



การผลิตโฟมยางธรรมชาติโดยใช้ไมโครบับเบิลด้วยก๊าซไนโตรเจน
Natural Rubber Latex Foam Production via Microbubbles of
Nitrogen Gas

กุลธิดา เกตุแก้ว
Kuntida Katkeaw

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the
Degree of Master of Engineering in Mining and Materials Engineering
Prince of Songkla University

2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



การผลิตโฟมยางธรรมชาติโดยใช้ไมโครบับเบิลด้วยก๊าซไนโตรเจน
Natural Rubber Latex Foam Production via Microbubbles of
Nitrogen Gas

กุลธิดา เกตุแก้ว
Kuntida Katkeaw

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the
Degree of Master of Engineering in Mining and Materials Engineering
Prince of Songkla University

2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การผลิตโพลีเมอร์ธรรมชาติโดยใช้ไมโครบับเบิลด้วยก๊าซไนโตรเจน
 ผู้เขียน นางสาวกุลธิดา เกตุแก้ว
 สาขาวิชา วิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....
 (รองศาสตราจารย์ กัลยาณี คุปตานนท์)

..... ประธานกรรมการ
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีระชัย แสงฉาย)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....กรรมการ
 (รองศาสตราจารย์ กัลยาณี คุปตานนท์)

.....
 (ดร.มัทนา ชังคะมโน)

.....กรรมการ
 (ดร.มัทนา ชังคะมโน)

.....กรรมการ
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิษณุ ราชเพ็ชร)

.....กรรมการ
 (ดร.สมใจ จันทร์อุดม)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
 ของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และ
 วัสดุ

.....
 (ศาสตราจารย์ ดร.ดำรงศักดิ์ ฟ้างูสง)
 คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....

(รองศาสตราจารย์ กัลยาณี คุปตานนท์)
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลงชื่อ.....

(นางสาวกุลธิดา เกตุแก้ว)
นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นางสาวกุลธิดา เกตุแก้ว)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์ การผลิตโพลีเมอร์ธรรมชาติโดยใช้ไมโครบับเบิลด้วยก๊าซไนโตรเจน
 ผู้เขียน นางสาวกุลธิดา เกตุแก้ว
 สาขาวิชา วิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ
 ปีการศึกษา 2562

บทคัดย่อ

โพลีเมอร์ธรรมชาติในปัจจุบันนิยมผลิตจากกระบวนการด้นลอปและกระบวนการทาลาเลย์ ซึ่งกระบวนการทาลาเลย์ให้โพลีเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นและสมบัติทางกายภาพที่ดีกว่ากระบวนการด้นลอป เนื่องจากเซลล์โพลีเมอร์มีลักษณะกลมและเชื่อมต่อกันเป็นเครือข่ายอย่างสมบูรณ์ ไม่มีรอยแตกหรือการฉีกขาดของการเชื่อมต่อระหว่างเซลล์โพลีเมอร์ และเซลล์โพลีเมอร์มีขนาดสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน ในขณะที่กระบวนการด้นลอปให้โพลีเมอร์ที่มีสมบัติทางกายภาพและการยืดหยุ่นที่ด้อยกว่า เนื่องจากเซลล์โพลีเมอร์มีขนาดไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน เซลล์โพลีเมอร์เกิดการฉีกแยกออกจากกัน ไม่เชื่อมต่อเป็นเครือข่ายทั้งชิ้นงาน นอกจากนี้สองวิธีดังกล่าวข้างต้นนี้ ได้มีการนำเสนอวิธีใหม่ในการผลิตโพลีเมอร์ธรรมชาติจากฟองอากาศขนาดเล็ก ซึ่งให้ลักษณะสัณฐานวิทยาคล้ายกันกับโพลีเมอร์ที่ผลิตจากกระบวนการทาลาเลย์แต่ใช้ต้นทุนที่ต่ำกว่ามาก เนื่องจากไม่จำเป็นต้องทำที่อุณหภูมิต่ำและไม่จำเป็นต้องใช้ระบบสุญญากาศในกระบวนการผลิต

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการเตรียมโพลีเมอร์ธรรมชาติโดยใช้ฟองก๊าซไนโตรเจนขนาดเล็กเพื่อศึกษาอิทธิพลของขนาดของฟองก๊าซต่อลักษณะสัณฐานวิทยา สมบัติทางกายภาพ และสมบัติความต้านทานต่อการติดไฟของโพลีเมอร์ โดยทำการเปรียบเทียบกับโพลีเมอร์ที่ผลิตจากฟองอากาศขนาดเล็ก การผลิตโพลีเมอร์ธรรมชาติโดยวิธีนี้ทำได้โดยการปล่อยก๊าซไนโตรเจนไหลผ่านน้ำยางคอมพาวด์ที่บรรจุอยู่ในบับเบิลคอลัมน์ ที่ต่อติดกับดีฟิวเซอร์มีขนาดรูพรุนอยู่ในช่วง 10-16 ไมครอน เพื่อทำให้เกิดฟองก๊าซขนาดเล็กในน้ำยางคอมพาวด์ ที่อัตราการไหลของก๊าซเข้าที่แตกต่างกัน คือ 30, 50 และ 80 มิลลิลิตรต่อนาที การศึกษาพบว่าอัตราการไหลมีผลอย่างมากต่อลักษณะสัณฐานวิทยา และสมบัติทางกายภาพของโพลีเมอร์ที่ผลิตได้ กล่าวคือเซลล์โพลีเมอร์รูปร่างกลมกระจายตัวสม่ำเสมอ และการเชื่อมต่อของเซลล์โพลีเมอร์เป็นไปอย่างสมบูรณ์ ไม่พบการฉีกขาดของเซลล์โพลีเมอร์และขนาดของเซลล์โพลีเมอร์ใหญ่ขึ้นตามอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น ทำให้ความหนาแน่นและดัชนีความแข็งแรงเชิงกลที่เปลี่ยนแปลงไปหลังการบ่มเร่งมีค่าลดลง แต่ทำให้เปอร์เซ็นต์การยุบตัวเนื่องจากแรงกดมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราการไหลเพิ่มมากขึ้น โดยดัชนีความแข็งแรงเชิงกลที่ได้จากโพลีเมอร์ไนโตรเจนนี้จัดเป็นโพลีเมอร์ที่มีความนิ่มปานกลางในทุก ๆ อัตราการไหล นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของโพลีเมอร์ที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนขนาดเล็กและโพลีเมอร์ที่ผลิตจากฟองอากาศขนาดเล็กที่อัตราการไหลเท่ากัน คือ 50 มิลลิลิตรต่อนาที ขนาดของเซลล์โพลีเมอร์ที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนมีขนาดเซลล์เล็กกว่าเซลล์โพลีเมอร์ที่ผลิตจากฟองอากาศอย่างเห็นได้ ส่งผลให้โพลีเมอร์ที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนมีค่าความหนาแน่นและดัชนีความแข็งแรงเชิงกลเพิ่มขึ้น แต่ทำให้เปอร์เซ็นต์การยุบตัวเนื่องจากแรงกดมีค่าลดลง นอกจากนี้ยังส่งผลให้ดัชนีความแข็งแรงเชิงกลที่เปลี่ยนแปลงไปหลังจากการบ่มเร่งมีค่าลดลงด้วย นั่นแสดงว่าก๊าซไนโตรเจนมีส่วนในการช่วยชะลอการเสื่อมสภาพ

ของโพลีเมอร์ แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อทำการเปรียบเทียบสมบัติความต้านทานต่อการติดไฟของโพลีเมอร์ที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนและโพลีเมอร์ที่ผลิตจากฟองอากาศที่อัตราการไหล 30, 80 และ 150 มิลลิลิตรต่อนาที ไม่พบว่าก๊าซไนโตรเจนมีส่วนช่วยในการต้านทานต่อการติดไฟของโพลีเมอร์อย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากโพลีเมอร์ที่ผลิตได้เป็นเซลล์เปิด ทำให้ค่าที่ได้มีค่าที่ใกล้เคียงกันในทุก ๆ อัตราการไหล

จากการทดลอง สามารถสรุปได้ว่าโพลีเมอร์ธรรมชาติสามารถผลิตได้จากฟองก๊าซไนโตรเจนขนาดเล็ก ทำให้ได้เซลล์โพลีเมอร์ที่มีลักษณะทรงกลม มีการเชื่อมต่อของเซลล์อย่างสมบูรณ์ และพบว่าโพลีเมอร์ธรรมชาติที่ผลิตโดยวิธีนี้ สามารถทำการปรับเปลี่ยนสมบัติทางกายภาพของโพลีเมอร์ได้อย่างง่าย โดยการปรับอัตราการไหล หรือ เปลี่ยนชนิดฟองก๊าซ

Thesis title Natural Rubber Latex Foam Production Via Microbubbles of Nitrogen Gas
Author Miss Kuntida Katkeaw
Major program Mining and materials Engineering
Academic year 2019

Abstract

Natural rubber latex foams are commonly produced by the two well-known methods of Dunlop and Talalay. Talalay foams are better flexibility and physical properties than Dunlop foams. This is due to the fact that Talalay method offers the foam with a microstructure of spherical cell shape and interconnected network structure throughout the foam while Dunlop process gives the foam with irregular cell shape and partially interconnected network structure. Recently, an alternative method using air microbubbles has been presented to simply fabricate a natural rubber latex foam with a microstructure similar to that of the Talalay foam without the need of vacuum and low processing temperature.

In this research, natural rubber latex foams were fabricated using nitrogen microbubbles to study its effect on microstructure and physical properties of the foams in comparison with those of the foams produced by air microbubbles. By flowing nitrogen gas through a diffuser having a pore size range of 10-16 μm which is firmly connected to a bubble column containing compound latex, a high volume of microbubbles was generated. The flow rate used here were varied: 30, 50 and 80 ml/min. The findings show that microstructure and physical properties of the foams produced by nitrogen microbubbles were significantly affected by the flow rate. Cell size increased with the increased flow rate leading to a decrease in foam density. Furthermore, compression set percentage of the foam decreased with the decreased nitrogen gas flow rate showing the better flexibility of the foam at low flow rate. In addition, the indentation hardness index values of all nitrogen foams produced from all the three flow rates were in between 101-170 N which were classified as a medium hardness. When the nitrogen foam produced at the flow rate of 50 ml/min was compared to the air foam fabricated at the identical flow rate. It was found that the foams exhibited a similar in spherical-like cell shape with interconnected network structure but different cell sizes. The air foam was found to be larger cell size than the other foam resulting in a difference in physical properties of the foams produced from different gas types. Besides, flammability test of the two foam types was compared.

The results show that flammability of both the nitrogen and air foams were similar due to the fact of open cell structure of the foams.

In conclusion, natural rubber latex foams could be effectively produced via nitrogen or air microbubbles. The foam produced by this microbubble technique possessed spherical cell shape with interconnected network structure. Different gas type used results in different cell size of the foam. Their physical properties could be simply altered by the adjustment of flow rate or gas type.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอแสดงความขอบคุณสำหรับความช่วยเหลือและความกรุณาแก่บุคคลเหล่านี้ ที่มีส่วนร่วมทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ กัลยาณี คุปตานนท์ และ ดร.มัทนา ชังคะมโณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ สำหรับคำแนะนำ คำชี้แนะ และคำปรึกษาอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการดำรงชีวิตในประจำวันและตลอดการศึกษาวิจัย รวมไปถึงความช่วยเหลือทางด้านภาษา การวิเคราะห์ผลการทดลอง และความเอาใจใส่ ซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญเป็นอย่างยิ่งต่องานวิจัยเล่มนี้ วิทยานิพนธ์เล่มนี้ไม่สามารถสำเร็จไปได้ถ้าขาดความกรุณาในส่วนนี้

ขอขอบคุณ ดร.รุ่งโรจน์ เกาะคู ที่ให้คำปรึกษาในส่วนของการไมโครบับเบิล ทั้งออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง วิธีการทดลอง ตลอดจนทุนงบประมาณที่ให้ในระหว่างการศึกษาวิจัย

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีระชัย แสงฉาย ประธานกรรมการสอบผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิษณุ ราชเพ็ชร และ ดร.สมใจ จันทร์อุดม กรรมการสอบ ที่ให้เกียรติมาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ ขอขอบคุณสำหรับคำแนะนำและข้อเสนอแนะต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อผู้วิจัยให้มีความรู้ความเข้าใจในงานของตนเองมากขึ้น

ขอขอบคุณ คุณเบญจพร หนูคล้าย สำหรับความช่วยเหลือ การวิเคราะห์ผลการทดลองในส่วนของสมบัติของโฟมยาง และคำปรึกษาที่มีให้ตลอดมา จนวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จในที่สุด

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย สถานวิจัยบัณฑิตวิทยาลัย เป็นเลิศด้านวิศวกรรมวัสดุ และทุนศิษย์กัณ กุฎิ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สำหรับทุนสนับสนุนส่งเสริมตลอดการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณบิดา มารดา ญาติพี่น้อง และครอบครัว สำหรับกำลังใจ ความรัก ความเอาใจใส่ และการสนับสนุน ที่มีผลอย่างยิ่งตลอดการศึกษาวิจัย

ขอขอบคุณ น้อง พี่ เพื่อนๆ และเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุที่คอยให้ความช่วยเหลือ และให้กำลังใจสนับสนุนกันตลอดมา

กุลธิดา เกตุแก้ว

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(5)
กิตติกรรมประกาศ	(9)
สารบัญ	(10)
สารบัญรูป	(13)
สารบัญตาราง	(16)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	(17)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของหัวข้อวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ยางธรรมชาติ	4
2.1.1 โครงสร้างของยางธรรมชาติ	4
2.2 นํ้ายางธรรมชาติ	4
2.2.1 นํ้ายางสด	4
2.2.2 นํ้ายางข้น	6
2.2.3 วิธีการผลิตนํ้ายางข้น	6
2.3 สมบัติของยางธรรมชาติ	6
2.3.1 สมบัติที่ดีของยางธรรมชาติ	6
2.3.2 สมบัติด้อยของยางธรรมชาติ	7
2.4 การเสื่อมสภาพของยาง	7
2.4.1 การเสื่อมสภาพเนื่องจากออกซิเจน	8
2.4.2 การเสื่อมสภาพเนื่องจากโอโซน	8
2.4.3 การเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน	8
2.4.4 กลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโมเลกุลยาง	9
2.4.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการเสื่อมสภาพ	9
2.4.6 ข้อเสียของการเสื่อมสภาพของยาง	11
2.5 สารต้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน	11
2.5.1 การเลือกใช้สารป้องกันการเสื่อมสภาพ	11
2.5.2 ชนิดของสารต้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน	12

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6 โฟมยางธรรมชาติ	12
2.6.1 กระบวนการผลิตโฟมยางธรรมชาติ	13
2.6.2 สารเคมีสำหรับกระบวนการผลิตโฟมยางธรรมชาติ	16
2.6.3 โครงสร้างและสมบัติของเซลล์โฟม	18
2.7 การผลิตบับเบิล	21
2.7.1 หลักการสร้างบับเบิลขนาดเล็ก	21
2.7.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดบับเบิลและขนาดของบับเบิล	21
2.7.3 ความเร็วในการลอยตัวของบับเบิล	23
2.7.4 บับเบิลคอแลมน์	23
2.8 ไมโครบับเบิล	24
2.8.1 การประยุกต์ใช้งานของไมโครบับเบิล	24
บทที่ 3 สารเคมี อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย	26
3.1 สารเคมี	26
3.2 อุปกรณ์	27
3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	32
3.3.1 ออกแบบและจัดสร้างชุดการทดลอง	32
3.3.2 สูตรการผลิตโฟมยางธรรมชาติ	33
3.3.3 การเตรียมน้ำยาคอมปาวด์	33
3.3.4 การเตรียมโฟมยางที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนด้วยกระบวนการไมโครบับเบิล	35
3.3.5 การเตรียมโฟมยางที่ผลิตจากฟองอากาศด้วยกระบวนการไมโครบับเบิล	39
3.3.6 การเตรียมโฟมยางที่ผลิตจากกระบวนการดันลอย	40
3.3.7 วิธีดำเนินงานวิจัย	41
3.4 วิธีการทดสอบ	41
3.4.1 ลักษณะโครงสร้างสัณฐานวิทยา	41
3.4.2 จำนวนเซลล์ต่อหน่วยปริมาตร	42
3.4.3 ความหนาแน่น	42
3.4.4 การทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงกด	42
3.4.5 การทดสอบดัชนีความแข็งเชิงกด	43
3.4.6 การทดสอบการบ่มเร่ง	44
3.4.7 การทดสอบดัชนีออกซิเจนจำกัด	44

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลอง	46
4.1 ผลของอัตราการไหลต่อสมบัติทางกายภาพของโพลีเมอร์ที่ผลิตจาก ฟองก๊าซไนโตรเจน	46
4.2 เปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของโพลีเมอร์ที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจน กับโพลีเมอร์ที่ผลิตจากฟองอากาศ	55
4.3 เปรียบเทียบสมบัติความต้านทานต่อการตีไฟของโพลีเมอร์ที่ผลิตจาก ฟองก๊าซไนโตรเจน โพลีเมอร์ที่ผลิตจากฟองอากาศ และโพลีเมอร์ที่ผลิตจาก กระบวนการดัดแปลง	62
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	63
5.1 ผลของอัตราการไหลต่อสมบัติทางกายภาพของโพลีเมอร์ที่ผลิตจาก ฟองก๊าซไนโตรเจน	63
5.2 เปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของโพลีเมอร์ที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจน กับโพลีเมอร์ที่ผลิตจากฟองอากาศ	63
5.3 เปรียบเทียบสมบัติความต้านทานต่อการตีไฟของโพลีเมอร์ที่ผลิต จากฟองก๊าซไนโตรเจน โพลีเมอร์ที่ผลิตจากฟองอากาศ และโพลีเมอร์ที่ผลิต จากกระบวนการดัดแปลง	64
5.4 ข้อเสนอแนะ	64
บรรณานุกรม	65
ภาคผนวก ก ค่าสมบัติทางกายภาพของโพลีเมอร์ธรรมชาติ	69
ภาคผนวก ข อนุสิทธิบัตร บทความวิจัยที่นำเสนอและได้รับการตีพิมพ์	75
ประวัติผู้เขียน	78

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 หลักการสร้างฟองก๊าซไนโตรเจนสำหรับการผลิตโฟมยางธรรมชาติ (ก) ฟองก๊าซไนโตรเจนที่อยู่ในบับเบิลคอลัมน์ (ข) ภาพขยายของฟองก๊าซไนโตรเจนที่อยู่ในบับเบิลคอลัมน์	2
รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติ	4
รูปที่ 2.2 ลักษณะที่เป็นไปได้ของอนุภาคยางธรรมชาติ	5
รูปที่ 2.3 กลไกการทำงานของ CHAIN BREAKING ANTIOXIDANTS (AH)	11
รูปที่ 2.4 ขั้นตอนการผลิตโฟมยางด้วยกระบวนการดันลอป	14
รูปที่ 2.5 ขั้นตอนการผลิตโฟมยางด้วยกระบวนการทาลาเลย์	15
รูปที่ 2.6 แสดงความสัมพันธ์ของ pH ที่ทำให้เกิดการเจลของฟองน้ำที่เวลาต่าง ๆ กัน	18
รูปที่ 2.7 เปรียบเทียบลักษณะของเซลล์ที่ได้จากกระบวนการทาลาเลย์และกระบวนการดันลอป	19
รูปที่ 2.8 อิทธิพลของมุมสัมผัสต่อขนาดของบับเบิล (ก) โพลีเอทิลีน (ข) โพลีเอทิลีนเคลือบทอง	22
รูปที่ 2.9 ความเร็วในการลอยตัวของฟองก๊าซที่แสดงตามทฤษฎี (LEVICH)	23
รูปที่ 2.10 การไหลของบับเบิลที่เป็นไปได้ในบับเบิลคอลัมน์	24
รูปที่ 3.1 ถังบรรจุก๊าซไนโตรเจนพร้อมตัวติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงดัน	27
รูปที่ 3.2 แผ่นดิฟฟิวเซอร์	27
รูปที่ 3.3 บับเบิลคอลัมน์พร้อมแผ่นดิฟฟิวเซอร์	28
รูปที่ 3.4 เครื่องวัดอัตราการไหล	28
รูปที่ 3.5 เต้าอบ	29
รูปที่ 3.6 เครื่องชั่ง	29
รูปที่ 3.7 เบ้าพิมพ์	30
รูปที่ 3.8 เครื่องกวน	30
รูปที่ 3.9 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง	30
รูปที่ 3.10 เครื่องตีฟองเอนกประสงค์	31
รูปที่ 3.11 ปีมลม	31
รูปที่ 3.12 ออกแบบชุดการทดลองกระบวนการไมโครบับเบิลด้วยก๊าซไนโตรเจน	32
รูปที่ 3.13 การติดตั้งอุปกรณ์ของกระบวนการไมโครบับเบิลด้วยก๊าซไนโตรเจน	32
รูปที่ 3.14 แผนผังสรุปขั้นตอนการเตรียมน้ำยางคอมปาวด์	34
รูปที่ 3.15 การเกิดฟองก๊าซไนโตรเจนด้วยกระบวนการไมโครบับเบิล (ก) การเกิดฟองก๊าซไนโตรเจนในน้ำยางคอมปาวด์ที่บรรจุอยู่ในบับเบิลคอลัมน์ (ข) ภาพขยายของฟองก๊าซไนโตรเจนที่บรรจุอยู่ในบับเบิลคอลัมน์	35

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.16 การกวนฟองยางหลังจากการเติมสารก่อเจล	35
รูปที่ 3.17 การเทฟองยางลงสู่แม่พิมพ์	36
รูปที่ 3.18 การวัลคาไนซ์ฟองยาง	36
รูปที่ 3.19 การล้างโฟมยางเพื่อกำจัดน้ำสบู่	36
รูปที่ 3.20 การอบไล่ความชื้น	37
รูปที่ 3.21 โฟมยางที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนด้วยกระบวนการไมโครบับเปิล	37
รูปที่ 3.22 แผนผังสรุปขั้นตอนการเตรียมโฟมยางจากฟองก๊าซไนโตรเจน	38
รูปที่ 3.23 แผนผังสรุปขั้นตอนการเตรียมโฟมยางจากฟองอากาศ	39
รูปที่ 3.24 แผนผังสรุปขั้นตอนการเตรียมโฟมยางจากกระบวนการตันลอป	40
รูปที่ 3.25 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงและกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด	41
รูปที่ 3.26 เครื่องทดสอบแรงกดที่ใช้ในการหาการยุบตัวเนื่องจากแรงกด	43
รูปที่ 3.27 เครื่องทดสอบแรงอัดที่ใช้ในการทดสอบดัชนีความแข็งเชิงกด	43
รูปที่ 3.28 เครื่องทดสอบการบ่มเร่ง	44
รูปที่ 3.29 เครื่องทดสอบดัชนีออกซิเจนจำกัด	45
รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายโฟมยางที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนโดยใช้อัตราการไหลที่แตกต่างกัน (ก) 30 (ข) 50 และ (ค) 80 มิลลิลิตรต่อนาที	46
รูปที่ 4.2 โครงสร้างสัณฐานวิทยาของโฟมยางที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนโดยใช้อัตราการไหลที่แตกต่างกัน (ก) OM และ (ข) SEM ที่อัตราการไหล 30 มิลลิลิตรต่อนาที (ค) OM และ (ง) SEM ที่อัตราการไหล 50 มิลลิลิตรต่อนาที (จ) OM และ (ฉ) SEM ที่อัตราการไหล 80 มิลลิลิตรต่อนาที	48
รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบการกระจายขนาดของเซลล์ของโฟมยางที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนโดยใช้อัตราการไหลที่แตกต่างกัน คือ (ก) 30 (ข) 50 และ (ค) 80 มิลลิลิตรต่อนาที	50
รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบความหนาแน่นของโฟมยางที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนโดยใช้อัตราการไหลที่แตกต่างกัน คือ 30, 50 และ 80 มิลลิลิตรต่อนาที	52
รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบ (ก) การยุบตัวเนื่องจากแรงกด (ข) ความสามารถในการคืนตัว (ค) ดัชนีความแข็งเชิงกด และ (ง) การเร่งการเสื่อมอายุของโฟมยางที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนโดยใช้อัตราการไหลที่แตกต่างกัน คือ 30, 50 และ 80 มิลลิลิตรต่อนาที	54
รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายโฟมยาง (ก) โฟมยางที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจน (ข) โฟมยางที่ผลิตจากฟองอากาศ	55

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.7 ภาพตัดขวางของโพลีเมอร์ (ก) โพลีเมอร์ที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจน (ข) โพลีเมอร์ที่ผลิตจากฟองอากาศ	56
รูปที่ 4.8 โครงสร้างสัณฐานวิทยาของโพลีเมอร์ (ก) OM และ (ข) SEM ของโพลีเมอร์ที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจน (ค) OM และ (ง) SEM ของโพลีเมอร์ที่ผลิตจากฟองอากาศ	57
รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบการกระจายขนาดของเซลล์ของโพลีเมอร์ (ก) โพลีเมอร์ที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจน (ข) โพลีเมอร์ที่ผลิตจากฟองอากาศ	58
รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบความหนาแน่นของโพลีเมอร์ที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนกับโพลีเมอร์ที่ผลิตจากฟองอากาศ	59
รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบ (ก) การยุบตัวเนื่องจากแรงกด (ข) ความสามารถในการคืนรูป (ค) ดัชนีความแข็งเชิงกด และ (ง) การเร่งการเสื่อมอายุของโพลีเมอร์ที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนกับโพลีเมอร์ที่ผลิตจากฟองอากาศ	61
รูปที่ 4.12 เปรียบเทียบดัชนีออกซิเจนจำกัดของโพลีเมอร์ที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจน โพลีเมอร์ที่ผลิตจากฟองอากาศ และโพลีเมอร์ที่ผลิตจากกระบวนการดันลอย	62

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สัดส่วนของส่วนประกอบต่าง ๆ ในน้ำยางสด	5
ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบข้อดี ข้อเสียของกระบวนการดันลอปและทาลาเลย์	15
ตารางที่ 3.1 สูตรการผลิตโฟมยางธรรมชาติ	33
ตารางที่ 4.1 ขนาดเซลล์ของโฟมยาง	49
ตารางที่ 4.2 มาตรฐานสมบัติทางกายภาพของโฟมยาง	51
ตารางที่ 4.3 ขนาดเซลล์ของโฟมยาง	58
ตาราง ก.1 ความหนาแน่นของโฟมยางที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนที่อัตราการไหล 30, 50 และ 80 มิลลิลิตรต่อนาที	70
ตาราง ก.2 การยุบตัวเนื่องจากแรงกดของโฟมยางที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนที่อัตราการไหล 30, 50 และ 80 มิลลิลิตรต่อนาที	70
ตาราง ก.3 ความสามารถในการคืนรูปของโฟมยางที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนที่อัตราการไหล 30, 50 และ 80 มิลลิลิตรต่อนาที	70
ตาราง ก.4 ดัชนีความแข็งเชิงกดของโฟมยางที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนที่อัตราการไหล 30, 50 และ 80 มิลลิลิตรต่อนาที	71
ตาราง ก.5 ดัชนีความแข็งเชิงกดที่เปลี่ยนไปหลังการบ่มเร่งของโฟมยางที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนที่อัตราการไหล 30, 50 และ 80 มิลลิลิตรต่อนาที	71
ตาราง ก.6 ความหนาแน่นของโฟมยางที่ผลิตจากฟองอากาศที่อัตราการไหล 50 มิลลิลิตรต่อนาที	71
ตาราง ก.7 การยุบตัวเนื่องจากแรงกดของโฟมยางที่ผลิตจากฟองอากาศที่อัตราการไหล 50 มิลลิลิตรต่อนาที	72
ตาราง ก.8 ความสามารถในการคืนตัวของโฟมยางที่ผลิตจากฟองอากาศที่อัตราการไหล 50 มิลลิลิตรต่อนาที	72
ตาราง ก.9 ดัชนีความแข็งเชิงกดของโฟมยางที่ผลิตจากฟองอากาศที่อัตราการไหล 50 มิลลิลิตรต่อนาที	72
ตาราง ก.10 ดัชนีความแข็งเชิงกดที่เปลี่ยนไปหลังการบ่มเร่งที่ผลิตจากฟองอากาศที่อัตราการไหล 50 มิลลิลิตรต่อนาที	73
ตาราง ก.11 ดัชนีออกซิเจนจำกัดของโฟมยางที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนที่อัตราการไหล 30, 80 และ 150 มิลลิลิตรต่อนาที	73
ตาราง ก.12 ดัชนีออกซิเจนจำกัดของโฟมยางที่ผลิตจากฟองอากาศที่อัตราการไหล 30, 80 และ 150 มิลลิลิตรต่อนาที	73
ตาราง ก.13 ดัชนีออกซิเจนจำกัดของโฟมยางที่ผลิตจากกระบวนการดันลอป	74

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

Phdl	สัดส่วนของปริมาณสารเคมีเทียบกับปริมาณยางแห้ง 100 ส่วนโดยน้ำหนักในน้ำยาง (part per hundred dry latex)
phr	สัดส่วนปริมาณสารต่าง ๆ เมื่อเทียบกับยาง 100 ส่วนโดยน้ำหนัก (Parts per hundred of rubber)
N30	ชั้นงานโฟมยางที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนที่อัตราการไหล 30 มิลลิลิตรต่ออนาที
N50	ชั้นงานโฟมยางที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนที่อัตราการไหล 50 มิลลิลิตรต่ออนาที
N80	ชั้นงานโฟมยางที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนที่อัตราการไหล 80 มิลลิลิตรต่ออนาที
A50	ชั้นงานโฟมยางที่ผลิตจากฟองอากาศที่อัตราการไหล 50 มิลลิลิตรต่ออนาที

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของหัวข้อวิจัย

ยางธรรมชาติเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย เนื่องจากมีสภาพดิน ฟ้า อากาศ ที่เอื้ออำนวยต่อการเจริญเติบโตและการให้ผลผลิตของยางธรรมชาติเป็นอย่างมาก ทำให้ประเทศไทย เป็นผู้ผลิตยางธรรมชาติส่งออกเป็นอันดับหนึ่งของโลก ผลผลิตจากยางธรรมชาติของไทยแยกตาม ประเภทพบว่า ไทยผลิตยางแท่งมากที่สุด รองลงมาคือ ยางแผ่นรมควัน น้ำยางข้นและยางผสม ตามลำดับ [1] เนื่องจากคุณภาพของยางธรรมชาติจากประเทศไทยเป็นที่ยอมรับจากทั่วโลก ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากน้ำยางธรรมชาติ โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์โฟมยางจำพวกหมอนและที่นอนยางพารา ที่ผลิตจากประเทศไทยจึงเป็นที่รู้จักและมีความต้องการสูงในตลาดโลกเช่นกัน เพราะโฟมยางจาก น้ำยางธรรมชาติ ซึ่งถือเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพ จากสมบัติในด้านความนุ่มสบาย ความยืดหยุ่น และการคืนรูปของผลิตภัณฑ์ สามารถรองรับน้ำหนักและการกดทับได้ดี รวมถึงความสามารถในการ ป้องกันการเกิดโรคมะเร็ง จากเชื้อแบคทีเรีย เชื้อรา และไรฝุ่น จึงเป็นทางเลือกที่ผู้บริโภคหันมา ให้ ความสนใจเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง

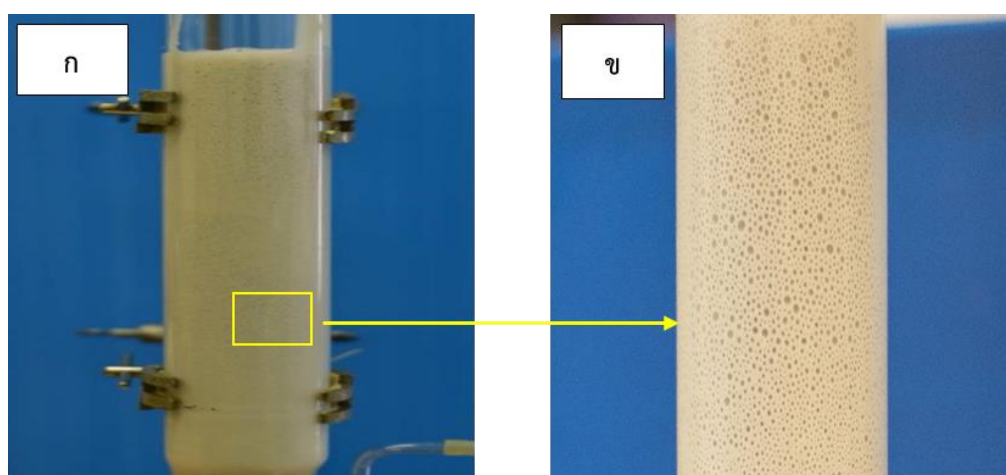
โฟมยางเป็นผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้จากน้ำยางข้น ประกอบด้วยเซลล์ของอากาศที่ต่อเนื่อง ติดกันกระจายตัวอยู่ในเนื้อยาง [2] ทำให้มีลักษณะเป็นรูพรุน ผิวหน้าสามารถระบายอากาศออกได้ และสามารถบิดงอได้โดยไม่เสียรูปอย่างถาวร จึงนิยมนำไปทำเป็นเครื่องใช้ที่รับแรงกด เช่น เบาะ ที่นอน หมอน และวัสดุช่วยสอนทางการแพทย์ เป็นต้น [3]

