บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

จากการทดสอบสมบัติเชิงกล ในบทนี้ได้กล่าวถึงผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง ซึ่งจะประกอบด้วย สมบัติการกดของยางธรรมชาติผสมยางมะตอยและวัสดุมวลรวมภายใต้อิทธิพลของขนาดวัสดุมวลรวมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.75 - 9.50 มิลลิเมตร, 9.50 - 12.50 มิลลิเมตร และ 12.50 - 19.00 มิลลิเมตร อิทธิพลของน้ำหนักโมเลกุลยางธรรมชาติ โดยยางธรรมชาติที่ผ่านการลดน้ำหนักโมเลกุลด้วยกระบวนการบดเป็นเวลา 0 นาที (1,412,000 กรัมต่อโมล , ค่า Mooney viscosity เท่ากับ 75.30) 10 นาที (616,000 กรัมต่อโมล, ค่า Mooney viscosity เท่ากับ 56.50) และ 30 นาที (418,000 กรัมต่อโมล, ค่า Mooney viscosity เท่ากับ 44.11) อิทธิพลของยางธรรมชาติที่ปริมาณ 0, 5, 8, และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและอิทธิพลของความเร็วการกดที่ 50, 150, และ 250 มิลลิเมตรต่อนาที นอกจากนี้ยังได้ศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นกับการเปลี่ยนรูปของโกชีและมอดูลัสการกดกับเวลาการกด ซึ่งรายละเอียดทั้งหมดสามารถแสดงได้ดังหัวข้อต่อไปนี้

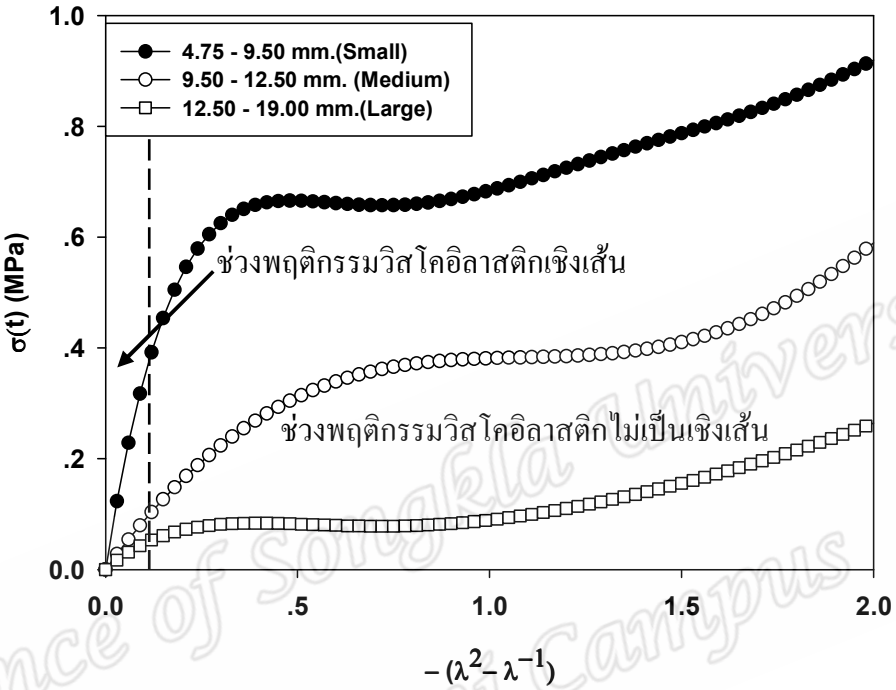
Prince of Songkla University Pattani Campus

ผลการทดสอบสมบัติการกด

การทดสอบสมบัติการกด ทดสอบโดยนำชิ้นตัวอย่างรูปทรงกระบอกซึ่งมีขนาดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.6 เซนติเมตร สูง 5 เซนติเมตร นำตัวอย่างที่ได้ไปทำการกดโดยใช้ความเร็วการกด 5, 100, 150, 200 และ 250 มิลลิเมตรต่อนาที ที่อุณหภูมิการกด 25 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่อง tensile tester เพื่อวัดแรงกดและระยะการกดแล้วนำไปคำนวณ หาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับการเปลี่ยนรูปของโกชีและมอดูลัสการกดกับเวลาการกด

