

การพัฒนาสูตรยางโฟมคอมปาวด์สำหรับผลิตโรลลิงแบรีเออร์จราจร

DEVELOPMENT OF NATURAL RUBBER FOAM COMPOUND  
FOR TRAFFIC ROLLING BARRIER



อโณทัย ผลสุวรรณ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลฉะบuri  
ปีการศึกษา 2562  
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลฉะบuri

# การพัฒนาสูตรยางโฟมคอมปาวด์สำหรับผลิตโรลลิงแบรีเออร์จรรยาจร

อโนทัย ผลสุวรรณ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
ปีการศึกษา 2562  
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การพัฒนาสูตรยางโฟมคอมปาวด์จากยางธรรมชาติสำหรับผลิตโรลลิงแบรีเออร์  
จราจร

Development of Natural Rubber Foam Compound Formulas for  
Manufacturing Traffic Rolling Barrier

ชื่อ - นามสกุล

นายอโนทัย ผลสุวรรณ

สาขาวิชา

วิศวกรรมการผลิต

อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ศิริชัย ต่อสกุล, Dr.-Ing.

ปีการศึกษา

2562

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชัยยะ ปราณีตพลกรัง, D.Eng.)



กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์อนุชา วัฒนานภา, Ph.D.)



กรรมการ

(อาจารย์กุลชาติ จุลเพ็ญ, D.Eng.)



กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ศิริชัย ต่อสกุล, Dr.-Ing.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ 26 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2563

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาสูตรยางโพลีคอมปาวด์จากยางธรรมชาติสำหรับผลิตโรลลิงแบรีเออร์จรรยา
ชื่อ – นามสกุล	นายอโณทัย ผลสุวรรณ
สาขาวิชา	วิศวกรรมการผลิต
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ศิริชัย ต่อสกุล Dr.-Ing.
ปีการศึกษา	2562

## บทคัดย่อ

โรลลิงแบรีเออร์จรรยาเป็นอุปกรณ์ลดช่วยลดความรุนแรงจากการเกิดอุบัติเหตุจากยานพาหนะ และได้นำเข้าจากต่างประเทศ โดยอาศัยหลักการลดแรงปะทะ และปรับทิศทางหลังการชนของยานพาหนะ ป้องกันอุบัติเหตุซ้ำซ้อน โรลลิงแบรีเออร์จรรยาผลิตจากโพลีโพลีเมอร์สังเคราะห์พอลิไวนิลเอทิลีนอะซิเตตที่มีสมบัติความยืดหยุ่นคล้ายยางธรรมชาติ การวิจัยในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาสูตรยางโพลีคอมปาวด์ที่ใช้วัตถุดิบจากยางธรรมชาติไทยเพื่อผลิตโพลีโรลลิงแบรีเออร์จรรยาทดแทนการนำเข้าจากต่างประเทศ

สูตรยางคอมปาวด์ประกอบด้วยสารเคมีหลายชนิดที่ใช้เพื่อการคงรูปร่างยางธรรมชาติ สารเคมีที่จะผสมเพื่อใช้เป็นตัวแปรในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยสัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 2 3 และ 4 ส่วนในร้อยละ ส่วน และสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 0 5 10 และ 15 ส่วนในร้อยละ รวมได้สูตรในขั้นตอนผสมเป็น 16 สูตร ใช้เครื่องผสมแบบลูกกลิ้งคู่ เมื่อผสมเสร็จทดสอบสมบัติการคงรูปร่างคอมปาวด์ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสเพื่อหาระยะเวลาการคงรูป และความหนืด ยางคอมปาวด์ที่ผสมเสร็จจะนำมาขึ้นรูป 3 ลักษณะ คือการพาความร้อนแบบไม่ควบคุมการขยายตัว การนำความร้อนแบบควบคุมการขยายตัวร้อยละ 25 และ 50 รวมได้สูตรยางคอมปาวด์ในขั้นตอนสุดท้าย 48 สูตร หลังการขึ้นรูปจะถูกทดสอบสมบัติทางกายภาพความหนาแน่นรวม และสัญญาณวิทยา สมบัติเชิงกลค่าการดูดซับแรงกอดอัด เปรียบเทียบกับชิ้นงานตัวอย่างจากต่างประเทศ

ผลการวิจัยพบว่าสูตรยางคอมปาวด์ตัวแปรสารกระตุ้น 2 ส่วนในร้อยละและสารเกิดฟอง 5 ส่วนในร้อยละขึ้นรูปแบบการพาความร้อน มีสมบัติทางกายภาพความหนาแน่นรวม 0.254 กรัมต่อตารางเซนติเมตรมีความใกล้เคียงตัวอย่างจากต่างประเทศ แต่สัญญาณวิทยาฟองโพลีเป็นแบบเปิดไม่เหมาะกับการใช้งานรับแรงเชิงกล สูตรยางคอมปาวด์ที่เหมาะสมสำหรับการผลิตโรลลิงแบรีเออร์จรรยาจรรยาคือตัวแปรสารกระตุ้น 1 ส่วนในร้อยละและสารเกิดฟอง 5 ส่วนในร้อยละ ขึ้นรูปแบบการนำความร้อนควบคุมการขยายตัว ร้อยละ 50 มีค่าการดูดซับแรงกอดอัด 0.194 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตรมีความใกล้เคียงกับตัวอย่างจากต่างประเทศ และสัญญาณวิทยาฟองโพลีเป็นแบบปิดเหมาะกับการใช้งานรับแรงเชิงกล

**คำสำคัญ:** โรลลิงแบรีเออร์จรรยา ยางธรรมชาติ การดูดซับแรงกอดอัด



**Thesis Title** Development of Natural Rubber Foam Compound Formulas for Manufacturing Traffic Rolling Barrier

**Name – Surname** Mr. Anothai Pholsuwan

**Program** Manufacturing Engineering

**Thesis Advisor** Associate Professor Sirichai Torsakul, Dr.-Ing.

**Academic Year** 2019

## ABSTRACT

Traffic Rolling Barrier is a device that reduces the severity of vehicle accidents which is imported from foreign countries. By using principles of reducing impact forces and changing the direction after the vehicle collision and then preventing second accidents. The traffic rolling barrier is made from the synthetic polymer foam, polyvinyl ethylene acetate that has the same resilience as natural rubber. The purpose of this study was to develop Thai natural rubber foam compound formulas for manufacturing traffic rolling barriers to replace them from foreign imports.

The compound rubber formula consists of many chemicals used to vulcanize natural rubber. The variables chemical in this research consisted of zinc oxide activators of 1, 2, 3 and 4 phr. and sodium hydrogen carbonate blowing agent of 0, 5, 10 and 15 phr. in a total of 16 formulas. They were mixed in a two-roll mill machine. All foam compound mixed was tested by curing rheometer at 150°C for curing time and compound viscosity. The foam compounds were ready to be molded into 3 parameters: convection heat transfers without expansion control, conduction heat transfers with 25% and 50% expansion control. Therefore, 48 formulas were created in the last process. After forming, the physical properties; bulk density and morphology and mechanical properties; compression deflection were characterized to compare with the foreign samples.

The results revealed that the foam compound with the activator agent of 2 phr. and blowing agent of 5 phr. in convection heat transfers had physical properties with a bulk density of 0.254 g/cm<sup>2</sup> similar to samples from foreign countries. But the foam morphology with an open type was not suitable for mechanical load applications. The foam compound formula suitable for the manufacturing traffic rolling barriers was that the activator 1 phr. and blowing agent 5 phr. in conduction heat transfer with 50% expansion control which had a compression deflection value of 0.194 N/mm<sup>2</sup> similar to samples from foreign countries and the foam morphology with a closed type was suitable for use in mechanical loads.

**Keywords:** traffic roller barrier, natural rubber, compression deflection

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความเมตตากรุณาอย่างสูงจากอาจารย์ที่ปรึกษา  
รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ต่อกุล คณะกรรมการสอบประกอบด้วยรองคณบดีฝ่ายพัฒนานักศึกษา  
อาจารย์ ดร.กุลชาติ จุลเพ็ญ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยยะ ปราณีตพลกรัง และผู้ช่วยศาสตราจารย์  
ดร.อนุชา วัฒนาจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี คณะครุศาสตร์ที่กรุณาให้คำแนะนำ  
และให้คำปรึกษาตลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความ  
สมบูรณ์ ซึ่งผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณบุคลากรของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม  
สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต และภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ ที่ให้การสนับสนุนการดำเนินงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณแนวทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองกรุงเทพ-ชลบุรี คุณชัยวัฒน์ จิตระกุล รองผู้อำนวยการ  
ฝ่ายวิศวกรรมที่ให้ความอนุเคราะห์ชิ้นงานโรลลิงแบรีเออร์จราจรเพื่อใช้เป็นตัวอย่างเปรียบเทียบใน  
งานวิจัยนี้

ท้ายที่สุดขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีที่ให้ความอนุเคราะห์ค่าใช้จ่าย  
ตลอดทุนการศึกษาในระดับปริญญาโทนี้

อโณทัย ผลสุวรรณ

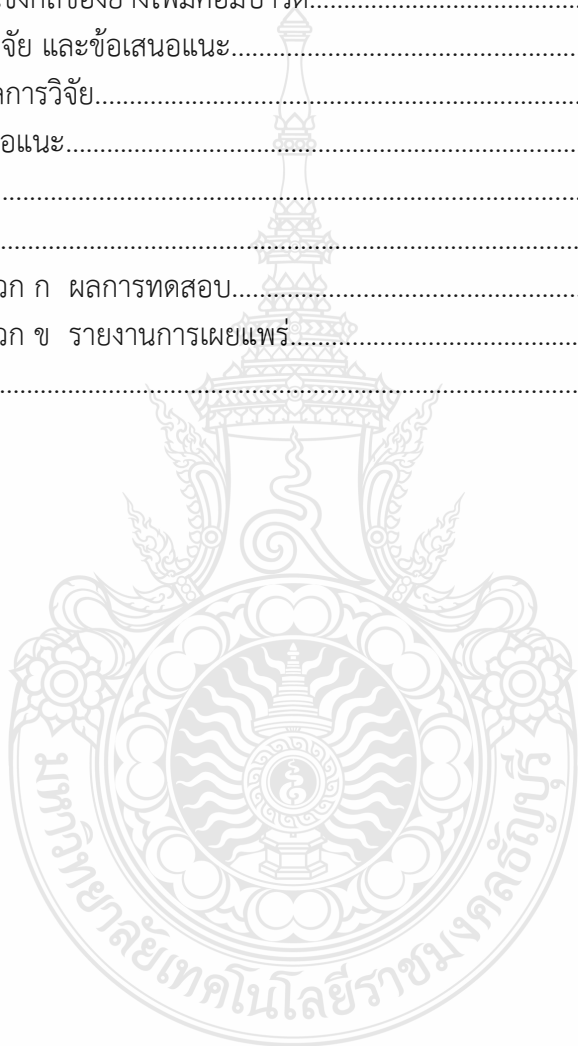


## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(9)
บทที่ 1 บทนำ.....	15
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	15
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	17
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	17
1.4 สมมติฐานการวิจัย.....	18
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย.....	18
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	19
2.1 ยางธรรมชาติ.....	15
2.2 การจำแนกชั้นของยางแท่ง.....	24
2.3 ยางคอมพาวด์ (Rubber Compound).....	25
2.4 โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต (sodium bicarbonate, NaHCO <sub>3</sub> ).....	29
2.5 แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate, CaCO <sub>3</sub> ).....	29
2.6 เอทิลีน-ไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์ (Ethylene-vinylacetate copolymer, EVA).....	31
2.7 โฟมยาง.....	32
2.8 การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer).....	33
2.9 การผสมยาง.....	35
2.10 เครื่องผสมยาง.....	35
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	36
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	41
3.1 วัสดุสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.....	41
3.2 เครื่องจักร อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	41
3.3 รายละเอียดวิธีการวิจัย.....	46
3.4 กำหนดตัวแปรในการวิจัย.....	48
3.5 การตรวจสอบวิเคราะห์.....	48

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	54
4.1 ผลการศึกษาชิ้นงานตัวอย่างโรลลิงแบรีเออร์จราจร.....	54
4.2 สมบัติการคงรูปของยางโฟมคอมปาวด์.....	60
4.3 สมบัติเชิงกลของยางโฟมคอมปาวด์.....	64
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	103
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	103
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	104
บรรณานุกรม.....	106
ภาคผนวก.....	109
ภาคผนวก ก ผลการทดสอบ.....	110
ภาคผนวก ข รายงานการเผยแพร่.....	127
ประวัติผู้เขียน.....	129



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างส่วนประกอบของน้ำยางสดและยางแห้ง.....	21
ตารางที่ 2.2 มาตรฐานยางแท่งที่กำหนดโดยประเทศต่างๆ.....	24
ตารางที่ 2.3 สมบัติของยางแท่งตามมาตรฐานไทย (Standard Thai Rubber, STR).....	26
ตารางที่ 2.4 ผลิตภัณฑ์จากยางแท่งชนิดต่างๆ.....	26
ตารางที่ 2.5 สมบัติของสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์.....	28
ตารางที่ 2.6 สมบัติของสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต.....	30
ตารางที่ 2.7 ตารางแสดงค่าความหนาแน่นของเอทิลีน-ไวนิลอะซีเตตโคพอลิเมอร์ที่ปริมาณ ไวนิล-อะซีเตตต่างๆ กัน.....	31
ตารางที่ 2.8 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของไหลบางชนิด.....	34
ตารางที่ 3.1 ตัวแปรในการวิจัย.....	48
ตารางที่ 3.2 แรงสปริงที่ใช้กดทดสอบความแข็งชนิดเอ.....	51
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความหนาแน่นรวม (Bulk density) ขึ้นตัวอย่างโฟมโรลลิงแบรีเออร์ จรรยา.....	59
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าความแข็ง (Hardness / Shore A) ขึ้นตัวอย่างโฟมโรลลิงแบรีเออร์ จรรยา.....	59
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความต้านทานต่อแรงกดอัด (Compression deflection) ขึ้นตัวอย่าง โฟมโรลลิงแบรีเออร์จรรยา.....	59

## สารบัญรูป

	หน้า	
รูปที่ 1.1	โวลลิงแบรีเออร์จรรยาจร ติดตั้งบนถนนพระตำหนัก เมืองพัทยา จังหวัดชลบุรี.....	16
รูปที่ 2.1	ปริมาณการผลิตและการใช้งานยางธรรมชาติระหว่างปีคริสต์ศักราช 1900 – 2008	19
รูปที่ 2.2	โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ (cis – 1, polyisoprene).....	20
รูปที่ 2.3	โครงสร้างอนุภาคของเนื้อยาง.....	21
รูปที่ 2.4	ลักษณะอนุภาคของเนื้อยางแห้งที่ได้จากต้น Hevea Basiliensis (ความยาวเส้น อ้างอิง 1 ไมโครเมตร).....	22
รูปที่ 2.5	โพลีพอลิเมอร์แบบสามมิติ (ก) โพลีโพลีฟิเลตเซลล์ปิด (ข) โพลีโพลียูรีเทน (PU) เซลล์เปิด .....	32
รูปที่ 2.6	แสดงการกระจายตัวของ (ก) อุณหภูมิตามความหนาของชิ้นงาน (ข) ความหนา แน่นการทำปฏิกิริยาเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลตามความหนาของชิ้นงาน.....	40
รูปที่ 3.1	เครื่องผสมสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill).....	42
รูปที่ 3.2	เครื่องรีโอมิเตอร์แบบตายเคลื่อนที่ (Moving Die Rheometer; MDR).....	42
รูปที่ 3.3	เครื่องอัดขึ้นรูปไฮดรอลิก (Compression Molding).....	43
รูปที่ 3.4	เตาอบแบบพาความร้อน.....	43
รูปที่ 3.5	เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ตามมาตรฐาน ASTM สำหรับใช้ทดสอบการดูดซับ แรงกดอัด.....	44
รูปที่ 3.6	ภาพแสดงโพลดเซลล์ขนาด 10 กิโลนิวตัน และแป้นรีบ – กดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง กลาง 150 มิลลิเมตร.....	44
รูปที่ 3.7	แม่พิมพ์โลหะที่ใส่ยางโพลีคอมปาวด์ก่อนการขึ้นรูป.....	45
รูปที่ 3.8	แม่พิมพ์โลหะทรงโดนัทขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน - นอก 13 - 64 มิลลิเมตร ความสูง 13 มิลลิเมตร.....	45
รูปที่ 3.9	แสดงขั้นตอนการผสมยางโพลีคอมปาวด์.....	46
รูปที่ 3.10	แสดงขั้นตอนการขึ้นรูปโพลียางธรรมชาติจากยางคอมปาวด์.....	47
รูปที่ 3.11	กราฟแสดงผลการทดสอบจากเครื่องเครื่องหาอุณหภูมิและเวลาคงรูปของยาง.....	49
รูปที่ 3.12	ลักษณะหัวกดทดสอบความแข็งชนิดเอ.....	50
รูปที่ 3.13	เครื่องทดสอบแรงกดตามมาตรฐาน ASTM D2240 – 15.....	50
รูปที่ 3.14	การทดสอบการดูดซับแรงกดอัดด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์.....	51
รูปที่ 3.15	กล้องถ่ายภาพมาโคร Olympus EM5 Mk2 กับเลนส์มาโคร Zuiko ความยาว โฟกัส 50 มิลลิเมตร อัตราขยาย 2 : 1.....	52
รูปที่ 3.16	การนับจำนวนไข่ปลาด้วยโปรแกรมอิมเมจ.....	53

## สารบัญญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 4.1	ภาพถ่ายชิ้นตัวอย่างโรลลิงแบรีเออร์จราจร จากแนวทางหลวงพิเศษระหว่างเมือง หมายเลข 9 (กรุงเทพ-ชลบุรี).....	54
รูปที่ 4.2	แสดงขนาดชิ้นตัวอย่างโฟมโรลลิงแบรีเออร์จราจร.....	55
รูปที่ 4.3	รูปแสดงชื่อเรียกของชิ้นงานโรลลิงแบรีเออร์ (ก) ด้านบน (ข) ด้านล่าง.....	56
รูปที่ 4.4	ภาพถ่ายตัดขวางชิ้นตัวอย่างโฟมโรลลิงแบรีเออร์จราจรตัวอย่าง.....	57
รูปที่ 4.5	ภาพถ่ายตัดขวางแสดงความแตกต่างขนาดฟองโฟมภายในชิ้นตัวอย่างโฟมโรลลิงแบรีเออร์จราจร.....	57
รูปที่ 4.6	แสดงขนาดพื้นที่ฟองโฟมเฉลี่ย และการกระจายตัวของชิ้นตัวอย่างโฟมโรลลิงแบรีเออร์จราจรที่ผลิตจากวัสดุโฟมเอทิลีนไวนิลอะซิเตท.....	58
รูปที่ 4.7	กราฟแสดงค่าผลต่างแรงบิด (MH – ML) มูว์ริงดายนรีโอมิเตอร์ (dN.m).....	60
รูปที่ 4.8	กราฟแสดงระยะเวลาย่างเริ่มคงรูป (scorch time) (นาที).....	62
รูปที่ 4.9	กราฟแสดงระยะเวลาคงรูปยาง (cure time) (นาที).....	63
รูปที่ 4.10	กราฟแสดงค่าความหนาแน่นรวม (Bulk density) ยางโฟม ขึ้นรูปด้วยกระบวนการพาความร้อน ไม่ควบคุมการขยายตัว.....	65
รูปที่ 4.11	กราฟแสดงค่าความหนาแน่นรวม (Bulk density) ยางโฟม ขึ้นรูปด้วยกระบวนการพาความร้อน ควบคุมการขยายตัว ร้อยละ 50.....	67
รูปที่ 4.12	กราฟแสดงค่าความหนาแน่นรวม (Bulk density) ยางโฟมขึ้นรูปด้วยกระบวนการพาความร้อน ควบคุมการขยายตัว ร้อยละ 25.....	67
รูปที่ 4.13	กราฟแสดงค่าความแข็ง (Hardness) ยางโฟมคอมปาวด์ขึ้นรูปด้วย กระบวนการนำความร้อน ควบคุมการขยายตัว ร้อยละ 50.....	68
รูปที่ 4.14	กราฟแสดงค่าความแข็ง (Hardness) ยางโฟม ขึ้นรูปด้วยกระบวนการนำความร้อน ควบคุมการขยายตัว ร้อยละ 25.....	69
รูปที่ 4.15	กราฟแสดงค่าความต้านทานแรงกดอัด (Compression deflection) ร้อยละ 25 ของความหนายางโฟม ขึ้นรูปด้วยกระบวนการพาความร้อน ไม่ควบคุมการขยายตัว.....	70
รูปที่ 4.16	กราฟแสดงค่าความต้านทานแรงกดอัด (Compression deflection) ร้อยละ 25 ของความหนายางโฟมขึ้นรูปด้วยกระบวนการนำความร้อน ควบคุมการขยายตัว ร้อยละ 50.....	72
รูปที่ 4.17	กราฟแสดงค่าความต้านทานแรงกดอัด (Compression deflection) ร้อยละ 25 ของความหนายางโฟม ขึ้นรูปด้วยกระบวนการนำความร้อน ควบคุมการขยายตัว ร้อยละ 25.....	73









## สารบัญญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.39	ภาพถ่ายแสดงโคมยางขึ้นรูปแบบการพาความร้อน ควบคุมการขยายตัว ร้อยละ 25 สัตว์ส่วนสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 5 ส่วนในร้อยละ (ก) สัตว์ส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 ส่วนในร้อยละ (ข) สัตว์ส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 2 ส่วนในร้อยละ (ค) สัตว์ส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 3 ส่วนในร้อยละ (ง) สัตว์ส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 4 ส่วนในร้อยละ.....	100
รูปที่ 4.40	ภาพถ่ายแสดงโคมยางขึ้นรูปแบบการพาความร้อน ควบคุมการขยายตัว ร้อยละ 25 สัตว์ส่วนสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 10 ส่วนในร้อยละ (ก) สัตว์ส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 ส่วนในร้อยละ (ข) สัตว์ส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 2 ส่วนในร้อยละ (ค) สัตว์ส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 3 ส่วนในร้อยละ (ง) สัตว์ส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 4 ส่วนในร้อยละ.....	101
รูปที่ 4.41	ภาพถ่ายแสดงโคมยางขึ้นรูปแบบการพาความร้อน ควบคุมการขยายตัว ร้อยละ 25 สัตว์ส่วนสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 15 ส่วนในร้อยละ (ก) สัตว์ส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 ส่วนในร้อยละ (ข) สัตว์ส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 2 ส่วนในร้อยละ (ค) สัตว์ส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 3 ส่วนในร้อยละ (ง) สัตว์ส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 4 ส่วนในร้อยละ.....	102



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การคมนาคมและการขนส่งเป็นปัจจัยพื้นฐานที่สำคัญในการขับเคลื่อนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมของประเทศ โครงข่ายเส้นทางการขนส่งทางถนนของประเทศไทยมีความยาว 217,797.06 กิโลเมตร เป็นถนนในความรับผิดชอบของกรมทางหลวงระยะทาง 66,871.36 กิโลเมตร กรมทางหลวงชนบทระยะทาง 49,080.16 กิโลเมตร เทศบาลระยะทาง 16,276.06 กิโลเมตร และอื่นๆ ระยะทาง 85,569.48 กิโลเมตร แนวโน้มปริมาณการเดินรถบนโครงข่ายทางหลวงของประเทศไทยมีมากขึ้น ทำให้ปริมาณการจราจรต่อความจุเพิ่มขึ้น ความเร็วในการเดินทางลดลง ส่งผลต่อระดับการให้บริการของถนน (Level of Service) โดยในปี 2553 มีประมาณการเดินทางประมาณ 3.07 ล้านคน-เที่ยวต่อวัน เพิ่มขึ้นจาก 2.4 ล้านคน-เที่ยวต่อวัน ในปี 2552 ทำให้ความเร็วเฉลี่ยในการเดินทางลดลงจาก 77.5 กิโลเมตรต่อชั่วโมงเหลือ 74.5 กิโลเมตรต่อชั่วโมง สำหรับการขนส่งสินค้าทางถนนเพิ่มขึ้นจาก 1.5 ล้านตันต่อวัน เป็น 2 – 3 ล้านตันต่อวัน ประเทศไทยมีความได้เปรียบทางภูมิศาสตร์ที่มีพื้นฐานที่สามารถเชื่อมต่อการคมนาคมส่งทางบกกับประเทศเพื่อนบ้านที่อยู่ติดกันอีก 4 ประเทศ ได้แก่ สาธารณรัฐแห่งสหภาพเมียนมาร์ สาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว มาเลเซีย และยังสามารถเชื่อมโยงไปยังประเทศใกล้เคียงได้อีก 3 ประเทศ คือ สาธารณรัฐสังคมนิยมเวียดนาม สาธารณรัฐประชาชนจีน สาธารณรัฐสิงคโปร์ จึงทำให้ประเทศไทยกลายเป็นศูนย์กลางเชื่อมต่อการขนส่งของภูมิภาค (Hub of Connectivity) ซึ่งสามารถพัฒนาเป็นการขนส่งต่อเนื่องหลายรูปแบบและมีถนนเชื่อมโยงตามแนวระเบียงเศรษฐกิจ (North-South Economic Corridor และ East-West Economic Corridor) แต่จากรายงานความปลอดภัยทางถนนของโลก พ.ศ. 2556 (Global Status Report on Road Safety 2015) ขององค์การอนามัยโลกพบว่าอัตราผู้เสียชีวิตจากอุบัติเหตุทางถนนในประเทศไทยสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องเป็นอันดับ 2 ของโลกโดยมีผู้เสียชีวิตจำนวน 36.2 คนต่อจำนวนประชากรแสนคนต่อปีรองจากประเทศลิเบีย อัตราการเกิดอุบัติเหตุดังกล่าวก่อให้เกิดความสูญเสียด้านสังคม เศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อมมีมูลค่าไม่น้อยกว่า 230,000 ล้านบาทต่อปี หรือเทียบเป็นปริมาณร้อยละ 2.8 ของมูลค่าผลิตภัณฑ์มวลรวมในประเทศ (GDP) ซึ่งโดยทั่วไปมูลค่าความเสียหายจากอุบัติเหตุไม่ควรเกินร้อยละ 1 – 2 ของ GDP โดยอุบัติเหตุส่วนใหญ่เกิดจากการขนส่งทางถนน รัฐบาลไทยตั้งเป้าว่าจะลดอัตราการเสียชีวิตให้เหลือต่ำกว่า 10 คนต่อประชากร 100,000 คนต่อปีให้สำเร็จภายในปี 2563 ตามแนวทางโครงการ “Decade of Action for Road Safety” โดยองค์การสหประชาชาติ แน่แน่นอนว่า มาตรฐานการป้องกันอุบัติเหตุด้วยการปรับปรุงโครงสร้างพื้นฐาน ก็สามารถช่วยให้มีความปลอดภัยมากขึ้นหรือช่วยลดความสูญเสียและความรุนแรง เช่น การออกแบบถนนที่ดี การติดตั้งสันชะลอความเร็ว (Speed hump) การติดตั้งราวเหล็กกุกกักกันรถสำหรับทางหลวง (Guard rail) การติดตั้งเตือนต่างๆ เป็นต้น[1 - 3] ราวเหล็กกุกกักกันรถสำหรับทางหลวง หรือที่นิยมเรียกกันว่า “การ์ดเลน (Guard lane) เป็นอุปกรณ์ความปลอดภัยที่นิยมใช้กันแพร่หลายภายในประเทศ ติดตั้งขนานตามความยาวของถนนเพื่อป้องกันยานพาหนะที่ขับเคลื่อนหรือเคลื่อนที่ผิดลักษณะหรือทิศทางปกติ ซึ่งอาจติดตั้งบริเวณกลางถนน (Median barriers) หรือบริเวณไหล่ถนน (Road side barrier)

หรือบนสะพาน (bridge railings) ในประเทศไทยมีการกำหนดมาตรฐาน มอก. 248-2531 เพื่อใช้ควบคุมคุณภาพของอุปกรณ์ดังกล่าว ปัจจุบันในหลายประเทศยังคงให้ความสำคัญกับการพัฒนาอุปกรณ์นี้ทั้งในลักษณะความสูง ความแข็งแรง และวัสดุที่นำมาใช้อย่างสม่ำเสมอ โรลลิงแบร์ริเออร์จราจร (Rolling Barriers) หรือ ราวลูกกลิ้งป้องกันอุบัติเหตุสาธารณะ เป็นนวัตกรรมจากประเทศสาธารณรัฐเกาหลี (เกาหลีใต้)[5 – 8] โดยติดตั้งเป็นแห่งแรกของจังหวัดนนทบุรีซึ่งเป็นแห่งที่สองของประเทศ ภายในซอยวัดลาดปลาตุก ระหว่างแยกทางหลวงพิเศษหมายเลข 9 ถึงบ้านหนองเพรางาย พื้นที่ของอำเภอบางบัวทอง และอำเภอไทรน้อย จังหวัดนนทบุรี ภายใต้ชื่อโครงการปรับปรุงทางเพื่อความปลอดภัย ระยะทางโครงการทั้งหมด 200 เมตร โดยใช้งบประมาณในการจัดซื้อจัดจ้างทั้งสิ้น 5.68 ล้านบาท ส่วนหนึ่งของโครงการฯ ประกอบด้วยการติดตั้งราวลูกกลิ้งโรลลิงแบร์ริเออร์จราจรระยะทาง 92 เมตร บริเวณทางโค้งของถนนบริเวณที่มีอัตราการเกิดอุบัติเหตุรุนแรงโดยเฉพาะในปี 2558 ถึง 11 ครั้ง หรือเกือบเดือนละ 1 ครั้ง โดยเปลี่ยนจากอุปกรณ์เดิมที่ใช้คือราวเหล็กลูกฟูกกันรถ ซึ่งทนทานต่อแรงกระแทกจากการชน แล้วยังหมุนไปชนกับยานพาหนะที่ร่วมทางคันอื่นอีก [9] โรลลิงแบร์ริเออร์จราจรที่ติดตั้งนี้ออกแบบสำหรับรถยนต์นั่งน้ำหนัก 1,300 กิโลกรัม ความเร็วไม่เกิน 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง มุมชน 20 องศา ลูกกลิ้งหรือโรลลิงนี้มีลักษณะทรงกระบอกผลิตจากวัสดุโพลีเอทิลีนอะซิเตท มีแกนกลางผลิตจากท่อเหล็กกลมกลวงฝังกับพื้นไหล่ทางหรือพื้นถนนความลึก 1.30 เมตร พร้อมยึดด้วยท่อเหล็กเหลี่ยมหรือกลมกลวงในแนวนอนขนานกับพื้นถนนตลอดความยาว [7] โพลีเอทิลีนไวนิลอะซิเตท เป็นโคพอลิเมอร์ระหว่าง เอทิลีน กับ ไวนิลอะซิเตท กระบวนการขึ้นรูปคล้ายกับเทอร์โมพลาสติก โพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ หรือสามารถขึ้นรูปในลักษณะโพนได้ คุณสมบัติมีน้ำหนักเบา ความยืดหยุ่นคล้ายยางโดยเฉพาะที่อุณหภูมิต่ำ มีความต้านทานต่อการแตกร้าว และรังสีอัลตราไวโอเลท



