บทที่ 5
สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษาการบด

การบดหินปูนให้ได้ขนาดละเอียดกว่า 1 ไมครอนสามารถสรุปผลการศึกษาดังนี้

5.1.1 การบดหินปูนแบบบดแห้งสามารถทำให้อนุภาคมีขนาดเล็กลงได้อย่างจำกัด เพราะเมื่อบดนานประมาณ 30 ชั่วโมง ก็ไม่สามารถบดให้อนุภาคมีขนาดเล็กลงไปอีกเนื่องจากเกิดการจับตัวกันของอนุภาคเล็กกลายเป็นอนุภาคกลุ่มใหญ่ (Agglomeration)

5.1.2 การบดแบบเปียกมีประสิทธิภาพและการกระจายตัวดีกว่าการบดแบบแห้ง (การบดหินปูน) และเมื่อบดนานขึ้นจะมีการกระจายตัวอยู่ในช่วงที่แคบลง

5.1.3 เพื่อให้ได้หินปูนขนาดละเอียดกว่า 1 ไครอน การบดแบบเปิด(Open Circuit) จะต้องบดนานอย่างน้อย 147 ชั่วโมง และเมื่อบดนานขึ้นนอกจากจะได้อนุภาคขนาดละเอียดแล้วยังได้กลุ่มอนุภาคที่มีช่วงขนาดแคบลงด้วย

5.1.4 การอาศัยสารปรับสภาพผิวสามารถทำให้อนุภาคมีขนาดเล็กลงได้ดีขึ้น เฉพาะในช่วงแรกของการบดเท่านั้น แต่เมื่อบดนานขึ้นพบว่าไม่ช่วยให้ดีขึ้นจากการบดแบบไม่ใส่สารปรับสภาพผิวได้

5.2 สรุปผลการศึกษาการบดแบบวงจรปิด(Close Circuit) กับการคัดขนาด และการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการบด

เมื่อออกแบบการบดให้หินปูนค้างอยู่ในเครื่องบด(Retention Time) 1 ชั่วโมง แล้วคัดแยกเอาขนาดที่หยาบกว่า 1 ไมครอนย้อนกลับไปบดใหม่นั้นสามารถสรุปผลได้ดังนี้ กำลังการผลิตของเครื่องบด และเครื่องคัดขนาดที่ต้องใช้สูงเป็น 5.56 เท่าของอัตราการผลิตหินปูน

5.3.1 ค่าใช้จ่ายในการบดสำหรับผลิตภัณฑ์ต่างๆ กัน 3 ขนาด เมื่อยังไม่ได้รวมค่าวัตถุดิบและค่าเตรียมวัตถุดิบ

ขนาดผลิตภัณฑ์ x,(microns)	MC:P ratio	ค่าใช้จ่ายในการบดบอลมิลล์ (บาท/เมตริกตัน)	รวมค่าวัตถุดิบค่าเตรียมและค่าบด (บาท/เมตริกตัน)
-1	5.56:1	808	1,558
-3	2.13:1	309	1,059
-10	1.08:1	156	906

5.3.2 ค่าใช้จ่ายในการบดแบบวงจรปิดจะถูกกว่าแบบวงจรเปิดโดยที่การบดแบบวงจรเปิด(Open Circuit) จะมีค่าใช้จ่ายรวมประมาณ 14,350 บาท/เมตริกตัน

5.3.3 การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการผลิต เพื่อเปรียบเทียบกับราคาของหินปูนบดละเอียดที่มีขายจะพบว่า

5.2.3.1 ราคาขายปลีกหินปูนตามท้องตลาดซึ่งเป็นที่ใช้เป็นตัวเติมในยาง(ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 10 ไมครอน) อยู่ในช่วงราคาประมาณ 15,000-20,000 บาท/เมตริกตัน