4.1 การศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของพอลิเมอร์

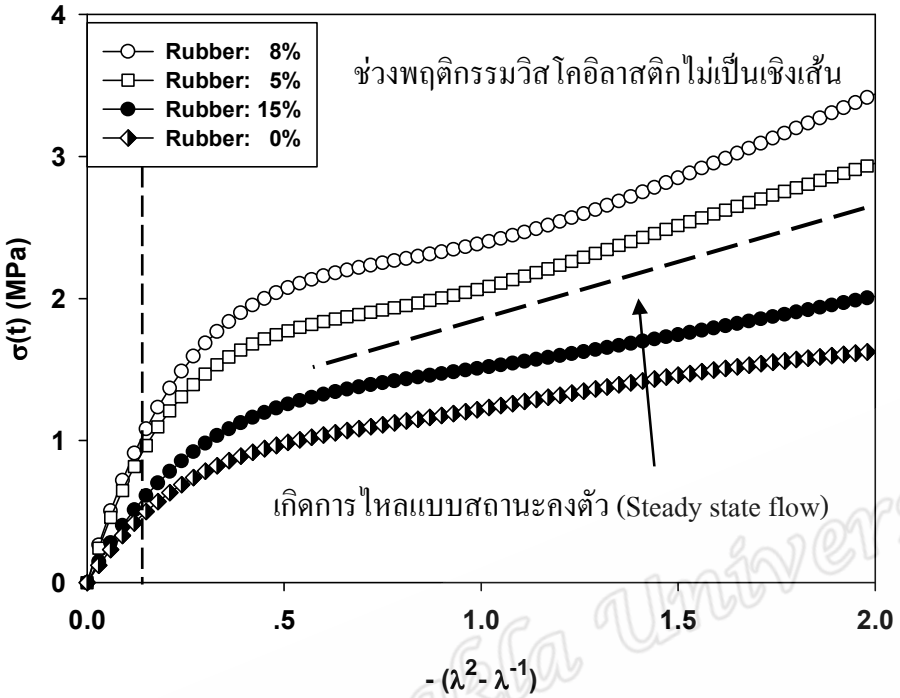
กราฟที่ได้จากการทดสอบสมบัติการกดโดยภาพรวมจะมีลักษณะพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปที่เกิดขึ้นดังนี้



รูปที่ 4.1 ความเค้นกับการเปลี่ยนรูปของโกชี ภายใต้อิทธิพลของขนาดวัสดุมวลรวมเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.75 - 9.50 มิลลิเมตร, 9.50 - 12.50 มิลลิเมตรและ 12.50 - 19.00 มิลลิเมตร ที่ปริมาณยางธรรมชาติ 0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความเร็วการกด 50 มิลลิเมตรต่อนาที บดเป็นเวลา 0 นาที

จากกราฟรูปที่ 4.1 พบว่า ในช่วงเริ่มต้นของการกด มีการเปลี่ยนรูปไม่เกิน 10 % มีการขยับอย่างช้าๆ กราฟจะมีลักษณะพฤติกรรมแบบวิสโคอิลาสติกเชิงเส้น เนื่องจากในช่วงดังกล่าวโซ่ยางมะตอย โซ่ยางธรรมชาติ เริ่มมีการขยับตัว เนื่องจากการคลายตัวของพอลิเมอร์เกิดขึ้น แต่เมื่อมีการเปลี่ยนรูปที่มากขึ้น จะแสดงพฤติกรรมแบบวิสโคอิลาสติกไม่เชิงเส้น เนื่องจากมีทั้งการคลายตัว การคืบ และการขยับตัวของวัสดุมวลรวม เมื่อวัสดุมวลรวมมีการขยับตัวก็จะเคลื่อนที่แบบทันทีทันใด ส่งผลให้ส่วนที่เคลือบและเกาะผิวที่ขรุขระของวัสดุมวลรวมเคลื่อนที่ตามไปด้วยอย่างรวดเร็ว จึงเกิดเป็นพฤติกรรมแบบวิสโคอิลาสติกไม่เชิงเส้น

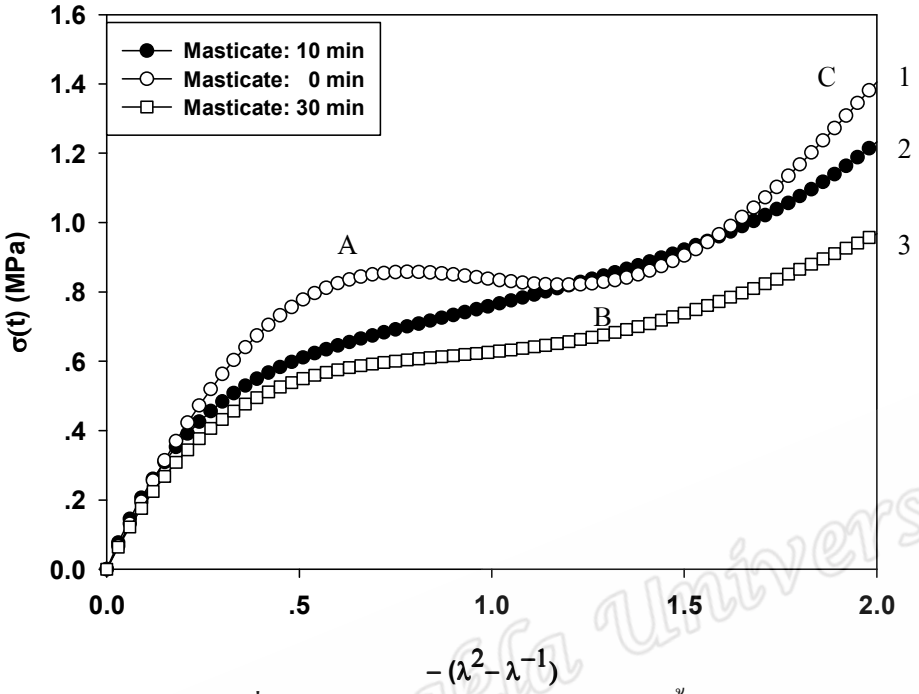
Prince of Songkla University Pattani Campus



