



การผลิตโฟมยางธรรมชาติโดยใช้ไมโครบับเบิล
Natural Latex Foam Production via Microbubbles

सानิตย์ ศิริกุลชัยกิจ
Sanit Sirikulchaikij

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

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

2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



การผลิตโฟมยางธรรมชาติโดยใช้ไมโครบับเบิล
Natural Latex Foam Production via Microbubbles

सानิตย์ ศิริกุลชัยกิจ
Sanit Sirikulchaikij

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

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

2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การผลิตโพลีเมอร์ธรรมชาติโดยใช้ไมโครบับเบิล
 ผู้เขียน นายสานิตย์ ศิริกุลชัยกิจ
 สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....
 (ดร.มัทนา ช้างคะมโน)

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

.....กรรมการ
 (ดร.มัทนา ช้างคะมโน)

.....กรรมการ
 (รองศาสตราจารย์ กัลยาณี คุปตานนท์)

.....กรรมการ
 (ดร.สมใจ จันทร์อุดม)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
 ส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา
 วิศวกรรมวัสดุ

.....
 (ศาสตราจารย์ ดร.ดำรงศักดิ์ ฟ้ารุ่งสว่าง)
 คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....

(ดร.มัทนา ช้างคะมโน)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลงชื่อ.....

(นายสานิตย์ ศิริกุลชัยกิจ)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นายसानิตย์ ศิริกุลชัยกิจ)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การผลิตโพนยางธรรมชาติโดยใช้ไมโครบับเบิล
ผู้เขียน	นายสานิตย์ ศิริกุลชัยกิจ
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ
ปีการศึกษา	2562

บทคัดย่อ

ปัจจุบันโพนยางธรรมชาติผลิตจากสองกระบวนการหลัก คือ ดันลอย และ ทาลาเลย์ สำหรับประเทศไทยจะใช้กระบวนการดันลอยในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์โพนยาง เช่น หมอน หมอนอิง และที่นอน ในขณะที่กระบวนการทาลาเลย์ไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากเป็นวิธีที่ซับซ้อนและมีราคาแพง อย่างไรก็ตามผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการทาลาเลย์มีความยืดหยุ่นและสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการดันลอย ซึ่งเป็นเพราะว่ามีโครงสร้างของเซลล์และการกระจายตัวของรูพรุนที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับโพนยางจากกระบวนการดันลอย

ไมโครบับเบิลหรือฟองก๊าซขนาดเล็ก ได้ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย เช่น การบำบัดน้ำเสีย การเพาะเลี้ยงปลา และ การคัดแยกขนาดอนุภาค เป็นต้น แต่ยังไม่พบการใช้งานทางด้านอุตสาหกรรมการยาง งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาการเตรียมโพนยางธรรมชาติจากฟองอากาศขนาดเล็ก ซึ่งสามารถขึ้นรูปโพนยางได้โดยการให้อากาศไหลผ่านแผ่นกรองดิฟฟิวเซอร์แล้วผ่านน้ำยางคอมพาวด์ที่บรรจุอยู่ในบับเบิลคอลัมน์เพื่อทำให้เกิดฟองอยู่ในคอลัมน์ ศึกษาผลของขนาดรูพรุนดิฟฟิวเซอร์ (40-100 ไมครอน: P2) (16-40 ไมครอน: P3) และ (10-16 ไมครอน: P4) ต่อการขึ้นรูปโพนยาง และศึกษาผลของอัตราการไหลขาเข้าของอากาศที่ 20 50 และ 100 มิลลิลิตรต่อนาที ต่อสมบัติทางกายภาพของโพนยางเปรียบเทียบกับโพนยางที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการดันลอย (ดันลอยโพน) พบว่า โพนยางที่เตรียมจากไมโครบับเบิล (บับเบิลโพน) จะมีขนาดเซลล์ที่ใหญ่ขึ้นตามขนาดของรูพรุนดิฟฟิวเซอร์ที่เพิ่มขึ้น หรือตามอัตราการไหลของอากาศขาเข้าที่เพิ่มขึ้น ลักษณะของเซลล์ภายในโพนยางดังกล่าวมีลักษณะเป็นทรงกลม มีการกระจายตัวสม่ำเสมอและมีการเชื่อมต่อของเซลล์แบบต่อเนื่อง ในขณะที่ดันลอยโพน เซลล์เกิดการ ฉีกขาด การเชื่อมต่อกันระหว่างเซลล์ไม่ดี และการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ ค่าความหนาแน่นของ ดันลอยโพน มีค่าสูงกว่าบับเบิลโพนที่ทุก ๆ อัตราการไหล โดยค่าความหนาแน่นของบับเบิลโพน สามารถปรับเปลี่ยนได้โดยการปรับอัตราการไหล เนื่องจากค่าความหนาแน่นของบับเบิลโพนลดลงตามอัตราการไหลของอากาศที่เพิ่มขึ้น ค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงกดของบับเบิลโพนจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลของอากาศที่เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน และเมื่อเปรียบเทียบกับดันลอยโพน พบว่าค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงกดของบับเบิลโพน มีค่าเปอร์เซ็นต์การยุบตัวน้อยกว่า ซึ่งบ่งบอกถึงการยืดหยุ่นที่ดีของบับเบิลโพน นอกจากนี้ค่าดัชนีความแข็งเชิงกดของบับเบิลโพนบ่งบอกว่าโพนยางที่ผลิตได้ที่ทุกอัตราการไหล เป็นโพนยางประเภทนิ่มเนื่องจากค่าดัชนีความแข็งเชิงกดไม่เกิน 100 นิวตัน เช่นเดียวกับดันลอยโพน

Thesis title Natural latex foam production via microbubbles
Author Mr. Sanit Sirikulchaikij
Major program Materials Engineering
Academic year 2019

Abstract

Dunlop and Talalay are well-known methods for natural rubber latex foam production. In Thailand, Dunlop process is mainly used for the manufacture of thick-molded latex foam products such as pillows, cushions, and mattresses, while Talalay is not popular due to complicated and expensive method. Nevertheless, the products produced from Talalay technique show better flexibility and mechanical properties than Dunlop products. This is because they have better cell structure and pore-size distribution as compared to the Dunlop ones.

Microbubbles are widely used in many applications such as wastewater treatment, fish farming, and particle size separation. However, up to date, there is no application in the field of latex foam production. In this research, therefore, microbubbles are applied to fabricate natural rubber foams by flowing air through a porous diffuser with different flow rates. The effects of diffuser's pore size (P2, P3, P4) and air flow rate (20, 50, 100 ml/min) on microstructure and physical properties of the as-prepared rubber foams were investigated in comparison with those of the Dunlop foams. The results show that air microbubbles could be effectively used to fabricate natural latex foam with an exceptional microstructure of spherical cell shape with crack-free interconnected network structure. In contrast, Dunlop foams provided irregular cell shape with partially interconnected network and non-uniform cell size distribution. Pore size of the diffuser and the flow rate affected strongly cell size of the bubbled foams and hence physical properties of the foams. Large pore size of the diffuser led to a large cell size of the foam. Similarly, the cell size increased significantly with the increased air flow rate. Density of the bubbled foams decreased with the increased flow rates. The compression set percentage decreased with the decreased flow rate. The hardness index pointed out that all the bubbled foams produced were classified as a soft latex with a value of less than 100 newtons.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอแสดงความขอบคุณสำหรับความช่วยเหลือ และความกรุณาของบุคคลเหล่านี้ที่มีส่วนร่วมทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ ดร.มัทนา ชังคะมโณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก สำหรับคำแนะนำ คำปรึกษา งบประมาณในการทำวิจัย ความเอาใจใส่ตลอดระยะเวลาที่ทำการวิจัย และการศึกษาวิจัยที่นำไปสามารถประยุกต์ใช้ในชีวิตประจำวันได้

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ กัลยาณี คุปตานนท์ ที่ให้คำแนะนำ คำชี้แนะ และการศึกษาวิจัยที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในชีวิตประจำวันได้

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รุ่งโรจน์ เกาะคู ที่ให้คำปรึกษาในส่วนของการรวบรวมข้อมูล ไมโครแบคทีเรีย รวมทั้งการออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง วิธีการทดลอง และงบประมาณในการทำวิจัย

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีระชัย แสงฉาย ประธานกรรมการสอบ และ ดร.สมใจ จันทร์อุดม กรรมการสอบ ที่ให้เกียรติมาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ ขอขอบคุณสำหรับคำแนะนำ และข้อเสนอแนะต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อผู้วิจัย

ขอขอบคุณ คุณเบญจพร หนูคล้าย สำหรับความช่วยเหลือในการวิเคราะห์ผลการทดลอง และคำปรึกษาต่าง ๆ จนจบงานวิจัย

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันวิจัยความเป็นเลิศด้านวิศวกรรมวัสดุ ทุนอุดหนุนเพื่อการวิจัย และทุนบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ขอขอบคุณ บิดา มารดา ญาติพี่น้อง สำหรับกำลังใจ และการสนับสนุนที่มีผลอย่างยิ่งตลอดในการทำวิจัย

ขอขอบคุณ น้อง พี่ เพื่อน และเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ ที่ให้ความช่วยเหลือ และให้กำลังใจกันตลอด

सानิตย์ ศิริกุลชัยกิจ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(5)
กิตติกรรมประกาศ	(7)
สารบัญ	(8)
สารบัญรูป	(12)
สารบัญตาราง	(15)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของหัวข้อวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
1.5 โครงสร้างของเล่มวิทยานิพนธ์	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ยาง	5
2.2 ยางธรรมชาติ	5
2.3 โครงสร้างของยางธรรมชาติ	5
2.4 ส่วนที่เป็นเนื้อยาง	7
2.4.1 อนุภาคยาง	7
2.4.2 โพรตีน	8
2.4.3 ไหม้น	8
2.5 ส่วนที่ไม่ใช่ยาง	8
2.5.1 ส่วนที่เป็นน้ำ	8
2.5.2 ส่วนของลูทอยด์	8
2.6 สมบัติของยางธรรมชาติ	9
2.6.1 ความต้านทานต่อแรงดึง	9
2.6.2 สมบัติเชิงพลวัต	9
2.6.3 ความต้านทานต่อการฉีกขาด	9
2.6.4 ความยืดหยุ่น	9
2.6.5 สมบัติทางกายภาพ	9
2.6.6 ความสามารถในการแปรรูป	9
2.7 น้ำยางชั้น	9
2.8 ประวัติการทำน้ำยางชั้น	10

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.9 การผลิตโฝมยาง	10
2.9.1 กระบวนการต้นลอป	11
2.9.2 กระบวนการทาลาเลย์	12
2.10 การผสมสารเคมีสำหรับกระบวนการผลิตโฝมยาง	14
2.10.1 สารวัลคาไนซ์	15
2.10.2 สารเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนซ์	15
2.10.3 สารต้านทานปฏิกิริยาการออกซิเดชัน	17
2.10.4 สารช่วยให้เกิดฟอง	17
2.10.5 สารรักษาความเสถียรของฟอง	17
2.10.6 สารกระตุ้นปฏิกิริยาวัลคาไนซ์	19
2.10.7 สารก่อเจล	19
2.11 ทฤษฎีเบื้องต้นของโฝมพอลิเมอร์	20
2.11.1 กระบวนการเกิดโฝม	20
2.11.2 โครงสร้างเซลล์และสมบัติของโฝมยาง	21
2.11.3 สมบัติการนำความร้อนของโฝม	22
2.12 การผลิตบับเบิล	23
2.12.1 การเกิดบับเบิล	23
2.12.2 ความเร็วในการลอยตัวของบับเบิล	23
2.12.3 บับเบิลคออลัมน์	25
2.13 ไมโครบับเบิล	26
2.14 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	27
บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์ ขั้นตอนการทดลอง และวิธีการวิเคราะห์	31
3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	31
3.1.1 น้ำยางธรรมชาติชั้นชนิดแอมโมเนียสูง	31
3.1.2 โฟแทสเซียมโอเลียด	31
3.1.3 กำมะถัน	31
3.1.4 ซิงค์ไดเอทิลไดโธโอคาร์บาเมต	31
3.1.5 ซิงค์เมอร์แคปโตเบนโซไทอาโซล	31
3.1.6 วิงสเตย์แอล	31
3.1.7 ซิงค์ออกไซด์	31
3.1.8 ไดฟีนิกิติน	31
3.1.9 โซเดียมซิติโคฟลูออไรด์	31

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 อุปกรณ์	32
3.2.1 ป้อนลมอากาศ	32
3.2.2 บับเบิลคอลัมน์	32
3.2.3 ดิฟฟิวเซอร์	33
3.2.4 เครื่องวัดอัตราการไหล	33
3.2.5 เบ้าพิมพ์	34
3.2.6 ชุดตีฟองใช้เครื่องตีไข่เนกประสงค์	34
3.2.7 เครื่องกวน	35
3.3 กระบวนการทดลอง	35
3.3.1 ออกแบบและจัดสร้างชุดการทดลอง	35
3.3.2 การเตรียมน้ำยาคอมปาวด์	36
3.3.2.1 สูตรที่ใช้ในการผลิตโฟมยาง	36
3.3.3 การขึ้นรูปโฟมยางด้วยกระบวนการไมโครบับเบิล	37
3.3.3.1 การเตรียมโฟมยางธรรมชาติโดยใช้กระบวนการไมโครบับเบิล	37
3.3.4 การขึ้นรูปโฟมยางด้วยกระบวนการดันลอป	41
3.4 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ	44
3.4.1 การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยา	44
3.4.2 ความหนาแน่น	45
3.4.3 จำนวนเซลล์ต่อปริมาตรที่อยู่ในโฟมยาง	45
3.4.4 การทดสอบค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงกด	46
3.4.5 การทดสอบดัชนีความแข็งเชิงกด	47
บทที่ 4 ผลการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลอง	48
4.1 การออกแบบชุดการทดลอง	48
4.1.1 แบบชุดทดลองที่ 1	48
4.1.2 แบบชุดทดลองที่ 2	49
4.1.3 แบบชุดทดลองที่ 3	50
4.2 ผลของขนาดรูพรุนดิฟฟิวเซอร์ต่อการขึ้นรูปโฟมยางจากไมโครบับเบิล	52
4.2.1 ผลของขนาดรูพรุนดิฟฟิวเซอร์ต่อการขึ้นรูปโฟมยางจากไมโครบับเบิล	52
4.2.2 ผลของขนาดรูพรุนดิฟฟิวเซอร์ต่อโครงสร้างทางจุลภาค	53
4.3 ผลของอัตราการไหลของอากาศต่อการขึ้นรูปโฟมยาง	54
4.3.1 ผลของอัตราการไหลของอากาศต่อการขึ้นรูปโฟมยางเปรียบเทียบกับดันลอปโฟม	54

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.2 ผลของอัตราการไหลของอากาศต่อโครงสร้างทางจุลภาค ของโฝมยางเปรียบเทียบกับตันลอปโฝม	55
4.4 สมบัติทางกายภาพของโฝมยาง	59
4.4.1 ผลของการทดสอบความหนาแน่นของโฝมยางจากกระบวนการ ไมโครบับเบิลและกระบวนการตันลอป	59
4.4.2 ผลของการทดสอบการยุบตัวและการคืนตัวเนื่องจากแรงกดของโฝม ยางที่ผลิตจากกระบวนการไมโครบับเบิลและกระบวนการตันลอป	60
4.4.3 ผลของการทดสอบดัชนีความแข็งเชิงกดของโฝมยางที่ผลิตจาก กระบวนการผลิตจากไมโครบับเบิลและกระบวนการตันลอป	62
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	63
5.1 ผลของขนาดรูพรุนดีฟิวเซอร์ต่อการขึ้นรูปโฝมยางจากไมโครบับเบิล	63
5.2 ผลของอัตราการไหลของอากาศต่อการขึ้นรูปโฝมยางจากไมโครบับเบิล	63
5.3 ผลของโครงสร้างต่อสมบัติทางกายภาพโฝมยางจากกระบวนการ ไมโครบับเบิลและกระบวนการตันลอป	63
5.4 ข้อเสนอแนะ	64
บรรณานุกรม	65
ภาคผนวก	70
ประวัติผู้เขียน	77

สารบัญญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 แสดงภาพตัวอย่างการผลิตโฟม	2
รูปที่ 1.2 แสดงภาพตัวอย่างโครงสร้างของโฟม	2
รูปที่ 1.3 แสดงหลักการสร้างฟองอากาศสำหรับผลิตโฟมยาง	3
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของยางธรรมชาติ	6
รูปที่ 2.2 ลักษณะอนุภาคยางธรรมชาติ	7
รูปที่ 2.3 แสดงกระบวนการผลิตแบบตันลอป	11
รูปที่ 2.4 แสดงกระบวนการผลิตแบบทาลาเลย์	13
รูปที่ 2.5 สูตรโครงสร้างโมเลกุลของ ZDEC	15
รูปที่ 2.6 สูตรโครงสร้างโมเลกุลของ ZMBT	16
รูปที่ 2.7 สูตรโครงสร้างโมเลกุลของ DPG	16
รูปที่ 2.8 ภาพแสดงการเพิ่มความเสถียรโดยการใส่สเตาปีไลเซอร์ไปต่อหัวอนุภาคยาง	18
รูปที่ 2.9 แสดงความสัมพันธ์ของ pH ที่ทำให้เกิดการเจลของฟองน้ำที่เวลาต่าง ๆ	19
รูปที่ 2.10 แสดงรูปร่างของบับเบิลขณะที่ผ่านของเหลว	24
รูปที่ 2.11 ความเร็วในการลอยตัวของฟองก๊าซ	24
รูปที่ 2.12 การไหลของบับเบิลที่เป็นไปได้ในบับเบิลคอลัมน์	26
รูปที่ 2.13 ฟลูอิดิก ออสซิลเลเตอร์	27
รูปที่ 3.1 ถังป้อนลมอากาศ	32
รูปที่ 3.2 บับเบิลคอลัมน์	32
รูปที่ 3.3 แผ่นดีฟิวเซอร์	33
รูปที่ 3.4 ตัววัดอัตราการไหล	33
รูปที่ 3.5 เบ้าพิมพ์อะลูมิเนียม	34
รูปที่ 3.6 เครื่องตีไข่อเนกประสงค์	34
รูปที่ 3.7 เครื่องกวน	35
รูปที่ 3.8 ชุดการทดลองกระบวนการไมโครบับเบิล	35
รูปที่ 3.9 ถังป้อนน้ำยาง	36
รูปที่ 3.10 การติดตั้งอุปกรณ์ของกระบวนการไมโครบับเบิล	37
รูปที่ 3.11 แสดงการทำให้เกิดฟองด้วยไมโครบับเบิล	38

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.12 กวนด้วยความเร็วต่ำ	38
รูปที่ 3.13 แสดงการเทใส่เข้าพิมพ์	39
รูปที่ 3.14 การวัดคาบไวนซ์ของฟองยางในเตาอบ	39
รูปที่ 3.15 ผลิตภัณฑ์โฟมยาง (ไมโครบับเบิล)	39
รูปที่ 3.16 แผนผังสรุปการขั้นตอนการทำโฟมยางด้วยกระบวนการไมโครบับเบิล	40
รูปที่ 3.17 น้ำยาคอมปาวดีในหม้อกวน	41
รูปที่ 3.18 กวนด้วยความเร็วรอบสูงเพื่อให้เกิดฟอง	41
รูปที่ 3.19 เทใส่เข้าพิมพ์และตั้งไว้ให้เกิดการเซตตัว	42
รูปที่ 3.20 การวัดคาบไวนซ์ของฟองยางในเตาอบ (ต้นลอป)	42
รูปที่ 3.21 ผลิตภัณฑ์โฟมยาง (ต้นลอป)	42
รูปที่ 3.22 แผนผังสรุปการเตรียมโฟมยางธรรมชาติโดยใช้กระบวนการต้นลอป	43
รูปที่ 3.23 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	44
รูปที่ 3.24 เครื่องทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงกด	46
รูปที่ 3.25 เครื่องทดสอบดัชนีความแข็งเชิงกด	47
รูปที่ 4.1 แบบชุดทดลองที่ 1	48
รูปที่ 4.2 ชุดการทดลองกระบวนการไมโครบับเบิลครั้งที่ 1	49
รูปที่ 4.3 แบบชุดทดลองที่ 2	49
รูปที่ 4.4 ชุดการทดลองกระบวนการไมโครบับเบิลครั้งที่ 2	50
รูปที่ 4.5 แบบชุดทดลองที่ 3	51
รูปที่ 4.6 ชุดการทดลองกระบวนการไมโครบับเบิลครั้งที่ 3	51
รูปที่ 4.7 (ก) โฟมยางที่ได้จากขนาดดิวเซอร์ P2 (ข) โฟมยางที่ได้จากขนาดดิวเซอร์ เซอร์ P3 และ (ค) โฟมยางที่ได้จากขนาดดิวเซอร์ P4	52
รูปที่ 4.8 แสดงภาพโครงสร้างจุลภาคที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงและกล้อง จุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของตัวอย่างโฟมยางที่ขึ้นรูปที่อัตราการ ไหลของอากาศเข้าคงที่เท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที โดย (ก)-(ข) ดิวเซอร์ P3 และ (ค)-(ง) ดิวเซอร์ P4	53
รูปที่ 4.9 แสดงภาพถ่ายชิ้นงานโฟมยางที่ได้จากการใช้อัตราการไหลของอากาศที่ แตกต่างกันโดยใช้ขนาดรูพรุนของดิวเซอร์คงที่ P4 เปรียบเทียบกับ ต้นลอปโฟม	54
รูปที่ 4.10 แสดงภาพตัดขวางของโฟมยาง (ก) กระบวนการต้นลอป (ข) 20 มิลลิลิตรต่อ นาที (ค) 50 มิลลิลิตรต่อนาที (ง) 100 มิลลิลิตรต่อนาที	55

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.11 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างของโพนในระดับจุลภาค (ก) OM และ (ข) SEM ด้นลอปโพน (ค) OM และ (ง) SEM ที่ 20 มิลลิเมตรต่อนาที (จ) OM และ (ฉ) SEM ที่ 50 มิลลิเมตรต่อนาที และ (ช) OM และ (ฌ) SEM ที่ 100 มิลลิเมตร ต่อนาที	56
รูปที่ 4.12 การกระจายตัวของเซลล์ของโพนยางที่ผลิตจาก (ก) กระบวนการด้นลอป (DF) (ข) กระบวนการไมโครบับเบิล 20 มิลลิเมตรต่อนาที (BF20) (ค) กระบวนการไมโครบับเบิล 50 มิลลิเมตรต่อนาที (BF50) และ (ง) กระบวนการไมโครบับเบิล 100 มิลลิเมตรต่อนาที (BF100)	58
รูปที่ 4.13 กราฟเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นของโพนยางจากกระบวนการด้นลอป (DF) และกระบวนการไมโครบับเบิล (BF) ที่ผลิตจากอัตราการไหล 20 50 และ 100 มิลลิเมตรต่อนาที	59
รูปที่ 4.14 กราฟเปรียบเทียบค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงกดของโพนยางจากกระบวนการ ด้นลอป (DF) และกระบวนการไมโครบับเบิล (BF) ที่ผลิตจากอัตราการไหล 20 50 และ 100 มิลลิเมตรต่อนาที	60
รูปที่ 4.15 กราฟเปรียบเทียบค่าการคืนตัวเนื่องจากแรงกดของโพนยางจากกระบวนการ ด้นลอป (DF) และกระบวนการไมโครบับเบิล (BF) ที่ผลิตจากอัตราการไหล 20 50 และ 100 มิลลิเมตรต่อนาที	61
รูปที่ 4.16 กราฟเปรียบเทียบค่าดัชนีความแข็งเชิงกดของโพนยางจากกระบวนการ ด้นลอป (DF) และกระบวนการไมโครบับเบิล (BF) ที่ผลิตจากอัตราการไหล 20 50 และ 100 มิลลิเมตรต่อนาที	62

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบของน้ำยางธรรมชาติ	6
ตารางที่ 2.2 ส่วนประกอบของเนื้อยางแห้ง	7
ตารางที่ 2.3 สูตรน้ำยางคอมปาวด์สำหรับการทำโฟมยาง	11
ตารางที่ 2.4 ข้อผิดพลาดและการแก้ไขสำหรับการผลิตยางฟองน้ำ	14
ตารางที่ 4.5 มาตรฐานสมบัติทางกายภาพของโฟมยาง	59

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของหัวข้อวิจัย

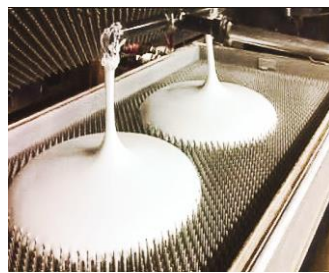
ยางธรรมชาติเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย และมีการส่งออกมากเป็นอันดับหนึ่งของโลก ประมาณ 3.8 ล้านตัน มีมูลค่าทั้งสิ้นประมาณ 159,000 ล้านบาท [1] อันเนื่องมาจากสภาพภูมิประเทศและสภาพอากาศร้อนชื้นซึ่งเหมาะกับการเจริญเติบโตของยางธรรมชาติ จึงทำให้มีอุตสาหกรรมยางเกิดขึ้นมากมายทั้งอุตสาหกรรมยางดิบและผลิตภัณฑ์ยาง เช่น โรงงานผลิตยางแผ่น ยางมียางและยางรถยนต์ เป็นต้น อีกทั้งยางธรรมชาติมีคุณสมบัติที่ดีเยี่ยมอยู่หลายประการ เช่น การเหนียวติดกันได้ดี มีความสามารถในการยืดหยุ่นสูง ทนทานต่อแรงดึงสูงโดยไม่ต้องเติมสารเสริมแรง มีความทนทานต่อการฉีกขาดสูงทั้งที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิสูง มีความต้านทานต่อการล้า ความต้านทานต่อการขีดถูสูง มีความเป็นฉนวนไฟฟ้าสูงมาก นอกจากนี้ยังทนต่อกรด และด่างอ่อน ทั้งหมดนี้ยางธรรมชาติจึงเหมาะต่อการนำมาทำเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เพื่อไปใช้งานได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามก็ยังมีสมบัติด้านการเสื่อมสภาพเร็วภายใต้แสงแดด ออกซิเจน โอโซน ความร้อน และการทมน้ำมัน ไม่ดี เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีพันธะคู่ (Double bond) อยู่มาก [2]

จากข้อมูลวิชาการพบว่าประเทศไทยมีการผลิตน้ำยางข้น (Concentrated Latex) ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตโฟมยางสำหรับที่นอน หมอน และวัสดุรองนั่งต่าง ๆ แต่ในปัจจุบันราคายางพาราภายในประเทศตกต่ำจึงจำเป็นต้องปรับปรุงกระบวนการผลิตโดยการลดต้นทุน เพื่อให้ผลิตภัณฑ์จากโฟมยางมีราคาต่ำลง ทำให้ผู้บริโภคสามารถใช้ผลิตภัณฑ์จากโฟมยางได้ทุกครัวเรือนและยังสามารถทำให้ราคายางพาราในท้องตลาดสูงขึ้นซึ่งจะเพิ่มรายได้ให้กับเกษตรกรผู้ปลูกยางพารา

การผลิตโฟมยางในปัจจุบันจะใช้กระบวนการดันลอป (Dunlop Process) และ ทาลาเลย์ (Talalay Process) ซึ่งกระบวนการแรกจะใช้เครื่อง Hobart mixer ในการกวนด้วยความเร็วรอบสูงเพื่อให้เกิดฟองอากาศ (รูปที่ 1.1ก) ทำให้โครงสร้างเซลล์โฟมที่ได้มีการฉีกขาดและแตกแยกของเซลล์ (รูปที่ 1.2 ก) ไม่เชื่อมต่อกันทั้งโครงสร้าง รวมทั้งการกระจายตัวของเซลล์ไม่สม่ำเสมอ ส่งผลต่อสมบัติของโฟมยางที่มีความนิ่มและความหนาแน่นไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน ในส่วนการผลิตด้วยกระบวนการทาลาเลย์ ซึ่งทำให้เกิดฟองโดยใช้แบบพิมพ์ที่ออกแบบมาพิเศษ (รูปที่ 1.1ข) เพราะขั้นตอนการผลิตมีทั้งการเพิ่มและลดอุณหภูมิรวมถึงการลดความดัน ทำให้กระบวนการมีความซับซ้อนและใช้พลังงานในการผลิตสูง แต่โฟมยางที่ได้มีโครงสร้างเซลล์เป็นทรงกลม เชื่อมต่อเป็นเครือข่ายอย่างสมบูรณ์ ไม่เกิดการฉีกขาด หรือ แยกออกของเซลล์ (รูปที่ 1.2ข) เซลล์กระจายตัวสม่ำเสมอ ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์โฟมยางมีความยืดหยุ่นดี มีความหนาแน่นและความนิ่มสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน

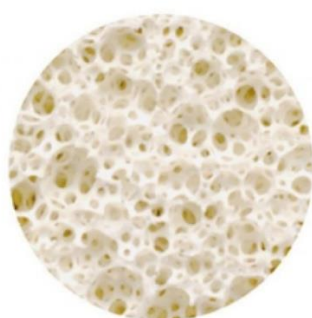


(ก)



(ข)

รูปที่ 1.1 แสดงภาพตัวอย่างการผลิตโฟม (ก) กระบวนการตีลอป และ (ข) กระบวนการทาลาเลย์ [3]



Talalay Process

(ก)



Dunlop Process

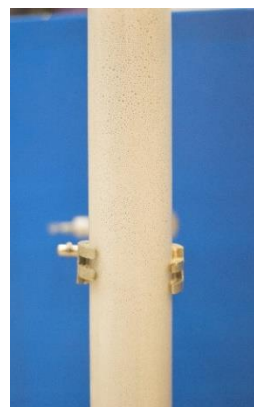
(ข)