5.2.3.2 การบดแบบเปิดจะมีค่าใช้จ่ายในการผลิตที่สูงมากเมื่อเทียบกับ ราคาหินปูนที่มีขายตามท้องตลาด

5.2.3.3 การบดแบบปิดเป็นกระบวนการบดที่มีค่าใช้จ่ายในการผลิตที่ต่ำ แต่จะต้องมีค่าใช้จ่ายสำหรับค่าชุดอุปกรณ์ในการคัดแยกขนาดอนุภาค

5.3 สรุปผลการศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับช่วงปริมาณผงหินปูนที่เหมาะสม

การศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับช่วงปริมาณหินปูนที่เหมาะสมสามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

5.3.1 วัสดุผสมมีค่าความแข็งเพิ่มมากขึ้นทุกช่วงอัตราการผสม 10-50 phrเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติที่ไม่มีการเติมผงหินปูน และวัสดุผสมมีค่าความแข็งเพิ่ม 15.88%

5.3.2 วัสดุผสมมีค่าความทนทานต่อแรงดึงเพิ่มมากขึ้นทุกช่วงอัตราการผสม (10-50 phr) และที่อัตราส่วนผสม 30 phr มีค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดเพิ่มขึ้น 23.53%เมื่อเทียบกับยางธรรมชาติที่ไม่มีการเติมผงหินปูน

5.3.3 วัสดุผสมมีค่าความต้านทานการฉีกขาดเพิ่มมากขึ้นทุกช่วงอัตราการผสม และที่อัตราส่วนผสม 30 phr มีค่าความต้านทานการฉีกขาดสูงสุดเพิ่มขึ้น 22.29%เมื่อเทียบกับยางธรรมชาติที่ไม่มีการเติมผงหินปูน

5.3.4 ช่วงการผสมที่น่าสนใจพบว่าอยู่ในช่วง 10-30 phr

5.4 สรุปผลการศึกษาสมบัติเชิงกลของยางผสม

การศึกษาสมบัติเชิงกลของยางผสมผงหินปูนสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

5.4.1 อิทธิพลของขนาดอนุภาคผงหินปูน

5.4.2.1 เมื่ออนุภาคหินปูนมีขนาดละเอียด ส่งผลให้ค่าความแข็งมีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยที่ d_{50} = 0.5 ไมครอน อัตราส่วนผสมที่ 30 phrยางผสมมีความแข็งเพิ่มขึ้นประมาณ 11.0 เช่นเดียวกับ ค่ามอดูลัสที่ 300% การยืด เมื่อใช้อนุภาคที่มีขนาดละเอียด จะส่งผลให้ค่ามอดูลัสที่ 300% การยืด มีค่าสูงขึ้น โดยที่ d_{50} = 0.5 ไมครอน อัตราส่วนผสมที่ 30 phrยางผสมมีค่ามอดูลัสที่ 300% การยืด เพิ่มขึ้นประมาณ 37.7%

หินปูนที่เตรียมโดยการบด มีขนาดละเอียดกว่า ของบริษัทปูนคุณภาพจำกัด ซึ่งมีขนาดประมาณ 10 ไมครอน

5.5 สรุปผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพของยางผสม

การศึกษาสมบัติทางกายภาพยางผสมผงหินปูนสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

5.5.1 จากการศึกษาโดยการถ่ายภาพภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่า เมื่อขนาดอนุภาคละเอียดขึ้น การกระจายตัวจะค่อนข้างสม่ำเสมอ และจะเกิดรอยขนาดเล็กที่ผิวยางเป็นจำนวนมาก แต่เมื่อมีการเคลือบอนุภาคด้วย Stearic Acid กลับทำให้รอยเหล่านั้นลดน้อยลง การกระจายตัวดีขึ้น และมีอนุภาคที่เกาะกันเป็นกลุ่มก้อนน้อยลง โดยเมื่อพิจารณาการเคลือบผิวด้วย PAA และ PMAA พบว่า การเคลือบด้วย PAA เป็นผลทำให้อนุภาคเกิดการเกาะตัวกันมากกว่าการใช้ PMAA แต่การเคลือบทั้ง 2 แบบ ก็ยังคงเกิดรอยขนาดเล็กที่ผิวยางเป็นจำนวนมากอยู่