รูปที่ 4.2 ความเค้นกับการเปลี่ยนรูปของโกชี ภายใต้อิทธิพลของปริมาณยางธรรมชาติ 0, 5, 8 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่น้ำหนักโมเลกุลยางธรรมชาติที่ผ่านการบด 30 นาที ความเร็วการกด 250 มิลลิเมตรต่อนาที และขนาดวัสดุมวลรวมเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.50 - 12.50 มิลลิเมตร

จากกราฟรูปที่ 4.2 พบว่า ในช่วงพฤติกรรมแบบวิสโคอิลาสติกไม่เชิงเส้น มีการเปลี่ยนรูป หรือการไหลแบบสถานะคงตัวเกิดขึ้น (Steady state flow) เนื่องจากช่วงดังกล่าว จะมีการเคลื่อนที่เปลี่ยนตำแหน่งเกิดขึ้น (Dislocation) ของทั้งส่วนที่เป็นยางธรรมชาติ ยางมะตอยและวัสดุมวลรวม ซึ่งการเปลี่ยนตำแหน่งที่เกิดขึ้นนี้ยังเป็นการขัดขวางการเปลี่ยนรูปให้เกิดยากขึ้น จึงต้องใช้ความเค้นที่มากขึ้นในการเปลี่ยนรูป นอกจากนี้ความเครียดที่เกิดขึ้นจะอยู่ในอัตราคงที่เมื่อเทียบกับเวลา

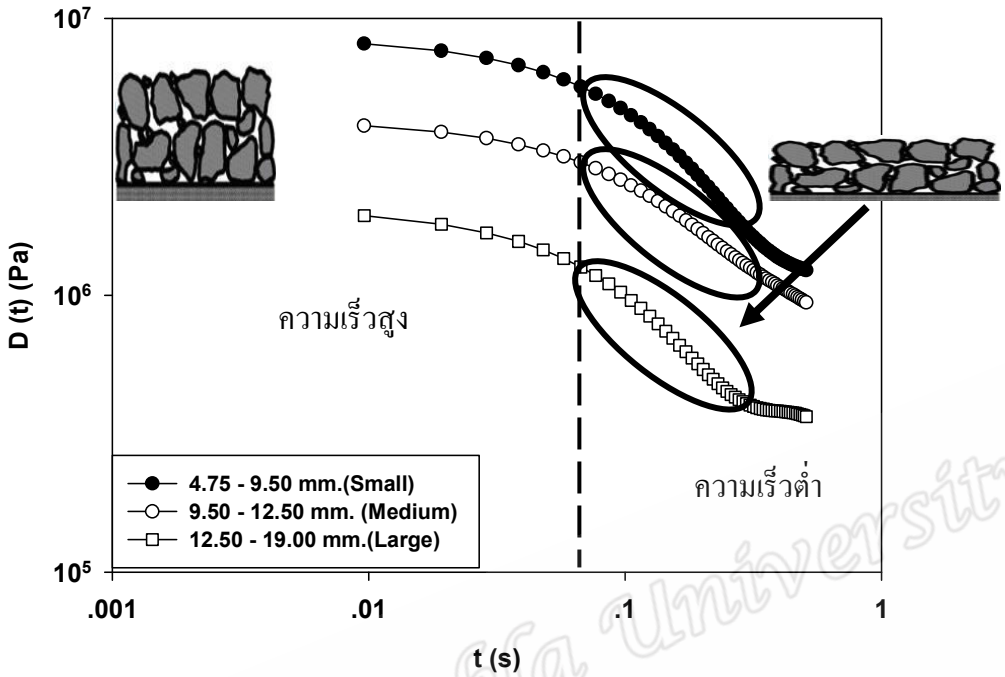
Prince of Songkla University Pattani Campus



รูปที่ 4.3 ความเค้นกับการเปลี่ยนรูปของโกชี ภายใต้อิทธิพลของน้ำหนักโมเลกุลยางธรรมชาติที่ผ่านการบด 0 นาที, 10 นาที, 30 นาที ที่ปริมาณยางธรรมชาติ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความเร็วการกด 50 มิลลิเมตรต่อนาที และขนาดวัสดุมวลรวมเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.50 - 12.50 มิลลิเมตร

จากกราฟรูปที่ 4.3 พบว่า กราฟเส้นที่ 1 หรือเส้นกราฟที่น้ำหนักโมเลกุลยางธรรมชาติที่ผ่านการบด 0 นาที การเปลี่ยนรูปที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะที่เพิ่มขึ้นจากตำแหน่งเริ่มต้นถึงตำแหน่ง A เนื่องจาก ช่วงดังกล่าว เมื่อพอลิเมอร์ได้รับความเค้น จะมีเพียงการขยับตัวในส่วนยางธรรมชาติและยางมะตอย ยังคงมีการเปลี่ยนรูปเกิดขึ้นไม่มาก มีความเค้นตกค้างเหลืออยู่ แต่เมื่อมีการเปลี่ยนรูปที่มากขึ้น คือมีทั้งการขยับตัว เคลื่อนตัวของยางธรรมชาติ ยางมะตอย และวัสดุมวลรวม ส่งผลให้ความสามารถในการต้านการไหลหรือต้านการเปลี่ยนรูปลดลง ดังช่วง AB จนถึงตำแหน่งหนึ่งเมื่อการคลายตัว การคืบ ของยางธรรมชาติ ยางมะตอย และการเคลื่อนที่ของวัสดุมวลรวมสิ้นสุดลง ส่งผลให้มีการเปลี่ยนรูปหรือการไหลแบบสถานะคงตัวเกิดขึ้น ดังช่วง BC