โดยทั่วไปในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติจำเป็นต้องใส่สารต้านออกซิเดชัน (Antioxidant) เพื่อป้องกันการออกซิเดชันของยางเนื่องจากออกซิเจนในอากาศ เพื่อยืดอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ให้ยาวนานยิ่งขึ้น [4] เนื่องจากโครงสร้างของยางธรรมชาติประกอบด้วยพันธะคู่ ของคาร์บอน ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ไม่อิ่มตัว ทำให้มีความต้านทานต่ำต่อการสลายตัวด้วยความร้อน รังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet) และสารออกซิไดส์ (Oxidizing agents) ทำใหยางสูญเสียสมบัติ ทางกายภาพ เช่น ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ แข็ง เปราะ มีรอยร้าว สีของผลิตภัณฑ์ยางเปลี่ยนไป และ อายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์สั้นลง [5] ซึ่งสารต้านออกซิเดชันเมื่อใส่เข้าไปมีโอกาสซึมออกมาที่ผิวยาง แล้วเกิดการสูญเสียไปจากการชะล้างได้ และยังสามารถเกิดการสูญเสียได้โดยการระเหยออกไปที่ อุณหภูมิสูงซึ่งทำให้ผลิตภัณฑ์มีอายุการใช้งานที่สั้นลง การสูญเสียดังกล่าวทำให้จำเป็นต้องใส่ สารต้านออกซิเดชันให้มากเกินพอ เพื่อชดเชยกับสารต้านออกซิเดชันที่สูญเสียไปทำให้สั้นเปลืองและ การใส่สารต้านออกซิเดชันในปริมาณมากอาจจะก่อให้เกิดอันตรายแก่คนงานที่ผสมยางอีกด้วย [6] ถึงแม้ยางธรรมชาติจะเกิดการเสื่อมสภาพได้ง่ายโดยก๊าซออกซิเจนแต่พบว่าการเก็บยางไว้ใน บรรยากาศที่เป็นก๊าซเฉื่อย เช่น ก๊าซไนโตรเจน จะไม่ทำใหยางเกิดการเสื่อม [7] ดังนั้นในงานวิจัยจะ ใช้ก๊าซไนโตรเจนเพื่อเป็นอีกวิธีการหนึ่งในการช่วยแก้ปัญหาของการเสื่อมสภาพของโฟมยาง

การผลิตโฟมยางธรรมชาติที่นิยมใช้กันในปัจจุบันมี 2 กระบวนการ คือ กระบวนการดันลอป (Dunlop process) เป็นกระบวนการที่ใช้เครื่องปั่น (Hobert mixer) ในการปั่นด้วยความเร็วรอบสูง

เพื่อปั่นน้ำยางให้เกิดฟอง ทำให้เกิดการใช้ไฟฟ้าในกระบวนการผลิตสูงและขนาดของฟองยางที่ได้มีขนาดไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้โฟมยางมีขนาดของรูพรุนที่ได้แตกต่างกันจึงมีระดับความนิ่มของโฟมยางที่ไม่สม่ำเสมอ ส่วนอีกวิธีหนึ่งคือกระบวนการทาลาเลย์ (Talalay process) เป็นกระบวนการที่ทำให้ได้โฟมยางที่มีขนาดรูพรุนที่สม่ำเสมอ แต่ในกระบวนการจำเป็นต้องใช้แบบพิมพ์ที่ออกแบบมาโดยเฉพาะ เพราะขั้นตอนการผลิตมีทั้งการเพิ่มและลดอุณหภูมิ รวมถึงการลดความดัน ทำให้วัสดุอุปกรณ์ราคาแพง กระบวนการมีความซับซ้อน และใช้พลังงานในการผลิตสูง โดยในประเทศไทยจะนิยมใช้กระบวนการดันลอปในการผลิตโฟมยางเนื่องจากกระบวนการผลิตต้นทุนต่ำและง่ายกว่ากระบวนการทาลาเลย์ แต่ลักษณะของผลิตภัณฑ์โฟมยางที่ได้มีคุณภาพที่ด้อยกว่าจากปัญหาจึงได้ปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อเป็นอีกวิธีหนึ่งในการแก้ปัญหาให้ได้โฟมยางที่มีขนาดของรูพรุนที่สม่ำเสมอและต้นทุนต่ำ ร่วมกับการใช้ก๊าซไนโตรเจนเพื่อช่วยลดการเสื่อมสภาพของโฟมยาง

ดังนั้นงานวิจัยนี้จะใช้กระบวนการไมโครบับเบิลในการทำให้น้ำยางเกิดฟอง โดยการใช้ก๊าซไนโตรเจนไหลผ่านน้ำยางคอมปาวด์ โดยน้ำยางคอมปาวด์จะบรรจุอยู่ในบับเบิลคอลัมน์ซึ่งจะมีแผ่นดีฟิวเซอร์ ที่มีลักษณะเป็นแผ่นแก้วที่ประกอบด้วยรูพรุนขนาดต่าง ๆ ทำให้เกิดเป็นฟองก๊าซขนาดเล็ก ดังแสดงในรูปที่ 1.1 และใช้โซเดียมซิลิโคฟลูออไรด์ (Sodium silicofluoride, SSF) เป็นสารที่ทำให้น้ำยางจับตัว ซึ่งกระบวนการนี้จะทำให้ได้ฟองก๊าซขนาดเล็ก (Microbubbles) ที่มีขนาดสม่ำเสมอกระจายตัวอยู่ในเนื้อยาง ทำให้ได้โฟมยางที่มีความนิ่มสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน โดยจะสามารถเลือกขนาดของฟองได้ จากการเปลี่ยนขนาดของดีฟิวเซอร์หรืออัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน และคาดว่า การใช้ก๊าซไนโตรเจนจะสามารถช่วยยืดอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์โฟมยางได้ เนื่องจากก๊าซไนโตรเจนเป็นก๊าซเฉื่อย ไม่ทำปฏิกิริยากับยาง จะทำหน้าที่เป็นอุปสรรคและช่วยยับยั้งการทำปฏิกิริยากันระหว่างยางกับออกซิเจน จึงนำไปสู่การชะลอการเสื่อมสภาพของโฟมยางธรรมชาติได้



รูปที่ 1.1 การสร้างฟองก๊าซไนโตรเจนสำหรับการผลิตโฟมยางธรรมชาติ (ก) ฟองก๊าซไนโตรเจนที่อยู่ในบับเบิลคอลัมน์ (ข) ภาพขยายของฟองก๊าซไนโตรเจน

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของอัตราการไหลต่อสมบัติทางกายภาพของโพลีเมอร์ที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจน

1.2.2 เปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของโพลีเมอร์ที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนกับโพลีเมอร์ที่ผลิตจากฟองอากาศ

1.2.3 เปรียบเทียบสมบัติความต้านทานต่อการตีไฟของโพลีเมอร์ที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจน โพลีเมอร์ที่ผลิตจากฟองอากาศ และโพลีเมอร์ที่ผลิตจากกระบวนการดันลอป

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.3.1 ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความนิ่มสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน

1.3.2 กำหนดสมบัติทางกายภาพของโพลีเมอร์ธรรมชาติได้ เช่น ความหนาแน่น ระดับความนิ่ม เป็นต้น

1.3.3 โพลีเมอร์มีอายุการใช้งานเพิ่มขึ้น

1.3.4 สร้างทางเลือกใหม่ในการผลิตโพลีเมอร์ธรรมชาติ

1.3.5 ได้องค์ความรู้ใหม่จากการนำฟองก๊าซขนาดเล็กมาผลิตโพลีเมอร์

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1.4.1 ขึ้นรูปโพลีเมอร์โดยใช้กระบวนการไมโครบับเบิลด้วยก๊าซไนโตรเจน โดยใช้ดีฟิวเซอร์ที่มีขนาดรูพรุนอยู่ในช่วง 10-16 ไมครอน ที่อัตราการไหล 30, 50, 80 และ 150 มิลลิลิตรต่อนาที โดยใช้ปริมาตรเริ่มต้นของน้ำยางคอมปาวด์เท่ากับ 198 มิลลิลิตร

1.4.2 ขึ้นรูปโพลีเมอร์โดยใช้กระบวนการไมโครบับเบิลด้วยอากาศ โดยใช้ดีฟิวเซอร์ที่มีขนาดรูพรุนอยู่ในช่วง 10-16 ไมครอน ที่อัตราการไหล 30, 50, 80 และ 150 มิลลิลิตรต่อนาที โดยใช้ปริมาตรเริ่มต้นของน้ำยางคอมปาวด์เท่ากับ 198 มิลลิลิตร

1.4.3 ขึ้นรูปโพลีเมอร์ด้วยกระบวนการดันลอป โดยใช้ปริมาตรเริ่มต้นของน้ำยางคอมปาวด์เท่ากับ 198 มิลลิลิตร

1.4.4 ศึกษาสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope) และกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) ความหนาแน่น (Density) การทดสอบดัชนีความแข็งเชิงกด (Indentation Hardness Index) การทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงกด (Compression set) การทดสอบการบ่มเร่ง (Aging) และ ดัชนีออกซิเจนจำกัด (Limiting Oxygen Index)

บทที่ 2

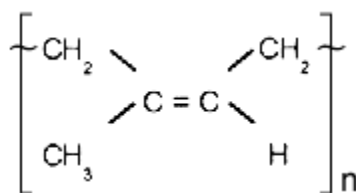
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติเป็นวัสดุที่โดดเด่นหลายประการที่วัสดุอื่นไม่สามารถเทียบเคียงได้ โดยเฉพาะสมบัติด้านความยืดหยุ่น (Elasticity) โดยสามารถยืดออกไปตามแนวแรงที่มากกระทำได้หลายเท่าของความยาวเดิมแล้วกลับคืนสู่สภาพเดิม เมื่อเอาแรงกระทำนั้นออกจะกลับสู่รูปร่างและความยาวเดิมนอกจากนี้ยังมีสมบัติเด่นอื่น ๆ อีกมากมาย เช่น ความเหนียว ความทนทานต่อการขีดสี สามารถป้องกันการซึมผ่านของอากาศและน้ำได้ดี และความสามารถในการยึดติดกับวัสดุอื่นได้ เช่น โลหะและสิ่งทอ ทำให้สามารถนำออกไปใช้ในงานด้านวิศวกรรมได้อย่างหลากหลาย [8]

2.1.1 โครงสร้างของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติ เป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นแบบ ซิส-1, 4-พอลิไอโซพรีน (cis-1, 4-polyisoprene) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 กล่าวคือมีไอโซพรีน (C_5H_8) ที่มีหน่วยย่อยแต่ละหน่วยประกอบขึ้นด้วย C 5 อะตอม และ H 8 อะตอม โครงสร้างที่ประกอบเป็นโมเลกุลยาง 1 โมเลกุลประกอบด้วยหน่วยของไอโซพรีนมากกว่า 5,000 หน่วยขึ้นไป ยางธรรมชาติมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 0.934 ที่ 20 องศาเซลเซียส และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อถูกยืดหรือเย็นตัวลง โดยมีดัชนีหักเหแสงเท่ากับ 1.5215 – 1.5238 ที่ 20 องศาเซลเซียส [9]



รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติ (ซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน) [9]

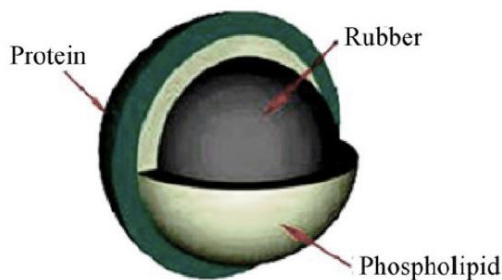
2.2 น้ำยางธรรมชาติ [10]

น้ำยางธรรมชาติเป็นสารแขวนลอยชนิดหนึ่งประกอบด้วยสารที่มีน้ำเป็นตัวกลาง นอกจากนี้ในส่วนที่เป็นของเหลวยังมีส่วนที่ไม่ใช่ยางอยู่ในรูปของสารแขวนลอยและสารละลาย โดยที่น้ำยางธรรมชาติส่วนมากเป็นน้ำยางที่ได้มาจากต้นยางชนิดฮีเวียบราซิลเลียนซิส (Hevea brasiliensis)

2.2.1 น้ำยางสด

น้ำยางสด คือ น้ำยางที่กรีดได้จากต้นยางพารา มีลักษณะเป็นสีขาวขุ่น คล้ายน้ำนม มีความหนืดประมาณ 12 - 15 เซนติพอยส์ (Centipoises) ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) 6.5 - 7.0

และความหนาแน่นประมาณ 0.975 - 0.980 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร รูปร่างของอนุภาคยางเป็นรูปทรงกลมหรือรูปลูกแพร์ขนาด 0.05 - 5 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ลักษณะที่เป็นไปได้ของอนุภาคยางธรรมชาติ [11]

ส่วนประกอบของน้ำยางสด แบ่งได้ 2 ส่วนหลัก คือ [10]

1. ส่วนที่เป็นยาง (Dry Rubber Content, DRC) เป็นอนุภาคยางของไอโซพรีนที่เชื่อมต่อกันประมาณ 2,000 – 5,000 หน่วย ต่อ 1 โมเลกุล

2. ส่วนที่ไม่ใช่ยาง (Non Rubber Content) เป็นส่วนประกอบอื่น ๆ ทั้งหมดที่ไม่ใช่ยาง มีสารประกอบต่าง ๆ หลายชนิด เช่น น้ำตาล โปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต เกลือแร่ เอนไซม์ และสารประกอบไนโตรเจน เป็นต้น โดยส่วนใหญ่จะมีสัดส่วนของส่วนประกอบต่าง ๆ ในน้ำยางสด ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สัดส่วนของส่วนประกอบต่าง ๆ ในน้ำยางสด [12]

ส่วนประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ปริมาณของแข็งทั้งหมด	36
เนื้อยางแห้ง	33
สารจำพวกโปรตีนและไขมัน	1 - 1.2
สารกลุ่มคาร์โบไฮเดรต	1
ซีลีไค์	1
น้ำ	64

2.2.2 น้ำยางข้น [3]

น้ำยางข้น คือน้ำยางที่มีปริมาณเนื้อยางไม่ต่ำกว่า 60 เปอร์เซ็นต์ ผลิตมาจากน้ำยางสดที่มีปริมาณเนื้อยางประมาณ 25-45 เปอร์เซ็นต์ นอกนั้นมีน้ำเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นจึงไม่สะดวกในการขนย้ายเพื่อไปทำผลิตภัณฑ์อื่นต่อ นอกจากนั้นน้ำยางสดยังมีคุณภาพที่ไม่สม่ำเสมอ เช่น ความเข้มข้นของเนื้อยางและปริมาณของสารที่ไม่ใช่ยางในน้ำยาง ทำให้ส่วนใหญ่ผู้ผลิตผลิตภัณฑ์จากน้ำยางต้องการน้ำยางที่มีเนื้อยางไม่ต่ำกว่า 60 เปอร์เซ็นต์

2.2.3 วิธีการผลิตน้ำยางข้น มี 4 วิธีด้วยกัน คือ [13]

1. การเซนติฟิวจ์ (Centrifugation)

เป็นวิธีที่ใช้มากที่สุดในการเตรียมน้ำยางข้นในระดับอุตสาหกรรม โดยการใช้แรงเซนติฟิวจ์แทนแรงโน้มถ่วง วิธีนี้ทำให้สูญเสียบางส่วนของส่วนประกอบที่ไม่ใช่ยาง และอนุภาคยางขนาดเล็ก ปริมาณส่วนที่ไม่ใช่ยางในน้ำยางข้นจึงต่ำ

2. การระเหย (Evaporation)

เป็นวิธีการระเหยน้ำออกจากน้ำยางธรรมชาติ โดยไม่ได้กำจัดสารอื่นที่ไม่ใช่ยางออกจากน้ำยาง ทำได้โดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ขณะที่น้ำยางผ่านหัวฉีด (Nozzle) ที่เหมาะสมผ่านเข้าไปในช่องว่าง (Chamber) ที่มีความดันลดลง 1/10 atm จึงทำให้จุดเดือดของน้ำมีค่าประมาณ 46 องศาเซลเซียส

3. การทำครีม (Creaming)

เนื่องจากอนุภาคยางมีความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ต่ำกว่าน้ำ ดังนั้นเมื่อตั้งน้ำยางทิ้งไว้เป็นเวลานาน อนุภาคยางมีแนวโน้มจะลอยขึ้นไปผิวหน้าในลักษณะเป็นครีมแยกออกจากชั้นน้ำ ทำให้ได้ครีมของน้ำยางที่อยู่ชั้นบนซึ่งมีความเข้มข้นมากขึ้น การทำให้น้ำยางมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นด้วยวิธีนี้ ทำโดยการเติมสารที่ทำให้เกิดครีม (Creaming agent) เช่น แอมโมเนีย หรือ โซเดียมอัลจินेट เพื่อทำให้เกิดครีมเร็วขึ้น วิธีนี้จะทำให้สูญเสียส่วนประกอบบางส่วน ได้แก่ ปริมาณส่วนที่ไม่ใช่ยางรวมทั้งอนุภาคยางขนาดเล็ก

4. การแยกด้วยไฟฟ้า (Electrodecantation)

เป็นวิธีที่สามารถทำน้ำยางข้นได้ด้วยการผ่านสนามไฟฟ้าไปในน้ำยาง เพื่อให้อนุภาคยางไปสะสมที่ผิวของเมมเบรนประเภท Semi-permeable แต่วิธีนี้ไม่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม

2.3 สมบัติของยางธรรมชาติ [10]

จากโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ ทำใหยางธรรมชาติมีสมบัติต่าง ๆ ดังนี้

2.3.1 สมบัติที่ดีของยางธรรมชาติ

1. สายโซ่ที่เคลื่อนไหวหักงอไปมาได้ง่ายทำใหยางมีความยืดหยุ่นสูง โดยที่ยางจะกลับคืนสู่รูปร่างและขนาดเดิม (หรือใกล้เคียง) อย่างรวดเร็ว เมื่อแรงภายนอกที่มากระทำหมดไป ทำใหยางธรรมชาติคงสภาพความยืดหยุ่นได้ดี และทำให้สามารถใช้งานที่อุณหภูมิต่ำได้

2. โครงสร้างโมเลกุลยางที่สม่ำเสมอทำให้ยางสามารถตกผลึกได้เมื่อยืด ยางธรรมชาติจึงมีสมบัติที่ตีเยี่ยมในด้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) แม้ไม่ได้เติมสารเสริมแรง (ประมาณ 20 MPa)

3. เนื่องจากยางธรรมชาติสามารถตกผลึกได้ ทำให้ยางธรรมชาติมีความทนทานต่อการฉีกขาดสูงมาก โดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูง พบว่าในการแกะยางออกจากเบ้าขณะร้อน มีปัญหาเรื่องยางขาดน้อยมาก

2.3.2 สมบัติด้อยของยางธรรมชาติ

1. ยางธรรมชาติมีโครงสร้างหลักประกอบด้วยคาร์บอนและไฮโดรเจน ทำให้ยางธรรมชาติมีสมบัติไม่ทนน้ำมันปิโตรเลียม น้ำมันพืช หรือตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วต่าง ๆ

2. ยางมีพันธะคู่ที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา จึงสามารถวัลคาไนซ์ได้ด้วยกำมะถัน (Sulfur) และทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ง่ายกับออกซิเจนและโอโซน เป็นสาเหตุทำให้เกิดการเสื่อมของยางทำให้ในการออกแบบสูตรของยางธรรมชาติในการนำไปใช้งานจำเป็นต้องมีสารกันเสื่อมสภาพ เช่น สารแอนต้ออกซิแดนท์ และแอนตีโอโซนแนนท์

2.4 การเสื่อมสภาพของยาง [8]

การเสื่อมสภาพของยางทำให้เกิดการขาดของสายโซ่โมเลกุลยางและการเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลยาง ทำให้สมบัติของผลิตภัณฑ์ยางลดลง อายุของยางขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อมที่ผลิตภัณฑ์ยางใช้งานอยู่ด้วย เช่น สภาวะการสัมผัสกับน้ำมัน แสงแดด อุณหภูมิสูง โอโซน และรังสี ยกตัวอย่าง เช่น เมื่อยางธรรมชาติสัมผัสกับอากาศ ออกซิเจนในอากาศจะทำปฏิกิริยากับโครงสร้างของยาง เรียกว่า ปฏิกิริยาออกซิเดชัน สาเหตุที่ออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยากับยางได้ง่ายเพราะว่าการมีพันธะคู่ของคาร์บอน-คาร์บอนซึ่งเป็นโครงสร้างที่ไม่อึดตัวทำให้ง่ายต่อการถูกออกซิไดส์ รวมทั้งมีความต้านทานต่ำต่อความร้อน และโอโซน ส่งผลให้ยางสูญเสียทั้งสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกล การที่ออกซิเจนรวมตัวเข้ากับยางเพียงไม่ถึง 1 เปอร์เซ็นต์ ยางก็สามารถเสื่อมจนใช้งานไม่ได้ แต่ถ้าเก็บยางไว้ในบรรยากาศเฉื่อย (Inert atmosphere) เช่น ในบรรยากาศไนโตรเจน หรือในสุญญากาศ (Vacuum) ยางจะไม่มีเสื่อมแทนการเก็บยางไว้ในอากาศปกติ เพราะจะทำให้ยางเสื่อมได้ การนำยางไปใช้งานยางจะเสื่อมเร็วขึ้น เพราะเนื่องจากความร้อน แสง ดินฟ้าอากาศ เป็นต้น งานวิจัยของ Baldwin, J. M., D. R. Bauer. and K. R. Ellwood. [14] ได้ศึกษาผลกระทบของการเติมลมยางด้วยก๊าซไนโตรเจนต่อประสิทธิภาพอายุการใช้งานของยางรถ โดยการเติมลมยางด้วยอากาศผสมก๊าซไนโตรเจนในสัดส่วน 50 เปอร์เซ็นต์ไนโตรเจน ต่อ 50 เปอร์เซ็นต์ออกซิเจน, 96 เปอร์เซ็นต์ไนโตรเจน และ 99.9 เปอร์เซ็นต์ไนโตรเจน หลังจากนั้นนำยางไปอบเป็นเวลา 3, 6, 9 และ 12 สัปดาห์ ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส แล้วนำไปทดสอบโดยการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกล (ความทนต่อแรงดึงและระยะยืด ณ จุดที่ขาด) ผลจากการทดลองพบว่าการเปลี่ยนแปลงสมบัติของยางจะชะลอตัวหรือหยุดชะงักลงอย่างมีนัยสำคัญกับปริมาณของไนโตรเจน ยกเว้น 99.9 เปอร์เซ็นต์ไนโตรเจน ที่ไม่ได้ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับ 96 เปอร์เซ็นต์ไนโตรเจน

2.4.1 การเสื่อมสภาพเนื่องจากออกซิเจน [8]

ยางคงรูปที่มีพันธะคู่หลงเหลืออยู่ภายในโมเลกุลสามารถเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศได้ ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนั้นจะเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ที่เกิดผ่านอนุมูลอิสระ ผลิตภัณฑ์ที่เกิดระหว่างการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน คือ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งจะแตกตัวต่อไปให้อนุมูลอิสระที่พร้อมจะทำปฏิกิริยาลูกโซ่ต่อไป

การหยุดปฏิกิริยาลูกโซ่ดังกล่าวสามารถทำได้โดยการเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพลงไปเพื่อทำการจับอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้น เพื่อทำให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นแตกตัวต่อไปเป็นส่วนที่ไม่มีผลต่อการเสื่อมสภาพของยาง

อุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่เร่งปฏิกิริยาออกซิเดชัน การเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากออกซิเจนไม่เพียงเกิดที่ผิวยางเท่านั้นแต่ยังสามารถเกิดได้ทั่วทั้งก้อนของยาง โดยทั่วไปการเสื่อมสภาพเนื่องจากออกซิเดชันทำให้ยางอ่อนลง (เพราะโมเลกุลของยางถูกตัดขาด) หรือทำให้ยางแข็งขึ้น (โมเลกุลยางเกิดการเชื่อมโยงมากขึ้น) ก็ได้การเปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นแบบใดนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของยาง

2.4.2 การเสื่อมสภาพเนื่องจากโอโซน

ยางคงรูปที่มีพันธะคู่ในโมเลกุลเมื่อใช้งานในสภาวะที่ถูกยึดออกภายใต้สภาพอากาศทั่วไปจะเกิดรอยแตกขึ้นอย่างช้า ๆ จนกระทั่งเกิดการเสีรูปร่าง สาเหตุที่ทำให้เกิดการเสีรูปร่าง คือ โอโซน ปัจจัยสำคัญที่ทำให้ยางเกิดการเสีสภาพเนื่องจากโอโซน ได้แก่ อุณหภูมิและความชื้น เนื่องจากโอโซนจะเข้าทำปฏิกิริยาตรงตำแหน่งพันธะคู่ เกิดเป็นโอโซนไนด์ โอโซนไนด์ที่เกิดขึ้นจะไม่เสีรูปร่างและว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ทำให้เกิดการแตกตัว

2.4.3 การเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน

ยางธรรมชาติเสื่อมสภาพได้ง่ายในบรรยากาศที่มีออกซิเจน และโอโซนภายใต้ความร้อน ดังนั้นมีหลายวิธีที่ควบคุมการสลายตัวของยางธรรมชาติ เช่น การเติมสารต่อต้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน การเชื่อมขวางโมเลกุลของยาง การเคลือบผิวของยาง และการเติมสารตัวเติม เป็นต้น สาเหตุที่ทำให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพได้ เช่น ทำให้ยางเกิดการสลายตัวเชิงความร้อนของการเชื่อมโยงและการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของยางที่ว่องไว ความชื้นทำให้ยางอ่อนตัว และความร้อนยังทำให้ยางเกิดการเชื่อมต่อไปได้ (ทั้งภายในและภายนอกโมเลกุล) ส่งผลให้ยางมีความแข็งเพิ่มขึ้น การทดสอบสมบัติความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อนเพียงอย่างเดียว สามารถทำได้โดยดำเนินการทดสอบในสภาวะที่ไร้ออกซิเจน เช่น ทดสอบภายใต้สุญญากาศหรือภายใต้ก๊าซเฉื่อย

การนำยางไปใช้งานนั้นยางต้องสัมผัสกับออกซิเจนและความร้อน ซึ่งความร้อนนั้นเป็นตัวเร่งให้ออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยาได้เร็วยิ่งขึ้น ทำให้ยางเสื่อมสภาพได้เร็ว ดังนั้นการทดสอบการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อนของยางจึงนิยมทำภายใต้สภาวะบรรยากาศปกติหรือภายใต้ ออกซิเจน ดังนั้นผลการทดสอบที่ได้จึงเป็นผลอันเนื่องมาจากทั้งความร้อนและออกซิเจน

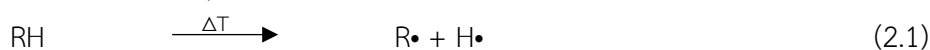
2.4.4 กลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโม่เลกุลยาง

กลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของยางประกอบด้วยขั้นตอนริเริ่ม ขั้นตอนขยาย และขั้นตอนการยุติปฏิกิริยา [5]

1. ขั้นตอนริเริ่ม

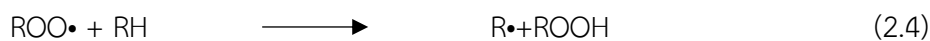
โม่เลกุลของยางถูกกระตุ้นด้วยความร้อนแล้วเกิดอนุมูลอิสระบนโม่เลกุลของยาง ($R\cdot$) $R\cdot$ ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้อนุมูลสารเปอร์ออกไซด์ ($ROO\cdot$)

(RH = Rubber hydrocarbon)



2. ขั้นตอนการขยาย

$ROO\cdot$ ทำปฏิกิริยากับโม่เลกุลยางข้างเคียงแล้วได้ $R\cdot$



3. ขั้นตอนสุดท้าย

เป็นขั้นตอนยุติปฏิกิริยา โดยที่ $ROO\cdot$ ทำปฏิกิริยากับ $R\cdot$ แล้วได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความเสถียร ($ROOR$) และ $RO\cdot$ ทำปฏิกิริยากับ $R\cdot$ แล้วได้ ROR หรือ $R\cdot$ ทำปฏิกิริยากับ $R\cdot$ แล้วได้ RR เป็นต้น



2.4.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการเสื่อมสภาพ

1. ชนิดของยาง

ยางแต่ละชนิดทนต่อสภาวะแวดล้อมไม่เท่ากัน และยางแต่ละชนิดมีโอกาสเกิดการขาดของสายโซ่ หรือเกิดการเชื่อมขวางของสายโซ่ที่ไม่เท่ากัน ถ้าการขาดของสายโซ่มากกว่าการเชื่อมของโม่เลกุลของยาง สมบัติทางกายภาพของยางจะนิ่ม แต่ถ้ากระบวนการเชื่อมขวางของยางมากกว่าการขาดของสายโซ่โม่เลกุล ยางก็จะแข็ง

2. สูตรของยาง

โดยปกติยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน ทำให้เกิดการเชื่อมขวางกันระหว่างโม่เลกุลของยางธรรมชาติโดยมีกำมะถันเป็นสารเชื่อมขวาง ยางที่มีกำมะถันเมื่อวัลคาไนซ์แล้วอัตราการออกซิเดชันจะสูงกว่าขณะยังไม่วัลคาไนซ์ ยิ่งระยะเวลาการวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้น การออกซิเดชันก็ยิ่งเพิ่มขึ้นตาม แต่การใช้ระบบการวัลคาไนซ์ที่มีกำมะถันน้อยจะทำให้ยางทนต่อการออกซิเดชันมากขึ้น

3. การมีสารต้านออกซิเดชัน

ในการขึ้นรูปยางธรรมชาติโดยปกติมีการเติมสารต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันเพื่อช่วยยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Antioxidant) ตามรายงานของ Modrow, H. et al. [15] ได้ศึกษาการเกิดออกซิเดชันของพันธะเชื่อมโยงโมเลกุลกำมะถันในยางสไตรีนบิวตาไดอีน (Styrene-Butadiene Rubber, SBR) ด้วยเทคนิคการวัดการดูดกลืนรังสีเอกซ์ชนิดโครงสร้างเซนส์ (X-ray Absorption Near Edge Structure, XANES) เพื่อตรวจสอบพันธะเชื่อมโยงโมเลกุลกำมะถันระหว่างการบ่มเร่งซึ่งได้ทำการศึกษาชนิดและความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงกับผลของสารป้องกันการเสื่อมสภาพจากการศึกษาพบว่าสารป้องกันการเสื่อมสภาพจะช่วยลดความเร็วในการเกิดการเสื่อมสภาพและไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะของพันธะเชื่อมโยง นอกจากนี้ชนิดของสารต้านออกซิเดชัน และปริมาณการใส่สารมีผลต่อการเสื่อมสภาพของยางด้วย ดังเช่นงานวิจัยของ Anderson, V. and J. L. Madelaine. [16] ได้ศึกษาความสามารถของสารต้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน 2 ชนิด คือ Wingstay L และ Butylated hydroxytoluene (BHT) ที่ใช้ในถุงมือยาง พบว่าสารต้านออกซิเดชัน Wingstay L สามารถป้องกันการเสื่อมสภาพของถุงมือยางได้ดีกว่า BHT (ซึ่งระเหยกลายเป็นไอได้ง่ายกว่า) สำหรับการศึกษาปริมาณ Wingstay L ในการป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในถุงมือยางคลอรีนต่อสมบัติหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน พบว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาการบ่มเร่งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ให้ยาวนานขึ้นหรือใช้สภาวะการบ่มที่มีความรุนแรงมากขึ้น (อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส) สมบัติการทนต่อแรงดึงมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในตัวอย่างที่มีปริมาณ wingstay L ต่ำที่สุดคือที่ปริมาณ 0.5 phdl และในตัวอย่างที่มีปริมาณสาร wingstay L ปริมาณ 0.7 phdl อาจจะไม่มากพอที่จะทำให้แน่ใจว่าสามารถป้องกันการเสื่อมสภาพของถุงมือยางคลอรีนได้ ดังนั้นต้องใช้สารต้านออกซิเดชันในปริมาณ 0.85-1.0 phdl จึงจะมากพอที่จะป้องกันการเสื่อมสภาพของถุงมือยางคลอรีนได้