รูปที่ 1.1 โรลลิงแบร์ริเออร์จราจร ติดตั้งบนถนนพระตำหนัก เมืองพัทยา จังหวัดชลบุรี

ยางพาราเป็นพืชเศรษฐกิจหลักที่ทำรายได้อย่างมากมายมาสู่ประเทศไทยและภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ประเทศไทยถือเป็นผู้ผลิตเป็นอันดับหนึ่งของโลกมาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2534 แต่เกือบทั้งหมดส่งออกในรูปวัตถุดิบ จากสถิติของสถาบันวิจัยยางพาราพบว่าใน พ.ศ. 2558 ที่ผ่านมาร้อยละ 86.33 หรือคิดเป็นปริมาณ 3.879 ล้านตัน หรือคิดเป็นมูลค่า 170,421.29 ล้านบาท ส่วนที่นำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์มีเพียงร้อยละ 13.6 หรือคิดเป็นปริมาณ 610,000 ตัน หรือคิดเป็นมูลค่ารวมประมาณ 476,347 ล้านบาท ปัญหาที่พบทำให้มีการกำหนดยุทธศาสตร์ประเทศไทย ในการสร้างขีดความสามารถในการแข่งขันเพื่อหลุดพ้นจากการเป็นประเทศรายได้ปานกลาง โดยกลยุทธ์สำคัญคือ การสร้างมูลค่าสินค้าเกษตรโดยเฉพาะพืชเศรษฐกิจหลักอย่างยางพารา เพราะเป็นแหล่งรายได้หลักและการจ้างงานขนาดใหญ่ของประเทศด้วยนโยบายการใช้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี การวิจัย และนวัตกรรมในการสร้างมูลค่าเพิ่ม เพื่อเพิ่มโอกาสในการแข่งขันในช่วงที่เศรษฐกิจโลกมีความผันผวน มีการแข่งขันและกีดกันทางการค้ามากขึ้น[4] สมบัติของน้ำยางมีความแปรปรวนเนื่องจากปริมาณเนื้อยางแห้ง โปรตีน กรดไขมัน คาร์โบไฮเดรต ปริมาณสารที่เป็นของแข็งทั้งหมดกับปริมาณเนื้อยางแห้งในน้ำยางสดประมาณร้อยละ 3 (โดยน้ำหนัก) แต่ถ้าปั่น (Centrifugation) น้ำยางสดเป็นน้ำยางข้นแล้ว ความแตกต่างนี้จะลดลงเหลือประมาณร้อยละ 1.5 (โดยน้ำหนัก) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการปั่น รวมทั้งประสิทธิภาพและการปรับสภาพของเครื่องปั่น ยางแห้งที่ได้จากน้ำยางที่ผ่านการปั่นแล้วผ่านกระบวนการทำให้แห้งจะมีคุณสมบัติที่สม่ำเสมอกว่า[11] และนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในหลากหลายอุตสาหกรรม เช่น อากาศยาน ยานยนต์ อุปกรณ์กีฬา รองเท้า หรือหลายวัตถุประสงค์ เช่น วัสดุฉนวนความร้อน วัสดุกันเสียง วัสดุลดแรงสั่นสะเทือน และวัสดุดูดซับแรงกระแทก เป็นต้น [10]

โฟมเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบา นิยมใช้เป็นวัสดุรองรับ โฟมยางที่ผลิตจากยางธรรมชาติแห้งสำหรับงานวิศวกรรมยังมีน้อย สูตรคอมปาวด์ยางส่งผลต่อสมบัติการใช้งาน และกระบวนการผลิต สารกระตุ้นจะทำให้เกิดการปฏิกิริยาการคงรูปเกิดขึ้นเร็ว สารเกิดฟองที่สลายตัวเป็นฟองก๊าซเมื่อได้รับความร้อนสลายตัวเกิดเป็นฟองโฟม ระยะเวลาการเริ่มคงรูป และคงรูปของปฏิกิริยาการคงรูปส่งผลต่อขนาดฟองโฟม และการกระจายตัว และสมบัติเชิงกลของยางโฟม

## 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

- 1.2.1 เพื่อพัฒนาสูตรยางโฟมคอมปาวด์สำหรับนำมาผลิตโรลลิงแบรีเออร์จราจร
- 1.2.2 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำยางธรรมชาติแห้งมาผลิตเป็นโรลลิงแบรีเออร์จราจรทดแทนการนำเข้าจากต่างประเทศเพื่อช่วยลดอุบัติเหตุ

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาหลักการนำโรลลิงแบรีเออร์ที่ผลิตจากวัสดุโฟมมาใช้เพื่อลดความรุนแรงจากการเกิดอุบัติเหตุของยานพาหนะที่สัญจรในท้องถนน
- 1.3.2 ศึกษาความสัมพันธ์สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ (ZnO) อัตราส่วนผสม 1 2 3 และ 4 ส่วนในร้อยละ (phr.) กับสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต (NaHCO<sub>3</sub>) อัตราส่วนผสม 0 5 10 และ

15 ส่วนในร้อยส่วน (phr.) ในยางธรรมชาติแท่งเกรด STR 5L โดยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้งที่ควบคุมอุณหภูมิผิว  $35 \pm 5$  องศาเซลเซียส

1.3.3 ทดสอบสมบัติการคงรูปของยางโฟมคอมปาวด์ ระยะเวลาเริ่มคงรูป และระยะเวลาคงรูป ด้วยเครื่อง Moving die rheometer / MDR ตามมาตรฐาน ASTM 5289 - 95

1.3.4 ขึ้นรูปยางโฟมคอมปาวด์ด้วยระบบการให้ความร้อนแบบพา (Free convection heat transfer) อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ในแม่พิมพ์โลหะวงแหวนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $44.5 \times 20$  มิลลิเมตร โดยไม่ควบคุมการขยายตัว ระยะเวลารวม 20 นาที

1.3.5 ขึ้นรูปยางโฟมคอมปาวด์ด้วยระบบการให้ความร้อนแบบนำ (Conduction heat transfer) อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ในแม่พิมพ์โลหะทรงโดนัทขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านในและนอก 13 และ 64 มิลลิเมตร ความสูง 13 มิลลิเมตร ตามลำดับ อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส แรงบีบแม่พิมพ์ 5 เมกะปาสคาล อัตราการขยายตัว ร้อยละ 50 และ 25 ตามลำดับ ระยะเวลา 8.3 นาที

1.3.6 ทดสอบขึ้นเปรียบเทียบตัวอย่างโรลลิงบาร์เออร์ ชิ้นงานที่ขึ้นรูป สันฐานวิทยาลัยฯ ฟองโฟมด้วยการถ่ายภาพมาโคร ขนาดและการกระจายตัวของฟองโฟมด้วยโปรแกรมอิมเมจเจ (ImageJ) สมบัติเชิงกลความต้านทานต่อแรงกดอัด (Compression deflection) ตามมาตรฐาน ASTM D1056 - 00 sec 17 การทดสอบหนาแน่นรวม (Bulk density) ตามมาตรฐาน ASTM D1056 - 00 sec 61 และความแข็ง (Hardness) ตามมาตรฐาน ASTM D2240 - 15

## 1.4 สมมติฐานการวิจัย

ฟองโฟมที่เกิดจากการสลายตัวของสารเกิดฟอง อุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวของสารเกิดฟองมีความสำคัญเกี่ยวข้องกับระดับความหนืดที่เกิดขึ้นในยางธรรมชาติในขณะคงรูป การคงรูปของยางในช่วงแรกมีความหนืดต่ำ ฟองโฟมที่เกิดจะมีขนาดใหญ่ ความสม่ำเสมอ น้อย เมื่อความหนืดเริ่มขึ้นฟองโฟมที่เกิดจะมีขนาดเล็ก และมีความสม่ำเสมอมากขึ้น ปริมาณสารกระตุ้นที่ใช้จะมีผลต่อระยะเวลาในการคงรูปของยางธรรมชาติ

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1.4.1 ทราบถึงความเป็นไปได้ในการนำยางธรรมชาติแท่งมาผลิตเป็น โรลลิงบาร์เออร์จราจรทดแทนการนำเข้าจากต่างประเทศ

1.4.2 ทราบถึงอิทธิพลสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ และสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตที่มีต่อลักษณะการเกิดฟองโฟมในยางธรรมชาติแท่ง

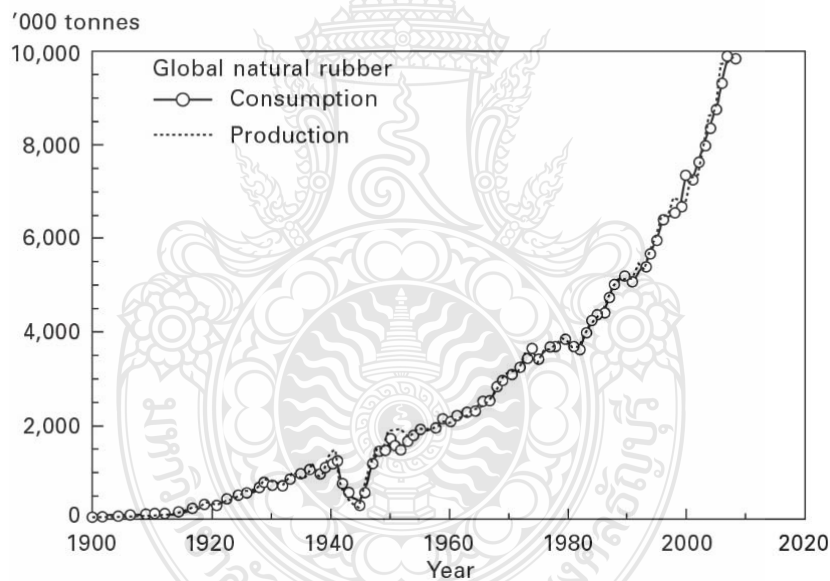
1.4.3 ทราบถึงอิทธิพลของการให้ความร้อน อัตราการขยายตัวขณะขึ้นรูปต่อลักษณะการเกิดฟองโฟมในยางธรรมชาติแท่ง



## บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ยางธรรมชาติ [11 - 14]

ยาง (Rubber) เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ได้มาจากต้นพืชธรรมชาติในสกุล *Hevea Brasiliensis* ซึ่งเรียกว่า “ยางธรรมชาติ” (Natural Rubber ; NR) จัดเป็นวัสดุธรรมชาติที่มีความสำคัญในลำดับที่ 4 ในโลกปัจจุบันรองจาก อากาศ น้ำ และปิโตรเลียม ผลิตมากกว่า 40,000 ชนิดผลิตมาจากวัสดุยางธรรมชาติโดยมากกว่า 400 ชนิดเป็นผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ ยางธรรมชาติปริมาณมากถูกแปรรูปใช้ในภารกิจทางทหาร ทางอุตสาหกรรม การขนส่ง การแพทย์ และอุปโภค กว่า 100 ปีจากอดีตตั้งแต่ก่อนการเกิดสงครามโลกครั้งที่ 1 ที่มีการนำยางธรรมชาติมาใช้ปริมาณความต้องการในการใช้ยางธรรมชาติเป็นวัตถุดิบได้เพิ่มขึ้นอย่างมากจนเกิดการขาดแคลนอย่างมากในช่วงสงครามโลกครั้งที่ 2

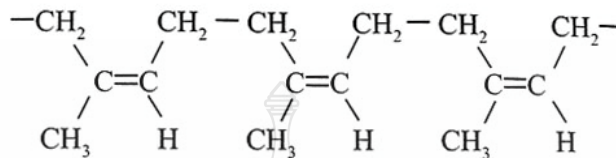


รูปที่ 2.1 ปริมาณการผลิตและการใช้งานยางธรรมชาติระหว่างปีคริสต์ศักราช 1900 – 2008 [12]

ยางธรรมชาติแต่ละหน่วยโมเลกุล ประกอบด้วยคาร์บอน 5 อะตอม และไฮโดรเจน 8 อะตอม เขียนเป็นสูตรเคมีคือ  $C_5H_8$  เรียกว่า ไอโซพรีน (Isoprene) การเรียงต่อซ้ำๆ กันของหน่วยไอโซพรีน เป็นสายโซ่เส้นตรงแบบซิส มีชื่อเรียกว่า ซิส -1, 4 - 1 พอลิไอโซพรีน (cis - 1, 4 - polyisoprene) ประมาณ 3,000 ถึง 5,000 หน่วย มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยประมาณ 200,000 – 40,000 มีการกระจายของน้ำหนักโมเลกุลกว้างมาก ซึ่งทำให้มีลักษณะการแปรรูปที่ดี (Excellent Process Behavior)



จากโครงสร้างจะพบว่าหน่วยไอโซพรีนพันธะคู่ (Double Bond) และหมู่แอลฟาเมทิลีน (α - methylene group) ซึ่งทำให้ยางธรรมชาติมีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจน หรือ โอโซน ซึ่งเป็นสาเหตุให้ยางเสื่อมสภาพ (Degradation) นอกจากนี้ยังสามารถทำปฏิกิริยาอื่นๆ เช่น ไฮโดรเจเนน (Hydrochlorinated Rubber) คลอรีน (Chlorinated Rubber) และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความว่องไวใน



รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ (cis - 1, polyisoprene)  
(ที่มา: <http://www.vcharkarn.com/lesson/1465>)

การทำปฏิกิริยาก็จะเพิ่มขึ้นด้วยการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติจะมีลักษณะแบบอสัณฐาน (Amorphous structure) แต่ในบางสภาวะ เช่น ที่อุณหภูมิต่ำหรือเมื่อยางถูกดึงยืด (Stretching) การจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลก็จะจัดเรียงตัวค่อนข้างเป็นระเบียบคล้ายผลึก (Crystallization Structure) ได้ การเกิดการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลคล้ายผลึกสามารถเกิดได้ที่อุณหภูมิต่ำ (Low Temperature Crystallization Structure) กว่า 20 องศาเซลเซียส โดยเฉพาะที่อุณหภูมิต่ำ -26 องศาเซลเซียสจะมีการเกิดได้เร็วที่สุด การเกิดลักษณะนี้จะทำให้สมบัติของยางมีความแข็งแรงขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นลักษณะโครงสร้างคล้ายผลึกก็จะลดลงทำให้สมบัติความแข็งแรงของยางลดลงสู่สภาพเดิม

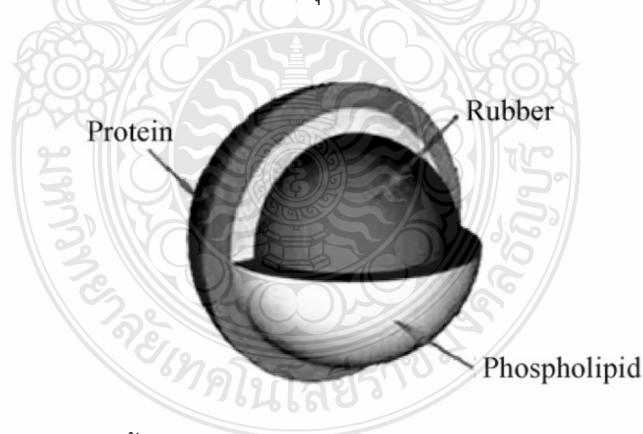
กว่าร้อยละ 90 ยางธรรมชาติถูกผลิตจากกลุ่มประเทศในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ อีกร้อยละ 10 ผลิตจากกลุ่มประเทศแอฟริกา และ อีกไม่ถึงร้อยละ 1 ในกลุ่มประเทศอเมริกาใต้ “ยางพารา” เป็นชื่อที่เรียกกันว่ายางธรรมชาติโดยทั่วไปสำหรับประเทศไทย รวมถึงใช้เรียกต้นไม้ที่ปลูก (Natural rubber latex) เพื่อให้ให้น้ำยาง (Latex) น้ำยางสดที่กรีตได้จะมีลักษณะสีขาวข้นคล้ายน้ำนม ประกอบด้วยส่วนประกอบอย่างน้อย 2 ส่วน คือ ส่วนของสารแขวนลอยหรือเนื้อยางแห้ง (Dry Rubber) กระจาย (Disperse Phase) อยู่ในส่วนที่เป็นตัวกลาง (Disperse Medium) ซึ่งโดยทั่วไปคือน้ำ (Aqueous Serum Phase) สัดส่วนของปริมาณเนื้อยางแห้ง (Dry Rubber Content) โดยทั่วไปจะอยู่ประมาณระหว่างร้อยละ 20 - 45 ความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 0.975 - 0.980 กรัมต่อมิลลิกรัมที่อุณหภูมิต่ำกว่า 20 องศาเซลเซียส อุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass Transition Temperature, TG)

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างส่วนประกอบของน้ำยางสดและยางแห้ง [12]

ส่วนประกอบ	น้ำยาง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ยางแห้ง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
ยางไฮโดรคาร์บอน	36	93.7
โปรตีน	14	2.2
คาร์โบไฮเดรต	1.6	0.4
นิวทรอลไลปิด	1.0	2.4
ไกลโคไลปิด + ฟอสโฟไลปิด	0.6	1.0
อนินทรีย์สาร	0.5	0.2
อื่นๆ	0.4	0.1
น้ำ	58.5	-

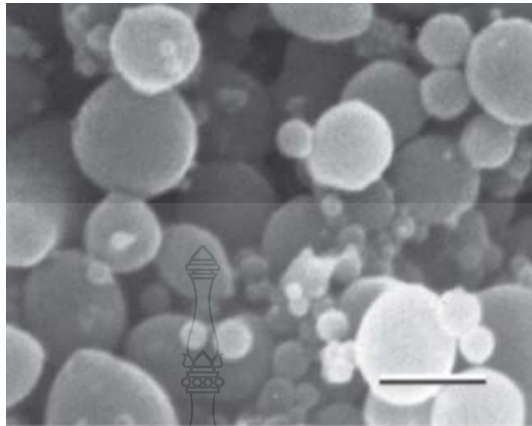
ประมาณ -72 องศาเซลเซียส มีความเป็นกรด - ด่าง (PH) ประมาณ 6.5 - 7.0 ความหนืด (Viscosity) และส่วนประกอบอื่นที่ไม่ใช่ยาง (non rubber constituents) ไม่คงที่ขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ อายุ ระบบ วิธีการกรีต และ ฤดูกาล

สารโปรตีนที่อยู่ในน้ำยางทำหน้าที่ห่อหุ้มอนุภาคของยาง (Hydrated Protein Envelope) ด้านนอก และ ฟอสโฟไลปิด (Phospholipids) ซึ่งส่วนใหญ่เป็นเลกซิทีน (Lecithin) อยู่ที่ด้านใน ทำหน้าที่รักษาสถานะความคงตัวของเหลว หรือความเสถียรของน้ำยาง (Stability) เพราะโปรตีนและฟอสโฟไลปิดที่ห่อหุ้มมีอนุภาคของคาร์บอกซิเลต (Carboxylate,  $\text{RCOO}^-$ ) ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดการผลัดกันระหว่างอนุภาคยางป้องกันการจับรวมตัวระหว่างอนุภาคของยางกลายเป็นก้อน (Coagulation)



รูปที่ 2.3 โครงสร้างอนุภาคของน้ำยาง [11]

ขนาดอนุภาคของน้ำยางจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 100 – 1000 นาโนเมตร หรือ 0.1 – 1 ไมโครเมตร



รูปที่ 2.4 ลักษณะอนุภาคของเนือยางแห้งที่ได้จากต้น Hevea Basiliensis (ความยาวเส้นอ้างอิง 1 ไมโครเมตร) [12]

การเสถียรภาพ (Destability) เกิดจากการทำลายชั้นโปรตีนและอนุภาคของคาร์บอกซี-แลต จากแบคทีเรียและยีสต์ที่อยู่ในอากาศที่ปะปนลงในน้ำยางสดซึ่งมีน้ำตาลเป็นส่วนประกอบเปลี่ยนเป็นกรดทำลายชั้นโปรตีนห่อหุ้มอนุภาคยาง ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น เกิดกลิ่นเหม็นบูดเน่า และรวมตัวกันเป็น เม็ดเล็กๆ (Coagulum) ลักษณะการเกิดนี้จะช้าหรือเร็วขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม อุณหภูมิ สายพันธุ์ยาง ความเสถียรหรือการคงสถานะสารแขวนลอยเป็นปัจจัยที่สำคัญของน้ำยาง โดยเฉพาะเมื่อต้องเก็บรักษาเป็นเวลานานหลายเดือน หรืออาจเป็นปี อาจจะต้องมีการปรับสภาพให้เหมาะสมกับการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ เช่น การเติมสารละลายแอมโมเนีย ร้อยละ 0.01 – 0.05 และ 0.15 โดยน้ำหนักน้ำยาง สำหรับการเก็บรักษาสภาพในระยะเวลาสั้น 3 – 10 ชั่วโมง และ 1 – 2 วันตามลำดับ การนำน้ำยางสดไปผ่านกระบวนการปั่นเหวี่ยง (Centrifugation) จะสามารถเพิ่มปริมาณเนือยางแห้งได้อีกเกือบเท่าตัว น้ำยางที่ได้นี้จะเรียกว่า “น้ำยางข้น” (Concentrated Latex) ปริมาณของเนือยางแห้งที่จะมีได้สำหรับน้ำยางที่จะใช้ในอุตสาหกรรมจะอยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 40 – 70

#### 2.1.1 สมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติ

2.1.1.1 ความยืดหยุ่น (Elasticity) สมบัติความยืดหยุ่นเป็นลักษณะเด่นของยางธรรมชาติ โดยเฉพาะ ยางธรรมชาติที่ทำให้คงรูปแล้วสมบัติด้านความยืดหยุ่นจะเพิ่มสูงมากขึ้น และสามารถกลับคืนรูปร่างและขนาดเดิมหรือใกล้เคียงได้อย่างรวดเร็วเมื่อสิ้นสุดแรงภายนอกที่กระทำ

2.1.1.2 ความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile Strength)/ความทนทานต่อการฉีกขาด (Tear Strength) โครงสร้างของยางธรรมชาติจะเปลี่ยนแปลงเป็นลักษณะผลึกได้เมื่อถูกดึงยึด ซึ่งทำให้สมบัติความทนทาน ต่อการฉีกขาดเพิ่มสูงขึ้นทั้งที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิสูง การผสมส่วนเสริมแรงลงไปจะสามารถเพิ่มค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดได้

2.1.1.3 สมบัติพลวัต (Dynamic Properties) ยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงพลวัตที่ตีเทียมการสะสมความร้อนที่เกิดจากการใช้งาน (Heat Buildup) มีน้อยมาก และยังมีความต้านทานต่อการล้าตัว (Fatigue Resistance) ที่สูงมาก

2.1.1.4 ความต้านทานต่อการขัดถู (Abrasion Resistance) ยางธรรมชาติมีความต้านทานต่อการขัดถูสูง เมื่อเปรียบเทียบกับยางสังเคราะห์อื่นๆ พบว่ายางธรรมชาติมีค่าความต้านทานต่อการขัดถูอยู่ในกลุ่มที่สูงมาก

#### 2.1.2 ยางแท่ง (Technically Specified Rubber, TSR หรือ block Rubber)

ในยุคก่อนสงครามโลกครั้งที่ 2 ผลิตภัณฑ์ยางที่ใช้กันอยู่ในเวลานั้นแปรรูปมาจากยางธรรมชาติเพียงอย่างเดียว เมื่อสิ้นสุดสงครามมีการผลิตยางสังเคราะห์เข้ามาใช้ควบคู่กับยางธรรมชาติ ซึ่งสมบัติของยางสังเคราะห์มีความสม่ำเสมอมากกว่ายางธรรมชาติ ปริมาณการใช้ยางสังเคราะห์เพิ่มขึ้นอย่างมากจนทำให้ผู้ผลิตยางธรรมชาติ จำต้องมีการปรับปรุงรูปแบบการผลิตที่สามารถระบุคุณภาพเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดขึ้นมา หรือให้มีคุณภาพที่สม่ำเสมอเพื่อให้สามารถแข่งขันกับยางสังเคราะห์ได้

2.1.3 ยางแท่ง เป็นยางที่ผลิตตามคุณภาพที่ระบุ โดยการปรับปรุงสายการผลิตยางธรรมชาติเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตรวมถึงบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในการขนส่ง การกำหนดมาตรฐานและวิธีการทดสอบสมบัติของยางให้เป็นสากล (Technical Grading)

2.1.4 การผลิตยางแท่งจากน้ำยางสด โดยการรวมน้ำยางสดในถังรวมน้ำยาง ทำการกรองน้ำยางให้สะอาดจากนั้นเจือจางน้ำยางด้วยน้ำสะอาดเพื่อให้มีปริมาณเนื้อยางแท่งร้อยละ 12 - 15 แล้วทำให้น้ำยางจับตัวโดยเติมกรดฟอร์มิก หรือกรดอะซิติก แล้วกวนเบาๆ ให้น้ำยางจับตัว ถ้าก้อนยางที่จับตัวกันแบบหลวมสามารถใช้เครื่องตัดย่อยให้น้ำยางเป็นชิ้นเล็กๆ แต่ถ้าก้อนยางจับตัวกันแน่นต้องนำเข้าเครื่องเครปรีดให้เป็นแผ่นก่อนนำเข้าเครื่องตัดย่อย ขณะที่ตัดย่อยยางให้พ่นน้ำเพื่อชะล้างสิ่งสกปรก ยางที่ผ่านกระบวนการตัดย่อยจะถูกอบด้วยลมร้อนอุณหภูมิประมาณ 100 – 110 องศาเซลเซียสประมาณ 4 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลาอบจะใช้ลมเย็นเป่ายางเพื่อลดอุณหภูมิก่อนนำไปอัดเป็นแท่งๆ ขนาด 670 x 330 x 170 มิลลิเมตร น้ำหนัก 33 1/3 กิโลกรัม ยางที่อัดเป็นแท่งจะถูกห่อด้วยฟิล์มพลาสติกพอลิเอทิลีน (Polyethylene film) ก่อนจัดจำหน่าย

2.1.5 การผลิตยางแท่งจากยางแท่ง โดยการนำยางแผ่นดิบไม่รมควัน ยางก้นถ้วย หรือเศษยางต่างๆ ไปแช่ในบ่อน้ำไหลเพื่อให้สิ่งสกปรกหลุดหรือตกตะกอน จากนั้นนำเข้าเครื่องบดและพ่นน้ำเพื่อทำความสะอาดอีกครั้ง (จำนวนครั้งที่ผ่านเครื่องบดขึ้นอยู่กับความสกปรกของยาง) ขั้นตอนต่อไปนำยางที่ผ่านการบดและทำความสะอาดไปผ่านเครื่องเครปรีดซึ่งในขั้นตอนนี้อาจจะผสมยางแผ่นสะอาดเข้ากับยางแท่งที่ผ่านกระบวนการทำความสะอาดมา จากนั้นนำเข้าเครื่องตัดย่อยละเอียดก่อนนำไปอบลมร้อนอุณหภูมิ 100 - 110 องศาเซลเซียสประมาณ 4 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลาอบจะใช้ลมเย็นเป่ายางเพื่อลดอุณหภูมิก่อนนำไปอัดเป็นแท่งๆ ขนาด 670 x 330 x 170 มิลลิเมตร น้ำหนัก 33 1/3 กิโลกรัม ยางที่อัดเป็นแท่งจะถูกห่อด้วยฟิล์มพลาสติกพอลิเอทิลีน (Polyethylene film) ก่อนจัดจำหน่าย

พ.ศ. 2508 สหพันธรัฐมาเลเซียได้กำหนดมาตรฐานที่เรียกว่า SMR หรือ Standard Malaysian Rubber ขึ้นเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตยางเป็นรายแรก และองค์การระหว่างประเทศว่าด้วยการมาตรฐาน (ISO) ได้นำข้อกำหนดเหล่านี้ไปเป็นแนวทางการกำหนดเป็นมาตรฐานสากล (ISO2000, Natural Rubber (NR), Guide to Specification) จนเป็นที่ยอมรับจากผู้ใช้ทั่วโลก ในปี พ.ศ. 2511 ประเทศไทยได้เริ่มปรับตัวในการผลิตยางแท่งโดยสถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์โดยกำหนดมาตรฐานของประเทศขึ้นโดยอ้างอิงตามมาตรฐานไอเอสโอ ยางแท่งที่ผลิตในช่วงนั้นใช้ชื่อว่า Thai Tested Rubber หรือ TTR กำหนดชั้นยางแบ่งออกเป็น 5 ชั้น ได้แก่ TTR 5L, TTR 5, TTR 10, TTR 20 และ TTR 50 นอกจากนี้ยังมีการกำหนดวิธีการปฏิบัติที่เป็นมาตรฐานสำหรับผู้ผลิตมาตรฐานหีบห่อ การเก็บตัวอย่างเพื่อทดสอบ และการออกใบรับรองคุณภาพ ต่อมาในปี พ.ศ. 2537 สถาบันวิจัยยางได้มีการทบทวนปรับปรุงเปลี่ยนแปลงมาตรฐานบางรายการและเปลี่ยนชื่อใหม่ให้เป็นสากลว่า Standard Thai Rubber หรือ STR