Prince of Songkla University Pattani Campus

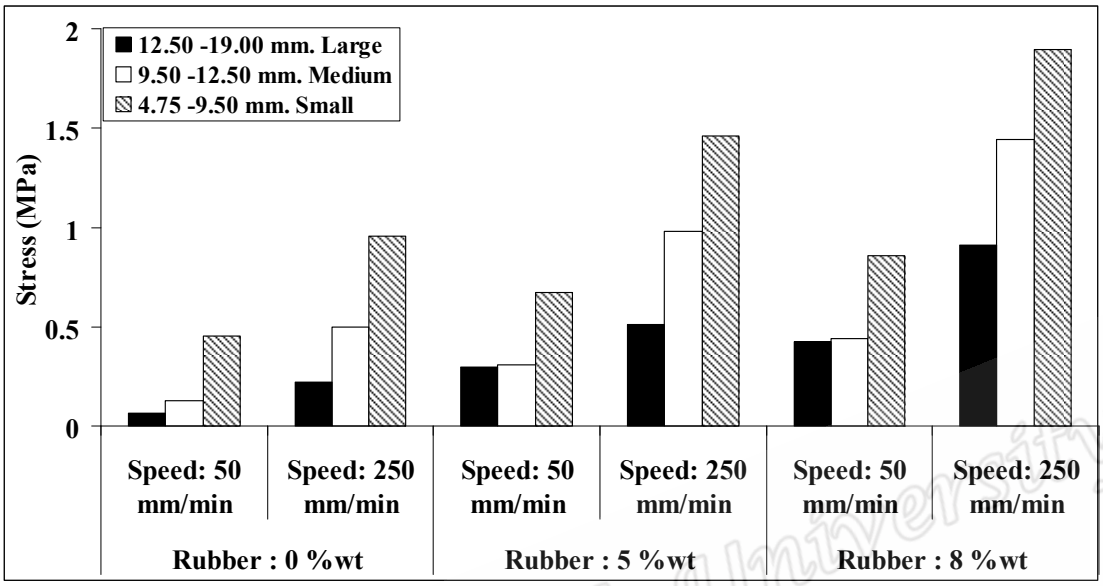


รูปที่ 4.4 มอดูลัสการกด (D(t)) กับ เวลาที่ใช้ในการกด (t) ภายใต้อิทธิพลของขนาดวัสดุมวลรวม เส้นผ่านศูนย์กลาง 4.75 - 9.50 มิลลิเมตร, 9.50 - 12.50 มิลลิเมตร และ 12.50 - 19.00 มิลลิเมตร ที่ปริมาณยางธรรมชาติ 0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความเร็วการกด 250 มิลลิเมตรต่อนาที บดเป็นเวลา 0 นาที

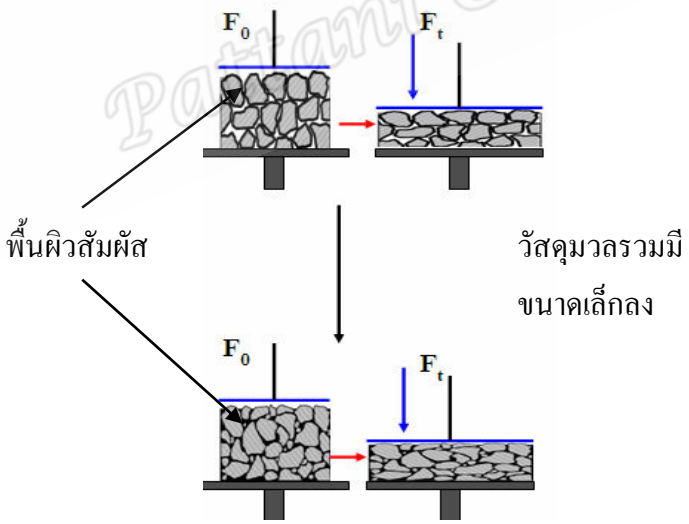
จากกราฟรูปที่ 4.4 พบว่า ในช่วงเวลาน้อยๆ มอดูลัสการกดจะมีค่ามาก เนื่องจากทั้งยางมะตอย ยางธรรมชาติและวัสดุมวลรวม มีเวลาการขยับหรือคลายตัวน้อย ยังคงมีความเค้นตกค้างอยู่ เปรียบเสมือนกับถนน เมื่อถูกล้อยานพหนะกดทับวิ่งด้วยความเร็วสูง แต่เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นค่ามอดูลัสการกดจะลดลง เนื่องจากทั้งยางมะตอย ยางธรรมชาติและวัสดุมวลรวม มีเวลาการขยับคลายตัวที่มากขึ้น มีการเปลี่ยนรูปที่มากขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการต้านการกด ต้านการเปลี่ยนรูปมีน้อยลง (ตรงบริเวณที่วงกลม) เปรียบเสมือนกับถนน เมื่อถูกล้อยานพหนะกดทับวิ่งด้วยความเร็วต่ำๆ