5.5.2 การศึกษาโดย FTIR พบว่า เมื่อใช้ผงหินปูนที่มีขนาดต่างกันคือ d_{50} = 0.5, 1.0 และ 1.5 ไมครอน ผสมในยาง พบว่า Spectrum ของยางซึ่งเติมผงหินปูนที่มีขนาด d_{50} = 0.5 ไมครอน มีความ Sharp มากที่สุด โดย Peak ที่ได้จะค่อนข้างคล้ายคลึงกัน แต่ช่วงการกระจายตัวของอนุภาค ไม่ว่าจะกว้าง หรือแคบก็ไม่ค่อยมีผลต่อประสิทธิภาพ ในการเข้าทำปฏิกิริยาของผงหินปูน หรือไม่ค่อยมีผลต่อ Spectrum ที่ได้นั่นเอง เช่นเดียวกับ การใช้อนุภาคที่มีการเคลือบผิวด้วย PAA และ PMAA ซึ่งนอกจาก Spectrum แสดงถึงหมู่ฟังก์ชั่นของ CH_3 ซึ่งเป็นสิ่งที่แตกต่างกันระหว่าง PAA และ PMAA ตามสูตรโครงสร้างแล้ว Peak อื่นๆจะค่อนข้างคล้ายคลึงกัน แสดงว่าการใช้สารเคลือบผิวไม่น่าจะทำให้เกิดพันธะระหว่างยาง และอนุภาค ส่วนวิธีการเคลือบผิว โดยที่ไม่ว่าจะใช้สารเคลือบแบบ PAA หรือ PMAA การเคลือบผิวโดยการบดผสม จะมีประสิทธิภาพมากกว่าการกวนผสม ซึ่งสังเกตจากกรณี Peak ที่ได้จากการบดผสมมีความ Sharp กว่า Peak ที่ได้จากการกวนผสม

5.4.2.2 การใช้อนุภาคที่มีขนาดละเอียด จะส่งผลให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงเพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน โดยที่ d_{50} = 0.5 ไมครอน มีผลทำให้ความทนทานต่อแรงดึงของยางเพิ่มจาก 18.8 MPa ขึ้นไปเป็นประมาณ 23.9 MPa แต่เมื่อเติมผงหินปูนมากไปอีกไม่ได้ทำให้ความทนทานต่อแรงดึงเปลี่ยนแปลง ซึ่งหากใช้อนุภาคที่มีขนาด d_{50} มากกว่า 1.0 ไมครอน จะส่งผลทำให้ความทนทานต่อแรงดึงของยางเพิ่มมากขึ้น จนถึงระดับหนึ่งแล้วลดลง โดยความทนทานต่อแรงดึงจะมีค่าสูงสุด เมื่อใช้ปริมาณผงหินปูน 15 phr ซึ่งการใช้อนุภาคที่มีขนาดละเอียด จะส่งผลให้ค่าความต้านทานการฉีกขาด เพิ่มสูงขึ้นด้วย แต่เมื่อเติมผงหินปูนมากขึ้นอีก ไม่ได้ทำให้ค่าความต้านทานการฉีกขาดเปลี่ยนแปลง โดยที่ d_{50} = 0.5 ไมครอน ยางผสมมีค่าความต้านทานการฉีกขาด เพิ่มขึ้นประมาณ 22.8%

5.4.2 อิทธิพลของสารเคลือบและกระบวนการเคลือบผิวอนุภาคผงหินปูน

5.4.2.1 การเคลือบผิวด้วย PAA จะส่งผลต่อความแข็ง ค่ามอดูลัสที่ 300% การยืด และค่าความต้านทานการฉีกขาด มากกว่าการเคลือบผิวด้วย PMAA โดยเมื่อเพิ่มปริมาณผงหินปูน ค่าความแข็งก็มีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน

5.4.2.2 กระบวนการเคลือบ (การบดเคลือบ และการกวนเคลือบ)ผิวอนุภาค ไม่มีผลต่อความแข็ง ค่ามอดูลัสที่ 300% การยืด และค่าความต้านทานการฉีกขาด เมื่อเทียบกับการใช้อนุภาคที่ไม่มีการเคลือบผิว

5.4.2.3 กระบวนการบดเคลือบให้ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลดีกว่าการกวนเคลือบ

5.4.2.4 การเคลือบผิวอนุภาค จะส่งผลให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงลดลงเมื่อเทียบกับใช้อนุภาคที่ไม่มีการเคลือบผิว ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากเกิดจากการเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาคหินปูนที่ผ่านการเคลือบผิวแล้ว ทำให้กลายเป็นจุดบกพร่องบนชิ้นงาน

5.4.2.5 การทดสอบ Bound Rubber พบว่าเมื่ออนุภาคมีขนาดละเอียดกว่า 1 ไมครอน จะมีผลทำให้ ปริมาณการจับยึดระหว่างยางและอนุภาคหินปูนมากที่สุด สำหรับการเคลือบผิวด้วย PAA และ PMAA ทำให้อนุภาคเกาะกันเป็นก้อนใหญ่ ทำให้ปริมาณการจับยึดระหว่างยางและอนุภาคหินปูนลดน้อยลง เนื่องจากปริมาณพื้นที่ผิวของอนุภาคที่จับกันเป็นก้อนมีค่าน้อยกว่า

5.4.3 การศึกษาเปรียบเทียบกับหินปูนที่มีขายตามท้องตลาด

5.4.3.1 ผงหินปูนที่เตรียมโดยการบด จะส่งผลต่อความแข็ง ค่าความทนทานต่อแรงดึง, ค่ามอดูลัสที่ 300% การยืด และค่าความต้านทานการฉีกขาด มากกว่าการใช้ Microcal และ Turboplex ของบริษัทปูนคุณภาพจำกัด ซึ่งน่าจะเป็นเพราะ ผง

5.6 สรุปผลการศึกษาการบด

ถ้ามีการศึกษาในเรื่องการผสมหินปูนในยางพาราควรมีการศึกษาเพิ่มในหัวข้อดังนี้

5.6.1 ควรให้ความสนใจเกี่ยวกับพันธะและการผสมระหว่างยางกับผงหินปูน ที่ขนาดอนุภาคต่างๆกัน โดยเฉพาะที่ขนาดอนุภาคเล็กเล็กกว่า 1 ไมครอน ซึ่งทำให้ยางผสมมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น

5.6.2 ในระหว่างการใส่ผงหินปูนเข้าไปผสมในยางพารา ควรให้มีการกระจายตัวที่ดีสม่ำเสมอเพราะจะทำให้เกิดการผสมกันที่ดี

5.6.3 ควรมีการศึกษาในสมบัติด้านอื่นๆ นอกเหนือจากสมบัติเชิงกล เพื่อประโยชน์การนำไปใช้ที่กว้างขวางมากยิ่งขึ้น

5.6.4 ควรทำการศึกษาระบบการบดแบบปิด และศึกษาการคัดแยกขนาดอนุภาคที่ตัดขนาดที่ค่าละเอียดมากเพื่อเป็นลดค่าใช้จ่ายเนื่องจากการบดเวลานาน

5.6.5 ต้องมีการศึกษาในเชิงลึก ของการวิเคราะห์ผลการถ่ายภาพ โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

5.6.6 ต้องมีการศึกษาในเชิงลึก ของการวิเคราะห์ผลโดยเครื่อง FTIR