## ตารางที่ 2.2 มาตรฐานยางแท่งที่กำหนดโดยประเทศต่างๆ [12]

SMR	Standard Malaysian Rubber
SIR	Standard Indonesian Rubber
SLR	Standard Sri – Lanka Rubber
CSR	Standard China Rubber

ถึงแม้การเรียกชื่อมาตรฐานของยางแท่งในแต่ละประเทศจะมีความแตกต่างกัน แต่คุณภาพยางแท่งชั้น (Grade) เดียวกันจะมีสมบัติเหมือนกัน เพราะทุกประเทศอ้างอิงจากมาตรฐานไอเอสโอในการจำแนกชั้นและวิธีการเดียวกัน

## 2.2 การจำแนกชั้นของยางแท่ง

วิธีดั้งเดิมที่ใช้ในการจำแนกชั้นของยางคือการใช้สายตาตรวจ (Visual Grading) ซึ่งต้องอาศัยทักษะความชำนาญ และประสบการณ์ของผู้ตรวจ บางครั้งผู้ตรวจอาจจะมีประสบการณ์ในการตรวจไม่มากนักจนเกิดความลังเลอาจเป็นสาเหตุของความผิดพลาด การปรับปรุงวิธีการจำแนกชั้นของยางจึงถูกกำหนดการตรวจสอบสมบัติที่จำเป็นของยางแท่งตามวิธีมาตรฐานสากล (Technical Grading) ตามวิธีการที่กำหนดไว้ตามองค์การมาตรฐานระหว่างประเทศไอเอสโอ ดังต่อไปนี้

- ปริมาณสิ่งสกปรก (Dirt Content) ส่วนใหญ่จะเป็นดิน ทรา ย กรวด ใบไม้ เปลือกไม้ ซึ่งสิ่งเหล่านี้จะรบกวนต่อกระบวนการแปรรูปยาง และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ การตรวจสอบกระทำโดยใช้แผ่นตะแกรงกรองขนาดรูตะแกรง 325 เมช หรือ 44 ไมครอน

- ปริมาณเถ้า (Ash Content) ในยางธรรมชาติประกอบด้วยเกลืออนินทรีย์ คาร์บอนเนตออกไซด์ และฟอสเฟตของโพแทสเซียม แมกนีเซียม แคลเซียม โซเดียม และแร่ธาตุอื่นๆ ปริมาณเถ้าจะช่วยบ่งชี้ถึงการเติมสารตัวเติมเพื่อช่วยน้ำหนักของยาง ปริมาณสารเหล่านี้จะกระทบต่อสมบัติของยางในเรื่องของความแข็งแรงการตรวจสอบกระทำได้โดยการนำยางแท่งไปเผาที่อุณหภูมิสูง 500 – 600 องศาเซลเซียส
- ปริมาณไนโตรเจน (Nitrogen Content) จะเป็นตัวชี้วัดปริมาณโปรตีนที่อยู่ในยางแท่ง นอกจากนี้ ปริมาณไนโตรเจนที่สูงจะส่งผลต่อการคงรูปของยาง
- ปริมาณสิ่งระเหย (Volatile Matter Content) โดยส่วนใหญ่คือความชื้นที่อยู่ในเนื้อยางแท่ง ปริมาณความชื้นที่สูงจะส่งผลต่อน้ำหนักยางแท่งที่มีน้ำหนักเจือปนและอาจเป็นสาเหตุให้ยางแท่งเกิดเชื้อรา และกลิ่นเหม็น นอกจากนี้จะกระทบต่อการบดผสมยาง ระยะเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการบดยางเพื่อไล่ความชื้นหรือน้ำออก หากกำจัดไม่หมดก็จะเป็นอุปสรรคในคลุกเคล้าสารต่างๆ ให้เป็นเนื้อเดียวกับยาง
- ความอ่อนตัวเริ่มแรก (Po) เป็นค่าที่บ่งชี้ความนิ่ม – แข็งของยาง ยางที่นิ่มจะบดได้ง่ายกว่ายางที่แข็ง ซึ่งรวมไปถึงพลังงานและเวลาที่ใช้ ยางที่มีค่าความอ่อนตัวเริ่มแรกสูงจะมีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า ซึ่งหมายความว่ายางจะมีสมบัติทางกายภาพในด้านการทนทานต่อปัจจัยต่างๆ ได้ดีกว่า
- ดัชนีความอ่อนตัว (Plasticity Retention Index, PRI) ยางที่มีค่าดัชนีความอ่อนตัวสูงจะแสดงถึงความต้านทานของยางแท่งต่อการแตกหักของโมเลกุลที่อุณหภูมิสูง หรือความต้านทานต่อการออกซิเดชันที่สูง หรือมีความเสถียรต่อการเสื่อมสภาพได้ดี
- สี (Color) เป็นสมบัติสำคัญของยางแท่งวัดเทียบกับตัวอย่างสีมาตรฐาน ให้ประโยชน์เมื่อต้องการนำยางไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความสะอาด หรือมีการตกแต่งสีสีนต่างๆ ใช้ทดสอบกับยางแท่งที่ผลิตจากน้ำยางเท่านั้น ค่าสเกลที่สูงคือสีที่คล้ำกว่าที่ต่ำ
- ความหนืด (Mooney Viscosity) เป็นสมบัติที่ระบุคุณภาพด้านการำยางไปใช้ ยางที่มีความหนืดสูงจะมีน้ำหนักโมเลกุลสูง ซึ่งยางมีความแข็งมากเมื่อนำไปใช้ ระยะเวลาในการบดยางให้นิ่มก่อนผสมสารเคมีก็จะนานกว่า คล้ายกับค่าความอ่อนตัวเริ่มแรก

### 2.3 ยางคอมพาวด์ (Rubber Compound) [11 13 14]

ยางธรรมชาติจัดเป็นวัตถุดิบหลักประเภท “พอลิเมอร์” ที่มีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยาง กระบวนการผลิตมีขั้นตอนหลัก คือ การออกสูตรยาง (Rubber Compound Design) การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ (Rubber Production Forming) การทำให้ยางคงรูป (Vulcanization) และการตกแต่งชิ้นงาน (Finishing)

การออกสูตรยางเป็นขั้นตอนสำคัญในอันดับแรกสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง เพื่อให้มีสมบัติถูกต้องตามต้องการ ยางจะต้องมีการผสมสารเคมีต่างๆ เช่น สารวัลคาไนซ์ สารตัวเร่งปฏิกิริยา สารตัวเติม เพื่อให้พร้อมที่จะนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ โดยมีจุดประสงค์หลัก ได้แก่

ตารางที่ 2.3 สมบัติของยางแท่งตามมาตรฐานไทย (Standard Thai Rubber, STR) [14]

Parameter	STR XL	STR 5L	STR 5	STR 5 CV	STR 10	STR 10 CV	STR 20	STR 20 CV
	Latex		Latex/Sheets		Lump/Sheets			
Dirt retained on 44 μ aperture (max, % wt.)	0.02	0.04	0.04	0.04	0.08	0.08	0.16	0.16
Ash (max, % wt.)	0.40	0.40	0.60	0.60	0.60	0.60	0.80	0.80
Nitrogen (max, % wt.)	0.50	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60
Volatile Matter (max, % wt.)	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
Initial Plasticity (Po) (min.)	35	35	30	-	30	-	30	-
Plasticity Retention Index (PRI) (min)	60	60	60	60	50	50	40	40
Colour Lovibond Scale (individual value, max)	4.0	6.0	-	-	-	-	-	-
Mooney Viscosity ML (1+4) 100°C	-	-	-	**	-	**	-	**
Colour Coding Marker	blue	Light green	Light green	White on light green background	brown	White on brown background	red	White on red background

Note Provision of Rheograph with basic cure data as consumer or ACS 1 based recipe will be offered as additional test.

\* Producer limit is not more than 0.50%

\*\* Producer limit of 70 (+7, -5), 60 (+7, -5) and 50 (+7, -5) for STR 5 CV; 60 (+7, -5) for STR 10 CV and 65 (+7, -5) for STR 20 CV

ตารางที่ 2.4 ผลิตรับกันจากยางแท่งชนิดต่างๆ [14]

ชนิดยางดิบ	ผลิตรับกันยาง	หมายเหตุ
ยางแท่ง STR XL, STR 5L, ADS, RSS1	ผลิตรับกันทางการแพทย์ นาฬิกาข้อมือ และการสัมผัสอาหาร ผลิตรับกันที่ต่อการสีสรร เส้นด้ายยืดแบบเหลี่ยม กว้าง ยาง เทปติดพื้นรองเท้าและส่วนประกอบ เป็นต้น	ยางชนิดนี้สะอาด และมีสีจาง โดยเฉพาะยาง STR XL และ ยาง STR 5L กับ RSS ค่อนข้างแข็งมาก มีความเหนียวสูง
ยาง STR 20, RSS 2, 3, 4, 5	ผลิตรับกันยางรถยนต์ ยางล้อรถจักรยานยนต์รวมทั้งผลิตรับกันยางอะไหล่ ยางใช้ในงานวิศวกรรม และใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไป	ยางมีสีคล้ำ โดยส่วนใหญ่ผสมกับสารตัวเติมเขม่าดำ เพื่อเสริมความแข็งแรง
ยางสีกิม	ผสมยางสีกิมกับยางชนิดอื่นๆ สำหรับผลิตรับกันยางที่ไม่ระบุชื่อจำกัด เช่น ยางปูพื้น ยางล้อรถเข็น ยางกันกระแทก เป็นต้น	เนื่องจากยางสีกิมมีสีอ่อน และมีสารที่ไม่ใช่ยางมากกว่ายางปกติ จึงได้ผลิตรับกันยางสีจางหรือต้องการแต่งเติมสี
น้ำยางข้น	ผลิตรับกันจุ่มแบบ เช่น ถุงมือ ลูกโป่ง ถุงยางอนามัย หุ่นยางสำหรับทารก เป็นต้น ผลิตรับกันฟองน้ำ เช่น ที่นอน หมอน เป็นต้น ผลิตรับกันเส้นด้ายยืดแบบกลม เช่น ท่อยาง กาวน้ำยาง เป็นต้น	การออกสูตรผลิตรับกันน้ำยาง ไม่ต้องเติมสารเสริมความแข็งแรง ก็ได้ผลิตรับกันที่มีความเหนียวและแข็งแรงมาก

หมายเหตุ STR: Standard Thai Rubber

RSS: Ribbed Smoked Sheet

ADS: Air Dried Sheet

- เพื่อให้สามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ (Process ability)
- เพื่อให้ผลิตภัณฑ์นั้นมีสมบัติตามที่ต้องการ (Properties)
- เพื่อควบคุมต้นทุน /ราคาตามที่ต้องการ (Price)

ส่วนประกอบทั่วไปในสูตรเคมียาง ประกอบด้วย

- ยาง ไม่ว่าจะเป็นยางธรรมชาติ หรือยางสังเคราะห์ หรือยางผสม หรือยางเทอร์พลาสติก

2.3.1 สารวัลคาไนซ์ (Vulcanizing Agent) หรือสารทำให้ยางคงรูป คือสารที่ทำให้โครงสร้างโมเลกุลของยางเกิดการเชื่อมโยงกันเป็นโครงสร้างตาข่าย โดยปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เซชัน ซึ่งเมื่อผ่านกระบวนการนี้แล้วยางจะมีความยืดหยุ่นสูงและเสถียรไม่เปลี่ยนแปลงจากอุณหภูมิมากขึ้น การวัลคาไนซ์ยางแบ่งออกได้เป็น 3 ระบบใหญ่ๆ ได้แก่ระบบ กำมะถัน ระบบเพอร์ออกไซด์ และระบบสารเคมีอื่นๆ กำมะถันเป็นสารวัลคาไนซ์ที่เหมาะสมกับยางทุกชนิดที่มีพันธะคู่อยู่ในสายโซ่โมเลกุล นิยมใช้กันมากที่สุดเพราะมีต้นทุนต่ำ ใช้เวลาสั้น และให้สมบัติเชิงกลของยางที่ดี การคงรูปด้วยกำมะถัน ผงสีเหลือง มีต้นทุนต่ำ ใช้กันมากที่สุดในโรงงานอุตสาหกรรม การคงรูปเกิดขึ้นได้เร็วเมื่อใช้ร่วมกับสารตัวเร่งปฏิกิริยา ยางคงรูปที่ได้มีสมบัติเชิงกลดี ปริมาณการใช้ 0.5-3.0 ส่วนในร้อยส่วน มีข้อจำกัดคือใช้ได้กับยางที่มีพันธะคู่ในโมเลกุลเท่านั้น ระบบของการคงรูปด้วยกำมะถัน แบ่งออกได้เป็น 3 ระบบตามปริมาณของกำมะถันและสารตัวเร่งปฏิกิริยา

- แบบดั้งเดิม (conventional vulcanization, CV) อัตราส่วนของกำมะถันต่อสารเร่งปฏิกิริยาสูง เช่น กำมะถัน 1.5 - 2.5 ส่วนในร้อยส่วน กับสารตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 - 1.0 ส่วนในร้อยส่วน การเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เกิดผ่านพันธะพอลิซัลฟิดิก ยางคงรูปที่ได้จะมีความยืดหยุ่นสูงและมีสมบัติทั้งเชิงกลและเชิงพลวัตที่ดี แต่ยางจะมีความทนทานต่อความร้อนต่ำ

- แบบประสิทธิภาพ (efficient vulcanization, EV) ใช้อัตราส่วนของกำมะถัน ต่อสารเร่งปฏิกิริยาต่ำ เช่น กำมะถัน 0 - 0.2 ส่วนในร้อยส่วน กับสารตัวเร่งปฏิกิริยาประมาณ 2.5 - 3.5 ส่วนในร้อยส่วน นิยมใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มที่แตกตัวให้กำมะถันได้ในระหว่างกระบวนการคงรูป (เรียกว่า sulfur donor accelerator) การเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เกิดผ่านพันธะมอนอไดซัลฟิดิกยางคงรูปที่ได้จะมีสมบัติทั้งเชิงกลและเชิงพลวัตไม่ด้อยกว่าระบบ CV แต่ยางจะมีความทนทานต่อความร้อนสูงและมีค่า การกลับคืนตัวถาวรหลังได้รับแรงอัด (Compression set) ที่ต่ำกว่า

- แบบกึ่งประสิทธิภาพ (semi-efficient vulcanization, semi-EV) ใช้อัตราส่วนของกำมะถันต่อสารเร่งปฏิกิริยาปานกลาง เช่น กำมะถัน 0.5 - 1.2 ส่วนในร้อยส่วน กับสารตัวเร่งปฏิกิริยา 1.5 - 2.5 ส่วนในร้อยส่วน การเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เกิดผ่านพันธะแบบผสม ยางคงรูปที่ได้มีสมบัติเชิงกล สมบัติเชิงพลวัต และสมบัติความทนทานต่อความร้อนอยู่ระหว่าง 2 ระบบข้างต้น

2.3.2 สารตัวเร่งปฏิกิริยา (Accelerator) คือสารเคมีที่ใช้เพื่อเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เซชัน นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มความหนาแน่นของการเชื่อมโยงโครงสร้างตาข่าย และสมบัติเชิงกล เบนโซไทอะโซลซัลฟีนามิด (Benzothiazole Sulfenamide) เป็นกลุ่มสารเร่งปฏิกิริยาที่ทำให้ยางมีระยะเวลาสกอรัชที่ยาวขึ้นแต่ให้อัตราเร็วในการวัลคาไนซ์เซชันที่สูงและให้ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูง สมบัติยางที่ได้จะมีความแข็งแรงสูง ยืดหยุ่นดี และมีความต้านทานต่อการล้าตัวสูง



2.3.3 สารกระตุ้นปฏิกิริยา (Activator) และสารหน่วงปฏิกิริยา (Retarder) คือสารเคมีที่ทำหน้าที่กระตุ้นให้สารเร่งปฏิกิริยาทำงานได้ดียิ่งขึ้น ที่นิยมใช้กันมากที่สุด ได้แก่ ซิงค์ออกไซด์ และกรดสเตียริก ปริมาณที่ใช้คือ 2 – 5 และ 1 – 2 ส่วนในร้อยส่วน ตามลำดับ ส่วนสารหน่วงปฏิกิริยา คือสารที่เติมลงไปเพื่อยืดระยะเวลาสกรอต ลดโอกาสของการเกิดยางตายในระหว่างเก็บรักษาหรือกระบวนการขึ้นรูปยางคอมพาวด์

#### ตารางที่ 2.5 สมบัติของสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ [30]

GENERAL		
<b>Chemical name(s):</b> carbamide (urea compound), zinc 2-ethylhexanoate, zinc benzenesulfinate, zinc carbonate, zinc ditolyl sulfinate, zinc oxide, zinc stearate		<b>RTECS number:</b> YR6250000
<b>Composition:</b> up to 98 wt%		
PHYSICAL CHEMICAL PROPERTIES		
<b>Melting, °C:</b> 218-265		<b>Decomposition, °C:</b> 133-142
<b>State:</b> solid or dispersion	<b>Color:</b> white to yellow	<b>Odor:</b> odorless to slight odor
<b>Density at 25°C, kg/m<sup>3</sup>:</b> 1050-1323		
HEALTH & SAFETY		
<b>Flash temp., °C:</b> 127		<b>Oral, rat LD50, mg/kg:</b> >5000
<b>UN risk:</b> R36/37/38	<b>UN safety:</b> S26,S36/37/39	
ECOLOGICAL IMPACT		
<b>Atmospheric life, years:</b> 14	<b>Partition, log K<sub>ow</sub>:</b> -2.97 to -2.26	
<b>Global warming potential:</b> 1320	<b>Ozone depletion potential:</b> 0	
<b>Algae, LC50, mg/l:</b> 10000/72H		
USE		
<b>Recommended for polymers:</b> EPDM, NBR, PE, PVC, PVC/NBR, rubber, SBR		
<b>Recommended for products:</b> automobiles, electric and electronic products, housing products, vibration-proof material, cushioning material, sealing material, heat insulating material, noise insulation material, closure sealing gaskets for food containers, paper and paperboard		
<b>Processing methods:</b> extrusion, blow molding		
<b>Concentrations used, phr:</b> 1-4.5		

2.3.4 สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Antidegradants) เป็นสารเคมีที่เติมลงไปเพื่อช่วยยืดอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน หรือปฏิกิริยาโอโซน ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการแตกร้าวที่ผิวของยาง การสูญเสียสมบัติทางกายภาพ

2.3.5 สารตัวเติม (Fillers) คือสารตัวเติมที่ใช้ผสมกับยาง แบ่งแยกตามความสามารถได้เป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ทำหน้าที่ช่วยเสริมแรง (Reinforcing) และกลุ่มที่ไม่ทำหน้าที่ช่วยเสริมแรง (Non-Reinforcing) การเลือกสารตัวเติมจำเป็นต้องพิจารณาถึงความเหมาะสม สภาพการนำไปใช้

2.3.6 สารทำให้อ่อนนุ่มและสารช่วยในกระบวนการผลิต (Plasticizers and Processing Aids) คือสารเคมีที่เติมลงไปในยางแล้วทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ดีขึ้น หรือมีความหนืดต่ำลงง่ายต่อ

กระบวนการผลิต นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มคุณสมบัติในการเหนียวติด การกระจายตัวของสารผสมในเนื้อ  
ยางขณะผสม และปรับปรุงสมบัติด้านความต้านทานต่อการงอตัวที่อุณหภูมิต่ำ

2.3.7 สารเกิดฟอง (Blowing Agents) คือสารตัวเติมที่มีความเสถียร และจะแตกตัวให้ก๊าซที่  
อุณหภูมิก่อนหรือขณะที่ยางเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนเซชัน ก๊าซที่เกิดขึ้นหลังจากการได้รับความร้อนจะ  
กลายเป็นฟองหรือโพรงอากาศกระจายอยู่ทั่วไปภายในเนื้อยาง สารที่นิยมใช้ได้แก่ โซเดียมไฮโดรเจน  
คาร์บอเนต ซึ่งเมื่อแตกตัวจะให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

2.3.8 สารหน่วงการติดไฟ (Flame Retardants) เป็นสารตัวเติมเพื่อช่วยหน่วงในการติดไฟของ  
ผลิตภัณฑ์โดยการสลายตัวให้แก๊ส หรือสารที่ไม่ติดไฟเมื่อได้รับความร้อน การใช้สารเคมีประเภทนี้ต้องมี  
ข้อระวังเป็นพิเศษเนื่องจากเป็นสารพิษ

## 2.4 โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต (sodium bicarbonate, $\text{NaHCO}_3$ ) [13 14 16]

โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต (Sodium hydrogen carbonate) มีลักษณะเป็นผลึกสีขาวที่  
ละลายน้ำได้ดี มีความเป็นด่าง เมื่อสลายตัวจะจะทำให้เกิด โซเดียมคาร์บอเนต ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) น้ำ และก๊าซ  
คาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) ที่สร้างฟองโฟม

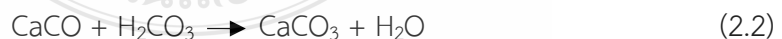
โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต มีสูตรโครงสร้างทางเคมี คือ  $\text{NaHCO}_3$  และมีชื่อเรียกอื่นว่าเบกกิ้งโซดา  
(Baking Soda), โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต โซเดียมแอซิดคาร์บอเนต, ไบคาร์บอเนตออฟโซดา  
เป็นต้น

สมการที่สมดุลสำหรับการสลายตัวของโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตเป็นโซเดียมคาร์บอเนต  
คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ดังสมการที่ 2.1



## 2.5 แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate, $\text{CaCO}_3$ )

แคลเซียมคาร์บอเนต ประกอบด้วยธาตุหลักที่เป็นส่วนประกอบสำคัญในสารอินทรีย์ และสารอนิน  
ทรีย์ ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ ออกซิเจน และแคลเซียม แคลเซียมคาร์บอเนต คือเกลือของกรดคาร์  
บอนิกที่ได้จากการทำปฏิกิริยาของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกละ (สมการ 2.2) หรือตะกอนของหินปูน  
(สมการ 2.3)



สูตรโครงสร้างทางเคมีของแคลเซียมคาร์บอเนตประกอบด้วยน้ำหนักแคลเซียมออกไซด์ ร้อยละ  
56.03 กับ ร้อยละ 43.97 ของคาร์บอนไดออกไซด์ หรือ ร้อยละ 40.04 ของแคลเซียม กับ ร้อยละ 59.96  
ของคาร์บอน สมบัติของแคลเซียมคาร์บอเนตเหมือนกับสมบัติของคาร์บอนเนต คือความไวต่อกรด  
แคลเซียมคาร์บอเนตละลายในน้ำบริสุทธิ์ได้ยาก อัตราการละลายอยู่ที่ 13 มิลลิกรัมต่อลิตรน้ำ คาร์บอนเนตไอออน

สามารถละลายได้ในไฮโดรเจนไอออน การละลายของแคลเซียมคาร์บอเนตจะส่งผลให้น้ำเกิดวามกระด้าง

แคลเซียมคาร์บอเนต เป็นสารตัวเติม (Filler) ที่ใช้กันทั่วไปในอุตสาหกรรมยางพารา และพลาสติก เพื่อลดต้นทุนการผลิต และเพื่อปรับคุณสมบัติทางกายภาพสมบัติทางกล(Reinforcing agents) โดยเฉพาะความสามารถในการรับความยืดหยุ่นของยาง (Compression set) และความร้อนของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยา NR- CaCO<sub>3</sub> ปฏิสัมพันธ์ 10 อนุภาคขนาดเล็กที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงกว่า คาดว่าจะมีสมบัติทางกลที่ดีขึ้น

## ตารางที่ 2.6 สมบัติของสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต [30]

GENERAL		
<b>Chemical name(s):</b> sodium hydrogen carbonate	<b>Character:</b> endothermic	<b>RTECS number:</b> VZ0950000
<b>Composition:</b> monosodium citrate, sodium hydrogen carbonate, partially hydrogenated oil, tricalcium phosphate, synthetic amorphous silica, polyethylene carrier, and ethylene homopolymer carrier; 20% sodium hydrogen carbonate in olefin carrier; 99% sodium hydrogen carbonate		
PHYSICAL CHEMICAL PROPERTIES		
<b>Boiling, °C:</b> 851		<b>Decomposition, °C:</b> >50-260
<b>State:</b> solid	<b>Color:</b> white, off white	<b>Odor:</b> odorless
<b>Density at 25°C, kg/m<sup>3</sup>:</b> 2160-2200		<b>pH:</b> 6-8
<b>Total gas evolution, ml/g:</b> 40-170		
<b>Max. gas evolution, °C:</b> 150-183		
<b>Main gaseous product:</b> CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O		
<b>Refractive index at 20°C:</b> 1.3344		
<b>Water solubility at 20°C, g/l:</b> 90		
<b>Vapor pressure at 25°C, kPa:</b> 3.44E-06		
HEALTH & SAFETY		
<b>Flash temp., °C:</b> non-flammable		<b>OSHA, PEL, ppm:</b> 5
<b>HMIS, F/H/R:</b> 0/0/1	<b>NFPA, F/H/R:</b> 0/0/1	<b>Carcinogenicity:</b> no
<b>Oral, rat LD50, mg/kg:</b> 4220-8290		
<b>Inhalation, rat LC50, mg/kg:</b> 4.75		
<b>UN risk:</b> R34	<b>UN safety:</b> S24/25	<b>UN/NA class:</b> not regulated
ECOLOGICAL IMPACT		
<i>Daphnia magna</i> , LC50, mg/l: 2350		
<i>Algae</i> , LC50, mg/l: 650/102H	<i>Rainbow trout</i> , LC50, mg/l: 8250-9000	
USE		
<b>Recommended for polymers:</b> ABS, EVA, PE, PET, PP, PS, PVC, TPE, TPO		
<b>Recommended for products:</b> celuka sheets, profiles, block foam, sheet (packaging, building materials), insulation coating material, various types of cushioning material		
<b>Processing methods:</b> extrusion, injection molding, rotational molding		
<b>Concentrations used, wt%:</b> 0.5-2		

อนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตทำหน้าที่เป็นส่วนเสริมแรง นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มการกระจายตัวของส่วนผสมสารคงรูป ตัวเร่งปฏิกิริยา สารกระตุ้น สารให้สี และสารอื่น อันเป็นการช่วยลดเวลาในการผสม และความร้อนที่เกิดขึ้นขณะผสม รวมถึงการเพิ่มความสม่ำเสมอของระดับการคงรูป

## 2.6 เอทิลีน-ไวนิลอะซีเตตโคพอลิเมอร์ (Ethylene-vinylacetate copolymer, EVA) [33]

เอทิลีน-ไวนิลอะซีเตตโคพอลิเมอร์ เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างเอทิลีน กับไวนิลอะซีเตต ที่ใช้กันอยู่มี 2 รูปแบบ คือ เป็นเม็ดกับแบบผง สมบัติของเอทิลีน-ไวนิลอะซีเตตพอลิเมอร์คล้ายยางสังเคราะห์ สัดส่วนไวนิลอะซีเตตที่สูงจะมีสมบัติการยืดตัว (Elongation) สูง ในทางกลับกันปริมาณเอทิลีนน้อยจะทำให้สมบัติใกล้เคียงกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene, LDPE) คือจะแข็ง และแข็งตึงมากกว่า นอกจากสมบัติจะเป็นปัจจัยมาจากปริมาณของเอทิลีน แล้วยังขึ้นอยู่กับความยาว และกิ่งสายโซ่โมเลกุล (Long chain branching) และการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุล (Molecular-weight) ที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิต เมื่อนำพอลิเอทิลีนไปโคพอลิเมอร์ไรเซชัน (copolymerization) กับไวนิลอะซีเตต (Vinyl acetate) เป็นเอทิลีน-ไวนิลอะซีเตตโคพอลิเมอร์ความเป็นผลึกจะลดลงแต่ความเป็นอสัณฐาน (Amorphous) จะมากขึ้นทำให้ช่วงจุดหลอมเหลวกว้างขึ้น

เอทิลีน-ไวนิลอะซีเตต เป็นพลาสติกที่เหนียว ไม่แตกเมื่อทดสอบค่าความทนต่อแรงกระแทก (Impact) ไม่ว่าจะปริมาณไวนิล-อะซีเตตจะมากหรือน้อยก็ตาม ความทนทานต่อแรงกระแทกที่อุณหภูมิต่ำดีมาก ในด้านการทนต่อสภาวะแวดล้อม (Environmental protection) มีความทนทานต่อรังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet rays, UV) และสภาพอากาศ (Weathering) แต่กระนั้นก็ยังต้องเติมสารป้องกันรังสีอัลตราไวโอเล็ตเพื่อยืดอายุการใช้งานภายนอกอาคาร

เอทิลีน-ไวนิลอะซีเตต สามารถผสม (Compound) และวัลคาไนซ์ (Vulcanize) ด้วยลูกกลิ้งในการผสมเช่นเดียวกับการผสมยาง แล้วจึงวัลคาไนซ์ยางให้เกิดโครงสร้างแบบเชื่อมขวาง (Cross-linked) สามมิติเป็นของแข็ง ฟองน้ำ หรือโฟมที่มีความเหนียว และความหนาแน่นต่ำ ด้วยสารเกิดฟองเอโซไดคาร์โบนาไมด์ (Azodiacobonamide) ได้

**ตารางที่ 2.7** ตารางแสดงค่าความหนาแน่นของเอทิลีน-ไวนิลอะซีเตตโคพอลิเมอร์ที่ปริมาณไวนิล-อะซีเตตต่างๆ กัน [33]

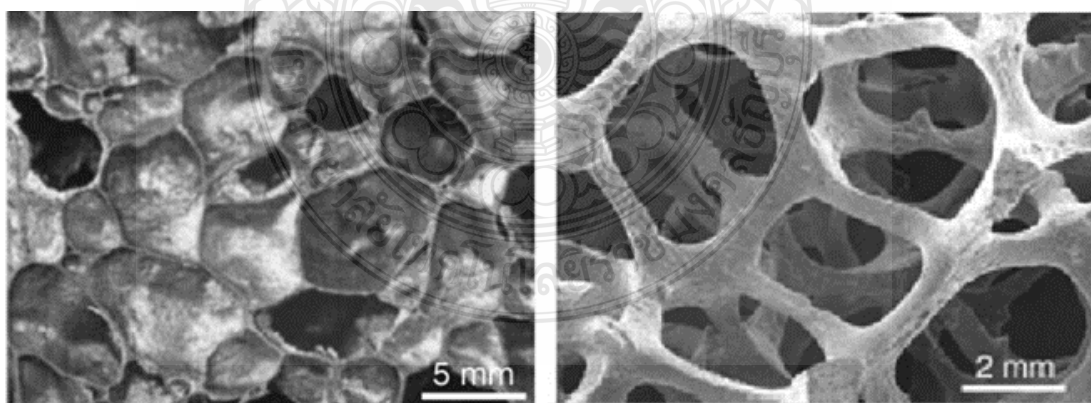
ความหนาแน่นของเอทิลีน-ไวนิลอะซีเตต กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร	ร้อยละของไวนิล-อะซีเตต ที่มีใน เอทิลีน-ไวนิลอะซีเตต
0.980	50
0.970	43
0.960	36
0.950	27
0.940	19
0.930	13