รูปที่ 1.2 แสดงภาพตัวอย่างโครงสร้างของโฟมที่ผลิตจาก (ก) กระบวนการทาลาเลย์ และ (ข) กระบวนการตีลอป [4]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จะปรับเปลี่ยนกระบวนการตีลอป ในส่วนที่ทำให้เกิดฟอง (Foaming) มาใช้ไมโครบับเบิลจากอากาศ โดยปล่อยให้อากาศไหลผ่านแผ่นกรองดิฟฟิวเซอร์ (Diffuser) และน้ำยางชั้นที่ผสมสารเคมีต่าง ๆ และผ่านการบ่มแล้ว (รูปที่ 1.3) เพื่อทำให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็ก (ไมครอน) ที่มีขนาดสม่ำเสมอกระจายอยู่ทั่วโฟมยาง (Perfect bubbly) และสามารถเลือกขนาดของฟองอากาศได้ โดยการเปลี่ยนขนาดของดิฟฟิวเซอร์ ซึ่งจะทำให้สามารถผลิตโฟมยางที่มีความหนาแน่นแตกต่างกันได้



(ก)



(ข)

รูปที่ 1.3 แสดงหลักการสร้างฟองอากาศสำหรับผลิตโฟมยาง (ก) แสดงการทำให้เกิดฟองโดยอากาศไหลผ่านน้ำยางคอมปาวด์ (ข) แสดงการขยายตัวเพื่อให้เกิดฟองอากาศเต็มบับเบิลคอลัมน์

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาผลของขนาดรูพรุนของดีฟิวเซอร์ต่อโครงสร้างจุลภาคของโฟมยาง
- 1.2.2 ศึกษาผลของอัตราการไหลต่อสมบัติทางกายภาพของโฟมยาง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาการขึ้นรูปโฟมยางธรรมชาติ ด้วยกระบวนการไมโครบับเบิล โดยใช้ดีฟิวเซอร์ที่มีขนาดรูพรุนที่แตกต่างกันคือ (40-100 ไมครอน: P2) (16-40 ไมครอน: P3) และ (10-16 ไมครอน: P4) และขึ้นรูปโฟมยางธรรมชาติโดยใช้กระบวนการผลิตแบบดันลอป โดยใช้น้ำยางเริ่มต้นที่ 167 กรัม

1.3.2 ศึกษาการขึ้นรูปโฟมยางธรรมชาติ ด้วยกระบวนการไมโครบับเบิล ที่อัตราการไหลของอากาศที่ 20 มิลลิลิตรต่อนาที 50 มิลลิลิตรต่อนาที และ 100 มิลลิลิตรต่อนาที โดยใช้น้ำยางชั้นเริ่มต้นที่ 167 กรัม

1.3.3 ศึกษาการขึ้นรูปโฟมยางธรรมชาติด้วยกระบวนการดันลอป โดยใช้น้ำยางเริ่มต้นที่ 167 กรัม

1.3.4 ศึกษาเปรียบเทียบสมบัติของโฟมยางธรรมชาติระหว่างการผลิตโฟมยางธรรมชาติด้วยวิธีไมโครบับเบิลกับวิธีดันลอป ด้านสัณฐานวิทยา (Morphology) ความหนาแน่น (Density) การยุบตัวเนื่องจากแรงกด (Compression set) ดัชนีความแข็งเชิงกด (Indentation hardness index)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ได้องค์ความรู้ใหม่ในการผลิตโพลีเมอร์โดยใช้วิธีไมโครบับเบิล
- 1.4.2 ได้ทางเลือกใหม่ในการผลิตโพลีเมอร์ธรรมชาติ
- 1.4.3 ได้โพลีเมอร์ธรรมชาติที่สามารถกำหนดสมบัติได้ตามต้องการ

1.5 โครงสร้างของเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 5 บท

- 1.5.1 บทที่ 1 ประกอบด้วยความสำคัญและที่มาของหัวข้อวิจัย วัตถุประสงค์ ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และขอบเขตของงานวิจัย
- 1.5.2 บทที่ 2 ประกอบด้วยทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษางานวิจัย
- 1.5.3 บทที่ 3 ประกอบด้วยสารเคมี วัสดุ อุปกรณ์ วิธีการวิจัย และวิธีการทดสอบในการศึกษางานวิจัย
- 1.5.4 บทที่ 4 ประกอบด้วยผลการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลอง
- 1.5.5 บทที่ 5 ประกอบด้วยสรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ยาง

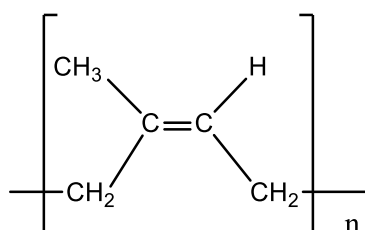
ยาง (Rubber) เป็นพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมีสมบัติเด่นโดยเฉพาะเรื่องของความยืดหยุ่น (Elasticity) สามารถยืดออกเมื่อได้รับแรงและหดตัวกลับสู่สภาพเดิมเมื่อเอาแรงออก มีสมบัติความเหนียวติด (Tack) ที่ดี มีความทนทานต่อการสึกกร่อน (Abrasion resistance) สามารถป้องกันการซึมผ่านของน้ำและอากาศได้ดี และมีความสามารถในการยึดติดกับวัสดุอื่น ๆ เช่น โลหะหรือสิ่งทอ จึงทำให้มีการนำไปใช้งานในทางวิศวกรรมมากขึ้น

2.2 ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR)

ยางธรรมชาติมาจากแหล่งกำเนิดในทวีปอเมริกาใต้ มีสายพันธุ์ที่หลากหลายซึ่งสามารถนำมาเป็นน้ำยางได้ น้ำยางมีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวถึงกับขาวปนเหลือง สีขุ่นข้น เป็นท่อเรียงตัวกันอยู่ภายในส่วนของเปลือกต้นยางพารา ถ้าต้องการให้น้ำยางออกมาจากต้นยาง จำเป็นต้องใช้มีดกรีดยางเพื่อที่จะให้ท่อของน้ำยางขาดออกจากกัน โดยในน้ำยางจะมีส่วนประกอบที่สำคัญ 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นเนื้อยาง (เนื้อยางแห้ง) และส่วนที่ไม่ใช่ยาง ดังแสดงในตารางที่ 2.1 โดยเนื้อยางแห้ง คือปริมาณของเนื้อยางที่อยู่ในน้ำยาง ซึ่งมีองค์ประกอบแสดงดังตารางที่ 2.2 โดยทั่วไปน้ำยางสดจะมีเนื้อยางแห้งประมาณ 25 ถึง 45 เปอร์เซ็นต์ น้ำยางมีความหนาแน่น 0.98 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีความเป็นกรด ต่าง (pH) ประมาณ 6.8 [5, 6]

2.3 โครงสร้างของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติ เป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นแบบ cis -1,4-polyisoprene (C₅H₈)_n ดังรูปที่ 2.1 โดยที่ n มีค่าอยู่ในช่วง 200,000 – 400,000 เป็นไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ทำให้ละลายได้ในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เฮกเซนหรือเฮกซีน มีโครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติเป็นแบบอสัณฐาน (Amorphous) มีสายโซ่ที่สามารถเคลื่อนไหวหักงอไปมาได้ง่าย ทำให้มีความยืดหยุ่นได้ดี โดยอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) ประมาณ -72 องศาเซลเซียส สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิต่ำ แต่ในบางครั้งโมเลกุลของยางก็สามารถจัดเรียงตัวได้เป็นระเบียบที่อุณหภูมิต่ำหรือเมื่อถูกยืดออกไป มันจะสามารถเกิดผลึกได้ การที่จะเกิดผลึกที่อุณหภูมิต่ำ (low temperature crystallization) สามารถที่จะทำให้อยางมีความแข็งแรงมากขึ้น แต่ที่อุณหภูมียิ่งสูงขึ้นยางก็จะมีความอ่อนตัว และสามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้ ในขณะที่เกิดผลึกจากการยืด (Strain induce crystallize) ยังคงสามารถทำให้อยางคงรูปและมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น จึงทำให้อยางมีความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ทนทานต่อการฉีกขาด (Tear resistance) และต้านทานต่อการขีดถูสูง ในโครงสร้างของยางจะมีพันธะคู่ที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา ทำให้อยางธรรมชาติสามารถวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันได้ง่าย อย่างไรก็ตามยางธรรมชาติจะเกิดการเสื่อมสภาพเมื่อทำปฏิกิริยากับออกซิเจนหรือโอโซนซึ่งยังเป็นข้อด้อยอยู่ [5,6]



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของยางธรรมชาติ cis-1,4- polyisoprene

ทราบกันดีว่ายางธรรมดานั้นมีสมบัติที่ดีเยี่ยมเหมาะสำหรับการนำไปทำเป็นผลิตภัณฑ์ยางต่าง ๆ แต่ยางธรรมชาติมีข้อเสียคือว่องไวต่อการเสื่อมสภาพเร็วภายใต้แสงแดด ออกซิเจน โอโซน และความร้อน เนื่องจากโมเลกุลของยางประกอบไปด้วยพันธะคู่ ทำให้มีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนและโอโซน โดยมีแสงแดดและความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งในระหว่างการผลิตผลิตภัณฑ์จึงจำเป็นต้องมีการเติมสารเคมีจำพวก Antidegradants เพื่อให้สามารถใช้งานได้นานขึ้น และนอกจากนี้ยางธรรมชาตียังมีประสิทธิภาพในการทนทานต่อสารละลายไม่มีขี้ผึ้ง น้ำมันและสารเคมี จึงทำให้ไม่สามารถใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องสัมผัสสารเหล่านี้ [5, 6]

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบของน้ำยางธรรมชาติ [6]

ส่วนประกอบ	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
ส่วนที่เป็นของแข็ง	27-48
ส่วนที่เป็นเนื้อยางแห้ง	25-45
โปรตีน	1-1.5
เรซิน	1-1.25
ขี้เถ้า	สูงถึง1
น้ำตาล	1
น้ำ	ส่วนที่เหลือจนครบ 100

ในส่วนประกอบของน้ำยางที่กล่าวแล้วนั้น สามารถแบ่งออกเป็นส่วนสำคัญได้ 2 ส่วน คือ

1. ส่วนที่เป็นเนื้อยาง 35 เปอร์เซ็นต์
2. ส่วนที่ไม่ใช่ยาง 65 เปอร์เซ็นต์
 - 2.1 ส่วนที่เป็นน้ำ 55 เปอร์เซ็นต์
 - 2.2 ส่วนที่เป็นลูทอยด์และอื่น ๆ 10 เปอร์เซ็นต์

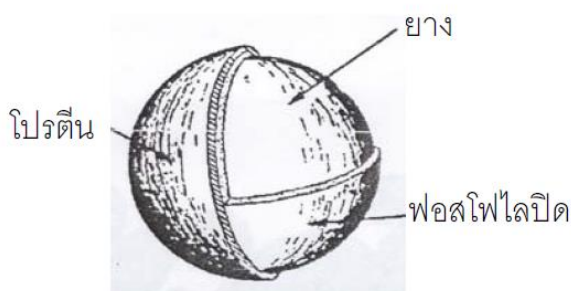
ตารางที่ 2.2 ส่วนประกอบของเนื้อยางแห้ง [7]

ส่วนประกอบ	เปอร์เซ็นต์
เนื้อยางไฮโดรคาร์บอน	86
น้ำกระจายอยู่ในเนื้อยาง	10
สารโปรตีน	1
สารพวกไขมัน	3

2.4 ส่วนที่เป็นเนื้อยาง

2.4.1 อนุภาคยาง

อนุภาคยางถูกห่อหุ้มด้วยสารจำพวกไขมันและโปรตีน ดังรูปที่ 2.2 โดยโปรตีนอยู่ชั้นนอกสุด ถัดออกมาคือชั้นไขมัน และอาจมีโลหะบางตัว เช่น แมกนีเซียม โปรแตสเซียม และทองแดงปะปนอยู่ ปริมาณเล็กน้อยประมาณ 0.5 เปอร์เซ็นต์ โดยปกติอนุภาคยางจะแขวนลอยอยู่ในน้ำประกอบด้วยสารไฮโดรคาร์บอน มีชื่อทางเคมีว่า ซิส -1,4 - พอลิไอโซพรีน มีความหนาแน่นเท่ากับ 0.92 กรัมต่อมิลลิเมตร ลักษณะอนุภาคค่อนข้างทรงกลม ขนาดอนุภาคแตกต่างกันออกไป คือ อยู่ระหว่าง 0.02 ไมครอน จนถึง 4 ไมครอน อนุภาคยางส่วนใหญ่จะมีขนาดมากกว่า 0.4 ไมครอน โดยมีอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 1.2 ไมครอน เมื่อนำน้ำยางสดมาปั่นด้วยความเร็วสูง พบว่าอนุภาคยางที่มีขนาดใหญ่จะแยกตัวออกจากชั้นน้ำขึ้นมาอยู่ด้านบน ส่วนอนุภาคยางที่มีขนาดเล็กจะปนอยู่กับทางน้ำยาง สามารถแยกออกโดยการทำให้จับตัวเป็นก้อนด้วยกรด



รูปที่ 2.2 ลักษณะอนุภาคยางธรรมชาติ [7]

2.4.2 โปรตีน

พวกโปรตีนอยู่ตามผิวรอบนอกสุดของอนุภาคยาง ซึ่งมีอยู่ประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ ของโปรตีนทั้งหมดที่อยู่ในน้ำยาง ส่วนที่เหลืออีกประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ อยู่ในชั้นน้ำ และอีก 25 เปอร์เซ็นต์ ปะปนอยู่กับส่วนที่เป็นลูทอยด์ (Lutoid)

2.4.3 ไขมัน

ไขมันซึ่งเกาะติดอยู่บริเวณระหว่างผิวของอนุภาคยางและโปรตีน ส่วนใหญ่เป็นสารพวก ฟอสโฟไลปิดชนิด α -Lecithin ทำหน้าที่ในการยึดโปรตีนให้เกาะติดอยู่บนผิวของอนุภาคยาง

2.5 ส่วนที่ไม่ใช่ยาง

ประกอบไปด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นน้ำหรือส่วนที่เรียกกันว่าเซรัม (Serum) และ ส่วนของลูทอยด์ (Lutoid) และสารอื่น ๆ

2.5.1 ส่วนที่เป็นน้ำหรือเรียกว่า เซรัม ประกอบไปด้วยส่วนที่ไม่ใช่ยางชนิดต่าง ๆ คือ

- คาร์โบไฮเดรต อยู่ในน้ำยางสดประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ ประกอบไปด้วยน้ำตาล ชนิดควาซิทอล นอกจากนี้ยังมีน้ำตาลชนิด กลูโคส ซูโครส ฟรุคโตส ในปริมาณเล็กน้อย
- โปรตีนและกรดอะมิโน เป็นส่วนที่อยู่ในเซรัมของน้ำยาง ส่วนใหญ่เป็นโปรตีน ประเภทอัลฟาไกลูบูลิน

2.5.2. ส่วนของลูทอยด์ และสารอื่น

- ลูทอยด์ ประกอบไปด้วยอนุภาคที่ไม่ใช่ยางจำนวนมาก ซึ่งอยู่ส่วนล่างสุด มีลักษณะอนุภาคค่อนข้างกลม เส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ที่ประมาณ 2-5 ไมครอน มีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคของยางมาก หุ้มด้วยเยื่อบางๆ และภายในนี้จะมีสารละลาย สารแขวนลอย มีค่า pH = 5.5 ส่วนใหญ่ประกอบด้วยโปรตีน โดยมีโปรตีนที่ละลายน้ำอยู่ประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์ และมีส่วนของโปรตีนที่ไม่ละลายน้ำอยู่ประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์

- อนุภาคเฟรย์-วิสลิง (Frey - wysling) มีลักษณะเป็นอนุภาค อยู่ในระหว่างชั้นของเนื้อยางกับชั้นเซรัม ขนาดใหญ่กว่าอนุภาคยาง ประกอบด้วยสารเม็ดสีพวก คาร์บอนอยด์ มีสีเหลืองเข้ม สามารถที่จะรวมตัวกับแอมโมเนียและแยกตัวออกจากยางมาอยู่ในส่วนของเซรัม [4]

2.6 สมบัติของยางธรรมชาติ [8]

2.6.1 ความต้านทานต่อแรงดึง แม้ไม่ได้เติมสารเสริมแรง จึงเหมาะกับการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์บางชนิด เช่น ถังมือยาง ถังยางอนามัย ยางรัดของ เป็นต้น

2.6.2 สมบัติเชิงพลวัต (Dynamic properties) ที่ดี ต้องมีความยืดหยุ่นสูง ในขณะที่มีความร้อนภายใน (Heat build-up) ที่เกิดจากการใช้งานต่ำและมีสมบัติที่เหนียวติดกันดี จึงเหมาะในการผลิตยางรถบรรทุก ยางล้อเครื่องบิน หรือสามารถใช้ผสมกับยางสังเคราะห์ในการผลิตยางรถยนต์ เป็นต้น

2.6.3 ความต้านทานต่อการฉีกขาดสูง ทั้งในที่อุณหภูมิต่ำและอุณหภูมิสูงจึงเหมาะกับการนำไปทำกระเปาะน้ำร้อน เพราะขั้นตอนในการเอาชิ้นงานออกจากเบ้าในระหว่างการขึ้นรูป จำเป็นต้องเอาชิ้นงานออกจากเบ้าในขณะที่ยังร้อน ยางต้องมีค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดในสภาวะที่ร้อนสูง

2.6.4 ความยืดหยุ่น ยางธรรมชาติจะมีความยืดหยุ่นสูงเมื่อมีแรงภายนอกที่มากระทำและจะกลับคืนสู่รูปร่างเดิม หรือใกล้เคียงในทันทีทันใด

2.6.5 สมบัติทางกายภาพ (Physical property) มีค่าถ่วงจำเพาะของยางธรรมชาติที่ 20 องศาเซลเซียส เท่ากับ 0.934 และมีค่าเพิ่มขึ้นถ้าถูกแช่แข็ง หรือถูกยืด ค่าความร้อนจำเพาะที่ 20 องศาเซลเซียส เท่ากับ 0.502 มีความต้านทานไฟฟ้า 10^{15} โอห์มต่อเซนติเมตร ซึ่งใช้เป็นฉนวนไฟฟ้าได้ดี

2.6.6 ความสามารถในการแปรรูป (Processability) ยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยสูง ทำให้แปรรูปได้ยากจึงต้องทำการบดก่อนแปรรูปทุกครั้ง การบดจะทำให้ น้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติลดต่ำลง ทำให้ยางนิ่มลง แต่อาจทำให้เกิดปัญหาต่าง ๆ เช่น ในกรณีการอัดเบ้าจะเกิดอากาศขัง (Air trap) ในยางได้ง่าย นอกจากนี้ยางธรรมชาติมีสมบัติความเหนียวติดที่ดี ไหลได้ง่าย และมีความต้านทานต่อการฉีกขาดที่อุณหภูมิสูงได้ดีจึงไม่มีปัญหาในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางโดยการอัดเบ้า

2.7 น้ำยางข้น

น้ำยางข้นเป็นรูปแบบหนึ่งของการผลิตวัตถุดิบยางธรรมชาติที่สำคัญของประเทศไทย น้ำยางข้นเป็นวัตถุดิบที่ใช้ในประเทศและส่งออก เพื่อแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่มการส่งออกทั้งในรูปแบบน้ำยางข้นและผลิตภัณฑ์จากน้ำยางข้น สามารถนำรายได้เข้าปีละหลายพันล้านบาท ดังนั้นการศึกษาระบวนการผลิตและการควบคุมคุณภาพของน้ำยางข้นจึงเป็นเรื่องจำเป็นและสำคัญอย่างยิ่งสำหรับผู้ผลิตและผู้ใช้น้ำยางข้น

2.8 ประวัติการทำโฟมยาง

Schidrowitz & Goldsbrough เริ่มต้นการทำฟองน้ำในปี ค.ศ. 1914 โดยเอาน้ำยางมาผสมกับแอมโมเนียมคาร์บอเนต หรือ โซเดียมคาร์บอเนต และทำปฏิกิริยากับกรดอะซิติกเกิดเป็นฟองก๊าซและจับตัวฟองในที่สุด โดยเรียกว่า Ovals ปี ค.ศ. 1927 Untiedt ได้ทำฟองน้ำโดยเอาน้ำยางมาใส่สบู่ ตีให้เป็นฟองและทำให้แห้ง ปลายปี ค.ศ. 1928 เดือนธันวาคม Edward Authur Murphy ทำงานที่บริษัทตันลอป ได้ค้นพบการใช้สาร Sodium silicofluoride เป็นตัวทำให้ฟองยาง (ที่ได้จากการตีน้ำยางกับสบู่) จับตัวเป็นก้อนได้ นับเป็นกระบวนการที่สำคัญที่ผลิตฟองน้ำในโรงงาน ปี ค.ศ. 1929 เริ่มทำฟองน้ำเป็นการค้า ทำเบาะหุ้มแผงเครื่องในหัวเครื่องบิน ปี ค.ศ. 1930 เริ่มทำเบาะรองนั่งในรถยนต์ออสติน ปี ค.ศ. 1931 น้ำยางชั้นปริมาณมากได้ถูกส่งไปประเทศอังกฤษเป็นครั้งแรก ทำให้การทำฟองน้ำระดับอุตสาหกรรมจึงได้เริ่มขึ้น ซึ่งได้เริ่มทำที่นอนและหมอนตั้งแต่นั้นมา ปี ค.ศ. 1934 ได้เริ่มทำเบาะรถที่นั่งโดยสาร ปี ค.ศ. 1935 Joseph Talalay พบวิธีการใหม่คือ Talalay process ทำโดยการ เติม (Hydrogen peroxide, H_2O_2) ลงในน้ำยางคอมปาวด์โดยปราศจากการตีให้เป็นฟอง เพื่อทำให้เกิดอากาศหรือก๊าซในน้ำยางคอมปาวด์และไม่จำเป็นต้องใช้สารก่อเจล (Gelling agent) ในการที่น้ำยางคอมปาวด์เกิดเป็นฟองโดยการกระตุ้นการแตกตัวด้วย H_2O_2 และทำให้เย็นจนแข็งโดยรวดเร็ว ขณะที่มันเย็นจนแข็งจะเกิดการจับตัวโดยการแทรกตัวของ คาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide, CO_2) เนื่องจาก CO_2 เป็นกรด ดังนั้นจึงทำให้ฟองน้ำเกิดเจลได้ ปลายปี ค.ศ. 1950 Madge ได้พัฒนาและเปลี่ยนแปลง วิธีการทำฟองน้ำโดยใช้ก๊าซเนื่องจากควบคุมยากมาเป็นการตีและขยายตัวด้วยการลดความดัน vacuum แทน [9]

2.9 การผลิตโฟมยาง

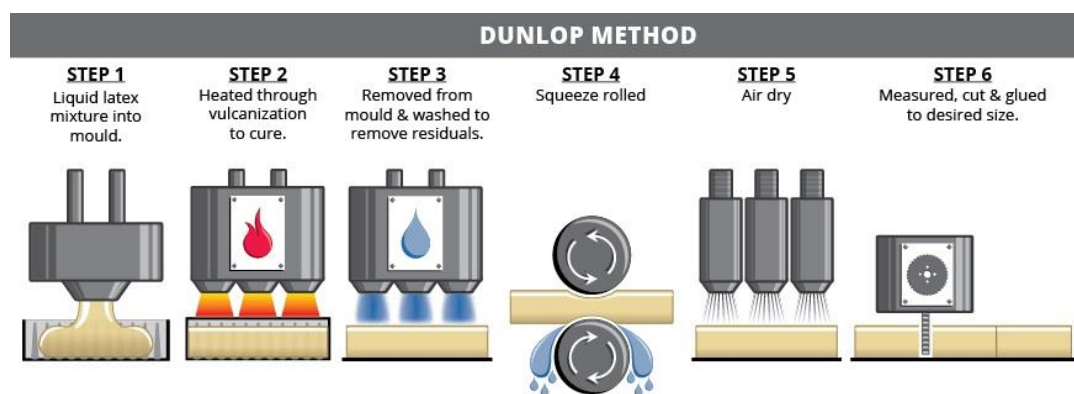
น้ำยางชั้นสามารถนำไปผลิตเป็นโฟมยางซึ่งนำไปใช้งานในภาคการขนส่งและการผลิตเฟอร์นิเจอร์ เช่น การผลิตเบาะรถยนต์ เบาะรองนั่งบนรถไฟ เบาะรองนั่งบนเครื่องบิน เบาะรถมอเตอร์ไซด์ ที่นอน และหมอน ซึ่งป้องกันการสะสมของแบคทีเรียและไรฝุ่น นอกจากนั้นโฟมยางยังสามารถนำไปใช้ในการผลิตวัสดุพิเศษอื่น ๆ เช่น อุปกรณ์ไฟฟ้า พื้นรองเท้า และวัสดุเคลือบผิว ปัจจุบันมี 2 วิธี ที่นิยมใช้ในการผลิตโฟมยาง คือ กระบวนการตันลอป และกระบวนการทาลาเลย์ วิธีแรกเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุด ประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ และอีก 10 เปอร์เซ็นต์ ที่เหลือใช้กระบวนการที่สอง [10-13] โดยใช้สูตรน้ำยางคอมปาวด์สำหรับการทำโฟมยางแสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สูตรน้ำยางคอมปาวด์สำหรับการทำโฟมยาง

สารเคมี	น้ำหนักแห้ง (phr)	น้ำหนักเปียก (g)
น้ำยางชั้น 60 % (HA)	100	167
K-oleate 10%	1.5	15
Sulfur 50%	2	4
ZDEC 50%	2	4
ZMBT 50%	2	4
Wingstay L 50%	2	4
ZnO 50%	5	10
DPG 33%	1.4	4.24
SSF 12.5%	0.25	2

2.9.1 กระบวนการดันลอป (Dunlop Process)

การผลิตแบบดันลอป มีการจดสิทธิบัตร เมื่อปี ค.ศ. 1930 ค้นพบโดย Murphy, Chapman และ Pounder การผลิตโฟมยางจากด้วยกระบวนการนี้จะกวนน้ำยางเพื่อให้เกิดฟอง แล้วทำการใส่สารเจลาเพื่อให้ฟองยางเกิดการเซ็ตตัว ก่อนที่จะนำไปวัลคาไนซ์ [14] ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงกระบวนการผลิตแบบดันลอป [14]

ขั้นตอนของการผลิตแบบต้นลอป

1. ทำการกวนน้ำยางข้นด้วยการกวนช้า ๆ เพื่อไล่แอมโมเนียออกจากน้ำยางจากนั้นเติมสารเคมีต่าง ๆ คือ สารช่วยให้เกิดฟอง สารวัลคาไนซ์ สารตัวเร่งให้ยางสุก และสารป้องกันการเสื่อมสภาพ หลังจากนั้นกวนด้วยความเร็วสูง เพื่อให้เกิดฟองตามที่ต้องการแล้วจึงลดความเร็วในการกวน แล้วเติมสารตัวกระตุ้น สารช่วยก่อเจล และสารก่อเจลหลักตามลำดับ จากนั้นทำการเทเข้าเบ้าพิมพ์แล้วปล่อยให้เกิดการเจลที่อุณหภูมิห้อง

2. จากนั้นนำเข้าเตาอบเพื่อให้โฟมยางเกิดการวัลคาไนซ์ ที่อุณหภูมิ 100-120 องศาเซลเซียส เพื่อให้โฟมยางเกิดการคงรูป

3. เมื่อโฟมยางที่เกิดการวัลคาไนซ์ครบตามเวลาที่ต้องการแล้ว จึงแกะเอาโฟมยางออกจากเบ้าพิมพ์

4. นำโฟมยางไปล้างทำความสะอาดด้วยน้ำ เพื่อกำจัดสารเคมี พวกที่ละลายน้ำได้ สารที่ไม่ใช่ยาง เช่น สบู่ ซึ่งสารเหล่านี้ทำให้โฟมยางที่ได้ไม่ทนต่อการบ่มเร่ง กระด้างตัวไม่ดี และมีกลิ่น

5. นำโฟมยางไปอบให้แห้งสนิท

6. ผลิตภัณฑ์โฟมยาง

ข้อดี

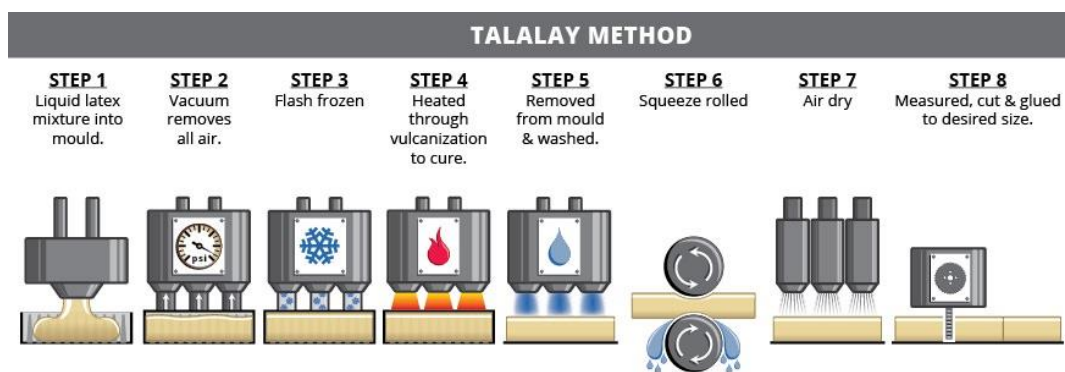
1. โฟมยางมีความหนาแน่นที่หลากหลาย ตั้งแต่ความหนาแน่นต่ำถึงความหนาแน่นสูง
2. ควบคุมความนิ่มและความแข็งได้ โดยการควบคุมระยะเวลาในการกวน ถ้ากวนเป็นเวลานาน จะได้โฟมยางที่นิ่ม แต่ถ้ากวนเวลาที่สั้น ๆ จะได้โฟมยางที่มีความหนาแน่นสูง โฟมยางจะมีความแข็งสูง
3. สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายน้อยกว่าแบบทาลาเลย์
4. สามารถผลิตได้อย่างรวดเร็ว