4. สภาวะสิ่งแวดล้อม

อุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญเร่งการเสื่อมสภาพของยางให้เร็วขึ้น นอกจากนี้ความเป็นกรดและเบสช่วยส่งเสริมการเกิดการแตกสลายของยางที่มีหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลการเสื่อมสภาพของยางขึ้นกับปริมาณออกซิเจน และโอโซน

5. ปริมาณการเชื่อมขวาง

ยางธรรมชาติที่มีการเชื่อมขวางทำให้การแพร่ผ่านของออกซิเจนในยางเป็นไปได้ยากขึ้น crosslink density คือความหนาแน่นของการเชื่อมขวาง ทำให้ทราบจำนวนการเชื่อมขวางโมเลกุลต่อน้ำหนักหรือปริมาตรของพอลิเมอร์ เป็นค่าที่เกี่ยวข้องกับน้ำหนักเฉลี่ยของพอลิเมอร์ที่อยู่ระหว่างจุดเชื่อมขวาง โดยความหนาแน่นเชื่อมขวางเท่ากับสัดส่วนของมวลโมเลกุลของพอลิเมอร์ต่อน้ำหนักเฉลี่ยของพอลิเมอร์ที่อยู่ระหว่างจุดเชื่อมขวาง นอกจากนี้ความหนาแน่นการเชื่อมขวางหมายถึง จำนวนสายโซ่พอลิเมอร์ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของพอลิเมอร์นั้น ๆ

6. พันธุ์ยางธรรมชาติ

สายพันธุ์ของยางมีผลต่อการเสื่อมสภาพทางความร้อนของยาง อาจเนื่องมาจากยางแต่ละสายพันธุ์อาจมีส่วนช่วยต่อต้านอนุมูลอิสระในธรรมชาติไม่เท่ากันหรืออาจเนื่องมาจากน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติไม่เท่ากัน เป็นต้น

2.4.6 ข้อเสียของการเสื่อมสภาพของยาง

1. ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์แข็ง เปราะ และมีรอยร้าว
2. สีของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนไป
3. อายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ยาสั้นลง
4. การทนต่อแรงดึงตกลง การยืดตัว ณ จุดที่ขาด สั้นลง โมดูลัส สูงขึ้น หรือ ตกลง

ตามรายงานของ Temna, K. [17] ได้ศึกษาการเตรียมยางพองน้ำย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่เตรียมจากยางธรรมชาติและแป้งมันสำปะหลัง พบว่าหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนยางพองน้ำมีค่าโมดูลัสที่ระยะยืด 100, 300 และ 500 เปอร์เซ็นต์ และความต้านทานต่อการฉีกขาดเพิ่มขึ้นในทางตรงกันข้ามความต้านทานต่อแรงดึง ระยะยืด ณ จุดที่ขาด และการผิดรูปหลังการกดอัดลดลง

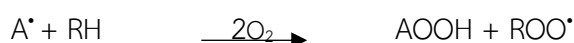
2.5 สารต้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Antioxidant) [6]

การใช้สารแอนติออกซิเดชันแทนที่ไม่ได้เป็นการต้านทานการเสื่อมสภาพไว้ได้อย่างถาวรแต่เป็นการหน่วงให้เกิดการเสื่อมเนื่องจากออกซิเดชันนั้นช้าลง ลดการเกิด Autoxidation ของยางให้เหลือน้อยที่สุด สามารถทำได้โดยการทำลายไม่ให้เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ โดยใส่สารเคมีเข้าไปรบกวนปฏิกิริยาหลักในขั้นตอนการแผ่ขยายของสายโซ่ (Propagation) ที่เรียกว่า Chain breaking antioxidants ซึ่งมีหน้าที่หลัก คือ การทำให้อนุมูลอิสระหมดไป นั่นคือปฏิกิริยาลูกโซ่ในการออกซิเดชันยุติไปด้วยกลไกการทำงานของ Chain breaking antioxidants (AH) ดังแสดงในรูปที่ 2.3

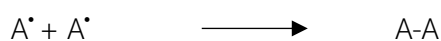
ปฏิกิริยาเริ่มต้น



ปฏิกิริยาการแผ่ขยาย



ปฏิกิริยาลิ้นสุด



รูปที่ 2.3 กลไกการทำงานของ Chain breaking antioxidants (AH) [6]

2.5.1 การเลือกใช้สารป้องกันการเสื่อมสภาพ [18]

1. ความสามารถในการละลาย การสกัด และความเข้ากันได้กับยาง (Solubility, Extractability and Compatibility) สารป้องกันการเสื่อมสภาพที่ดีต้องละลายในยางหรือมีความเข้ากันได้ดี และต้องละลายในตัวทำละลายต่าง ๆ ที่ยางต้องสัมผัสในระหว่างการใช้งานหรือโดนสกัดออกจากยางได้น้อย

2. ความสามารถในการระเหย และความเสถียรทางเคมี (Volatility and Chemical stability) สารป้องกันการเสื่อมที่จำเป็นต้องมีความสามารถในการระเหยต่ำ (มีน้ำหนักโมเลกุลสูง) และมีเสถียรภาพสูง ซึ่งจะทำให้มีระยะเวลาในการป้องกันไม่ให้ยางเสื่อมสภาพนานขึ้น หรือสามารถใช้งานผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิสูงขึ้น

3. การเปลี่ยนสียาง และการทำให้ยางตกสี (Discoloration and Staining) สารป้องกันการเสื่อมสภาพบางชนิดเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทำให้เกิดสารเคมีที่มีสี จึงส่งผลให้สีของยางเปลี่ยนไป ส่วนการตกสีนั้นเกิดจากการที่สารป้องกันการเสื่อมสภาพเคลื่อนตัวมาที่ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ และเมื่อสัมผัสกับวัสดุอื่นจะทำให้เกิดรอยเปื้อนบนวัสดุที่มาสัมผัสกับผิวยาง

4. ความเข้มข้นและราคา (Concentration and Cost) การพิจารณาใช้สารป้องกันการเสื่อมสภาพในปริมาณที่เหมาะสมนั้นขึ้นกับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ชนิดของยาง สภาพการใช้งานของผลิตภัณฑ์ ระดับการตกสี การเปลี่ยนสีที่ยอมรับได้ และที่สำคัญอีกประการ คือ ต้นทุนการผลิต เนื่องจากสารป้องกันการเสื่อมสภาพมีราคาค่อนข้างสูง การใช้ในสารป้องกันการเสื่อมสภาพส่วนใหญ่จะมีปริมาณการใช้งานที่เหมาะสมค่าหนึ่ง การใช้ในปริมาณที่สูงกว่าค่าดังกล่าว นอกจากจะส่งผลกระทบต่อต้นทุนการผลิตแล้วยังไม่เสริมประสิทธิภาพในการป้องกันการเสื่อมสภาพให้สูงขึ้น

2.5.2 ชนิดของสารต้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน [3, 6]

สารต้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ใช้กับผลิตภัณฑ์ที่เตรียมจากน้ำยางสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. สารอนุพันธ์ของเอมีน (Amine derivative)

เป็นสารต้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันดีกว่าสารต้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เป็นสารอนุพันธ์ฟีนอลิก เนื่องจากผลของความร้อน ออกซิเจน แสง และโลหะบางชนิด แต่จะมีปัญหาด้านการเปลี่ยนสีของผลิตภัณฑ์เมื่อมีอายุการใช้งานนาน ๆ ได้แก่ Phenyl-2-Naphthylamine (PBN), N,N-di-2-naphthyl-p-phenylenediamine (DBNPPD) เป็นต้น

2. สารอนุพันธ์ฟีนอลิก (Phenolic derivative)

เป็นสารต้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ไม่เปลี่ยนสีของผลิตภัณฑ์เมื่อได้รับความร้อน หรือเกิดการเปลี่ยนสีเล็กน้อยเมื่อใช้ไปนาน ๆ ได้แก่ Phenolic sulfide เป็นต้น

2.6 โฟมยางธรรมชาติ

โฟมยางธรรมชาติเป็นผลิตภัณฑ์ที่ทำมาจากน้ำยางชั้น โดยที่ภายในเนื้อยางประกอบไปด้วยโพรงเล็ก ๆ จำนวนมาก มีรูหรือโพรงอากาศขนาดเล็กภายในเนื้อยางอาจจะติดต่อกันทั้งหมดหรือติดต่อกันบางส่วนและอาจจะมีส่วนที่ไม่ติดต่อกันเลย กระบวนการในการผลิตโฟมยางธรรมชาติเป็นกระบวนการผลิตยางที่มีฟองก๊าซกระจายตัวอยู่ในน้ำยาง แล้วทำให้เสียความเสถียร หลักการสำคัญของการผลิตโฟมยางประกอบด้วย 3 ขั้นตอนดังนี้ [19]

1. กระบวนการเกิดฟองก๊าซ

เป็นกระบวนการทำให้เกิดฟองก๊าซในน้ำยางคอมปาวด์ โดยการตี ปั่น พน หรือเติมสารที่ทำให้ก๊าซออกมาเพื่อให้เกิดเป็นฟองก๊าซแทรกตัวอยู่ในเนื้อยาง

2. กระบวนการทำให้ฟองยางอยู่ตัว

เป็นกระบวนการที่ทำให้ฟองเหลวเกิดการเจลโดยเติมสารเคมีหรือก๊าซที่ช่วยให้น้ำยางที่เป็นฟองแล้วเกิดการเจลในแก้วหรือในบริเวณที่กำหนด

3. กระบวนการทำให้โฟมยางเกิดการคงรูป

เป็นกระบวนการวัลคาไนซ์ฟองเจลที่เปียก แล้วนำยางฟองน้ำที่ได้มาล้าง อบแห้ง และตากแห้งในขั้นตอนสุดท้ายต่อไป

2.6.1 กระบวนการผลิตโฟมยางธรรมชาติ

กระบวนการผลิตโฟมยางจากน้ำยางธรรมชาติที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมมี 2 วิธีหลักๆ ได้แก่

1. การผลิตโฟมยางธรรมชาติโดยกระบวนการต้นลอป

กระบวนการต้นลอป เป็นกระบวนการผลิตโฟมยางธรรมชาติที่มีการจดสิทธิบัตรเมื่อ ค.ศ. 1930 โดย Murphy, Chapman และ Pounder นักวิจัยของบริษัท Dunlop Rubber Company วิธีนี้ได้รับความนิยมและใช้ผลิตยางฟองน้ำจากยางธรรมชาติเป็นส่วนใหญ่ [17]

ขั้นตอนของกระบวนการต้นลอป [13, 20] ประกอบด้วย

1.1 ทำการไล่แอมโมเนียจากน้ำยางชั้นด้วยการกวนช้า ๆ นำน้ำยางชั้นที่ทำการปรับแอมโมเนียแล้วเติมผสมสารเคมีต่าง ๆ คือ สารช่วยให้เกิดฟอง สารวัลคาไนซ์ สารตัวเร่งให้ยางสุก และสารป้องกันการเสื่อมสภาพ หลังจากนั้นตีน้ำยางคอมปาวด์ให้เกิดฟองเมื่อได้ฟองตามที่ต้องการแล้วจึงลดความเร็วในการตีฟองเพื่อให้ได้ฟองละเอียดและมีความสม่ำเสมอ จากนั้นทำการเติมสารตัวเร่ง สารตัวกระตุ้น และ สารก่อเจลตามลำดับ หลังจากเติมสารก่อเจลแล้ว ทำการเทฟองยางขณะที่ยังเหลวลงในเบ้าพิมพ์ที่ต้องการและปล่อยให้ฟองยางจับตัวที่อุณหภูมิห้อง

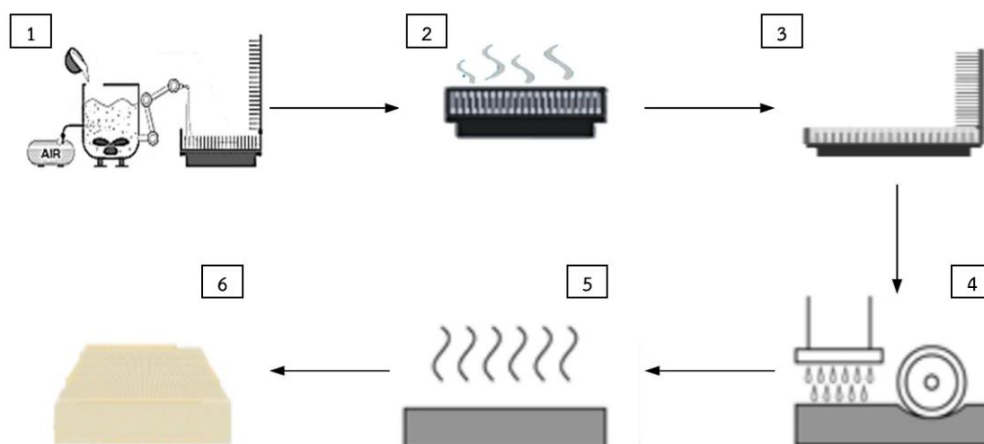
1.2 จากนั้นทำการวัลคาไนซ์โฟมยางที่ได้โดยนำไปอบที่อุณหภูมิ 100-120 องศาเซลเซียสเพื่อให้โฟมเกิดการคงรูป

1.3 เมื่อโฟมยางเกิดการวัลคาไนซ์อย่างสมบูรณ์แล้วจึงแกะเอาโฟมยางออกจากเบ้าพิมพ์

1.4 นำโฟมยางไปล้างทำความสะอาดด้วยน้ำ เพื่อกำจัดสารเคมีที่ละลายน้ำได้ สารที่ไม่ใช่ยาง เช่น สบู่ ซึ่งสารเหล่านี้ทำให้โฟมยางที่ได้ไม่ทนต่อการบ่มเร่ง กระด้างตัวไม่ดี และมีกลิ่น

1.5 นำโฟมยางไปอบให้แห้ง

1.6 ผลิตภัณฑ์โฟมยางธรรมชาติ



รูปที่ 2.4 ขั้นตอนการผลิตโฟมยางด้วยกระบวนการดันลอป [21, 22]

2. การผลิตโฟมยางธรรมชาติโดยกระบวนการทาลาเลย์ (Talalay process)

การผลิตโฟมยางธรรมชาติด้วยกระบวนการทาลาเลย์ พัฒนามาจากกระบวนการดันลอปโดย J.A.A, and L Talalay นักวิจัยของบริษัท Dunlop Rubber Company ในช่วง ค.ศ. 1950 โดยจะมีขั้นตอนที่ซับซ้อนกว่ากระบวนการดันลอป [17]

ขั้นตอนของกระบวนการทาลาเลย์ [13, 20] ประกอบด้วย

2.1 ทำการไล่แอมโมเนียจากน้ำยางชั้นด้วยการกวนช้า ๆ นำน้ำยางชั้นที่ทำการปรับแอมโมเนียแล้วผสมสารเคมี หลังจากนั้นตีน้ำยางคอมปาวด์ให้เป็นฟองแล้วเทใส่เบ้าพิมพ์

2.2 ปิดเบ้าพิมพ์ด้วยระบบสุญญากาศเพื่อให้ฟองขยายตัวหรือไหลได้เต็มแม่พิมพ์ นำไปแช่แข็งที่อุณหภูมิประมาณ -30 องศาเซลเซียส เพื่อเยือกแข็งฟองยางปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่เบ้าพิมพ์เข้าไปยังฟองยางที่ถูกเยือกแข็ง ทำให้ pH ตกลงส่งผลให้โฟมยางเกิดการเจล

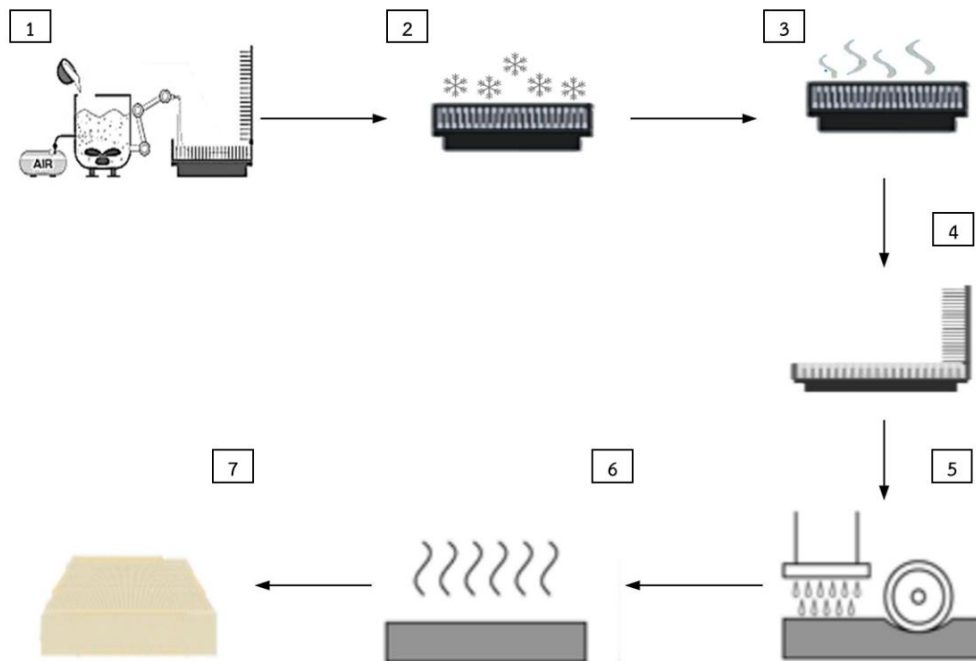
2.3 จากนั้นทำการวัลคาไนซ์โฟมยางที่ได้โดยนำไปอบที่อุณหภูมิ 100-120 องศาเซลเซียส

2.4 เมื่อโฟมยางเกิดการวัลคาไนซ์อย่างสมบูรณ์แล้วจึงแกะเอาโฟมยางออกจากเบ้าพิมพ์

2.5 นำโฟมยางไปล้างทำความสะอาดด้วยน้ำ เพื่อกำจัดสารเคมีที่ละลายน้ำได้ สารที่ไม่ใช่ยาง เช่น สบู่ ซึ่งสารเหล่านี้ทำให้โฟมยางที่ได้ไม่ทนต่อการบ่มเร่ง กระด้างตัวไม่ตี และมีกลิ่น

2.6 นำโฟมยางไปอบให้แห้ง

2.7 ผลิตภัณฑ์โฟมยางธรรมชาติ



รูปที่ 2.5 ขั้นตอนการผลิตโฟมยางด้วยกระบวนการทาลาเลย์ [21, 22]

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบข้อดี ข้อเสียของกระบวนการดันลอปและทาลาเลย์ [20]

กระบวนการ	ข้อดี	ข้อเสีย
ดันลอป	<ol style="list-style-type: none"> โฟมยางมีความหนาแน่นตั้งแต่ต่ำไปจนถึงสูง ต้นทุนต่ำกว่าแบบทาลาเลย์ 	<ol style="list-style-type: none"> ระดับความนิ่มของโฟมยางไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน ด้านล่างมักแข็งกว่าด้านบน เนื่องจากขนาดของรูพรุนที่แตกต่างกัน โฟมยางมีความหนาแน่นสูงทำให้ผลิตภัณฑ์แข็งและน้ำหนักเพิ่มมากขึ้น
ทาลาเลย์	<ol style="list-style-type: none"> โฟมยางมีความหนาแน่นต่ำ ทำให้มีความนิ่ม โฟมยางมีความนิ่มสม่ำเสมอเนื่องจากขนาดของรูพรุนมีความสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน 	<ol style="list-style-type: none"> ต้นทุนสูงกว่าแบบดันลอป สิ้นเปลืองพลังงาน (เนื่องจากต้องทำให้เป็นสุญญากาศและใช้อุณหภูมิต่ำ) รอบของการผลิตผลิตภัณฑ์นานกว่ากระบวนการดันลอปประมาณ 4 เท่า

2.6.2 สารเคมีสำหรับกระบวนการผลิตโฟมยางธรรมชาติ

สารเคมีที่ใช้ในการทำโฟมยางธรรมชาติจะต้องเตรียมอยู่ในรูปของสารละลาย สารแขวนลอย หรือเตรียมอยู่ในรูปของสารอิมัลชัน ขึ้นอยู่กับสมบัติของสารเคมีเหล่านั้น การเตรียมสารเคมีให้อยู่ในรูปของสารแขวนลอย อาศัยแรงทางกลบดสารเคมีให้มีขนาดอนุภาคประมาณ 1-5 ไมครอน และใช้สารช่วยกระจายตัว (Dispersing agent) เพื่อให้สารเคมีที่บดสามารถแขวนลอยในตัวกลางที่เป็นน้ำได้อย่างเสถียร [23]

1. สารช่วยในการเกิดฟอง

สารที่ใช้ในการเกิดฟองสำหรับกระบวนการผลิตโฟมยางธรรมชาติจากน้ำยางธรรมชาติจากน้ำยางธรรมชาติ โดยทั่วไปจะใช้สบู่ในกลุ่มคาร์บอกซิเลต ได้แก่ โอลิเอต (Oleate), ริซิโนเลต (Ricinoleate), คาสโตรอล ออย (Castor oil) และ เรซินเนต (Resinate) ซึ่งอาจใช้เพียงชนิดเดียวหรือใช้ร่วมกันก็ได้ ซึ่งการใช้ร่วมกันประสิทธิภาพจะมากกว่าเพียงชนิดเดียว โดยที่สบู่คาสโตรอล ออย จะทำให้เกิดฟองซ้ำ อาจใช้ในงานที่ต้องการยางฟองน้ำความหนาแน่นสูง ซึ่งจะมีประสิทธิภาพในการช่วยเกิดฟองน้อยกว่า สบู่โอลิเอต เมื่อใช้สบู่โพแทสเซียมโอลิเอต (Potassium oleate) จะทำให้เกิดฟองขึ้นอย่างรวดเร็ว และให้การเจดที่ดีกว่า ใช้ในงานที่ต้องการโฟมยางที่มีความหนาแน่นต่ำ นอกจากชนิดของสบู่ที่ส่งผลต่อความหนาแน่น ปริมาณของสบู่ที่ใช้ก็ส่งผลต่อความหนาแน่นด้วย โดยถ้าเพิ่มปริมาณสบู่ในน้ำยางคอมพาวด์จะทำให้มีฟองอากาศในโฟมยางมาก และลดความหนาแน่นของโฟมยาง [3]

2. สารวัลคาไนซ์

ระบบการวัลคาไนซ์ที่ใช้ในกระบวนการผลิตโฟมยางธรรมชาติ ที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือ กำมะถัน เป็นสารที่ใช้เพื่อวัลคาไนซ์ยาง โดยเมื่อใส่กำมะถันเข้าไปในยางแล้วให้ความร้อน จะเกิดการวัลคาไนซ์ ทำให้สมบัติของยางดีขึ้นคือ เมื่อเย็นไม่แข็ง ไม่มีกลิ่น ไม่ละลายในตัวทำละลาย เป็นต้น ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากกำมะถันทำให้เกิดการเชื่อมโยงโมเลกุล การเชื่อมโยงโมเลกุลในยางทำให้โมเลกุลของยางใหญ่ขึ้นทำให้เกิดการหลอมเหลวเมื่อถูกความร้อนและแข็งตัวเมื่อเย็นเป็นไปได้อย่างขึ้น ปริมาณกำมะถันในยางทำให้ปริมาณการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น และสมบัติของยางเช่น ความต้านทานแรงดึง ความแข็ง โมดูลัส และความกระด้างตัวของยางเปลี่ยนแปลงไปตามการเชื่อมโยงโมเลกุลด้วย [9] โดยเมื่อปริมาณการเชื่อมโยงโมเลกุลเพิ่มขึ้น ส่งผลให้โมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic modulus) และความแข็ง (Hardness) มีค่าเพิ่มขึ้น ระยะยืดจนขาด (Elongation at break) มีค่าลดลง ค่าความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) และค่าทนทานต่อการฉีกขาดจะเพิ่มขึ้นสูงสุด และลดลงเมื่อปริมาณการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น โดยใช้ค่า relaxed modulus ที่ระยะยืด 100 เปอร์เซ็นต์เป็นตัวตรวจสอบวัดความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยง [3]

3. สารเร่งปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ [9]

ZDEC (Zinc-N-diethyl dithiocarbamate) เป็นสารตัวเร่งประเภทซิงค์ไดไธโอคาร์บาเมต สารเคมีในกลุ่มนี้เหมาะกับการใช้เป็นตัวเร่ง ในการบ่ม โดยใช้อากาศร้อน หรือ ใช้น้ำเพราะเป็นตัวเร่งที่เกิดการบ่มเร็วขึ้น สามารถคงรูปได้ดีและวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิต่ำที่ 115-125 องศาเซลเซียส ในระยะเวลาสั้น แต่ถ้าใช้อุณหภูมิสูงกว่านี้ อาจเกิดการ reversion ขึ้นได้ ดังนั้นไม่ควร cure เกิน 125 องศาเซลเซียส

ZMBT (Zinc salt of 2-mercaptobenzothiazole) เป็นสารเร่งในกลุ่มโรอาโซล สารเคมีในกลุ่มนี้ สามารถบ่มได้ทุกรูปแบบของการวัลคาไนซ์ และสามารถกระตุ้นให้เกิดการบ่มเร็วขึ้นได้โดยการใช้ตัวเร่งที่เป็นต่าง เช่น สารพวกไดไฮโอคาร์บาเมต และไฮยูแรมแต่การกระตุ้นนี้มีผลให้ scorch time สั้นลงด้วย และถ้าใช้ร่วมกับ basic accelerator โดยใช้สัดส่วนจำนวนโมลเท่ากัน จะให้ผลสูงสุดและความเร็วใหม่ในการบ่มที่เร็วกว่าที่ใช้เดี่ยว ๆ โดย basic accelerator ที่นิยมใช้จะเป็นสารพวกกัวนิติน เช่น DPG เป็นต้น

DPG (Diphenyl guanidine) เป็นสารตัวเร่งในกลุ่มกัวนิติน สารตัวเร่งกลุ่มกัวนิตินเป็นสารตัวเร่งที่ทำให้ยางสุก (Cure) ช้า ถ้าใช้เป็นตัวเร่งเสริมจะมีการกระตุ้นสูงมากโดยเฉพาะการกระตุ้นสารพวกโรอาโซล ถ้าใช้สารเคมีในกลุ่มนี้เป็นตัวเร่งหลักจะไม่สามารถวัลคาไนซ์โดยใช้อากาศร้อนได้ เพราะจับตัวช้าเกินไป การทำงานของกัวนิตินต้องใช้ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เป็นตัวกระตุ้นแต่ไม่จำเป็นต้องใช้กรดไขมัน

4. สารต้านทานปฏิกิริยาออกซิเดชัน

โดยทั่วไปแล้วจะไม่ใช้สารต้านทานปฏิกิริยาออกซิเดชันในงานน้ำยาง ทั้งนี้เพราะพอลิเมอร์ที่อยู่ในสภาพของน้ำยางมีความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพได้ดี และพอลิเมอร์ในสภาพน้ำยางไม่ได้ผ่านการบด ฉีก หรือผ่านการสัมผัสอุณหภูมิสูงขณะกระบวนการผลิต

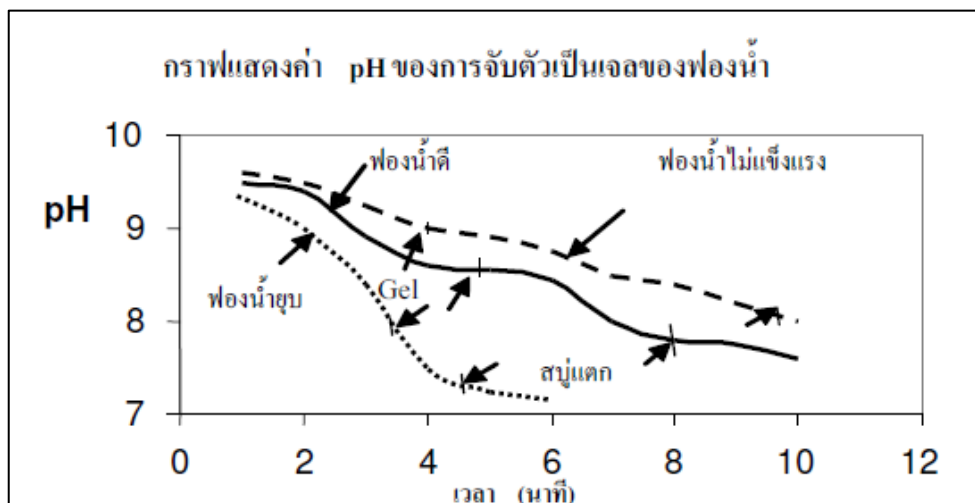
Antioxidant Wingstay เป็นสารที่ใสในน้ำยางเพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพ สารแอนต้ออกซิแดนท์ เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพของยางที่เนื่องมาจากการที่ออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยากับยาง โดยสารต้านทานออกซิเดชันจะอยู่ในผลิตภัณฑ์เพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพของยาง

5. สารกลุ่มกระตุ้นสารตัวเร่งการวัลคาไนซ์

ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) ทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้นตัวเร่ง ให้ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยเมื่อใส่ไปในยางปริมาณเล็กน้อยจะทำให้มอดูลัสสูงขึ้น และบางครั้งไม่มีการใส่สารกระตุ้นก็จะมีวัคคาไนซ์เกิดขึ้นโดยทั่วไปนิยมใช้ซิงค์ออกไซด์ เป็นสารกระตุ้นในปริมาณ 3-5 phr และถ้าซิงค์ออกไซด์มีขนาดอนุภาคเล็กก็สามารถลดการใช้เหลือเพียง 1 phr ได้และถ้าใช้มากกว่า 5 phr ขึ้นไป มักมีจุดประสงค์อื่นมากกว่าจะใช้เป็นการกระตุ้น เช่น ทำให้การถ่ายเทความร้อนในยางเร็วขึ้นเหมาะแก่การทำยางหนา ๆ โดยเฉพาะการทำให้ยางสุกโดยใช้อากาศร้อน

6. สารช่วยให้ฟองยางเกิดการเจล [24]

โซเดียมซิลิโคฟลูออไรด์ (Sodium silicofluoride, SSF) เป็นสารที่ใสในน้ำยางเพื่อให้ น้ำยางจับตัวเป็นเจล เป็นกระบวนการทำให้เกิดการเจลอย่างช้า ๆ ซึ่งเตรียมอยู่ในรูปของสารแขวนลอยในตัวกลางซึ่งเป็นน้ำโดยมีค่า pH ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 3.3 เมื่อใส่โซเดียมซิลิโคฟลูออไรด์ลงในน้ำยาง จะทำให้เกิดการสูญเสียความเสถียรอย่างช้า ๆ ของน้ำยางทำให้เกิดการเจลขึ้น



รูปที่ 2.6 แสดงความสัมพันธ์ของ pH ที่ทำให้เกิดการเจลของฟองน้ำที่เวลาต่าง ๆ กัน และผลกระทบต่อโครงสร้างของยางฟองน้ำ [24]

จากรูปที่ 2.6 ฟองน้ำที่มีค่า pH ประมาณ 9-10 เมื่อเติมโซเดียมซัลไฟโคฟลูออไรด์ในปริมาณที่เหมาะสมลงในน้ำยางสำหรับฟองน้ำที่ดีจะทำให้ pH ของน้ำยางลดลงอย่างช้า ๆ เหลือประมาณ 8.5 เมื่อเวลาผ่านไป 5 นาที สำหรับ pH ที่ลดลงอย่างรวดเร็วจะใช้เวลาในการเจลน้อย จะทำให้โฟมยางที่ได้เกิดการยุบตัว เนื่องจากการพังลายโครงสร้างของฟองจะเกิดขึ้นก่อนที่อนุภาคของยางเกิดการประสานกันจึงทำให้เกิดการยุบตัวของโฟมยาง แต่ถ้า pH ลดลงช้ามาก ๆ หรือใช้เวลาในการเจลนานทำให้เกิดการเจลช้าเกินไป จะทำให้ฟองน้ำแตกก่อนที่จะประสานกัน จะทำให้ฟองน้ำที่ได้ไม่แข็งแรงและถ้าทิ้งระยะเวลาให้ฟองน้ำเกิดการเจลนานเกินไปก็จะส่งผลให้ฟองน้ำแตกได้

2.6.3 โครงสร้างและสมบัติของเซลล์โฟม [25]