Prince of Songkla University Pattani Campus

4.2 การศึกษาอิทธิผลของขนาดวัสดุมวลรวม



รูปที่ 4.5 ความเค้นกับการเปลี่ยนรูปโกชีที่ 0.15 ภายใต้อิทธิพลของขนาดวัสดุมวลรวมเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.75 - 9.50 มิลลิเมตร, 9.50 - 12.50 มิลลิเมตร และ 12.50 - 19.00 มิลลิเมตร ที่ปริมาณยางธรรมชาติ 0, 5, 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความเร็วการกด 50, 250 มิลลิเมตรต่อนาที บดเป็นเวลา 10 นาที



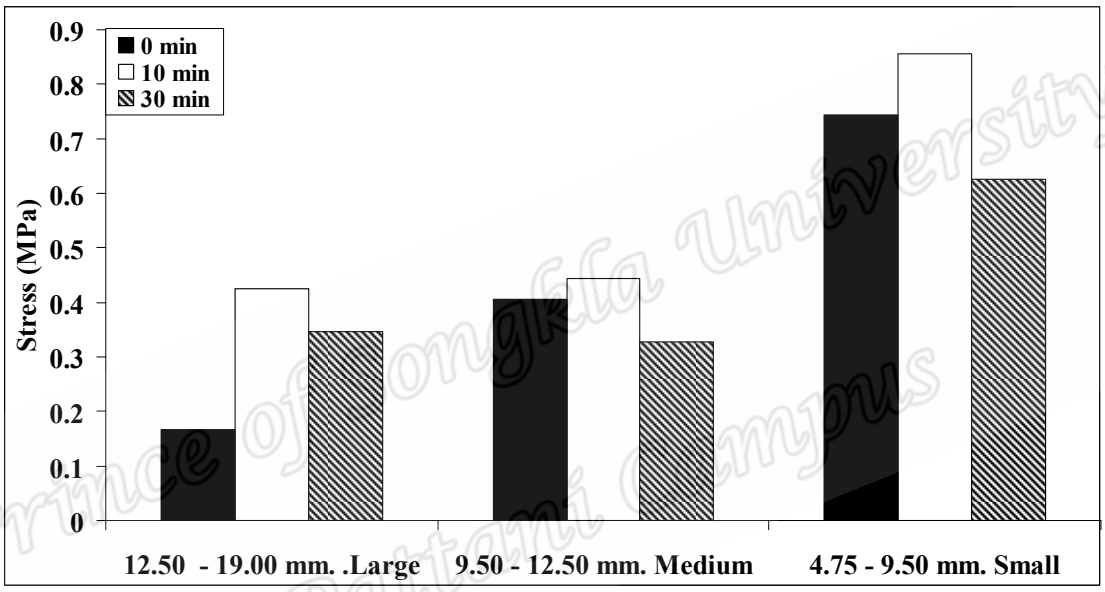
รูปที่ 4.6 ภาพประกอบการอธิบายอิทธิผลของขนาดวัสดุมวลรวม

จากการศึกษาอิทธิผลของขนาดวัสดุมวลรวม พบว่า โดยภาพรวม ค่าความเค้นจะเพิ่มขึ้น เมื่อวัสดุมวลรวมมีขนาดเล็กลง ดังแสดงดังกราฟรูปที่ 4.5 เนื่องจาก เมื่อขนาดวัสดุมวลรวม

Prince of Songkla University Pattani Campus

มีขนาดเล็กลง ส่งผลให้มีพื้นผิวสัมผัสที่มากขึ้น จึงทำให้มีความเสียดทานภายในระหว่างผิวของวัสดุมวลรวมและการยึดเกาะติดระหว่างยางมะตอยกับวัสดุมวลรวมมากขึ้น และเป็นการเพิ่มจำนวนพื้นผิวสำหรับต้านการไหลตัว โดยความเสียดทานภายในและแรงยึดเกาะระหว่างวัสดุมวลรวมจะช่วยป้องกันไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่ผ่านซึ่งกันและกัน ด้วยเหตุนี้จึงเป็นผลให้ความเค้นมีค่าเพิ่มขึ้น