## 2.7 โฟมยาง [15 16]

โฟมยาง คือการสร้างก๊าซเฉื่อยภายในยางเมทริกซ์เนื่องจากอุณหภูมิเพิ่มขึ้นและการสลายตัวด้วยความร้อน การสร้างโครงสร้างเซลล์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) น้ำหนักโมเลกุล 44 กรัมต่อโมล ทั้งอุณหภูมิและเวลาในการหลอมยางยังเป็นตัวแปรสำคัญสำหรับการผลิตยางโฟมเพื่อผลิตโฟมที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงให้สมบัติทางกลทางกายภาพและความร้อนที่แตกต่างกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกันของสารฟองทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเซลล์ที่แตกต่างจากกระบวนการหลอมเหลว นอกจากนี้ยังมีสารเคมีหลายชนิดที่ใช้ในการผสมยางเช่นสังกะสีออกไซด์ (ZnO) กรดสเตียริก กำมะถัน (S) Benzothiazyl-2-cyclohexyl sulfenamide (CBS) และ Tetra-methyl thiuram disulfide (TMTD) ใช้เป็นสารช่วยแข็งตัวของเซลล์ตัวแทนของเซลล์นิวเคลียสหรือตัวยับยั้งเซลล์ที่มีผลต่อปริมาณก๊าซทั้งหมดที่ปล่อยออกมาและสมบัติของโฟมยางธรรมชาติอื่น ๆ ที่เรียกว่าสารเติมแต่งหรือสารเติมแต่ง เช่นซิลิกาคาร์บอนคาร์บอนเนตดินเหนียว

ยางโฟม ยางฟอง หรือที่นิยมเรียกทับศัพท์ว่า “โฟมลาเท็กซ์” หมายถึง ผลิตภัณฑ์ยางที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนทำมาจากน้ำยาง ซึ่งรูพรุนเป็นได้ทั้งรูที่ต่อเนื่องหรือต่อเนื่องบางไม่ต่อเนื่องบาง และใช้คำว่า สกิน (skin) หรือ เนเชอรัลสกิน (natural skin) สำหรับผิวเรียบของยางฟองน้ำส่วนที่ติดกับผิวของเบ้าพิมพ์

โฟมที่ผลิตทางเคมีเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างองค์ประกอบที่แตกต่างกันในวัตถุดิบถูกทำให้เกิดการสลายตัวปลดปล่อยก๊าซ (เช่นไนโตรเจน หรือคาร์บอนไดออกไซด์) เฉื่อยให้พลาสติกเกิดเป็นโพรงอากาศภายในวัสดุหลัก ลักษณะของโพรงอากาศหรือเซลล์โฟมมีแบบเซลล์ปิดที่โพรงก๊าซที่เกิดขึ้นกระจายตัวแบบไม่เชื่อมต่อกัน และเซลล์เปิดที่มีโพรงเชื่อมต่อกันโดยมีเฟสของก๊าซ และของแข็งซึ่งกระจายอยู่อย่างต่อเนื่อง (รูปที่ 2.5 ) ความสามารถในการซึมผ่านของของเหลวผ่านรูพรุนมีความสัมพันธ์กับความพรุนของเซลล์เปิด และลักษณะพอลิเมอร์ ภายในยางโฟมสามารถพบลักษณะเซลล์ทั้งสองได้



รูปที่ 2.5 โฟมพอลิเมอร์แบบสามมิติ (ก) โฟมโพลีฟิวด์เซลล์ปิด (ข) โฟมโพลียูรีเทน (PU) เซลล์เปิด [15]

## 2.7.1 ประเภทของโฟมจำแนกตามลักษณะทางกายภาพ

2.7.1.1 โฟมยืดหยุ่น (Flexible Foam) โฟมชนิดนี้พอลิเมอร์เมทริกซ์จะมีอุณหภูมิสภาพแก้ว (glass transition temperature: T) ที่ต่ำมีลักษณะอ่อนนุ่มยืดหยุ่นและคืนตัวเมื่อถูกกดได้ง่ายเช่น โฟมยาง (elastomeric foam)

2.7.1.2 โฟมชนิดแข็ง (Rigid Foam) โฟมชนิดนี้พอลิเมอร์เมทริกซ์จะอยู่ในสถานะผลึก ลักษณะที่แข็งไม่คืนตัวเมื่อถูกกดหรือบีบ

2.7.1.3 โฟมชนิดกึ่งแข็ง (Semi-Rigid Foam) มีในลักษณะอยู่ระหว่างโฟมชนิดแข็งและชนิดยืดหยุ่นกล่าวคือโฟมชนิดนี้จะมีมอดูลัสยืดหยุ่น (elastic modulus) ที่สูง โฟมชนิดยืดหยุ่นแต่มีพฤติกรรมทางความเค้นความเครียด (stress-strain behavior) คล้ายกับโฟมชนิดยืดหยุ่นมากกว่าโฟมชนิดแข็ง

## 2.8 การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer) [25 27 32]

การถ่ายเทความร้อน มีความสำคัญในชีวิตประจำวันและอุตสาหกรรมแปรรูปอาหาร ไม่ว่าจะเป็นการใช้ความร้อนในการหุงต้มอาหาร กระบวนการแปรรูปที่เกี่ยวข้องกับความร้อนและความเย็นในโรงงานแปรรูปอาหาร เช่น กระบวนการแช่เย็น การแช่แข็ง การฆ่าเชื้อโดยใช้ความร้อนการอบแห้ง และการระเหย กระบวนการเหล่านี้เกี่ยวข้องกับการถ่ายโอนความร้อนระหว่างผลิตภัณฑ์และตัวกลางให้ความร้อน หรือความเย็น การถ่ายโอนความร้อนเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติที่เกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิระหว่างตำแหน่งสองตำแหน่งในมีค่าแตกต่างกันโดยความร้อนจะถ่ายเทจากที่มีอุณหภูมิสูงไปที่มีอุณหภูมิต่ำเสมอ ในตัวกลางหรือระหว่างตัวกลางการถ่ายโอนความร้อน

2.8.1 การนำความร้อน (heat conduction) คือ ปรากฏการณ์ที่พลังงานความร้อนถ่ายเทภายในวัตถุหนึ่งๆ หรือระหว่างวัตถุสองชิ้นที่สัมผัสกัน โดยมีทิศทางของการเคลื่อนที่ของ จากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ โดยที่ตัวกลางไม่มีการเคลื่อนที่ การนำความร้อนเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นระดับชั้นอะตอมของอนุภาค เป็นหนึ่งในกระบวนการถ่ายเทความร้อน ในโลหะ การนำความร้อนเป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระ(คล้ายการนำไฟฟ้า)ในของเหลวและของแข็งที่มีสภาพการนำความร้อนต่ำเป็นผลมาจากการสั่นของโมเลกุลข้างเคียง ในก๊าซการนำความร้อนเกิดขึ้นผ่านการสั่นสะเทือนระหว่างโมเลกุล หรือกล่าวคือการนำความร้อนเป็นลักษณะการถ่ายเทความร้อนผ่าน โดยตรงจากวัตถุหนึ่งไปยังอีกวัตถุหนึ่งโดยการสัมผัสกัน เช่น การเอามือไปจับกาน้ำร้อน จะทำให้ความร้อนจากกาน้ำถ่ายเทไปยังมือ จึงทำให้รู้สึกร้อน เป็นต้น วัสดุใดจะนำความร้อนดีหรือไม่ดี ขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

2.8.2 การพาความร้อน คือ ปรากฏการณ์ที่โมเลกุลของตัวกลางที่ใช้ในการพาความร้อน เมื่ออากาศได้รับความร้อนจากแหล่งกำเนิดความร้อนแล้วตัวโมเลกุลที่ร้อนจะถูกพาให้เคลื่อนที่ไปยังวัตถุที่ต้องการให้เกิดความร้อน จึงทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนของลมร้อนไปยังแหล่งกำเนิดความร้อนที่อาศัยวิธีการพาความร้อน หรือ การถ่ายเทความร้อน ได้แก่ ฮีตเตอร์คริบ ฮีตเตอร์ลอยอากาศตัวไอ-ยู

ลักษณะของงานที่ใช้หลักการพาความร้อน ได้แก่ เตอบต้วยลมนร้อนจากฮีตเตอร์ครีบ ระบบไล่ความชื้นของ AHU ด้วยฮีตเตอร์ครีบ เป็นต้น

การพาความร้อน การถ่ายเทความร้อนโดยการพาประกอบด้วยกลไก 2 อย่าง คือ พลังงานเกิดการถ่ายเทอันมีผลเนื่องมาจากการเคลื่อนที่หรือการแพร่แบบสุ่มของโมเลกุล และผลเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของ ของไหลการถ่ายเทลักษณะนี้เกิดขึ้นได้ เช่น ในระบบที่มีการกระจายตัวของอุณหภูมิจะมีการถ่ายเทความร้อนได้และเนื่องจากโมเลกุลจะมีการเคลื่อนที่แบบสุ่มอยู่ด้วย ดังนั้นการถ่ายเท ความร้อนทั้งหมดที่เกิดขึ้นจึงเกิดขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่แบบสุ่มของโมเลกุลและการเคลื่อนที่ ของของไหลส่วนใหญ่ การถ่ายเทความร้อนโดยการพาแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะคือ

2.8.2.1 การพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Natural หรือ Free Convection) คือการเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของของแข็งและของไหล โดยที่ของไหลไม่ถูกทำให้เคลื่อนไหวโดยกลไกภายนอก วัตถุซึ่งมีผิวเรียบอยู่ในของไหลที่อยู่หนึ่งเกิดการถ่ายเทอุณหภูมิของผิวสูงกว่าอุณหภูมิของของไหล ความร้อนจะถ่ายเทมายังของไหลที่ชิดกับผนังทา ให้ความหนาแน่นของของไหลที่อยู่ชิดผนังต่ำลง ซึ่งทำให้เกิดแรงผลักดันให้ของไหลลอยตัวขึ้น ของไหลที่อยู่ต่ำวาก็จะเคลื่อนเข้ามาแทนที่และทำให้เกิดการหมุนเวียนของของไหล

2.8.2.2 การพาโดยการบังคับ (Forced Convection) เกิดขึ้นเมื่อของไหลมีความเร็วอยู่ด้วยกลไกภายนอก เช่น พัดลม หรือสูบน้ำ เมื่อของเหลวมีความเร็ว เราจะต้องทราบกลไกในการเคลื่อนที่ของของไหลก่อน โดยปกติเราจะแบ่งการไหลของของไหลเป็นสองแบบ คือ การไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) และการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) ในการไหลแบบราบเรียบ ซึ่งของไหลไหลเป็นชั้น ๆ ขนานกับความร้อนเกิดการถ่ายเทสู่ผิวของของแข็งโดยการนำ และถ่ายเทต่อๆ กันไปในของไหลโดยการนำผ่านชั้นของๆ ไหล ในกรณีของการไหลแบบปั่นป่วนซึ่งของไหลเคลื่อนที่อย่างไม่มีการเรียงมีการเคลื่อนที่ตั้งฉากกับทิศทางของการไหลด้วย การเคลื่อนที่ของความร้อนส่วนใหญ่ จะเกิดจากอนุภาคของๆ ไหลที่ได้รับความร้อนมาแล้วเคลื่อนที่นำความร้อนถ่ายเทไปยังที่อื่น

**ตาราง 2.8** แสดงค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของของไหลบางชนิด [27]

ประเภทการพาความร้อนและชนิดของการไหล	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย ( $W/m^2 K$ )
การพาความร้อนแบบอิสระ,อากาศ	5-25
การพาความร้อนแบบอิสระ,น้ำ	20-100
การพาความร้อนแบบบังคับ,อากาศ	10-200
การพาความร้อนแบบบังคับ,น้ำ	50-10,000
น้ำ กำลังเดือด	3,000-100,000
ไอของน้ำ ที่กำลังอิมตัว	5,000-100,000

## 2.9 การผสมยาง [11 12 13 14]

หลังจากที่ออกสูตรยาง การผสมยางกับสารตัวเติมต่างๆจะต้องดำเนินการโดยใช้เครื่องผสมที่อาจจะเป็นระบบปิด หรือเปิด การผสมยางเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญอย่างมากต่อสมบัติและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ สภาวะในการผสม ชนิดเครื่องจักร อุณหภูมิ ความเร็ว ระยะเวลา และลำดับของการผสม จะส่งผลกระทบต่อของการกระจายตัว (Distribution) การแตกตัว (Disperse) การเข้ากันได้ของเนื้อยางกับสารตัวเติม (Incorporation หรือ Wetting) ของสารตัวเติมที่ผสมลงไป การผสมจำเป็นต้องมีการตรวจสอบคุณภาพของๆ ผสมในแต่ละรอบการผสม (Batch) ในเรื่องของความหนืดมูนนี่ (Mooney Viscosity) และสมบัติการคงรูปของยาง (Cure Characteristics) เพื่อให้คุณภาพผสมคงที่ ยางที่ผ่านกระบวนการผสมแล้วจะเรียกว่า “ยางคอมพาวด์”

### 2.9.1 การตรวจสอบคุณภาพของยางคอมพาวด์เบื้องต้น

ลักษณะการวัลคาไนซ์ (Cure Characteristics) นอกจากสมบัติการไหลแล้ว ลักษณะการวัลคาไนซ์ เช่น ระยะเวลาสกอร์ช (Scorch time) และระยะเวลาในการวัลคาไนซ์ (curing time) ก็จัดเป็นสมบัติสำคัญของคอมพาวด์ที่ส่งผลต่อกระบวนการผลิต เพราะถ้ายางเกิดการวัลคาไนซ์เร็วเกินไป หรือมีระยะเวลาสกอร์ชที่สั้นเกินไปก็อาจก่อให้เกิดปัญหาในระหว่างการไหลขึ้นรูปได้ เช่น ยางไหลได้ไม่เต็มแม่พิมพ์ ดังนั้นในการออกสูตรเคมียางจึงต้องออกสูตรให้ยางคอมพาวด์มีระยะเวลาสกอร์ชที่ยาวเพียงพอที่จะไม่ก่อให้เกิดปัญหาในกระบวนการผลิต และยางคอมพาวด์ก็ควรจะมีความสามารถในการวัลคาไนซ์ที่สั้นเพื่อทำให้ต้นทุนการผลิตลดลงและเพิ่มผลผลิตการผลิต

การทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางยังเป็นหนึ่งในขั้นตอนของการควบคุมคุณภาพในกระบวนการผลิตอีกด้วย เช่น หากมีการซังน้ำหนกของสารเคมีในกลุ่มที่ทำให้ยางวัลคาไนซ์ผิดหรืออาจเติมสารเคมีดังกล่าวผิดขั้นตอนก็จะส่งผลทำให้ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางผิดปกติได้ ปัจจุบันเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางมี 3 ชนิด ได้แก่ เครื่องมูนนี่วีส์โคมิเตอร์ เครื่องรีโอมิเตอร์แบบจานแกว่ง (Oscillating disc rheometer; ODR) และเครื่องรีโอมิเตอร์แบบตายเคลื่อนที่ (Moving die rheometer; MDR)

## 2.10 เครื่องผสมยาง [11]

เครื่องผสมยางแบบ 2 ลูกกลิ้ง (Two-roll Mill) เป็นเครื่องผสมยางระบบเปิดที่ใช้ลูกกลิ้ง 2 ลูกเรียงตัวขนานกันในแนวนอน หมุนเข้าหากันด้วยความเร็วผิวที่ต่างกันเพื่อสร้างแรงเฉือนในการผสมยางกับสารตัวเติมระหว่างลูกกลิ้งทั้งสอง ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง (Nip หรือ gap) สามารถปรับระยะห่างให้เหมาะสมต่อการใช้งาน ที่ด้านปลายทั้งสองด้านของลูกกลิ้งจะมีแผ่นกั้น (Guide หรือ Cheeks) ควบคุมการแผ่กระจายของยางขณะบิด เมื่อเริ่มผสมยางชิ้นเล็กๆ จะเคลื่อนตัวผ่านช่องระหว่างลูกกลิ้งสามสี่ครั้ง ความร้อนที่ได้รับจากความเค้นเฉือน (Shear Heat) และสมบัติการเกาะตัวของยางจะทำให้ยางเริ่มเกาะกันเป็นชั้นเดียว ยางจะถูกรีดออกมาเป็นแผ่นรอบลูกกลิ้ง ขณะเดียวกันจะมีกองยาง (Bank) อยู่เหนือช่องว่างระหว่างลูกกลิ้ง ผู้ผสมต้องกรีดยางที่รีดออกมาโดยใช้มีดตัดยาง (Mill Knife) และพับไปมาในขณะใส่สารตัวเติม ยางที่ถูกตัดพับไปมาระหว่างช่องว่างของลูกกลิ้ง แรงเฉือนที่เกิดขึ้นจากความเร็วผิวที่แตกต่างกันระหว่างลูกกลิ้งทั้งสองจะทำให้เกิดการผสมกระจายตัวและแตกตัวระหว่างชั้นความหนาของยาง



แผ่นที่รีดได้เป็นอย่างดี เครื่องผสมยางลักษณะนี้เหมาะกับการผสมในปริมาณน้อยๆ และต้องใช้ผู้ผสมที่มีความชำนาญ

## 2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.11.1 Leandra Oliveira-Salmazo และคณะ [17] ทำการทดลองขึ้นรูปโฟมจากยางธรรมชาติแห้ง ด้วยเครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) ภายใต้อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นจำเพาะที่ได้มีระดับปานกลางประมาณ 0.3 โดยใช้ อโซไดคาร์บอนเอไมด์ (Azodicarbonamide) เป็นสารเกิดฟองที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส รูปทรงของฟองอากาศจะถูกควบคุมจากทิศทางการขยายตัวของชิ้นงานปริมาตร 7.52 ลูกบาศก์เซนติเมตร หรือ  $19.7 \times 24.7 \times 23.2 \times 17.8$  (กว้าง(มิลลิเมตร) x ยาว(มิลลิเมตร) x หนา(มิลลิเมตร)) หรือ 7 กรัม อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียสในแม่พิมพ์สแตนเลส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร) x ความสูง (มิลลิเมตร) และ  $31.0 \times 10.0$  ตามลำดับ โดยใช้กำมะถันเป็นสารวัลคาไนซ์ อุณหภูมิในการขึ้นรูป 160 องศาเซลเซียส 25 นาที สัดส่วนรูปทรงฟองอากาศ (anisotropic ratios) ที่ได้จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.98 – 2.48 ภายใต้ความหนาแน่นจำเพาะที่เท่ากัน หลังการขึ้นรูปจะมีการศึกษาสมบัติเชิงกลของรูปร่างของฟองอากาศรูปทรงต่างๆ พบว่ายางธรรมชาติที่มีสัดส่วนรูปทรงฟองอากาศมากจะมีความแตกต่างของมอดูลัสการอัดทางด้านยาวและขวางมากที่สุด ในทางตรงกันข้ามรูปทรงฟองอากาศต่ำจะมีความแตกต่างของมอดูลัสการอัดทางด้านยาวและขวางต่ำที่สุด

2.11.2 N.N. Najib และคณะ [18] ทำการศึกษาการสัณฐานวิทยา (Morphology) และสมบัติความต้านทานต่อการกระแทก (Impact properties) ของยางธรรมชาติแห้งที่ผสมด้วยเครื่องผสมลูกกลิ้งคู่ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์อัด (Compression moulding) อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 2 นาที และ เตาอบลมร้อน (Air-circulation oven) อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เวลา 20 นาที กับสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตซึ่งเป็นสารอนินทรีย์ที่ให้ฟองก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการสลายตัวที่อุณหภูมิระหว่าง 145 – 150 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วนผสม 4 8 10 และ 12 ส่วนในร้อยส่วน ปริมาณสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตที่เพิ่มขึ้น ค่าแรงบิดสูงสุด  $M_H$  ค่า  $M_H$  เป็นค่าที่แสดงถึงค่าความแข็งแรง หรือมอดูลัสเฉือนของยางที่เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลสูงสุด หรือจุดคงรูป แรงบิดสูงสุดที่ลดลงแสดงให้เห็นถึงปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขนาดใหญ่ และเล็กที่เพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตที่เพิ่มขึ้น ฟองขนาดเล็กจะแทรกตัวระหว่างสายโซ่โมเลกุลส่งผลให้การเคลื่อนตัวได้อิสระมากขึ้นทำให้ค่าแรงบิดลดลงส่งผลให้ระยะเวลาเริ่มคงรูปเพิ่มขึ้น

สัดส่วนสารเกิดฟองที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ค่าความหนาแน่นลดลง ปริมาณก๊าซคาร์บอนได ออกไซด์ ที่เพิ่มขึ้นในช่วงระยะเวลาเริ่มคงรูปสั้น ฟองโฟมถูกกักอยู่ในชิ้นงานส่งผลให้อัตราการขยายตัวสูงขึ้น สัดส่วนสารเกิดฟองที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลลดลงเนื่องจากปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นพร้อมกับปฏิกิริยาการคงรูปทำให้ผนังฟองโฟมบางทำให้เกิดการเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลที่น้อยลง การสลายตัวของสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน (Endothermic) ความร้อนในการทำปฏิกิริยาจะถูกดูดซึมขัดขวางการเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุล ความหนาแน่นที่ลดมีความสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของฟองโฟม ต่อหน่วย

ปริมาตร สัดส่วนสารเกิดฟองที่เพิ่มขึ้นทำให้จำนวนฟองโพลีเมอร์ต่อหน่วยปริมาตรเพิ่มขึ้น ขนาดฟองโพลีเมอร์เฉลี่ย ลดลงเมื่อสัดส่วนสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น

2.11.3 Nachnapa Tangboriboon และคณะ [19] ศึกษาสมบัติทางความร้อนของโพลีเมอร์จากยางธรรมชาติแห้ง ซึ่งมีสมบัติเด่นในเรื่องน้ำหนักเบา ความเป็นฉนวนความร้อน สมบัติเชิงกลทางการดูดซับพลังงาน ที่เตรียมโดยใช้เครื่องผสมแบบลูกกลิ้งคู่ (Two-roll mill) โดยใช้กำมะถันเป็นสารวัลคาไนซ์ ที่อุณหภูมิ 396 องศาเซลเซียส (122.5 องศาเซลเซียส) สารเกิดฟองที่ใช้มี 2 ชนิดคือโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต และ ไดไนโตรโซเพนตะเมธิลีนเตตระไมด์ (Dinitrosopentamethylenetetramine, DNPT) อัตราส่วนผสม 5 ส่วนในร้อยละ (phr.) และสารเสริมแรงแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate,  $\text{CaCO}_3$ ) อัตราส่วนผสม 0 20 40 และ 60 ส่วนในร้อยละ จากหลักฐานวิทยาพบว่าที่อุณหภูมิ 396 องศาเซลเซียส สารเกิดฟองจะสลายตัวเกิดเป็นฟองอากาศลักษณะแบบเปิด (Open cell) และปิด (close) จากการทดสอบอัตราส่วนผสมแคลเซียมคาร์บอเนต 60 ส่วนในร้อยละจะมีค่าสมบัติเชิงกลและความร้อนที่ดีที่สุด มีค่าความหนาแน่นรวม (Bulk density) / การกลับคืนตัวถาวรหลังได้รับแรงอัด (Compression set) / ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ที่อุณหภูมิสูงกว่า 800 องศาเซลเซียส เมื่อผสมกับโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต และไดไนโตรโซเพนตะเมธิลีนเตตระไมด์ คือ 240.5 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร หรือร้อยละ 32.6 / 0.066 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน และ 219.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร / ร้อยละ 11.30 / 0.070 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน ตามลำดับ จำนวนของแคลเซียมคาร์บอเนต ทำให้ความหนาแน่นรวม (Bulk density) เพิ่มขึ้นเนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างยางธรรมชาติกับแคลเซียมคาร์บอเนต แคลเซียมคาร์บอเนตเมื่อผสมในยางธรรมชาติจะส่งผลต่อลักษณะฟองโพลีเมอร์ที่เกิด เนื่องจาก แคลเซียมเป็นประจุบวก ( $\text{Ca}^{2+}$ ) สามารถจับกันได้ดีกับคาร์บอเนตที่มีประจุลบ ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) ภายในเนื้อยาง แคลเซียมแคพไออนประสานได้ดีกับเนื้อยางส่งผลต่อสมบัติทางกล และความร้อน ในขณะที่คาร์บอเนตแอนไอออนเกิดเป็นฟองก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ระหว่างปฏิกิริยาการคงรูป ทำให้ได้ฟองโพลีเมอร์ลักษณะเปิด และปิดขนาดใหญ่มากกว่าสัดส่วนที่ไม่ได้ผสมแคลเซียมคาร์บอเนต ปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนต สารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตความหนืดจะสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว และระยะเวลาการคงรูปสั้น

2.11.4 ดร.กัลทิมา เชาวชาญชัยกุล และ ดร.วัลลภ หาญณรงค์ชัย [20] ทำการศึกษาผลการปรับผิวเส้นใยธรรมชาติ และผลชนิดและปริมาณของเส้นใยธรรมชาติต่อการพัฒนาวัสดุซับเสียงจากวัสดุยางโพลีเอทิลีนและเส้นใยธรรมชาติ การตรวจสอบสมบัติรูปร่างและขนาดของเซลล์โพลีเมอร์โดยการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ (Stereo microscope) ชิ้นงานที่เตรียมผิวหน้าจากการตัดตั้งฉากกับการขยายตัวของเซลล์โพลีเมอร์ และหาขนาดเฉลี่ย 100 เซลล์ด้วยโปรแกรมอิมเมจ (Image J)

2.11.5 ธนิต เบี้ยแก้ว และคณะ [21] พัฒนาวีธีการนับจำนวนไขปลา 3 ชนิด จากรูปภาพที่ถ่ายจากกล้องดิจิทัลแล้วประมวลผลการนับด้วยโปรแกรมอิมเมจ เปรียบเทียบกับการนับโดยตรง (Actual count) ผลการศึกษาพบว่าการใช้เทคนิคนี้ในการนับจำนวนไขปลา 1 ถึง 100 ฟองของปลาทั้ง 3 ชนิด มีความถูกต้องแม่นยำมากกว่าร้อยละ 99

2.11.6 Kyung-Whan Kim และคณะ [5] ได้ทำการศึกษาสมบัติ และหลักการลดความรุนแรงจากการเกิดอุบัติเหตุทางจราจรเปรียบเทียบระหว่างแบรีเออร์จราจรแบบเดิม กับโรลลิ่งแบรีเออร์จราจรสรุปได้ดังนี้

โรลลิ่งแบรีเออร์ (Rolling Barriers) เกิดจากแนวความคิดบริษัทขนาดเล็กในประเทศสาธารณรัฐเกาหลี หรือเกาหลีใต้ จากความต้องการที่จะวิจัยนวัตกรรมโรลลิ่งแบรีเออร์ที่หุ้มด้วยพอลิยูเรเทนติดตั้งบนราวท่อเหล็กตลอดตามแนวยาว ในงานวิจัยฉบับนี้ต้องการที่จะศึกษาสมบัติ และหลักการของการแก้ไขปรับเปลี่ยนทิศทางของยานพาหนะที่สูญเสียการควบคุม และความแข็งแรงของแบรีเออร์จากการชนของรถยนต์นั่งน้ำหนัก 1.3 ตัน และรถบรรทุกน้ำหนัก 3.5 ตันในทางตรง และโค้ง รวมถึงทิศทางของยานพาหนะหลังการชน ลักษณะโครงสร้างแบรีเออร์ขณะ และหลังการชน

วัตถุประสงค์ของแบรีเออร์ที่ติดตั้งขนานกับทางวิ่งเพื่อ 1) ป้องกันมิให้ยานพาหนะที่สูญเสียการควบคุมวิ่งออกนอกทางวิ่ง หรือวิ่งข้ามไปในช่องจราจรด้านตรงข้าม 2) รถการบาดเจ็บของผู้โดยสาร และความเสียหายที่จะเกิดกับยานพาหนะ 3) บังคับให้ยานพาหนะที่ชนกลับเข้าไปในทิศทางทางวิ่งปกติ นอกจากนี้แบรีเออร์ยังเป็นที่ช่วยนำสายตาผู้ขับขี่ยานพาหนะ และป้องกันคนข้ามถนนนอกจุดข้ามทางที่กำหนด แบรีเออร์แบบเดิมทำจากโลหะแผ่นขึ้นรูป หรือจากวัสดุคอนกรีต แบรีเออร์แบบลวดเหล็กไม่ค่อยนิยมใช้

ความแข็งแรงของแบรีเออร์ที่มากจะมีทันทันต่อการชนของยานพาหนะขนาดใหญ่ได้ แต่ได้ด้านตรงข้ามจะสร้างความเสียหายรุนแรงกับยานพาหนะขนาดเล็ก การออกแบบความแข็งแรงของแบรีเออร์ที่เหมาะสมกับยานพาหนะขนาดใหญ่ และขนาดเล็กในคราวเดียวกันเป็นเรื่อง

มุมจากหลังการชน (Reflection angle) น้อย ยานพาหนะที่เกิดการชนจะต้องวิ่งอยู่ในทิศทางเดิม หลังจากการชนกับแบรีเออร์จะต้องมีมุมจาก 0 องศา ค่าของมุมจากหลังการชนจะต้องต่ำกว่าร้อยละ 60 ของมุมชน (Crash angle) เมื่อยานพาหนะชนกับแบรีเออร์ที่มุมชน 20 องศา มุมจากควรจะต้องมีค่าไม่เกิน 12 องศา มุมจากหลังการชนที่มากจากการชนแบรีเออร์คอนกรีตเป็นสาเหตุของการเกิดอุบัติเหตุซ้ำซ้อน