ข้อเสีย

1. ได้รูพรุนของโฟมยางที่แตกต่างกัน ทำให้โฟมยางมีความนิ่มที่ไม่สม่ำเสมอ
2. โฟมยางมีความหนาแน่นสูงส่งผลต่อน้ำหนักของผลิตภัณฑ์

2.9.2 กระบวนการทาลาเลย์ (Talalay Process)

วิธีการนี้ค้นพบโดย Joseph Talalay เกิดขึ้นในราว ค.ศ. 1936 ซึ่งจะเรียกกระบวนการนี้ว่า กระบวนการทาลาเลย์ จากนั้นได้มีการพัฒนาและปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง กระบวนการนี้จะทำให้ฟองยางเกิดการเยือกแข็งอย่างรวดเร็ว ซึ่งอุณหภูมิจะต่ำกว่าจุดเยือกแข็งและมีการใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปในฟองน้ำยางก่อนนำไปอบวัลคาไนซ์ [14] ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงกระบวนการผลิตแบบทาลาเลย์ [14]

ขั้นตอนของการผลิตแบบทาลาเลย์

- 1.1 ทำการกวนน้ำยางชั้นด้วยการกวนช้า ๆ เพื่อไล่แอมโมเนียออกจากน้ำยาง จากนั้นเติมสารเคมีต่าง ๆ แล้วกวนให้เกิดฟองตามที่ต้องการ จากนั้นทำการเทเข้าเบ้าพิมพ์
2. ปิดเบ้าพิมพ์ด้วยระบบสุญญากาศเพื่อให้ฟองเกิดการไหลเต็มเบ้า แล้วทำการลดอุณหภูมิถึง -30 องศาเซลเซียส เพื่อให้เกิดการแข็งของฟองยาง แล้วจึงปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่เบ้าพิมพ์ จากนั้นทำให้เกิดการเจลของฟองยาง
3. เมื่อโฟมยางที่เกิดการวัลคาไนซ์ครบตามเวลาที่ต้องการแล้ว จึงแกะเอาโฟมยางออกจากเบ้าพิมพ์
4. นำโฟมยางไปล้างทำความสะอาดด้วยน้ำ เพื่อกำจัดสารเคมี พวกที่ละลายน้ำได้ สารที่ไม่ใช่น้ำ เช่น สบู่ ซึ่งสารเหล่านี้ทำให้โฟมยางที่ได้ไม่ทนต่อการบ่มแรง กระด้างตัวไม่ดี และมีกลิ่น
5. นำโฟมยางไปอบให้แห้งสนิท
6. ผลิตภัณฑ์โฟมยาง

ข้อดี

1. ได้โฟมยางที่มีความหนาแน่นต่ำ ทำให้โฟมยางมีความนิ่ม
2. รูพรุนของโฟมยางมีความสม่ำเสมอกระจายทั่วทั้งโฟมยาง จึงทำให้โฟมยางมีความนิ่มทั้งชิ้น

ข้อเสีย

1. ค่าใช้จ่ายสูงกว่าแบบดันลอป
2. ใช้พลังงานมาก เพราะในกระบวนการมีทั้งการลดอุณหภูมิ และทำในระบบสุญญากาศ
3. ระยะเวลาในการผลิตนาน

จะเห็นได้ว่าในกระบวนการผลิตโฟมยางด้วยวิธีการของทาลาเลย์มีการทำให้เกิดการเจลด้วยความเย็นร่วมกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แทนที่การใช้สารช่วยเจลเหมือนกับกระบวนการของดันลอป และนอกจากนี้ยังมีข้อดีคือ สามารถทำให้ควบคุมความหนาแน่นได้ เพราะจะควบคุมน้ำหนักของฟอง

ยางที่เทใส่ลงในเบ้าพิมพ์ที่ได้จากการตีฟองในกระบวนการของต้นลอป แต่กระบวนการของทาลาเลย์ นั้นจะมีขั้นตอนที่ยุ่งยากและซับซ้อนมากกว่ากระบวนการของต้นลอป [15]

ในส่วนของผลิตภัณฑ์โฟมยางที่ได้หลังจากกระบวนการผลิตก็ยังมีปัญหาและข้อผิดพลาดในการผลิตโฟมยางที่เกิดขึ้น ซึ่งมีสาเหตุและวิธีการแก้ไข ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ข้อผิดพลาดและการแก้ไขสำหรับการผลิตโฟมยาง [16]

ความผิดพลาด	สาเหตุ	การแก้ไข
โครงสร้างมีลักษณะหยาบ	เจลที่ pH ต่ำเกินไป	เพิ่มสารช่วยเจล
มีรูขนาดใหญ่	เจลที่ pH ต่ำเกินไป	เพิ่มสารช่วยเจล
ผิวขรุขระ	การเจลไม่เพียงพอ เบ้าเย็นเกินไป	เพิ่มสารช่วยเจล หรือ SSF เพิ่มอุณหภูมิเบ้า
ผิวหยาบและหนา	เบ้าร้อนเกินไป	ลดอุณหภูมิเบ้า
ผิวเกิดรอยทางไหลของยาง	เบ้าร้อนเกินไป เกิดการเจลเร็วไป	ลดอุณหภูมิเบ้า ลด SSF
ผิวเกิดเป็นหลุมตื้น ๆ	สารหล่อลื่นเบ้ามากเกินไป สารหล่อลื่นเบ้าไม่แห้ง	ลดสารหล่อลื่นเบ้า ทำให้สารหล่อลื่นเบ้าแห้ง
เป็นรอยแตกตรงกลาง	เจลเร็วเกินไป	ลด SSF ใช้เบ้าที่เย็นลง

2.10 การผสมสารเคมีสำหรับกระบวนการผลิตโฟมยาง

หลักการจะคล้ายกับการผสมยางแห้ง แต่มีข้อแตกต่างคือสารต่าง ๆ ที่ผสมลงไปนี้น้ำยางต้องผ่านการเตรียมให้อยู่ในสถานะเปียกก่อนเพราะการใช้สารต่าง ๆ ในสถานะแห้งเติมลงไปนี้น้ำยางทำให้เกิดปัญหาในการจับตัวกันในน้ำยางได้ สารเคมีที่ใช้ในการผสมกับน้ำยางธรรมชาติประกอบด้วยสารเคมีต่อไปนี้ [16]

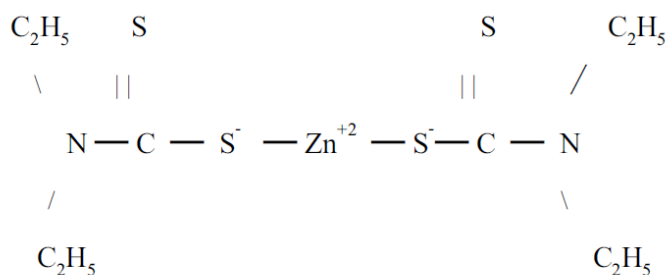
1. น้ำยางธรรมชาติ
2. สารวัลคาไนซ์
3. สารตัวเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนซ์
4. สารต้านปฏิกิริยาออกซิเดชัน
5. สารช่วยให้เกิดฟอง
6. สารรักษาความเสถียรของฟอง
7. สารกระตุ้นปฏิกิริยาวัลคาไนซ์
8. สารก่อเจล

2.10.1 สารวัลคาไนซ์ (Vulcanizing agent)

ระบบการวัลคาไนซ์ที่ใช้ในกระบวนการผลิตโพลีเอทิลีนที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือ กำมะถัน (Sulfur) เป็นสารที่ใช้เพื่อวัลคาไนซ์ยาง โดยเมื่อใส่กำมะถันเข้าไปในยางแล้วให้ความร้อน จะเกิดการวัลคาไนซ์ ทำให้สมบัติของยางดีขึ้นคือ เมื่อเย็นไม่แข็ง ไม่มีกลิ่น ไม่ละลายในตัวทำละลาย เป็นต้น ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากกำมะถันทำให้เกิดการเชื่อมโยงโมเลกุล การเชื่อมโยงโมเลกุลในยางทำให้โมเลกุลของยางใหญ่ขึ้นทำให้เกิดการหลอมเหลวเมื่อถูกความร้อนและแข็งตัวเมื่อเย็นเป็นไปได้อย่างขึ้น ปริมาณกำมะถันในยางทำให้ปริมาณการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น และสมบัติของยาง เช่น ความต้านทานแรงดึง ความแข็ง โมดูลัส และความกระด้างตัวของยางเปลี่ยนแปลงไปตามการเชื่อมโยงโมเลกุลด้วย [10] โดยเมื่อปริมาณการเชื่อมโยงโมเลกุลเพิ่มขึ้น ส่งผลให้โมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic modulus) และความแข็ง (Hardness) มีค่าเพิ่มขึ้น ระยะยืดจนขาด (Elongation at break) มีค่าลดลง ค่าความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) และค่าทนทานต่อการฉีกขาดจะเพิ่มขึ้นสูงสุด และลดลงเมื่อปริมาณการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น โดยใช้ค่า relaxed modulus ที่ระยะยืด 100 เปอร์เซ็นต์ เป็นตัวตรวจสอบวัดความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยง [18]

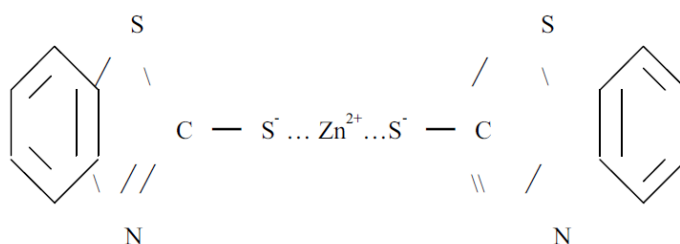
2.10.2 สารเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ (Accelerator)

ZDEC (Zinc-N-diethyl dithiocarbamate) เป็นสารตัวเร่งประเภทซิงค์ไดไธโอคาร์บาเมต สารเคมีในกลุ่มนี้เหมาะกับการใช้เป็นตัวเร่ง ในการบ่ม โดยใช้อากาศร้อน หรือ ใช้น้ำเพราะเป็นตัวเร่งที่เกิดการบ่มเร็วขึ้น สามารถคงรูปได้ดีและวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิต่ำที่ 115-125 องศาเซลเซียส ในระยะเวลาสั้น แต่ถ้าใช้อุณหภูมิสูงกว่านี้ อาจเกิดการพลิกกลับสู่สภาพเดิมได้ (Reversion) ดังนั้นไม่ควรบ่มเกิน 125 องศาเซลเซียส สูตรโครงสร้างโมเลกุลของ ZDEC แสดงดังรูปที่ 2.5



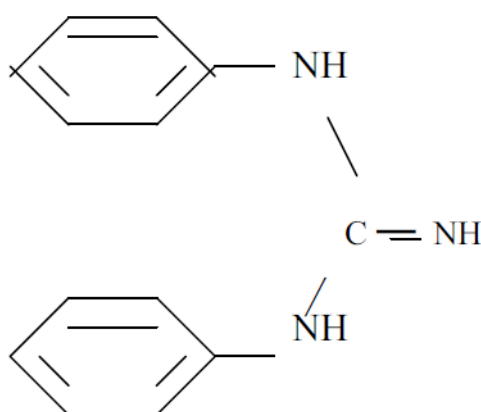
รูปที่ 2.5 สูตรโครงสร้างโมเลกุลของ ZDEC [9]

ZMBT (Zinc salt of 2-mercaptobenzothiazole) เป็นสารเร่งในกลุ่มไฮโอโซล สารเคมีในกลุ่มนี้ สามารถบ่มได้ทุกรูปแบบของการวัลคาไนซ์ และสามารถกระตุ้นให้เกิดการบ่มเร็วขึ้นได้โดยการใช้ตัวเร่งที่เป็นต่าง เช่น สารพวกไดไฮโอคาร์บาเมต และไธยูแรม แต่การกระตุ้นนี้มีผลให้ระยะเวลาที่ยางเริ่มจะเกิดการคงรูป (Scorch time) สั้นลงด้วย และถ้าใช้ร่วมกับสารตัวเร่ง โดยใช้สัดส่วนจำนวนโมลเท่ากัน จะให้ผลสูงสุดและความเร็วใหม่ในการบ่มที่เร็วกว่าที่ใช้เดี่ยว ๆ โดย สารตัวเร่ง ที่นิยมใช้จะเป็นสารพวกกัวนิติน เช่น DPG เป็นต้น สูตรโครงสร้างโมเลกุลของ ZMBT แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 สูตรโครงสร้างโมเลกุลของ ZMBT [9]

DPG (Diphenyl guanidine) เป็นสารตัวเร่งในกลุ่มกัวนิติน สารตัวเร่งกลุ่มกัวนิตินเป็นสารตัวเร่งที่ทำให้ยางสุกช้า ถ้าใช้เป็นตัวเร่งเสริมจะมีการกระตุ้นสูงมากโดยเฉพาะการกระตุ้นสารพวกไฮโอโซล ถ้าใช้สารเคมีในกลุ่มนี้เป็นตัวเร่งหลักจะไม่สามารถวัลคาไนซ์โดยใช้อากาศร้อนได้เพราะจับตัวเข้าไปการทำงานของกัวนิติน ต้องใช้ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เป็นตัวกระตุ้นแต่ไม่จำเป็นต้องใช้กรดไขมัน สูตรโครงสร้างโมเลกุลของ DPG แสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 สูตรโครงสร้างโมเลกุลของ DPG [9]

2.10.3 สารต้านทานปฏิกิริยาการออกซิเดชัน (Antioxidant)

โดยทั่วไปแล้วจะไม่ใช้สารต้านทานปฏิกิริยาออกซิเดชันในงานนี้ยาง ทั้งนี้เพราะพอลิเมอร์ที่อยู่ในสภาพของน้ำยางมีความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพได้ดี และพอลิเมอร์ในสภาพน้ำยางไม่ได้ผ่านการบด ฉีก่อน หรือผ่านการสัมผัสอุณหภูมิสูงขณะกระบวนการผลิต

Antioxidant Wingstay เป็นสารที่ใส่น้ำยางเพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพ สารต้านทานออกซิเดชันจะอยู่ในผลิตภัณฑ์ยาง โดยเป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพของยางเนื่องมาจากการที่ออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยากับยาง [13]

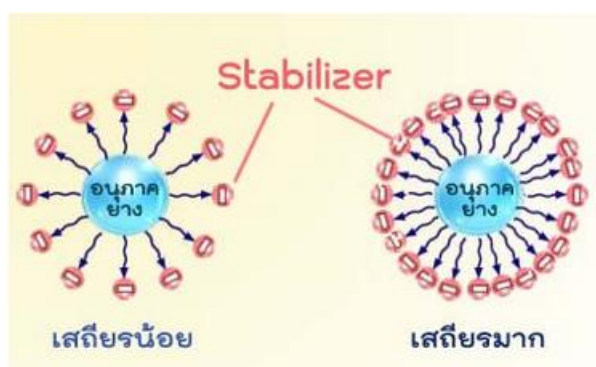
2.10.4 สารช่วยให้เกิดฟอง (Foam promoters)

สารที่ใช้ในการเกิดฟองสำหรับกระบวนการผลิตโฟมยางธรรมชาติจากน้ำยางธรรมชาติ โดยทั่วไปจะใช้สบู่ในกลุ่มคาร์บอกซิเลต ได้แก่ โอลิเอต (Oleate), ริซิโนเลต (Ricinoleate), คาสโตรอล ออยล์ (Castor oil) และ เรซินเนต (Resinate) ซึ่งอาจใช้เพียงชนิดเดียวหรือใช้ร่วมกันก็ได้ ซึ่งการใช้ร่วมกันประสิทธิภาพจะมากกว่าเพียงชนิดเดียว โดยที่สบู่คาสโตรอล ออยล์ จะทำให้เกิดฟองขึ้นช้า อาจใช้ในงานที่ต้องการยางฟองน้ำความหนาแน่นสูง ซึ่งจะมีประสิทธิภาพในการช่วยเกิดฟองน้อยกว่าสบู่โอลิเอต เมื่อใช้สบู่โพแทสเซียมโอลิเอต (Potassium oleate) จะทำให้เกิดฟองขึ้นอย่างรวดเร็ว และให้การเจลที่ตึกว่า ใช้ในงานที่ต้องการโฟมยางที่มีความหนาแน่นต่ำ นอกจากชนิดของสบู่ที่ส่งผลต่อความหนาแน่น ปริมาณของสบู่ที่ใช้ก็ส่งผลต่อความหนาแน่นด้วย โดยถ้าเพิ่มปริมาณสบู่ในน้ำยางคอมปาวด์จะทำให้มีฟองอากาศในโฟมยางมาก และลดความหนาแน่นของโฟมยาง [17]

2.10.5 สารรักษาความเสถียรของฟอง (Foam stabilizer) [17]

สารรักษาความเสถียรของฟอง หรือสารสตาบิไลเซอร์ (Stabilizer) เป็นสารที่ใช้รักษาน้ำยางให้คงสภาพของอนุภาคเดี่ยว ๆ ให้แขวนลอยอยู่ในน้ำได้ สารเพิ่มความเสถียรของน้ำยางมีหลายชนิดด้วยกัน การใช้ที่จะทำให้น้ำยางเกิดความเสถียร สามารถทำได้ 2 แนวทาง ดังนี้

1. เติมสารสตาบิไลเซอร์เข้าไปเพื่อเพิ่มประจุให้อนุภาคยาง และทำให้เกิดแรงผลักระหว่างอนุภาคของน้ำยางมากยิ่งขึ้น
2. เติมสารสตาบิไลเซอร์ เข้าไปเพื่อให้เกิดชั้นป้องกันของอนุภาคยาง



รูปที่ 2.8 ภาพแสดงการเพิ่มค่าความเสถียร โดยการใส่สารสตาบิไลเซอร์ไปห่อหุ้มอนุภาคยาง [17]

ชนิดของสารสตาบิไลเซอร์

สารสตาบิไลเซอร์สามารถช่วยปรับความเสถียรของน้ำยางแบ่งได้เป็น 2 ระบบ คือ

1 ระบบไอออนิก (Ionic stabilizer)

เป็นสารที่ละลายในน้ำแล้วให้อนุมูล (ion) ในน้ำได้ ในระบบนี้สามารถแบ่งออกได้ 3 กลุ่มคือ แอนไอออน (Anionic) จะได้ประจุลบ แคทไอออน (Cationic) จะได้ประจุบวก และ Amphoteric ซึ่งได้ประจุบวกและประจุลบจะขึ้นอยู่กับค่า pH

2 ระบบนอนไอออนิก (Non-ionic stabilizer)

เป็นสตาบิไลเซอร์ที่ได้จากการควบแน่นระหว่าง polyethylene oxide กับ fatty alcohol น้ำยางมีความเสถียรโดยการดูดโมเลกุลของน้ำเข้าไปล้อมรอบอนุภาคยางเป็นแบบ steric effect

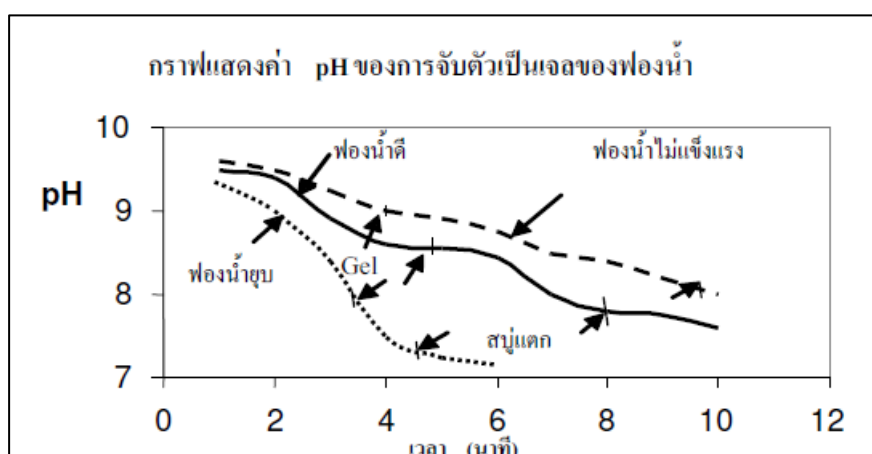
ซึ่งน้ำยางที่ใช้สารพวกนอนไอออนิก สตาบิไลเซอร์ นั้นมีความเสถียรต่อกรด ต่าง และเกลือ สตาบิไลเซอร์อาจจะตกตะกอนได้ในน้ำยาง ในขณะที่มีอุณหภูมิที่สูงขึ้น อุณหภูมิที่สามารถทำให้น้ำยางเกิดการตกตะกอนจะมีชื่อเรียกว่า Cloud point เมื่อเกิดการตกตะกอนทำให้น้ำยางเสียความเสถียร

2.10.6 สารกระตุ้นปฏิกิริยาลูกคานซ์ (Vulcanization activators)

ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) ทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้นตัวเร่ง ให้ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยเมื่อใส่ไปในปริมาณเล็กน้อยจะทำให้โมดูลัสสูงขึ้น และบางครั้งไม่มีการใส่สารกระตุ้นก็จะมีปฏิกิริยาลูกคานซ์เกิดขึ้นโดยทั่วไปนิยมใช้ซิงค์ออกไซด์ เป็นสารกระตุ้นในปริมาณ 3-5 phr และถ้าซิงค์ออกไซด์มีขนาดอนุภาคเล็กก็สามารถลดการใช้เหลือเพียง 1 phr ได้และถ้าใช้มากกว่า 5 phr ขึ้นไป มักมีจุดประสงค์อื่นมากกว่าจะใช้เป็นการกระตุ้น เช่น ทำให้การถ่ายเทความร้อนในยางเร็วขึ้นเหมาะแก่การทำยางหนา ๆ โดยเฉพาะการทำให้อย่างสุกโดยใช้อากาศร้อน [13]

2.10.7 สารก่อเจล (Gelling agent)

โซเดียมซิลิโคฟลูออไรด์ (Sodium silicofluoride, SSF) เป็นสารที่ใส่น้ำยางเพื่อให้น้ำยางจับตัวเป็นเจล เป็นกระบวนการทำให้เกิดเจลอย่างช้า ๆ ซึ่งเตรียมอยู่ในรูปของสารแขวนลอยในตัวกลางซึ่งเป็นน้ำโดยมีค่า pH ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 3.3 เมื่อใส่โซเดียมซิลิโคฟลูออไรด์ลงในน้ำยางจะทำให้เกิดการสูญเสียความเสถียรอย่างช้า ๆ ทำให้เกิดการเจลขึ้น ซึ่งยางพองน้ำที่มีค่า pH ประมาณ 9-10 เมื่อเติมโซเดียมซิลิโคฟลูออไรด์ลงในยางพองน้ำในปริมาณที่เหมาะสม จะได้ยางพองน้ำที่ดี สำหรับยางพองน้ำที่ดี ค่า pH ควรจะเหลือประมาณ 8.5 เมื่อเกิดการเจลผ่านไปเป็นเวลา 5 นาที ดังรูปที่ 2.9 สำหรับ pH ที่ลดลงอย่างรวดเร็วจะใช้เวลาในการเจลด้อยจะทำให้โคมยางที่ได้เกิดการยุบตัว เนื่องจากการพังทลายโครงสร้างของพอง จะเกิดขึ้นก่อนที่อนุภาคของยางเกิดการประสานกันจึงทำให้เกิดการยุบตัวของโคมยาง แต่ถ้า pH ลดลงช้ามาก ๆ หรือใช้เวลาในการเจลดาน ทำให้เกิดการเจลช้าเกินไป จะทำให้พองน้ำแยกก่อนที่จะประสานกัน จะทำให้พองน้ำที่ได้ไม่แข็งแรงและถ้าทิ้งระยะเวลาให้พองน้ำเกิดการเจลดานเกินไปก็จะส่งผลให้พองน้ำแตกได้



รูปที่ 2.9 แสดงความสัมพันธ์ของ pH ที่ทำให้เกิดการเจลของพองน้ำที่เวลาต่าง ๆ กันและผลกระทบต่อโครงสร้างของยางพองน้ำ [18]

2.11 ทฤษฎีเบื้องต้นของโฟมพอลิเมอร์ [19]

การผลิตโฟมพอลิเมอร์ที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง คือ การทำให้เกิดฟองก๊าซ (Bubbles) กระจายตัวในพอลิเมอร์ แล้วเพิ่มขนาดของฟองก๊าซก่อนทำให้เสถียร ซึ่งจะได้โครงสร้างโฟมพอลิเมอร์ ระบบการผลิตโฟมแบบกระจายฟองก๊าซนี้แบ่งออกเป็น 3 ประเภทใหญ่ ๆ ตามชนิดของพอลิเมอร์ ดังนี้

1. เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic Polymer) ชั้นแรกพอลิเมอร์จะอยู่ในรูปของแข็ง ต่อมาจะถูกหลอมเหลวเกิดเป็นเฟสของไหล (Fluid Phase) ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นถูกทำให้เสถียรด้วยความเย็นจนกระทั่งโฟมคงรูปอยู่ได้

2. เทอร์โมเซต (Thermoset Foam system) พอลิเมอร์ในระบบเทอร์โมเซตจะเกิดฟองก๊าซในพอลิเมอร์ขณะยังคงเป็นของไหลอยู่ เมื่อเกิดการขยายตัวของโฟม จะตามด้วยการเกิดพันธะเชื่อมโยงทำให้โฟมเสถียรขึ้น

3. น้ำยาง (Latex) เกิดฟองก๊าซขึ้นแล้วทำให้เสถียรโดยการเปลี่ยนเฟส ซึ่งทำโดยการลด pH ลง หรือการลดอุณหภูมิจนถึงจุดเยือกแข็ง หรือการทำทั้งสองอย่างและมักจะตามด้วยการวัลคาไนซ์ โฟมที่ได้ก๊าซที่ใช้ในการทำให้เกิดโฟมอาจได้มาจากอากาศ โดยการตีปั่นของเหลวหรือการพ่นน้ำยาง หรือได้จากสารละลายจุดเดือดต่ำ ๆ เช่น เพนเทน (Pentane) ฟลูออโรคาร์บอน (Fluorocarbon) ทำให้ละลายในพอลิเมอร์แล้วทำให้กลายเป็นก๊าซโดยการให้ความร้อน หรือการลดความดัน หรือ ก๊าซอาจได้จากการทำปฏิกิริยา เช่น ปฏิกิริยาของไอโซไซยานเนต (Isocyanate) กับน้ำ หรือการสลายตัวของสารฟูเคมี เช่น สารฟูชนิดอะโซไดคาร์บอนาไมด์ (Azodicarbonamide) ฟองก๊าซทั้งหมดที่เกิดขึ้นในช่วงเริ่มต้น อาจขยายใหญ่ขึ้นโดยการแพร่ของก๊าซจากสารละลายเข้าสู่ฟองก๊าซ โดยใช้ความร้อนหรือการลดความดันหรือการรวมตัวกันของฟองก๊าซสองฟอง หรือมากกว่าเข้าด้วยกัน (Coalescence) ถ้าผนังเซลล์ (Cell membrane) รอบ ๆ ฟองก๊าซยังคงไม่บอบสลายจะได้เซลล์ปิด ถ้าหากผนังเซลล์แตกออกบางส่วนหรือทั้งหมดจะได้โฟมเซลล์เปิด การแตกของผนังเซลล์เกิดขึ้นมาก อาจนำไปสู่การยุบตัวของโฟมได้ และถ้าการหล่อเย็นในโฟมเซลล์ปิดก่อนการเสถียร อาจทำให้เกิดการหดตัวเพราะความดันในเซลล์ปิดนั้นลดลง

2.11.1 กระบวนการเกิดโฟม (Foam formation) [19]

ขั้นตอนการเกิดโฟมมีดังนี้

1. การเกิดฟองก๊าซ (Bubble formation)

ขั้นตอนแรกในการผลิตโฟม คือ การก่อตัวของฟองก๊าซเล็ก ๆ ขึ้นในพอลิเมอร์เหลวอย่างแท้จริงโดยไม่มีของแข็ง เรียกว่า Self-nucleation แต่ถ้าในระบบมีของแข็งละเอียดเล็ก ๆ อยู่ด้วยที่เรียกว่า สารก่อฟองก๊าซ (Nucleating agent) เช่น อนุภาคของสารตัวเติมต่าง ๆ เป็นต้น การเกิดฟองเล็ก ๆ จะง่ายขึ้นที่ผิวบริเวณของแข็งกับของเหลวจะเกิดการก่อตัวเป็นฟองเล็ก ๆ เป็นจำนวนมากอย่างรวดเร็ว ในเนื้อของเหลวเรียกกระบวนการนี้ว่า Heterogeneous nucleation

2. การขยายตัวของฟองก๊าซ (Bubbles growth)

หลังจากมีฟองก๊าซเล็ก ๆ เกิดขึ้นจนถึงระดับหนึ่งจะไม่มีฟองใหม่ แต่ฟองจะเริ่ม ขยายตัวที่ ก่อตัวขึ้นในขั้นตอนแรกจะเริ่มโตขึ้นโดยวิธีการต่อไปนี้ เช่น

- การขยายตัวเนื่องจากการให้ความร้อน
- การขยายตัวเนื่องจากการลดลงของความดัน
- การแพร่ของก๊าซจากสารละลายในพอลิเมอร์เหลวเข้าสู่ฟอง
- การรวมตัวเข้าด้วยกันระหว่างฟองก๊าซด้วยกันเอง เนื่องจากแรงดันที่แตกต่างกัน