การผลิตเซลล์ในลักษณะต่าง ๆ จะมีผลต่อโครงสร้างเซลล์ที่ได้ซึ่งลักษณะและสมบัติจะแตกต่างกันออกไปแล้วแต่กระบวนการผลิต โดยโครงสร้างเซลล์จะเป็นคุณลักษณะสำคัญที่มีผลต่อสมบัติของโฟมยาง ลักษณะโครงสร้างเซลล์ของโฟมยางที่ผลิตจากน้ำยางธรรมชาติด้วยกระบวนการทาลาเลย์ (Talalay latex) และกระบวนการดันลอป (Standard latex) จะมีลักษณะแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 เปรียบเทียบลักษณะของเซลล์ที่ได้จากกระบวนการทาลาเลย์และกระบวนการดันลอป [24]

จากลักษณะโครงสร้างของเซลล์ที่ได้จากกระบวนการทาลาเลย์มีลักษณะกลม และการกระจายของเซลล์อย่างสม่ำเสมอซึ่งจะทำให้ได้โฟมยางที่มีสมบัติในการรับแรง กระจายแรง ได้ดี มีความคงทน มีความสามารถในการระบายความชื้น และการผ่านของอากาศได้ดี เมื่อเทียบกับ โฟมยางที่ได้จากกระบวนการดันลอป (Standard latex) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Khampok, S. [24] ศึกษากระบวนการขึ้นรูปและสมบัติของโฟมยางธรรมชาติความหนาแน่นต่ำ โดยการขยายปริมาตรด้วยการประยุกต์กระบวนการดันลอปและกระบวนการทาลาเลย์โดยป้อนสุญญากาศ พบว่าลักษณะสัณฐานวิทยาของโฟมยางที่ไม่ได้ขยายปริมาตรจากทั้งสองกระบวนการ ลักษณะเซลล์ ที่ได้มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบและต่อเนื่องกัน แต่มีความแตกต่างกันคือลักษณะเซลล์ของ โฟมยางที่ได้จากกระบวนการทาลาเลย์มีรูปร่างกลม และเมื่อทำการขยายปริมาตรของโฟมยางเพิ่มขึ้น ลักษณะของเซลล์ที่ได้จากกระบวนการทาลาเลย์ยังมีความเป็นระเบียบและต่อเนื่องกัน ขนาดของ เซลล์ที่มีรูปร่างกลมจะมีขนาดขยายใหญ่ขึ้น ในทางตรงข้ามลักษณะของเซลล์ที่ได้จากกระบวนการ ดันลอปโครงสร้างของเซลล์เกิดการพังทลายของเซลล์อย่างถาวร (การเชื่อมต่อในลักษณะหลวมๆ มี สภาพของการฉีกขาดของเนื้อโฟม) จึงส่งผลให้โครงสร้างเซลล์ที่มีลักษณะกลม การจัดเรียงอย่างเป็น ระเบียบและต่อเนื่องกันของโฟมยางที่ได้จากกระบวนการทาลาเลย์ ทั้งในส่วนของปริมาตรที่ไม่ได้ ขยายและในส่วนของปริมาตรเพิ่มสูงขึ้น จะมีค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงกด ค่าดัชนีความแข็ง เชิงกด และค่าดัชนีความแข็งเชิงกดที่เปลี่ยนแปลงไปหลังการบ่มเร่งมีค่าต่ำ นอกจากนี้การกระเด็งมี ค่าสูงกว่ายางพองน้ำที่ได้จากกระบวนการดันลอปทุก ๆ ความหนาแน่น

2.9.1 ขนาดเซลล์กับความหนาของผนังเซลล์

โฟมที่มีจำนวนเซลล์และสัดส่วนเซลล์เปิด-ปิดเท่ากัน พบว่าความแข็งแรง สมบัติด้าน ความร้อนและทางกายภาพอื่น ๆ แตกต่างกันในพอลิเมอร์เดียวกันในโฟมชนิดต่าง ๆ ที่มี ความหนาของผนังเซลล์เท่ากันแต่ขนาดเซลล์ต่างกัน หรือขนาดเซลล์เท่ากันแต่ความหนาผนังเซลล์ไม่ เท่ากัน จะได้โครงสร้างเซลล์ที่เป็นเฟสของก๊าซแตกต่างกัน แสดงว่าความหนาแน่นของโฟมจะ

ไม่ขึ้นอยู่กับเฉพาะขนาดเซลล์แต่จะถูกควบคุมด้วยความหนาของผนังเซลล์ด้วย ดังเช่นงานวิจัยของ Zakaria, Z. et al. [26] ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิการเกิดฟองต่อโครงสร้างสัณฐานวิทยาและสมบัติการรับแรงกดของโฟมยางยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นขนาดของเซลล์ใหญ่ขึ้น ผนังเซลล์บางลง ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นลดลง เมื่อค่าความหนาแน่นลดลงทำให้ความสามารถในการรับแรงลดลง เนื่องจากขนาดของเซลล์ใหญ่ขึ้น ผนังเซลล์บางลง ส่งผลต่อความเสถียรของเซลล์โฟมซึ่งมีแนวโน้มว่าเป็นสาเหตุของการแตกหักของผนังเซลล์ ในทางตรงข้ามเซลล์ขนาดเล็กทำให้ได้ผนังเซลล์ที่หนา ส่งผลให้ต้านทานต่อการโค้งงอและการพังทลายของเซลล์เพิ่มขึ้น เพราะว่าการเสียรูปอย่างถาวรเกิดจากการแตกของผนังเซลล์และขอบเซลล์ จะเห็นได้ว่าความหนาแน่นของโฟมเกี่ยวข้องโดยตรงกับความหนาของผนังเซลล์ ดังนั้นความต้านทานต่อการตัดงอของผนังเซลล์และการพังทลายของเซลล์เพิ่มขึ้นตามค่าความหนาแน่น

2.9.2 ความหนาแน่นเซลล์

เป็นสมบัติทางโครงสร้างของโฟมที่แสดงถึงลักษณะส่วนประกอบของโฟมพอลิเมอร์ที่เป็นของแข็งกับส่วนที่เป็นก๊าซ นอกจากนี้ความหนาแน่นของเซลล์แสดงถึงความสัมพันธ์กับสมบัติทางกายภาพหลาย ๆ อย่าง เช่น ความหนาแน่นโฟม ความแข็งแรง สมบัติการนำความร้อน และสมบัติทางไฟฟ้า ตามรายงานของ Heidari, A., and M. Fasihi. [27] ความแตกต่างของขนาดเซลล์นำไปสู่ความแตกต่างของความหนาแน่นเซลล์ ขนาดเซลล์เล็กลงความหนาแน่นเซลล์เพิ่มขึ้น แต่เมื่อเซลล์มีขนาดใกล้เคียงกัน ความหนาแน่นของโฟมจะมีผลต่อความหนาแน่นเซลล์มากที่สุด โดยที่ความหนาแน่นเซลล์สูงสุดจะเกิดขึ้นที่โฟมความหนาแน่นต่ำที่สุด สอดคล้องกับงานวิจัยของ Najib, N.N. et al. [28] ศึกษาผลของสารฟู่ต่อสัณฐานวิทยาของเซลล์และสมบัติด้านการทนแรงกระแทกของโฟมยางธรรมชาติ พบว่าปริมาณสารฟู่เพิ่มขึ้นเซลล์ที่ได้ขนาดเล็กลง ละเอียดยิ่ง และสม่ำเสมอมากขึ้น จากขนาดเซลล์ที่เล็กลงส่งผลให้ความหนาแน่นของเซลล์เพิ่มขึ้น สำหรับสมบัติการทนต่อแรงกระแทกสารฟู่ที่เพิ่มขึ้นสารเกิดการสร้างก๊าซมากขึ้นทำให้ความหนาแน่นลดลง ส่งผลให้สมบัติการทนต่อแรงกระแทกลดลง แต่การดูดซับพลังงานเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารฟู่ที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ลักษณะโครงสร้างที่มีเซลล์ขนาดใหญ่กระจายอยู่ระหว่างเซลล์เล็ก จะส่งผลให้สูญเสียสมบัติของโฟมไปเนื่องจากเซลล์ที่ใหญ่กว่ามีผนังเซลล์ที่บางกว่าเมื่อมีการใช้แรงกระแทกผนังเซลล์มีแนวโน้มที่จะยุบตัวและแยกออกจากกัน เช่น งานวิจัยของ ณัฐนิ และคณะ [29] ศึกษาปริมาณสารก่อฟองที่ปริมาณต่าง ๆ พบว่าเมื่อใช้สารก่อฟองในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ทำให้โฟมยางมีฟองก๊าซแทรกตัวอยู่ในเนื้ออย่างมากขึ้นอีกทั้งฟองอากาศมีขนาดใหญ่ขึ้น ลักษณะดังกล่าวทำให้โฟมยางที่ได้มีความหนาแน่นน้อยเนื่องจากยางถูกแทนที่ด้วยอากาศ ได้ผลิตภัณฑ์โฟมที่มีน้ำหนักน้อย แต่การใส่สารก่อฟองในปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้โฟมเกิดการยุบตัวได้ง่ายและโฟมมีขนาดของฟองอากาศขนาดเล็กกระจายร่วมกับฟองอากาศขนาดใหญ่ซึ่งเป็นจุดอ่อน ส่งผลให้โฟมไม่แข็งแรง ฉีกขาดง่าย

2.9.3 สมบัติทางความร้อน [30]

ปัจจัยที่มีผลต่อค่าการนำความร้อนของโฟม คือค่าความหนาแน่นขององค์ประกอบของเฟสพอลิเมอร์ แต่ปริมาณความร้อนส่วนมากมักเกิดจากการถ่ายเทผ่านเฟสของก๊าซ ซึ่งก๊าซจะมีสมบัติที่เป็นฉนวนความร้อนได้ดีกว่าของแข็ง ทำให้เมื่อความหนาแน่นของโฟมลดลงค่าความต้านทานความร้อนของโฟมจึงมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณของก๊าซภายในโฟมเพิ่มขึ้นจะทำให้กระบวนการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นหลักเป็นกระบวนการแผ่รังสีความร้อน เมื่อความหนาแน่นของโฟมเพิ่มมากขึ้นกระบวนการถ่ายเทความร้อนจะเกิดได้มากขึ้นเนื่องจากโฟมมีเนื้อของแข็งมากขึ้น

2.7 การผลิตบับเบิล (Bubble generation)

2.7.1 หลักการสร้างบับเบิลขนาดเล็ก [31]

สำหรับการสร้างบับเบิลขนาดเล็ก โดยทั่วไปสามารถทำได้ 4 วิธี ดังนี้

1. การอัดอากาศผ่านวัสดุรูพรุนที่ทำจากแผ่นเซรามิค แผ่นโลหะ แผ่นฟิล์ม หรือแผ่นพิวเตอร์ เป็นต้น สามารถลดขนาดของรูพรุนได้ด้วยการลดขนาดของรูพรุน แต่ขนาดรูพรุนต้องมีขนาดเล็กกว่าฟองอากาศหลายเท่า มีผลทำให้เกิดการสูญเสียความดันในระบบเพิ่มขึ้น ต้องใช้พลังงานในการเดินปั๊มที่สูงขึ้น และรูพรุนที่ติดกันมีผลให้บับเบิลที่ปล่อยออกมาเกิดการรวมตัวเป็นบับเบิลที่มีขนาดใหญ่ขึ้น

2. การอัดเพิ่มความดันอากาศให้ละลายในของเหลว เป็นการอัดเพิ่มความดันอากาศเหนือของเหลวจนถึงความดันไออิ่มตัวจนอากาศละลายในของเหลวได้มากขึ้น หลังจากนั้นเปิดวาล์วเพื่อลดความดันในถัง อากาศที่ละลายในของเหลวจะกลับสู่สถานะก๊าซ จากนั้นเกิดเป็นบับเบิลที่มีขนาดเล็ก แต่วิธีการนี้มีปัญหาในเรื่องของการใช้พลังงานในการอัดที่ค่อนข้างมาก เพื่อสร้างบับเบิลขนาดเล็กให้มีปริมาณมากเพียงพอ นอกจากนี้อุปกรณ์ในการสร้างบับเบิลยังมีขนาดใหญ่และมีความซับซ้อน

3. การใช้คลื่นเหนือเสียงส่งผ่านของเหลว ซึ่งก่อให้เกิดการสั่นของความดันส่งผลให้ของเหลวเกิดความปั่นป่วนในตำแหน่งที่มีความดันต่ำกว่าความดันไอจึงกลายเป็นบับเบิลขนาดเล็ก นอกจากนี้ความถี่ของคลื่นเหนือเสียงมีผลต่อขนาดของฟองอากาศที่เกิดขึ้น อย่างไรก็ตามวิธีนี้แก้ปัญหาด้านปริมาณและการควบคุมขนาดของบับเบิล

4. วิธีการใช้แรงเฉือนตัดย่อยบับเบิลให้มีขนาดเล็ก ซึ่งอาจจะใช้ใบพัดสำหรับหมุนสร้างแรงเฉือนตัดย่อยบับเบิล หรืออาจใช้ของเหลวพ่นด้วยความเร็วสูงจนเกิดบริเวณที่มีความดันต่ำที่สามารถดึงบับเบิลเข้ามาผสมในของเหลวอย่างรุนแรง จนเกิดการตัดเฉือนย่อยบับเบิลให้มีขนาดเล็กลง สำหรับวิธีนี้ข้อดี คือ สามารถสร้างฟองอากาศที่มีขนาดเล็กและปริมาณมากได้โดยการควบคุมความเร็วของของเหลวหรือความเร็วใบพัด

2.7.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดบับเบิลและขนาดของบับเบิล

1. ความหนืดและแรงตึงผิวของของเหลว

เมื่อความหนืดและแรงตึงผิวของของเหลวเพิ่มขึ้นส่งผลให้บับเบิลขนาดใหญ่ขึ้น ดังเช่นงานวิจัยของ Schafer, R., C. Merten. and G. Eigenberger [32] จากการเปรียบเทียบขนาดบับเบิล

กับของเหลวที่มีความหนืดแตกต่างกันด้วยก๊าซไนโตรเจนในไซโคลเฮกซานอล (Cyclohexanol) ไซโคลเฮกซาโนน (Cyclohexanone) และไซโคลเฮกเซน (Cyclohexane) โดยที่ไซโคลเฮกซานอล ไซโคลเฮกซาโนน และไซโคลเฮกเซน มีค่าความหนืดเท่ากับ 41.07×10^{-3} , 1.80×10^{-3} และ 0.98×10^{-3} kg/(m·s) ตามลำดับ พบว่าไซโคลเฮกซานอลที่มีความหนืดสูงจะได้บับเบิลขนาดใหญ่กว่า ไซโคลเฮกซาโนน และไซโคลเฮกเซน สำหรับการเปรียบเทียบขนาดบับเบิลกับของเหลวที่มีแรงตึงผิวด้วยก๊าซไนโตรเจนในน้ำและไซโคลเฮกเซน ทั้งสองระบบมีค่าความหนืดและความหนาแน่นของเหลวใกล้เคียงกัน แต่ไซโคลเฮกเซนมีค่าแรงตึงผิวเพียง 1 ใน 3 ของน้ำ ดังนั้นแรงตึงผิวที่ลดลงส่งผลให้บับเบิลขนาดเล็กลง

2. ความหนาแน่นของของเหลวและก๊าซ (Buoyant Force)

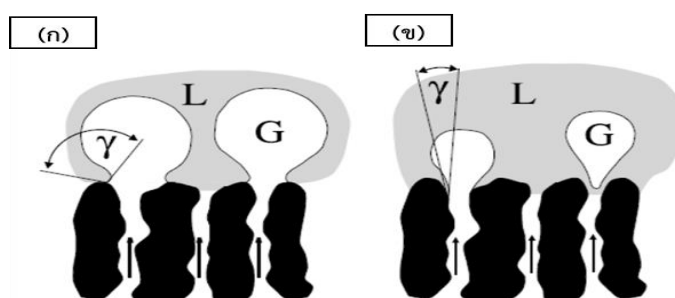
ของเหลวที่มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นจะทำให้ขนาดของฟองที่ได้เล็กลง และความหนาแน่นของก๊าซเพิ่มขึ้นจะทำให้ขนาดของฟองที่ได้เล็กลงเช่นเดียวกัน โดยความหนาแน่นของก๊าซที่สูงขึ้นอาจจะเป็นผลมาจากความดันหรือมวลโมเลกุลของก๊าซ [32-35] ตามรายงานของ Wiegand, G. and E.U. Franck. [36] สำหรับแรงตึงผิวของระบบน้ำกับก๊าซ 6 ชนิด คือฮีเลียม นีออน อาร์กอน ไนโตรเจน มีเทน และโพรเพน แรงตึงผิวมีค่าลดลงตามความดัน ยกเว้นน้ำกับก๊าซฮีเลียมเพียงอย่างเดียวที่แรงตึงผิวมีค่าเพิ่มขึ้นตามความดัน ส่วนระบบน้ำผสมสารละลายไม่มีขั้ว 3 ชนิด คือ เฮกเซน เต็คเคน และโทลูอีน แรงตึงผิวมีค่าเพิ่มขึ้นตามความดัน ซึ่งแรงตึงผิวที่แตกต่างกันจะส่งผลให้ได้ขนาดของฟองที่แตกต่างกัน

3. อัตราการไหลเข้าของแก๊ส (Gas flow rate)

อัตราการไหลของก๊าซเข้าสูงขึ้นส่งผลให้บับเบิลขนาดใหญ่ขึ้น นอกจากนี้อัตราการไหลที่สูงขึ้นจะเพิ่มความถี่ในการชนกันของบับเบิลที่นำไปสู่อัตราการรวมตัวที่สูงขึ้นและขนาดของบับเบิลที่ใหญ่ขึ้น [32]

4. ดิฟฟิวเซอร์ (Diffuser)

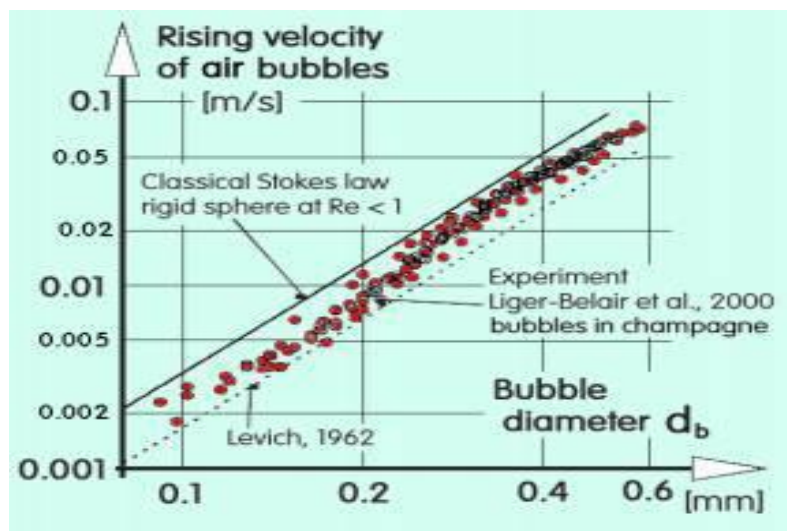
ดิฟฟิวเซอร์ คือ แผ่นพรุนหรือท่อพรุนที่ทำให้เกิดเป็นบับเบิล การใช้ขนาดของรูพรุนที่แตกต่างกันส่งผลต่อขนาดของบับเบิล ตามรายงานของ Ribeiro Jr, C. P. and P. L. C. Lage. [37] รูพรุนขนาดเล็กจะทำให้ได้บับเบิลขนาดเล็ก งานวิจัยของ Schafer, R., C. Merten. and G. Eigenberger [31] ชนิดวัสดุของแผ่นพรุนมีอิทธิพลต่อการเกิดฟองสำหรับวัสดุที่มีความสามารถในการเปียกได้ดี (เช่น มุมสัมผัสขนาดเล็ก) จะเกิดฟองที่เล็กกว่าเมื่อวัสดุที่มีมุมสัมผัสขนาดใหญ่ เนื่องจากบับเบิลหลุดออกจากดิฟฟิวเซอร์ได้ง่าย ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 อิทธิพลของมุมสัมผัสต่อขนาดของบับเบิล (ก) โพลีเอทิลีน (ข) โพลีเอทิลีนเคลือบทอง [32]

2.7.3 ความเร็วในการลอยตัวของบับเบิล (Bubble rise velocity) [38]

เป็นตัวแปรที่แสดงถึงความสามารถในการลอยตัวของบับเบิลขณะที่อยู่ในคอลัมน์ โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อการลอยตัวของบับเบิล เช่น ขนาดและรูปร่างของบับเบิล ซึ่งความเร็วในการลอยตัวของบับเบิลนั้นแปรผันตรงกับขนาดของบับเบิล ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ความเร็วในการลอยตัวของฟองก๊าซที่แสดงตามทฤษฎี (Levich) และจากการทดลอง [38]

2.7.4 บับเบิลคอลัมน์ (Bubble column) [33]

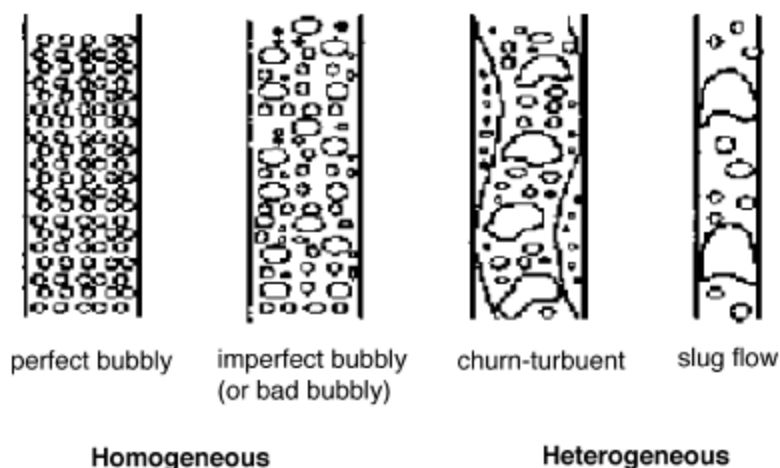
รูปแบบการไหลของบับเบิลคอลัมน์สามารถพบได้ทั่วไปมี 3 แบบ คือ homogeneous (Bubbly flow) regime, heterogeneous (Churn-turbulent) regime และ slug flow regime ดังแสดงในรูปที่ 2.10

การไหลแบบ homogeneous regime เป็นการไหลที่ลักษณะของฟองมีขนาดค่อนข้างเล็กและความเร็วในการลอยตัวสม่ำเสมอ การกระจายของฟองสม่ำเสมอซึ่งสามารถสังเกตได้จากพื้นที่หน้าตัดของบับเบิลคอลัมน์ ดังนั้นขนาดของฟองในการไหลแบบ homogeneous regime ค่อนข้างที่จะสมบูรณ์

การไหลแบบ churn-turbulent regime เรียกอีกอย่างว่า heterogeneous regime เป็นลักษณะรูปแบบ homogeneous gas-liquid system ที่ถูกรบกวนจากการปั่นป่วนที่เพิ่มขึ้น การเคลื่อนไหวของฟองก๊าซและของเหลวหมุนเวียน ผลที่ตามมาคือรูปแบบการไหลไม่คงที่และฟองอากาศขนาดใหญ่ การไหลแบบนี้บางครั้งเรียกว่า coalesced bubble flow จากขนาดที่แตกต่างกันของฟองอากาศ ซึ่งจะมีทั้งฟองอากาศขนาดใหญ่และฟองอากาศขนาดเล็ก

การไหล slug flow regime มีเฉพาะในการทดลองให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็กที่ high gas flow rates การไหลแบบนี้จะใช้ชื่อจากการก่อตัวของ bubble slugs เมื่อฟองอากาศขนาดใหญ่

เสถียรโดยผนังของบับเบิลคอลัมน์ สังเกตได้ว่าบับเบิลคอลัมน์จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางสูงถึง 15 เซนติเมตร



รูปที่ 2.10 การไหลของบับเบิลที่เป็นไปได้ในบับเบิลคอลัมน์ [33]

2.8 ไมโครบับเบิล

ไมโครบับเบิลมีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 1-999 ไมโครเมตร โดยประโยชน์ของไมโครบับเบิล คือ มีพื้นที่ผิวมากเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาตรก๊าซ จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของบับเบิลลดลงส่งผลให้การถ่ายเทมวลเพิ่มขึ้นและระยะเวลาที่นานขึ้นในการสัมผัสกันระหว่างของเหลวกับก๊าซ [39]

2.8.1 การประยุกต์ใช้งานของไมโครบับเบิล

จากงานวิจัยของ Li, P. [40] เนื่องจากลักษณะของไมโครบับเบิลมีขนาดเล็กจึงมีการนำไมโครบับเบิลไปใช้งานในหลากหลายสาขา เช่น การเพาะพันธุ์ปลาและหอย ยา และบำบัดน้ำเสีย เป็นต้น

1.การบำบัดน้ำเสีย การใช้งานหลักของไมโครบับเบิลในการบำบัดน้ำเสียสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ air flotation และ oxygen supplying

Air flotation เป็นกระบวนการแยกตะกอนออกจากน้ำเสีย โดยจะแยกตะกอนที่มีแนวโน้มจะลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ อย่างเช่น น้ำเสียประเภทที่มีน้ำมัน ไขมัน และสีต่าง ๆ ที่ยากต่อการตกตะกอน การลอยตัวโดยใช้บับเบิลเป็นตัวจับอนุภาคของแข็งที่ไม่ชอบน้ำให้ลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ เพื่อจะทำการแยกและกำจัดออก อย่างเช่น ใช้ในการแยกน้ำมันที่ปนอยู่ในน้ำเสียเพื่อให้ง่ายต่อการนำไปบำบัดต่อ

Oxygen supplying เป็นกระบวนการเติมออกซิเจนให้กับน้ำ สาเหตุ คือ เมื่อมีไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำปริมาณสูง จะทำให้การเจริญเติบโตของสาหร่ายและพืชน้ำจืดเนื่องจากสารอาหารที่มากเกินไป ทำให้ออกซิเจนในน้ำลดระดับลงได้ จึงนำไมโครบับเบิลมาใช้ในการเติมออกซิเจนให้กับน้ำและพบว่าความเข้มข้นของออกซิเจนเพิ่มขึ้นเมื่อมีขนาดของฟองลดลง

2.การเพาะเลี้ยงปลาและหอย จากการทดลองใช้ไมโครบับเบิลในการเพาะเลี้ยงหอยนางรม สามารถเพิ่มปริมาณและการเพิ่มคุณภาพของผลผลิต เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการเพิ่มค่าออกซิเจนในน้ำ ทำให้สัตว์น้ำมีสุขภาพแข็งแรงเติบโตไว กำจัดการสะสมของเสียในบ่อเลี้ยง เพิ่มความหนาแน่นของสัตว์เลี้ยงค่าออกซิเจนที่ระดับผิวน้ำกับก้นบ่อใกล้เคียงกัน เนื่องจากการเติมอากาศที่ระดับก้นบ่อ

บทที่ 3

สารเคมี อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

เนื้อหาในบทนี้จะประกอบด้วย สารเคมี อุปกรณ์ ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย และวิธีการทดสอบโพลิเมอร์ยางธรรมชาติ

3.1 สารเคมี

3.1.1 น้ำยางธรรมชาติเข้มข้นแอมโมเนียสูง (High ammonia concentrated natural rubber latex, HATZ type) มีปริมาณเนื้อยางแห้ง (Dry rubber content, DRC) 60 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total solids content, TSC) ในน้ำยาง 61.52 เปอร์เซ็นต์ เก็บรักษาด้วยแอมโมเนีย 0.70 เปอร์เซ็นต์ ผลิตโดยบริษัท ฉลอง น้ำยางชั้น จำกัด

3.1.2 โปแทสเซียมโอเลต (Potassium oleate) มีลักษณะเป็นของเหลวสีเหลืองอ่อน เตรียมอยู่ในรูปสารละลายเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ เตรียมสำเร็จจากบริษัท ลักกี้โพร จำกัด

3.1.3 กำมะถัน (S) มีลักษณะเป็นผงสีเหลืองขุ่น ใช้ในรูปของสารแขวนลอยที่มีความเข้มข้น 50 เปอร์เซ็นต์ ทำหน้าที่เป็นสารวัลคาไนซ์ เตรียมสำเร็จจากบริษัท ลักกี้โพร จำกัด

3.1.4 ซิงค์ไดเอทิลไดโธโอคาร์บาเมต (ZDEC) มีลักษณะเป็นผงสีขาวเทาขุ่น ใช้ในรูปของสารแขวนลอยที่มีความเข้มข้น 50 เปอร์เซ็นต์ ทำหน้าที่เป็นสารตัวเร่ง เตรียมสำเร็จจากบริษัท ลักกี้โพร จำกัด

3.1.5 ซิงค์เมอร์แคปโตเบนโซไทอาโซล (ZMBT) มีลักษณะเป็นผงสีเหลืองขุ่น ใช้ในรูปของสารแขวนลอยที่มีความเข้มข้น 50 เปอร์เซ็นต์ ทำหน้าที่เป็นสารตัวเร่ง เตรียมสำเร็จจากบริษัท ลักกี้โพร จำกัด

3.1.6 วิงสเตย์แอล (WINGSTAY L) มีลักษณะเป็นผงสีขาว ใช้ในรูปของสารแขวนลอยที่มีความเข้มข้น 50 เปอร์เซ็นต์ ทำหน้าที่เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพ เตรียมสำเร็จจากบริษัท ลักกี้โพร จำกัด

3.1.7 ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) มีลักษณะเป็นผงสีขาวครีมขุ่น ใช้ในรูปของสารแขวนลอยที่มีความเข้มข้น 50 เปอร์เซ็นต์ ทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ยาง เตรียมสำเร็จจากบริษัท ลักกี้โพร จำกัด

3.1.8 ไดฟีนิลกิติน (DPG) มีลักษณะเป็นผงสีขาวขุ่น ใช้ในรูปของสารแขวนลอยที่มีความเข้มข้น 33 เปอร์เซ็นต์ ทำหน้าที่เป็นสารก่อเจลเสริม เตรียมสำเร็จจากบริษัท ลักกี้โพร จำกัด

3.1.9 โซเดียมซิติโคพลูออไรด์ (SSF) มีลักษณะเป็นเม็ดสีขาวขุ่น ใช้ในรูปของสารแขวนลอยที่มีความเข้มข้น 12.5 เปอร์เซ็นต์ ทำหน้าที่เป็นสารก่อเจลหลัก เตรียมสำเร็จจากบริษัท ลักกี้โพร จำกัด

3.2 อุปกรณ์

3.2.1 ก๊าซไนโตรเจน ใช้สำหรับปล่อยให้ไหลผ่านแผ่นดิฟฟิวเซอร์ในบับเบิบล้อมนเพื่อให้น้ำยางเกิดฟอง จากบริษัท เซาร์ทเทอร์นลิตวิตอีอกซีเย่น จำกัด ความบริสุทธิ์ 99.5 เปอร์เซ็นต์ ควบคุมความดันให้คงที่ที่ 2 บาร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.1



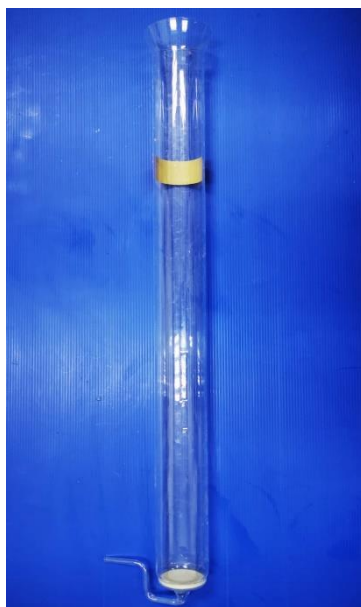
รูปที่ 3.1 ถังบรรจุก๊าซไนโตรเจนพร้อมตัวติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงดัน (Pressure gauge)

3.2.2 ดิฟฟิวเซอร์ เป็นแผ่นแก้วมีลักษณะเป็นแผ่นกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ประกอบด้วยรูพรุนขนาด 10-16 ไมครอน ทำให้เกิดเป็นฟองก๊าซเมื่อปล่อยก๊าซไหลผ่านแผ่นดิฟฟิวเซอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.2