การลดความเร็วหลังการชนต่ำ (Small Speed Reduction) ความเร็วของยานพาหนะที่ลดลงอย่างรวดเร็วจากการชน แรงเฉื่อย (Inertia) ที่ตกค้างจะทำให้ผู้ขับขี่ และผู้โดยสารกระแทกกับภายในของยานพาหนะ การลดความเร็วหลังเมื่อเกิดอุบัติเหตุที่มากกว่า 24 กิโลเมตรต่อชั่วโมงจะทำให้เกิดการบาดเจ็บร้ายแรงกับผู้ขับขี่ และผู้โดยสารเมื่อชนกับแบรีเออร์แบบเดิม การดูดซับแรงกระแทกจากการชนต่ำการลดความเร็วจากการชนก็จะเกิดน้อย การลดความเร็วของยานพาหนะหลังการชนต่ำ และการลดมุมจากหลังการชนต่ำไม่สามารถทำได้ในแบรีเออร์แบบเดิม

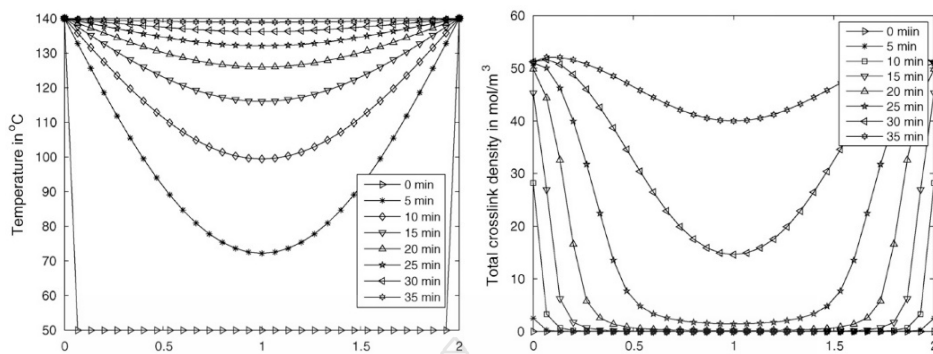
โรลลิงแบรีเออร์ ความแตกต่างเมื่อเปรียบเทียบกับแบรีเออร์แบบเดิม โรลลิงแบรีเออร์ทำหน้าที่รองรับ (Crash cushioning) และปรับทิศทาง (Reorientation) ของยานพาหนะที่ชน

การรองรับการชน (Crash cushioning) โรลลิงแบรีเออร์ไม่ได้ทำหน้าที่ดูดซับแรงกระแทก แต่ทำหน้าที่รองรับการชน และปรับทิศทางของยานพาหนะที่ชนให้เหมาะสม โครงสร้างของโรลลิงแบรีเออร์ และรถยนต์จะทำหน้าที่ดูดซับแรงกระแทกที่เกิดขึ้นจากการชน การดูดซับแรงกระแทกที่มากการลดความเร็วของยานพาหนะที่เกิดอุบัติเหตุจะเกิดขึ้นมาก การบาดเจ็บของผู้ขับขี่ และผู้โดยสารก็จะเกิดขึ้นรุนแรง จากการทดสอบภาคสนามพบว่าอัตราการลดความเร็ว (Deceleration rates) เมื่อชนกับโรลลิงแบรีเออร์มีค่าร้อยละ 4 – 40 ซึ่งน้อยกว่าเมื่อเทียบกับแบรีเออร์แบบเดิม แบรีเออร์แบบเดิมโครงสร้างมีสมบัติความยืดหยุ่น (Elastic) หลังจากยานพาหนะชนจะกระเด็น (Bouncing) ออกไปข้างในช่องทางจราจรข้างเคียง ทำให้เกิดอุบัติเหตุซ้ำซ้อน ความเร็วหลังจากการเกิดอุบัติเหตุที่ไม่สามารถลดลงได้จะส่งผลให้เกิดอุบัติเหตุร้ายแรงถ้าแบรีเออร์ไม่สามารถดูดซับพลังงานจากการกระแทกได้

แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างโรลลิงแบรีเออร์กับยานพาหนะเมื่อชนเกิดขึ้นน้อยมาก เมื่อเทียบกับแบรีเออร์แบบเดิม ความแตกต่างของการดูดซับพลังงานจากแรงกระแทกของยานพาหนะของแบรีเออร์ทั้ง 2 ชนิดเป็นสัดส่วนกัน โรลลิงแบรีเออร์ช่วยลดแรงปะทะที่เกิดขึ้นกับผู้ขับขี่ และผู้โดยสารได้เพราะการลดความเร็วหลังการชนที่ต่ำกว่าแบรีเออร์แบบเดิม โรลลิงแบรีเออร์ไม่ได้ทำหน้าที่ดูดซับพลังงานจากการปะทะ แต่ทำหน้าที่ปรับทิศทางการวิ่งของยานพาหนะให้เหมาะสม และลดความเร็วของยานพาหนะหลังการปะทะให้น้อยที่สุด

ความรุนแรงของอุบัติเหตุจากมุมมองที่มากหลังการชนของยานพาหนะพบได้ในแบรีเออร์แบบเดิม จากการทดสอบภาคสนามพบการกระเด็นออกจากโรลลิงแบรีเออร์น้อยมาก ในขณะเดียวกันยังพบว่าหลังการชนยานพาหนะจะวิ่งชนไปกับโรลลิงแบรีเออร์

2.11.7 P.M. Abhilash และคณะ [29] ศึกษาการพยากรณ์ความหนาแน่นของการทำปฏิกิริยาเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลภายในชิ้นงานยางยางธรรมชาติเหลี่ยมขนาดความหนา 2.0 เซนติเมตร ที่ให้ความร้อน 140 องศาเซลเซียส ซึ่งเกิดการกระจายตัวของความร้อนแตกต่างตามความหนาของชิ้นงาน เนื่องจากค่าการนำความร้อนของยางต่ำ การกระจายตัวของอุณหภูมิตามความหนาของชิ้นงานจะแตกต่างกันมาก ซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาการคงรูปเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลภายในแตกต่างกัน ส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกล และความเป็นเนื้อเดียวของวัสดุ



(ก)

(ข)

รูปที่ 2.6 แสดงการกระจายตัวของ (ก) อุณหภูมิตามความหนาของชิ้นงาน (ข) ความหนาแน่นการทำปฏิกิริยาเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลตามความหนาของชิ้นงาน



### บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาวิธีดำเนินการวิจัยเตรียมโพลีเมอร์อย่างธรรมชาติแห่ง เริ่มจากการเตรียมวัสดุอุปกรณ์และเครื่องจักรต่างๆ ที่ใช้ในการขึ้นรูปและการทดสอบตัวอย่าง โดยดำเนินการตามขั้นตอนต่อไปนี้

#### 3.1 วัสดุสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

- 3.1.1 ยางธรรมชาติชนิดแห้งเกรด STR 5L จาก บ.ถาวร ทีทีอาร์ อุตสาหกรรม
- 3.1.2 สารกระตุ้นปฏิกิริยา
  - 3.1.2.1 นาโนซิงค์ออกไซด์ จากบริษัทเอส เค ไปโอ โพรดักชั่น (ประเทศไทย) จำกัด
  - 3.1.2.2 กรดสเตียริก ผลิตโดย อีเมอริ ออริโอ เคมีคัล ประเทศมาเลเซีย
- 3.1.3 สารเร่งปฏิกิริยา
  - 3.1.3.1 เตตระเมทิลไทยูเรมไดซัลไฟด์ เกรดห้องปฏิบัติการ จาก บริษัทเวสเซล เคมีคัล จำกัด สาธารณรัฐประชาชนจีน
  - 3.1.3.2 ไซโครเฮกซิลเบนโซไทอะโซล ซัลโฟเอไมด์ ผลิตโดย บริษัทเซนยาง ซันนี่ จอย เคมีคัล จำกัด สาธารณรัฐประชาชนจีน
- 3.1.4 สารเกิดฟอง
  - 3.1.4.1 โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ของ KEMAUS เกรดห้องปฏิบัติการ ประเทศออสเตรเลีย
- 3.1.5 สารทำให้ยางคงรูป
  - 3.1.5.1 กำมะถัน ของ Giantleo เกรดอุตสาหกรรม
- 3.1.6 สารให้สี
  - 3.1.6.1 ไททาเนียมไดออกไซด์ ANATASE เกรด COTIOX KA-100 จากบริษัทคอสโมเคม จำกัด
- 3.1.7 สารตัวเติม
  - 3.1.7.1 แคลเซียมคาร์บอเนต ของ KEMAUS เกรดห้องปฏิบัติการ ประเทศออสเตรเลีย

#### 3.2 เครื่องจักร อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

- 3.2.1 เครื่องผสมสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) สัดส่วนความเร็วผิวลูกกลิ้ง 4 : 1 รุ่น YFTR 8” (YFH - 8” × 18” L) ของบริษัท ยงฟงแมชชีนเนอร์ จำกัด ประเทศไทย



รูปที่ 3.1 เครื่องผสมสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill)

3.2.2 เครื่องรีโอมิเตอร์แบบตายเคลื่อนที่ (Moving Die Rheometer, MDR) มาตรฐาน ASTM D 5289 - 95 ยี่ห้อ GOTECH รุ่น GT - M2000



รูปที่ 3.2 เครื่องรีโอมิเตอร์แบบตายเคลื่อนที่ (Moving Die Rheometer; MDR)



3.2.3 เครื่องอัดขึ้นรูปไฮดรอลิก (Compression molding) รุ่น YFYHM - 100T ของ บริษัท ยง ฟง แมชชีนเนอร์รี่ จำกัด ประเทศไทย



รูปที่ 3.3 เครื่องอัดขึ้นรูปไฮดรอลิก (Compression Molding)

3.2.4 เตาอบแบบพาความร้อน (Natural convection drying and heating chamber) ขนาด ความจุ 114 ลิตรน้ำ อุณหภูมิสูงสุดไม่เกิน 300 องศาเซลเซียส  $\pm 1.5$  องศาเซลเซียส ยี่ห้อ Binder รุ่น ED115



รูปที่ 3.4 เตาอบแบบพาความร้อน

3.2.5 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine) มาตรฐานตามข้อกำหนดของ ASTM สำหรับทดสอบการดูดซับแรงกดอัด โหลดเซลล์ขนาด 10 กิโลนิวตัน แผ่นรับ-กด (Compression plate) กลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร ยี่ห้อ LLOYD รุ่น LC

3.2.6 แม่พิมพ์เหล็กกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 44.5 ความสูง 20 มิลลิเมตร



3.2.7 แม่พิมพ์เหล็กรูปทรงโดนัทขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 13 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน - นอก 13 - 64 มิลลิเมตรตามลำดับ ความสูง 13 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.5 เครื่องทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM สำหรับใช้ทดสอบการดูดซับแรงกดอัด



รูปที่ 3.6 ภาพแสดงโหลดเซลล์ขนาด 10 กิโลนิวตัน และแป้นรับ - กดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร

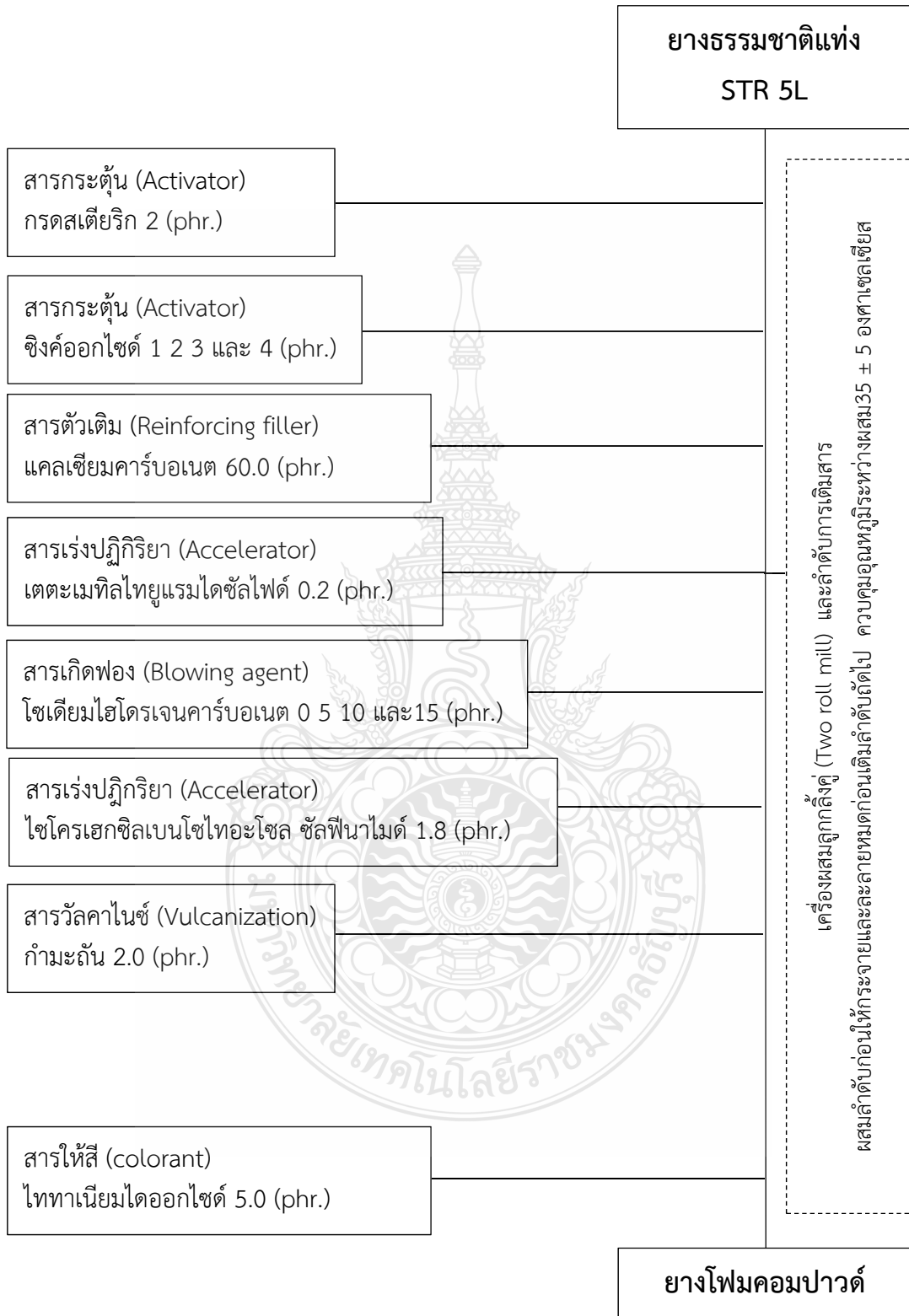


รูปที่ 3.7 แม่พิมพ์โลหะที่ใส่ยางโฟมคอมปาวด์ก่อนการขึ้นรูป

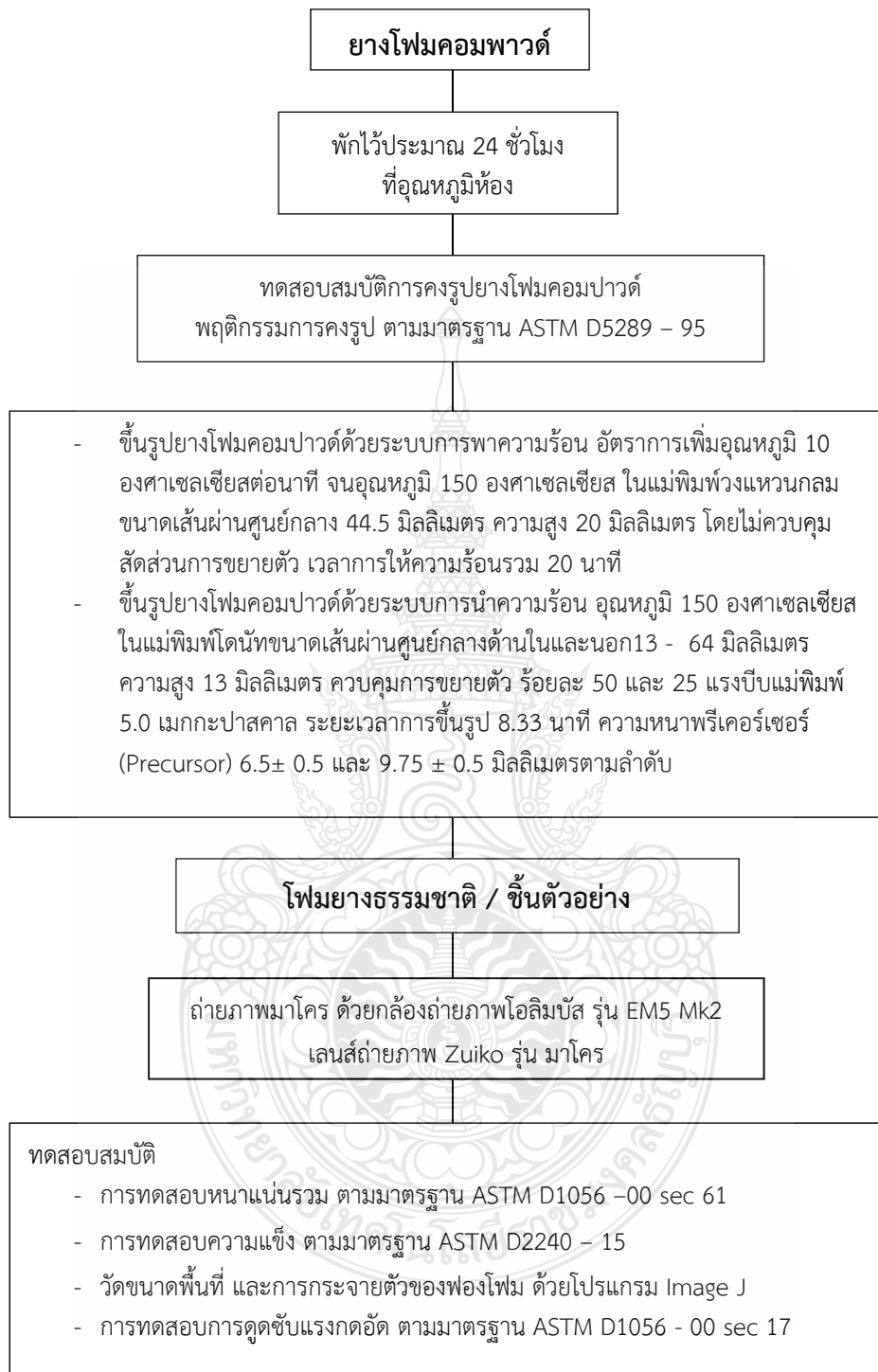


รูปที่ 3.8 แม่พิมพ์โลหะทรงโดนัทขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน - นอก 13 - 64 มิลลิเมตร ความสูง 13 มิลลิเมตร

### 3.3 รายละเอียดวิธีการวิจัย



รูปที่ 3.9 แสดงขั้นตอนการผสมยางโฟมคอมปาวด์



รูปที่ 3.10 แสดงขั้นตอนการขึ้นรูปโฟมยางธรรมชาติจากยางคอมพาวด์

### 3.4 กำหนดตัวแปรในการวิจัย

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรในการวิจัย

สารเคมี	สัดส่วนในร้อยละ (phr)			
ยางธรรมชาติแท่ง (STR 5L)	100	100	100	100
กรดสเตียริก (Stearic acid)	2	2	2	2
ซิงค์ออกไซด์ (ZnO)	1 - 4			
เตตระเมทิลไทอยูเรมไดซัลไฟด์(TMTD)	0.2	0.2	0.2	0.2
โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต (NaHCO <sub>3</sub> )	5 10 และ 15			
โซโครเฮกซิลเบนโซไดอะโซล ซัลฟิनाไมด์ (CBS)	1.8	1.8	1.8	1.8
กำมะถัน (S)	2	2	2	2
แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO <sub>3</sub> )	60	60	60	60
ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO <sub>2</sub> )	5	5	5	5

### 3.5 การตรวจสอบวิเคราะห์

#### 3.5.1 ทดสอบสมบัติของชิ้นงานโฟมยาง

3.5.1.1 เครื่องหาอุณหภูมิและเวลาคงรูปของยาง (Moving die rheometer/ MDR) [35] เป็นแบบที่ไม่ต้องใช้โรเตอร์ (Rotor) แต่ใช้การเคลื่อนไหวของตายน์ (Die) เป็นหลักในการทำงานเพื่อหาอุณหภูมิการคงรูป และเวลาที่ใช้สำหรับการทำให้ยางเริ่มคงรูป (scorch time) และเวลาคงรูป (Vulcanize หรือ Cure time) ทำรูถึงเวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสมในการผลิตผลิตภัณฑ์ ไม่ว่าจะเป็นอย่างชนิดใดหรือสูตรคอมปาวด์ใด ทั้งนี้เพื่อให้ผลิตภัณฑ์นั้นมีคุณภาพดี ใช้งานทนทาน และเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด นอกจากนั้นเครื่องหาอุณหภูมิและเวลาคงรูปของยาง สามารถใช้พัฒนาสูตรใหม่ๆ เพื่อพัฒนาคุณภาพผลิตภัณฑ์ให้ดียิ่งขึ้น หรือพัฒนาให้เกิดผลิตภัณฑ์ใหม่ๆ ได้

#### คำอธิบาย

$S'$  = กราฟของท็อกซ์ของความยืดหยุ่น (torque of elasticity) กับเวลา

$S''$  = กราฟของท็อกซ์ของความหนืด (torque of viscosity) กับเวลา

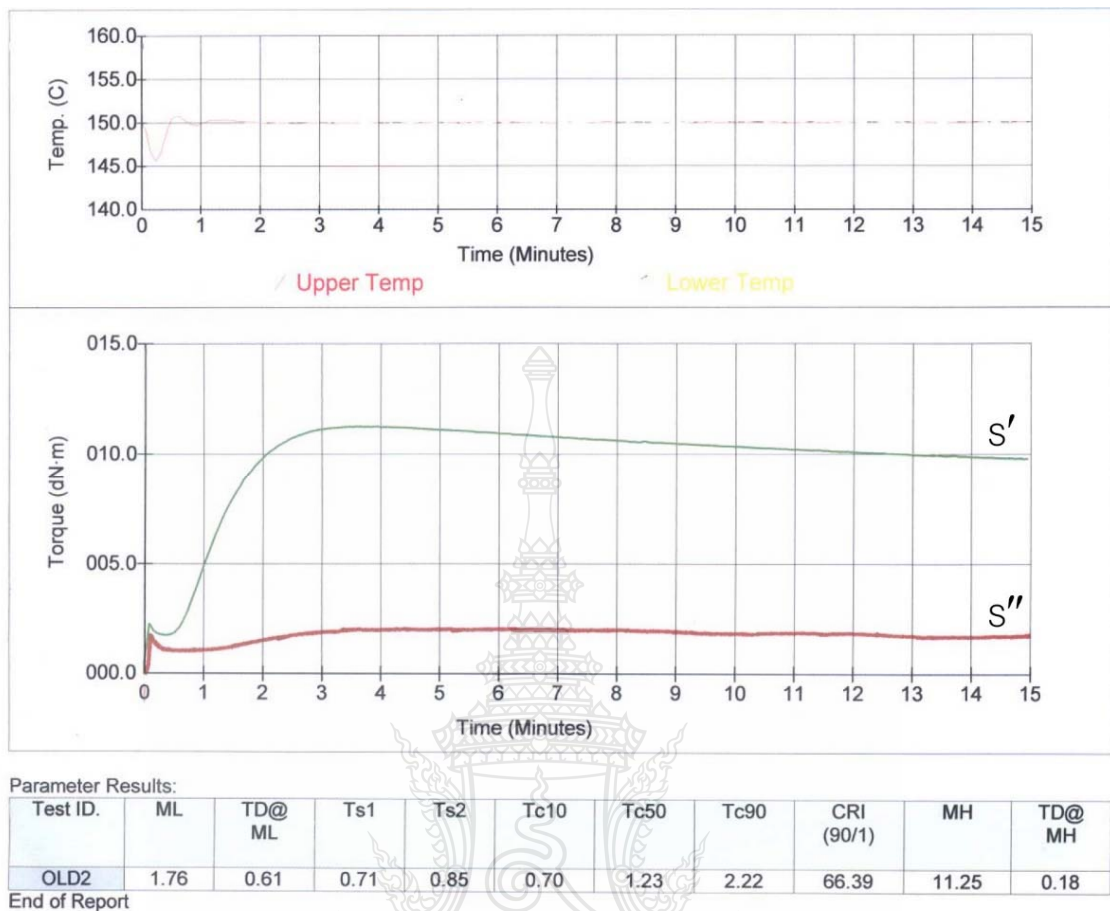
Temp. (c) = อุณหภูมิที่ยางเกิดปฏิกิริยาการคงรูป หรือ อุณหภูมิที่ใช้ในการ ทดสอบ (150°C)

ML = Lowest modulus of elasticity

= ค่าท็อกซ์ที่ความยืดหยุ่นต่ำสุด (minimum torque of elasticity)

MH = Highest modulus of elasticity

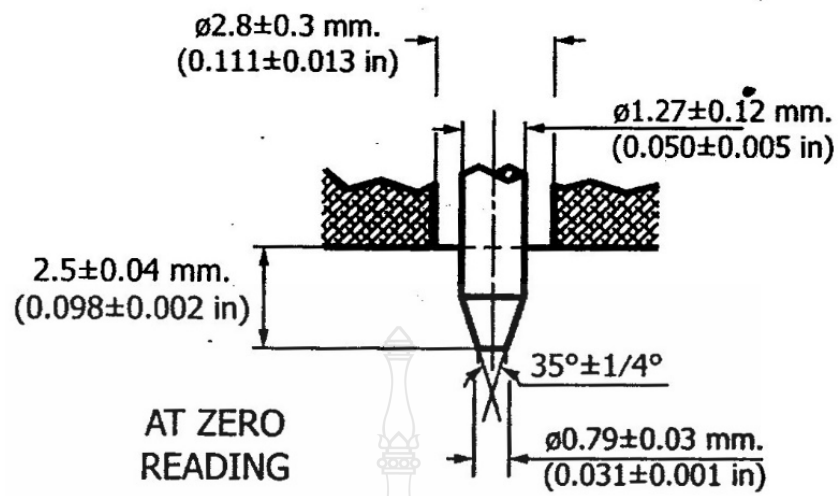
= ค่าท็อกซ์ที่ความยืดหยุ่นสูงสุด(maximum torque of elasticity)



รูปที่ 3.11 กราฟแสดงผลการทดสอบจากเครื่องเครื่องหาอุณหภูมิและเวลาทรงรูปของยาง [35]

3.5.1.2 การตรวจสอบความแข็ง (Rubber durometer hardness, ASTM D2240 - 15) [24] เป็นการวัดความแข็งยางธรรมชาติผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์ที่ไม่ผ่านการเคลือบผิวโดยใช้เครื่องดูโรมิเตอร์ (Durometer) ชนิดเอ (A) ความหนาชิ้นทดสอบไม่น้อยกว่า 6 มิลลิเมตร (กรณีความหนาของชิ้นทดสอบต่ำกว่ากำหนดสามารถวางซ้อนได้) ตำแหน่งที่ทดสอบจะต้องห่างจากขอบชิ้นทดสอบอย่างน้อย 12 มิลลิเมตร ชิ้นทดสอบต้องวางอยู่บนพื้นผิวที่เรียบแข็งแรง ผิวของชิ้นทดสอบต้องเรียบได้ระนาบเพื่อให้หัวกดสัมผัสได้เต็ม [27]





รูปที่ 3.12 ลักษณะหัวกดทดสอบความแข็งชนิดเอ [24]



รูปที่ 3.13 เครื่องทดสอบแรงกดตามมาตรฐาน ASTM D2240 – 15

ตารางที่ 3.2 แรงสปริงที่ใช้ทดสอบความแข็งชนิดเอ [24]

ค่าความแข็งของวัสดุ	แรงกดของเครื่องวัดดูโรมิเตอร์ (นิวตัน)
0 - 100	0.55 – 8.05 ( $\pm 0.075$ )

3.5.1.3 ความหนาแน่น (Density, ASTM D1056 – 00 sec61, ASTM D3575 - 00 sec 47) [22 23] เป็นการวัดความหนาแน่นของวัสดุที่บวมถึงโคมโครงสร้างแบบเปิดจากการคำนวณน้ำหนักและปริมาตรของชิ้นทดสอบซึ่งมีขนาดมากกว่า 16 ลูกบาศก์เซนติเมตร [26]

สูตรคำนวณความหนาแน่น

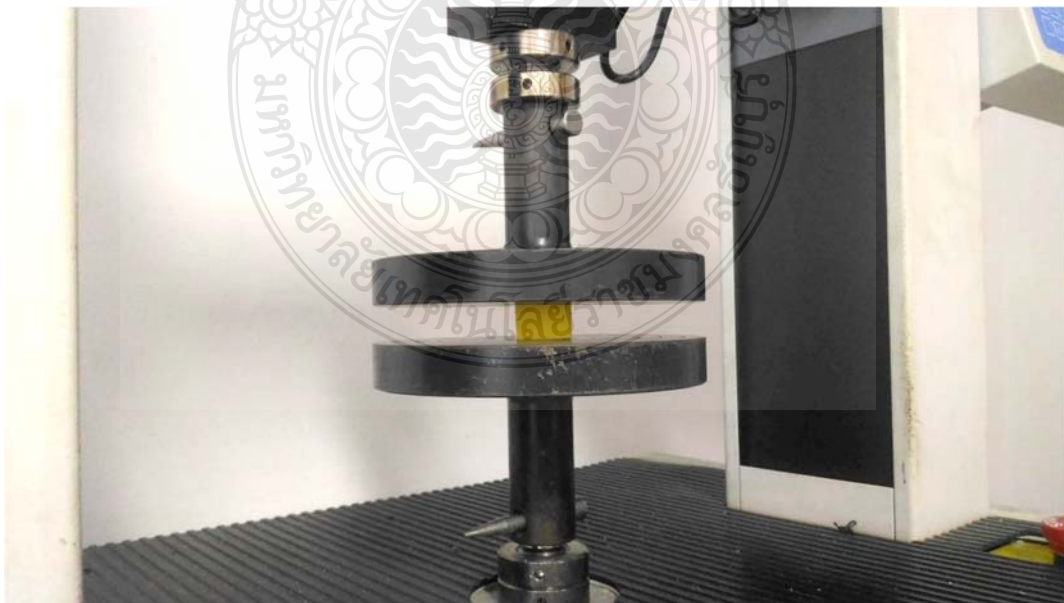
$$D = m / v \quad (3.1)$$

$D$  = ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

$m$  = น้ำหนักชิ้นทดสอบ (กิโลกรัม)