ของแต่ละเฟส ฟองเล็กที่มีแรงดันมากจะขยายขนาดโตขึ้นเรื่อย ๆ จนทำให้ฟองแตกรวมกับฟองอื่น กลายเป็นฟองที่มีขนาดใหญ่กว่าเดิม

- แรงตึงผิวของพอลิเมอร์ ถ้าแรงตึงผิวต่ำส่งผลให้การขยายตัวของฟองก๊าซเกิดขึ้น ได้ดีขึ้นยางต่างชนิดกันจะมีแรงตึงผิวไม่เท่ากัน การขยายตัวของฟองก๊าซในยางต่างชนิดกันจึงไม่ เท่ากัน (โดยที่ตัวแปรอื่นคงที่)

ในช่วงแรกของการเกิดฟองที่ปริมาตรก๊าซน้อย ๆ ฟองก๊าซจะเป็นทรงกลมเมื่อฟองก๊าซมี ปริมาตรขยายตัวมากขึ้น เนื่องจากเฟสของไหลรักรูปร่างได้ไม่ดี ดังนั้นจึงทำให้ฟองก๊าซกลายเป็น พอลิฮีดรอล (Polyhedral shape) ซึ่งเป็นรูปร่างที่มีผิวด้านเรียบมากกว่าหรือเท่ากันอย่างน้อยสี่ด้าน ซึ่งมักเรียกฟองก๊าซเมื่อเป็นรูปร่างต่าง ๆ ว่า “ เซลล์ ” (Cell)

การกระจายตัวของของไหลในผนังเซลล์ที่บาง ๆ ระหว่างสองฟองก๊าซและ robe หรือ แกน ของรอยต่อของก๊าซสามอัน ที่ชิดกันทำให้รูปร่างของเซลล์จะกลายเป็นชนิดโดเดคาฮีดรอล (Dodecahedrals) ซึ่งมีผนังสี่หรือห้าด้านรอบเซลล์เมื่อโฟมขยายตัวสูงสุด

3. การเกิดความเสถียรของฟองก๊าซ (Bobbie stability)

ในการเกิดโฟม ขั้นตอนการขยายตัวของโฟมเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวของระบบโดยการเกิดฟอง ก๊าซ ทำให้พลังงานอิสระในระบบเพิ่มขึ้น โฟมจะไม่เสถียร จึงจำเป็นต้องใช้สารเคมีบางชนิดและ ปรับอุณหภูมิของระบบให้เหมาะสม เช่น การเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ความหนืดของพอลิเมอร์ หลอม ลดลง แรงตึงผิวลดลงด้วย ทำให้ผนังเซลล์บางได้ง่าย เป็นผลให้ผนังเซลล์แตกง่ายขึ้น เพราะต้านความ เค้นที่กระทำจากแรงดันภายในเซลล์ได้จำกัด ในทางกลับกัน การเพิ่มอุณหภูมิก็จะเพิ่มการ เกิดปฏิกิริยาที่ทำให้โฟมเสถียรเร็วขึ้น ซึ่งการเกิดโฟมแบบนี้จะเกิดการเสถียรโดยอาศัยการเกิด พอลิเมอร์ไรเซชัน หรือการเกิดพันธะเชื่อมโยง เช่น ในการผลิตโฟมยางวัลคาไนซ์พร้อม ๆ กับการ ขยายตัวโดยสารฟู ทำให้การขยายตัวของโฟมแข่งขันกับการวัลคาไนซ์

2.11.2 โครงสร้างเซลล์และสมบัติของโฟมยาง

การเกิดเซลล์ในลักษณะต่าง ๆ เช่น ความหนาแน่นของเซลล์และขนาดของเซลล์จะมีผลต่อ สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สมบัติการนำความร้อนของโฟมที่ได้ ซึ่งเซลล์ที่เกิดขึ้นอาจมีจำนวน มากน้อยและรูปร่างแตกต่างกันออกไป แล้วแต่กระบวนการผลิต โดยโครงสร้างเซลล์ที่กล่าวมาข้างต้น เป็นคุณลักษณะสำคัญที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของโฟม

1. ความหนาแน่นเซลล์

ความหนาแน่นเซลล์ (Cell density) จะเป็นสมบัติทางโครงสร้างของโพลิเมอร์ที่แสดงถึงลักษณะส่วนประกอบของโพลิเมอร์ที่เป็นของแข็งกับส่วนที่เป็นก๊าซ (Solid phase and gas phase) นอกจากนี้ความหนาแน่นเซลล์แสดงความสัมพันธ์กับสมบัติทางกายภาพหลาย ๆ อย่างด้วย เช่น ความหนาแน่นโพลิเมอร์ ความแข็งแรง สมบัติการนำความร้อน และสมบัติทางไฟฟ้า

2. ขนาดเซลล์กับความหนาแน่นของผนังเซลล์

การที่โพลิเมอร์มีจำนวนเซลล์และสัดส่วนเซลล์ปิด-เปิดเท่ากัน พบว่าความแข็งแรง สมบัติด้านความร้อน และทางกายภาพอื่น ๆ จะแตกต่างกันมากในโพลิเมอร์เดียวกันในโพลิเมอร์ชนิดหนึ่ง ๆ ที่มีความหนาแน่นของผนังเซลล์เท่ากัน แต่ขนาดเซลล์ต่างกัน หรือขนาดเซลล์เท่ากัน แต่ความหนาแน่นของผนังเซลล์ไม่เท่ากัน นั่นคือ ความหนาแน่นของโพลิเมอร์ต่างกัน ซึ่งแสดงว่าความหนาแน่นของโพลิเมอร์จะไม่ขึ้นอยู่กับเฉพาะขนาดเซลล์ แต่จะถูกควบคุมด้วยความหนาแน่นของผนังเซลล์ด้วย โพลิเมอร์ที่มีส่วนประกอบทางเคมีความหนาแน่นและจำนวนเซลล์เปิด-ปิดเท่ากัน พบว่าขนาดเซลล์จะมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของโพลิเมอร์ เช่น การเพิ่มขนาดเซลล์จะลดสมบัติเชิงกล แต่เพิ่มการนำความร้อน หรือลดความเป็นฉนวนความร้อนลง

2.11.3 สมบัติการนำความร้อนของโพลิเมอร์

การนำความร้อนของโพลิเมอร์ (λ) จะเป็นผลรวมของการนำความร้อนของส่วนที่เป็นของแข็ง (λ_s) ส่วนที่เป็นก๊าซ (λ_g) ส่วนของการพาความร้อน (convective, λ_c) และการนำความร้อนโดยผ่านการแผ่ความร้อนในทุกทิศทาง (Radiative, λ_r) ดังสมการที่ (1)

$$\lambda = \lambda_s + \lambda_g + \lambda_c + \lambda_r \quad (1)$$

โดยปกติค่า λ จะต่ำมาก อันเนื่องมาจากเหตุผล 2 ประการ คือ การนำความร้อนของโพลิเมอร์เองที่ต่ำมากซึ่งมีค่าประมาณ 0.2-0.3 W/(m.K) และการที่มีส่วนของโพลิเมอร์ในส่วนผนังและ ribs เท่านั้น ทำให้มีโพลิเมอร์เพียงปริมาณเล็กน้อยในโพลิเมอร์ หากพิจารณาในส่วนของก๊าซที่อยู่ในเซลล์ ซึ่งมีปริมาณมากกว่าจะเป็นส่วนที่สำคัญที่สุดต่อการกระจายความร้อน เพราะโพลิเมอร์ปกติจะประกอบด้วยก๊าซซึ่งอาจมีปริมาตร 90 เปอร์เซ็นต์ หรือมากกว่านี้ เนื่องจากปัจจุบันมีการใช้สารฟลูออโรโพลิเมอร์ได้แตกต่างกันหลายชนิด ดังนั้นค่า λ_g จึงมีค่าอยู่ในช่วงกว้างมากแล้วแต่ชนิดของสารฟลูออโรโพลิเมอร์

การนำความร้อนที่เกิดโดยวิธีการแผ่ความร้อน (λ_r) นั้นจะขึ้นอยู่กับขนาดของเซลล์ และความโปร่งใสของผนังเซลล์ โดยโพลิเมอร์ที่มีขนาดเล็กจำนวนมากจะมีการแผ่ความร้อนในทุกทิศทางได้น้อยกว่าโพลิเมอร์ที่มีขนาดใหญ่และจำนวนเซลล์น้อยและนี่เป็นเหตุผลอธิบายว่า การเพิ่มขึ้นของขนาดเซลล์มีผลต่อการนำความร้อนมากกว่าการเพิ่มความหนาแน่นโพลิเมอร์ สำหรับการนำความร้อนโดยวิธีการพา (λ_c) จะมีผลต่อค่าการนำความร้อนของโพลิเมอร์ (λ) น้อยมาก เนื่องจากโพลิเมอร์ที่ผลิตทั่วไปมีขนาดของเซลล์เล็ก

2.12 การผลิตบับเบิล (Bubble generation)

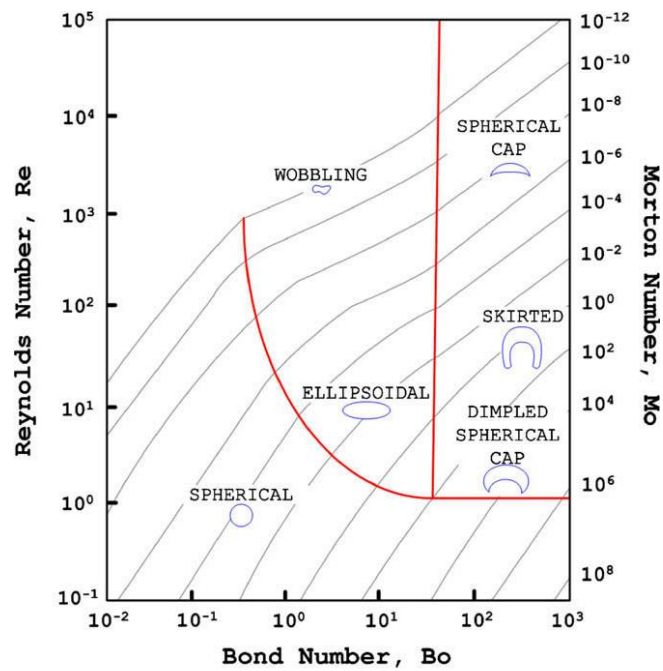
2.12.1 การเกิดบับเบิล (Bubble formation)

ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดบับเบิล (ฟองก๊าซ) และขนาดของบับเบิลประกอบด้วยปัจจัยต่าง ๆ เช่น

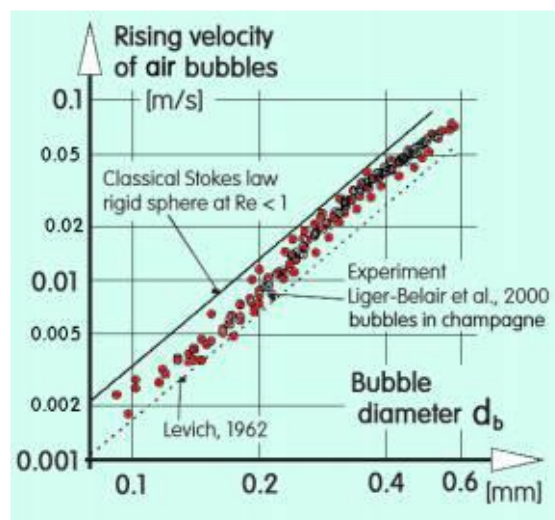
1. ความหนืดและแรงตึงผิวของของเหลว จากการทดลองพบว่าขนาดของบับเบิลใหญ่ขึ้นเมื่อความหนืดและแรงตึงผิวของของเหลวเพิ่มขึ้น [20, 21]
2. ความหนาแน่นของของเหลวและก๊าซ ของเหลวที่มีความหนาแน่นสูงจะทำให้แรงลอยตัว (Buoyancy force) ของบับเบิลเพิ่มขึ้น ส่งผลให้บับเบิลหลุดออกจากดิฟฟิวเซอร์ได้ง่ายขึ้น ดังนั้นขนาดของบับเบิลจะเล็กลงเมื่อของเหลวมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น [20, 21] ในทางตรงกันข้าม ขนาดของบับเบิลจะใหญ่ขึ้นเมื่อความหนาแน่นของก๊าซเพิ่มขึ้น [22]
3. อัตราการไหลของก๊าซและของของเหลว ที่อัตราการไหลของก๊าซขาเข้าสูงขึ้นจะส่งผลให้ขนาดบับเบิลใหญ่ขึ้น แต่ขนาดของบับเบิลจะเล็กลงเมื่ออัตราการไหลของของเหลวสูงขึ้น (กรณีไหลตามกัน) เนื่องจากบับเบิลหลุดออกจากดิฟฟิวเซอร์ได้ง่าย [21]
4. ดิฟฟิวเซอร์ (Diffuser) โดยทั่วไปดิฟฟิวเซอร์สามารถติดตั้งที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในบับเบิลคอลัมน์ได้ 3 ตำแหน่ง คือ ด้านบน ด้านข้าง และด้านล่าง โดยที่ขนาดของบับเบิลเล็กลงเมื่อระยะความลึกของดิฟฟิวเซอร์มากขึ้น [20] วัสดุที่ใช้ทำดิฟฟิวเซอร์ก็ส่งผลต่อขนาดบับเบิลเช่นกัน คือถ้าวัสดุที่ใช้มีค่าความสามารถในการเปียก (Wettability) จะทำให้ขนาดของบับเบิลเล็กลง เนื่องจากบับเบิลหลุดออกจากดิฟฟิวเซอร์ได้ง่าย [23, 24]

2.12.2 ความเร็วในการลอยตัวของบับเบิล (Bubble rise velocity)

เป็นตัวแปรที่บอกถึงความสามารถในการลอยตัวของบับเบิล ในขณะที่อยู่ในคอลัมน์ ซึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อการลอยตัวของบับเบิล เช่น ขนาดและรูปร่างของบับเบิล ซึ่งสามารถแบ่งรูปร่างของบับเบิลได้เป็น spherical, ellipsoidal, spherical/ellipsoidal cap และอื่น ๆ [26, 27] ดังรูปที่ 2.10 ในส่วนของแรงลอยตัวของบับเบิลที่แปรผันตรงกับขนาดของบับเบิล ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.10 แสดงรูปร่างของบับเบิลขณะที่ผ่านของเหลว [26]



รูปที่ 2.11 ความเร็วในการลอยตัวของฟองก๊าซที่แสดงตามทฤษฎี (Levich) และจากการทดลอง [28]

2.12.3 บับเบิลคอลัมน์ (Bubble column)

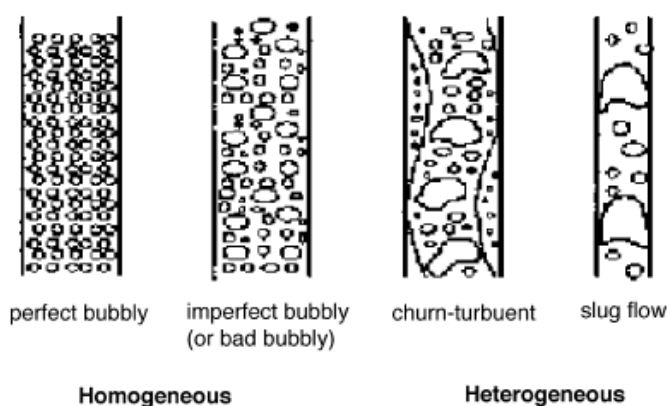
ในอุตสาหกรรมเคมีและปิโตรเคมีได้มีการใช้บับเบิลคอลัมน์กันอย่างแพร่หลาย โดยมีจุดเด่นในการถ่ายเทมวลสารและความร้อนได้ดี นอกจากนั้นค่าบำรุงซ่อมแซมก็ยังต่ำมาก [19] ในการออกแบบและขยายขนาดของบับเบิลคอลัมน์โดยทั่วไปจะมีอัตราส่วนระหว่างความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 2 ต่อ 5 แต่ปัจจัยที่ต้องคำนึงคือ การถ่ายเทมวลสารและความร้อน การผสม และการเกิดปฏิกิริยา [22, 29]

รูปแบบการไหลของบับเบิลคอลัมน์สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 แบบ คือ ขึ้นอยู่กับขนาดของบับเบิลคอลัมน์และความเร็วก๊าซ (Superficial gas velocity) ได้แก่ homogeneous (bubbly flow) regime, heterogeneous (churn-turbulent) regime และ slug flow regime ดังรูปที่ 2.12

1. การไหลแบบ homogeneous regime เกิดขึ้นเมื่อความเร็วก๊าซต่ำ ฟองก๊าซจะมีขนาดค่อนข้างเล็ก และความเร็วในการลอยตัวสม่ำเสมอ การกระจายของฟองสม่ำเสมอซึ่งสามารถสังเกตได้จากพื้นที่หน้าตัดของบับเบิลคอลัมน์ ดังนั้นขนาดของฟองในการไหลแบบ homogeneous (Bubbly flow) regime ค่อนข้างที่จะสมบูรณ์

2. การไหลแบบ churn-turbulent regime เรียกอีกอย่างว่า heterogeneous regime เกิดขึ้นเมื่อความเร็วก๊าซสูง เป็นลักษณะรูปแบบ homogeneous gas-liquid system ที่ถูกรบกวนจากการปั่นป่วนที่เพิ่มขึ้น การเคลื่อนไหวของฟองก๊าซและของเหลวหมุนเวียน ผลที่ตามมาคือรูปแบบการไหลไม่คงที่ (Unsteady flow pattern) มีการรวมตัวของฟองก๊าซทำให้เกิดฟองก๊าซขนาดใหญ่ ในขณะที่เดียวกันก็เกิดการแตกของฟองเกิดเป็นฟองก๊าซขนาดเล็ก ทำให้ระบบมีขนาดฟองก๊าซที่ต่างกัน การไหลแบบนี้บางครั้งเรียกว่า coalesced bubble flow ซึ่งจะมีทั้งฟองก๊าซขนาดใหญ่และฟองก๊าซขนาดเล็ก

3. การไหล slug flow regime เป็นระบบการไหลในคอลัมน์ขนาดเล็ก (เส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 15 เซนติเมตร) ใช้สำหรับการทดลองในห้องปฏิบัติการ และมีอัตราการไหลของก๊าซสูง (High gas flow rates)

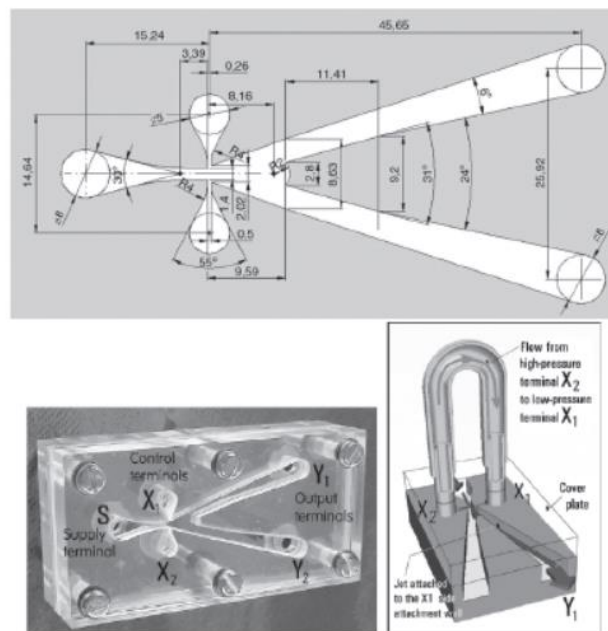


รูปที่ 2.12 การไหลของบับเบิลที่เป็นไปได้ในบับเบิลคอลัมน์ [30]

2.13 ไมโครบับเบิล

ไมโครบับเบิลมีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 1-999 ไมครอน มีวิธีการผลิตได้ 3 วิธีด้วยกัน 1. ใช้เทคนิคการอัดก๊าซเข้าไปของเหลว 2. ใช้เทคนิคคูลตราชาวด์ 3. ใช้ฟลูอิดิก ออสซิลเลเตอร์ (Fluidic oscillator) [29] โดยสองวิธีแรกจะใช้พลังงานมากในการผลิตไมโครบับเบิล ส่วนวิธีสุดท้ายจะใช้พลังงานในการผลิตน้อยกว่า [28, 31, 32] การนำวิธีการไมโครบับเบิลไปประยุกต์ใช้งานในปัจจุบันมีมากมาย เช่น การบำบัดน้ำเสีย การเพาะเลี้ยงปลา การคัดแยกขนาดอนุภาค เป็นต้น

ฟลูอิดิก ออสซิลเลเตอร์ แสดงดังรูปที่ 2.13 เป็นอุปกรณ์ที่ออกแบบโดย ศาสตราจารย์วิลเลียม ซิมเมอร์แมน (Prof. William Zimmerman) ซึ่งใช้ต่อเข้าดิฟฟิวเซอร์ เมื่อก๊าซไหลผ่าน ฟลูอิดิก ออสซิลเลเตอร์ และดิฟฟิวเซอร์ จะทำให้ได้ฟองก๊าซที่มีขนาดเท่ากับขนาดรูพรุนของดิฟฟิวเซอร์ ซึ่งปกติถ้าก๊าซไหลผ่านดิฟฟิวเซอร์อย่างเดียว ฟองก๊าซที่ได้จะมีขนาดประมาณ 10-20 เท่า ของขนาดรูพรุน นอกจากนี้ ฟลูอิดิก ออสซิลเลเตอร์ ยังเป็นอุปกรณ์ที่ไม่มีส่วนที่เคลื่อนไหว ไม่ต้องใช้ไฟฟ้า แข็งแรง ทนทาน และราคาไม่แพง [32]



รูปที่ 2.13 ฟลูอิดิก ออสซิลเลเตอร์ ออกแบบโดยศาสตราจารย์วิลเลียม ซิมเมอร์แมน [28]

2.14 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สุจิตรา [18] ได้ศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการขึ้นรูปและสมบัติของโพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ โดยการขยายปริมาตรด้วยการประยุกต์กระบวนการดันลอปและกระบวนการทาลาเล่ย์ โดยใช้ปั๊มสูญญากาศ เพื่อให้ได้ฟองน้ำที่มีความหนาแน่นต่ำ เมื่อทำการขยายปริมาตรความหนาแน่นของยางฟองน้ำที่ได้จะมีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบลักษณะสัณฐานวิทยาพบว่ายางฟองน้ำที่ไม่ได้ขยายปริมาตรจากทั้งสองกระบวนการ ลักษณะเซลล์ที่ได้มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบและต่อเนื่องกัน แต่มีความแตกต่างกันคือลักษณะเซลล์ของยางฟองน้ำที่ได้จากกระบวนการทาลาเล่ย์มีรูปร่างกลม ส่วนยางฟองน้ำที่ทำการขยายปริมาตรเพิ่มขึ้นเซลล์ที่ได้จากกระบวนการทาลาเล่ย์ยังมีความเป็นระเบียบและต่อเนื่องกัน ขนาดเซลล์ที่มีรูปร่างกลมจะมีขนาดขยายใหญ่ขึ้น แต่เซลล์จากกระบวนการดันลอปที่ได้จากการขยายปริมาตรโครงสร้างของเซลล์เกิดการพังทลายของเซลล์อย่างถาวร จากลักษณะโครงสร้างและความหนาแน่นที่ได้จะส่งผลต่อสมบัติของฟองน้ำ ทำให้โครงสร้างของเซลล์ที่มีลักษณะกลม มีการจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบและต่อเนื่องของยางฟองน้ำที่ได้จากกระบวนการทาลาเล่ย์ จะมีค่าดัชนีความแข็งเชิงกด ค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงกดและค่าดัชนีความแข็งเชิงกดที่เปลี่ยนแปลงไปมีค่าต่ำและค่าการกระด้างมีค่าสูงกว่ายางฟองน้ำที่ได้จากกระบวนการดันลอป

คมสันต์ [15] ได้ศึกษาการเตรียมยางฟองน้ำย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่เตรียมจากยางธรรมชาติและแป้งมันสำปะหลัง โดยเทคนิคการเตรียมแป้งมันสำปะหลังมาสเตอร์แบทช์จากเทคนิคแบบเจลาคีโนซึมาเตรียมยางฟองน้ำ ได้ทำการศึกษาปริมาณแป้งมันสำปะหลังที่ 0 10 30 50 และ 70 phr โดยแปรระบบวัลคาไนซ์ด้วยสารเร่งและกำมะถัน ได้แก่ ระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ (Conventional vulcanization system) ระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ (Semi-Efficiently Vulcanized System) และระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพ (Efficient vulcanization System) จากการศึกษาสมบัติหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนของยางฟองน้ำพบว่า โมดูลัสที่ระยะยืด 100 300 และ 500 เปอร์เซ็นต์ และความต้านทานต่อการฉีกขาดเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามความต้านทานต่อแรงดึง เปอร์เซ็นต์ยืด ณ จุดขาด และการผิดรูปหลังการกดอัดลดลง

วรารุช [33] ได้ศึกษาการพัฒนาวัสดุกระแทกจากยางฟองน้ำ โดยใช้กระบวนการดันลอปในการผลิตยางฟองน้ำ โดยทำการแปรปริสารที่ทำให้เกิดฟอง โพลีเอทิลีนโอลิเอต คือ 0.75 1.00 และ 1.40 phr และใช้สารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่ 0.0 10 20 และ 30 phr ใช้ความร้อน 2 วิธี คือ การอบไอน้ำ และการอบด้วยตู้อบ จากผลการทดลองพบว่าค่าความหนาแน่นที่ใช้โพลีเอทิลีนโอลิเอต 0.75 1.00 และ 1.40 phr ความหนาแน่นของยางฟองน้ำจะมีค่าลดลงตามปริมาณโพลีเอทิลีนโอลิเอตที่เพิ่มขึ้น การให้ความร้อนแบบไอน้ำจะให้ความหนาแน่นที่สูงกว่าการให้ความร้อนแบบอบด้วยตู้อบ ความสามารถในการต้านทานต่อแรงกดพบว่ายางฟองน้ำที่ผ่านกระบวนการไอน้ำสามารถต้านทานแรงกดได้ดีกว่ายางฟองน้ำที่ผ่านกระบวนการอบด้วยตู้อบ ผลของการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่เพิ่มขึ้นทำให้ยางฟองน้ำที่ได้มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นด้วย เพราะแคลเซียมคาร์บอเนตที่เพิ่มขึ้นนั้นเข้าไปแทนที่น้ำบางส่วนหนึ่งจึงทำให้เกิดเป็นฟองยากขึ้นขนาดฟองมีขนาดเล็ก

และไม่มีควมสม่ำเสมอของเซลล์เป็นเหตุให้ยางพองน้ำนั้นมีความหนาแน่นที่สูงขึ้น ยางพองน้ำที่ไม่เติมแคลเซียมคาร์เนตจะมีความหนาแน่นต่ำสุด

สุรศักดิ์ และคณะ [34] ได้ทำการศึกษาผลของสารตัวเติมจากวัสดุธรรมชาติต่อสมบัติของพองน้ำยางธรรมชาติ โดยทำการแปรปริมาณของแป้งไม้ที่ 10 20 30 40 และ 45 กรัม และศึกษาปริมาณ 50 เปอร์เซ็นต์แป้งไม้ที่ปริมาณ 10 20 40 60 และ 80 กรัม พบว่าแป้งไม้ที่ต่ำกว่า 20 กรัม ไม่มีปัญหาในการเกิดพอง แต่เมื่อใช้ในปริมาณที่มากขึ้นการตีพองทำได้ยากขึ้น เพราะเนื่องจากแป้งไม้มีเปอร์เซ็นต์ของแข็งสูงได้ดูดน้ำยางไปหมด เมื่อทดลองที่ 50 เปอร์เซ็นต์ แป้งไม้พบว่าพองน้ำเกิดได้ง่ายขึ้น แต่เมื่อใช้ปริมาณมากขึ้น 60 และ 80 กรัม การตีพองจะเกิดพองยากยิ่งและมีการจับตัวอย่างรวดเร็วหลังจากเติมสารก่อเจลหลัก พองน้ำที่ได้นั้นมีการหดตัวมาก และยังสามารถศึกษาการแปรปริมาณเส้นใยเปลือกมะพร้าวต่อสมบัติของพองยาง พบว่าเมื่อใช้ในปริมาณที่ต่ำกว่า 15 กรัม ไม่มีปัญหาต่อการเกิดพอง และเมื่อใช้ในปริมาณ 25 กรัม การตีให้เป็นพองเกิดได้ยากขึ้น เป็นเพราะเส้นใยตกตะกอนเพราะมีน้ำหนักมากขึ้น แต่เมื่อใช้ถึง 40 กรัม พบว่าการตีให้เกิดพองทำได้ง่ายขึ้นแต่เมื่อใส่สารก่อเจลหลักเกิดได้ช้ามากทำให้ได้พองน้ำที่เกิดการยุบตัวมาก และยังสามารถศึกษาปริมาณสารตัวเติมประเภทเคลย์ (Clay) ต่อสมบัติของพองน้ำ พบว่าที่ทำการเติม 50 เปอร์เซ็นต์เคลย์ ในช่วง 10 และ 20 กรัม พองน้ำที่จะมีความละเอียดและเกิดพองได้ง่าย แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเป็น 40 กรัม จะได้พองที่ไม่สม่ำเสมอ เกิดพองได้ยากขึ้น อาจเป็นเพราะสารตัวเติมได้ดูดซับเอาน้ำจากระบบจึงทำให้ไม่มีความสมดุลเกิดขึ้นในการเกิดพอง และทำให้ปริมาณพองที่ได้น้อยลง พองยางไม่เสถียร การเจลของพองจะเกิดเร็วขึ้นตามปริมาณสารตัวเติมที่เพิ่มสูงขึ้น