4.3 การศึกษาอิทธิผลของน้ำหนักโมเลกุลยางธรรมชาติ

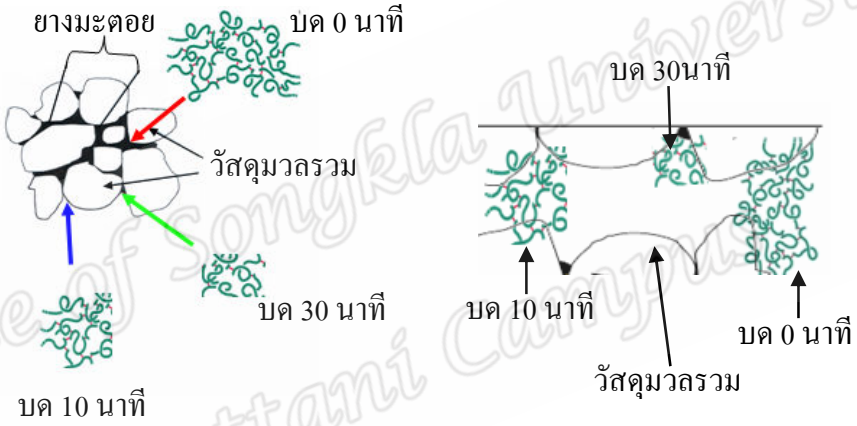


รูปที่ 4.7 ความเค้นกับการเปลี่ยนรูปของโกชีที่ 0.15 ภายใต้อิทธิพลของน้ำหนักโมเลกุลยางธรรมชาติที่ผ่านการบด 0 นาที, 10 นาที, 30 นาที ที่ปริมาณยางธรรมชาติ 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความเร็วการกด 50 มิลลิเมตรต่อนาที และขนาดวัสดุมวลรวมเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.50 - 19.00 มิลลิเมตร, 9.50 - 12.50 มิลลิเมตร, 4.75 - 9.50 มิลลิเมตร

จากการศึกษาอิทธิผลของน้ำหนักโมเลกุลยางธรรมชาติ พบว่า โดยภาพรวม ค่าความเค้นจะเพิ่มขึ้นที่นำหนักโมเลกุลที่ผ่านการบด 0, 30, 10 นาที ตามลำดับ สำหรับวัสดุมวลรวมขนาด12.50 - 19.00 มิลลิเมตร และ 30, 0, 10 นาที ตามลำดับ สำหรับวัสดุมวลรวมขนาด 9.50 - 12.50 มิลลิเมตรและขนาด 4.75 - 9.50 มิลลิเมตร ดังกราฟรูปที่ 4.7 เนื่องจากเมื่อยางธรรมชาติที่ผ่านการบด จะส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลต่ำจึงมีการขยับตัวของโซ่ยางธรรมชาติมากและมีจุดเกี่ยวพันกันน้อย จึงทำให้ง่ายในการแทรกตัวเข้าไปอยู่ระหว่างพื้นผิวสัมผัสของวัสดุมวลรวม ส่งผลให้มีค่าความต้านทานการเปลี่ยนรูปและความแข็งแรงมากกว่ายางธรรมชาติที่ไม่ผ่านการบด ซึ่งมีน้ำหนัก

Prince of Songkla University Pattani Campus

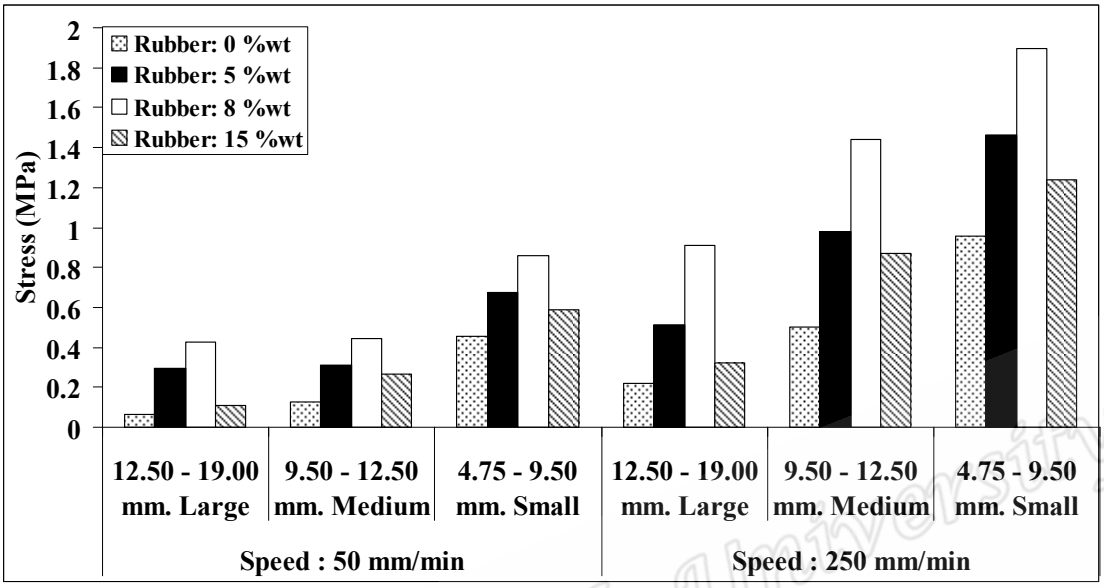
โมเลกุลที่สูง จำนวนโซ่ยางที่ไปเกาะเกี่ยวน้อยลง ความยาวของโซ่มากก็จะใช้เวลามากในการขยับตัวของโซ่ยาง จึงยากต่อการแทรกตัวเข้าไปอยู่ระหว่างพื้นผิวสัมผัสของวัสดุมวลรวม แต่ในทางกลับกัน ขนาดวัสดุมวลรวมบางขนาด ที่น้ำหนักของโมเลกุลยางธรรมชาติต่ำมากก็จะส่งผลเสียต่อสมบัติเชิงกล ได้เช่นกัน เนื่องจากการที่น้ำหนักของโมเลกุลยางธรรมชาติที่ต่ำมาก มีที่ว่างในการขยับตัวมากเกินไปและมีจุดเกี่ยวพันที่น้อยเกินไป นั่นคือ โซ่ยางหนึ่งโซ่จะมีการเกาะเกี่ยววัสดุมวลรวมทั้งสองก้อนนั้นมีน้อยลง เนื่องจากความยาวโซ่สั้นลง ส่งผลให้มีความต้านทานการไหล การเปลี่ยนรูปและความแข็งแรงที่น้อยตามไปด้วย เป็นผลให้ค่าความเค้นมีค่าต่ำลงเช่นกัน ดังนั้นระหว่างขนาดวัสดุมวลรวมกับน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติ ควรเลือกให้ได้สมบัติที่เหมาะสมต่อการใช้งาน