$v$  = ปริมาตรชิ้นทดสอบ (ลูกบาศก์เมตร)

3.5.1.4 การทดสอบการดูดซับแรงกดอัด ตามมาตรฐาน (ASTM D1056 - 00 sec 17) [22] เป็นการทดสอบเพื่อหาแรงกดอัดสำหรับกดชิ้นทดสอบเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างร้อยละ 25 (ความละเอียดที่ใช้วัดไม่น้อยกว่า 0.5 มิลลิเมตร) กำหนดให้ความเร็วในการกดอยู่ระหว่าง 12.5 – 50.8 มิลลิเมตรต่อนาที (ความเร็วที่กำหนดเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดแรงกระแทก) ขนาดของชิ้นงานให้เป็นไปตามรูปที่ 3.14 ความหนาของชิ้นงานแต่ละชั้นไม่น้อยกว่า 6.00 มิลลิเมตร (กรณีชิ้นงานบางสามารถนำมาซ้อนกันได้ แต่ต้องเป็นการเตรียมจากการผสมในครั้งเดียวกัน) ความหนาที่ชิ้นทดสอบรวมไม่น้อยกว่า 12.7 มิลลิเมตร หัวกดชิ้นงานทดสอบกำหนดให้มีพื้นที่หน้าตัดมากกว่าชิ้นงาน



รูปที่ 3.14 การทดสอบการดูดซับแรงกดอัดด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์



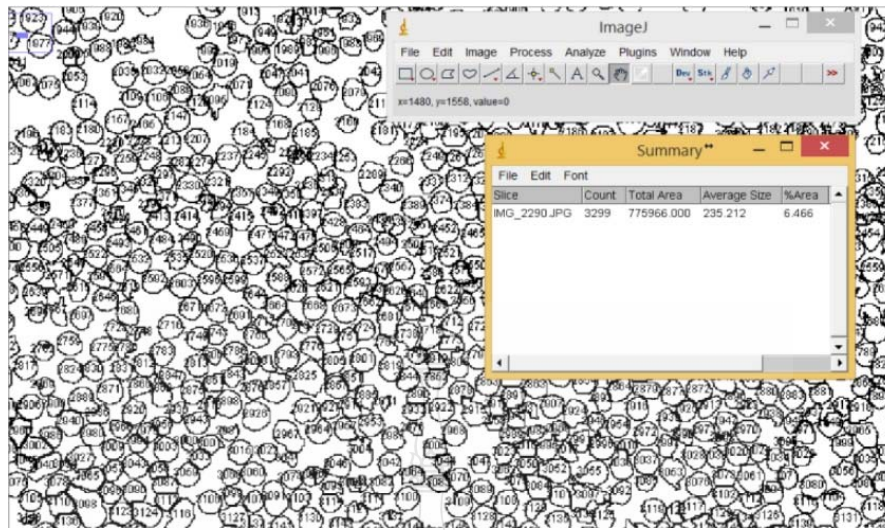
### 3.5.2 การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ

3.5.2.1 การถ่ายภาพมาโคร เป็นการถ่ายภาพระบบดิจิทัลยี่ห้อ โอลิมปัส EM5 mk2 ขนาดความละเอียด 16 ล้านพิกเซล กับเลนส์ถ่ายภาพมาโคร Zuiko ขนาดความยาวโฟกัส 50 (x2) มิลลิเมตร กำลังขยาย 2 : 1 เพื่อเปรียบเทียบ และตรวจสอบลักษณะการเกิดขนาดฟองโฟม และการกระจายตัว ไฟล์ภาพที่ถ่ายจะเป็น raw หรือ jpeg ที่สามารถนำไปใช้วิเคราะห์สำหรับโปรแกรมอิมเมจเจ [31] ได้



รูปที่ 3.15 กล้องถ่ายภาพมาโคร Olympus EM5 Mk2 กับเลนส์มาโคร Zuiko ความยาวโฟกัส 50 มิลลิเมตร อัตราขยาย 2 : 1

3.6.2.2 การหาขนาดของเซลล์ และจำนวนเซลล์ต่อพื้นที่ โปรแกรมประมวลผลภาพเพื่อประเมินค่านวนหาพื้นที่และปริมาณพิกเซล (Pixel) เพื่อมาใช้ในวิทยาศาสตร์ ชื่อ “อิมเมจเจ” ถูกพัฒนาขึ้นโดย เวย์ รัสแบนด์ (Wayne Rasband) และ สถาบันสุขภาพแห่งชาติ (The National Institute of Health, NIH) ประเทศสหรัฐอเมริกา ประเภทไฟล์ข้อมูลภาพถ่ายที่สามารถใช้วิเคราะห์ ได้แก่ TIFF GIF JPEG BMP DICOM FIT และ RAW ไป การวิเคราะห์ของโปรแกรมใช้เทียบเคียงความละเอียดของจุดพิกเซลในภาพกับหน่วยความยาวสากลจากการกำหนดโดยผู้ใช้งานเริ่มต้นใช้งานวิเคราะห์



รูปที่ 3.16 การนับจำนวนไขปลาด้วยโปรแกรมอิมเมจเจ [21]



## บทที่ 4

### ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

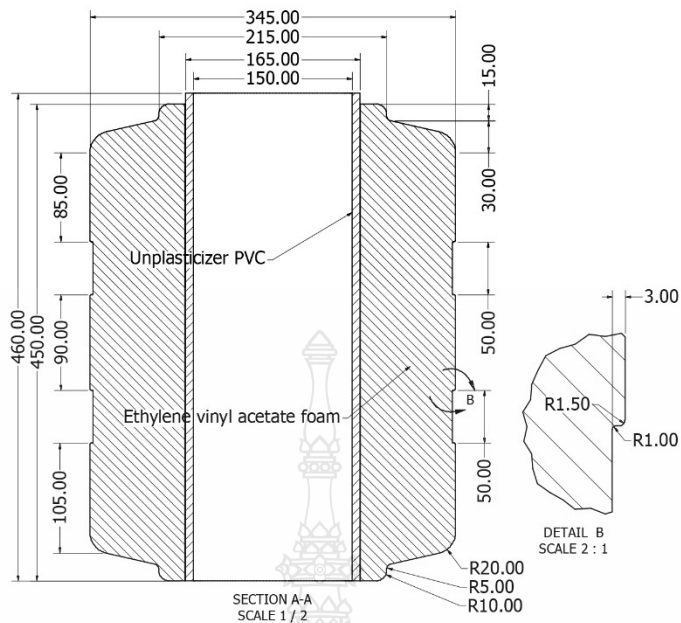
#### 4.1 ผลการศึกษาชิ้นงานตัวอย่างโรลลิงแบรีเออร์จราจร

ชิ้นตัวอย่างโรลลิงแบรีเออร์จราจรนี้ รูปที่ 4.1 ได้รับการอนุเคราะห์จากแขวงทางหลวงพิเศษระหว่างเมือง หมายเลข 9 (กรุงเทพ – ชลบุรี) วัสดุที่ใช้ผลิตชิ้นตัวอย่างนี้ คือ โฟมเอทิลีนไวนิลอะซิเตต (Ethylene-vinyl acetate, EVA) ผลิตจากประเทศสาธารณรัฐเกาหลี (เกาหลีเหนือ) รายละเอียดระบุตามเอกสารทดสอบการใช้งานแนบท้ายภาคผนวก



รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายชิ้นตัวอย่างโรลลิงแบรีเออร์จราจร จากแขวงทางหลวงพิเศษระหว่างเมือง หมายเลข 9 (กรุงเทพ-ชลบุรี)

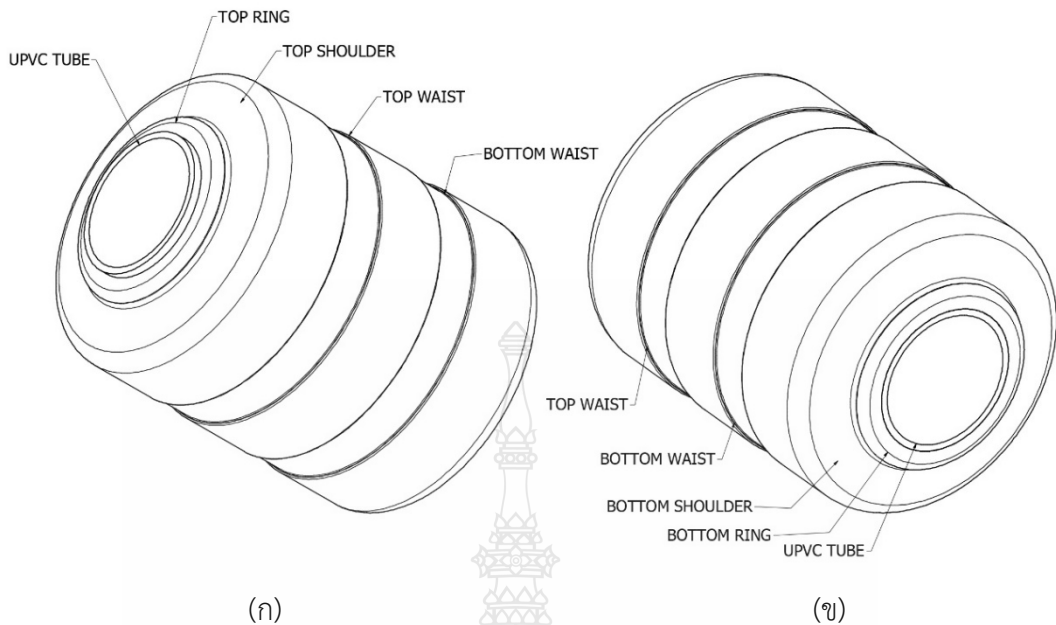
จากรูปที่ 4.1 โฟมเอทิลีนไวนิลอะซิเตต เป็นพอลิเมอร์ที่นิยมใช้ทำโฟม เพราะพอลิเมอร์ชนิดนี้ทนต่อสภาวะสิ่งแวดล้อม ความร้อน และน้ำมัน สามารถใช้งานได้ทั้งภายใน และภายนอกอาคารพอลิเมอร์ชนิดนี้ง่ายต่อการควบคุมคุณภาพระหว่างกระบวนการผลิตส่วนประกอบของชิ้นงานโรลลิงแบรีเออร์จราจร ด้านนอกเป็นวัสดุโฟมเอทิลีนไวนิลอะซิเตตสีเหลืองเพื่อง่ายต่อผู้ขับขี่ยานพาหนะสังเกตเห็น ลักษณะพื้นผิวขรุขระมีรูพรุนเล็กน้อย บริเวณด้านข้างมีแถบพอลิเมอร์สะท้อนแสงความกว้าง 50 มิลลิเมตร จำนวน 2 แถบ คาดโดยรอบชิ้นงาน แกนด้านในทำวัสดุพอลิไวนิลคลอไรด์ (Unplasticizer Polyvinyl chloride, UPVC) น้ำหนักชิ้นงานจากการชั่งเท่ากับ 7.8 กิโลกรัม



รูปที่ 4.2 แสดงขนาดขึ้นตัวอย่างโฟมโรลลิงแบรีเออร์จรรยา

จากรูปที่ 4.2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก และภายในของขึ้นตัวอย่างโรลลิงแบรีเออร์จรรยาที่วัดได้เท่ากับ 345.0 และ 165.0 มิลลิเมตรตามลำดับ ความสูงของชิ้นงานส่วนที่เป็นโฟมพอลิเอทิลีน - ไวนิลอะซีเตต เท่ากับ 450.0 มิลลิเมตร โดยมีส่วนด้านข้างสำหรับรับการกระแทกมีความสูง 400.0 มิลลิเมตร และมีร่องกว้าง 50.0 มิลลิเมตร ลึก 3.0 มิลลิเมตรจำนวน 2 ร่อง ห่างกัน 90 มิลลิเมตร ด้านในเป็นท่อพลาสติกพอลิไวนิลคลอไรด์สีขาวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอก - ใน 165 และ 150 มิลลิเมตรตามลำดับ ความสูงของท่อพลาสติกพอลิไวนิลคลอไรด์ 460 มิลลิเมตร ซึ่งมีความสูงมากกว่า ส่วนของโฟมพอลิเอทิลีน-ไวนิลอะซีเตต 10 มิลลิเมตร เหตุจากวัตถุประสงค์ของออกแบบที่จะให้วัสดุท่อทำหน้าที่รับน้ำหนักของโรลลิงทั้งหมด

ปริมาตรส่วนโฟมพอลิเอทิลีน-ไวนิลอะซีเตต คำนวณตามแบบรูปเท่ากับ 29,366 ลูกบาศก์-เซนติเมตร เมื่อคำนวณกับความหนาแน่นรวมเฉลี่ย 0.129 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร พบส่วนโฟมพอลิเอทิลีน-ไวนิลอะซีเตตมีน้ำหนัก 37,88.2 กรัม ปริมาตรส่วนท่อพอลิไวนิลคลอไรด์ คำนวณตามแบบรูปเท่ากับ 1,707.0 ลูกบาศก์เซนติเมตร เมื่อคำนวณกับความหนาแน่นท่อพอลิไวนิลมาตรฐาน 1.40 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร พบค่าน้ำหนักจากการคำนวณ 2,389.8 กรัม น้ำหนักรวมของโรลลิงแบรีเออร์จรรยาจากการคำนวณ เท่ากับ 6,178 กรัม หรือ 6.178 กิโลกรัม



รูปที่ 4.3 รูปแสดงชื่อเรียกของชิ้นงานโรลลิงแบรีเออร์ (ก) ด้านบน (ข) ด้านล่าง

จากรูปที่ 4.3 การออกแบบโรลลิงแบรีเออร์จรรยาใช้ท่อพอลิไวนิลคลอไรด์ที่เป็นวัสดุที่ทนทานต่อสภาวะแวดล้อม และมีแรงเสียดทานต่ำเมื่อติดตั้งอยู่กับส่วนโครงสร้างโลหะ แรงเสียดทานที่ต่ำจะช่วยให้โรลลิงแบรีเออร์หมุนอย่างอิสระเพื่อเปลี่ยนมุมการชน (Crash angle) และลดมุมจาก (Reflection angle) ของยานพาหนะที่มาปะทะกับโรลลิงแบรีเออร์จรรยา เหตุจากการสูญเสียการควบคุม นอกจากนั้นวัสดุท่อพอลิไวนิลคลอไรด์ยังทำหน้าที่รับน้ำหนักโพนีเอทิลีน-ไวนิลอะซิเตต เนื่องจากวัสดุพอลิเมอร์มีจุดอ่อนของความคราก (Creep) และการคืนตัวถาวรหลังรับแรงอัด (Compression set) จากการรับน้ำหนักตัวเองในสภาวะอุณหภูมิสูงเป็นระยะเวลานาน ส่วนทอป (Top) และบอทท่อมริง (Bottom ring) เป็นการออกแบบเพื่อลดความคลาดเคลื่อนจากกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานวัสดุโพนีเอทิลีน-ไวนิลอะซิเตตที่อาจกระทบต่อการหมุนอย่างอิสระของโรลลิงแบรีเออร์จรรยา บริเวณทอป (Top) และบอทท่อมโพลเดอร์ (Bottom shoulder) ออกแบบให้มีระนาบเอียงเพื่อรองรับการเปลี่ยนรูป (Deformation) ของโพนีเอทิลีน-ไวนิลอะซิเตต ขณะที่ยานพาหนะมาปะทะ ซึ่งมุมระนาบเอียงจะต้องมีเพียงพอที่รองรับการเปลี่ยนรูปนี้จะไม่ขัดขวางการหมุนเพื่อเปลี่ยนมุมการชน และลดมุมจากของยานพาหนะทอป (Top) และบอทท่อมเวสต์ (Bottom waist) ออกแบบเพื่อกำหนดตำแหน่งติดตั้ง และลดโอกาสความเสียหายหลังจากการชนของแถบพอลิเมอร์สะท้อนแสง เนื่องจากวัสดุโพนีเอทิลีน-ไวนิลอะซิเตต และแถบพอลิเมอร์สะท้อนแสงมีความยืดหยุ่นแตกต่างกันมากจึงไม่สามารถใช้สารประสานระหว่างผิวของวัสดุทั้งสองได้ การประสานแบบเกย (Offset) ระหว่างปลายทั้งสองด้านของแถบพอลิเมอร์สะท้อนแสงด้วยสารประสาน หรือกาวยหลังจากการพันลงในร่องดังกล่าวแทน



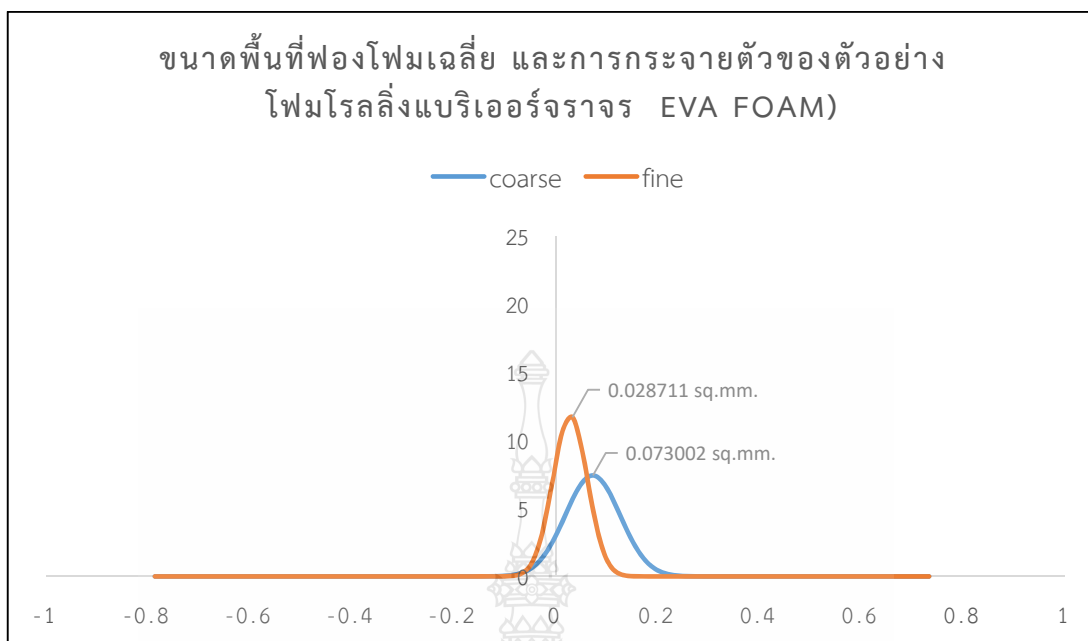


รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายตัดขวางชิ้นตัวอย่างโฟมโพลีเอทิลีนแบรีเออร์จรรยาจรตัวอย่าง



รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายตัดขวางแสดงความแตกต่างขนาดฟองโฟมภายในชิ้นตัวอย่างโฟมโพลีเอทิลีนแบรีเออร์จรรยาจร

จากรูปที่ 4.4 และ 4.5 เมื่อทำการตัดผ่าขวางชิ้นตัวอย่างโฟมโพลีเอทิลีนแบรีเออร์จรรยาจรตัวอย่าง และพิจารณาด้วยสายตา และภาพถ่ายมาโคร พบความแตกต่างของขนาดฟองโฟมบริเวณชั้นผิวด้านใน และนอกมีความแตกต่างจากบริเวณส่วนกลาง กล่าวคือบริเวณในจะมีขนาดของฟองโฟมที่หยาบกว่าด้านนอก ทั้งสองด้าน เมื่อตรวจสอบโดยการวัดพบว่าส่วนผิวฟองโฟมละเอียดด้านนอกวัดได้ประมาณ 40 มิลลิเมตร และด้านในประมาณ 20 มิลลิเมตร บริเวณส่วนกลางที่เป็นฟองโฟมหยาบจะมีความลึกประมาณ 30 มิลลิเมตร แต่การกระจายตัวของฟองโฟมละเอียด และหยาบนี้ไม่ได้เกิดขึ้นสม่ำเสมอทั้งรอบชิ้นงาน ลักษณะฟองโฟมที่พบเป็นแบบปิด (Closed cell foam) ซึ่งเหมาะกับการใช้งานที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับแรง



**รูปที่ 4.6** แสดงขนาดพื้นที่ฟองโฟมเฉลี่ย และการกระจายตัวของชิ้นตัวอย่างโฟมโรลิ่งแบรีเออร์จราจร ที่ผลิตจากวัสดุโฟมเอทิลีนไวนิลอะซิเตท

จากรูปที่ 4.6 พอลิเอทิลีนเป็นวัสดุพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติก แบบกึ่งผลึก (Semi-crystalline) และแบบอสัณฐาน (Amorphous) ขึ้นอยู่กับสัดส่วนไวนิลอะซิเตทที่ผสมในเอทิลีน แต่สมบัติเด่นอีกประการของพอลิเอทิลีน-ไวนิลอะซิเตท คือ สามารถผสม (Compound) และวัลคาไนซ์ (Vulcanize) ด้วยลูกกลิ้งผสมเช่นเดียวกับการผสมยางธรรมชาติ แล้วจึงทำปฏิกิริยาการคงรูปให้เกิดโครงสร้างแบบเชื่อมขวาง (Cross-linked) สามมิติเป็นของแข็งด้วยความร้อน การทำโฟมพอลิเอทิลีน-ไวนิลอะซิเตทใช้สารเกิดฟองที่สลายตัวเป็นก๊าซที่สร้างฟองเมื่อได้รับความร้อน [33] สารเกิดฟองที่นิยมใช้คือ เอโซไดคาร์บอนามิด (Azodiabonamide) ที่แตกตัวให้ก๊าซไนโตรเจน แอมโมเนีย คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ อุณหภูมิเริ่มสลายตัวระหว่าง 130 – 230 องศาเซลเซียส การกระจายตัวของสารเกิดฟองภายในพอลิเอทิลีน-ไวนิลอะซิเตทได้ดีกว่ายางธรรมชาติ และพอลิเอทิลีน-ไวนิลอะซิเตทมีความหนืดขณะหลอมต่ำจึงสามารถเกิดฟองก๊าซได้มาก และมีขนาดใหญ่เนื่องจากการแตกรวมกันของฟองก๊าซขนาดเล็กข้างเคียง (Cell coalescence) พอลิเมอร์มีสมบัติการเป็นฉนวนความร้อนรวมถึงฟองก๊าซที่เกิดขึ้น ความแตกต่างของการแพร่ความร้อนตามระยะความหนาของชิ้นงานทำให้อัตราการเพิ่ม – ลดอุณหภูมิที่แตกต่างกันโดยบริเวณกลางของชิ้นงาน อุณหภูมิที่แตกต่างกันส่งผลถึงระยะเวลาในการเริ่มคงรูป และคงรูป รวมถึงอัตราการเกิดการคงรูป [29] อัตราการเพิ่มอุณหภูมิจากบริเวณส่วนกลางของชิ้นงานที่มีความหนาทำให้ระยะเวลาเริ่มคงรูป และคงรูปนานกว่าผิวภายนอกทั้ง 2 ด้าน ความหนืดของวัสดุเมทริกซ์เกิดขึ้นช้าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงถึงจุดการสลายตัวของสารเกิดฟอง แต่การเริ่มคงรูป และการคงรูปเกิดขึ้น

ซ้ำ ขนาดฟองก๊าซเฉลี่ยที่เกิดขึ้นจะมีขนาดใหญ่ 0.073002 ตารางมิลลิเมตรและมีค่ากระจายตัวของขนาดฟองมากกว่า ในทางตรงกันข้ามที่บริเวณผิวด้านนอกทั้งสองรับการถ่ายเทความร้อนได้มาก และเร็ว อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ หรือพลังงานความร้อนได้เร็ว ระยะเวลาการเริ่มคงรูป และการคงรูปเกิดขึ้นเร็ว ความหนืดของวัสดุเมทริกซ์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ขนาดฟองก๊าซที่เกิดขึ้นช่วงอุณหภูมิสลายตัวของสารเกิดฟองจึงมีขนาดเล็ก 0.028711 ตารางมิลลิเมตร และการกระจายตัวของขนาดที่น้อยกว่า

**ตารางที่ 4.1** แสดงค่าความหนาแน่นรวม (Bulk density) ขึ้นตัวอย่างโฟมโพลีเอทิลีนแบรีเออร์จราจร

ขึ้นตัวอย่างโฟมโพลีเอทิลีนแบรีเออร์จราจร	ความหนาแน่นรวม กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
ส่วนชิ้นงานด้านนอก ละเอียด (fine)	0.136
ส่วนชิ้นงานด้านใน หยาบ (coarse)	0.122
ความหนาแน่นรวมเฉลี่ย	0.129

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความหนาแน่นส่วนชิ้นงานด้านนอก ละเอียด (fine) เพราะการรับถ่ายเทความร้อนจากแหล่งกำเนิดเริ่มจากด้านนอกของชิ้นงาน ความร้อนที่ได้รับส่งผลให้อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิเกิดขึ้นเร็ว [29] เมื่อถึงอุณหภูมิที่สารเกิดฟองสลายตัว ใกล้กับเวลาเริ่มคงรูป และคงรูปของวัสดุเมทริกซ์ความหนืดจึงมีมาก การเกิดฟองจึงเกิดได้ยาก ฟองที่ได้มีขนาดเล็ก ค่าความหนาแน่นรวมที่ได้จึงมีค่าสูงถึง 0.136 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งแตกต่างจากส่วนชิ้นงานด้านใน หยาบ (coarse) ที่พลังงานความร้อนที่ได้รับมีการเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ เนื่องจากสมบัติวัสดุเมทริกซ์พอลิเมอร์ และฟองก๊าซที่เกิดขึ้นมีความต้านทานต่อการนำความร้อน ฟองโฟมที่เกิดขึ้นมีขนาดใหญ่ และการกระจายตัวของขนาดเฉลี่ยมากทำให้ค่าความหนาแน่นรวมมีค่า 0.122 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งต่ำกว่าส่วนชิ้นงานด้านนอก

**ตารางที่ 4.2** แสดงค่าความแข็ง (Hardness / Shore A) ขึ้นตัวอย่างโฟมโพลีเอทิลีนแบรีเออร์จราจร

ขึ้นตัวอย่างโฟมโพลีเอทิลีนแบรีเออร์จราจร	ความแข็ง Shore A
ส่วนชิ้นงานด้านนอก ละเอียด (fine)	26.4
ส่วนชิ้นงานด้านใน หยาบ (coarse)	20.2

**ตารางที่ 4.3** แสดงค่าความต้านทานต่อแรงกดอัด (Compression deflection) ขึ้นตัวอย่างโฟมโพลีเอทิลีนแบรีเออร์จราจร

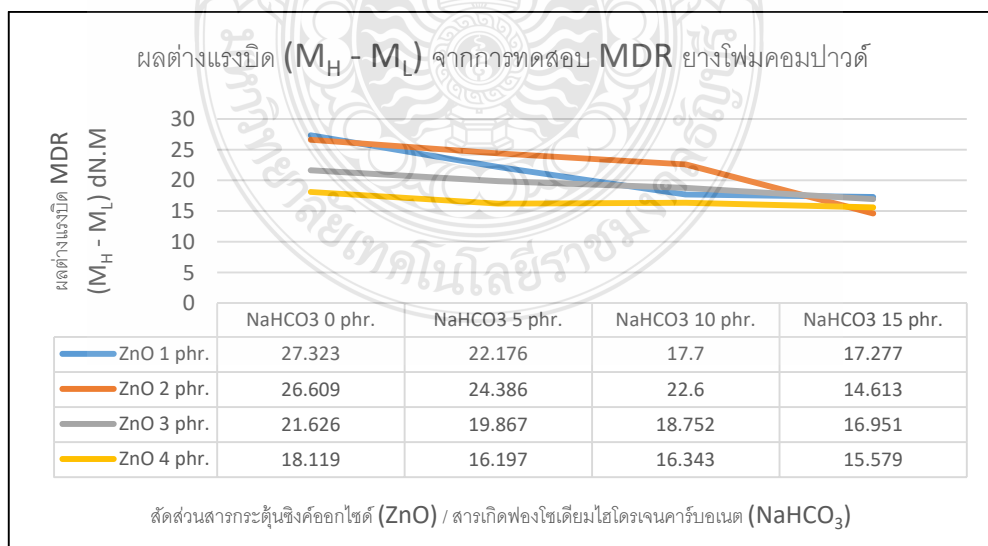
ขึ้นตัวอย่างโฟมโพลีเอทิลีนแบรีเออร์จราจร	ค่าความต้านทานต่อแรงกดอัด (นิวัตน์ต่อตารางมิลลิเมตร)
ส่วนชิ้นงานด้านนอก ละเอียด (fine)	0.166
ส่วนชิ้นงานด้านใน หยาบ (coarse)	0.095



ตารางที่ 4.2 และ 4.3 ขนาดฟองโฟมเฉลี่ยที่เล็ก และการกระจายตัวของขนาดที่แคบ ซึ่งหมายถึงมีเนื้อวัสดุมากกว่า ค่าความหนาแน่นรวมจะสูง วัสดุจะสามารถรับแรงกดได้มากกว่าค่าความแข็งจะมีค่าสูง คือ 26.4 Shore A และสอดคล้องถึงค่าความต้านทานต่อแรงกดอัด 0.166 นิวตันต่อตารางเมตร ขนาดฟองโฟมเฉลี่ยที่ใหญ่ และการกระจายตัวของขนาดที่กว้าง ปริมาณเนื้อวัสดุที่จะใช้รับแรงจะค่าต่ำกว่า คือ 20.2 Shore A และสอดคล้องถึงค่าความต้านทานต่อแรงกดอัด 0.095 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร ซึ่งน้อยกว่าส่วนชิ้นงานด้านนอกที่มีฟองโฟมละเอียด