Ramasamy, S., et al [35] ได้ศึกษาผลของการใส่ผงข้าวแกลบลงไปไนโพมยางต่อสมบัติเชิงกล โดยได้ทำการแปรปริมาณผงข้าวแกลบ ที่ปริมาณ 0.0 2.5 5.0 7.5 และ 10.0 phr จากผลการทดลองพบว่าสมบัติเชิงกลของการยุบตัวเนื่องจากแรงกด ที่ 0 phr มีค่าน้อยที่สุด และที่ 10 phr มีค่ามากที่สุด สามารถบอกได้ว่าเมื่อทำการเติมผงข้าวแกลบในปริมาณที่มากขึ้นจะทำให้มีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้นในโพมยางแต่ในทางตรงกันข้ามจะทำให้ค่าคืนตัวเนื่องจากแรงกด (Recovery) นั้นไม่ดี และสมบัติทางด้านความแข็งแรงกด (Compressive stress-strain) พบว่าในระยะหดเนื่องจากแรงกดเดียวกัน แรงที่ใช้ในการกดของโพมที่ 10 phr มีค่าสูงสุด และที่ 0 phr มีค่าน้อยสุด ยิ่งใส่ปริมาณผงข้าวแกลบมาก แรงที่ใช้ก็มากตามขึ้นด้วย

Bashir, A.S.M., et al. [36] ได้ศึกษาผลสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสมบัติสัญญาณทางวิทยาของโพมยางที่ใช้เปลือกไข่เป็นสารตัวเติม ซึ่งได้ทำการแปรปริมาณเปลือกไข่ที่ 0.0 2.5 5.0 7.5 และ 10.0 phr จากผลการทดลองพบว่าค่าความแข็งแรงดึง ที่ 2.5 phr มีค่าต่ำสุด เพราะว่าอาจเกิดการกระจายตัวเข้ากันไม่ดีในโพมยางแต่เมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติมมากขึ้นค่าของความแข็งแรงดึง มีค่ามากขึ้น และค่าของการยืดตัวจนขาด พบว่าที่ 0.0 phr มีค่าการยืดตัวจนขาดสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับที่ปริมาณอื่น ๆ ถ้ายิ่งใส่สารตัวเติมในปริมาณที่มากขึ้นทำให้ค่าการยืดตัวจนขาดนั้นไม่ดี ยืดได้น้อย และค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงกด พบว่า ที่ปริมาณ 10.0 phr ให้ค่าสูงสุด แสดงว่าค่าที่ได้นั้นมีสมบัติที่ไม่ดีในขณะที่ 0.0 phr มีค่าต่ำสุด บ่งบอกถึงค่าที่ดีสำหรับโพมยาง ยิ่งเพิ่ม

ปริมาณสารตัวเติมมากขึ้นสมบัติการยุบตัวเนื่องจากแรงกดจะได้ค่าที่ไม่ดี สมบัติความหนาแน่น พบว่า ยิ่งเพิ่มสารตัวเติมมากขึ้นจะได้ค่าความแน่นที่สูงขึ้นตามไปด้วย การทดสอบสมบัติทางความร้อนพบว่า ปริมาณสารตัวเติม 10.0 phr มีเปอร์เซ็นต์ของแก้ว (Char) ที่ตกค้างมากที่สุด ยิ่งเพิ่มสารตัวเติมมากขึ้น แก้วตกค้างก็จะมีค่ามากขึ้นด้วย และสมบัติทางสัญญาณวิทยภาพว่าสารตัวเติมกระจายตัวเข้ากับเนื้อยางได้ดี

Karim, A.F.A., et al. [37] ได้ทำการศึกษาการวิเคราะห์สมบัติของการเติมเส้นใยปอแก้ว (Kenaf fiber) ลงไปในโพลียเอทิลีนเทอร์ฟทาเลต ซึ่งได้ทำการแปรปริมาณของสารตัวเติมที่ 0.0 1., 3.0 5.0 และ 7.0 phr จากผลการทดลองพบว่า สมบัติของความแข็งแรงดึง ที่ 0.0 ให้ค่ามากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับที่ปริมาณอื่น ๆ ยิ่งทำการเพิ่มสารตัวเติมที่เป็นเส้นใยลงจะทำให้ค่าความแข็งแรงดึง มีค่าลดลง และค่าของการยืดตัวจนขาด ที่ไม่ใส่สารตัวเติมเลยคือที่ 0.0 phr จะให้ค่าสูงที่สุดเมื่อทำการยืดออกไปจนขาด ในปริมาณที่ใส่สารตัวเติมนั้นจะให้ค่าการยืดตัวจนขาดที่ต่ำกว่าที่ได้จะใกล้เคียงกัน และค่าของโมดูลัส ที่ปริมาณสารตัวเติมมากขึ้นก็ให้ค่าที่สูงตามไปด้วย ส่วนค่าของความหนาแน่น นั้น ยิ่งใส่สารตัวเติมมากขึ้นค่าได้ก็จะมีค่ามากขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน สมบัติการยุบตัวเนื่องจากแรงกด ที่ ปริมาณสารตัวเติม 0.0 phr จะมีค่าที่ดีที่สุด ยิ่งเพิ่มปริมาณสารตัวเติมที่มากขึ้นค่าที่ได้ก็จะสูงและมีสมบัติที่ไม่ดี และทำให้ค่าการคืนตัวเนื่องจากแรงกดไม่มีตามไปด้วยตามปริมาณสารตัวเติมที่มากขึ้น สมบัติทางความร้อนที่ไม่มีการเติมสารจะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ของถ่านที่ตกค้างน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับที่ ปริมาณสารตัวเติมมาก ยิ่งใส่มากเปอร์เซ็นต์ของถ่านที่ตกค้างก็จะมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย

Chapman et al. [38] ได้ศึกษาว่ายาฟองน้ำที่ทำการเตรียมจากน้ำยางคอมพาวด์มีส่วนผสมของสารที่ทำให้เกิดฟอง ทำให้เกิดฟองด้วยการตีฟอง จะเห็นว่าสารที่เหมาะสมในการทำให้เกิดฟองคือ แอมโมเนียมโอเลเอต (Ammonium oleate) ส่วนสารที่ใช้เป็นสารก่อเจลหลักที่ใช้ร่วมกับสารที่ทำให้เกิดฟองคือ โซเดียมซิลิโคฟลูออไรด์ (Sodium silicofluoride) โพแทสเซียมซิลิโคฟลูออไรด์ (Potassium silicofluoride) หรือแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต (Ammonium persulphate) โดยจะสามารถเติมลงไปก่อนหรือหลังจากการเกิดฟองก็ได้

Blackley [39] ได้รายงานในการศึกษาสารตัวเร่งประเภทไดไทโอคาร์บาเมต (Dithiocarbamate) นั้นสามารถละลายในน้ำได้โดยใช้ Sodium di-nbutyldithiocarbamate เป็นสารตัวเร่งในการวัลคาไนซ์โดยใช้กำมะถัน โดยการเตรียมแผ่นฟิล์มจากน้ำยางธรรมชาติ จะพบว่าในการใช้ปริมาณของสารตัวเร่งเพียง 0.5 phr ทำให้เกิดการวัลคาไนซ์ได้อย่างรวดเร็ว ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และยังสามารถวัลคาไนซ์ได้ที่อุณหภูมิห้องโดยใช้ระยะเวลาประมาณ 1 อาทิตย์ ในการเพิ่มสารตัวเร่งจะไม่มีผลกระทบต่ออัตราการวัลคาไนซ์

Blackley [40] ได้รายงานในการศึกษาของสารตัวเร่งประเภทไดไทโอคาร์บาเมต 2 ชนิด ได้แก่ ซิงค์ไดเอทิล ไดไทโอคาร์บาเมต และซิงค์ไดบิวทิลไดไทโอคาร์บาเมต ได้ทำการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิการวัลคาไนซ์ต่อการต้านทานต่อแรงดึงของฟิล์มที่ได้เตรียมจาก Isobutene-Isoprene Rubber Latex และได้ทำการ Post vulcanized ที่อุณหภูมิต่าง ๆ เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง จะเห็นว่าการใช้สารตัวเร่ง ซิงค์ไดเอทิลไดไทโอคาร์บาเมตจะเกิดการวัลคาไนซ์ได้แค่เพียงเล็กน้อย ภายได้

สภาวะอุณหภูมิในการวัลคาไนซ์ที่ต่ำกว่า 120 องศาเซลเซียส และยังพบว่าในการใช้สารตัวเร่งซิงค์ไดไธโอคาร์บาเมตนั้นสามารถใช้อุณหภูมิในการวัลคาไนซ์ที่ต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส จะเกิดการวัลคาไนซ์ได้เร็วกว่าการใช้ซิงค์ไดเอทิลไดไธโอคาร์บาเมต และยังสามารถให้ค่าการต้านทานต่อแรงดึงสูงกว่าการใช้ซิงค์ไดเอทิลไดไธโอคาร์บาเมต

ในการใช้ซิงค์ไดเอทิลไดไธโอคาร์บาเมตเป็นสารตัวเร่งนั้น จะสามารถทำให้น้ำยางที่ได้รักษาสภาพด้วยแอมโมเนียเริ่มมีการเกิดคริมแข็งขึ้นอย่างช้า ๆ ในสภาวะปกติ ซึ่งเกิดจากอนุมูลของซิงค์เกิดขึ้นอย่างช้า ๆ และยังมีปัญหาอีกประการหนึ่งของการใช้สารพวกไดไธโอคาร์บาเมตเป็นสารตัวเร่งคือ จะได้ชิ้นงานผลิตภัณฑ์ที่เกิดรอยตำหนิได้ง่ายเมื่อเกิดการสัมผัสกับสารที่มีพวกทองแดงเป็นองค์ประกอบแม้เพียงเล็กน้อยก็จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของสีเป็นสีน้ำตาลของสารพวก Copper Dithiocarbamate ที่เกิดปฏิกิริยาทองแดงกับไดไธโอคาร์บาเมตในชิ้นงานผลิตภัณฑ์

Blackley [41] ได้รายงานเกี่ยวกับผลของการใช้ปริมาณซิงค์ออกไซด์ที่ทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นในการเกิดวัลคาไนซ์ โดยในแผ่นฟิล์มวัลคาไนซ์ที่มีการใช้กำมะถัน 1 phr และใช้ Zine dibutyl dithiocarbamate ในปริมาณ 1 phr เป็นสารตัวเร่งจะพบว่าปริมาณซิงค์ออกไซด์ได้ส่งผลต่ออัตราในการวัลคาไนซ์เพียงเล็กน้อย ในการเพิ่มปริมาณซิงค์ออกไซด์จะทำให้มีความแข็งแรงดึง และความต้านทานต่อการสลายตัวของโมเลกุลยาง (Over-valcanization) และถ้าต้องการแผ่นยางที่มีความใสให้ใช้ซิงค์ออกไซด์ในปริมาณที่มากที่สุด 0.5 phr และถ้าต้องการให้มีค่า โมดูลัสสูง และความต้านทานต่อการสลายตัวของโมเลกุลยาง จะต้องใช้ซิงค์ออกไซด์อย่างน้อย 2.5 phr

Blackley [42] ได้รายงานเกี่ยวกับปริมาณกำมะถันที่ใช้สำหรับยางคอมปาวด์น้ำยางธรรมชาติ มีปริมาณเพียง 1-2 phr และยังแบ่งการเชื่อมโยงของโมเลกุล (Crosslink) ของคอมปาวด์ในระบบการวัลคาไนซ์โดยใช้กำมะถัน (Sulfur-valcanization) ตามปริมาณกำมะถันสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทคือ โมโนซัลฟิดิก (Monosulphidic) ไดซัลฟิดิก (Disulphidic) และโพลีซัลฟิดิก (Polysulphidic) ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างของการเชื่อมโยงโมเลกุลต่อสมบัติเชิงกล ซึ่งจะพบว่าในการเชื่อมโยงของโมเลกุลแบบโพลีซัลฟิดิก จะให้สมบัติในด้านความทนทานต่อแรงดึงสูง แต่ในส่วนของโมโนซัลฟิดิกจะให้สมบัติการต้านทานต่อความร้อนได้ดีกว่าโพลีซัลฟิดิก ในการเตรียมน้ำยางคอมปาวด์ในระบบกำมะถันโดยใช้สารวัลคาไนซ์ในน้ำยางธรรมชาติ พบว่าการเชื่อมโยงของโมเลกุลแบบโพลีซัลฟิดิกมากกว่า อันเนื่องมาจากอัตราส่วนของการใช้กำมะถันต่อสารตัวเร่งจะเป็นระบบกำมะถันปกติ (Conventional system) มากกว่าระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพ (Efficient vulcanization system)

บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์ ขั้นตอนการทดลอง และวิธีการวิเคราะห์

ในส่วนของงานวิจัยศึกษาเกี่ยวกับขนาดรูพรุนของดิฟฟิวเซอร์และอัตราการไหลของอากาศต่อสมบัติทางกายภาพของโฟมยางธรรมชาติ จากการขึ้นรูปโฟมยางธรรมชาติโดยกระบวนการไมโครบับเบิลด้วยอากาศและศึกษาการขึ้นรูปโฟมยางธรรมชาติด้วยกระบวนการดันลอป เนื้อหาในบทนี้จะประกอบด้วย สารเคมี อุปกรณ์ ขั้นตอนการทดลองและการวิเคราะห์ดังนี้

3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 น้ำยางธรรมชาติชั้นชนิดแอมโมเนียสูง (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 โพแทสเซียมโอเลต (Potassium oleate) มีลักษณะเป็น มีลักษณะเป็นของเหลวสีเหลืองอ่อน เตรียมอยู่ในรูปสารละลายเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ เตรียมสำเร็จจากบริษัท ลักกี้โฟร์ จำกัด

3.1.3 กำมะถัน ((Sulphur, S) มีลักษณะเป็นผงสีเหลืองขุ่น ใช้ในรูปของสารแขวนลอยที่มีความเข้มข้น 50 เปอร์เซ็นต์ ทำหน้าที่เป็นสารวัลคาไนซ์ เตรียมสำเร็จจากบริษัท ลักกี้โฟร์ จำกัด

3.1.4 ซิงค์ไดเอทิลไดโธคาร์บาเมต (Zinc diethyldithiocarbamate, ZDEC) มีลักษณะเป็นผงสีขาวขุ่น ใช้ในรูปของสารแขวนลอยที่มีความเข้มข้น 50 เปอร์เซ็นต์ ทำหน้าที่เป็นสารตัวเร่ง เตรียมสำเร็จจากบริษัท ลักกี้โฟร์ จำกัด

3.1.5 ซิงค์เมอร์แคปโทเบนโซไทอาโซล (Zinc-2-mercaptobenzthiazole, ZMBT) มีลักษณะเป็นผงสีเหลืองขุ่น ใช้ในรูปของสารแขวนลอยที่มีความเข้มข้น 50 เปอร์เซ็นต์ ทำหน้าที่เป็นสารตัวเร่ง เตรียมสำเร็จจากบริษัท ลักกี้โฟร์ จำกัด

3.1.6 ริงสเตย์แอล (WINGSTAY L) มีลักษณะเป็นผงสีขาว ใช้ในรูปของสารแขวนลอยที่มีความเข้มข้น 50 เปอร์เซ็นต์ ทำหน้าที่เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพ เตรียมสำเร็จจากบริษัท ลักกี้โฟร์ จำกัด

3.1.7 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) มีลักษณะเป็นผงสีขาวครีมขุ่น ใช้ในรูปของสารแขวนลอยที่มีความเข้มข้น 50 เปอร์เซ็นต์ ทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ยาง เตรียมสำเร็จจากบริษัท ลักกี้โฟร์ จำกัด

3.1.8 ไดฟีนิลกวานิดีน (Diphenyl guanidine, DPG) มีลักษณะเป็นผงสีขาวขุ่น ใช้ในรูปของสารแขวนลอยที่มีความเข้มข้น 33 เปอร์เซ็นต์ ทำหน้าที่เป็นสารก่อเจลเสริม (Secondary gelling agent) เตรียมสำเร็จจากบริษัท ลักกี้โฟร์ จำกัด

3.1.9 โซเดียมซิลิโคฟลูออไรด์ (Sodiumsilicofluoride, SSF) มีลักษณะเป็นเม็ดสีขาวขุ่น ใช้ในรูปของสารแขวนลอยที่มีความเข้มข้น 12.5 เปอร์เซ็นต์ ทำหน้าที่เป็นสารก่อเจลหลัก เตรียมสำเร็จจากบริษัท ลักกี้โฟร์ จำกัด

3.2 อุปกรณ์

3.2.1 ปัมลมอากาศ ใช้สำหรับปล่อยให้ไหลผ่านแผ่นดีฟิวเซอร์ในบับเบิลคอลัมน์เพื่อให้ตัวอย่างเกิดฟอง ยี่ห้อพูม่า (PUMA) ตัวถังสามารถเก็บอากาศได้ 25 ลิตร จากบริษัท เซ้าท์เทอร์นลิตวิต อ็อกซิเจน จำกัด ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ถังปั๊มลมอากาศ

3.2.2 บับเบิลคอลัมน์

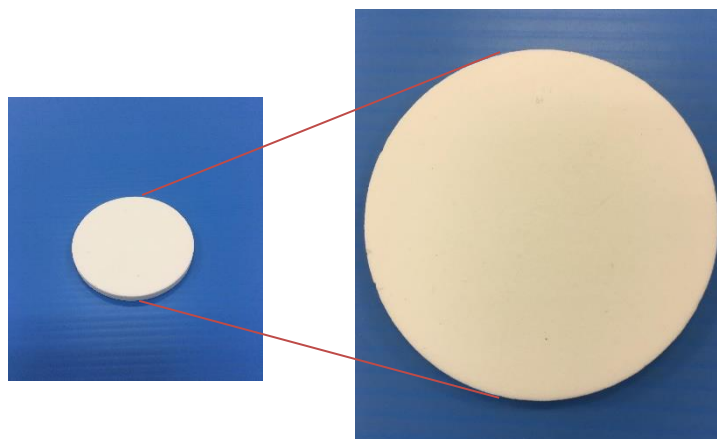
เป็นอุปกรณ์ที่ทำการเชื่อมให้ติดกับตัวดีฟิวเซอร์ เป็นที่กักเก็บฟองอากาศหลังจากทำการปล่อยอากาศผ่านตัวดีฟิวเซอร์ โดยตัววัสดุที่ใช้ทำบับเบิลคอลัมน์จะใช้แก้วชนิดโบโรซิลิเกต ซึ่งออกแบบให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 5 เซนติเมตร ความสูง 80 เซนติเมตร ปริมาตรประมาณ 1,570 ลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งสั่งทำจากภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 บับเบิลคอลัมน์

3.2.3 ดิฟฟิวเซอร์

ดิฟฟิวเซอร์ มีลักษณะเป็นแผ่นกลมทำด้วยแก้วโบโรซิลิเกต แสดงดังรูปที่ 3.12 แผ่นดิฟฟิวเซอร์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ที่ประกอบด้วยรูพรุนขนาดไมครอน (40-100 ไมครอน: P2) (16-40 ไมครอน: P3) และ (10-16 ไมครอน: P4) ทำหน้าที่ในการสร้างฟองอากาศขนาดเล็กเพื่อทำการปล่อยอากาศไหลผ่านแผ่นดิฟฟิวเซอร์ ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แผ่นดิฟฟิวเซอร์

3.3.4 อุปกรณ์วัดอัตราการไหล (Flow meter)

ทำหน้าที่วัดอัตราการไหลของก๊าซขาเข้าก่อนปล่อยไหลผ่านแผ่นดิฟฟิวเซอร์เข้าสู่บับเบิลคอมลัมน์ ตรงหน้าปัดสามารถบอกอัตราการไหลที่ต้องการได้ โดยในงานวิจัยนี้ใช้ ยี่ห้อ Aalborg อัตราการไหลตั้งแต่ 0-120 มิลลิลิตรต่อนาที จากสหรัฐอเมริกา ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลที่อัตราการไหล 0-120 มิลลิลิตรต่อนาที

3.2.5 เบ้าพิมพ์ (Mold)

ทำจากโลหะอะลูมิเนียม มีลักษณะเป็นเบ้าพิมพ์แบบกลม มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร ความสูง 5 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 เบ้าพิมพ์อะลูมิเนียม

3.2.6 ชุดตีฟองไข่เครื่องตีไข่เอนกประสงค์ Hobart mixer (HOM-150123, 300W)

สามารถปรับระดับความเร็วได้ 5 ระดับ โดยเรียงลำดับความเร็วต่ำสุดไปยังความเร็วสูงสุดคือ ระดับ 1 2 3 4 และ 5 ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 เครื่องตีไข่เอนกประสงค์

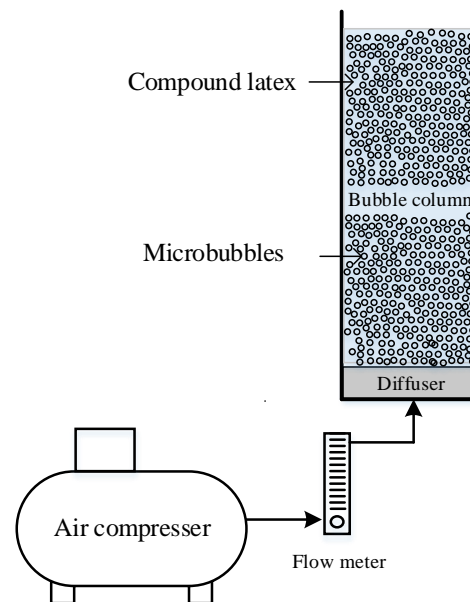
3.3.7 เครื่องกวน สำหรับบ่มน้ำยางกับสารเคมี ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 เครื่องกวน

3.3 กระบวนการทดลอง

3.3.1 ออกแบบและจัดสร้างชุดการทดลอง



รูปที่ 3.8 ชุดการทดลองกระบวนการไมโครบับเบิล

3.3.2 การเตรียมน้ำยางคอมปาวด์

ในการศึกษานี้มีวิธีการเตรียมน้ำยางคอมปาวด์สำหรับการทดลองดังนี้ โดยนำน้ำยางชนิดแอมโมเนียสูงมาใส่ในถังเพื่อทำการบ่มน้ำยางกับสารเคมี (Maturation) โดยเติมโพแทสเซียมโอเลต กำมะถัน ซิงค์ไดเอทิลไดโธโอคาร์บาเมต ซิงค์เมอร์แคปโตเบนโซไทอาโซล และ วิงสเตย์แอล จากนั้นทำการผสมด้วยความเร็วรอบต่ำเป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ถังบ่มน้ำยาง

3.3.2.1 สูตรที่ใช้ในการผลิตโฟมยาง

ตารางที่ 3.1 สูตรโฟมยาง

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 การขึ้นรูปโฟมยางด้วยกระบวนการไมโครบับเบิล

การเตรียมโฟมยางโดยกระบวนการไมโครบับเบิลด้วยปั๊มลมอากาศ มีการติดตั้งอุปกรณ์และขั้นตอนกระบวนการผลิต ดังรูปที่ 3.10



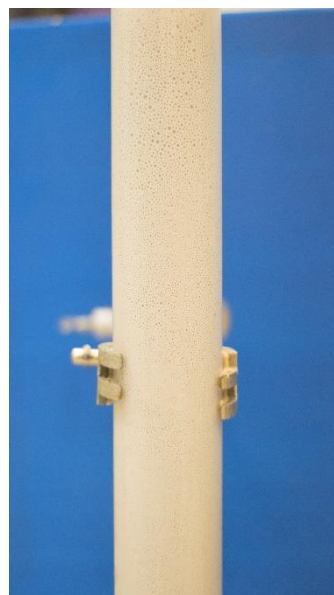
รูปที่ 3.10 การติดตั้งอุปกรณ์ของกระบวนการไมโครบับเบิล ปั๊มลมอากาศเชื่อมต่อกับเครื่องวัดอัตราการไหลและเชื่อมต่อกับบับเบิลคอลัมน์ลักษณะทรงกระบอกที่ติดอยู่กับแผ่นดิฟฟิวเซอร์

3.3.3.1 การเตรียมโฟมยางธรรมชาติโดยใช้กระบวนการไมโครบับเบิล

3.3.3.1.1 นำน้ำยางคอมปาวด์มาเทลงในบับเบิลคอลัมน์พร้อมกับปล่อยอากาศผ่านตัววัดอัตราการไหลและรอเวลาจนให้เกิดฟองในบับเบิลคอลัมน์จนเต็ม ดังรูปที่ 3.11



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.11 แสดงการทำให้เกิดฟองด้วยไมโครบับเบิล (ก) แสดงการทำให้เกิดฟองโดยอากาศไหลผ่าน
น้ำยางคอมปาวด์ (ข) แสดงการขยายตัวเพื่อให้เกิดฟองเต็มบับเบิลคอลัมน์

3.3.3.1.2 นำฟองยางจากบับเบิลคอลัมน์ลงในหม้อกวนหลังจากนั้นทำการเติม
สาร ZnO กับ DPG แล้วทำการกวนด้วยความเร็วรอบต่ำ เป็นเวลา 2 นาที เพื่อให้สารก่อเจลกระจาย
ทั่ว และหลังจากนั้นเติมสารก่อเจล SSF แล้วกวนด้วยความเร็วรอบต่ำ เป็นเวลา 1 นาที ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 กวนด้วยความเร็วต่ำ พร้อมใส่ ZnO กับ DPG และสารก่อเจล

3.3.3.1.3 หลังจากนำเทเข้าเบ้าพิมพ์และตั้งไว้ให้เกิดการเจลของฟองยาง ดังรูปที่ 3.13



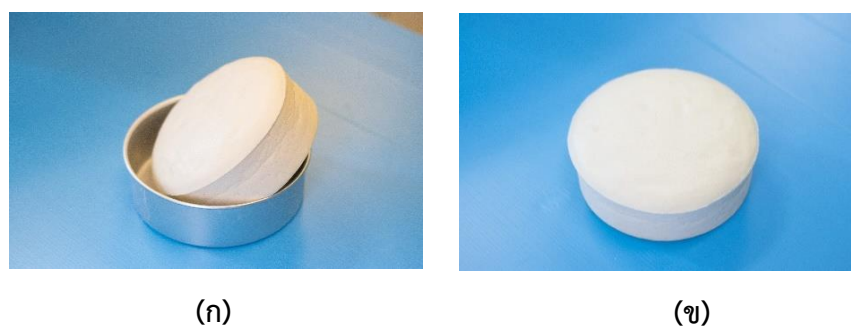
รูปที่ 3.13 (ก) แสดงการนำฟองยางเทใส่เบ้าพิมพ์ (ข) ฟองยางเกิดการเจลในเบ้าพิมพ์

3.3.3.1.4 จากนั้นนำเข้าเตาอบเพื่อให้เกิดการวัลคาไนซ์ของฟองยางที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 การวัลคาไนซ์ของฟองยางในเตาอบ

3.3.3.1.5 ทำการแกะออกจากเบ้า ล้างและอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นก็จะได้ผลิตภัณฑ์โฟมยาง ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 ผลิตภัณฑ์โฟมยาง (ก) แกะฟองยางออกจากเบ้าพิมพ์ (ข) ผลิตภัณฑ์ฟองยางธรรมชาติ

แผนผังสรุปการขั้นตอนการทำโคมยางด้วยกระบวนการไมโครบำบัด



รูปที่ 3.16 วิธีการเตรียมฟองยางธรรมชาติด้วยกระบวนการไมโครบำบัด

3.3.4 การขึ้นรูปโฟมยางด้วยกระบวนการดันลอป

การเตรียมโฟมยางโดยกระบวนการดันลอป มีขั้นตอนกระบวนการผลิต ดังรูปที่

3.22

3.3.4.1. นำน้ำยางคอมปาวด์ที่เตรียมไว้มาเทลงในหม้อกวน ดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 น้ำยางคอมปาวด์ในหม้อกวน

3.3.4.2 เริ่มกวนด้วยความเร็วรอบสูงเพื่อให้เกิดฟองตามที่ต้องการ หลังจากนั้นใส่ ZnO และ DPG กวนด้วยความเร็วรอบที่ต่ำ เป็นเวลา 1 นาที จากนั้นใส่สารก่อเจล SSF และกวนต่ออีก 30 วินาที ดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 กวนด้วยความเร็วรอบสูงเพื่อให้เกิดฟอง พร้อมกับใส่ ZnO กับ DPG และสารก่อเจล

3.3.4.3 เทใส่เบ้าพิมพ์และตั้งไว้ให้เกิดการเซ็ตตัว ดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 (ก) แสดงการนำฟองยางเทใส่เบ้าพิมพ์ (ข) ฟองยางเกิดการเจลในเบ้าพิมพ์

3.3.4.4 จากนั้นนำเข้าเตาอบเพื่อให้เกิดการวัลคาไนซ์ของฟองยางที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ดังรูปที่ 3.20



