรอกซิล (hydroxyl) และฟีนอลิก (phenolic) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีกับ โมเลกุลของยางได้ (พงษ์ธร แซ่จู้, 2548)

ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลระหว่างยางคอมพอสิตที่ไม่มีสารตัวเติมเติมด้วยถั่วลยถิกไนต์ละเอียดมาก และเติมด้วยเขม่าดำ

สมบัติ	ยางคอมพอสิตที่ไม่มีสารตัวเติม	ยางคอมพอสิตที่เติมถั่วลยถิกไนต์ละเอียดมาก	ยางคอมพอสิตที่เติมเขม่าดำ
ความแข็งแรงดึง (MPa)	28.8	25.0	32.1
ระยะยืดเมื่อขาด (%)	968	850	602
มอดุลัสที่ระยะยืด 300% (MPa)	0.774	0.935	2.41
มอดุลัสที่ระยะยืด 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

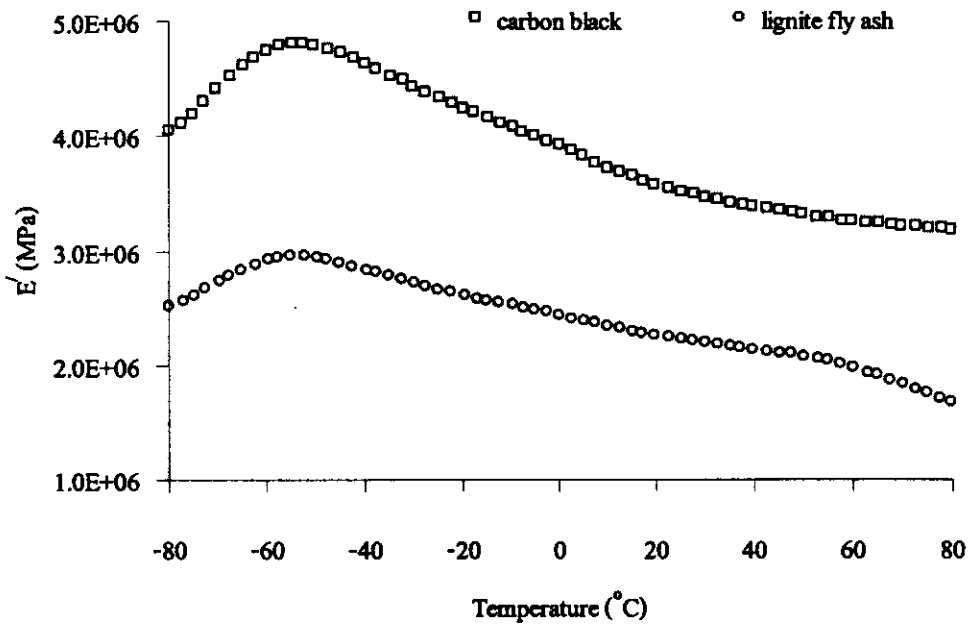
ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลระหว่างยางคอมพอสิตที่เติมตัวเติมต่างๆ เช่น เชม่าคำ (ที่ปริมาณการเติม 30 phr) เถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดมาก (ที่ปริมาณการเติม 10 phr) จากงานวิจัยนี้ และยางคอมพอสิตที่เติมตัวเติมอื่นๆที่หาได้ง่าย (Saad and Younan, 1995) เช่น  $\text{CaCO}_3$ , Kaolin และ แป้ง Talc โดยปริมาณสารตัวเติมเท่ากับ 40 phr และมีเส้นใยในลอนประมาณ 25 phr อย่างไรก็ตามจากการเปรียบเทียบยางคอมพอสิตที่เติมตัวเติมต่างๆข้างต้นพบว่ายางคอมพอสิตที่เติม เชม่าคำและเถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดมากยังมีสมบัติที่เหนือกว่าในแง่ของ tensile strength และ ระยะยืดเมื่อขาดแต่มีข้อคือยกกว่าในค่าของมอดุลัส แต่เมื่อเปรียบเทียบกับยางคอมพอสิตที่เติมเฉพาะ  $\text{CaCO}_3$  ที่ 40 phr พบว่ายางคอมพอสิตที่เติมเถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดมากมีสมบัติเชิงกลโดยรวมที่เหนือกว่า ดังนั้นการทำยางคอมพอสิตจากตัวเติมอื่นที่สามารถจัดหาได้ง่ายและราคาถูกสามารถทำได้แต่ต้องคำนึงถึงสมบัติเฉพาะอย่างที่น่าสนใจและอาจมีตัวเติมประเภทเส้นใยเสริมด้วย

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลระหว่างยางคอมพอสิตที่เติมด้วยเถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดมาก เชม่าคำ  $\text{CaCO}_3$ , Kaolin และ แป้ง Talc