#### 4.2 สมบัติการคงรูปของยางโฟมคอมปาวด์

ปฏิกิริยาการคงรูปจะมีเกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพ (Physical properties) ของยางคอมปาวด์จากความหนืดต่ำเป็นวัสดุยืดหยุ่น การเกิดปฏิกิริยาการคงรูปมีความซับซ้อนพิจารณาตามกราฟเปรียบเทียบ อุณหภูมิ แรงบิดที่ใช้วัด กับระยะเวลาออกได้เป็น 3 ช่วง ในช่วงแรก คือระยะเวลาเคียวดีเลย์ (cure delay) หรือ อินดักชั่น (induction) เป็นผลมาจากการเลือกใช้สารเร่งปฏิกิริยา (accelerator) เป็นช่วงที่วัสดุเมทริกซ์มีความหนืดต่ำ เนื่องจากความหนาแน่นปฏิกิริยาเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุล (Crosslink density) เกิดขึ้นน้อยและช้า การเกิดปฏิกิริยาในช่วงสอง คือ เคียวพีเรียด (cure period) ซึ่งเป็นช่วงที่เกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงโครงสร้างเคมีสายโซ่โมเลกุลมีมาก และเร็วขึ้น การเกิดปฏิกิริยาในช่วงสุดท้าย คือ โอเวอร์เคียว (over cure) เมื่อปฏิกิริยาการคงรูปของยางผ่านจากจุดค่าแรงบิดสูงสุดที่ใช้วัดความหนืดซึ่งเทียบได้กับระดับของการทำปฏิกิริยาเชื่อมโยงโครงสร้างเคมีสายโซ่โมเลกุลการคงรูปของยางคอมปาวด์ และสมบัติเชิงกลของวัสดุ การทดสอบสมบัติการคงรูปของยางธรรมชาติสามารถได้ด้วยเครื่อง Moving Die Rheometer (MDR) ซึ่งใช้เทคนิคในการวัดค่าการคงรูปของยางผ่านแรงบิดที่ใช้ที่แสดงถึงค่าความหนาแน่นในการทำปฏิกิริยาในการคงรูป (Crosslinking density) ที่เป็นสัดส่วนกับความหนืดของยางคอมปาวด์ [35]

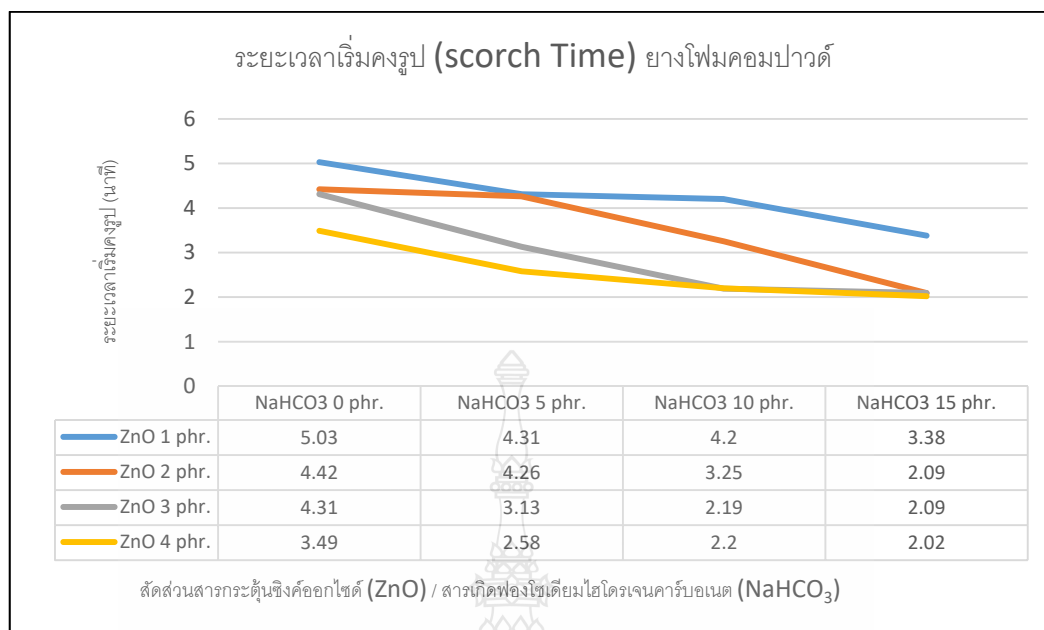


รูปที่ 4.7 กราฟแสดงค่าผลต่างแรงบิด ( $M_H - M_L$ ) มิวิงดาเยนรีโอมิเตอร์ (dN.m)

จากภาพที่ 4.7 พบสัดส่วนสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 0 ส่วนในร้อยส่วน กับสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 2 3 และ 4 มีค่าลดลงคือ 27.323 26.609 21.626 และ 18.119 เดนซิวิตัน-เมตร ตามลำดับ เนื่องจากสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์เป็นสารเร่ง หรือกระตุ้นปฏิกิริยาในยางคอมปาวด์ และเป็นสารหล่อลื่นช่วยในการกระจายตัว และการไหลของยาง ผลต่างแรงบิดจึงลดลงตามปริมาณสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น

เมื่อเพิ่มสัดส่วนสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 5 10 และ 15 ส่วนในร้อยส่วน พบค่าผลต่างแรงบิดของสัดส่วนของสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 2 และ 3 ส่วนในร้อยส่วนลดลงเหลือ 17.277 14.613 16.951 และ 15.579 เดนซิวิตัน-เมตร เนื่องจากอุณหภูมิสำหรับการทดสอบสมบัติการคงรูปยางโพลีคอมปาวด์ คือ 150 องศาเซลเซียส อุณหภูมิการสลายตัวของสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตเริ่มต้นที่ 50 องศาเซลเซียส และจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อถึงอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสค่าผลต่างแรงบิดที่ลดลงตามสัดส่วนของสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตที่เพิ่มขึ้นการเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขนาดใหญ่จำนวนมากขึ้นในช่วงเคียวดีเลย์ (Cure delay) หรือ อินดักชัน (Induction) และฟองขนาดเล็ก (Micro voids) ในช่วงเคียวพีเรียด (Cure period) จากสมบัติของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สามารถละลายได้ดีในพอลิเมอร์ ฟองขนาดเล็กที่เกิดขึ้นจึงสามารถแทรกซึม และฝังตัวอยู่ระหว่างสายโซ่โมเลกุลช่วยให้การเคลื่อนตัวของสายโซ่โมเลกุลจึงเกิดขึ้นได้ง่ายความเค้นเฉือนที่ใช้จึงลดลง ค่าส่วนต่างแรงบิดจึงมีแนวโน้มลดลงระยะเวลาในการเริ่มคงรูป หรือ เคียวดีเลย์ (Cure delay) หรือ อินดักชัน (induction) สิ้นลง [18]

ผลต่างค่าแรงบิดที่ลดลงตามสัดส่วนของสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตเนื่องจากปฏิกิริยาการสลายตัวของสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตเป็นปฏิกิริยาการดูดความร้อน (Endothermic) ซึ่งดูดซับความร้อนที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาการคงรูปของยาง และปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดมากขึ้นตามสัดส่วนของสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตที่เพิ่มขึ้นแทรกตัวอยู่ระหว่างสายโซ่โมเลกุลขัดขวางการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุล พบว่าสัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 4 ส่วนในร้อยส่วน กับสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 5 10 และ 15 ส่วนจะผลต่างค่าแรงบิดที่เกือบคงที่คือ 16.197 16.343 และ 15.579 เดนซิวิตัน-เมตร

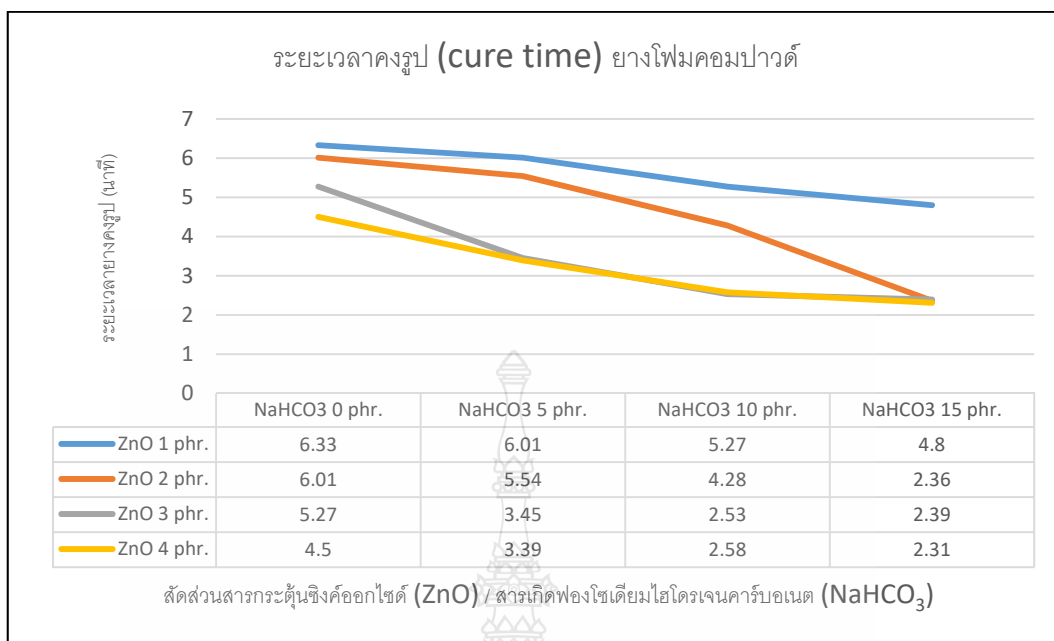


รูปที่ 4.8 กราฟแสดงระยะเวลาเริ่มคงรูป (scorch time) (นาที)

จากรูปที่ 4.8 พบสัดส่วนสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 0 ส่วน กับสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 2 3 และ 4 ส่วนในร้อยละ มีระยะเวลาในการเริ่มคงรูป หรือ เคียวดีเลย์ (Cure delay) หรือ อินดักชั่น (induction) สั้นลงตามลำดับ คือ 5.03 4.42 4.31 และ 3.49 นาที สัดส่วนสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 5 10 และ 15 ส่วนในร้อยละ กับปริมาณสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น ระยะเวลาในการเริ่มคงรูป หรือ เคียวดีเลย์ (Cure delay) หรือ อินดักชั่น (induction) มีแนวโน้มลดลงทั้งหมด

สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 3 ส่วนในร้อยละ กับ สารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 10 ส่วนในร้อยละ มีระยะเวลาในการเริ่มคงรูปลดลงใกล้เคียงสัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 4 ส่วนในร้อยละ กับสารเกิดฟองโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 และ 15 ส่วนในร้อยละ ระหว่าง 2.19 – 2.02 นาที

สารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เมื่อผสมกับกรดสเตียริกจะได้สารประกอบที่ละลายได้ดีในยางธรรมชาติ สารประกอบนี้จะช่วยให้การเกิดปฏิกิริยาเริ่มคงรูปได้เร็วขึ้น รวมถึงเป็นสารกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยาการคงรูปในยางคอมปาวด์ [25]



**รูปที่ 4.9** กราฟแสดงระยะเวลาคงรูปยาง (cure time) (นาที)

จากรูปที่ 4.9 พบว่าสัดส่วนสารเกิดฟอง 0 ส่วนในร้อยละ 10 กับสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 2 3 และ 4 ส่วนในร้อยละ 10 มีระยะเวลาคงรูป หรือ เคียวพีเรียด (Cure period) ลดลง 6.33 6.01 5.27 และ 4.5 นาทีตามลำดับ สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 ส่วนในร้อยละ 10 กับ สารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตลดลงอย่างเป็นสัดส่วนคงที่ คือ 6.33 6.1 5.27 และ 4.8 นาที ระยะเวลาในการคงรูปที่มีสัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 2 ส่วนในร้อยละ 10 จะลดลงมากในช่วงสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 5 และ 10 ส่วนในร้อยละ 10 คือ 5.54 และ 4.28 นาทีตามลำดับ สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 3 และ 4 ส่วนในร้อยละ 10 กับสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 5 10 และ 15 ส่วนในร้อยละ 10 จะมีระยะเวลาในการคงรูปใกล้เคียงกัน

ระยะเวลาของการเริ่มคงรูป (Scorch time) เพราะสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ปริมาณที่มากขึ้นสามารถรวมตัวกับกรดสเตียริกเป็นสารประกอบที่สามารถละลายกระจายตัวได้ดีในยางธรรมชาติมากขึ้น และทำหน้าที่กระตุ้นการทำปฏิกิริยาเชื่อมต่อพันธะของสายโซ่โมเลกุลทำให้ระยะเวลาในการเริ่มคงรูปสั้นลงตามสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น [18]

สารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เมื่อผสมกับกรดสเตียริกจะได้สารประกอบที่ละลายได้ดีในยางธรรมชาติ สารประกอบนี้จะช่วยให้การเกิดปฏิกิริยาเริ่มคงรูปได้เร็วขึ้น รวมถึงเป็นสารกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยาการคงรูปในยางคอมปาวด์ [25]

สารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตไม่ได้ทำหน้าที่เพียงการสลายตัวเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สร้างฟองโฟมเพียงอย่างเดียว สารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตยังช่วยเร่งการคงรูปด้วยปฏิกิริยาการสลายตัวของสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต จะเกิดขึ้นระหว่าง 50 – 260 องศา

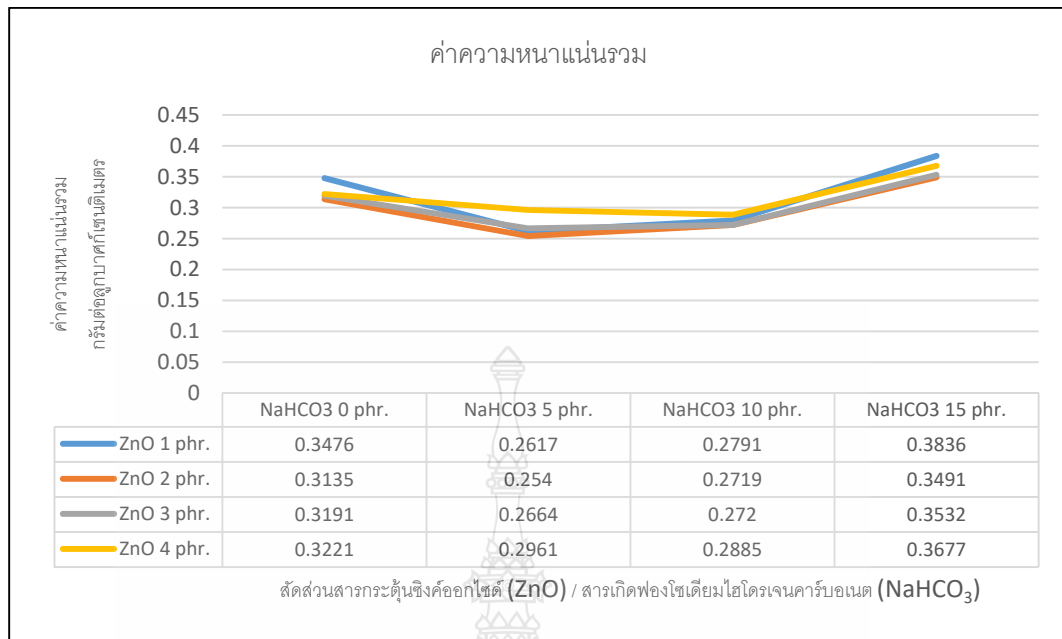
เซลเซียส ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสการสลายตัวจะเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ ช่วงระหว่างอุณหภูมิ 150 – 183 องศาเซลเซียส [30] อัตราการสลายตัวของสารเกิดฟอง (Rate of gas volume) จะเกิดขึ้นมากและเร็วที่สุด แต่ก็ขึ้นอยู่กับสัดส่วนของสารเกิดฟองด้วย การสลายตัวของสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตจะได้โซเดียมคาร์บอเนต ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) เป็นสารประกอบของเกลือคาร์บอนิก มีสมบัติการดูดความชื้น เมื่อละลายน้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) มีฤทธิ์เป็นด่างแก่ช่วยให้ปฏิกิริยาการเริ่มคงรูป และคงรูปของยางเกิดเร็วขึ้น

#### 4.3 สมบัติเชิงกลของยางโฟมคอมปาวด์

##### 4.3.1 ค่าความหนาแน่นรวม (Bulk density) ASTM D1056 -00 sec61

การถ่ายเทความร้อน คืออัตราการถ่ายเทความร้อน (Rate of energy) เพื่อทำให้ระบบมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ การถ่ายเทความร้อนจะเกิดจากที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่ที่มีอุณหภูมิต่ำ ทิศทางของการถ่ายเทความร้อนจะเกิดขึ้นเมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิ (Temperature different,  $\Delta T$ ) โดยทิศทางจากอุณหภูมิสูงไปยังอุณหภูมิต่ำ อัตราการถ่ายเทความร้อน (Heat transfer rate) จะขึ้นอยู่กับความแตกต่างของอุณหภูมิ ความแตกต่างของอุณหภูมิที่มากอัตราการถ่ายเทความร้อนจะสูง อัตราการถ่ายเทความร้อนขึ้นอยู่กับ ชนิดของวัตถุ พื้นผิว ความแตกต่างของอุณหภูมิ ความหนาของวัตถุ การถ่ายเทความร้อนต่อหนึ่งหน่วยเวลา (W) ขึ้นอยู่กับ ความแตกต่างของอุณหภูมิ ความแตกต่างอุณหภูมิที่มากการถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มขึ้น ความหนาของวัตถุ ความหนาของวัตถุเพิ่มขึ้นอัตราการถ่ายเทความร้อนจะลดลง และค่าการนำความร้อนของวัสดุ (Thermal conductivity) ซึ่งเป็นค่าคงที่เฉพาะของวัตถุ ค่าการนำความร้อนของยาง และอากาศ คือ 0.13 และ 0.026 วัตต์ต่อเมตร.องศาเซลเซียสตามลำดับ การแพร่ความร้อน (Thermal diffusivity) เป็นอัตราส่วนของความสามารถในการนำความร้อนของวัสดุ ต่อความสามารถในการเก็บสะสมความร้อนของวัตถุ ยางธรรมชาติมีการแพร่ความร้อนต่ำ จึงสามารถเก็บความร้อนได้ดีแต่ถ่ายเทความร้อนไม่ดี การแพร่ความร้อนคือ อัตราส่วนของการนำความร้อนของวัสดุต่อผลคูณของค่าความหนาแน่นรวม (Density) กับค่าความถ่วงความร้อนจำเพาะ (Specific heat) [26 27 28 32]

ยางธรรมชาติเป็นวัสดุที่มีค่าการนำความร้อนต่ำ ระดับอุณหภูมิที่กระจายตามหน้าตัดของชิ้นงานมีความแตกต่างกันมากเป็นผลทำให้ความหนาแน่นปฏิกิริยาเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุล ความหนืด (Viscosity) ความตึงผิว (Surface tension) การสลายตัว (Decomposition) ของสารฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต สร้างฟองโฟมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เกิดขึ้นไม่สม่ำเสมอ ความหนาแน่น ส่งผลให้สมบัติเชิงกลมีความแปรปรวน [29]



**รูปที่ 4.10** กราฟแสดงค่าความหนาแน่นรวม (Bulk density) ยางโฟม ขึ้นรูปด้วยกระบวนการพาความร้อน ไม่ควบคุมการขยายตัว

จากรูปที่ 4.10 การพาความร้อน (Convection heat transfer) เป็นการถ่ายเทความร้อนระหว่างพื้นผิวของของแข็งกับของไหลที่ผ่านพื้นผิวนั้น ของไหลที่ไหลผ่านด้วยความเร็วจะทำให้สามารถถ่ายเทความร้อนได้มาก การพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Free convection heat transfer, h) คือการไหลของของไหลผ่านพื้นผิวโดยธรรมชาติ เท่ากับ 2 – 2.5 วัตต์ต่อตารางเมตร.องศาเซลเซียส การพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Free convection heat transfer) เป็นการให้ความร้อนกับแม่พิมพ์ที่มีความสม่ำเสมอทุกด้าน ในคราวเดียวกันความร้อนที่ให้กับแม่พิมพ์อย่างกลมขนาดรัศมี หรือระยะเวลาการรับความร้อนด้านข้างวัดจากด้านนอกถึงกึ่งกลางแม่พิมพ์ 22.25 มิลลิเมตรด้วย ระบบการพาความร้อนแบบธรรมชาติในงานวิจัยนี้เริ่มจาก 50 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เมื่อเวลาผ่านไป 15 นาทีอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาจะเพิ่มถึง 150 องศาเซลเซียส คงอุณหภูมิ และอบต่ออีก 5 นาทีเพื่อให้ครบระยะเวลาของยาง

เมื่อพิจารณาค่าความหนาแน่นรวมส่วนสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 0 ส่วนในร้อย ส่วนพบค่าความหนาแน่นแปรปรวนอยู่ระหว่าง 0.3135 – 0.3476 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เนื่องจากไม่สามารถกำจัดปริมาณสิ่งระเหยในยางธรรมชาติแห่ง STR 5L ปริมาณสิ่งระเหย (Volatile Matter Content) โดยส่วนใหญ่คือความชื้นภายในยางแห้ง ปริมาณความชื้นที่สูงจะส่งผลต่อน้ำหนักยางแห้งที่มีน้ำเจือปน นอกจากนี้จะกระทบต่อการบดผสมยาง ระยะเวลา และอุณหภูมิที่ใช้ในการบดยางเพื่อไล่ความชื้นหรือน้ำออก ความชื้นที่มีอยู่เป็นอุปสรรคในคลุกเคล้าสารต่าง ๆ ให้เป็นเนื้อเดียวกัน [26 27 28 29 32]มาตรฐานกำหนดการยีนยอมให้มีปริมาณสิ่งระเหยในยางแห้ง STR 5L ได้ไม่เกินร้อยละ 0.8

โดยน้ำหนัก ปฏิบัติการการสลายตัวของสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต เริ่มเกิดขึ้นตั้งแต่ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส การบดขย้างส่งผลให้เนื้ออย่างมีอุณหภูมิสูงขึ้น ภายที่มีอุณหภูมิสูงเนื้ออย่างจะ นิยมการผสมสารเคมีจะเกิดการแตกตัว และกระจายตัวง่ายรวมถึงการกำจัดสิ่งระเหยภายในสายโซ่ โมเลกุลของยาง การบดขย้างที่อุณหภูมิต่ำอย่างจะมีความหนืดสูง การไหลผ่านระหว่างลูกกลิ้งเกิดขึ้นได้ ยาก การกระจายตัว และการแตกตัวของสารเคมีเกิดขึ้นได้ไม่ดี บางครั้งเกิดการขาดของสายโซ่โมเลกุล ยางมากเกินไป การผสมยางที่ใช้สารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตจึงจำเป็นต้องควบคุมอุณหภูมิ ยางในขณะผสมให้สูงถึง 50 องศาเซลเซียส โดยการควบคุมผ่านอุณหภูมิผิวลูกกลิ้งผสมไม่ให้เกิน 35 องศาเซลเซียส [11 12 13 14]

เมื่อพิจารณาค่าความหนาแน่นรวมที่สัดส่วนสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 5 และ 10 ส่วนในร้อยส่วน กับสัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์สัดส่วน 1 2 3 และ 4 ส่วนในร้อยส่วน พบค่าความ หนาแน่นรวมที่ลดลงอยู่ในช่วงระหว่าง 0.254 – 0.2916 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร สัดส่วนสารเกิด ฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตที่เพิ่มขึ้น เริ่มแตกตัวที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เนื่องจากการให้ ความร้อนแบบการพาลักษณะธรรมชาติ (Free convection heat transfer) ระยะเวลาเริ่มคงรูป (scorch time) หรือ เคียวดีเลย์ (Cure delay) หรือ อินดัคชัน (Induction) จะมีระยะเวลานาน ระยะเวลาการเกิดฟองโฟมในขณะความหนืดของเนื้ออย่างเมทริกซ์ (Matrix) ยังต่ำอยู่จึงมีขนาดใหญ่ เมื่อ ฟองโฟมที่เกิดมีขนาดใหญ่ค่าความหนาแน่นรวมของยางโฟมมีค่าน้อย [18]

เมื่อพิจารณาค่าความหนาแน่นรวมที่สัดส่วนสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 15 ส่วนใน ร้อยส่วน กับสัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 2 3 และ 4 ส่วนในร้อยส่วน พบค่าความหนาแน่นรวม เพิ่มขึ้น ปริมาณสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตที่เพิ่มแตกตัวให้โซเดียมคาร์บอเนต ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) เป็นสารประกอบของเกลือคาร์บอเนต มีสมบัติการดูดความชื้น เมื่อละลายน้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) มีฤทธิ์เป็นด่างแก่ ช่วยให้เกิดปฏิกิริยาการเริ่มคงรูป และคงรูปของยางเกิดเร็ว ความหนืดของยางเพิ่มขึ้นเร็วขึ้น สัดส่วนสาร เกิดฟองโฟมโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตที่มาก ฟองโฟมที่เกิดขึ้นมากพร้อม ๆ กันในขณะที่มีความหนืด ของยางเมทริกซ์ (Matrix) สูง ลักษณะฟองโฟมจะมีขนาดเล็ก ละเอียด ทำให้ค่าความหนาแน่นรวมสูงขึ้น [18]

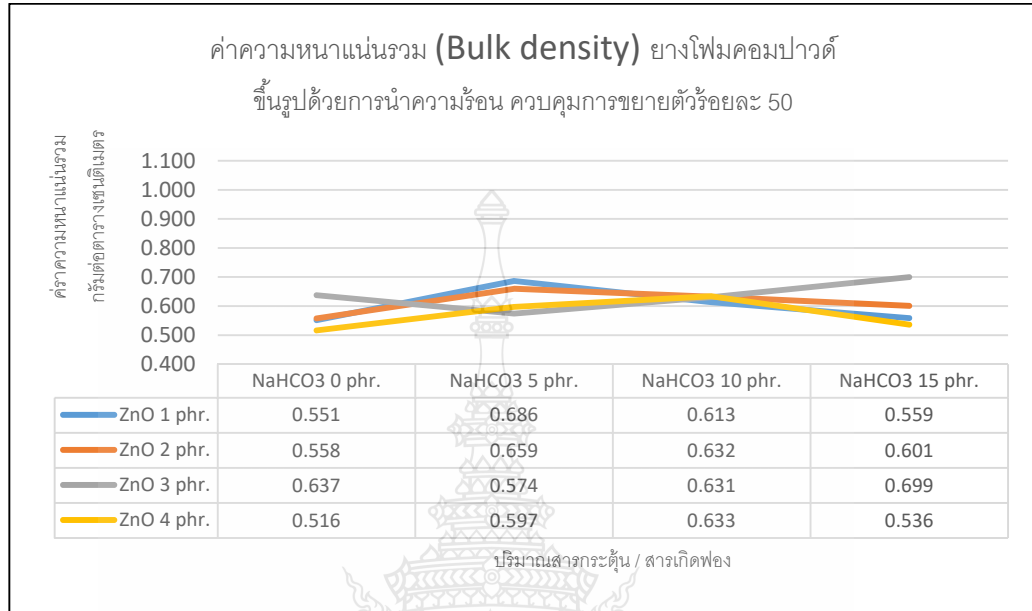
จากรูปที่ 4.11 พบสัดส่วนสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 0 ส่วนในร้อยส่วน กับ สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 2 3 และ 4 ส่วนในร้อยส่วน มีค่าความหนาแน่นรวมอยู่ในช่วง 0.516 – 0.558 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และแนวโน้มค่าความหนาแน่นรวมเพิ่มขึ้นเป็น 0.536 – 0.699 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เมื่อสัดส่วนโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตเพิ่มขึ้นเป็น 15 ส่วนในร้อยส่วน

ความแปรปรวนของค่าความหนาแน่นรวมเกิดจากข้อจำกัดในการผสมยางโฟมคอมปาวด์ที่การ กระจาย และแตกตัวของสารเคมีไม่สม่ำเสมอ การไม่สามารถกำจัดสิ่งระเหย เนื่องจากการผสมต้อง อุณหภูมิต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันไม่ให้สารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนเกิดการสลายตัว

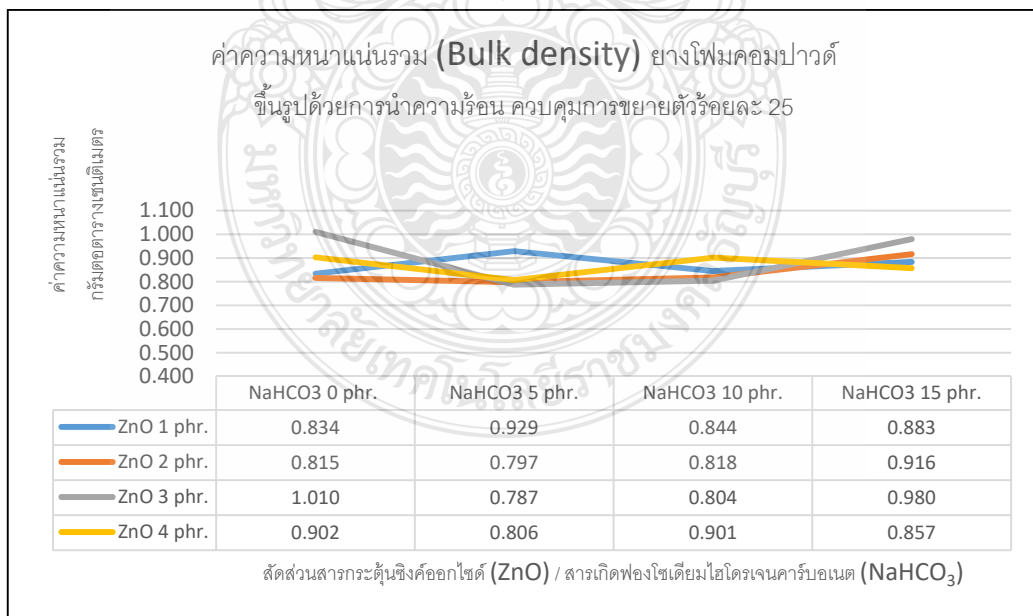
ปัจจัยความแปรปรวนของค่าความหนาแน่นรวมอีกประการคือขนาดของความหนาแน่นขึ้นงานยาง โฟมคอมปาวด์ หรือพรีเคอร์เซอร์ (Precursor) ตามข้อกำหนดควบคุมการขยายตัว ร้อยละ 50 ด้วยพิกัด ความเผื่อความหนาแน่นของขึ้นงานยางโฟมคอมปาวด์ หรือพรีเคอร์เซอร์ (Precursor)  $6.5 \pm 0.5$  มิลลิเมตร