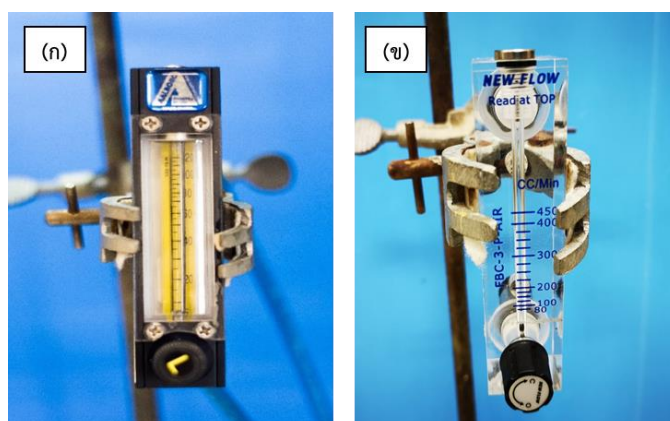
รูปที่ 3.2 แผ่นดิฟฟิวเซอร์

3.2.3 บับเบิลคอลัมน์ ใช้สำหรับบรรจุน้ำอย่างขึ้น มีลักษณะเป็นทรงกระบอกติดกับแผ่นดิฟฟิวเซอร์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ความสูง 80 เซนติเมตร ปริมาตรประมาณ 1,570 ลูกบาศก์เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 บับเบิลคอลัมน์พร้อมแผ่นดิฟฟิวเซอร์

3.2.4 เครื่องวัดอัตราการไหล (Flow meter) ทำหน้าที่วัดอัตราการไหลของก๊าซก่อนไหลผ่านแผ่นดิฟฟิวเซอร์เข้าสู่บับเบิลคอลัมน์ สำหรับงานวิจัยนี้เครื่องวัดอัตราการไหลมีอยู่ 2 ประเภท คือ เครื่องวัดอัตราการไหลที่ 0 - 120 มิลลิลิตรต่อนาที ยี่ห้อ AALBORG และเครื่องวัดอัตราการไหลที่ 80 - 450 มิลลิลิตรต่อนาที ยี่ห้อ NEW FLOW ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 เครื่องวัดอัตราการไหล (ก) เครื่องวัดอัตราการไหลที่ 0 - 120 มิลลิลิตรต่อนาที
(ข) เครื่องวัดอัตราการไหลที่ 80 - 450 มิลลิลิตรต่อนาที

3.2.5 เตาอบ (Oven) ทำหน้าที่ให้ความร้อนเพื่อให้ยางเกิดการวัลคาไนซ์ ยี่ห้อ Memmert
ดังแสดงรูปในที่ 3.5



รูปที่ 3.5 เตาอบ

3.2.6 เครื่องชั่งแบบทศนิยม 2 ตำแหน่ง สามารถชั่งได้สูงสุด 300 กรัม ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 เครื่องชั่งแบบทศนิยม 2 ตำแหน่ง

3.2.7 เบ้าพิมพ์ (Mold) ทำจากโลหะอลูมิเนียม มีลักษณะเป็นเบ้าพิมพ์แบบกลม มีขนาด
เส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร ความสูง 5 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.7



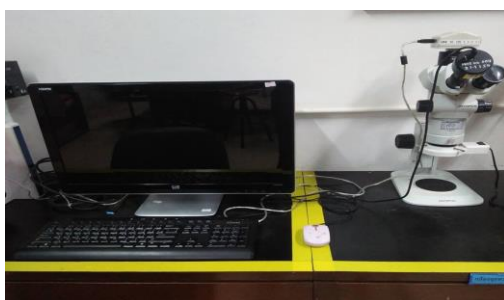
รูปที่ 3.7 เป้าพิมพ์

3.2.8 เครื่องกวนใช้สำหรับบ่มน้ำยางกับสารเคมี ความเร็วรอบ 50-200 รอบต่อนาที
ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 เครื่องกวน

3.2.9 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (OM) โดยการใช้กล้องจุลทรรศน์ OLYMPUS รุ่น SZX7
ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

3.2.10 เครื่องตีฟองเอนกประสงค์ Hobart mixer (HOM-150123, 300W) สามารถปรับระดับความเร็วได้ 5 ระดับ โดยเรียงลำดับความเร็วต่ำสุดไปยังความเร็วสูงสุดคือ ระดับ 1, 2, 3, 4 และ 5 ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 เครื่องตีฟองเอนกประสงค์

3.2.11 ปัมลม (Air pump) ใช้สำหรับปล่อยให้ไหลผ่านแผ่นดีฟิวเซอร์ในบับเบิ้ลคอลัมน์ เพื่อให้ น้ำยาเกิดฟอง ยี่ห้อพูม่า (PUMA) ตัวถังสามารถเก็บอากาศได้ 25 ลิตร โดยควบคุมความดันให้คงที่ที่ประมาณ 2 บาร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.11

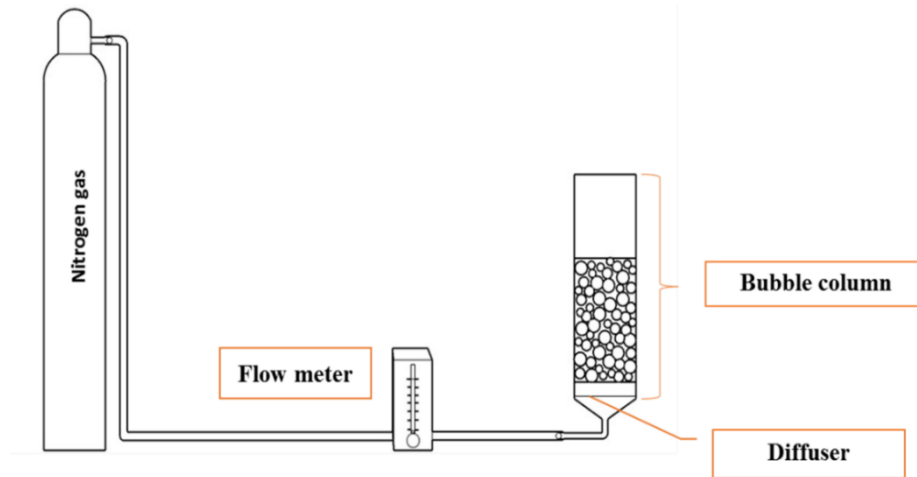


รูปที่ 3.11 ปัมลม

3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ในการดำเนินการวิจัยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วน คือ การเตรียมโพลีเมอร์ที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจน การเตรียมโพลีเมอร์ที่ผลิตจากฟองอากาศ และการเตรียมโพลีเมอร์ที่ผลิตจากกระบวนการดันลอปมีขั้นตอนในการเตรียมโพลีเมอร์ดังนี้

3.3.1 ออกแบบและติดตั้งชุดการทดลอง



รูปที่ 3.12 ออกแบบชุดการทดลองกระบวนการไมโครบับเบิลด้วยก๊าซไนโตรเจน

การติดตั้งอุปกรณ์ของกระบวนการไมโครบับเบิลด้วยก๊าซไนโตรเจน ประกอบด้วยถังบรรจุก๊าซไนโตรเจนเชื่อมต่อกับเครื่องวัดอัตราการไหล และเชื่อมต่อกับบับเบิลคอลัมน์ลักษณะทรงกระบอกที่ติดอยู่กับแผ่นดีฟิวเซอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 การติดตั้งอุปกรณ์ของกระบวนการไมโครบับเบิลด้วยก๊าซไนโตรเจน

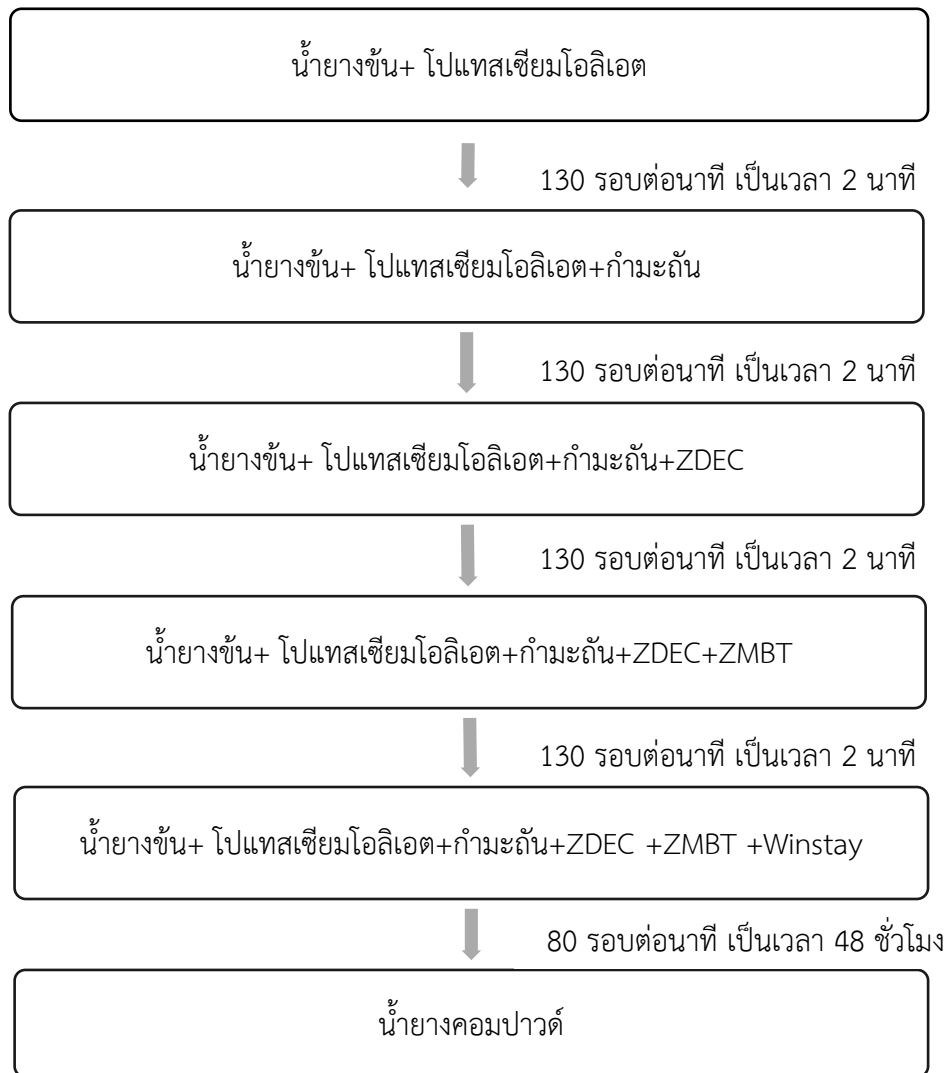
3.3.2 สูตรการผลิตโฟมยางธรรมชาติ

ตารางที่ 3.1 สูตรการผลิตโฟมยางธรรมชาติ

น้ำยางและสารเคมี	น้ำหนักแห้ง (phr)	น้ำหนักเปียก (g)
60% Latex	100	166.67
10% Potassium oleate	1.5	15
50% Sulfur	2	4
50% ZDEC	2	4
50%ZMBT	2	4
50% Wingstay L	2	4
50% ZnO	5	10
33% DPG	1.4	4.24
12.5% SSF	0.25	2

3.3.3 การเตรียมน้ำยางคอมปาวด์

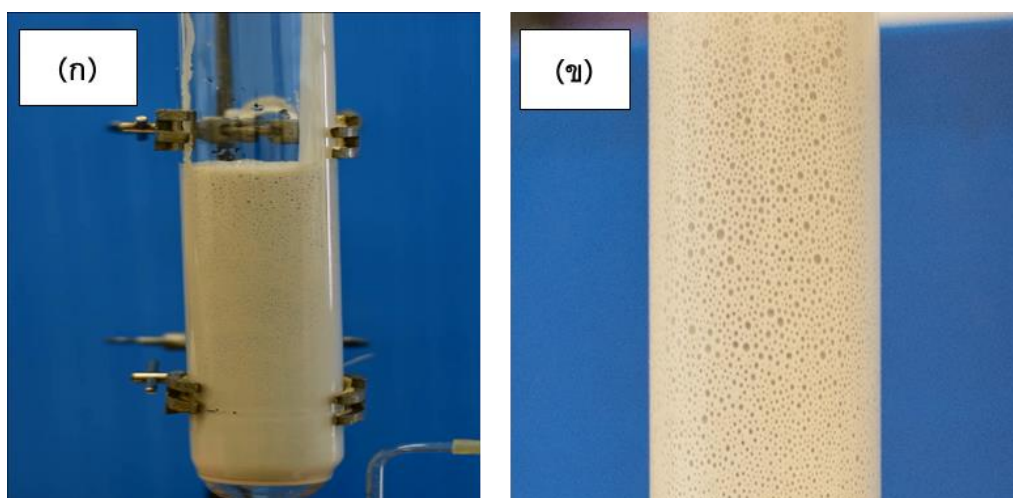
เตรียมน้ำยางคอมปาวด์ โดยการนำน้ำยางชั้นผสมกับสารเคมี คือ โปแทสเซียมโอเลต กำมะถัน ZDEC ZMBT และ Wingstay L ตามลำดับ เริ่มต้นขั้นตอนการเตรียมน้ำยางคอมปาวด์ ด้วยการเติมโปแทสเซียมโอเลตลงในน้ำยางชั้น ตามด้วยการกวนเป็นเวลา 2 นาที ด้วยความเร็ว 130 รอบต่อนาที ก่อนการเติมสารตัวถัดไป เพื่อให้สารกระจายตัวในน้ำยาง เมื่อทำการเติมสารครบทั้งหมดตามที่กล่าวมาข้างต้นแล้ว ปรับความเร็วลดลงเป็น 80 รอบต่อนาที แล้วทำการบ่มด้วยการกวนทิ้งไว้เป็นเวลา 48 ชั่วโมง แผนผังสรุปขั้นตอนการเตรียมน้ำยางคอมปาวด์ ดังแสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 แผนผังสรุปขั้นตอนการเตรียมน้ำยางคอมปาวด์

3.3.4 การเตรียมโฟมยางที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนด้วยกระบวนการไมโครบับเบิล

1. เริ่มต้นทำการติดตั้งอุปกรณ์ของชุดการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.13 เมื่อทำการติดตั้งชุดการทดลองเรียบร้อยแล้ว ทำการเปิดก๊าซไนโตรเจนเพื่อปล่อยให้ก๊าซไนโตรเจนไหลเข้าสู่เครื่องวัดอัตราการไหลและทำการปรับอัตราการไหลตามที่ต้องการก่อนที่จะไหลเข้าสู่บับเบิลคอลัมน์ โดยในงานวิจัยนี้จะใช้อัตราการไหลเข้าของก๊าซไนโตรเจนที่ 30, 50, 80 และ 150 มิลลิลิตรต่อนาที
2. หลังจากนั้นทำการนำน้ำยางคอมปาวด์ที่ป่มแล้วมาซึ่งให้ได้ปริมาณ 198 กรัม แล้วทำการเทน้ำยางลงสู่บับเบิลคอลัมน์ดังแสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 การเกิดฟองก๊าซไนโตรเจนด้วยกระบวนการไมโครบับเบิล (ก) การเกิดฟองก๊าซไนโตรเจนในน้ำยางคอมปาวด์ที่บรรจุอยู่ในบับเบิลคอลัมน์ (ข) ภาพขยายของฟองก๊าซไนโตรเจนที่บรรจุอยู่ในบับเบิลคอลัมน์

3. ทำการปล่อยก๊าซไนโตรเจนให้ไหลผ่านน้ำยางคอมปาวด์ จนกระทั่งน้ำยางคอมปาวด์ขยายตัวจนได้ปริมาณตามที่ต้องการ หลังจากนั้นทำการเทฟองยางลงสู่หม้อกวนแล้วเติม ZnO และ DPG กวนด้วยความเร็วรอบต่ำเป็นเวลา 1 นาที ตามด้วยการเติม SSF เป็นลำดับสุดท้ายและกวนด้วยความเร็วรอบต่ำ เป็นเวลา 30 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 การกวนฟองยางหลังจากการเติมสารก่อเจล

4. หลังจากนั้นทำการเทฟองยางลงสู่แม่พิมพ์ และตั้งไว้เพื่อให้ฟองยางเกิดการเจล ดังแสดงในรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 การเทฟองยางลงสู่แม่พิมพ์

5. เมื่อฟองยางเกิดการเจลอย่างสมบูรณ์แล้วก็ทำการนำแม่พิมพ์เข้าสู่เตาเพื่อทำการวัลคาไนซ์ฟองยางที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที ดังแสดงในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 การวัลคาไนซ์ฟองยาง

6. เมื่อครบเวลาตามที่กำหนดนำแม่พิมพ์ออกจากเตาอบ แล้วทำการแกะโฟมยางออกจากแม่พิมพ์แล้วนำไปล้างด้วยน้ำเปล่าเพื่อกำจัดน้ำสบู่ออก ดังแสดงในรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 การล้างโฟมยางเพื่อกำจัดน้ำสบู่

7. นำโคมยางเข้าเตาอบอีกครั้งเพื่อทำการอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 3.20



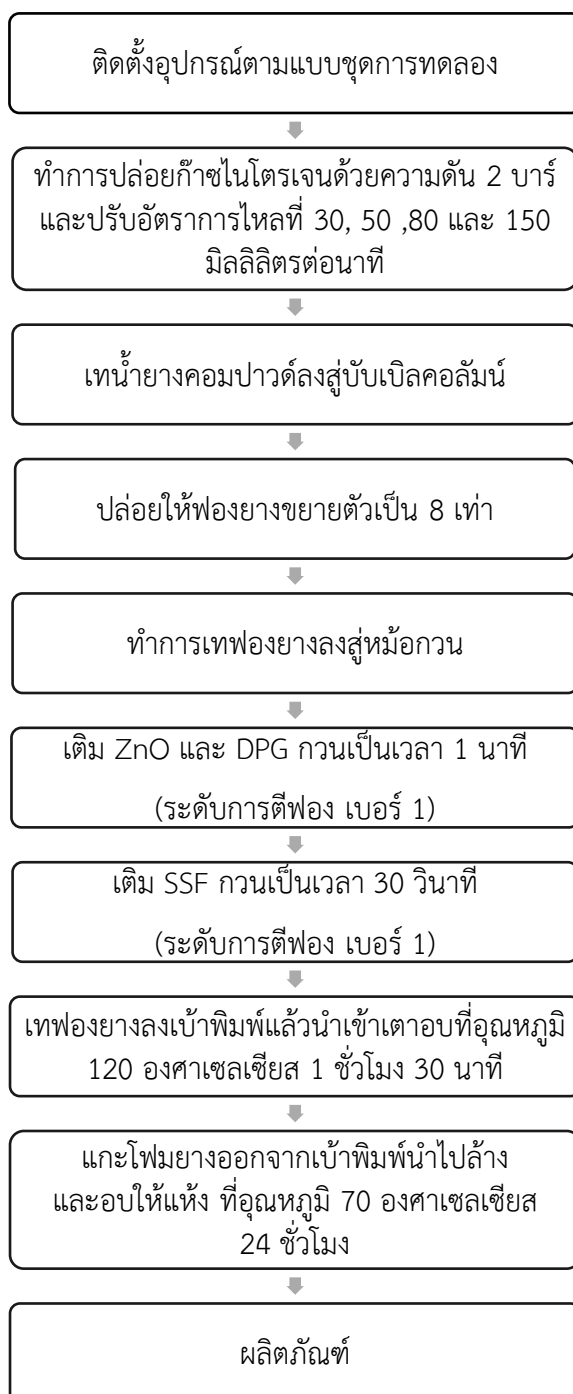
รูปที่ 3.20 การอบไล่ความชื้น

8. โคมยางที่ได้จากการขึ้นรูปจากฟองก๊าซไนโตรเจนด้วยกระบวนการไมโครบับเบิล ดังแสดงในรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 โคมยางที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนด้วยกระบวนการไมโครบับเบิล

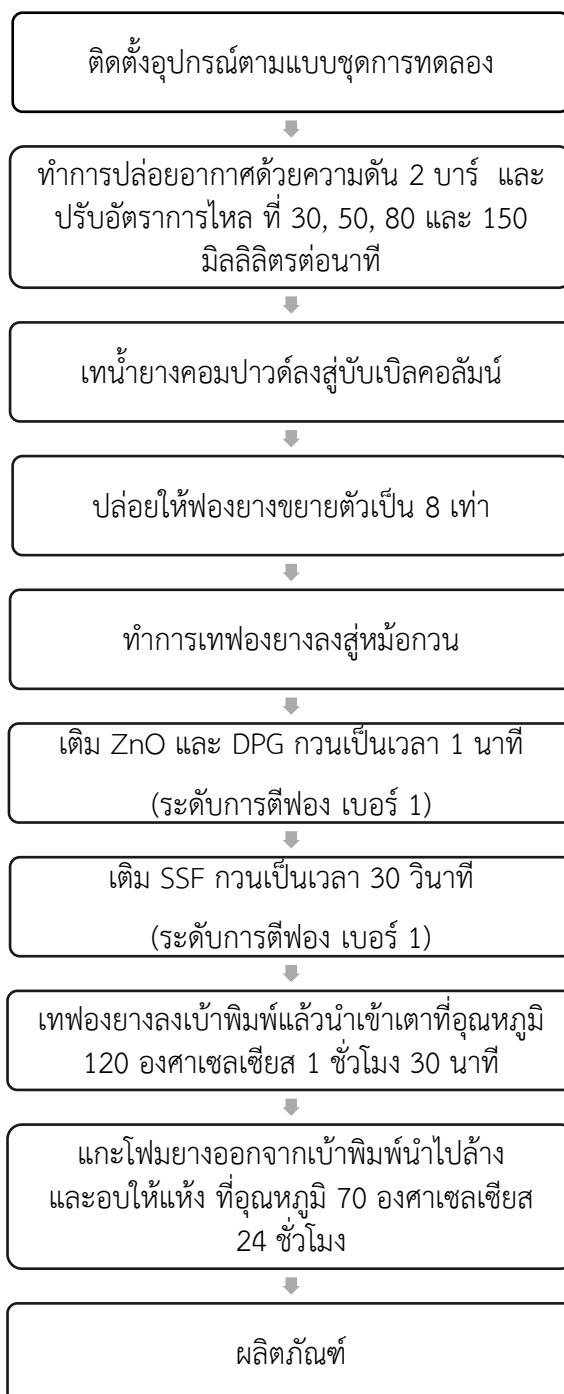
แผนผังสรุปขั้นตอนการเตรียมโคมยางที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจน ดังแสดงในรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 แผนผังสรุปขั้นตอนการเตรียมโฟมยางจากฟองก๊าซไนโตรเจน

3.3.5 การเตรียมโพลีเมอร์ที่ผลิตจากฟองอากาศด้วยกระบวนการไมโครบับเบิล

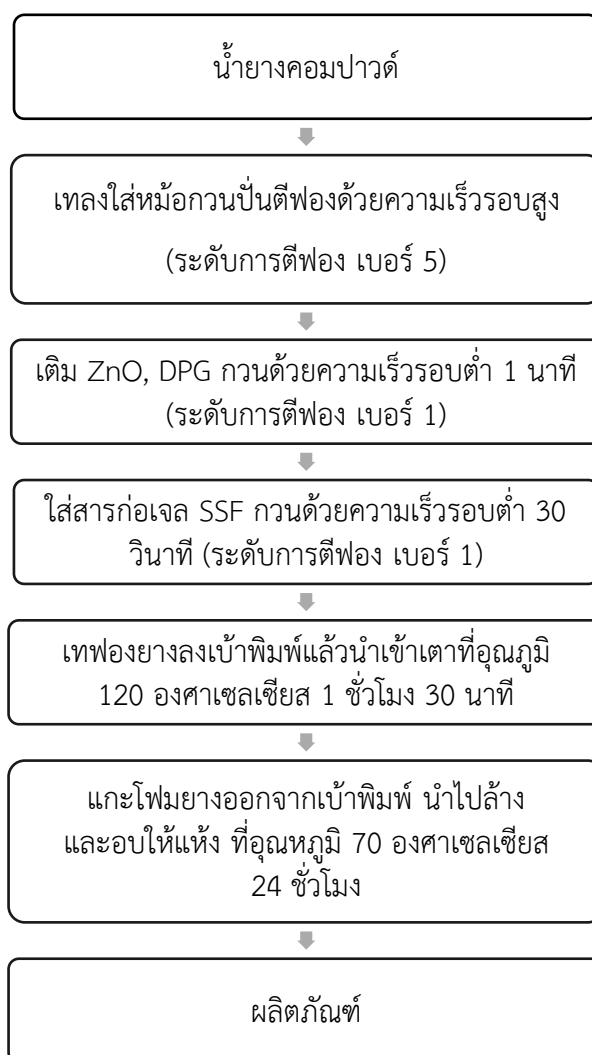
โพลีเมอร์ที่ผลิตจากฟองอากาศมีขั้นตอนการเตรียมโพลีเมอร์เช่นเดียวกับการเตรียมโพลีเมอร์ที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจน โดยจะใช้ปั๊มลมในการปล่อยอากาศให้เข้าสู่ดีฟิวเซอร์แล้วไหลผ่านน้ำยางคอมพาวด์จนเกิดเป็นบับเบิล แผนผังสรุปขั้นตอนการเตรียมโพลีเมอร์ที่ผลิตจากฟองอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 แผนผังสรุปขั้นตอนการเตรียมโพลีเมอร์จากฟองอากาศ

3.3.6 การเตรียมโพลียเอทิลีนที่ผลิตจากกระบวนการดัดแปลง

โพลียเอทิลีนที่ผลิตจากกระบวนการดัดแปลงสามารถเตรียมได้โดยการนำน้ำยางคอมพาวด์มาปั่นตีฟอง โดยใช้ความเร็วรอบสูงจนได้ปริมาณฟองยางตามที่ต้องการแล้วลดความเร็วในการตีฟองให้ต่ำลง เพื่อย่อยฟองให้ละเอียด หลังจากนั้นเติม ZnO, DPG และ SSF (สารก่อเจล) กวนด้วยความเร็วรอบต่ำ จนครบระยะเวลาในการปั่นตีฟอง และทำการเทฟองยางลงเบ้าพิมพ์ นำเข้าเตาอบเพื่อวัลคาไนซ์ ฟองยาง จากนั้นทำการแกะโพลียเอทิลีนออกจากเบ้าพิมพ์ ล้าง และอบให้แห้ง แผลนผึ่งสุรूपขั้นตอน การเตรียมโพลียเอทิลีนจากกระบวนการดัดแปลง ดังแสดงในรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 แผนผังสรุปขั้นตอนการเตรียมโพลียเอทิลีนจากกระบวนการดัดแปลง

3.3.7 วิธีดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาผลของอัตราการไหลของต่อสมบัติทางกายภาพของโพลีเมอร์ที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจน วัตถุประสงค์ในการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบสมบัติของโพลีเมอร์ที่มีโครงสร้างที่แตกต่างกันโดยใช้อัตราการไหลที่แตกต่างกันจากกระบวนการไมโครบับเบิล ในส่วนของการศึกษาจะทำการเตรียมโพลีเมอร์โดยใช้อัตราการไหลที่แตกต่างกัน 3 อัตราการไหล คือ 30, 50 และ 80 มิลลิลิตรต่อนาที

2. เปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของโพลีเมอร์ที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนกับโพลีเมอร์ที่ผลิตจากฟองอากาศ วัตถุประสงค์ในการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบสมบัติของโพลีเมอร์ที่มีโครงสร้างที่แตกต่างกัน โดยการใช้ก๊าซที่แตกต่างกันจากกระบวนการไมโครบับเบิล ในส่วนของการศึกษาทำการเตรียมโพลีเมอร์ที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนกับโพลีเมอร์ที่ผลิตจากฟองอากาศที่อัตราการไหลเท่ากัน คือ 50 มิลลิลิตรต่อนาที

3. เปรียบเทียบสมบัติความต้านทานต่อการตีไฟของโพลีเมอร์ที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจน โพลีเมอร์ที่ผลิตจากฟองอากาศ และโพลีเมอร์ที่ผลิตจากกระบวนการดันลอป วัตถุประสงค์ในการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบสมบัติความต้านทานต่อการตีไฟของโพลีเมอร์ โดยการใช้ก๊าซที่แตกต่างกันจากกระบวนการไมโครบับเบิลกับกระบวนการดันลอป ในส่วนของการศึกษาทำการเตรียมโพลีเมอร์ที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนกับโพลีเมอร์ที่ผลิตจากฟองอากาศที่อัตราการไหล 30, 80 และ 150 มิลลิลิตรต่อนาที และโพลีเมอร์ที่ผลิตจากกระบวนการดันลอป

3.4 วิธีการทดสอบ

3.4.1 ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานวิทยา

การดูลักษณะโครงสร้างของโพลีเมอร์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์ OLYMPUS รุ่น SZX7 และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด JEOL รุ่น JSM-5800LV ดังแสดงในรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงและกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด

3.4.2 จำนวนเซลล์ต่อหน่วยปริมาตร

การหาจำนวนเซลล์ต่อหน่วยปริมาตรมีสูตรคำนวณ ดังแสดงในสมการที่ 3.1

$$N = \frac{6}{\pi d^3} \left(\frac{\rho_{\text{rubber}}}{\rho_{\text{foam}}} - 1 \right) \quad (3.1)$$

N = จำนวนเซลล์ต่อหน่วยปริมาตร (เซลล์ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

d = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเซลล์เฉลี่ยของโฟมยาง (เซนติเมตร)

ρ_{rubber} = ความหนาแน่นของยางที่เป็นของแข็ง (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

ρ_{foam} = ความหนาแน่นของโฟมยาง (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

3.4.3 ความหนาแน่น (Density)

การทดสอบความหนาแน่นตามมาตรฐาน ASTM D 3574-95 โดยการตัดชิ้นโฟมยางให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมขนาด $2.0 \times 2.0 \times 2.0$ เซนติเมตร และนำไปชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งละเอียด 2 ตำแหน่ง และมีสูตรคำนวณ ดังแสดงในสมการที่ 3.2

$$D = \frac{M}{V} \text{ g/cm}^3 \quad (3.2)$$

D = ความหนาแน่นของชิ้นงาน (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

M = น้ำหนักของชิ้นงานทดสอบ (กรัม)

V = ปริมาตรของชิ้นทดสอบ (หน่วยเป็นลูกบาศก์เซนติเมตร)

3.4.4 การทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงกด (Compression set)

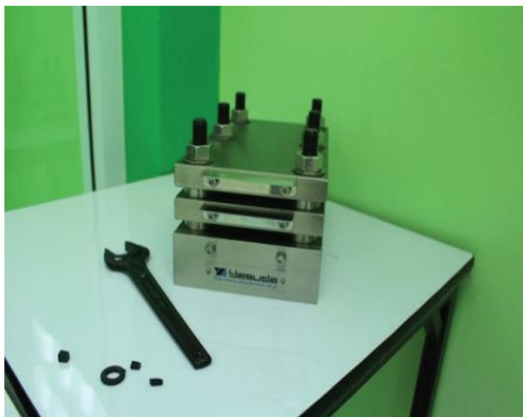
ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ISO 1856 Method B โดยการตัดชิ้นงานเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 50 ± 1 มิลลิเมตร หนา 25 ± 1 มิลลิเมตร วัดความหนาของชิ้นทดสอบในแนวตั้งฉากกับระนาบทั้งสองของชิ้นทดสอบ 3 ตำแหน่ง โดยไม่มีแรงกด แล้วหาค่าเฉลี่ยความหนาของชิ้นทดสอบ (d_0) เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงกด ดังแสดงในรูปที่ 3.26 วางชิ้นทดสอบบริเวณกึ่งกลางระหว่างแผ่นระนาบของเครื่องกด เลื่อนแผ่นระนาบทั้งสองเข้าหากัน จนชิ้นทดสอบมีความหนาลดลงร้อยละ 50 ± 4 ของความหนาเดิม อุณหภูมิ 27 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง นำชิ้นทดสอบออกจากเครื่องกด ปล่อยให้ชิ้นทดสอบคืนตัวที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที วัดความหนาของชิ้นทดสอบ (d_r) มีสูตรคำนวณ ดังแสดงในสมการที่ 3.3

$$C.S. = \frac{d_0 - d_r}{d_0} \times 100 \quad (3.3)$$

$C.S.$ = การยุบตัวเนื่องจากแรงกด (ร้อยละ)

d_0 = ความหนาเริ่มต้นของชิ้นทดสอบ (มิลลิเมตร)

d_r = ความหนาสุดท้ายของชิ้นทดสอบ (มิลลิเมตร)



รูปที่ 3.26 เครื่องทดสอบแรงกดที่ใช้ในการหาการยุบตัวเนื่องจากแรงกด

3.4.5 การทดสอบดัชนีความแข็งเชิงกด (Indentation Hardness Index)

ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ISO 2439 Method A โดยการตัดชิ้นงานทดสอบเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 380 ± 20 มิลลิเมตร หนา 50 ± 20 มิลลิเมตร ระบายด้านบนและล่างขนานกัน แต่เนื่องจากชิ้นงานทดสอบที่ได้จากการทำงานวิจัยไม่สามารถตัดให้มีขนาดตามมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบได้ อันเนื่องมาจากข้อจำกัดของตัวอย่างที่เตรียมได้ ดังนั้นจึงได้ใช้ชิ้นงานในการทดสอบที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร และความหนา 50 มิลลิเมตร ทำการทดสอบโดยวางชิ้นทดสอบบนแผ่นรองรับชิ้นทดสอบ เลื่อนแป้นกดลงบนชิ้นทดสอบ โดยมีน้ำหนักกด 5 นิวตัน แล้ววัดความหนา บันทึกค่าความหนาเริ่มต้น เพิ่มแรงกดให้ความหนาของชิ้นทดสอบลดลงร้อยละ 70 ± 2.5 ของความหนาเริ่มต้นแล้วคลายแรงกดด้วยอัตราเดิม ทำซ้ำ 2 ครั้ง หลังจากนั้นเพิ่มแรงกดให้ความหนาของชิ้นทดสอบลดลงร้อยละ 40 ± 1 ของความหนาเริ่มต้น ปล่อยทิ้งไว้ 30 ± 1 วินาที แล้วบันทึกค่าดัชนีความแข็งเชิงกดจากน้ำหนักที่อ่านได้เป็นนิวตัน เครื่องมือที่ใช้ทดสอบดัชนีความแข็งเชิงกดดังแสดงในรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.27 เครื่องทดสอบแรงอัดที่ใช้ในการทดสอบดัชนีความแข็งเชิงกด

3.4.6 การทดสอบการเร่งการเสื่อมอายุ (Aging)

ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ISO 2440 ชิ้นงานทดสอบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร และความหนา 50 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องทดสอบการบ่มเร่ง Yasuda รุ่น 102-SHF-S ดังแสดงในรูปที่ 3.28

1. นำชิ้นงานทดสอบไปหาดัชนีความแข็งเชิงกดที่ความหนาของชิ้นทดสอบลดลงร้อยละ 40 ± 1 ของความหนาเริ่มต้น ปล่อยให้ทิ้งไว้ 30 ± 1 วินาที แล้วบันทึกค่าดัชนีความแข็งเชิงกดจากน้ำหนักที่อ่านได้เป็นนิวตัน (X_a)

2. นำชิ้นงานทดสอบอบที่อุณหภูมิ 70 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง

3. หลังจากนั้นนำชิ้นทดสอบไปหาดัชนีความแข็งเชิงกดที่ความหนาลดลงร้อยละ 40 ± 1 ของความหนาเริ่มต้น ปล่อยให้ทิ้งไว้ 30 ± 1 วินาที แล้วบันทึกค่าดัชนีความแข็งเชิงกดจากน้ำหนักที่อ่านได้เป็นนิวตัน (X_0) สูตรคำนวณหาค่าดัชนีความแข็งเชิงกดที่เปลี่ยนไป ดังแสดงในสมการที่ 3.4

$$X = \frac{X_a - X_0}{X_a} \times 100 \quad (3.4)$$

X = ดัชนีความแข็งเชิงกดที่เปลี่ยนแปลงไป (ร้อยละ)

X_a = ดัชนีความแข็งเชิงกดก่อนบ่มเร่ง (นิวตัน)

X_0 = ดัชนีความแข็งเชิงกดหลังบ่มเร่ง (นิวตัน)



รูปที่ 3.28 เครื่องทดสอบการบ่มเร่ง

3.4.7 การทดสอบดัชนีออกซิเจนจำกัด (Limiting Oxygen Index)

ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 2863 โดยการตัดชิ้นงานทดสอบให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมขนาด $100 \times 15.0 \times 15.0$ มิลลิเมตร มายึดให้อยู่ในรูปแนวตั้งภายในกระบอกลอยเปิด แล้วทำการจุดติดไฟขึ้นตัวอย่างให้เกิดการเผาไหม้ที่มีลักษณะคล้ายเปลวเทียน ในบรรยากาศที่มีการผสมกันของก๊าซไนโตรเจนและออกซิเจน หลังจากนั้นจึงปรับความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนให้พอเหมาะแก่

การที่ชิ้นตัวอย่างจะติดไฟอยู่ได้ตามมาตรฐาน ASTM D 2863 ด้วยเครื่องทดสอบดัชนีออกซิเจน Yasuda รุ่น 214 ดังแสดงในรูปที่ 3.29



รูปที่ 3.29 เครื่องทดสอบดัชนีออกซิเจนจำกัด

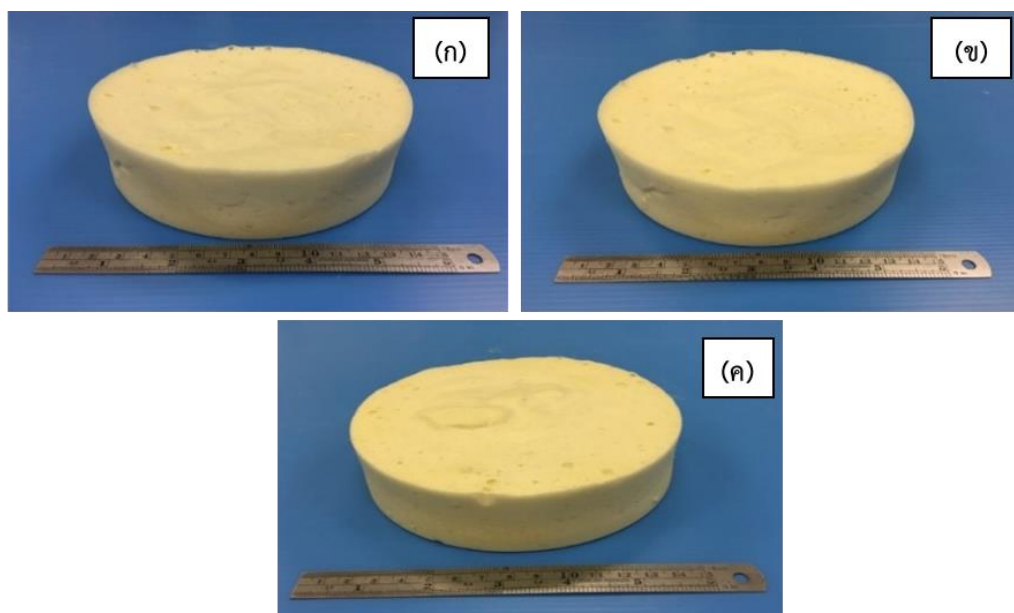
บทที่ 4

ผลการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงผลการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลองจากการศึกษางานวิจัยแบ่งออกเป็น 3 วัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้ (1) ศึกษาผลของอัตราการไหลต่อสมบัติทางกายภาพของโพลียัมที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจน (2) เปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของโพลียัมที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนกับโพลียัมที่ผลิตจากฟองอากาศ (3) เปรียบเทียบสมบัติความต้านทานต่อการตีไฟของโพลียัมที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจน โพลียัมที่ผลิตจากฟองอากาศ และโพลียัมที่ผลิตจากกระบวนการดันลอป

4.1 ศึกษาผลของอัตราการไหลต่อสมบัติทางกายภาพของโพลียัมที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจน

การศึกษาอัตราการไหลต่อสมบัติทางกายภาพของโพลียัม โดยใช้อัตราการไหลที่ต่างกัน 3 อัตราการไหล คือ 30, 50 และ 80 มิลลิลิตรต่อนาที เพื่อดูโครงสร้างสัณฐานวิทยาและสมบัติทางกายภาพของโพลียัม โพลียัมที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนด้วยกระบวนการไมโครบับเบิลโดยใช้อัตราการไหลที่ต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.1



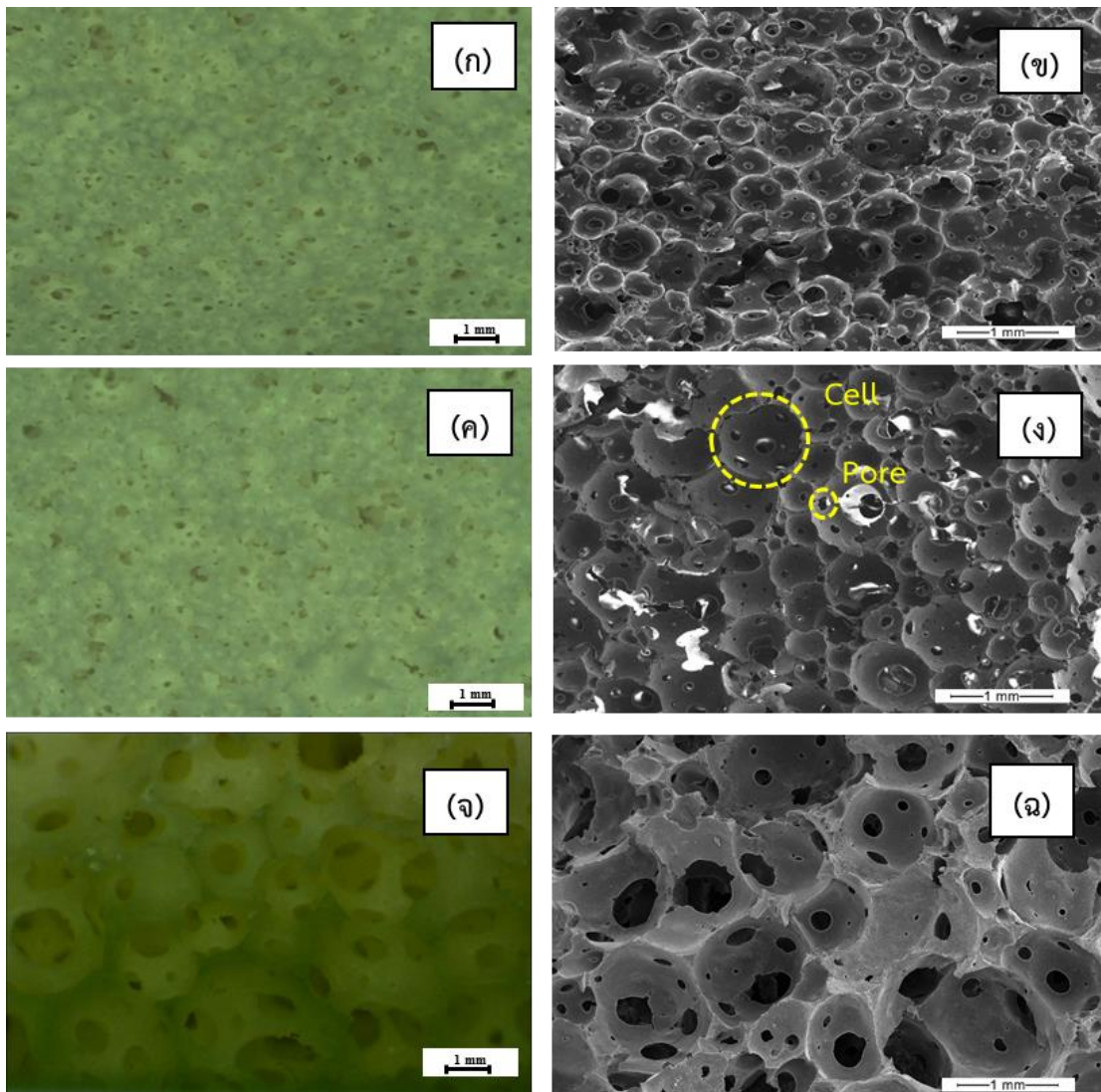
รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายโพลียัมที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนโดยใช้อัตราการไหลที่ต่างกัน (ก) 30 (ข) 50 และ (ค) 80 มิลลิลิตรต่อนาที

4.1.1 โครงสร้างสัณฐานวิทยาของโพลีเมอร์ที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจน

การผลิตเซลล์ในลักษณะต่าง ๆ จะมีผลต่อโครงสร้างของโพลีเมอร์ ซึ่งลักษณะสมบัติที่ได้จะแตกต่างกัน เนื่องมาจากลักษณะโครงสร้าง รูปร่าง และขนาดเซลล์ของโพลีเมอร์จะมีอิทธิพลต่อสมบัติของโพลีเมอร์ทั้งด้านความแข็งแรง การนำไฟฟ้า และความร้อน เป็นต้น [3, 20] ซึ่งโครงสร้างสัณฐานวิทยาของโพลีเมอร์ที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนโดยใช้อัตราการไหลที่แตกต่างกัน ได้ถูกศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงและกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด

1. ลักษณะโครงสร้างเซลล์ของโพลีเมอร์ที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจน

ลักษณะโครงสร้างเซลล์ของโพลีเมอร์ที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนโดยใช้อัตราการไหลที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.2 พบว่าลักษณะเซลล์มีรูปร่างกลม กระจายตัวสม่ำเสมอและเซลล์เชื่อมต่อกันทั่วทั้งชิ้นงาน ซึ่งลักษณะโครงสร้างของเซลล์ที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนแต่ละอัตราการไหลมีโครงสร้างของเซลล์ลักษณะเดียวกัน แต่มีขนาดของเซลล์แตกต่างกัน เนื่องมาจากการเกิดฟองของกระบวนการไมโครบับเบิลอัตราการไหลของก๊าซเข้ามีผลต่อขนาดของฟองก๊าซ ทำให้ส่งผลต่อขนาดของเซลล์โพลีเมอร์ที่ได้แตกต่างกัน [32, 33] นอกจากนี้ลักษณะเซลล์ของโพลีเมอร์ที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนมีลักษณะคล้ายกันกับโพลีเมอร์ที่ผลิตจากกระบวนการทาลาเลย์ โดยโพลีเมอร์ที่ผลิตจากกระบวนการทาลาเลย์มีสมบัติการรับแรง กระจายแรงได้ดี มีความคงทน มีความสามารถในการระบายความชื้น และการผ่านของอากาศได้ดี เมื่อเทียบกับโพลีเมอร์จากกระบวนการดันลอป เนื่องจากมีลักษณะเซลล์ที่กลมกว่า และการกระจายของเซลล์สม่ำเสมอกว่าแบบดันลอป ทำให้ลักษณะเซลล์ที่มีรูปร่างกลม และกระจายตัวสม่ำเสมอ ดังรูปที่แสดงจะส่งผลให้โพลีเมอร์มีสมบัติทางกายภาพที่ดี [3, 24, 41]



รูปที่ 4.2 โครงสร้างพื้นฐานวิทยาของโฟมยางที่ผลิตจากฟองก้ำซไนโตรเจนโดยใช้อัตราการใช้ที่แตกต่างกัน (ก) OM และ (ข) SEM ที่อัตราการใช้ 30 มิลลิลิตรต่อนาที
 (ค) OM และ (ง) SEM ที่อัตราการใช้ 50 มิลลิลิตรต่อนาที
 (จ) OM และ (ฉ) SEM ที่อัตราการใช้ 80 มิลลิลิตรต่อนาที

2. ขนาดเซลล์ และการกระจายขนาดของเซลล์ของโฝมยางที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจน

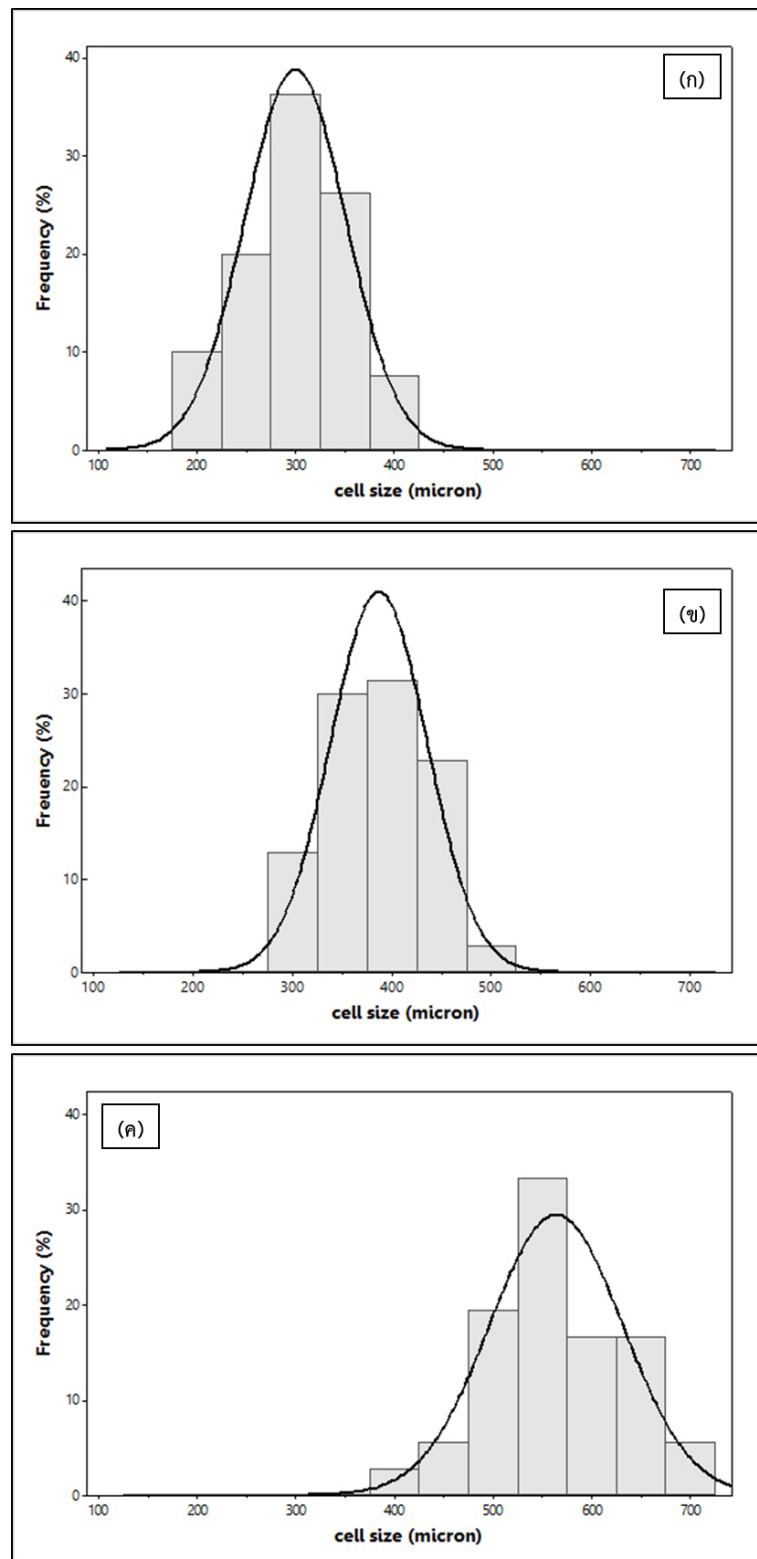
ขนาดเซลล์ และจำนวนเซลล์ต่อหน่วยปริมาตรของโฝมยางที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนโดยใช้อัตราการไหลที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าขนาดเซลล์เฉลี่ยเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น โดยที่อัตราการไหล 30, 50 และ 80 มิลลิลิตรต่อนาทีที่มีขนาดเซลล์เฉลี่ยเท่ากับ 301, 387 และ 564 ไมครอน ตามลำดับ ซึ่งขนาดเซลล์เฉลี่ยของโฝมยางที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนเป็นไปตามทฤษฎีการเกิดฟองของกระบวนการไมโครบับเบิล คือขนาดฟองก๊าซใหญ่ขึ้นตามอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้นทำให้โฝมยางที่อัตราการไหลสูงขนาดเซลล์ของโฝมใหญ่กว่าที่อัตราการไหลต่ำ [32, 33] จากความแตกต่างของขนาดเซลล์เป็นค่าที่นำไปสู่ความแตกต่างของจำนวนเซลล์ต่อหน่วยปริมาตร เมื่อทำการคำนวณค่าจำนวนเซลล์ต่อหน่วยปริมาตรพบว่าที่อัตราการไหล 30, 50 และ 80 มิลลิลิตรต่อนาที มีค่าจำนวนเซลล์ต่อหน่วยปริมาตรเท่ากับ 3.54×10^5 , 2.43×10^5 และ 0.95×10^5 เซลล์ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ จากการวิเคราะห์ทำให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเซลล์เฉลี่ยกับจำนวนเซลล์ต่อหน่วยปริมาตร เมื่อขนาดเซลล์เฉลี่ยเล็กลงส่งผลให้จำนวนเซลล์ต่อหน่วยปริมาตรเพิ่มขึ้น ดังนั้นจำนวนเซลล์ต่อหน่วยปริมาตรจึงลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ขนาดเซลล์ที่ได้จะมีผลต่อผนังเซลล์ด้วย เนื่องจากขนาดเซลล์ใหญ่จะทำให้ได้ผนังเซลล์ที่บางกว่าเซลล์ขนาดเล็ก [26] เพราะนอกจากขนาดเซลล์แล้วความหนาของผนังเซลล์มีผลต่อความหนาแน่น และสมบัติทางกายภาพอื่น ๆ ของโฝมยางด้วย [25]

ตารางที่ 4.1 ขนาดเซลล์ของโฝมยาง

การทดสอบ	N30*	N50**	N80***
ขนาดเฉลี่ยของเซลล์ (micron)	301	387	564
จำนวนเซลล์ต่อหน่วยปริมาตร (cm^{-3})	3.54×10^5	2.43×10^5	0.95×10^5

หมายเหตุ *, **, *** คือ ซึ้นงานโฝมยางที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนที่อัตราการไหล 30, 50 และ 80 มิลลิลิตรต่อนาที ตามลำดับ

การกระจายขนาดของเซลล์ของโฝมยางที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนโดยใช้อัตราการไหลที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.3 เนื่องจากผลของอัตราการไหลตามที่กล่าวไว้ข้างต้น ทำให้เส้นโค้งการกระจายขนาดของเซลล์เลื่อนไปทางค่าที่มีขนาดเซลล์ที่ใหญ่ขึ้นเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามอัตราการไหลที่ต่ำทำให้ได้เซลล์ขนาดเล็กลง ละเอียด และกระจายตัวสม่ำเสมอ ส่งผลให้การกระจายขนาดของเซลล์ของโฝมยางที่อัตราการไหล 30 และ 50 มิลลิลิตรต่อนาที มีลักษณะการกระจายของเซลล์ที่แคบกว่าโฝมยางที่อัตราการไหล 80 มิลลิลิตรต่อนาที เนื่องจากอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้นทำให้ควบคุมขนาดของฟองได้ยาก เพราะอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้นเร่งให้เกิดการเชื่อมติดกันของฟองก๊าซ นอกจากนี้ความถี่ของการรวมตัวกันของฟองจะเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้นอีกด้วย [35, 42]



รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบการกระจายขนาดของเซลล์ของโพรทอซัวที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนโดยใช้ อัตราการไหลที่แตกต่างกัน คือ (ก) 30 (ข) 50 และ (ค) 80 มิลลิลิตรต่อนาที

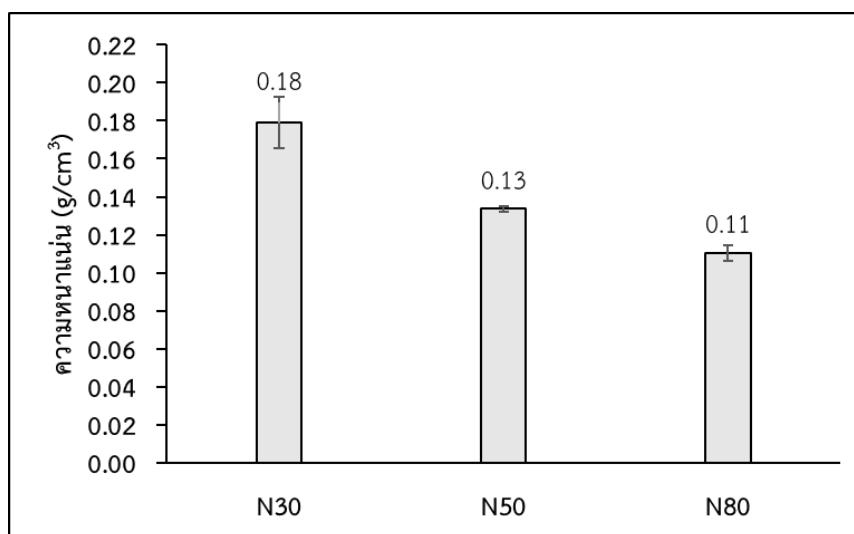
4.1.2 สมบัติทางกายภาพของโพลีเมอร์ที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจน

ในการศึกษาสมบัติทางกายภาพของโพลีเมอร์ที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนด้วยกระบวนการไมโครบับเบิลซึ่งสมบัติที่ทดสอบ ได้แก่ การทดสอบความหนาแน่น การทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงกด การทดสอบดัชนีความแข็งเชิงกด และการทดสอบการบ่มเร่ง โดยมาตรฐานการทดสอบสมบัติทางกายภาพของโพลีเมอร์ ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 มาตรฐานสมบัติทางกายภาพของโพลีเมอร์ [43]

การทดสอบ	ข้อกำหนด
การยุบตัวเนื่องจากแรงกด (เปอร์เซ็นต์)	ไม่เกิน 6
ดัชนีความแข็งเชิงกด (นิวตัน)	นิ่ม (น้อยกว่า 100)
	ปานกลาง (101-170)
	แข็ง (มากกว่า 170)
การบ่มเร่ง (เปอร์เซ็นต์)	ไม่เกิน 20

ความหนาแน่นเป็นสมบัติที่แสดงถึงลักษณะส่วนประกอบของโพลีเมอร์ที่เป็นของแข็งกับส่วนที่เป็นอากาศ ความหนาแน่นของโพลีเมอร์ที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนโดยใช้อัตราการไหลที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.4 พบว่าความหนาแน่นของโพลีเมอร์ที่อัตราการไหล 30 มิลลิลิตรต่อนาที มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 0.18 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นเป็น 50 มิลลิลิตรต่อนาที โพลีเมอร์มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 0.13 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นเป็น 80 มิลลิลิตรต่อนาที จะมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 0.11 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จะเห็นได้ว่าเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นความหนาแน่นของโพลีเมอร์มีค่าลดลง เนื่องจากอัตราการไหลที่สูงขึ้นทำให้ได้ขนาดของเซลล์ที่ใหญ่ขึ้น ส่งผลให้ได้โพลีเมอร์ที่มีความหนาแน่นต่ำ เพราะโครงสร้างมีปริมาณเนื้ออย่างต่ำต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร ในทางตรงกันข้ามอัตราการไหลต่ำทำให้ได้ขนาดของเซลล์ที่เล็ก ส่งผลให้ได้โพลีเมอร์ที่มีความหนาแน่นสูงเพราะโครงสร้างมีปริมาณเนื้ออย่างสูงต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร [44] นอกจากความหนาแน่นที่ได้จะแตกต่างกันแล้ว จะทำให้มีสมบัติทางกายภาพหลาย ๆ อย่างแตกต่างกันด้วย [45]



รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบความหนาแน่นของโฟมยางจากฟองก๊าซไนโตรเจนโดยใช้อัตราการไหลที่แตกต่างกัน คือ 30, 50 และ 80 มิลลิลิตรต่อนาที

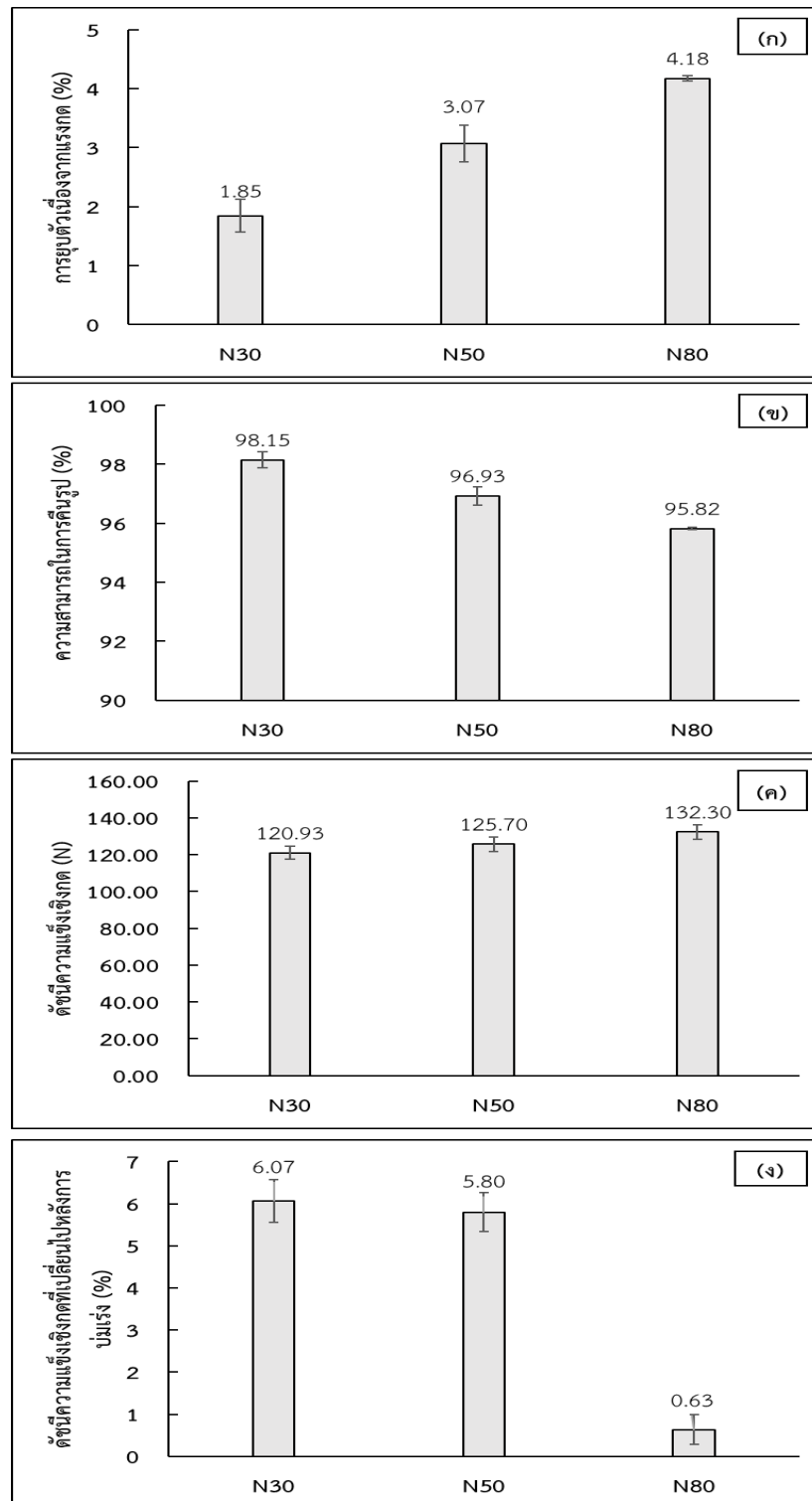
ค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงกด ความสามารถในการคืนตัว ดัชนีความแข็งเชิงกด และการเร่งการเสื่อมสภาพ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 การยุบตัวเนื่องจากแรงกดเป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถในการคืนรูปร่างและขนาดเมื่อมีแรงมากระทำให้ชิ้นงานเปลี่ยนรูปไประยะหนึ่ง ถ้าการยุบตัวเนื่องจากแรงกดมีค่าต่ำแสดงว่าโฟมยางมีความสามารถในการคืนรูปได้ดี ค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงกด และความสามารถในการคืนรูปของโฟมยางที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนโดยใช้อัตราการไหลที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (ก) และ (ข) พบว่าอัตราการไหลเพิ่มขึ้นมีค่าการยุบตัวของโฟมยางสูงขึ้น โฟมยางที่อัตราการไหล 30 มิลลิลิตรต่อนาที มีค่าการยุบตัวเท่ากับ 1.85 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหล 50 มิลลิลิตรต่อนาที มีค่าการยุบตัวเท่ากับ 3.07 เปอร์เซ็นต์ และที่อัตราการไหล 80 มิลลิลิตรต่อนาที มีค่าการยุบตัวเท่ากับ 4.18 เปอร์เซ็นต์ โฟมยางที่อัตราการไหล 80 มิลลิลิตรต่อนาที มีค่าการยุบตัวสูงสุด ส่งผลให้มีความสามารถในการคืนรูปต่ำที่สุด เนื่องจากโฟมยางมีขนาดเซลล์ใหญ่ทำให้ผนังเซลล์เชื่อมต่อกันบาง เมื่อถูกกดทับเป็นเวลานานจึงส่งผลให้เกิดการยุบตัวสูง ดังนั้นขนาดของเซลล์ที่ใหญ่ขึ้นส่งผลต่อความเสถียรของเซลล์อันเป็นสาเหตุของการแตกหักของเซลล์โฟมในที่สุด [26, 46] อย่างไรก็ตามค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงกดของโฟมยางทั้งสามอัตราการไหลมีค่าที่อยู่ในเกณฑ์ตามที่มาตรฐานกำหนด คือมีค่าการยุบตัวไม่เกิน 6 เปอร์เซ็นต์ (ตารางที่ 4.2)