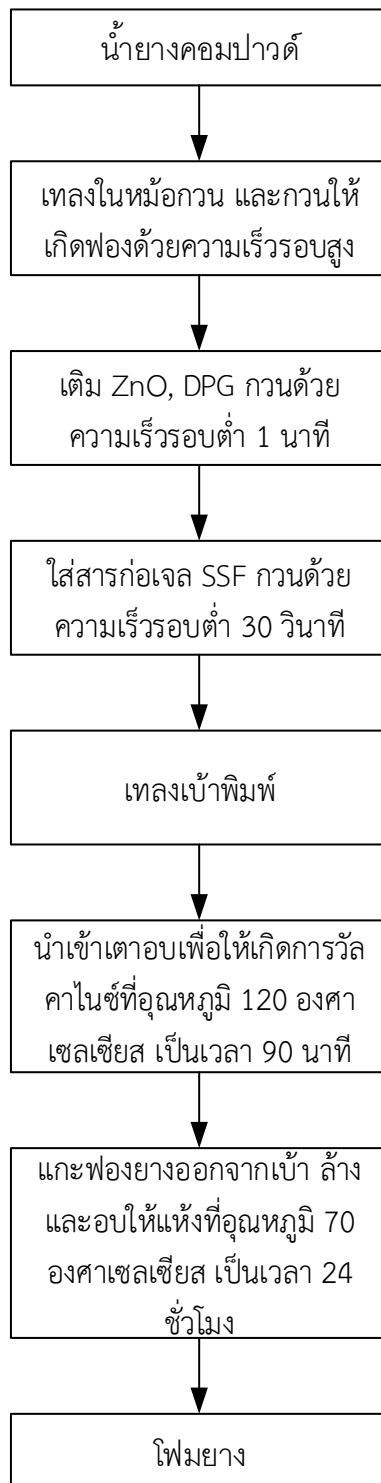
รูปที่ 3.20 การวัลคาไนซ์ของฟองยางในเตาอบ

3.3.4.5 ทำการแกะออกจากเบ้า ล้างและอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นก็ได้ผลิตภัณฑ์โฟมยาง ดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 (ก) แกะฟองยางออกจากเบ้าพิมพ์ (ข) ผลิตภัณฑ์ฟองยางธรรมชาติ

แผนผังสรุปการเตรียมโฟมยางธรรมชาติโดยใช้กระบวนการต้นลอป



รูปที่ 3.22 วิธีการเตรียมโฟมยางธรรมชาติโดยใช้กระบวนการต้นลอป

3.4 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ

3.4.1 การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยา

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโพลีเมอร์ธรรมชาติถูกตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope, OM , OLYMPUS, SZX7) เพื่อดูโครงสร้างของโพลีเมอร์เบื้องต้น และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM, JEOL, JSM-5800LV) เพื่อตรวจสอบลักษณะรูปร่างขนาด และการเชื่อมต่อของเซลล์โพลีเมอร์ ที่แรงดันไฟฟ้า 20 kV โดยชิ้นงาน จะถูกเคลือบด้วยทองคำก่อนการตรวจสอบ จากนั้นจะใช้โปรแกรม ImageJ Software ในการวัดขนาดของเซลล์ของโพลีเมอร์ [43] โดยตัวอย่างของกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ แสดงดังรูปที่ 3.23



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.23 (ก) กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (ข) กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด

3.4.2 ความหนาแน่น

การทดสอบความหนาแน่นตามมาตรฐาน ASTM D 3574-95 โดยการตัดชิ้นโฟมยางให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมขนาด 2.0×2.0×2.0 ลูกบาศก์เซนติเมตร และนำไปชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งละเอียด 2 ตำแหน่ง และมีสูตรคำนวณดังสมการ 3.1

$$\rho = M/V \quad (3.1)$$

ρ = ความหนาแน่นของโฟมยาง (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

M = น้ำหนักของโฟมยาง (กรัม)

V = ปริมาตรของโฟมยาง (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

3.4.3 จำนวนเซลล์ต่อปริมาตรที่อยู่ในโฟมยาง

จำนวนเซลล์ต่อหน่วยปริมาตรสามารถคำนวณได้จาก สมการ 3.2 [44]

$$N = \frac{6}{\pi d^3} \left(\frac{\rho_{rubber}}{\rho_{foam}} - 1 \right) \quad (3.2)$$

N = จำนวนเซลล์ต่อปริมาตร (เซลล์ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

d = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเซลล์เฉลี่ยของโฟมยาง (ไมครอน)

ρ_{rubber} = ความหนาแน่นของยางที่เป็นของแข็ง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.09 (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

ρ_{foam} = ความหนาแน่นของโฟมยาง (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

3.4.4 การทดสอบค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงกด

ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ISO 1856 Method B โดยการตัดชิ้นงานเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 50 ± 1 มิลลิเมตร หนา 25 ± 1 มิลลิเมตร วัดความหนาของชิ้นทดสอบ ในแนวตั้งฉากกับระนาบทั้งสองของชิ้นทดสอบ 3 ตำแหน่ง โดยไม่มีแรงกด แล้วหาค่าเฉลี่ยความหนาของชิ้นทดสอบ (d₀) เครื่องทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงกดแสดงดังรูปที่ 3.12 วางชิ้นทดสอบบริเวณกึ่งกลางระหว่างแผ่นระนาบของเครื่องกด เลื่อนแผ่นระนาบทั้งสองเข้าหากัน จนชิ้นทดสอบมีความหนาลดลงร้อยละ 50 ± 4 ของความหนาเดิม อุณหภูมิ 27 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง นำชิ้นทดสอบออกจากเครื่องกด ปล่อยให้ชิ้นทดสอบคืนตัวที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที วัดความหนาของชิ้นทดสอบ (d_r) [45] ดังสมการ 3.3 โดยตัวอย่างของเครื่อง ดังรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 เครื่องทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงกด [47]

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

C.S. = การยุบตัวเนื่องจากแรงกด (เปอร์เซ็นต์)

(d₀) = ความหนาเริ่มต้นของชิ้นทดสอบ (มิลลิเมตร)

(d_r) = ความหนาเริ่มต้นของชิ้นทดสอบ (มิลลิเมตร)

3.4.5 การทดสอบดัชนีความแข็งเชิงกด (Indentation hardness)

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 โดยตัวอย่างของเครื่อง ดังรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 เครื่องทดสอบดัชนีความแข็งเชิงกด [49]

บทที่ 4

ผลการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในส่วนของผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลอง ในงานวิจัยเล่มนี้ศึกษาเกี่ยวกับผลของการปรับขนาดรูพรุนของดีฟิวเซอร์และปรับอัตราการไหลของอากาศขาเข้าต่อสมบัติทางกายภาพและโครงสร้างจุลภาคของโฟมยางธรรมชาติ จากการขึ้นรูปโฟมยางธรรมชาติโดยกระบวนการไมโครบับเบิล เพื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานโฟมยางที่ขึ้นรูปจากกระบวนการดันลอป ผลที่ได้ประกอบด้วย การออกแบบชุดการทดลองของกระบวนการไมโครบับเบิล ผลของการปรับขนาดรูพรุนดีฟิวเซอร์ ผลของการปรับอัตราการไหลของอากาศขาเข้า และการเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกายภาพของโฟมยางที่ผลิตจากสองกระบวนการดังกล่าว

4.1 การออกแบบชุดการทดลอง

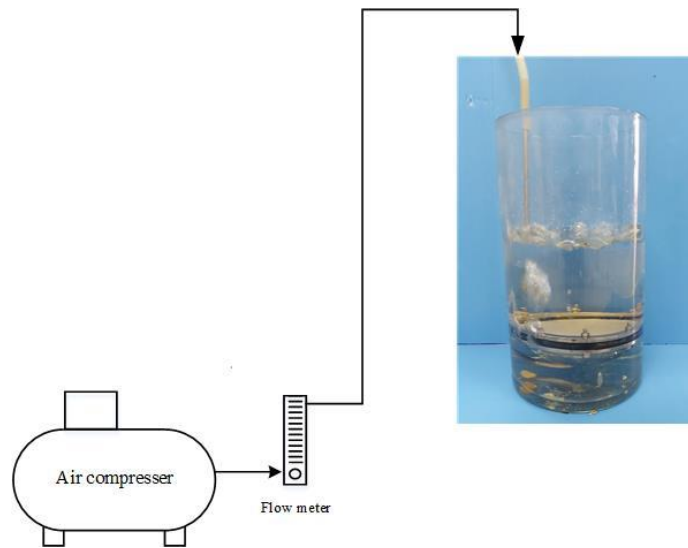
การออกแบบการทดลองในการขึ้นรูปโฟมยางด้วยกระบวนการไมโครบับเบิลนั้นจำเป็นต้องออกแบบเครื่องมือที่ทำให้เกิดฟองเพื่อสร้างรูพรุนขนาดเล็กกระจายทั่วอยู่ในชิ้นงานของโฟมยาง ดังนั้นจึงต้องทำการออกแบบเครื่องมือดังกล่าวต่อไปนี้

4.1.1 แบบชุดทดลองที่ 1

ออกแบบชุดทดลองที่ทำให้เกิดฟองเพื่อใช้ในการขึ้นรูปโฟมยางโดยการออกแบบในครั้งแรกจะใช้เหล็กในการสร้างเครื่องมือ และมีแผ่นตะแกรง (Sieve) ขนาดรูพรุน 325 400 และ 500 ไมครอน ในการสร้างฟองอากาศ ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แบบชุดทดลองที่ 1



รูปที่ 4.2 ชุดการทดลองกระบวนการไมโครบับเบิลครั้งแรก

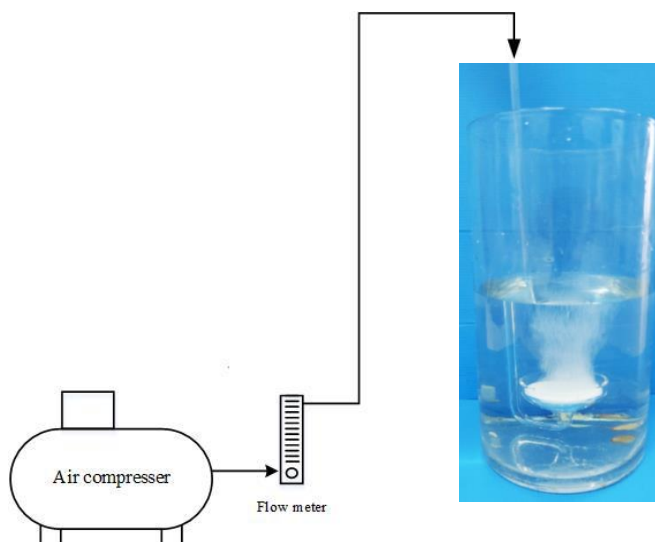
จากการศึกษาและการออกแบบเครื่องมือที่ทำให้เกิดฟองเพื่อใช้ในการขึ้นรูปโฟมยางในครั้งแรกนั้นได้ทำการติดตั้งและทำการทดลอง พบว่า ตัวแผ่นตะแกรงที่ยึดติดอยู่กับเหล็กเกิดการรั่วทำให้ไม่สามารถสร้างฟองขนาดเล็กได้ ดังรูปที่ 4.2 ดังนั้นชุดการทดลองนี้ จึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาเป็นตัวอย่างอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดฟองในการขึ้นรูปโฟมยาง จึงได้ทำการออกแบบชุดทดลองที่ 2 ต่อไป

4.1.2 แบบชุดทดลองที่ 2

ออกแบบอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดฟองเพื่อใช้ในการขึ้นรูปโฟมยางโดยการออกแบบในครั้งที่สองซึ่งคล้ายกับการออกแบบในครั้งแรกโดยเปลี่ยนจากตะแกรงมาเป็นแผ่นกรองดิฟฟิวเซอร์ ซึ่งทำจากแก้วโบโรซิลิเกต โดยนำมาเชื่อมต่อกับแก้วโบโรซิลิเกต ในการสร้างฟองอากาศ ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แบบชุดทดลองที่ 2



รูปที่ 4.4 ชุดการทดลองกระบวนการไมโครบับเบิลครั้งที่สอง

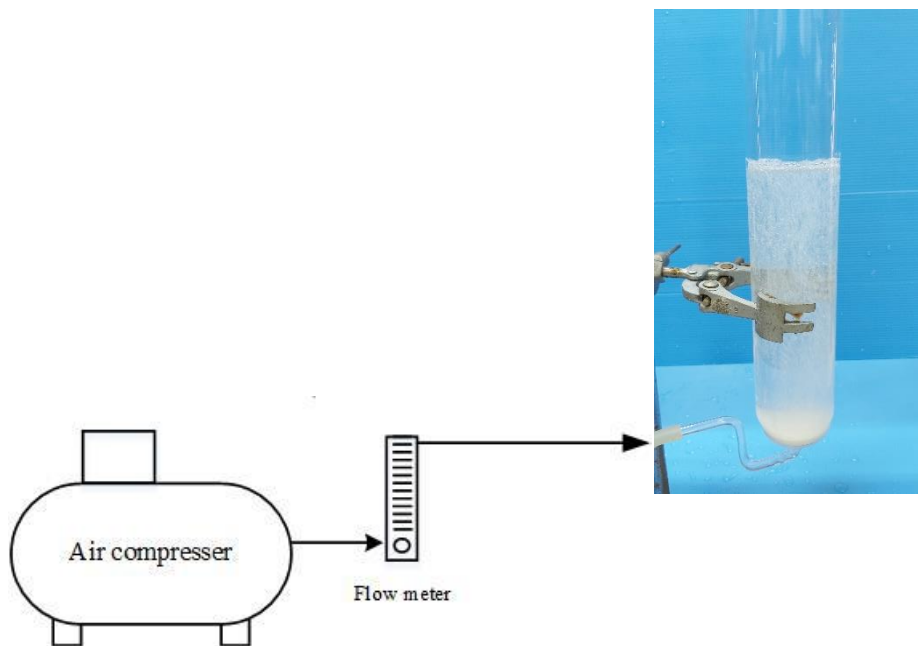
จากการศึกษาและการออกแบบเครื่องมือที่ทำให้เกิดฟองเพื่อใช้ในการขึ้นรูปโฟมยางในครั้งที่สองนี้ พบว่าสามารถทำให้เกิดฟองกระจายอยู่ทั่วแผ่นดิฟฟิวเซอร์ แต่จะมีช่องว่างระหว่างตัวดิฟฟิวเซอร์กับบับเบิลคอลัมน์ ดังรูปที่ 4.4 ซึ่งเมื่อนำไปขึ้นรูปโฟมยางจะมีส่วนที่หนาและแข็งเกิดขึ้นในส่วนล่างของโฟมยาง ดังนั้นจึงยังคงจำเป็นต้องปรับปรุงแบบชุดบับเบิลคอลัมน์ต่อไป

4.1.3 แบบชุดทดลองที่ 3

แบบอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดฟองเพื่อใช้ในการขึ้นรูปโฟมยางในครั้งนี้จะใช้แผ่นแก้วดิฟฟิวเซอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร เชื่อมยึดติดกับแก้วทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน โดยให้แผ่นดิฟฟิวเซอร์อยู่ในส่วนล่างของคอลัมน์ ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แบบชุดทดลองที่ 3



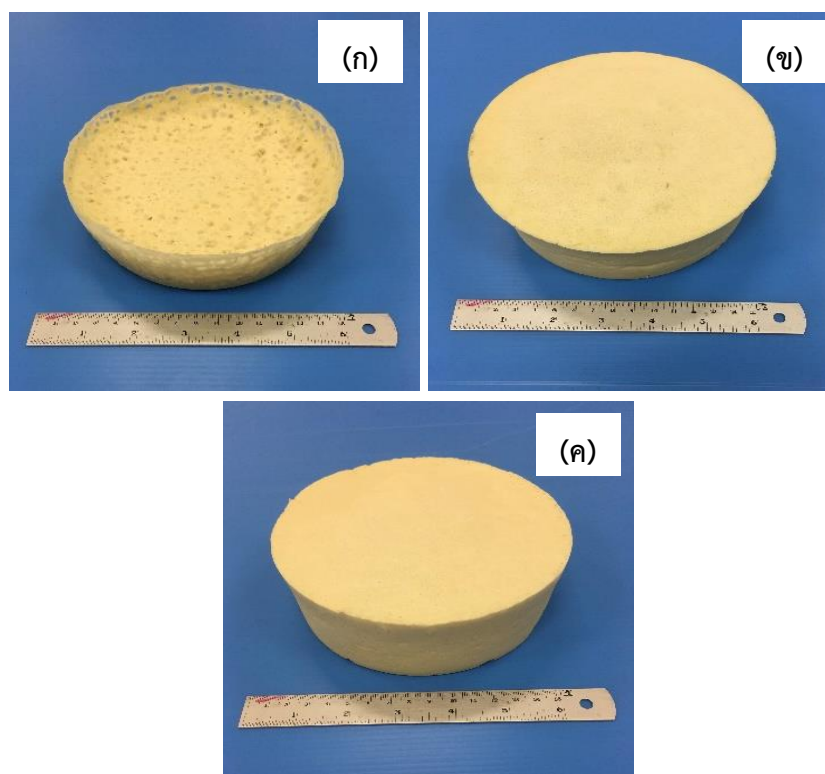
รูปที่ 4.6 ชุดการทดลองกระบวนการไมโครบีเบิลครั้งที่สาม

จากการศึกษาและการออกแบบสร้างชุดคอลัมน์ที่ทำให้เกิดฟองเพื่อใช้ในการขึ้นรูปโฟมยาง ในครั้งนี้ พบว่าสามารถที่จะทำให้เกิดฟองกระจายทั่วอยู่ทั่วแผ่นดีฟิวเซอร์ ฟองอากาศกระจายอย่างสม่ำเสมอทั่วบับเบิลคอลัมน์ เมื่อนำไปขึ้นรูปโฟมยาง ชิ้นงานที่ได้มีความสมบูรณ์ดี ดังนั้นจึงเลือกใช้แบบชุดทดลองที่ 3 นี้มาทำการขึ้นรูปโฟมยางเพื่อทำการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง ดังแสดงในหัวข้อที่ 4.2 4.3 และ 4.4

4.2 ผลของขนาดรูพรุนดีฟิวเซอร์ต่อการขึ้นรูปโฟมยางจากไมโครบับเบิล

4.2.1 ผลของขนาดรูพรุนดีฟิวเซอร์ต่อการขึ้นรูปโฟมยาง

ขนาดรูพรุนของดีฟิวเซอร์ที่ใช้อยู่ในช่วง (40-100 ไมครอน: P2) (16-40 ไมครอน: P3) และ (10-16 ไมครอน: P4) โดยใช้อัตราการไหลของอากาศคงที่เท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที จะได้ผลิตภัณฑ์โฟมยาง ดังรูปที่ 4.7

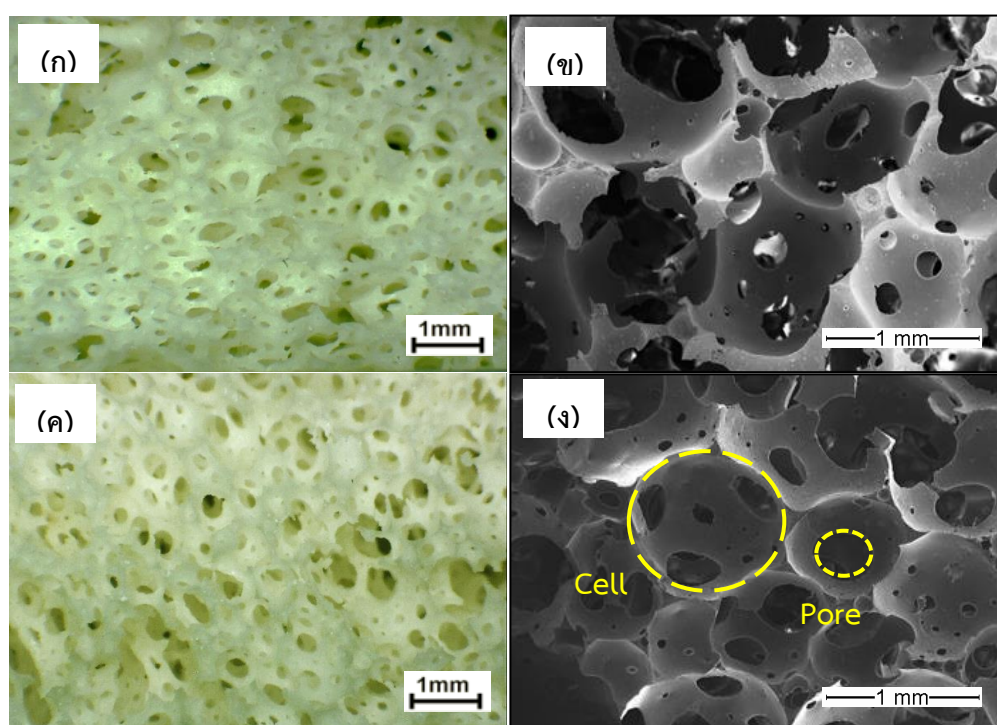


รูปที่ 4.7 (ก) โฟมยางที่ได้จากขนาดดีฟิวเซอร์ P2 (ข) โฟมยางที่ได้จากขนาดดีฟิวเซอร์ P3 และ (ค) โฟมยางที่ได้จากขนาดดีฟิวเซอร์ P4

รูปที่ 4.7 แสดงภาพถ่ายตัวอย่างชิ้นงานโฟมยางจากกระบวนการไมโครบับเบิลที่ใช้ขนาดรูพรุนของดีฟิวเซอร์ต่างกัน 3 ขนาด แต่ใช้อัตราการไหลของอากาศคงที่เท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อ นาที ผลการทดลองพบว่าโฟมยางที่ได้จากการใช้ขนาดรูพรุน P2 ไม่สามารถขึ้นรูปชิ้นงานโฟมยางได้ ดังรูป (ก) เนื่องจากขนาดของฟองที่ได้จากขนาดของดีฟิวเซอร์มีขนาดใหญ่เกินไป จึงทำให้ฟองที่ได้ นั้นเกิดการแตกตัวเป็นจำนวนมากซึ่งส่งผลให้ฟองยางที่ได้นั้นมีในปริมาณน้อย ทำให้โฟมยางที่ได้ นั้นไม่มีความสมบูรณ์ของชิ้นงานจึงไม่สามารถนำไปทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลได้ ส่วน โฟมยางที่ได้จากการใช้ขนาดรูพรุน P3 ดังรูป (ข) และโฟมยางที่ได้จากการใช้ขนาดรูพรุน P4 ดังรูป (ค) สามารถขึ้นรูปชิ้นงานโฟมยางได้อย่างสมบูรณ์ เพราะขนาดฟองที่ได้มีขนาดเล็กและไม่เกิดการแตกตัวของฟองทำให้โฟมยางที่ได้สามารถนำไปทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลได้

ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้เลือกโฟมยางที่ได้จากการใช้ขนาดของรูพรุนดีฟิวเซอร์ P3 และ P4 นำมา วิเคราะห์ เพื่อดูโครงสร้างทางจุลภาคของโฟมยางโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง และ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ว่ามีลักษณะเบื้องต้นอย่างไร

4.2.2 ผลของขนาดรูพรุนดีฟิวเซอร์ต่อโครงสร้างทางจุลภาค



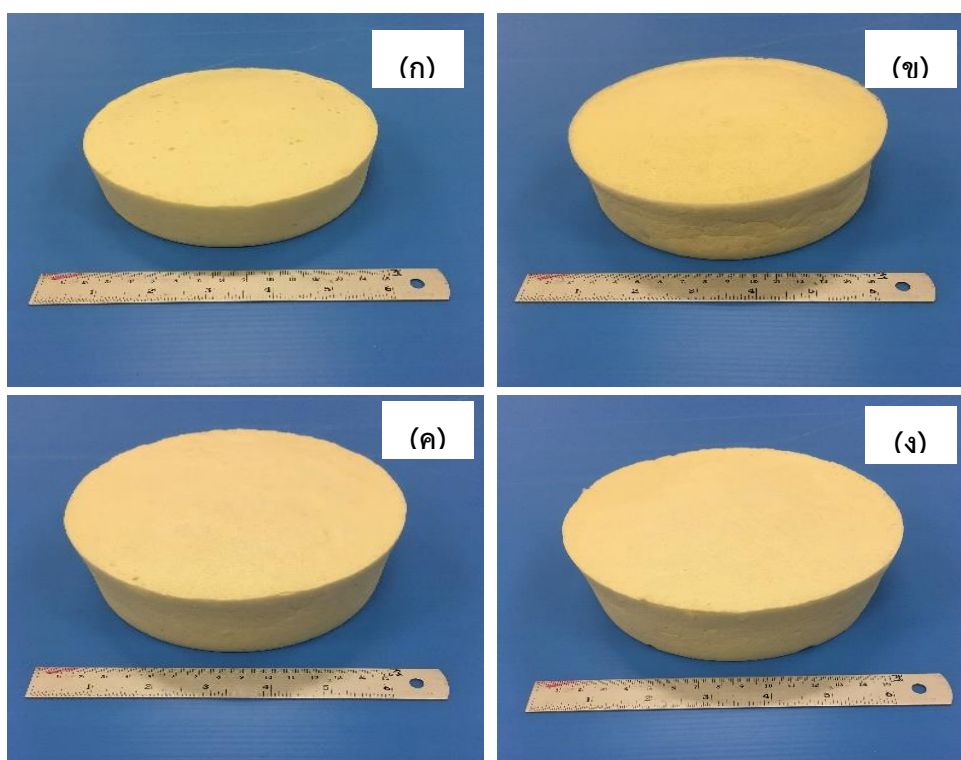
รูปที่ 4.8 แสดงภาพโครงสร้างจุลภาคที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงและกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของตัวอย่างโฟมยางที่ขึ้นรูปที่อัตราการไหลอากาศขาเข้าคงที่เท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อ นาที โดย (ก)-(ข) ดีฟิวเซอร์ P3 และ (ค)-(ง) ดีฟิวเซอร์ P4

รูปที่ 4.8 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงของตัวอย่างโฟมยางที่ได้จากกระบวนการไมโครบับเบิลที่อัตราการไหลของอากาศคงที่เท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที แต่ใช้ดิฟฟิวเซอร์ที่มีขนาดรูพรุนแตกต่างกัน (P3 และ P4) พบว่าโฟมยางที่ผลิตได้จากทั้งดิฟฟิวเซอร์สองขนาด ให้ลักษณะรูปร่างเซลล์ (Cell) ที่เหมือนกันคือ ทรงกลม และในแต่ละเซลล์จะประกอบด้วยรูเล็ก ๆ (Pore) แต่ละเซลล์มีการเชื่อมต่อกันอย่างต่อเนื่องและเป็นไปอย่างสมบูรณ์ เกิดการแตกแยกของเซลล์ นอกจากนี้การกระจายตัวของเซลล์โฟมค่อนข้างจะสม่ำเสมอ แต่ขนาดเซลล์ที่ได้แตกต่างกันตามขนาดของดิฟฟิวเซอร์ P3 (รูปที่ 4.8 ก-ข) มีขนาดเซลล์ที่ใหญ่กว่าโฟมยางที่ ดิฟฟิวเซอร์ P4 (รูปที่ 4.8 ค-ง)

4.3 ผลของอัตราการไหลของอากาศต่อการขึ้นรูปโฟมยาง

ศึกษาอัตราการไหลของอากาศเข้า 3 อัตราดังนี้ 20 50 และ 100 มิลลิลิตรต่อนาที โดยใช้ดิฟฟิวเซอร์ขนาด P4 ซึ่งได้ทำการศึกษาผลของขนาดฟองอากาศต่อสมบัติทางภาพของโฟมยางเปรียบเทียบกับโฟมยางที่ได้จากกระบวนการต้นloop ดังนี้

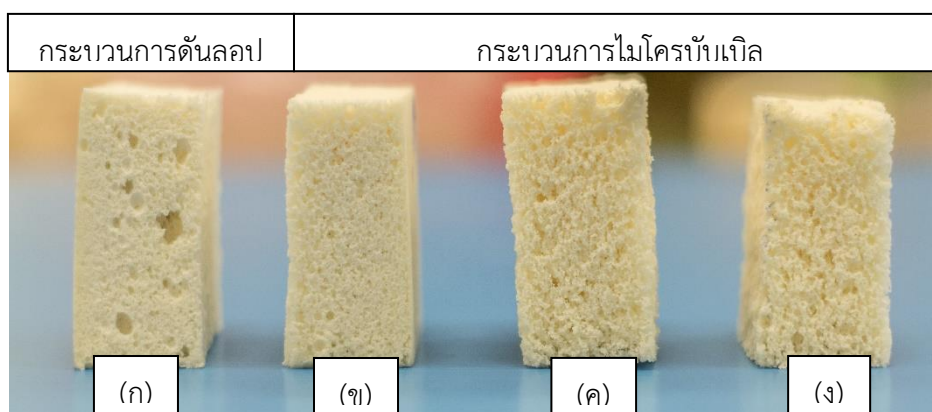
4.3.1 ผลของอัตราการไหลของอากาศต่อการขึ้นรูปโฟมยางเปรียบเทียบกับต้นloopโฟม



รูปที่ 4.9 แสดงภาพถ่ายชิ้นงานโฟมยางที่ได้จากการใช้อัตราการไหลของอากาศที่แตกต่างกันโดยใช้ขนาดรูพรุนของดิฟฟิวเซอร์คงที่ P4 เปรียบเทียบกับต้นloopโฟม