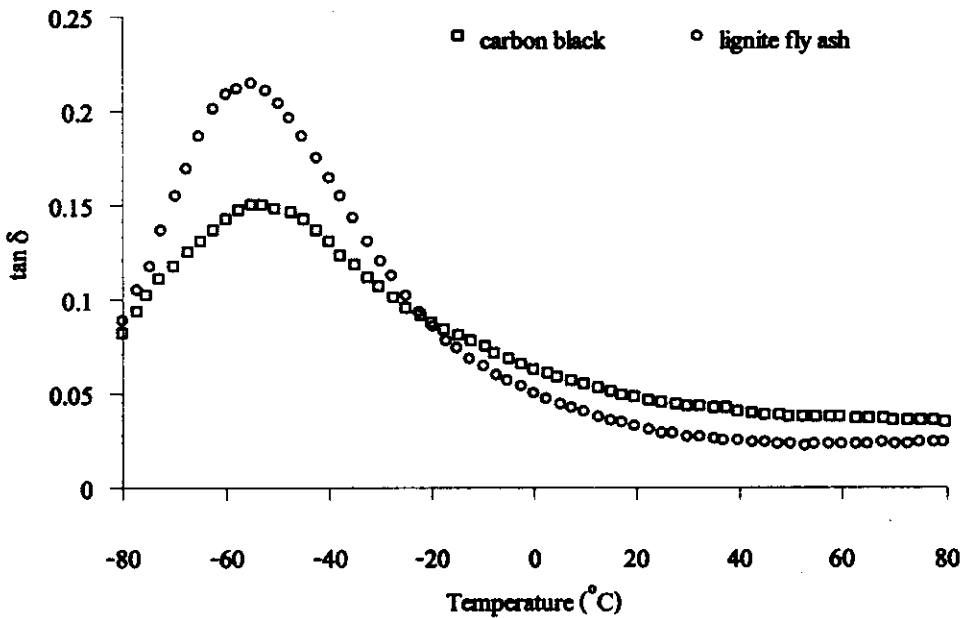
สมบัติ	เชม่าคำ	เถ้าลอยลิกไนต์	$\text{CaCO}_3$ **	$\overline{\text{CaCO}_3}$	Kaolin	Talc
Tensile strength (MPa)	32.1	25.0	12.0	9.4	10.2	10.3
Elongation at break (%)	602	850	748	72	70.1	80.9
Modulus at 300% (MPa)	2.41	0.935	-	-	-	-
Young modulus (MPa)	3.11	1.272	0.81	28.2	31.2	25.0

\*\*ไม่เติมเส้นใย

รูปที่ 4.47 และ 4.48 แสดงผลการเปรียบเทียบสมบัติเชิงพลวัตระหว่างยางคอมพอสิตที่เติมเถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดมาก 10 phr กับยางคอมพอสิตที่เติมเชม่าคำ 30 phr โดยรูปที่ 4.47 เป็นการเปรียบเทียบค่ามอดุลัสสะสม และรูปที่ 4.48 เป็นการเปรียบเทียบค่าตัวประกอบของการสูญเสีย พบว่า มอดุลัสสะสมของยางคอมพอสิตที่เติมเชม่าคำมีค่าสูงกว่ามอดุลัสสะสมของยางคอมพอสิตที่เติมเถ้าลอยลิกไนต์ และยางคอมพอสิตที่เติมเชม่าคำมีค่าตัวประกอบของการสูญเสียสูงสุดต่ำกว่ายางคอมพอสิตที่เติมเถ้าลอยลิกไนต์ ยางคอมพอสิตที่เติมเชม่าคำจะมีค่ามอดุลัสสะสม ที่สูงเนื่องจาก โครงสร้างของโพลีซัลไฟด์จะสั้นและมีเสถียรภาพ (จำนวน x ที่น้อยในโครงสร้าง R-S-S<sub>x</sub>-S-R') ทำให้สมบัติเชิงกลดีขึ้น มีหน่วงกันชั้นเคมีที่อ่อนไหวทางปฏิกิริยาออกซิเจนพื้นผิว ซึ่งจะ ทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างยางกับพื้นผิวเชม่าคำในช่วงของการผสม (Da Costa, et al. , 2000)



รูปที่ 4.47 การเปรียบเทียบค่ามอดุลัสระหว่างยางคอมโพสิตที่เติมเขม่าดำและเติมเถ้าลอย  
ลิกไนต์ละเอียดยกมาก



รูปที่ 4.48 การเปรียบเทียบค่าตัวประกอบของการสูญเสียระหว่างยางคอมโพสิตที่เติมเขม่าดำและ  
เติมเถ้าลอยลิกไนต์ละเอียดยกมาก