รูปที่ 4.8 ภาพประกอบการอธิบายอิทธิผลของของน้ำหนักโมเลกุลยางธรรมชาติ

Prince of Songkla University Pattani Campus

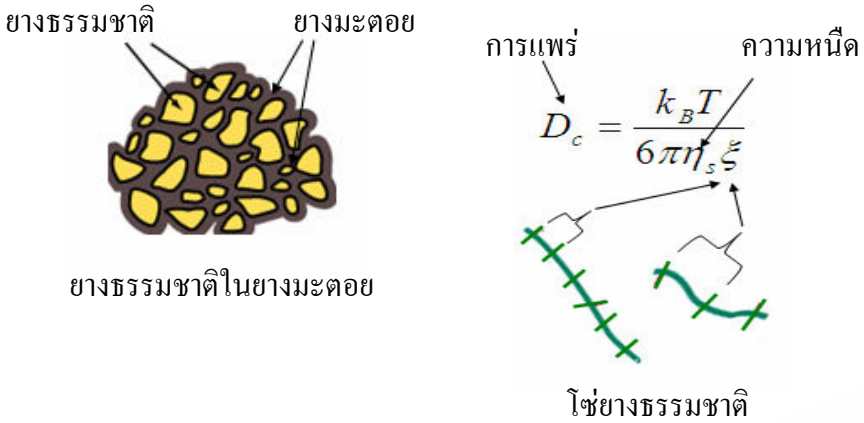
4.4 การศึกษาอิทธิผลของปริมาณยางธรรมชาติ



รูปที่ 4.9 ความเค้นกับการเปลี่ยนรูปของโกชีที่ 0.15 ภายใต้อิทธิพลของปริมาณยางธรรมชาติ 0, 5, 8 และ15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่น้ำหนักโมเลกุลยางธรรมชาติที่ผ่านการบด 10 นาที ความเร็วการกด 50, 250 มิลลิเมตรต่อนาที และขนาดวัสดุมวลรวมเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.50 - 19.00 มิลลิเมตร, 9.50 - 12.50 มิลลิเมตร, 4.75 - 9.50 มิลลิเมตร

จากการศึกษาอิทธิผลของปริมาณยางธรรมชาติ พบว่า โดยภาพรวม ความเค้นเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น จนถึงจุดหนึ่งที่ปริมาณยางธรรมชาติมากเกินไป ส่งผลให้ความเค้นลดลง ดังกราฟรูปที่ 4.9 เนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณยางธรรมชาติ ความหนืดเพิ่มขึ้น และส่งผลให้จุดพันกันของสายโซ่มีมากขึ้น จึงทำให้มีความแข็งแรง ความสามารถในการต้านการไหลการเคลื่อนที่ผ่านระหว่างกันของวัสดุมวลรวม การต้านการเปลี่ยนรูป เพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่ที่ปริมาณยางธรรมชาติ 15 % ส่วนใหญ่ของขนาดวัสดุมวลรวมขนาดต่างๆ พบว่าค่าความเค้นและค่ามอดูลัสจะลดลงเพราะปริมาณยางที่มากขึ้น จะมีผลต่อการแพร่ของยางธรรมชาติและยางมะตอย ซึ่งจากสมการ $D_c = \frac{k_B T}{6\pi\pi_s \xi}$ (Doi, 1996) จะแสดงให้เห็นว่า เมื่อความหนืดเพิ่มขึ้น ทำให้การแพร่ลดลง โดยปริมาณยางธรรมชาติที่เพิ่มมากขึ้น มีผลให้ยางมะตอยเป็นตัวที่จะแพร่เข้าหายางธรรมชาติและในทางกลับกันเมื่อปริมาณยางธรรมชาติน้อยๆ โดยยางธรรมชาติจะเป็นตัวแพร่เข้าหายางมะตอย และจากการแพร่ดังกล่าวนี้จะมีผลให้เกิดค่าความเค้นและมอดูลัสที่ลดลงตามไปด้วย