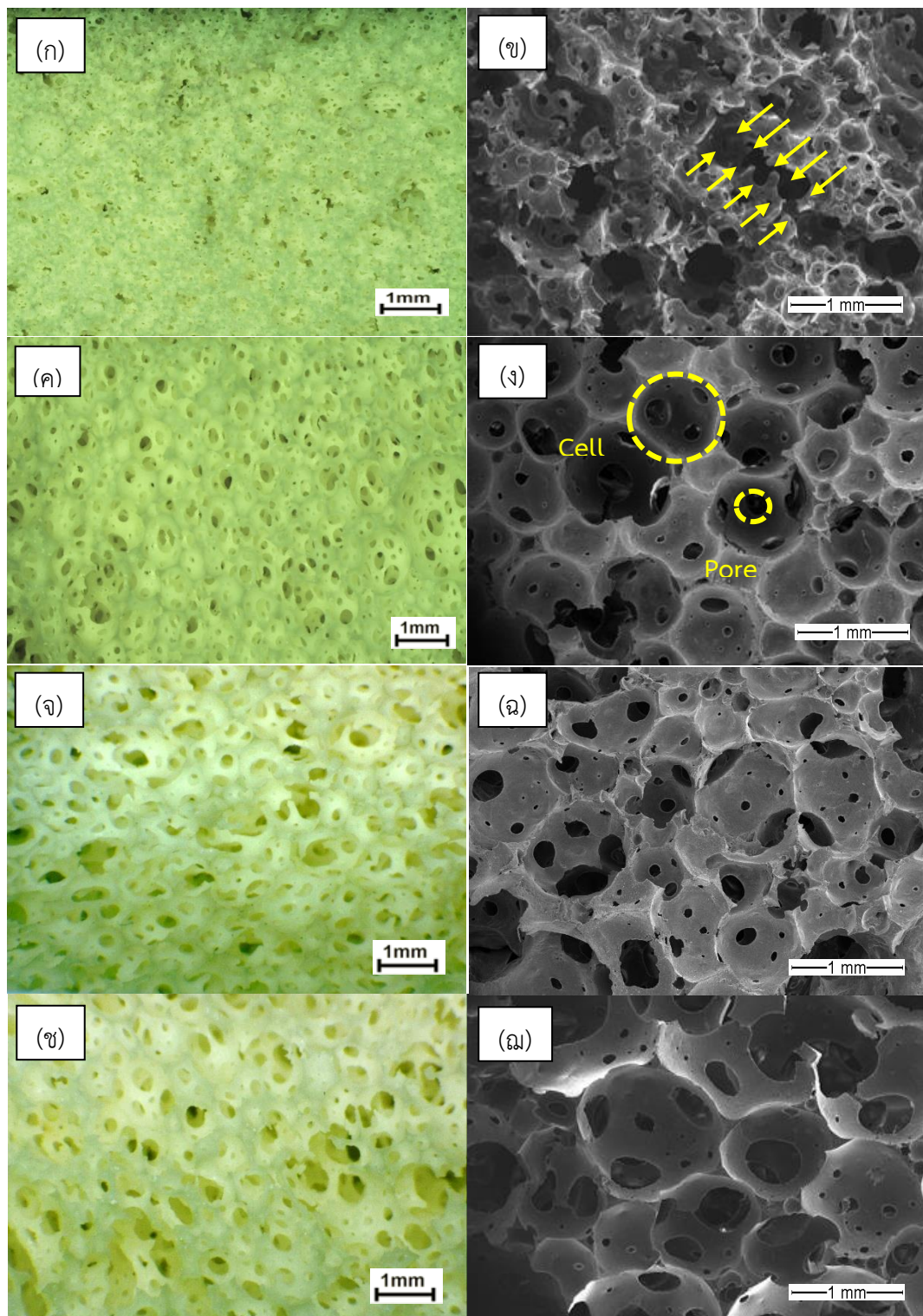
รูปที่ 4.9 แสดงภาพถ่ายชิ้นงานโฟมยางที่ได้จากการใช้อัตราการไหลของอากาศที่แตกต่างกัน (ก) 20 มิลลิลิตรต่อนาที (ข) 50 มิลลิลิตรต่อนาที (ค) 100 มิลลิลิตรต่อนาที และ (ง) ที่ผลิตจากกระบวนการดันลอป จะเห็นว่าชิ้นงานโฟมยางที่ได้นั้นมีความสมบูรณ์ของชิ้นงานดีสามารถขึ้นรูปได้และนำไปวิเคราะห์เพื่อดูโครงสร้างภายในของโฟมยางได้และยังสามารถนำไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ ได้ตามที่สนใจ

4.3.2 ผลของอัตราการไหลของอากาศต่อโครงสร้างทางจุลภาคของโฟมยางเปรียบเทียบกับดันลอปโฟม



รูปที่ 4.10 แสดงภาพตัดขวางของโฟมยาง (ก) กระบวนการดันลอป (ข) 20 มิลลิลิตรต่อนาที (ค) 50 มิลลิลิตรต่อนาที (ง) 100 มิลลิลิตรต่อนาที

จากรูปที่ 4.10 แสดงเปรียบเทียบภาพถ่ายของโฟมยางแบบตัดขวางจากกระบวนการดันลอป และจากกระบวนการไมโครบับเบิลที่อัตราการไหลของอากาศที่แตกต่างกัน เห็นได้ชัดว่าโฟมยางที่ได้ นั้นมีความแตกต่างกันทั้งสองกระบวนการ สามารถมองได้ด้วยตาเปล่า พบว่าโครงสร้างของเซลล์ที่ได้ จากกระบวนการดันลอปนั้นมีความไม่สม่ำเสมอ (รูปที่ 4.10ก) ประกอบด้วยเซลล์ที่มีขนาดใหญ่และ ขนาดเล็กมีการเชื่อมต่อกันไม่ต่อเนื่องในระหว่างเซลล์ ในทางตรงข้ามโครงสร้างของเซลล์ที่ได้จาก กระบวนการไมโครบับเบิล (รูปที่ 4.10ข-ง) มีความสม่ำเสมอของเซลล์มีการเชื่อมต่อกันระหว่างเซลล์ ดี และมีลักษณะคล้าย ๆ กันในของแต่ละอัตราการไหล แสดงถึงความหนาแน่นที่เป็นเนื้อเดียวกันทั่ว ทั้งชิ้นงานโฟม และนอกจากนี้ขนาดเซลล์ของกระบวนการไมโครบับเบิลจะขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของ อากาศ [50] ซึ่งที่อัตราการไหลของอากาศที่ต่ำดูเหมือนว่าจะมีขนาดของเซลล์ที่เล็กส่วนการใช้อัตรา การไหลที่สูงขึ้นจะได้ขนาดของเซลล์ที่ใหญ่กว่า



รูปที่ 4.11 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างของโฟมในระดับจุลภาค (ก) OM และ (ข) SEM ต้นลอปโฟม (ค) OM และ (ง) SEM ที่ 20 มิลลิลิตรต่อนาที (จ) OM และ (ฉ) SEM ที่ 50 มิลลิลิตรต่อนาที และ (ช) OM และ (ณ) SEM ที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาที

รูปที่ 4.11 แสดงภาพโฟมยางจากกล้อง OM และ SEM จากกระบวนการดันลอปและกระบวนการไมโครบับเบิล เมื่อเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างที่ได้จากสองกระบวนการ จะเห็นได้ชัดว่าโครงสร้างจากกระบวนการดันลอป รูปที่ 4.11 ก-ข มีเซลล์ที่เกิดการฉีกขาด แตกกระจาย เรียงตัวกันไม่เป็นระเบียบ และไม่มีความสม่ำเสมอของเซลล์ ขณะที่โครงสร้างของเซลล์ที่ได้จากกระบวนการไมโครบับเบิล ดังรูปที่ ค-ณ มีโครงสร้างของเซลล์ที่ไม่ฉีกขาด มีรูปร่างเป็นทรงกลม มีความเป็นระเบียบสม่ำเสมอของเซลล์และมีการเชื่อมต่อกันของเซลล์อย่างต่อเนื่อง ซึ่งเซลล์ที่มีรูปร่างเป็นทรงกลมจะส่งผลให้โฟมยางมีสมบัติเชิงกลและเชิงกายภาพดีกว่าโฟมยางที่เซลล์ฉีกขาดในโครงสร้าง [51]

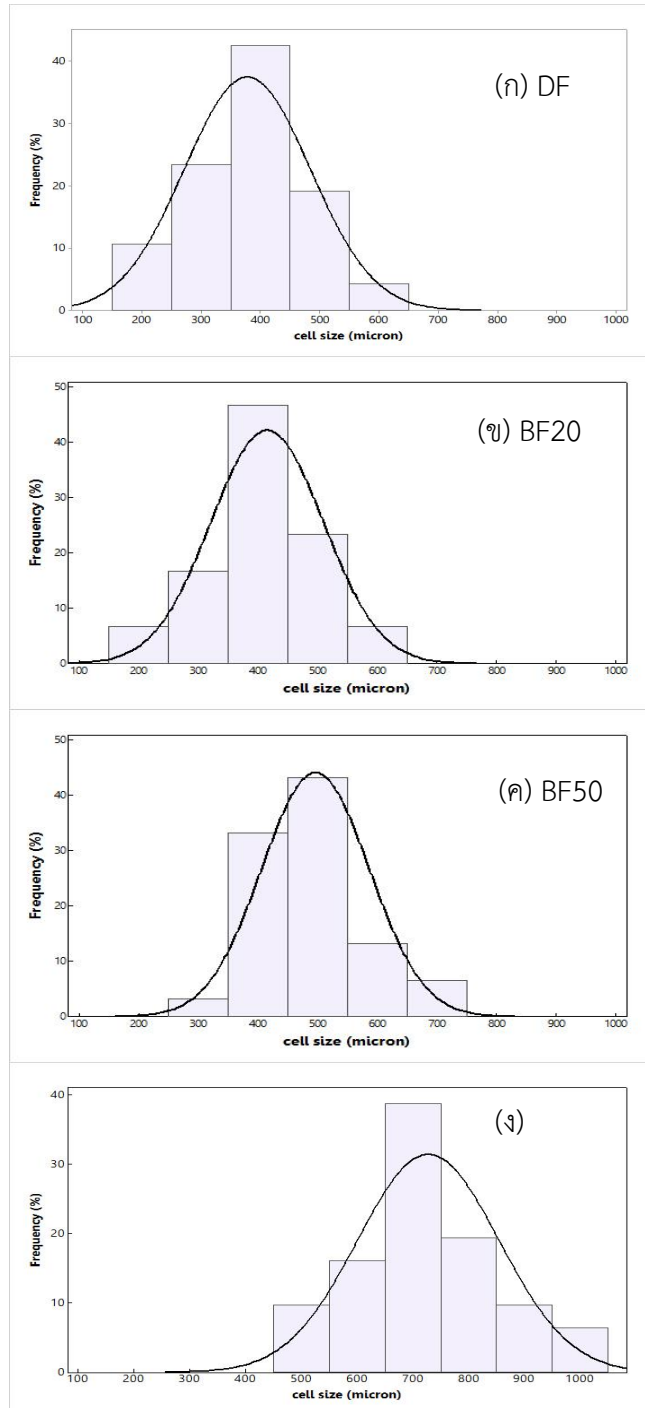
เนื่องจากการขึ้นรูปโฟมยางด้วยกระบวนการดันลอปและกระบวนการไมโครบับเบิลมีความคล้ายกันยกเว้นขั้นตอนในการทำให้เกิดฟอง ดังนั้นความแตกต่างในเรื่องของโครงสร้างของเซลล์ระหว่างกระบวนการดันลอปกับกระบวนการไมโครบับเบิลจึงเป็นผลมาจากขั้นตอนการทำให้เกิดฟองที่แตกต่างกันนี้ โดยกระบวนการดันลอปจะทำให้เกิดฟองด้วยการกวนด้วยความเร็วรอบสูง จึงทำให้เซลล์ฉีกขาดและยังทำให้เกิดเป็นโพรงอากาศขึ้นบางส่วนหลังจากการกวนเร็ว ในทางกลับกันการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไมโครบับเบิลจะใช้อากาศไหลผ่านดิฟฟิวเซอร์เข้าสู่บับเบิลคอลัมน์โดยตรงพร้อมกับการสร้างฟองที่มีขนาดเล็กในระดับไมครอนจำนวนมากและสร้างเซลล์ที่มีการเชื่อมต่อกันได้อย่างสมบูรณ์

หลายปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อโครงสร้างของโฟมยาง เช่น อุณหภูมิ สูตรน้ำยาที่ใช้ รวมถึงเทคนิคในการเตรียม ซึ่งจะเห็นได้ชัดว่ากระบวนการดันลอปผลิตโฟมยางที่มีโครงสร้างของเซลล์แบบฉีกขาดและการกระจายตัวของเซลล์ที่ไม่สม่ำเสมอ [56] ในขณะที่เซลล์ที่มีรูปร่างเป็นทรงกลมและมีการเชื่อมต่อกันโดยไม่เกิดการฉีกขาดของเซลล์จากกระบวนการทาลาเลย์ [57,58] ซึ่งพบว่าลักษณะโครงสร้างนี้มีความคล้ายกับโฟมยางที่ผลิตจากกระบวนการไมโครบับเบิล

รูปที่ 4.12 แสดงการกระจายตัวของเซลล์โฟมที่ได้จากกระบวนการดันลอป (รูปที่ 4.12 ก) และกระบวนการไมโครบับเบิล (รูปที่ 4.12 ข-ง) พบว่า การกระจายตัวของเซลล์ในโฟมยางขึ้นอยู่กับอัตราการไหล กล่าวคือ ที่อัตราการไหลต่ำ (รูปที่ 4.12 ข-ค) เซลล์โฟมจะมีการกระจายตัวสม่ำเสมอดีกว่าที่อัตราการไหลสูง (รูปที่ 4.12 ง) ขนาดของเซลล์โฟมยางก็เช่นกัน ขึ้นอยู่กับอัตราการไหล โดยจะแปรผันตรงกับอัตราการไหล (รูปที่ 4.12 ข-ง) โดยโฟมยางที่ผลิตจากอัตราการไหล 20 50 และ 100 มิลลิลิตรต่อนาที มีขนาดเซลล์เฉลี่ยอยู่ที่ 415 496 และ 727 ไมครอน ตามลำดับ ส่วนโฟมยางที่ผลิตจากกระบวนการดันลอปมีขนาดเซลล์เฉลี่ยอยู่ที่ 378 ไมครอน มีการกระจายตัวของเซลล์ใกล้เคียงกับบับเบิลโฟมที่ผลิตที่อัตราการไหลต่ำ

เมื่อทำการคำนวณค่าจำนวนเซลล์ต่อหน่วยปริมาตรของโฟมยางที่ผลิตจากฟองอากาศที่อัตราการไหลต่างกันคือ 20 50 และ 100 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่ามีค่าเท่ากับ 2.16×10^5 1.73×10^5 และ 0.72×10^5 เซลล์ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าจำนวนเซลล์ต่อหน่วยปริมาตรของโฟมยางลดลงตามอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น ซึ่งผลการทดลองนี้ตรงกันกับการทดลองของ Vahidifar, A. et al. [52] และ Karim, A. et al. [56] ส่วนโฟมยางที่ผลิตจากดันลอป มีจำนวนเซลล์ต่อหน่วยปริมาตรเท่ากับ 2.39×10^5 เซลล์ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งมากกว่าบับเบิลโฟมที่ทุกอัตราการไหลจากความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเซลล์เฉลี่ยกับจำนวนเซลล์ต่อหน่วยปริมาตรจะได้ว่า ขนาดเซลล์เฉลี่ย

ที่เล็กส่งผลให้จำนวนเซลล์ต่อหน่วยปริมาตรเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลต่อไปยังค่าความหนาแน่นของโฝมายางด้วยเช่นกัน ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไปในหัวข้อ 4.4



รูปที่ 4.12 การกระจายตัวของเซลล์ของโฝมายางที่ผลิตจาก (ก) กระบวนการดันลอป (DF) (ข) กระบวนการไมโครบับเบิล 20 มิลลิลิตรต่ออนาที (BF20) (ค) กระบวนการไมโครบับเบิล 50 มิลลิลิตรต่ออนาที (BF50) และ (ง) กระบวนการไมโครบับเบิล 100 มิลลิลิตรต่ออนาที (BF100)

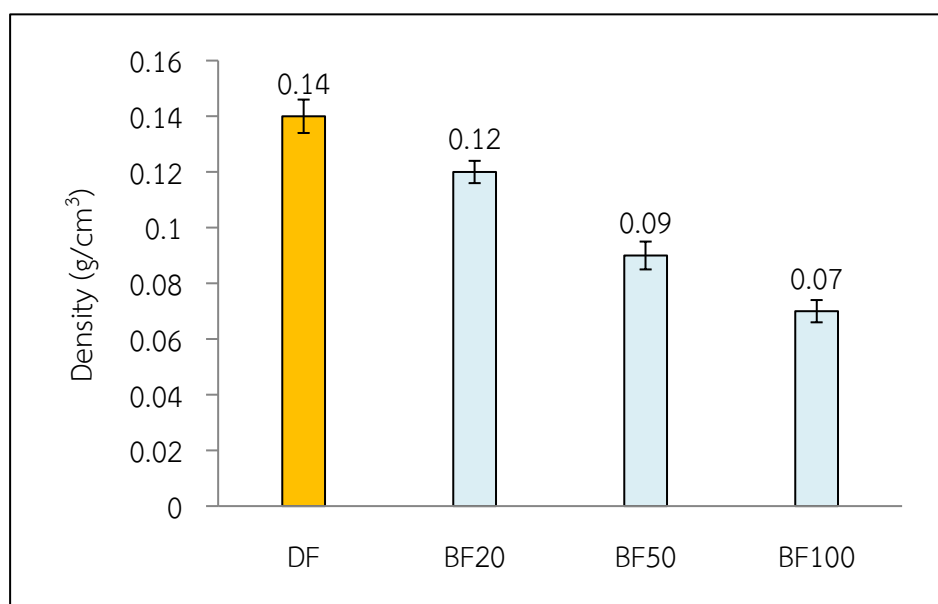
4.4 สมบัติทางกายภาพของโฟมยาง

การศึกษาสมบัติทางกายภาพของโฟมยางที่เตรียมจากกระบวนการไมโครบับเบิล ที่ทำการทดสอบ ได้แก่ ความหนาแน่น การยุบตัวเนื่องจากแรงกด ดัชนีความแข็งเชิงกด โดยมาตรฐานสมบัติทางกายภาพของโฟมยางแสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.5 มาตรฐานสมบัติทางกายภาพของโฟมยาง

การทดสอบ	ข้อกำหนด
การยุบตัวเนื่องจากแรงกด (%)	ไม่เกิน 6
ดัชนีความแข็งเชิงกด (นิวตัน)	นิ่ม <100
	ปานกลาง 101-170
	แข็ง >170

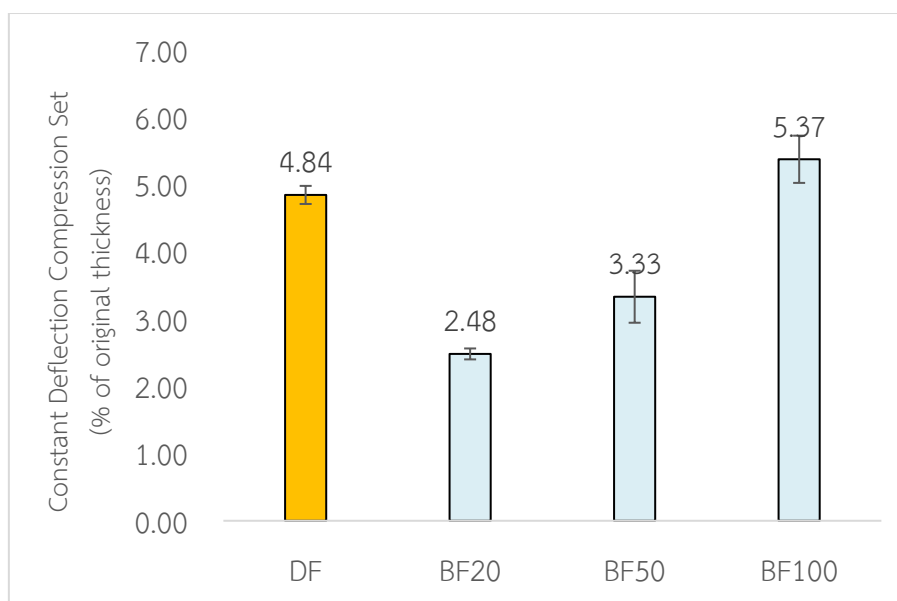
4.4.1 ผลของการทดสอบความหนาแน่นของโฟมยางจากกระบวนการไมโครบับเบิลและกระบวนการดันลอป



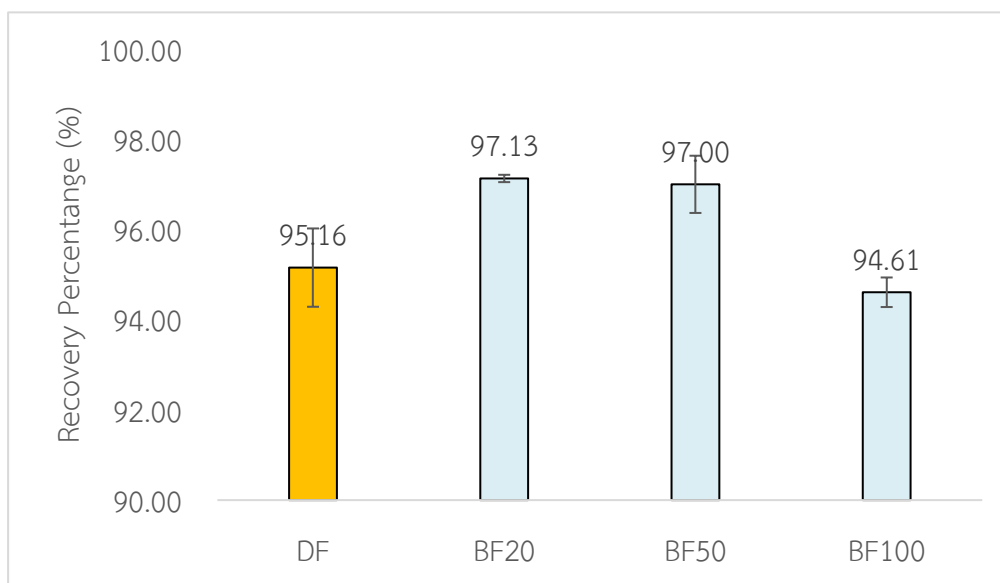
รูปที่ 4.13 กราฟเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นของโฟมยางจากกระบวนการดันลอป (DF) และกระบวนการไมโครบับเบิล (BF) ที่ผลิตจากอัตราการไหล 20 50 และ 100 มิลลิลิตรต่อนาที

รูปที่ 4.13 แสดงค่าความหนาแน่นของโฟมยางจากกระบวนการดันลอป (DF) และกระบวนการไมโครบับเบิล (BF) ที่อัตราการไหล 20 50 และ 100 มิลลิลิตรต่อนาที จะเห็นได้ว่าโฟมยางที่ขึ้นรูปโดยใช้กระบวนการไมโครบับเบิลที่ทุกอัตราการไหล มีความหนาแน่นต่ำกว่าดันลอปโฟม และจะเห็นได้ว่า ค่าของความหนาแน่นลดลงตามอัตราการไหลของอากาศที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างของเซลล์และความหนาแน่นมีความสัมพันธ์กันมาก ขนาดของเซลล์เพิ่มขึ้นทำให้อัตราส่วนการขยายตัวของโฟมยางนั้นเพิ่มขึ้นด้วย [10] ส่งผลให้จำนวนเซลล์ต่อหน่วยปริมาตรลดลง และดังนั้น โฟมยางมีความหนาแน่นต่ำ [59] แต่อย่างไรก็ตาม ความหนาแน่นของบับเบิลโฟมสามารถปรับค่าได้ โดยการปรับขนาดเซลล์ให้เล็กหรือใหญ่ตามขนาดดีฟิวเซอร์หรืออัตราการไหลที่ใช้ในการผลิต

4.4.2 ผลของการทดสอบการยุบตัวและคืนตัวเนื่องจากแรงกดของโฟมยางที่ผลิตจากกระบวนการไมโครบับเบิลและกระบวนการดันลอป



รูปที่ 4.14 กราฟเปรียบเทียบค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงกดของโฟมยางจากกระบวนการดันลอป (DF) และกระบวนการไมโครบับเบิล (BF) ที่ผลิตจากอัตราการไหล 20 50 และ 100 มิลลิลิตรต่อนาที

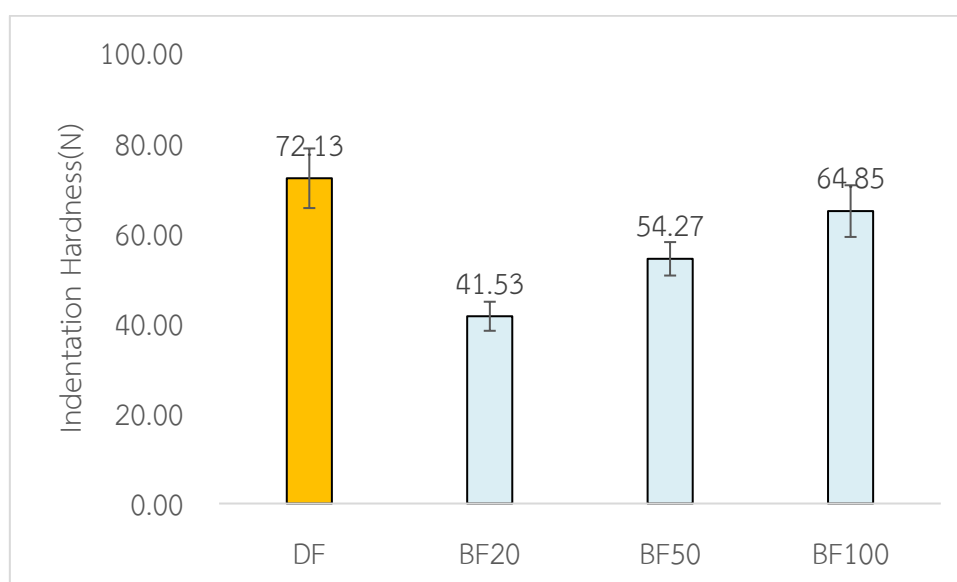


รูปที่ 4.15 กราฟเปรียบเทียบค่าการคืนตัวเนื่องจากแรงกดของโพลียเอทิลีนจากกระบวนการด้นลอป (DF) และกระบวนการไมโครบับเบิล (BF) ที่ผลิตจากอัตราการไหล 20 50 และ 100 มิลลิลิตรต่อนาที

รูปที่ 4.14 แสดงค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงกด การยุบตัวเนื่องจากแรงกดเป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถในการยุบตัวและคืนรูปเมื่อมีแรงกระทำ ถ้าการยุบตัวเนื่องจากแรงกดมีค่าต่ำ แสดงว่าโพลียเอทิลีนมีความสามารถในการยืดหยุ่นและคืนรูปได้ดี ทั้งนี้จะเห็นได้ว่า โพลียเอทิลีนที่ผลิตได้จากทั้งสองกระบวนการมีค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงกดอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดทั้งหมด คือ ไม่เกิน 6 เปอร์เซ็นต์ (ตารางที่ 4.5) สำหรับโพลียเอทิลีนที่ได้จากกระบวนการไมโครบับเบิลที่อัตราการไหลของอากาศ 20 50 และ 100 มิลลิลิตรต่อนาที มีค่าการยุบตัวเท่ากับ 2.48 3.33 และ 5.37 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ซึ่งค่าที่ได้จะลดลงอย่างมีนัยสำคัญตามอัตราการไหลที่ลดลง นั่นคือเซลล์โพลียเอทิลีนเล็กจะให้ความยืดหยุ่นดีกว่าเซลล์โพลียเอทิลีนใหญ่ ในขณะที่ถึงแม้ว่าด้นลอปโพลียเอทิลีนมีเซลล์โพลียเอทิลีนที่เล็กกว่าบับเบิลโพลียเอทิลีนที่ทุกอัตราการไหล แต่มีค่าการยุบตัวเท่ากับ 4.84 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมากกว่าบับเบิลโพลียเอทิลีนที่ผลิตจากอัตราการไหล 20 และ 50 มิลลิลิตรต่อนาที ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างเซลล์ที่ต่างกัน ถึงแม้จะมีเซลล์โพลียเอทิลีนที่เล็กกว่า แต่เซลล์โพลียเอทิลีนมีการฉีกขาด ไม่เชื่อมต่อกันอย่างสมบูรณ์ จึงทำให้เสียรูปได้ง่ายกว่า จะเห็นได้ว่าขนาดของเซลล์มีบทบาทสำคัญต่อสมบัติการยุบตัวเนื่องจากแรงกด คาดว่าเซลล์ที่มีขนาดใหญ่มีแนวโน้มที่จะยุบตัวได้ง่ายกว่าเซลล์ที่มีขนาดเล็ก [60]

รูปที่ 4.15 แสดงเปอร์เซ็นต์การคืนตัวเนื่องจากแรงกด ถ้าการยุบตัวเนื่องจากแรงกดมีค่าต่ำ จะส่งผลให้ความสามารถในการคืนรูปของโฟมได้ดี เนื่องจากมีความยืดหยุ่นที่ดี แต่ถ้าการยุบตัวเนื่องจากแรงกดมีค่าสูงก็จะส่งผลให้ความสามารถในการคืนรูปไม่ดีด้วยเช่นกัน จากการทดสอบพบว่า โฟมยางที่มีเซลล์ขนาดเล็กจากระบวนการไมโครบับเบิลที่อัตราการไหลของอากาศที่ 20 และ 50 มิลลิลิตรต่อนาที นั้นมีการคืนตัวสูงสุด 97.13 เปอร์เซ็นต์ และ 97.13 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ในขณะที่โฟมยางจากระบวนการดันลอป นั้นมีการคืนตัว 95.16 เปอร์เซ็นต์ แสดงความสามารถในการคืนตัวเนื่องจากแรงกดต่ำกว่า เนื่องจากเซลล์บางส่วนมีลักษณะฉีกขาด ไม่เชื่อมต่อกันทั้งโครงสร้าง ถึงแม้ว่าจะมีขนาดเซลล์ที่เล็กกว่าโฟมยางจากระบวนการไมโครบับเบิล

4.4.3 ผลของการทดสอบดัชนีความแข็งเชิงกดของโฟมยางที่ผลิตจากระบวนการไมโครบับเบิล และกระบวนการดันลอป



รูปที่ 4.16 กราฟเปรียบเทียบค่าดัชนีความแข็งเชิงกดของโฟมยางจากระบวนการดันลอป (DF) และกระบวนการไมโครบับเบิล (BF) ที่ผลิตจากอัตราการไหล 20 50 และ 100 มิลลิลิตรต่อนาที