ดัชนีความแข็งเชิงกด คือ ความเค้นกดที่ทำให้เกิดการผิดรูปจากน้ำหนักที่ใช้กดลงบนชิ้นงานทดสอบ ซึ่งการวัดค่าดัชนีความแข็งเชิงกดเป็นการทดสอบในการใช้งานจริงของผลิตภัณฑ์โฟมยาง เช่น การทดสอบเตียงหรือเก้าอี้ เป็นต้น เป็นการเปรียบเทียบคนที่นอนเหมือนตัวกดในขณะที่นั่งเพราะจะมีน้ำหนักกดลงบนตัวของโฟมยางหรือเก้าอี้ในการใช้งาน [3] ค่าดัชนีความแข็งเชิงกดของโฟมยางที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนโดยใช้อัตราการไหลที่แตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 4.5 (ค) พบว่าค่าความดัชนีความแข็งเชิงกดของโฟมยางอยู่ในช่วง 100 – 170 นิวตัน (ตารางที่ 4.2) ซึ่งตามมาตรฐานเป็น

โพลีเมอร์ที่ได้อยู่ในระดับนิมปานกลาง ซึ่งสามารถที่จะเลือกความแข็งของโพลีเมอร์ได้โดยการแปรอัตราการไหลเพื่อการนำไปใช้งาน

การทดสอบการบ่มแรงเป็นการเปรียบเทียบถึงความต้านทานของยางต่อการเสื่อมเมื่อเวลาผ่านไป โดยการนำยางไปอยู่ในสถานะที่เร่งให้ยางเสื่อมเร็วขึ้น โดยการเพิ่มอุณหภูมิแล้วปล่อยให้ยางเสื่อมภายในระยะเวลาที่กำหนด หลังจากนั้นนำยางที่ได้ไปทดสอบสมบัติบางอย่างแล้วเปรียบเทียบสมบัติที่ได้ก่อนและหลังนำยางเข้าสู่สถานะนั้น โดยสมบัติที่ทดสอบควรเป็นสมบัติที่เกี่ยวข้องกับการนำไปใช้งานจริง [47] โดยทั่วไปโพลีเมอร์จะถูกนำไปใช้งานในการรับแรงเป็นส่วนใหญ่ จึงได้ทำการทดสอบสมบัติดัชนีความแข็งเชิงกดก่อนและหลังการเข้าสู่สถานะการบ่มแรงการเสื่อม ซึ่งการเสื่อมของโพลีเมอร์จะทำให้ค่าดัชนีความแข็งเชิงกดเปลี่ยนไป ค่าดัชนีความแข็งเชิงกดที่เปลี่ยนไปหลังการบ่มแรงของโพลีเมอร์ที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนโดยใช้อัตราการไหลที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (ง) พบว่าอัตราการไหลเพิ่มขึ้นค่าดัชนีความแข็งเชิงกดที่เปลี่ยนไปหลังการบ่มแรงมีค่าลดลง จะเห็นได้ว่าโพลีเมอร์ที่อัตราการไหล 80 มิลลิลิตรต่อนาที มีค่าดัชนีความแข็งเชิงกดที่เปลี่ยนไปหลังการบ่มแรงต่ำที่สุด เนื่องจากเซลล์ที่ได้จากกระบวนการไมโครบับเบิลมีลักษณะคล้ายคลึงกันกับเซลล์ที่ได้จากกระบวนการทาลาเลย์ คือ ลักษณะโครงสร้างของเซลล์มีรูปร่างกลม [3] เมื่อขนาดของเซลล์ที่ได้ขยายใหญ่ขึ้น รูปร่างเซลล์ที่ขยายใหญ่ขึ้นทำให้ลักษณะเซลล์มีความเป็นเซลล์เปิดสูงขึ้น ส่งผลให้อากาศสามารถผ่านเข้าออกได้ง่าย จากการที่ผนังเซลล์ที่เชื่อมต่อกันค่อนข้างบาง และมีความต่อเนื่องกัน [24] ทำให้โพลีเมอร์ที่อัตราการไหล 80 มิลลิลิตรต่อนาที มีค่าเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับโพลีเมอร์ที่อัตราการไหล 50 และ 30 มิลลิลิตรต่อนาที ที่มีค่าดัชนีความแข็งเชิงกดเพิ่มขึ้นตามขนาดเซลล์ที่เล็กลง อย่างไรก็ตามค่าดัชนีความแข็งเชิงกดที่เปลี่ยนไปหลังการบ่มของโพลีเมอร์ทั้งสามอัตราการไหลมีค่าที่อยู่ในเกณฑ์ตามที่มาตรฐานกำหนด คือโพลีเมอร์มีค่าแข็งขึ้นหรือนิ่มลงไม่เกิน 20 เปอร์เซ็นต์จากค่าความแข็งเดิม (ตารางที่ 4.2)

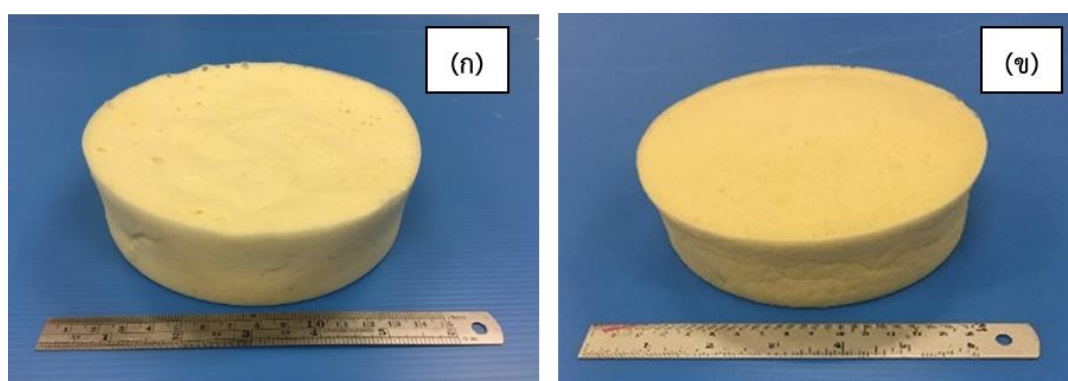
จากสมบัติทางกายภาพของโพลีเมอร์ที่แสดงข้างต้น แสดงให้เห็นว่าโพลีเมอร์ที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนด้วยกระบวนการไมโครบับเบิลสามารถกำหนดขนาดเซลล์ ความหนาแน่น และสมบัติทางกายภาพอื่น ๆ ได้ด้วยการกำหนดอัตราการไหลเพื่อการผลิตโพลีเมอร์ให้เหมาะกับการนำไปใช้งานในด้านต่าง ๆ



รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบ (ก) การยวบตัวเนื่องจากแรงกด (ข) ความสามารถในการคืนตัว (ค) ดัชนีความแข็งแรงเชิงกด และ (ง) การเร่งการเสื่อมอายุของโพนยางที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจน โดยใช้อัตราการไหลที่แตกต่างกัน คือ 30, 50 และ 80 มิลลิลิตรต่อนาที

4.2 เปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของโพลียูรีเทนที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนกับโพลียูรีเทนที่ผลิตจากฟองอากาศ

ในการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติของโพลียูรีเทนที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการไมโครบับเบิลจากโพลียูรีเทนที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนกับโพลียูรีเทนที่ผลิตจากฟองอากาศที่อัตราการไหลเท่ากัน คือ 50 มิลลิลิตรต่อนาที โดยทำการศึกษาโครงสร้างพื้นฐานวิทยา และสมบัติทางกายภาพของโพลียูรีเทนที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนกับโพลียูรีเทนที่ผลิตจากฟองอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 4.6



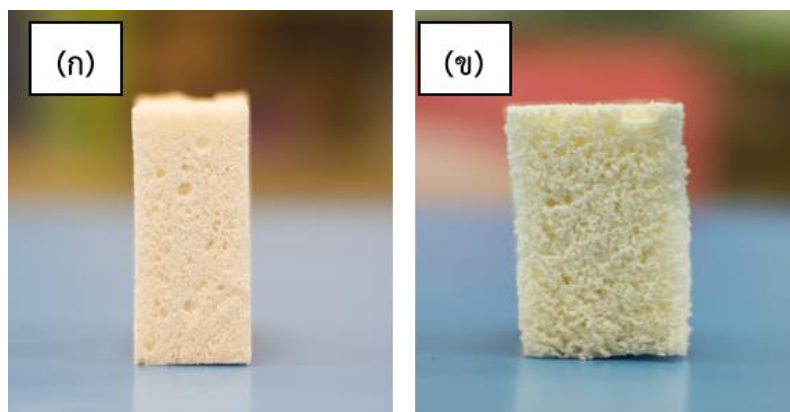
รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายโพลียูรีเทน (ก) โพลียูรีเทนที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจน
(ข) โพลียูรีเทนที่ผลิตจากฟองอากาศ

4.2.1 โครงสร้างพื้นฐานวิทยาของโพลียูรีเทนที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนกับโพลียูรีเทนที่ผลิตจากฟองอากาศ

โครงสร้างพื้นฐานวิทยา ลักษณะและขนาดเซลล์ของโพลียูรีเทนที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนกับโพลียูรีเทนที่ผลิตจากฟองอากาศด้วยกระบวนการไมโครบับเบิลที่อัตราการไหล 50 มิลลิลิตรต่อนาที ได้ถูกศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง และกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด โดยการเปรียบเทียบลักษณะ ขนาด และการกระจายขนาดของเซลล์

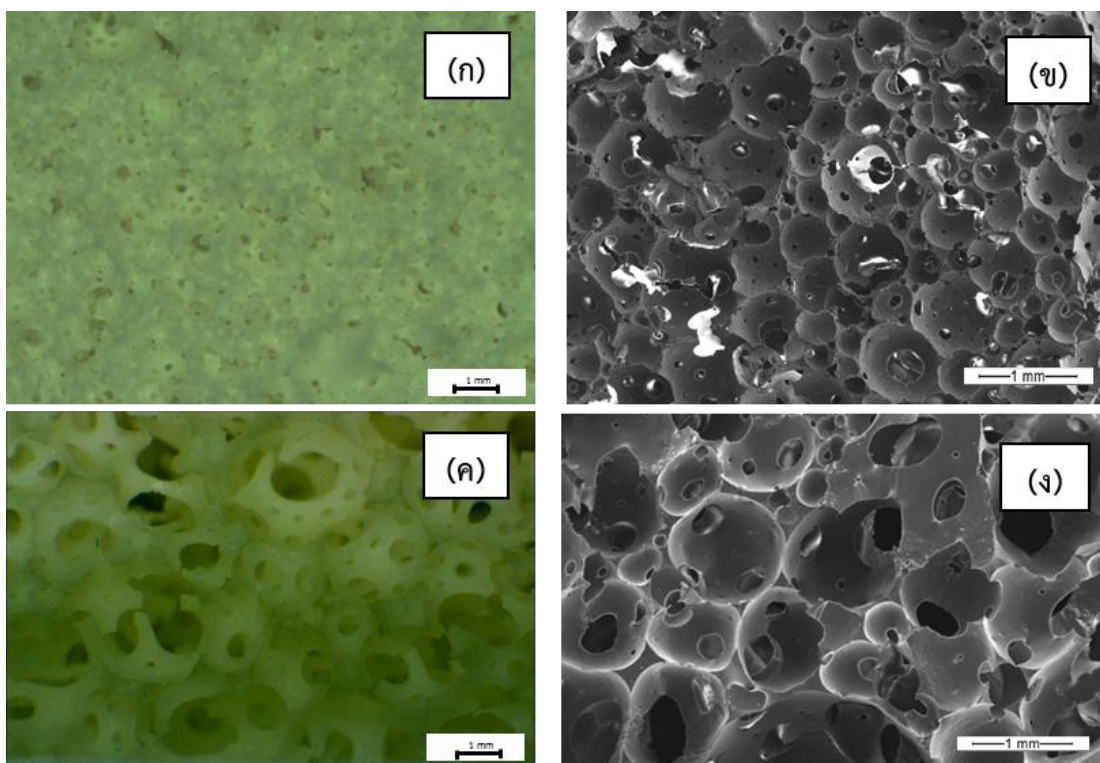
1. ลักษณะโครงสร้างเซลล์ของโพลียูรีเทนที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนกับโพลียูรีเทนที่ผลิตจากฟองอากาศ

ภาพตัดขวางของโพลียูรีเทนที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนกับโพลียูรีเทนที่ผลิตจากฟองอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 4.7 พบว่าโพลียูรีเทนที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนกับโพลียูรีเทนที่ผลิตจากฟองอากาศเมื่อมองด้วยตาเปล่าลักษณะของเซลล์โพลียูรีเทนจะมีการกระจายตัวของฟองก๊าซและฟองอากาศที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ



รูปที่ 4.7 ภาพตัดขวางของโฟมยาง (ก) โฟมยางที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจน
(ข) โฟมยางที่ผลิตจากฟองอากาศ

ลักษณะโครงสร้างเซลล์ของโฟมยางที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนกับโฟมยางที่ผลิตจากฟองอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 4.8 พบว่าลักษณะโครงสร้างของเซลล์โฟมจากการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไมโครบับเบิลลักษณะเซลล์มีรูปร่างกลม กระจายตัวสม่ำเสมอ ทั้งชิ้นงาน และการเชื่อมต่อของเซลล์เป็นไปอย่างสมบูรณ์ไม่มีการแตกแยกออกจากกัน จะเห็นได้ว่าที่อัตราการผลิตเท่ากันลักษณะเซลล์ของโฟมยางที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนและลักษณะเซลล์ของโฟมยางที่ผลิตจากฟองอากาศมีลักษณะโครงสร้างของเซลล์ที่คล้ายกัน คือ เซลล์มีลักษณะกลมและเชื่อมต่อกันอย่างสมบูรณ์ แต่ขนาดของเซลล์ที่ได้แตกต่างกัน ตามรายงานของ Wiegand G. and E. U. [36] สำหรับระบบของน้ำผสมกับสารละลายไม่มีขี้ผึ้ง แรงตึงผิวมีค่าเพิ่มขึ้นตามความหนาแน่นของก๊าซ ซึ่งตามทฤษฎีการเกิดฟองแรงตึงผิวเพิ่มขึ้นทำให้ฟองขนาดใหญ่ขึ้น [32] เนื่องจากน้ำยางข้นประกอบด้วยน้ำและเนื้อยางที่มีส่วนประกอบเป็นไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขี้ผึ้ง ส่งผลให้อากาศที่มีความหนาแน่นมากกว่ามีขนาดของฟองใหญ่กว่า ทำให้โฟมยางที่ผลิตจากฟองอากาศมีขนาดเซลล์โฟมที่ใหญ่กว่าโฟมยางที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจน



รูปที่ 4.8 โครงสร้างพื้นฐานวิทยาของโฟมยาง (ก) OM และ (ข) SEM ของโฟมยางที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจน (ค) OM และ (ง) SEM ของโฟมยางที่ผลิตจากฟองอากาศ

2. ขนาดเซลล์และการกระจายขนาดของเซลล์ของโฟมยางที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนกับโฟมยางที่ผลิตจากฟองอากาศ

ขนาดเซลล์ และจำนวนเซลล์ต่อหน่วยปริมาตรของโฟมยางที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนกับโฟมยางที่ผลิตจากฟองอากาศ ดังแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่าโฟมยางจากกระบวนการไมโครบับเบิลที่อัตราการไหลที่เท่ากัน ขนาดเซลล์เฉลี่ยของเซลล์โฟมยางที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนมีขนาดเล็กกว่าโฟมยางที่ผลิตจากฟองอากาศ โดยที่โฟมยางที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนมีขนาดเซลล์เฉลี่ยเท่ากับ 387 ไมครอน และโฟมยางที่ผลิตจากฟองอากาศมีขนาดเซลล์เฉลี่ยเท่ากับ 497 ไมครอน จากความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเซลล์เฉลี่ยกับจำนวนเซลล์ต่อหน่วยปริมาตรตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นว่าขนาดเซลล์เฉลี่ยเล็กลงส่งผลให้จำนวนเซลล์ต่อปริมาตรเพิ่มขึ้น เมื่อทำการคำนวณส่งผลให้โฟมยางที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนมีจำนวนเซลล์ต่อหน่วยปริมาตรมากกว่าโฟมยางที่ผลิตจากฟองอากาศ

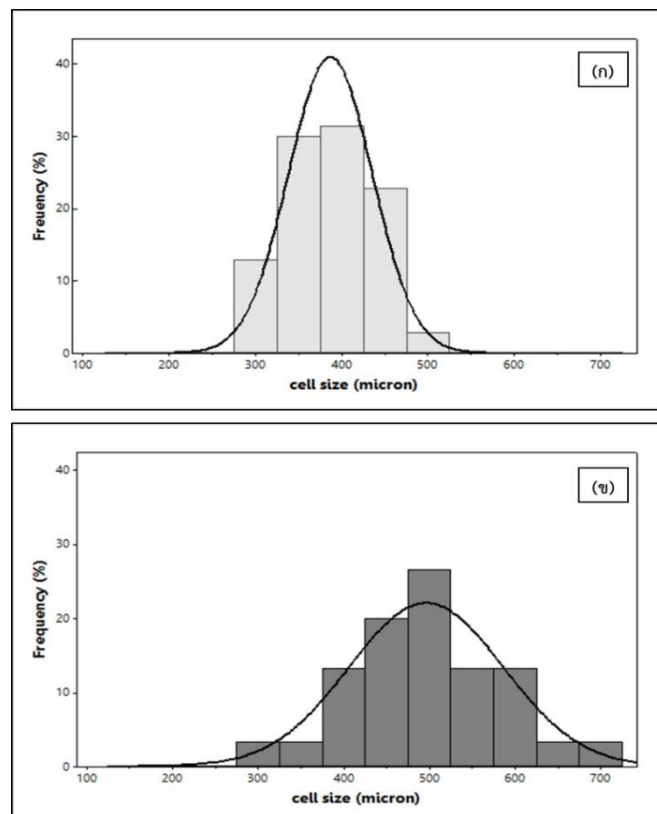
ตารางที่ 4.3 ขนาดเซลล์ของโคมยาง

การทดสอบ	N50*	A50**
ขนาดเฉลี่ยของเซลล์ (micron)	387	497
จำนวนเซลล์ต่อหน่วยปริมาตร (cm ⁻³)	2.43×10 ⁵	1.70×10 ⁵

หมายเหตุ * คือ ชีงงานโคมยางที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนที่อัตราการไหล 50 มิลลิลิตรต่อนาที

** คือ ชีงงานโคมยางที่ผลิตจากฟองอากาศที่อัตราการไหล 50 มิลลิลิตรต่อนาที

สำหรับการกระจายขนาดของเซลล์ของโคมยางที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนกับโคมยางที่ผลิตจากฟองอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 4.9 พบว่าการกระจายขนาดของเซลล์ของโคมยางที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนลักษณะเซลล์เล็ก ละเอียด และกระจายตัวสม่ำเสมอ ทำให้การกระจายขนาดของเซลล์แคบกว่าโคมยางที่ผลิตจากฟองอากาศ เนื่องจากฟองขนาดใหญ่เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการรวมตัวของฟองเพิ่มขึ้น [48] ทำให้ขนาดของฟองอากาศควบคุมได้ยากกว่าฟองก๊าซไนโตรเจน [29]

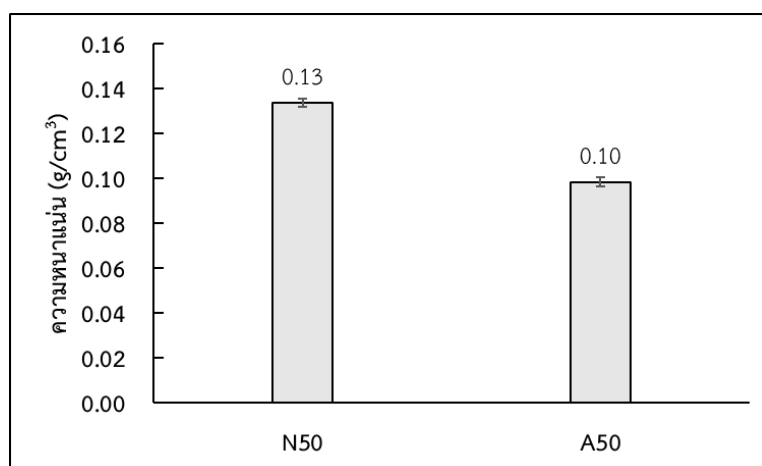


รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบการกระจายขนาดของเซลล์ของโคมยาง (ก) โคมยางที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจน (ข) โคมยางที่ผลิตจากฟองอากาศ

4.2.2 สมบัติทางกายภาพของโพลียเอทิลีนที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนกับโพลียเอทิลีนที่ผลิตจากฟองอากาศ

ในการศึกษาสมบัติทางกายภาพของโพลียเอทิลีนที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนกับโพลียเอทิลีนที่ผลิตจากฟองอากาศด้วยกระบวนการไมโครบับเบิลที่อัตราการไหล 50 มิลลิลิตรต่อนาที ซึ่งสมบัติที่ทดสอบ ได้แก่ การทดสอบความหนาแน่น การทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงกด การทดสอบดัชนีความแข็งเชิงกด และการทดสอบการบ่มแรง โดยมาตรฐานการทดสอบสมบัติทางกายภาพของโพลียเอทิลีน ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ความหนาแน่นของโพลียเอทิลีนที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนกับโพลียเอทิลีนที่ผลิตจากฟองอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 4.10 พบว่าความหนาแน่นของโพลียเอทิลีนทั้งสองมีค่าแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด กล่าวคือ โพลียเอทิลีนไนโตรเจนมีความหนาแน่นมากกว่าโพลียเอทิลีนอากาศ ทั้งนี้เนื่องจากความจริงที่ว่าโพลียเอทิลีนทั้งสองชนิดมีขนาดเซลล์ที่แตกต่างกัน กล่าวคือเมื่อใช้ก๊าซไนโตรเจนขึ้นรูปโพลียเอทิลีน จะให้ขนาดเซลล์เล็กกว่าการใช้ฟองอากาศขึ้นรูป (ถึงแม้ว่าจะทำการขึ้นรูปที่อัตราการไหลเท่ากันก็ตาม) ดังนั้นเมื่อขนาดเซลล์เล็ก ทำให้มีปริมาณเนื้อเยื่อต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรมาก ส่งผลให้ได้ค่าความหนาแน่นมากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับโพลียเอทิลีนที่มีขนาดเซลล์ใหญ่ [45] ดังนั้นจะเห็นได้ว่า ถึงแม้ว่าจะใช้อัตราการไหลที่เท่ากัน แต่ถ้าใช้แหล่งกำเนิดฟองต่างชนิดกัน (อากาศและไนโตรเจน) จะให้โพลียเอทิลีนที่มีขนาดเซลล์ไม่เท่ากัน ส่งผลให้ความหนาแน่นของโพลียเอทิลีนดังกล่าวไม่เท่ากันด้วย



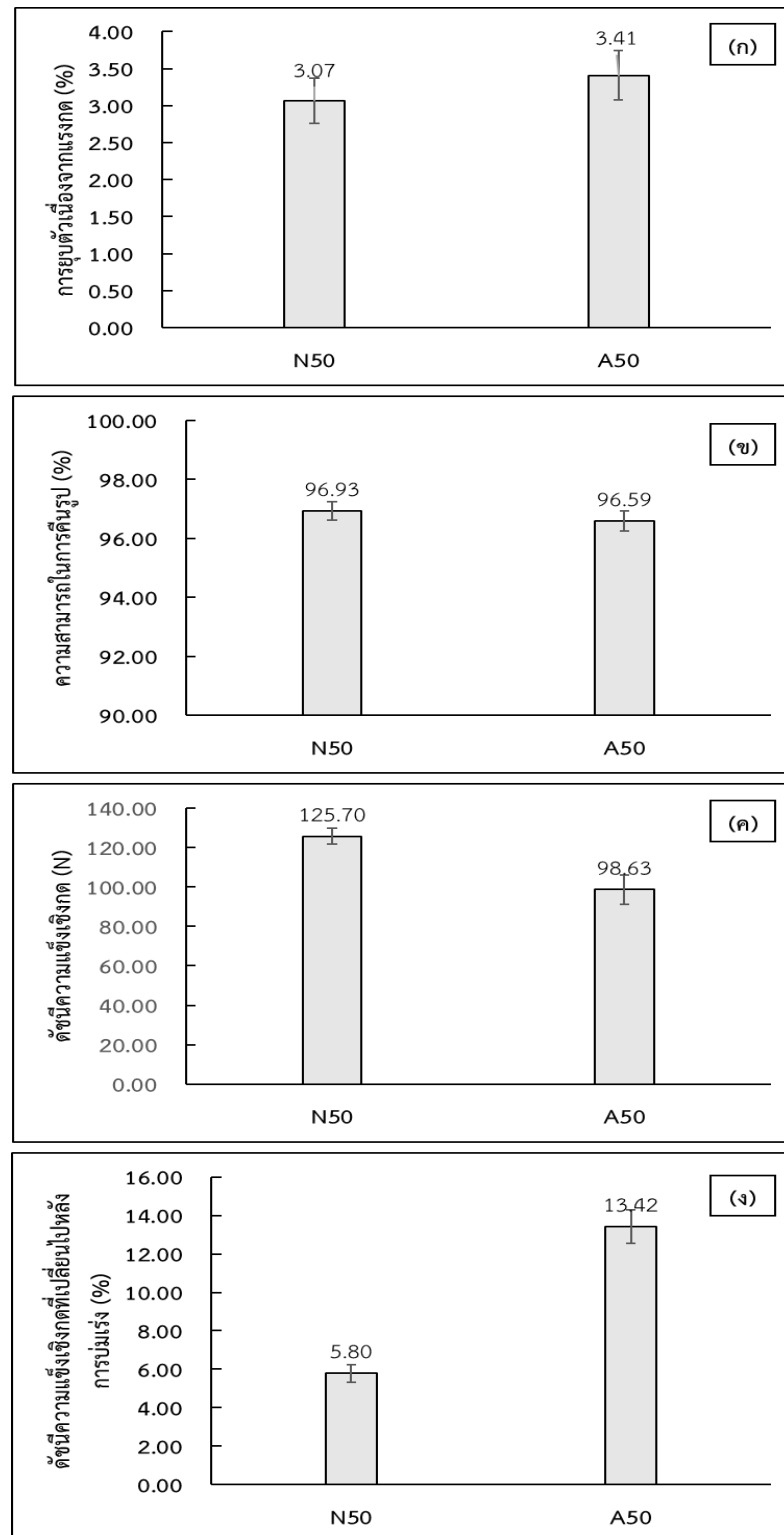
รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบความหนาแน่นของโพลียเอทิลีนที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนกับโพลียเอทิลีนที่ผลิตจากฟองอากาศ

ค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงกดของของโฝมยางที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนกับโฝมยางที่ผลิตจากฟองอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 4.11 (ก) โฝมยางที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจน มีค่าการยุบตัวเท่ากับ 3.07 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่โฝมยางที่ผลิตจากฟองอากาศ มีค่าการยุบตัวเท่ากับ 3.41 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นได้ว่าโฝมยางที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนมีค่าการยุบตัวน้อยกว่า (คืนตัวได้ดี 96.95% ดังแสดงในรูปที่ 4.11 (ข)) โฝมยางที่ผลิตจากฟองอากาศ

ดัชนีความแข็งเชิงกดของโฝมยางที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนกับโฝมยางที่ผลิตจากฟองอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 4.11 (ค) จะเห็นได้ว่าค่าดัชนีความแข็งเชิงกดของโฝมยางที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนมีค่าสูงกว่าโฝมยางที่ผลิตจากฟองอากาศ เพราะว่าขนาดเซลล์ที่เล็กทำให้ได้โฝมยางที่มีความเป็นรูพรุนต่ำ ทำให้เมื่อทำการกดชิ้นงานให้ลดลงในระดับเดียวกันส่งผลให้ใช้แรงในการกดที่สูงกว่าโฝมยางที่มีความเป็นรูพรุนสูง ซึ่งบ่งบอกถึงความยืดหยุ่นที่ดีกว่า ทั้งนี้เนื่องมาจากขนาดเซลล์ที่เล็กกว่า

การบ่มเร่งการเสื่อมอายุโดยการทดสอบดัชนีความแข็งเชิงกดก่อนและหลังการบ่มเร่ง ค่าดัชนีความแข็งเชิงกดที่เปลี่ยนแปลงไปหลังการบ่มเร่ง ดังแสดงในรูปที่ 4.11 (ง) พบว่าค่าดัชนีความแข็งเชิงกดที่เปลี่ยนแปลงไปหลังการบ่มเร่งของโฝมยางที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนมีค่าต่ำกว่าโฝมยางที่ผลิตจากฟองอากาศ โดยในทางทฤษฎีโฝมยางที่มีลักษณะเซลล์ที่มีรูปร่างกลมเช่นเดียวกันกับโฝมยางที่ได้จากกระบวนการทาลาเลย์ ค่าดัชนีความแข็งเชิงกดที่เปลี่ยนแปลงไปหลังการบ่มเร่งของโฝมจะมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย เมื่อโฝมยางมีขนาดเซลล์ที่ใหญ่ เพราะว่าขนาดเซลล์ขยายใหญ่ขึ้น รูปร่างเซลล์ที่ขยายใหญ่ขึ้นโครงสร้างเซลล์มีความเป็นเซลล์เปิดสูงขึ้นทำให้อากาศสามารถผ่านเข้าออกได้ง่าย จากการที่ผนังเซลล์เชื่อมต่อกันค่อนข้างบางและมีความต่อเนื่องกัน [24] โดยขนาดเซลล์ของโฝมยางที่ผลิตจากฟองอากาศมีขนาดที่ใหญ่กว่าโฝมยางที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจน แต่ค่าดัชนีความแข็งเชิงกดที่เปลี่ยนแปลงไปหลังการบ่มเร่งมีค่าสูงกว่า มีแนวโน้มว่าการใช้ก๊าซไนโตรเจนในการผลิตโฝมยางซึ่งโดยปกติแล้วจะไม่เกิดการเสื่อมเนื่องจากก๊าซเฉื่อย แต่อย่างไรก็ตาม จะเกิดการเสื่อมได้ง่ายจากการรวมตัวกันของก๊าซออกซิเจนกับยางเพียงไม่ถึง 1 เปอร์เซ็นต์ ก็ทำให้ยางเสื่อมได้ ซึ่งในอากาศมีออกซิเจนมากถึง 21 เปอร์เซ็นต์ เมื่อต้องอยู่ในสภาวะที่เร่งให้เกิดการเสื่อมโดยการเพิ่มอุณหภูมิอาจจะส่งผลให้เกิดการเชื่อมขวางของโมเลกุล หรือขาดกันของโมเลกุลส่งผลให้ลักษณะของโฝมยางเปลี่ยนไปจากเดิมทำให้โฝมยางที่ผลิตจากฟองอากาศเกิดการเสื่อมที่สูงกว่าโฝมยางที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจน [5]

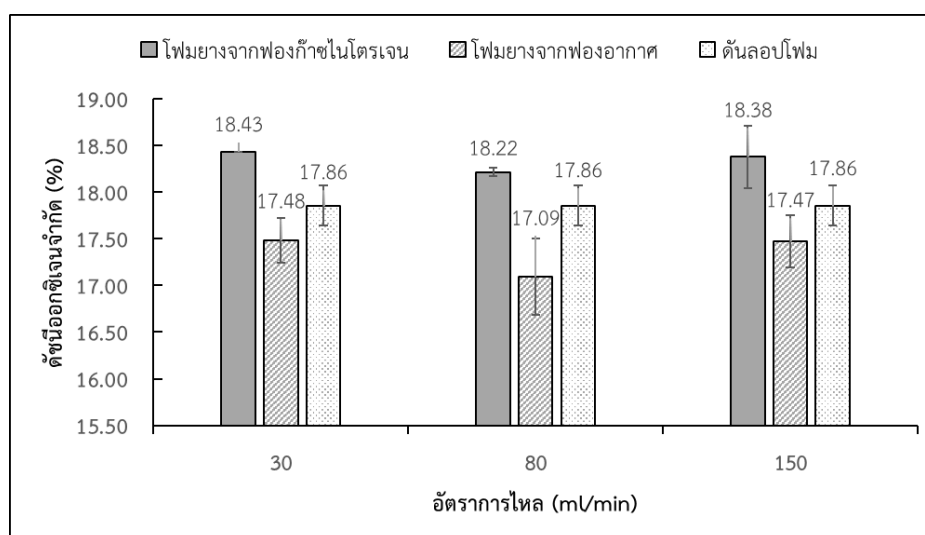
จากสมบัติทางกายภาพของโฝมยางที่แสดงข้างต้น แสดงให้เห็นว่าโฝมยางที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนกับโฝมยางที่ผลิตจากฟองอากาศด้วยกระบวนการไมโครบับเบิล โฝมยางทั้งสองมีค่าแตกต่างกันทั้งขนาดเซลล์ ความหนาแน่น และสมบัติทางกายภาพอื่น ๆ จากการที่ใช้แหล่งกำเนิดฟองต่างชนิดกัน ทำให้สามารถปรับเปลี่ยนสมบัติทางกายภาพของโฝมได้ด้วยการเปลี่ยนชนิดของฟองก๊าซ เช่นเดียวกับการกำหนดอัตราการไหล



รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบการ (ก) ยับยั้งเนื่องจากแรงกด (ข) ความสามารถในการคืนรูป (ค) ดัชนีความแข็งแรงเชิงกด และ (ง) การเร่งการเสื่อมอายุของโฟมยางที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนกับโฟมยางที่ผลิตจากฟองอากาศ

4.3 เปรียบเทียบสมบัติความต้านทานต่อการติดไฟของโพลียเอทิลีนที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจน โพลียเอทิลีนที่ผลิตจากฟองอากาศ และโพลียเอทิลีนที่ผลิตจากกระบวนการดันลอป

สมบัติความต้านทานต่อการติดไฟโดยการทดสอบดัชนีออกซิเจนจำกัด (Limiting Oxygen Index, LOI) คือ ปริมาณออกซิเจนที่น้อยที่สุดที่ต้องการในบรรยากาศที่ทำให้วัสดุเกิดการเผาไหม้ ซึ่งวัสดุที่มีค่าดัชนีออกซิเจนจำกัดต่ำจะเกิดการเผาไหม้ได้ง่าย [49] ค่าดัชนีออกซิเจนจำกัดของโพลียเอทิลีนที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจน โพลียเอทิลีนที่ผลิตจากฟองอากาศ (ชิ้นงานโพลียเอทิลีนไนโตรเจน และโพลียเอทิลีนอากาศผลิตที่อัตราการไหลแตกต่างกัน 3 อัตราการไหลคือ 30, 80 และ 150 มิลลิลิตรต่อนาที) และโพลียเอทิลีนที่ผลิตจากกระบวนการดันลอป ดังแสดงในรูปที่ 4.12 พบว่าโพลียเอทิลีนที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนมีค่าดัชนีออกซิเจนจำกัดมากที่สุด แสดงว่าโพลียเอทิลีนสามารถต้านทานต่อการติดไฟได้มากที่สุด รองลงมา คือ โพลียเอทิลีนที่ผลิตจากกระบวนการดันลอป และโพลียเอทิลีนที่ผลิตจากฟองอากาศ สามารถต้านทานต่อการติดไฟได้น้อยที่สุด แต่อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าค่าดัชนีออกซิเจนจำกัดที่ได้ยังต่ำกว่า 21 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งยังไม่ถือว่าโพลียเอทิลีนที่ผลิตได้ทั้งสามชนิดนี้มีสมบัติหน่วงหรือต้านทานต่อการติดไฟ เพราะในบรรยากาศมีปริมาณออกซิเจน 21 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเพียงพอที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้สำหรับวัสดุที่มีค่าดัชนีออกซิเจนจำกัดน้อยกว่า 21 เปอร์เซ็นต์ [49] ทั้งนี้เนื่องมาจากโพลียเอทิลีนที่ผลิตได้มีโครงสร้างเป็นเซลล์เปิด ถ้าสามารถทำให้โพลียเอทิลีนเป็นโครงสร้างเซลล์แบบปิดได้อาจจะทำให้ได้โพลียเอทิลีนที่มีความสามารถในการทนต่อการติดไฟได้ดีกว่า หรือทำการเติมสารหน่วงการติดไฟ เช่น อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์, แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ และแอนติโมนีออกไซด์ เป็นต้น



รูปที่ 4.12 เปรียบเทียบดัชนีออกซิเจนจำกัดของโพลียเอทิลีนที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจน โพลียเอทิลีนที่ผลิตจากฟองอากาศ (อัตราการไหล 30, 80 และ 150 มิลลิลิตรต่อนาที) และโพลียเอทิลีนที่ผลิตจากกระบวนการดันลอป

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยแบ่งออกเป็น 3 วัตถุประสงค์คือ (1) ศึกษาผลของอัตราการไหลต่อสมบัติทางกายภาพของโพลีเมอร์ที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจน (2) เปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของโพลีเมอร์ที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนกับโพลีเมอร์ที่ผลิตจากฟองอากาศ (3) เปรียบเทียบสมบัติความต้านทานต่อการตีไฟของโพลีเมอร์ที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจน โพลีเมอร์ที่ผลิตจากฟองอากาศ และโพลีเมอร์ที่ผลิตจากกระบวนการดันลอป โดยในงานวิจัยได้มีข้อสรุปและข้อเสนอแนะดังนี้

5.1 ศึกษาผลของอัตราการไหลต่อสมบัติทางกายภาพของโพลีเมอร์ที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจน

จากการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองโพลีเมอร์ที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนด้วยกระบวนการไมโครบับเบิล โดยใช้อัตราการไหลที่แตกต่างกัน 3 อัตราการไหลคือ 30, 50 และ 80 มิลลิลิตรต่อนาที เพื่อเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของโพลีเมอร์ที่สามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1.1 โครงสร้างของโพลีเมอร์ที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจน พบว่าลักษณะเซลล์มีรูปร่างกลมกระจายตัวสม่ำเสมอ และการเชื่อมต่อของเซลล์เป็นไปอย่างสมบูรณ์ในทุก ๆ อัตราการไหล

5.1.2 อัตราการไหลมีผลต่อขนาดของเซลล์ ขนาดเซลล์ของโพลีเมอร์ใหญ่ขึ้นตามอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น ส่วนการกระจายขนาดของเซลล์ของโพลีเมอร์ที่อัตราการไหล 30 และ 50 มิลลิลิตรต่อนาที สม่ำเสมอกว่าที่อัตราการไหล 80 มิลลิลิตรต่อนาที

5.1.3 สมบัติทางกายภาพของโพลีเมอร์ที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจน พบว่าค่าความหนาแน่นมีค่าลดลงตามอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น ค่าการยุบตัวมีค่าสูงขึ้นตามอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น ดัชนีความแข็งเชิงกดเป็นโพลีเมอร์ที่มีระดับนิ่มปานกลางในทุก ๆ อัตราการไหล และดัชนีความแข็งเชิงกดที่เปลี่ยนแปลงไปหลังการบ่มแรงลดลงตามอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นโพลีเมอร์ที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนด้วยกระบวนการไมโครบับเบิลสามารถกำหนดขนาดเซลล์ ความหนาแน่น และสมบัติทางกายภาพอื่น ๆ ได้ด้วยการกำหนดอัตราการไหลเพื่อการผลิตโพลีเมอร์ให้เหมาะกับการนำไปใช้งานในด้านต่าง ๆ

5.2 เปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของโพลีเมอร์ที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนกับโพลีเมอร์ที่ผลิตจากฟองอากาศ

จากการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของโพลีเมอร์ที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนกับโพลีเมอร์ที่ผลิตจากฟองอากาศด้วยกระบวนการไมโครบับเบิลที่อัตราการไหลเท่ากัน คือ 50 มิลลิลิตรต่อนาที สามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.2.1 ผลของโครงสร้างของโพลีเมอร์ที่ได้จากกระบวนการไมโครบับเบิล พบว่าลักษณะเซลล์มีรูปร่างกลม กระจายตัวสม่ำเสมอ และการเชื่อมต่อของเซลล์เป็นไปอย่างสมบูรณ์ทั้งโพลีเมอร์ที่ผลิตจาก

ฟองก๊าซไนโตรเจนและโฟมยางที่ผลิตจากฟองอากาศ ขนาดเซลล์ของโฟมยางจากฟองก๊าซไนโตรเจน มีขนาดเซลล์ที่เล็กกว่าโฟมยางจากฟองอากาศ และการกระจายขนาดของเซลล์ของโฟมจากฟองก๊าซไนโตรเจนมีความสม่ำเสมอกว่าโฟมยางจากฟองอากาศ

5.2.2 สมบัติทางกายภาพของโฟมยางที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนกับโฟมยางที่ผลิตจากฟองอากาศ โฟมยางจากฟองก๊าซไนโตรเจนมีความหนาแน่นสูงกว่า การยุบตัวน้อยกว่า มีความสามารถในการรับแรงสูงกว่า และดัชนีความแข็งเชิงกดที่เปลี่ยนไปหลังการบ่มแรงน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับโฟมยางจากฟองอากาศ ดังนั้นการขึ้นรูปโฟมยางด้วยกระบวนการไมโครบับเบิลด้วยอัตราการไหลที่เท่ากัน แต่ก๊าซต่างชนิดกันทำให้ลักษณะเซลล์ ความหนาแน่น และสมบัติทางกายภาพอื่น ๆ แตกต่างกัน

5.2.3 โฟมยางที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนมีแนวโน้มจะช่วยชะลอการเสื่อมสภาพของโฟมยางธรรมชาติ

5.3 เปรียบเทียบสมบัติความต้านทานต่อการตีไฟของโฟมยางที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนกับโฟมยางที่ผลิตจากฟองอากาศ และโฟมยางที่ผลิตจากกระบวนการต้นลอป

จากการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง เพื่อเปรียบเทียบสมบัติความต้านทานต่อการตีไฟของโฟมยางที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจน โฟมยางที่ผลิตจากฟองอากาศ (อัตราการไหล 30, 80 และ 150 มิลลิลิตรต่อนาที) และโฟมยางที่ผลิตจากกระบวนการต้นลอป สามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.3.1 ก๊าซไนโตรเจนมีแนวโน้มเป็นตัวช่วยในการต้านทานการตีไฟ แต่เนื่องจากโครงสร้างเป็นแบบเซลล์เปิดทำให้ค่าที่ได้ใกล้เคียงกันในทุก ๆ อัตราการไหล

5.4 ข้อเสนอแนะ

5.4.1. จากงานวิจัยครั้งทำให้เห็นว่าถ้าสามารถทำให้โฟมยางที่ได้มีลักษณะเป็นเซลล์ปิดได้มีผลที่ดีทั้งในการชะลอการเสื่อมสภาพและความต้านทานต่อการตีไฟ โดยการทำการปิดผิวของโฟมยางด้วยน้ำยางหล่อแบบเพื่อกักเก็บอากาศไว้ หรือใช้ดีฟิวเซอร์ขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร เพื่อให้ได้เซลล์ปิดในโครงสร้างโฟม

5.4.2 ใช้ตัวหน่วงการตีไฟร่วมด้วยเพื่อสมบัติความต้านทานต่อการตีไฟ

บรรณานุกรม

- [1] โสภภาพรรณ จินดาไพศาล. 2553. การเตรียมยางธรรมชาติเหลวควบคุมน้ำหนักโมเลกุล. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต, สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [2] สุระศักดิ์ เทพทอง. 2545. อิทธิพลของสารก่อเจลเสริมต่อการหดตัวและสมบัติของพองยางธรรมชาติ. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต, สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [3] วิธาร พันธุ์ศิริวิโรจน์. 2551. การทำพองยางธรรมชาติด้วยกระบวนการทาลาเลย์: สภาวะการแปรรูป. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [4] Kohman, G.T. 1929. The Absorption of oxygen by rubber. The Journal of Physical Chemistry (33): 226–243.
- [5] สะอาด ริยะจันทร์. 2553. ออกซิเดชันและการแตกสลายทางแสงของยาง. สาขาเทคโนโลยีวัสดุ คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [6] อับดุลฮาгим หามะ. 2552. ยางธรรมชาติเกาะติดสารต้านออกซิเดชัน 4-อะมิโนไดฟีนิลามีนเพื่อปรับปรุงการออกสูตรยาง. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต, สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [7] Thomson, W. 1885. India rubber and its decay. Journal of the Society of Chemical Industry (4): 710.
- [8] รัฐพงศ์ หนูหมาด. 2552. การศึกษาพันธะเชื่อมโยงและการเสื่อมสภาพของฟิล์มยางโดยเทคนิคการวัดการดูดกลืนรังสีเอกซ์. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [9] วิริยะ ทองเรือง และคณะ. 2547. การพัฒนากระบวนการผลิตโฟมยาง. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [10] วิภาวี พัฒนกุล. 2554. ยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์. สถาบันวิจัยยาง.
- [11] อนุชิต วิเชียรชม. 2556. การเตรียมและสมบัติทางไฟฟ้าของเมมเบรนผสมที่ได้จากยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์และโคโตะซาน. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [12] สถาบันวิจัยยาง. 2555. ข้อมูลวิชาการยางพารา.
- [13] กวิชาติ กะตั้งองงาน. 2549. การทำยางพองน้ำด้วยวิธีการทาลาเลย์ II: การเจลด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์. การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. ครั้งที่ 32
- [14] Baldwin, J. M., D. R. Bauer and K. R. Ellwood. 2004. Effects of Nitrogen Inflation on Tire Aging and Performance. Rubber Division, American Chemical Society Grand Rapids, MI.

- [15] Modrow, H. et al. 2000. Monitoring Thermal Oxidation of Sulfur Crosslinks in SBR-Elastomers using Sulfur K-edge XANES: A feasibility study. *Kautschuk Gummi Kunststoffe* (53): 328-337.
- [16] Anderson, V., and J. L. Madelaine. 2001. Protection of non-chlorinated and chlorinated gloves with phenolic antioxidant.
- [17] Temna, K. 2014. Preparation of biodegradable rubber based on natural rubber and cassava starch. A thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science in Polymer Science and Technology, Prince of Songkla University.
- [18] อนุรักษ์ อุทัยพันธ์. 2554. อิทธิพลของระบบวัลคาไนซ์แบบผสมระหว่างระบบกำมะถันกับระบบเปอร์ออกไซด์ และสารป้องกันการเสื่อมสภาพต่อสมบัติของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบรนต์ยางธรรมชาติกับพอลิโพรพิลีน, วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [19] วราวุธ สุขมาก. 2552. การพัฒนาวัสดุกันกระแทกจากยางฟองน้ำ. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีบรรจุภัณฑ์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [20] ชินรัตน์ ลาภพูลธนะอนันต์. 2548. เทคโนโลยีการผลิตและทดสอบโฟมยางจากน้ำยางธรรมชาติ. เครือข่ายพัฒนาอุตสาหกรรมผลิตยางและไม้ยางพารา.
- [21] Information on: <https://www.latexco.com/option/dunlop-process/#.Xcjl-tUzblU> (สืบค้นเมื่อ 2/10/2562)
- [22] Information on: <https://www.europeanbedding.sg/blogs/articles/103253254-how-are-latex-mattresses-made> (สืบค้นเมื่อ 2/10/2562)
- [23] อาชีซัน แกสมาน, เจริญ นาคะสรรค์ และ อนุรักษ์ สิทธิรักษ์. 2549. อิทธิพลของสารก่อเจลและสารตัวเติมต่อการแปรรูปและสมบัติของยางฟองน้ำจากน้ำยางธรรมชาติชนิดครีมี: คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [24] Khampok, S. 2007. The processing and property studies of low-density natural rubber foam. A thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Engineering in Materials Engineering, Prince of Songkla University.
- [25] Saunders, J H. 1991. Chapter 2 Fundamentals of foam formation, in polymeric foam, edited by Klemperer, D. and Frisch, K. Oxford University Press, New York.
- [26] Zakaria, Z. et al. 2007. Effect of foaming temperature on morphology and compressive properties of ethylene propylene diene monomer rubber (EPDM) foam. *Malaysian Polymer Journal* (2): 22-30.
- [27] Heidari, A. and M. Fasihi. 2018. Cell structure-impact property relationship of polypropylene/thermoplastic elastomer blend foams. *eXPRESS Polymer Letters* (13): 429-442.

- [28] Najib, N.N. et al. 2009. Effect of blowing agent concentration on cell morphology and impact properties of natural Rubber Foam. *Journal of Physical Science* (20): 13-25.
- [29] ณัฐินี โล่พัฒนานนท์ และคณะ. 2558. การผลิตแผ่นฉนวนกันความร้อนจากโฟมยางธรรมชาติผสมเอทิลีนไวนิลอะซีเตท. ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [30] สุภัทรชัย แสงวงษ์. 2550. สมบัติเชิงกลพลวัตและสัณฐานวิทยาของโฟมคอมโพสิตพอลิโพรไพลีนและผงไม้ยางพารา. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ, มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- [31] ประไพพิศ ถาวรศรี. 2562 การศึกษาใช้ฟองอากาศระดับไมครอนสำหรับล้างทำความสะอาดผงบานหิน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [32] Schafer, R., C. Merten. and G. Eigenberger. 2002. Bubble size distributions in a bubble column reactor under industrial conditions. *Experimental Thermal and Fluid Science* (26): 595-604.
- [33] Kantarcia, N., F. Borakb. and K.O. Ulgena. 2004. Bubble column reactors. *Process Biochemistry* (40) 2263–2283.
- [34] Krishna, R. 1991. A model for gas holdup in bubble columns incorporating the influence of gas density on flow regime transitions. *Chemical Engineering Science* (46): 2491-2496.
- [35] Hecht, K. et al. 2015. Effect of Gas Density on Gas Holdup in Bubble Columns. *Chemie Ingenieur Technik* (87): 762–772.
- [36] Wiegand, G. and E. U. Franck. 1994. Interfacial tension between water and non-polar fluids up to 473 K and 2800 bar. *Berichte der bunsengesellschaft für physikalische Chemie* (98): 809-817.
- [37] Ribeiro Jr, C. P. and P. L. C. Lage. 2004. Experimental study on bubble size distributions in a direct-contact evaporator. *Brazilian Journal of Chemical Engineering* (21): 69 – 81
- [38] Zimmerman, W. B. et al. 2008. Microbubble Generation. *Bentham Science* (2): 1-8(8).
- [39] Zimmerman, W. B. et al. 2009. On the design and simulation of an airlift loop bioreactor with microbubble generation by fluidic oscillation. *Food and Bioproducts Processing* (87) : 215-227.
- [40] Li, P. 2006. Development of Advanced Water Treatment Technology Using Microbubbles. *issertation of Keio University, Keio.*

- [41] Blackley, D.C. 1997. Polymer Latices Science and Technology (1): Fundamental principles, London.
- [42] Camarasa, E. et al. 1999. Influence of coalescence behaviour of the liquid and of gassing on hydrodynamics and bubble characteristics in a bubble column. *Chemical Engineering and Processing* (38): 329–344.
- [43] Roslim., R., M. Y. Amir Hashim and P. T. Augurio. 2012. Natural Latex Foam. *Journal of Engineering Science* (8): 15-27.
- [44] ประยูร ศรีขวัญ. 2547. การปรับเปลี่ยนความแข็งของฟองยางโดยการซ้อนชั้น. *วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาตรี, สาขาเทคโนโลยียาง, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.*
- [45] Madge, E.W. 1962. Latex foam rubber. Maclaren, London.
- [46] Klemperer, D. and C. Frisch. 1991. Polymeric foam. Hanser publishers. New York.
- [47] บุญธรรม นิธิอุทัย และ ปรีชา ป้องภัย. 2534. ปฏิบัติการเทคโนโลยี II. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [48] Krishna., R. 1997. Gas holdup in slurry bubble columns: effect of column diameter and slurry concentrations. *American Institute of Chemical Engineers Journal* (43): 311-316.
- [49] มณฑล ศรีเพ็ชร. 2561. การเพิ่มมูลค่าเศษวัสดุสิ่งทอให้เป็นถุงมือกันไฟ. *วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาสิ่งทอและเครื่องนุ่งห่ม คณะอุตสาหกรรมสิ่งทอ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ.*

ภาคผนวก ก

คำสมบัติทางกายภาพของโพลีเอทิลีน

ตาราง ก.1 ความหนาแน่นของโฟมยางที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนที่อัตราการไหล 30, 50 และ 80 มิลลิลิตรต่อนาที

ความหนาแน่น (g/cm ³)	อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที)		
	30	50	80
ชั้นที่ 1	0.17	0.13	0.11
ชั้นที่ 2	0.17	0.13	0.11
ชั้นที่ 3	0.19	0.14	0.12
STDEV	0.013	0.001	0.004
เฉลี่ย	0.18	0.13	0.11

ตาราง ก.2 การยุบตัวเนื่องจากแรงกดของโฟมที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนที่อัตราการไหล 30, 50 และ 80 มิลลิลิตรต่อนาที

การยุบตัวเนื่องจากแรงกด (เปอร์เซ็นต์)	อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที)		
	30	50	80
ชั้นที่ 1	1.88	3.23	4.14
ชั้นที่ 2	1.55	3.26	4.17
ชั้นที่ 3	2.11	2.71	4.22
STDEV	0.281	0.309	0.040
เฉลี่ย	1.85	3.07	4.18

ตาราง ก.3 ความสามารถในการคืนรูปของโฟมยางที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนที่อัตราการไหล 30, 50 และ 80 มิลลิลิตรต่อนาที

ความสามารถในการคืนรูป (เปอร์เซ็นต์)	อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที)		
	30	50	80
ชั้นที่ 1	98.12	96.77	95.86
ชั้นที่ 2	98.45	96.74	95.83
ชั้นที่ 3	97.89	97.29	95.78
STDEV	0.281	0.309	0.040
เฉลี่ย	98.15	96.93	95.82

ตาราง ก.4 ดัชนีความแข็งเชิงกดของโฟมยางที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนที่อัตราการไหล 30, 50 และ 80 มิลลิลิตรต่อนาที

ดัชนีความแข็งเชิงกด (N)	อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที)		
	30	50	80
ชั้นที่ 1	117.5	129.8	132.9
ชั้นที่ 2	120.9	125.6	128.1
ชั้นที่ 3	124.4	121.7	135.9
STDEV	3.450	4.050	3.934
เฉลี่ย	120.93	125.70	132.30

ตาราง ก.5 ดัชนีความแข็งเชิงกดที่เปลี่ยนไปหลังการบ่มแรงของโฟมยางที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนที่อัตราการไหล 30, 50 และ 80 มิลลิลิตรต่อนาที

ดัชนีความแข็งเชิงกดที่เปลี่ยนไปหลังการบ่มแรง (เปอร์เซ็นต์)	อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที)		
	30	50	80
ชั้นที่ 1	6.6	5.9	0.6
ชั้นที่ 2	5.6	6.2	1.0
ชั้นที่ 3	6.0	5.3	0.3
STDEV	0.503	0.458	0.351
เฉลี่ย	6.07	5.80	0.63

ตาราง ก.6 ความหนาแน่นของโฟมยางที่ผลิตจากฟองอากาศที่อัตราการไหล 50 มิลลิลิตรต่อนาที

ความหนาแน่น (g/cm ³)	อัตราการไหล 50 มิลลิลิตรต่อนาที
ชั้นที่ 1	0.10
ชั้นที่ 2	0.10
ชั้นที่ 3	0.10
STDEV	0.001
เฉลี่ย	0.10

ตาราง ก.7 การยุบตัวเนื่องจากแรงกดของโฟมยางที่ผลิตจากฟองอากาศที่อัตราการไหล 50 มิลลิลิตร ต่อนาที

การยุบตัวเนื่องจากแรงกด (เปอร์เซ็นต์)	อัตราการไหล 50 มิลลิลิตรต่อนาที
ชั้นที่ 1	3.06
ชั้นที่ 2	3.45
ชั้นที่ 3	3.72
STDEV	0.332
เฉลี่ย	3.41

ตาราง ก.8 ความสามารถในการคืนรูปของโฟมยางที่ผลิตจากฟองอากาศที่อัตราการไหล 50 มิลลิลิตร ต่อนาที

ความสามารถในการคืนรูป (เปอร์เซ็นต์)	อัตราการไหล 50 มิลลิลิตรต่อนาที
ชั้นที่ 1	96.94
ชั้นที่ 2	96.55
ชั้นที่ 3	96.28
STDEV	0.332
เฉลี่ย	96.59

ตาราง ก.9 ดัชนีความแข็งเชิงกดของโฟมยางที่ผลิตจากฟองอากาศที่อัตราการไหล 50 มิลลิลิตรต่อ นาที

ดัชนีความแข็งเชิงกด (N)	อัตราการไหล 50 มิลลิลิตรต่อนาที
ชั้นที่ 1	95.4
ชั้นที่ 2	107
ชั้นที่ 3	93.2
STDEV	7.586
เฉลี่ย	98.6

ตาราง ก.10 ดัชนีความแข็งแรงเชิงกตที่เปลี่ยนไปหลังการบ่มแรงของโพนยางที่ผลิตจากฟองอากาศที่อัตราการไหล 50 มิลลิลิตรต่อนาที

ดัชนีความแข็งแรงเชิงกตที่เปลี่ยนไปหลังการบ่มแรง (%)	อัตราการไหล 50 มิลลิลิตรต่อนาที
ชั้นที่ 1	14.04
ชั้นที่ 2	12.80
ชั้นที่ 3	13.42
STDEV	0.620
เฉลี่ย	13.42

ตาราง ก.11 ดัชนีออกซิเจนจำกัดของโพนยางที่ผลิตจากฟองก๊าซไนโตรเจนที่อัตราการไหล 30, 80 และ 150 มิลลิลิตรต่อนาที

ดัชนีออกซิเจนจำกัด (%)	อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที)		
	30	80	150
ชั้นที่ 1	18.43	18.23	18.48
ชั้นที่ 2	18.43	18.17	18.00
ชั้นที่ 3	18.43	18.25	18.65
STDEV	0	0.042	0.337
เฉลี่ย	18.43	18.22	18.38

ตาราง ก.12 ดัชนีออกซิเจนจำกัดของโพนยางที่ผลิตจากฟองอากาศที่อัตราการไหล 30, 80 และ 150 มิลลิลิตรต่อนาที

ดัชนีออกซิเจนจำกัด (%)	อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที)		
	30	80	150
ชั้นที่ 1	17.41	16.97	17.39
ชั้นที่ 2	17.75	17.55	17.79
ชั้นที่ 3	17.29	16.76	17.24
STDEV	0.239	0.409	0.284
เฉลี่ย	17.48	17.09	17.47

ตาราง ก.13 ดัชนีออกซิเจนจำกัดของโพลีเมอร์ที่ผลิตจากกระบวนการตันลอป

ดัชนีออกซิเจนจำกัด (%)	ตันลอปโพลีเมอร์
ชั้นที่ 1	17.79
ชั้นที่ 2	18.10
ชั้นที่ 3	17.68
STDEV	0.218
เฉลี่ย	17.86

ภาคผนวก ข

อนุสิทธิบัตร บทความวิจัยที่นำเสนอและได้รับการตีพิมพ์

เลขที่อนุสิทธิบัตร 14401



อสป/200 - ข

อนุสิทธิบัตร

อาศัยอำนาจตามความในพระราชบัญญัติสิทธิบัตร พ.ศ. 2522
แก้ไขเพิ่มเติมโดยพระราชบัญญัติสิทธิบัตร (ฉบับที่ 3) พ.ศ. 2542
ที่กรมทรัพย์สินทางปัญญาออกอนุสิทธิบัตรฉบับนี้ให้แก่

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

สำหรับการประดิษฐ์ตามรายละเอียดการประดิษฐ์ ข้อถ้อยสิทธิ และรูปเขียน (ถ้ามี)
กฎในอนุสิทธิบัตรนี้

เลขที่คำขอ 1803000736

วันรับอนุสิทธิบัตร 20 กุมภาพันธ์ 2561

ผู้ประดิษฐ์ นางสาวมัทนา ช่างคมโฉม และคณะ

ส่งถึงการประดิษฐ์ กระบวนการผลิตไฟมยางจากน้ำยางธรรมชาติโดยใช้ไมโครบับเบิล

ให้ผู้ทรงอนุสิทธิบัตรและหน้าที่ตามกฎหมายว่าด้วยสิทธิบัตรทุกประการ

ออกให้ ณ วันที่ 18 เดือน กันยายน พ.ศ. 2561

หมดอายุ ณ วันที่ 19 เดือน กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2567



(ลงชื่อ).....

(นายตฤณ บุญแท้)

รองอธิบดีกรมทรัพย์สินทางปัญญา ปฏิบัติราชการแทน

อธิบดีกรมทรัพย์สินทางปัญญา

ผู้ออกอนุสิทธิบัตร

พนักงานเจ้าหน้าที่

หมายเหตุ 1. ผู้ทรงอนุสิทธิบัตรต้องชำระค่าธรรมเนียมรายปีเริ่มแต่ปีที่ 5 ของอายุสิทธิบัตร มิฉะนั้น อนุสิทธิบัตรจะสิ้นสุดอายุ

2. ผู้ทรงอนุสิทธิบัตรจะขอชำระค่าธรรมเนียมรายปีล่วงหน้าโดยชำระทั้งหมดในคราวเดียวก็ได้

3. ภายใน 90 วันก่อนวันสิ้นสุดอายุอนุสิทธิบัตร ผู้ทรงอนุสิทธิบัตรมีสิทธิขอต่ออายุอนุสิทธิบัตรได้ 2 ครั้ง มีกำหนดคราวละ 2 ปี โดย

ยื่นคำขอต่ออายุ ต่อพนักงานเจ้าหน้าที่

4. การอนุญาตให้ใช้สิทธิตามอนุสิทธิบัตรและการโอนอนุสิทธิบัตรต้องทำเป็นหนังสือและจดทะเบียนต่อพนักงานเจ้าหน้าที่

036986

The Effect of Nitrogen Bubbles on Microstructure of Natural Rubber Foams Produced by Bubbling Process

Kuntida Katkeaw^{1,a}, Benjaporn Nooklay^{2,b}, Rungrote Kokoo^{3,c},
 Kalayanee Kooptarnond^{1,d} and Matthana Khangkhamano^{1,e}

¹Department of Mining and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hatyai, Songkhla, 90112, Thailand.

²Scientific Equipment Center, Prince of Songkla University, Hatyai, Songkhla, 90112, Thailand.

³Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, 10800, Thailand.

^akuntida.psu@gmail.com, ^bnooklay_@hotmail.com, ^crungrote.k@eng.kmutnb.ac.th,
^dkalayanee.k@psu.ac.th, ^ekmatthana@eng.ac.th

Keywords: Natural rubber, Rubber foam, Rubber foam production, Nitrogen, bubbling process

Abstract. Natural rubber latex foam (NRF) was produced using nitrogen bubbling process. The process involved flowing of nitrogen with a constant flow rate of 80 cc/min through a bubble column, filled with latex compound, to generate a high bubble-volume inside the column. Microstructure of the finished product was examined using a scanning electron microscope (SEM), in comparison with that of the purchased Dunlop foam. The results showed characteristic of the as-produced foam that they composed of spherical pores with a uniform interconnected-cell structures. On the other hand, the Dunlop foam exhibited non-spherical pores and non-uniform cell structure with broken cells.

Introduction

The porous rubber products from the natural rubber latex (NRL) are called latex foam. These natural latex foams (NRFs) have a variety of applications, such as pillows, cushions and mattresses [1]. Although Dunlop and Talalay processes are commonly used for manufacturing NRFs, Talalay is less popular due to high production cost and complexity of the process. Nevertheless, the cell structure, pore-size distribution, and mechanical properties of the NRFs produced from Talalay process are better than those fabricated by Dunlop technique. This is because Dunlop process uses of high-speed stirring Hobart mixer to produce a high-volume bubbles leading to a broken cell structure and non-uniform pore size distribution within the foams [2, 3]. Moreover, degradation of the Dunlop foams due to the action of oxygen in the air is also the problem for long-term service. This is because oxidation reaction leads to the deterioration in the physical and mechanical properties of rubber products [4].

In order to overcome those drawbacks suffering from Dunlop process, broken cell structure and non-uniform pore size as well as degradation problem, an alternative technique is introduced here by the application of bubbling process to generate a high-bubble volume, instead of the use of Hobart mixer. By using this technique with nitrogen flow, a crack-free and uniform cell structure with superior oxidation resistance is expected. In this study, NRF was fabricated via bubbling technique using nitrogen to produce a high-bubble volume. Microstructure of the bubbled foam was studied, in comparison with that of the purchased Dunlop foam. The results are reported and discussed.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล นางสาวกุลธิดา เกตุแก้ว
 รหัสประจำตัวนักศึกษา 6010120057
 วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมวัสดุ)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2560

ทุนการศึกษา

1. ทุนศิษย์ก้นกุฏิ ปีงบประมาณ 2559
2. ทุนอุดหนุนวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ ปีงบประมาณ 2561

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

1. Matthana Khanghamano, Rungrote Kokoo, Sanit Sirikulchaikij and kultida Katkeaw. Patty Patent No. 1803000736, February 20, 2018
2. Kuntida Katkeaw, Benjaporn Nooklay, Rungrote Kokoo, Kalayanee Kooptarnond and Matthana Khanghamano. "The Effect of Nitrogen Bubbles on Microstructure of Natural Rubber Foams Produced by Bubbling Process" 2rd. International Conference on Sensors, Materials and Manufacturing (ICSMM 2018) National Taipei University of Technology, Taipei, Taiwan November 19-21, 2018.