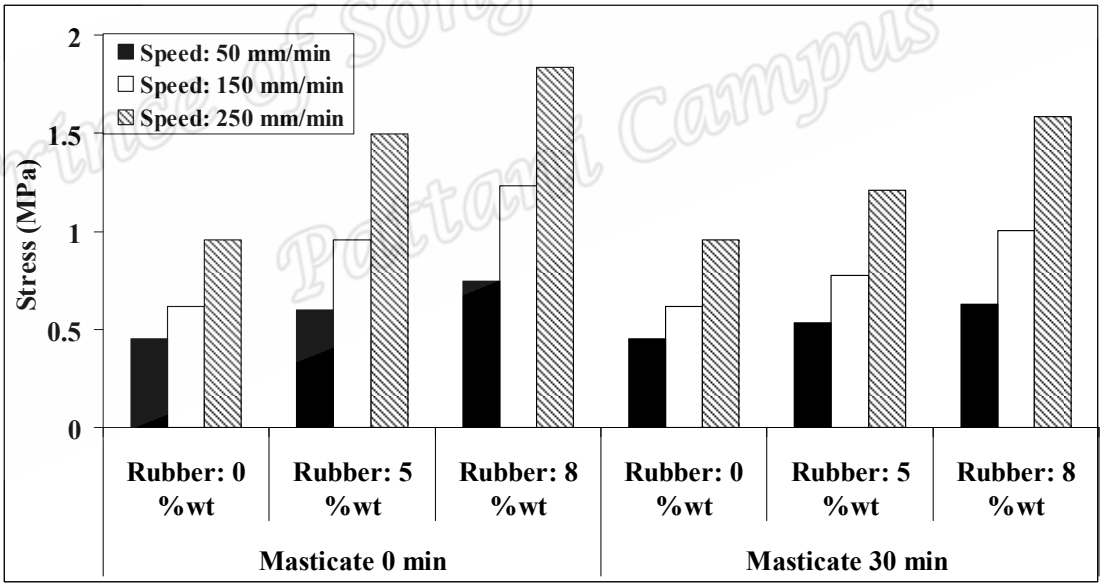
Prince of Songkla University Pattani Campus



รูปที่ 4.10 ภาพประกอบการอธิบายอิทธิผลของปริมาณยางธรรมชาติ

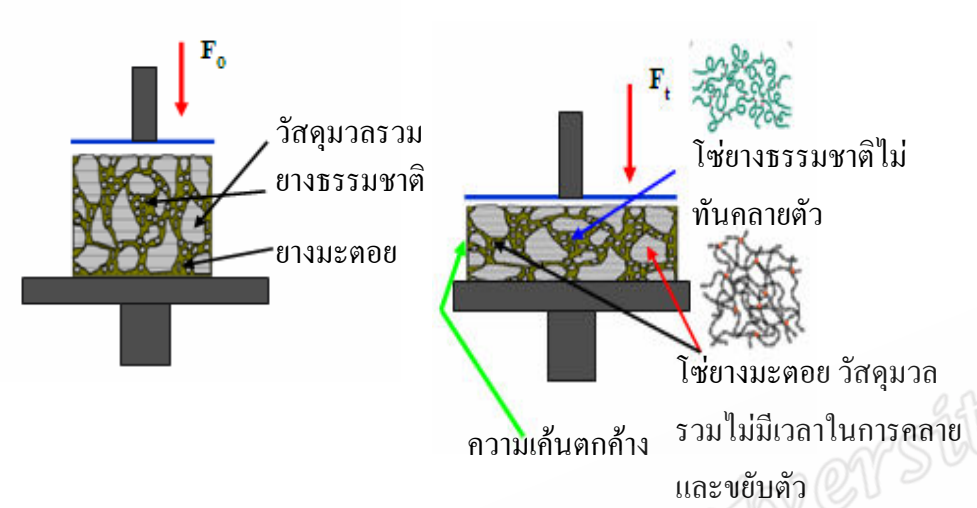
Prince of Songkla University Pattani Campus

4.5 การศึกษาอิทธิผลของความเร็วการกด



รูปที่ 4.11 ความเค้นกับการเปลี่ยนรูปของโกชีที่ 0.15 ภายใต้อิทธิพลของความเร็วการกด 50, 150 และ 250 มิลลิเมตรต่อนาที ที่ปริมาณยางธรรมชาติ 0, 5, 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก น้ำหนักโมเลกุลยางธรรมชาติที่ผ่านการบด 0 นาที 30 นาที และขนาดวัสดุมวลรวมเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.75 - 9.50 มิลลิเมตร

จากการศึกษาอิทธิผลของความเร็วการกด พบว่า โดยภาพรวม ความเค้นเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วการกดเพิ่มขึ้น ดังกราฟรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.12 ภาพประกอบการอธิบายอิทธิผลของความเร็วการกด

เนื่องจากอิทธิพลของความเร็วการกด เมื่อทำการกดด้วยความเร็วที่เพิ่มขึ้น โซ่ยางธรรมชาติจะยังไม่มีการรีแลก โซ่ยางมะตอยและวัสดุมวลรวม จะมีเวลาในการขยับตัว การไหลหรือคลายตัวน้อย ทำให้มีความเค้นตกค้างภายในเนื้อวัสดุดังกล่าว นอกจากนี้ยังมีความเสียดทานภายในสายโซ่ยางธรรมชาติ ยางมะตอยและความเสียดทานภายในระหว่างผิวสัมผัสของทั้งยางมะตอย ยางธรรมชาติที่เคลือบผิววัสดุมวลรวมและระหว่างผิวสัมผัสของวัสดุมวลรวมซึ่งกันและกันที่มากขึ้นจึงมีผลให้ความเค้นเพิ่มขึ้น

Prince of Songkla University Pattani Campus