ดัชนีความแข็งเชิงกด คือ แรงกดที่ทำให้ชิ้นงานเกิดการผิดรูปโดยการให้น้ำหนักกดลงบนชิ้นทดสอบ ซึ่งแสดงค่าความแข็งของโฟมยาง ในการศึกษาพบว่าโฟมยางที่เตรียมได้ทั้งหมดมีค่าดัชนีความแข็งเชิงกดต่ำกว่า 100 นิวตัน ซึ่งจัดเป็นโฟมยางที่นิ่ม (ตารางที่ 4.5) นอกจากนี้ค่าดัชนีความแข็งเชิงกดของโฟมยางที่ได้จากระบวนการไมโครบับเบิลมีค่าลดลงเมื่อใช้อัตราการไหลของอากาศที่ลดลง ดังนั้นโฟมยางจากระบวนการไมโครบับเบิลสามารถที่จะกำหนดระดับความนิ่ม ความแข็งของโฟมยางได้โดยการควบคุมอัตราการไหลของอากาศที่ใช้ และยังเป็นทางเลือกของความต้อการต่อการนำไปใช้งานในรูปแบบต่าง ๆ ได้ตามความเหมาะสม

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาปัจจัยการปรับขนาดรูพรุนของดิฟฟิวเซอร์และปรับอัตราการไหลของอากาศขาเข้าต่อสมบัติทางกายภาพและโครงสร้างจุลภาคของโพลีเอทิลีน จากการศึกษาขึ้นรูปโพลีเอทิลีนโดยกระบวนการไมโครบับเบิลเปรียบเทียบกับโพลีเอทิลีนที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการดันลอป ซึ่งผลการวิจัยที่ได้มีข้อสรุปและข้อเสนอแนะดังนี้

5.1 ผลของขนาดรูพรุนดิฟฟิวเซอร์ต่อการขึ้นรูปโพลีเอทิลีนจากไมโครบับเบิล

การขึ้นรูปโพลีเอทิลีนจากไมโครบับเบิลโดยใช้ขนาดรูพรุนดิฟฟิวเซอร์ต่างกัน 3 ขนาด ที่ขนาดรูพรุนดิฟฟิวเซอร์ P3 และ P4 สามารถขึ้นรูปโพลีเอทิลีนได้อย่างสมบูรณ์ ส่วนที่ P2 ไม่สามารถขึ้นรูปโพลีเอทิลีนได้ ทำให้การขึ้นรูปโพลีเอทิลีนโดยไมโครบับเบิลนั้นไม่สามารถที่จะใช้ขนาดรูพรุนดิฟฟิวเซอร์ตั้งแต่ 40 ไมครอน ขึ้นไปได้

การขึ้นรูปโพลีเอทิลีนจากไมโครบับเบิลโดยใช้ขนาดรูพรุนดิฟฟิวเซอร์ที่ต่างกัน พบว่าขนาดเซลล์โพลีเอทิลีนแปรผันตรงกับขนาดรูพรุนของดิฟฟิวเซอร์ โดยเซลล์โพลีเอทิลีนมีการเชื่อมต่อกันอย่างสมบูรณ์ทั่วทั้งชิ้นงาน

5.2 ผลของอัตราการไหลของอากาศต่อการขึ้นรูปโพลีเอทิลีนจากไมโครบับเบิล

การขึ้นรูปโพลีเอทิลีนจากกระบวนการไมโครบับเบิลโดยใช้อัตราการไหลของอากาศต่างกัน 3 อัตรา คือ 20 50 และ 100 มิลลิลิตรต่อนาที และใช้ขนาดรูพรุนดิฟฟิวเซอร์ที่ P4 พบว่าโพลีเอทิลีนนั้นมีความสมบูรณ์ของชิ้นงานดี มีความสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้น สามารถนำไปทดสอบสมบัติทางกายภาพได้

ผลของอัตราการไหลของอากาศต่อโครงสร้างทางจุลภาคของโพลีเอทิลีน พบว่า ขนาดเซลล์โพลีเอทิลีนแปรผันตรงกับอัตราการไหล นอกจากนี้ลักษณะเซลล์ที่ได้จากกระบวนการไมโครบับเบิล คือ มีรูปร่างเป็นทรงกลม กระจายตัวสม่ำเสมอ และการเชื่อมต่อของเซลล์แต่ละเซลล์มีความต่อเนื่องทั่วทั้งโครงสร้าง อัตราการไหลของอากาศมีผลต่อการขึ้นรูปโพลีเอทิลีน คือ สามารถกำหนดขนาดเซลล์ของโพลีเอทิลีนได้ และนำไปสู่ความสามารถในการกำหนดสมบัติทางกายภาพของโพลีเอทิลีนได้อย่างดี

5.3 ผลของโครงสร้างต่อสมบัติทางกายภาพโพลีเอทิลีนจากกระบวนการไมโครบับเบิลและกระบวนการดันลอป

จากผลการทดลองพบว่าโพลีเอทิลีนที่ได้จากทั้งสองกระบวนการ ค่าความหนาแน่นที่ได้จะขึ้นอยู่กับขนาดของเซลล์ เซลล์เล็กจะมีความหนาแน่นสูงกว่าเซลล์ที่มีขนาดใหญ่ จากกระบวนการไมโครบับเบิล ค่าความหนาแน่นจะขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของอากาศ ที่อัตราการไหลต่ำจะได้ค่าความหนาแน่นที่สูงกว่าการใช้อัตราการไหลสูง การทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงกดจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างที่ได้ คือโครงสร้างเซลล์ที่มีลักษณะเป็นทรงกลม และมีความต่อเนื่องของเซลล์ของกระบวนการไมโครบับเบิลจะให้สมบัติที่ดีกว่ากระบวนการของดันลอปที่โครงสร้างเซลล์มีการฉีกขาด

การทดสอบค่าดัชนีความแข็งเชิงกดของกระบวนการไมโครบับเบิลพบว่าที่อัตราการไหลที่ต่ำจะให้ค่าความนิ่มของ โฟมสูงกว่าการใช้อัตราไหลสูง เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการดันลอปจะเห็นว่าค่าโฟมยางที่ได้จากกระบวนการไมโครบับเบิลที่ใช้อัตราการไหลที่ต่ำจะให้ระดับความนิ่มมากกว่า

ข้อดีของกระบวนการไมโครบับเบิลสามารถที่จะผลิตโฟมยางที่มีความหนาแน่นแตกต่างกันได้ควบคุมขนาดของเซลล์โฟมได้ โดยการปรับอัตราการไหลของอากาศนำไปสู่การทำโฟมยางด้วยไมโครบับเบิลถือเป็นเทคโนโลยีที่ใหม่และง่ายต่อการทำโฟมยาง สามารถทำโฟมยางได้จริง ถือเป็นทางเลือกใหม่ในการทำโฟมยาง และการนำโฟมยางไปใช้งานในด้านต่าง ๆ ได้ตามความเหมาะสม

5.4 ข้อเสนอแนะ

1. การใช้ขนาดรูพอร์นดิฟิวเซอร์ควรใช้ที่ขนาดต่ำกว่า 40 ไมครอน ถ้ามากกว่านั้นจะไม่สามารถขึ้นรูปโฟมยางได้
2. ถ้าต้องการขนาดเซลล์ที่เล็กสามารถปรับอัตราการไหลของอากาศได้โดยใช้ที่อัตราต่ำ และสามารถปรับเปลี่ยนขนาดรูพอร์นดิฟิวเซอร์ได้
3. สามารถทำการขยายสเกลให้ใหญ่ขึ้นได้โดยไม่มีอาการจำกัดในเรื่องของอุปกรณ์ต่อการขยายปริมาตรของฟองยางให้ได้ปริมาณฟองยางที่ปริมาตรสูงสุดได้
4. ก่อนที่จะนำน้ำยางมาขึ้นรูปโฟมยางควรจะมีการบ่มน้ำยางกับสารเคมี ประกอบด้วย สารทำให้เกิดฟอง สารวัลคาไนซ์ สารตัวเร่ง และ สารป้องกันการเสื่อมสภาพ เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ก่อนที่จะนำมาขึ้นรูปโฟมยาง

บรรณานุกรม

- [1] Information on: <https://www.tcijthai.com/news/2019/3/watch/8881> (สืบค้นเมื่อวันที่ 27 พฤษภาคม 2562)
- [2] การประยุกต์ใช้ยางธรรมชาติในอุตสาหกรรม 2559. สำนักหอสมุดและศูนย์สารสนเทศ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กรมวิทยาศาสตร์บริการกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
- [3] Information on: <https://www.sterlingmattress.com/sterling-mattresses/latex-foam/> (สืบค้นเมื่อวันที่ 27 พฤษภาคม 2562)
- [4] Information on: <https://www.topmattress.com/best-latex-mattress/> (สืบค้นเมื่อวันที่ 27 พฤษภาคม 2562)
- [5] เสาวณีย์ ก่อวฒิกุลรังษี. 2547. การผลิตยางธรรมชาติ (Natural Rubber Productions). ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี.
- [6] บุญธรรม นิธิอุทัย. 2530. ยางธรรมชาติ ยางสังเคราะห์และคุณสมบัติ. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี.
- [7] Blackley, D.C. 1997. Polymer Latices Science and Technology. Second edition. Chapman & Hall, London (2): 44-55
- [8] พรทิพย์ ประกายมณีวงศ์ นุชนาฏ ฌ ระนอง ณพรรัตน์ วิชิตชลชัย และ สุมนา แจ่มเหมือน. 2552. เทคโนโลยีการผลิตยาง ผลผลิตยาง การผลิตและผลิตภัณฑ์จากยาง. กลุ่มอุตสาหกรรมยาง สถาบันวิจัยยาง
- [9] อรสา ภัทรไพบุลย์ชัย. 2556. เทคโนโลยีน้ำยาง (Latex Technology) มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
- [10] De, S. K., J. R. White, and K. Naskar, 2001. Rubber technologist's handbook: Shawbury, Rapa Technology Ltd.
- [11] Dunn, D. J.; Beswick, R. H. D, 2002. Natural and synthetic latex polymers. market report. Rapra Technology Limited. Shrewsbury, UK
- [12] Eaves, D, 2004. Handbook of polymer foams. Rapra Technology Limited. Shrewsbury, UK
- [13] วิริยะ ทองเรือง. 2547. การพัฒนากระบวนการผลิตโฟมยางธรรมชาติ
- [14] Information on: http://rubber.oie.go.th/rrd/file/latex_foam.pdf (สืบค้นเมื่อวันที่ 21 มิถุนายน 2562)
- [15] คมสันต์ เต็มมา. 2557. การเตรียมฟองน้ำย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่เตรียมได้จากธรรมชาติและแป้งมันสำปะหลัง. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [16] วิธาร พันธุ์ศิริวิโรจน์. 2551. การทำฟองยางธรรมชาติด้วยกระบวนการทาลาเลย์: สภาวะแปรรูป วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

- [17] Information on: <https://rubberdigest.com/?p=117> (สืบค้นเมื่อวันที่ 24 มิถุนายน 2562)
- [18] สุจิตรา คำป้อก. 2550. การศึกษากระบวนการขึ้นรูปโฟมยางธรรมชาติความหนาแน่นต่ำ. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมวัสดุ, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- [19] 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
- [20] Gerlach, D., N. Alleborn, V. Buwa, and E. Durst, 2007. Numerical simulation of periodic bubble formation at a submerged orifice with constant gas flow rate. *Chemical Engineering Science* (62): 2109-2125
- [21] Ma, D., M Liu, Y. Zu, and C. Tang, 2012. Two-dimensional volume of fluid simulation studies on single bubble formation and dynamics in bubble columns. *Chemical Engineering Science* (72): 61-77
- [22] Kantarci, N., F. Borak, and K. O. Ulgen, 2005. Bubble column reactors. *Process Biochemistry* (40): 2263-2283
- [23] Kulkarni, A. A., and J.B. Joshi, 2005. Bubble formation and bubble rise velocity in gas-liquid systems: A review. *Industrial & Engineering Chemistry Research* (44): 5873-5931
- [24] Gnyloskurenko, S. V., A. V. Byakova, O. I. Raychenko, and T. Nakamura, 2003. Influence of wetting conditions on bubble formation at orifice in an inviscid liquid. Transformation of bubble shape and size. *Colloids and Surfaces a- Physicochemical and Engineering Aspects* (218): 73-87
- [25] Ponter, A. B., and A. I. Surati, 1997. Bubble emissions from submerged orifices - A critical review. *Chemical Engineering & Technology* (20): 85-89
- [26] Clift, R., J. R. Grace, and M. E. Weber, 1978. *Bubble, drops, and particles*. New York ; London, Academic Press (380)
- [27] Yang, G. Q., B. Du, and L. S. Fan, 2007. Bubble formation and dynamic in gas – liquid – solid fluidization – A review. *Chemical Engineering Science* (62): 2-27
- [28] Zimmerman, W. B.; Rees, J. M, 2009. Optimal modelling and experimentation for the improved sustainability of microfluidic chemical technology design. *Chemical Engineering Research and Design* 87 (6): 798-808
- [29] Degaleesan, S., M. Dudukovic, and Y. Pan, 2001. Experimental study of gas – induced liquid – flow structures in bubble columns. *Aiche Journal* (47): 1913-1931

- [30] Bouaifi, M., G. Hebrard, D. Bastoul, and M. Roustan 2001. A comparative study of gas hold-up, bubble size, interfacial area and mass transfer coefficients in stirred gas-liquid reactors and bubble columns. *Chemical Engineering and Processing* (40): 97-111
- [31] Zimmerman, W. B., V. Tesar, and H. C. Bandulasena, 2011a. Towards energy efficient nanobubble generation with fluidic oscillation. *Current Opinion in Colloid & Interface Science* (16): 350-356
- [32] Zimmerman, W. B., M Zandi, V. Tesar, D. J. Gilmour, and K. Ying, 2011b. Design of an airlift loop bioreactor and pilot scales studies with fluidic oscillator induced microbubbles for growth of a microalgae *Dunaliella salinella*. *Applied Energy* (88): 3357-3369
- [33] วรารุช สุขมาก 2552. การศึกษาการพัฒนาวัสดุกันกระแทกจากยางพองน้ำ. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาเทคโนโลยีวัสดุภัณฑ์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- [34] สุรศักดิ์ เทพทอง และคณะ 2551. การศึกษาผลของสารตัวเติมจากวัสดุธรรมชาติต่อสมบัติของพองน้ำยางธรรมชาติ
- [35] Ramasamy, S., H. Ismail, and Y. Munusamy, 2013. Effect of Rice Husk Powder on Compression Behavior and Thermal Stability of Natural Rubber Latex Foam. *Bioresources* 8(3): 4258-4269
- [36] Bashir, A.S.M., et al, 2017. Mechanical, thermal, and morphological properties of (eggshell powder)-filled natural rubber latex foam. *Journal of Vinyl and Additive Technology* 23(1): 3-12
- [37] Karim, A.F.A., H. Ismail, and Z.M. Ariff, 2016. Properties and characterization of kenaf-filled natural rubber latex foam. *BioResources* 11(1): 1080-1091
- [38] Chapman, W.T., Pounder, D.W. and Murphy, E.A. 1930. Improvements in or Relating to the Manufacture of Good of Rubber or Similar Material GB: 332-525
- [39] Blackley, D.C. 1997c. *Polymer Latices Science and Technology*, Second edition. Chapman & Hall, London (3): 50-52
- [40] Blackley, D.C. 1997c. *Polymer Latices Science and Technology*, Second edition. Chapman & Hall, London (3): 53-54
- [41] Blackley, D.C. 1997c. *Polymer Latices Science and Technology*, Second edition. Chapman & Hall, London (3): 67-68
- [42] Blackley, D.C. 1997c. *Polymer Latices Science and Technology*, Second edition. Chapman & Hall, London (3): 35-36

- [43] Amandine, V.; Cédric, M.; Sergio, M.; Patricia, D, 2019. An ImageJ tool for simplified post-treatment of TEM phase contrast images (SPCI). *Micron* (121): 90-98
- [44] Guriya, K. C.; Tripathy, D. K, 1996. Morphology and physical properties of closed-cell microcellular ethylene–propylene–diene terpolymer (EPDM) rubber vulcanizates. Effect of blowing agent and carbon black loading. *Journal of Applied Polymer Science* 62 (1): 117-127
- [45] Flexible cellular polymeric materials —Determination of compression set ISO1856
- [46] Information on: <http://www.mandkbangkok.com/Compression-Set-Tester.html> (สืบค้นเมื่อวันที่ 3 มิถุนายน 2562)
- [47] Flexible cellular polymeric materials –Determination of hardness (indentation technique) (ISO 2439:2008) English version of DIN EN ISO 2439:2009-05
- [48] Roslim, R., M.Y. Amir, and P.T. Augurio, 2012. *Natural latex foam*. *Journal of engineering science* (8): 15-27
- [49] Information on: <http://share.psu.ac.th/blog/pom-sec/43637> (สืบค้นเมื่อวันที่ 3 มิถุนายน 2562)
- [50] Ma, D.; Liu, M.; Zu, Y.; Tang, C, 2012. Two-dimensional volume of fluid simulation studies on single bubble formation and dynamics in bubble columns. *Chemical Engineering Science* (72): 61-77
- [51] Luo, S. K.; Ding, G. F.; Dai, B.; Yang, M.; Liu, F, 2014. Study on the Cell Structure and Mechanical Properties of Methyl Vinyl Silicone Rubber Foam Materials. *Advanced Materials Research* 1004-1005, 297-306
- [52] Vahidifar, A.; Nouri Khorasani, S.; Park, C. B.; Naguib, H. E.; Khonakdar, H. A, 2016. Fabrication and Characterization of Closed-Cell Rubber Foams Based on Natural Rubber/ Carbon Black by One-Step Foam Processing. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 55 (8): 2407-2416
- [53] Devore, J. L, 2012. *Probability and statistics for engineering and the sciences*. 8th ed.; Richard Stratton: Boston, USA
- [54] Gnyloskurenko, S. V.; Byakova, A. V.; Raychenko, O. I.; Nakamura, T, 2003. Influence of wetting conditions on bubble formation at orifice in an inviscid liquid. Transformation of bubble shape and size. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 218 (1): 73-87
- [55] Ponter, A. B.; Surati, A. I, 1997. Bubble emissions from submerged orifices – a critical review. *Chemical Engineering & Technology* 20 (2): 85-89

- [56] Karim, A. F. A.; Ismail, H.; Ariff, Z. M, 2016. Properties and characterization of kenaf-filled natural rubber latex foam. *BioResources* 11 (1): 1080-1091
- [57] Frisch, K. C, 1981. History of Science and Technology of Polymeric Foams. *Journal of Macromolecular Science: Part A – Chemistry* 15(6): 1089-1112
- [58] Blackley, D. C, 1997. *Polymer Latices. Science and Technology. Applications of latices.* 2nd ed.; Springer: Netherlands (3)
- [59] Zimmerman, W. B.; Kokoo, R, 2018. Esterification for biodiesel production with a phantom catalyst. Bubble mediated reactive distillation. *Applied Energy* 221 :28-40.
- [60] Ariff, Z. M.; Zakaria, Z.; Tay, L. H.; Lee, S. Y, 2008. Effect of foaming temperature and rubber grades on properties of natural rubber foams. *Journal of Applied Polymer Science* 107(4): 2531-2538

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ตาราง ก. ความหนาแน่นของยางพองน้ำที่ได้จากกระบวนการไมโครบับเบิล

ชั้นที่ (g/cm ³)	อัตราการไหลของอากาศ (มิลลิลิตรต่อนาที)		
	20	50	100
1	0.12	0.09	0.07
2	0.12	0.09	0.08
3	0.12	0.09	0.07
เฉลี่ย	0.12	0.09	0.07
STDEV	0.02	0.03	0.02

ตาราง ข. ความหนาแน่นของยางพองน้ำที่ได้จากกระบวนการดันลอป

ชั้นที่	ความหนาแน่น (g/cm ³)
1	0.15
2	0.14
3	0.14
เฉลี่ย	0.14
STDEV	0.03

ตาราง ค. การยุบตัวเนื่องจากแรงกดที่ได้จากกระบวนการไมโครบับเบิล

การยุบตัวเนื่องจากแรงกด (%)	อัตราการไหลของอากาศ (มิลลิลิตรต่อนาที)		
	20	50	100
1	2.81	2.91	5.74
2	2.83	3.41	5.34
3	2.96	3.67	5.04
เฉลี่ย	2.48	3.33	5.37
STDEV	0.08	0.39	0.35

ตาราง ง. การยุบตัวเนื่องจากแรงกดที่ได้จากกระบวนการด้นลอป

ชั้นที่	การยุบตัวเนื่องจากแรงกด (%)
1	4.44
2	5.84
3	4.25
เฉลี่ย	4.84
STDEV	0.13

ตาราง จ. ความสามารถในการคืนรูปเนื่องจากแรงกดที่ได้จากกระบวนการไมโครบับเบิล

ความสามารถในการคืนรูปเนื่องจากแรงกด (%)	อัตราการไหลของอากาศ (มิลลิลิตรต่อนาที)		
	20	50	100
1	97.19	97.09	94.26
2	97.17	97.59	94.66
3	97.04	97.33	94.91
เฉลี่ย	98.68	97.00	94.61
STDEV	0.08	0.63	0.33

ตาราง ช. ความสามารถในการคืนรูปเนื่องจากแรงกดที่ได้จากกระบวนการด้นลอป

ชั้นที่	ความสามารถในการคืนรูปเนื่องจากแรงกด (%)
1	95.56
2	94.16
3	95.75
เฉลี่ย	95.16
STDEV	0.87

ตาราง จ. ดัชนีความแข็งแรงเชิงกดที่ได้จากกระบวนการไมโครบับเบิล

ดัชนีความแข็งแรงเชิงกด (N)	อัตราการไหลของอากาศ (มิลลิลิตรต่อนาที)		
	20	50	100
1	44.30	54.00	68.90
2	42.30	50.70	60.80
3	38.00	58.10	64.80
เฉลี่ย	41.53	54.27	64.83
STDEV	3.22	3.71	4.05

ตาราง ฉ. ดัชนีความแข็งแรงเชิงกดที่ได้จากกระบวนการตันลอย

ชั้นที่	ดัชนีความแข็งแรงเชิงกด (N)
1	66.10
2	71.10
3	79.20
เฉลี่ย	72.13
STDEV	6.61

ภาคผนวก ข

เอกสารการตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

1. อนุสิทธิบัตร กระบวนการผลิตโพลิเมอร์จากน้ำยางธรรมชาติโดยใช้กระบวนการไมโครบับเบิล เลขที่ 1803000736

เลขที่อนุสิทธิบัตร 14401		อสป/200 - ข
อนุสิทธิบัตร		
อาศัยอำนาจตามความในพระราชบัญญัติสิทธิบัตร พ.ศ. 2522 แก้ไขเพิ่มเติมโดยพระราชบัญญัติสิทธิบัตร (ฉบับที่ 3) พ.ศ. 2542 อธิบดีกรมทรัพย์สินทางปัญญาออกอนุสิทธิบัตรฉบับนี้ให้แก่		
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์		
สำหรับการประดิษฐ์ตามรายละเอียดการประดิษฐ์ ข้อถือสิทธิ และรูปเขียน (ถ้ามี) ที่ปรากฏในอนุสิทธิบัตรนี้		
เลขที่คำขอ	1803000736
วันรับอนุสิทธิบัตร	20 กุมภาพันธ์ 2561
ประดิษฐ์	นางสาวมัทนา สังกะเสน และคณะ
แสดงถึงการประดิษฐ์	กระบวนการผลิตโพลิเมอร์จากน้ำยางธรรมชาติโดยใช้ไมโครบับเบิล
ให้ผู้ทรงอนุสิทธิบัตรและหน้าที่ตามกฎหมายว่าด้วยสิทธิบัตรทุกประการ	
ออกให้	ณ วันที่ 18 เดือน กันยายน พ.ศ. 2561
หมดอายุ	ณ วันที่ 19 เดือน กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2567
(ลงชื่อ).....	(นายติเรก บุญแท้) รองอธิบดีกรมทรัพย์สินทางปัญญา ปฏิบัติราชการแทน อธิบดีกรมทรัพย์สินทางปัญญา ผู้ออกอนุสิทธิบัตร
		
		พนักงานเจ้าหน้าที่
หมายเหตุ	1. ผู้ทรงอนุสิทธิบัตรต้องชำระค่าธรรมเนียมรายปีเริ่มตั้งแต่ปีที่ 5 ของอายุสิทธิบัตร มิฉะนั้น อนุสิทธิบัตรจะสิ้นอายุ 2. ผู้ทรงอนุสิทธิบัตรจะขอชำระค่าธรรมเนียมรายปีล่วงหน้าโดยชำระทั้งหมดในคราวเดียวกันได้ 3. ภายใน 90 วันก่อนวันสิ้นอายุอนุสิทธิบัตร ผู้ทรงอนุสิทธิบัตรมีสิทธิขอต่ออายุอนุสิทธิบัตรได้ 2 ครั้ง มีกำหนดคราวละ 2 ปี โดย ยื่นคำขอต่ออายุ ต่อพนักงานเจ้าหน้าที่ 4. การอนุญาตให้ใช้สิทธิตามอนุสิทธิบัตรและการโอนอนุสิทธิบัตรต้องทำเป็นหนังสือและจดทะเบียนต่อพนักงานเจ้าหน้าที่	036986

2. Rubber Foam Processing via Bubbling Technique (ISSN: 1662, Vol. 962, pp-100)

Materials Science Forum
ISSN: 1662-9752, Vol. 962, pp 96-100
doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.962.96
© 2019 Trans Tech Publications Ltd, Switzerland

Submitted: 2018-12-21
Accepted: 2018-12-25
Online: 2019-07-12

Rubber Foam Processing via Bubbling Technique

Sanit Sirikulchaikij^{1,a}, Benjaporn Nooklay^{2,b}, Rungrote Kokoo^{3,c}
and Matthana Khanghamano^{1,d}

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.

^aSanit_Sirikulchaikij@hotmail.com, ^bnooklay_@hotmail.com ^crungrrote.k@eng.kmutnb.ac.th,
^dkmatthana@eng.psu.ac.th

Keywords: Natural rubber, Rubber foam, Rubber foam production, Bubbling process

Abstract. Natural rubber foams are currently produced by the two well-known processes of Dunlop and Talalay. Dunlop process, however, requires a high-speed Hobart Mixer to generate a high bubble-volume, while Talalay is complexity and expensive technique. Here, a simple and inexpensive technique for rubber foam production was introduced. The process involved air flowing with a constant flow rate through a porous diffuser, firmly connected to the bubble column containing compound latex, to generate a high bubble-volume. Microstructure of the as-produced rubber foams was examined using a scanning electron microscope (SEM), in comparison with that of the purchased Dunlop foam. Spherical cell shape with a uniform interconnected-cell structure was gained from the bubbled foams, while fractured-cell structure was obtained from the Dunlop foam.

Introduction

Latex foam can be defined as a cellular rubber that has been made directly from liquid latex. To produce rubber foam, two processes are well-known; Dunlop and Talalay. Dunlop process has been mainly used in Thailand for the manufacture of thick-molded latex foam products such as pillows, cushions, and mattresses[1], while Talalay is not a popular method due to complicated and expensive method. Nevertheless, the products produced from Talalay technique show better flexibility and mechanical properties than Dunlop products. This is because they have better cell structure and pore-size distribution as compared to the Dunlop ones.

Dunlop process uses Hobart mixer, a high-speed stirring tool, to produce a high-volume bubble leading to high energy consumption of the process [2,3]. Furthermore, Dunlop products have fractured cellular structure and nonuniform pore-size distribution resulting in poorer mechanical properties than Talalay products [4].

The main idea of this research is, therefore, to present an alternative method for manufacturing latex foams using bubbling technology. This was aimed to maintain those favored properties of rubber foams gained from the Talalay and those uncomplexity from Dunlop process. Here, to produce a high-volume bubble, Dunlop process was improved by replacing the Hobart mixer with a bubble column. Using this new technique, cell-structure and pore size of the produced rubber foams are able to be controlled, and hence mechanical properties of the products.

2. Natural rubber latex foam production using air microbubbles: microstructure and physical properties



Materials Letters

Available online 31 October 2019, 126916

In Press, Corrected Proof 




Natural rubber latex foam production using air microbubbles: Microstructure and physical properties

Sanit Sirikulchaikij ^a, Rungrote Kokoo ^b, Matthana Khangkhamano ^a  

^a Department of Mining and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90112, Thailand

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

Received 3 October 2019, Revised 23 October 2019, Accepted 29 October 2019, Available online 31 October 2019.

 **Show less**

<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.126916>

[Get rights and content](#)

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายสันติย์ ศิริกุลชัยกิจ	
รหัสประจำตัวนักศึกษา	5910120040	
วุฒิการศึกษา		
วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิทยาศาสตร์และวิศวกรรมวัสดุ)	มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์	2558

ทุนการศึกษา

ทุนบัณฑิตศึกษาวิศวกรรมศาสตร์ ปีงบประมาณ 2559
ทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ ปีงบประมาณ 2560

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

1. Sanit Sirikulchaikij, Benjaporn Nooklay, Rungrote Kokoo and Matthana Khanghamano. "Rubber Foam Processing via Bubbling Technique." 2nd International Conference on Sensors, Materials and Manufacturing (ICSMM 2018) National Taipei University of Technology, Taipei, Taiwan November 19-21, 2018.
2. Matthana Khanghamano, Rungrote Kokoo, Sanit Sirikulchaikij and kultida Katkeaw. Patty Patent No. 1803000736, February 20, 2018
3. Sanit Sirikulchaikij, Matthana Khanghamano and Rungrote Kokoo. Natural rubber latex foam production using air microbubbles: microstructure and physical properties, Materials Letters, impress.