ความหนาของชิ้นงานที่เตรียมก่อนการขึ้นรูปจะอยู่ระหว่าง 6.0 – 7.0 มิลลิเมตร หรือเทียบเป็นการขยายตัวระหว่าง ร้อยละ 46.5 – 53.8



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นรวม (Bulk density) ยางโฟม ขึ้นรูปด้วยกระบวนการพาความร้อน ควบคุมการขยายตัว ร้อยละ 50



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นรวม (Bulk density) ยางโฟมขึ้นรูปด้วยกระบวนการพาความร้อน ควบคุมการขยายตัว ร้อยละ 25

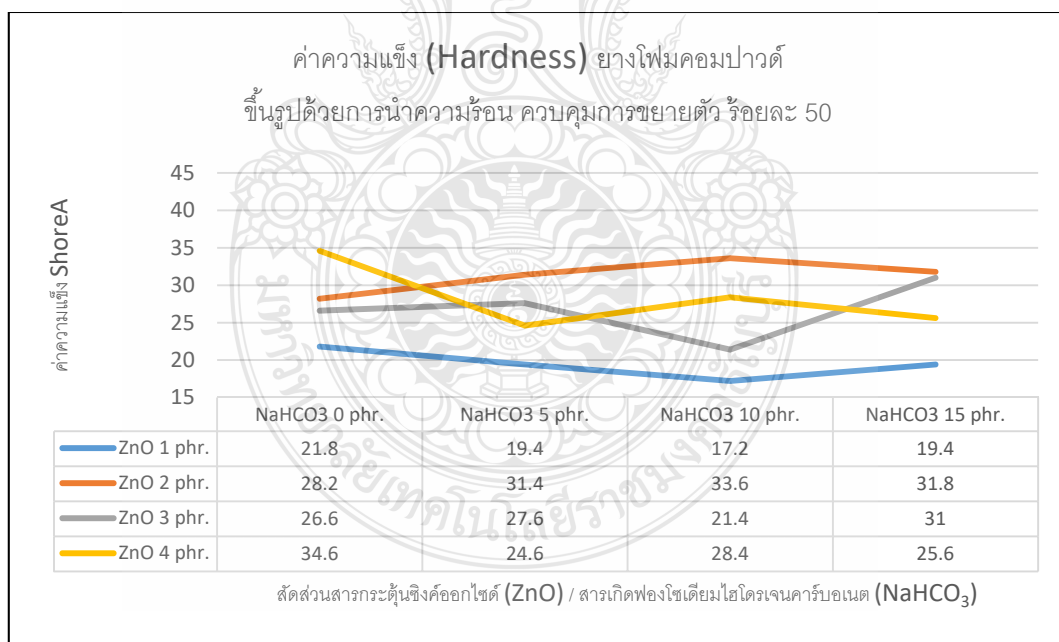


จากรูปที่ 4.12 พบสัดส่วนสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 0 ส่วนในร้อยส่วน กับ สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 2 3 และ 4 ส่วนในร้อยส่วน มีค่าความหนาแน่นรวมอยู่ในช่วง 0.815 – 1.010 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และแนวโน้มค่าความหนาแน่นรวมเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเป็น 0.857 – 0.916 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เมื่อสัดส่วนโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตเพิ่มขึ้นเป็น 15 ส่วนในร้อยส่วน

ความแปรปรวนของค่าความหนาแน่นรวมเกิดจากข้อจำกัดในการผสมยางโพลีคอมพาวด์ที่การกระจาย และแตกตัวของสารเคมีไม่สม่ำเสมอ การไม่สามารถกำจัดสิ่งระเหย เนื่องจากการผสมต้องอุณหภูมิต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันไม่ให้สารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนเกิดการสลายตัว

ปัจจัยความแปรปรวนของค่าความหนาแน่นรวมอีกประการคือขนาดของความหนาขึ้นงานยางโพลีคอมพาวด์ หรือพรีเคอร์เซอร์ (Precursor) ตามข้อกำหนดควบคุมการขยายตัว ร้อยละ 50 ด้วยพิกัดความเผื่อความหนาของชิ้นงานยางโพลีคอมพาวด์ หรือพรีเคอร์เซอร์ (Precursor)  $9.75 \pm 0.5$  มิลลิเมตร ความหนาของชิ้นงานที่เตรียมก่อนการขึ้นรูปจะอยู่ระหว่าง 9.25 – 10.25 มิลลิเมตร หรือเทียบเป็นการขยายตัวระหว่าง ร้อยละ 71.15– 78.84

#### 4.3.2 ค่าความแข็ง (Hardness) ASTM D2240 -15 [24]

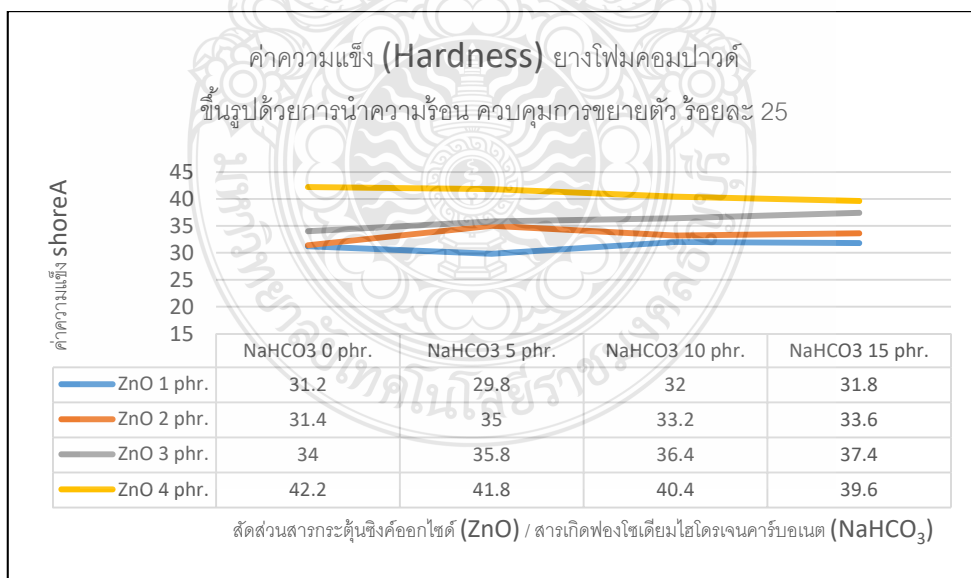


รูปที่ 4.13 กราฟแสดงค่าความแข็ง (Hardness) ยางโพลีคอมพาวด์ขึ้นรูปด้วย กระบวนการนำความร้อน ควบคุมการขยายตัว ร้อยละ 50

จากรูปที่ 4.13 สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 และ 2 ส่วนในร้อยละ ส่วนในร้อยละ ส่วนในร้อยละ กับสัดส่วนสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 0 5 10 และ 15 ส่วนในร้อยละ มีค่าความแข็งเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เนื่องจากปัจจัยในการควบคุมการขยายตัว ร้อยละ 50 จะมีผลต่อความหนาแน่นรวมที่เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ความหนาแน่นรวมเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อค่าความแข็งของวัสดุ

สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 2 3 และ 4 ส่วนในร้อยละ กับสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 0 5 10 และ 15 ส่วนในร้อยละ มีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลง แต่มีค่าแปรปรวนสูงโดยเฉพาะเมื่อเพิ่มสัดส่วนของสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 10 และ 15 เนื่องจากการผสมยางคอมปาวด์ต้องควบคุมอุณหภูมิต่ำ การกระจาย และแตกตัวเกิดขึ้นได้ยาก [11 12 13 14]

ปัจจัยอีกประการของความแปรปรวนคือ การถ่ายเทความร้อนให้กับยางโพลีคอมปาวด์ หรือพรีเคอร์เซอร์ (Precursor) ที่วางในแม่พิมพ์ ความแตกต่างระยะห่างจากผิวแม่พิมพ์เมื่อวางยางโพลีคอมปาวด์ หรือพรีเคอร์เซอร์ (Precursor) ที่บริเวณด้านล่างการถ่ายเทความร้อนจะเกิดในลักษณะการนำความร้อน (Conduction heat transfer) ระหว่างผิวแม่พิมพ์กับยางโพลีคอมปาวด์ หรือพรีเคอร์เซอร์ (Precursor) ส่วนด้านบนเป็นการถ่ายเทความร้อนจากผิวแม่พิมพ์ด้านบนกับยางโพลีคอมปาวด์ หรือพรีเคอร์เซอร์ (Precursor) จะเกิดในลักษณะการพาความร้อน (Free convection heat transfer) ที่ระยะห่างระหว่าง กล่าวคือแหล่งความร้อนจากผิวแม่พิมพ์จะนำสู่ตัวกลางที่เป็นอากาศ และอากาศจะพาความร้อนมาถ่ายเทให้กับยาง การเกิดลักษณะนี้จะทำให้เกิดความแตกต่างระหว่าง การกระจายของอุณหภูมิของขึ้นยางคอมปาวด์ หรือพรีเคอร์เซอร์ (Precursor) ด้านบนและล่างที่มีต่อความหนาแน่นของการทำปฏิกิริยาการเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุล สมบัติเชิงกล ความแปรปรวนจะเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตที่เพิ่ม [26 27 28 29 32]



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงค่าความแข็ง (Hardness) ยางโพลี ขึ้นรูปด้วยกระบวนการนำความร้อน ควบคุมการขยายตัว ร้อยละ 25

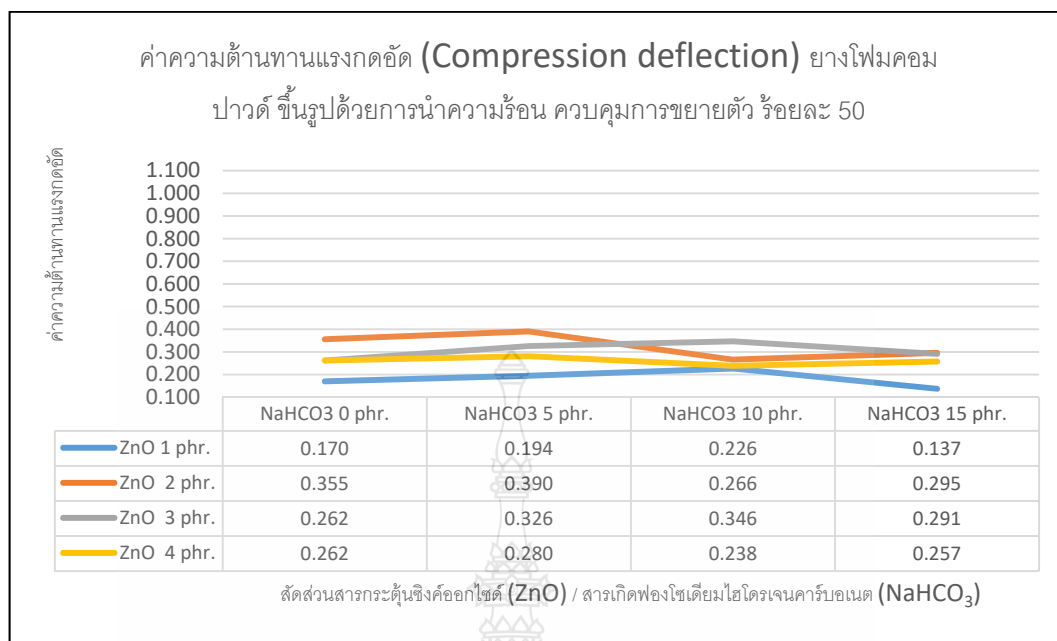


จากรูปที่ 4.15 พบค่าความต้านทานแรงกดอัดสัดส่วนของสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 0 ส่วนในร้อยส่วน กับสัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์มีค่าความต้านทานแรงกดอัดใกล้เคียงกันระหว่าง 0.029 – 0.032 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร สัดส่วนของสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 4 ส่วนในร้อยส่วนพบค่าดูดซับแรงกดอัดสูงสุด คือ 0.039 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร เนื่องจากสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ช่วยให้ความหนาแน่นในการเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลมีส่งผลให้สมบัติเชิงกลสูงขึ้น

สัดส่วนสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 5 และ 10 ส่วนในร้อยส่วน กับสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 2 และ 3 ส่วนในร้อยส่วนมีค่าความต้านทานแรงกดอัดลดลงเหลือระหว่าง 0.016 – 0.024 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร เนื่องจากการให้ความร้อนแบบการพา (Free convection heat transfer) ระยะเวลาเริ่มคงรูป (scorch time) หรือ เคียวดีเลย์ (Cure delay) หรือ อินดักชั่น (Induction) จะมีระยะเวลานาน ระยะเวลาการเกิดฟองโฟมในขณะความหนืดของเนื้อยางเมทริกซ์ (Matrix) มีค่าน้อย ฟองโฟมที่เกิดมีขนาดใหญ่ค่าความหนาแน่นรวมของยางโฟมมีค่าน้อย ส่งผลได้ค่าความต้านทานแรงกดอัดลดลง

สัดส่วนสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 15 ส่วนในร้อยส่วน กับสัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 2 และ 3 ส่วนในร้อยส่วน แตกตัวให้โซเดียมคาร์บอเนต ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) เป็นสารประกอบของเกลือคาร์บอเนต มีสมบัติการดูดความชื้น เมื่อละลายน้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) มีฤทธิ์เป็นด่างแก่ ให้ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลสูง ความหนืดมีสูง ฟองโฟมที่เกิดมีขนาดเล็ก ละเอียด และกระจายตัวสม่ำเสมอ ทำให้ค่าการดูดซับพลังงานมีสูงขึ้น สัดส่วนของสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 4 ส่วนในร้อยส่วน กับสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 4 ส่วนในร้อยส่วน แตกตัวให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จำนวนมาก ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีสมบัติในการละลายเข้ากับพอลิเมอร์ได้ ฟองโฟมคาร์บอนไดออกไซด์ขนาดเล็กของสามารถแทรกอยู่ระหว่างสายโซ่โมเลกุล ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลจึงถูกขัดขวางการเชื่อมโยงจากฟองก๊าซขนาดเล็กค่าความต้านทานแรงกดอัดจึงมีแนวโน้มลดลง

การให้ความร้อนแบบการพา (Free convection heat transfer) ระยะเวลาเริ่มคงรูป (scorch time) หรือ เคียวดีเลย์ (Cure delay) หรือ อินดักชั่น (Induction) จะมีระยะเวลานาน ระยะเวลาการเกิดฟองโฟมในขณะความหนืดของเนื้อยางเมทริกซ์ (Matrix) มีค่าน้อย ฟองโฟมที่เกิดมีขนาดใหญ่ค่าความหนาแน่นรวมของยางโฟมมีค่าน้อย ฟองโฟมขนาดใหญ่อาจเกิดจากการรวมตัวของฟองโฟมขนาดเล็กที่สามารถทะลุผนังเซลล์ที่มีความหนืดต่ำในช่วงเคียวดีเลย์ (Cure delay) หรือ อินดักชั่น (Induction) ลักษณะฟองโฟมที่พบมีแบบฟองโฟมปิด (Closed cell) และ ฟองโฟมแบบเปิด (Open cell) การดูดซับแรงกดในฟองโฟมแบบเปิดจะเกิดจากสมบัติของวัสดุเมทริกซ์ที่เป็นผนังเซลล์โฟมแต่เพียงอย่างเดียว



**รูปที่ 4.16** กราฟแสดงค่าความต้านทานแรงกดอัด (Compression deflection) ร้อยละ 25 ของ ความหนาวยางโฟมขึ้นรูปด้วยกระบวนการนำความร้อน ควบคุมการขยายตัว ร้อยละ 50

จากรูปที่ 4.16 พบสัดส่วนสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 0 ส่วนในร้อยส่วน กับ สัดส่วน สารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 2 3 และ 4 ส่วนในร้อยส่วน มีค่าการดูดซับแรงอัดอยู่ในช่วง 0.170 – 0.355 นิวตันต่อตารางเมตร และแนวโน้มค่าความต้านทานแรงกดอัดลดลงเล็กน้อยเป็น 0.137 – 0.291 นิวตัน ต่อตารางมิลลิเมตร เมื่อสัดส่วนโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตเพิ่มขึ้นเป็น 15 ส่วนในร้อยส่วน

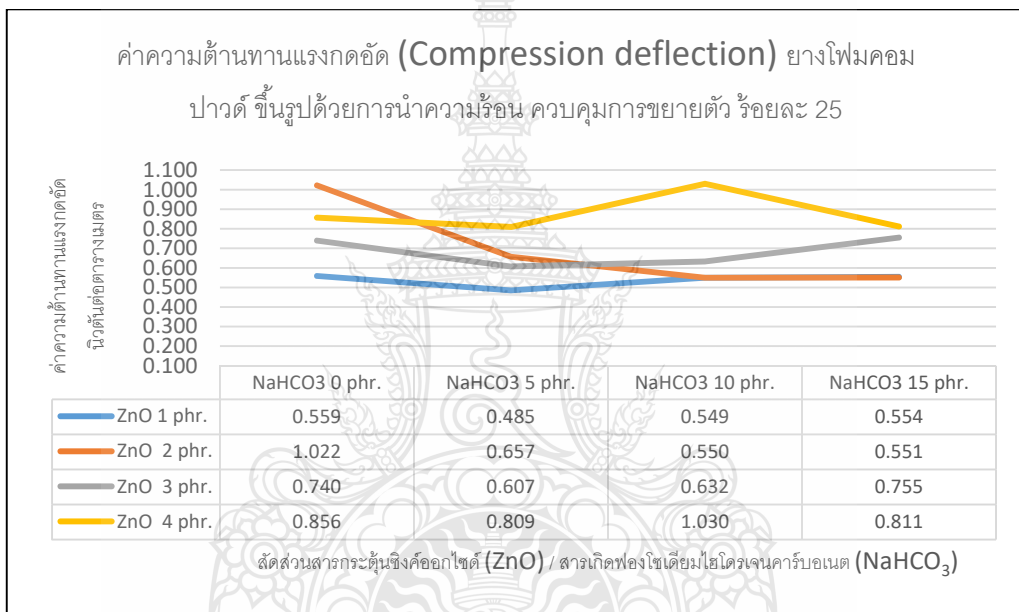
สัดส่วนสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 15 ส่วนในร้อยส่วน กับสัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ ออกไซด์ 1 ส่วนในร้อยส่วน ความหนาแน่นในการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลมีน้อย ค่า ความต้านทานแรงกดอัดที่พบคือ 0.137 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร ซึ่งต่ำที่สุด

สัดส่วนสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 15 ส่วนในร้อยส่วน กับสัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 3 ส่วนในร้อยส่วน แตกตัวให้โซเดียมคาร์บอเนต (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) เมื่อละลายน้ำ (H<sub>2</sub>O) มีฤทธิ์เป็นด่างแก่ ทำให้ ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลสูง ความหนืดมีสูง ฟองโฟมที่เกิดมีขนาดเล็ก ละเอียด และกระจายตัวสม่ำเสมอ ทำให้ค่าการดูดซับพลังงานมีสูงขึ้น คือ 0.291 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร

สัดส่วนของสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 4 ส่วนในร้อย กับสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 4 ส่วนในร้อยส่วน แตกตัวให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จำนวนมาก ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีสมบัติในการ ละลายเข้ากับพอลิเมอร์ได้ ฟองโฟมคาร์บอนไดออกไซด์ขนาดเล็กของสามารถแทรกอยู่ระหว่างสายโซ่ โมเลกุล ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลจึงถูกขัดขวางการเชื่อมโยงจากฟองก๊าซขนาดเล็ก ค่าความต้านทานแรงกดอัดค่าน้อยกว่า คือ 0.257 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร

ความแปรปรวนของค่าความหนาแน่นรวมเกิดจากข้อจำกัดในการผสมยางโพลีคอมปาวด์ที่การกระจาย และแตกตัวของสารเคมีไม่สม่ำเสมอ การไม่สามารถกำจัดสิ่งระเหย เนื่องจากการผสมต้องอุณหภูมิต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนเกิดการสลายตัว

ปัจจัยความแปรปรวนของค่าความหนาแน่นรวมอีกประการคือขนาดของความหนาชิ้นงานยางโพลีคอมปาวด์ หรือพรีเคอร์เซอร์ (Precursor) ตามข้อกำหนดควบคุมการขยายตัว ร้อยละ 50 ด้วยพิกัดความเผื่อความหนาของชิ้นงานยางโพลีคอมปาวด์ หรือพรีเคอร์เซอร์ (Precursor)  $6.5 \pm 0.5$  มิลลิเมตร ความหนาของชิ้นงานที่เตรียมก่อนการขึ้นรูปจะอยู่ระหว่าง 6.0 – 7.0 มิลลิเมตร หรือเทียบเป็นการขยายตัวระหว่าง ร้อยละ 46.5 – 53.8



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงค่าความต้านทานแรงกดอัด (Compression deflection) ร้อยละ 25 ของความหนายางโพลีคอมปาวด์ ขึ้นรูปด้วยกระบวนการนำความร้อน ควบคุมการขยายตัว ร้อยละ 25

จากรูปที่ 4.17 สัดส่วนสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 0 ส่วนในร้อยละ กับสัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 3 และ 4 ส่วนมีค่าความต้านทานแรงกดอัดที่เพิ่มขึ้นคือ 0.559 0.740 และ 0.856 ตามลำดับเนื่องจากความหนาแน่นการปฏิบัติกริยาของสายโซ่โมเลกุลที่เพิ่มขึ้น

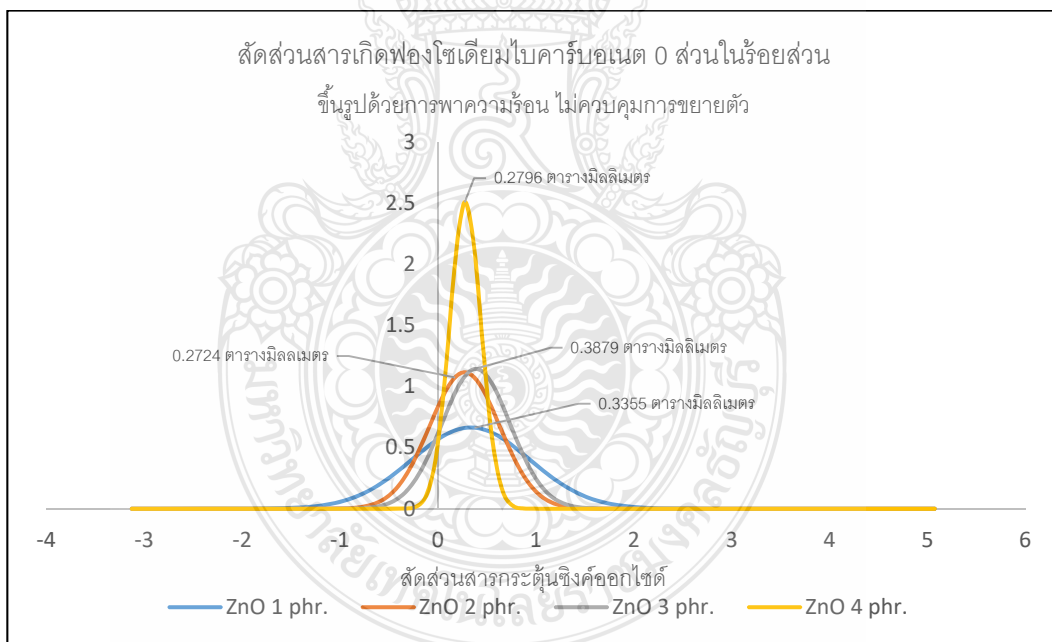
สัดส่วนสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 0 ส่วนในร้อยละ กับสัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 2 ส่วนในร้อยละ ค่าความต้านทานแรงกดอัดที่พบ 1.022 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร อาจไม่เป็นไปตามทฤษฎีอาจเนื่องจากข้อจำกัดในการผสมยางโพลีคอมปาวด์ที่การกระจาย และแตกตัวของสารเคมีไม่สม่ำเสมอ การไม่สามารถกำจัดสิ่งระเหย เนื่องจากการผสมต้องอุณหภูมิต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนเกิดการสลายตัว



สัดส่วนสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 10 และ 15 ส่วนในร้อยละ กับสัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 4 ส่วนในร้อยละ ค่าความต้านทานแรงกดอัดที่พบ 1.030 และลดลงเหลือ 0.811 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร เนื่องจากฟองโพลีคาร์บอนไดออกไซด์ขนาดเล็กที่เกิดตามสัดส่วนของสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตที่มากขึ้นแทรกอยู่ระหว่างสายโซ่โมเลกุล ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลจึงถูกขัดขวางการเชื่อมโยงจากฟองก๊าซขนาดเล็กค่าความต้านทานแรงกดอัดค่าน้อย

สัดส่วนสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 10 และ 15 ส่วนในร้อยละ กับสัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 3 ส่วนในร้อยละ ค่าความต้านทานแรงกดอัดที่พบมีค่าสูงขึ้น 0.632 และ 0.755 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร เนื่องจากโซเดียมคาร์บอเนต ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) ที่เกิดจากการสลายตัวของสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต เมื่อละลายน้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) มีฤทธิ์เป็นด่างแก่ ทำให้ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลสูง ความหนืดมีสูง ฟองโพลีที่เกิดมีขนาดเล็ก ละเอียดยิ่ง และกระจายตัวสม่ำเสมอ ทำให้ค่าการดูดซับพลังงานมีค่าเพิ่มขึ้น

4.3.4 สมบัติทางกายภาพขนาดพื้นที่ฟองโพลีและกระจายตัวของขนาดฟองโพลี การแจกแจงปกติแบบมาตรฐาน (Standard normal distribution)

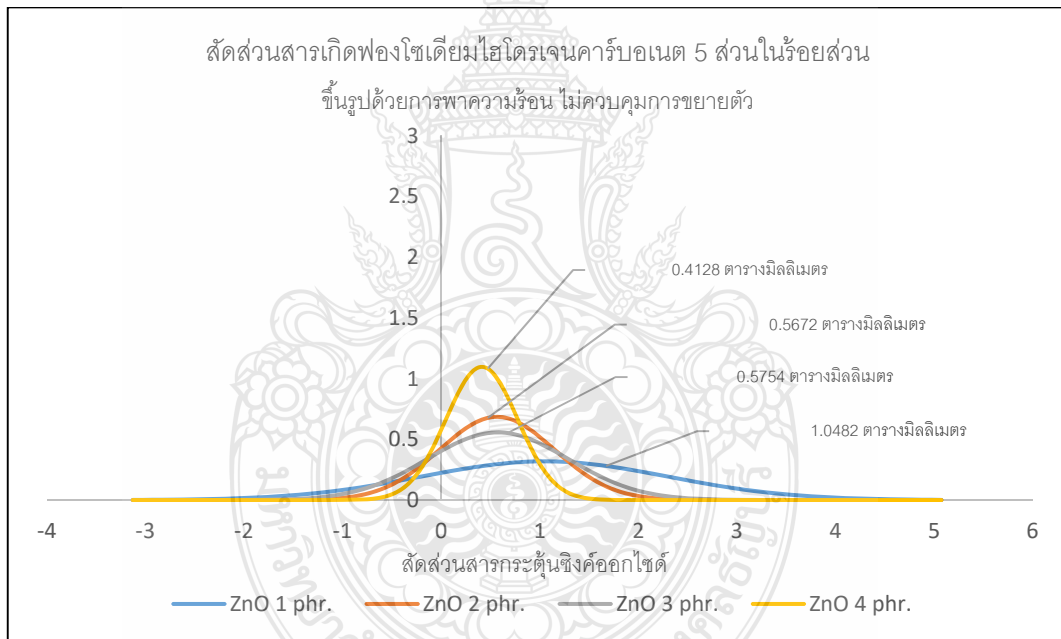


รูปที่ 4.18 กราฟแสดงขนาดพื้นที่เฉลี่ย และความสม่ำเสมอของฟองโพลีในยางธรรมชาติ ขึ้นรูปด้วยการพาความร้อน ไม่ควบคุมการขยายตัว สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 2 3 และ 4 ส่วนในร้อยละ กับสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 0 ส่วนในร้อยละ

จากรูป 4.18 สัตว์ส่วนสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตไฮโดรเจนคาร์บอเนต 0 ส่วนในร้อยส่วน กับสัตว์ส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 2 3 และ 4 ส่วนในร้อยส่วนพบค่าเฉลี่ยขนาดฟองโฟม 0.3355 0.2724 0.3879 และ 0.2796 ตารางมิลลิเมตรตามลำดับ

สัตว์ส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 ส่วนในร้อยส่วนมีขนาดพื้นที่ฟองโฟมเฉลี่ยใหญ่ และการกระจายตัวขนาดของขนาดฟองโฟมมีมากที่สุดเพราะการให้ความร้อนแบบการพาลักษณะธรรมชาติ (Free convection heat transfer) ระยะเวลาเริ่มคงรูป (scorch time) หรือ เคียวดีเลย์ (Cure delay) หรือ อินดักชั่น (Induction) มีระยะเวลานาน ความหนืดของเนื้อยางเมทริกซ์ (Matrix) เกิดขึ้นช้า

สัตว์ส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 4 ส่วนในร้อยส่วนมีขนาดพื้นที่ฟองโฟมเฉลี่ย และการกระจายตัวขนาดของขนาดฟองโฟมมากที่สุดเพราะปริมาณสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ที่มาก ระยะเวลาเริ่มคงรูป (scorch time) หรือ เคียวดีเลย์ (Cure delay) หรือ อินดักชั่น (Induction) จะมีระยะเวลานั้น ระยะเวลาการเกิดฟองโฟมในขณะที่ความหนืดของเนื้อยางเมทริกซ์ (Matrix) เกิดขึ้นเร็ว



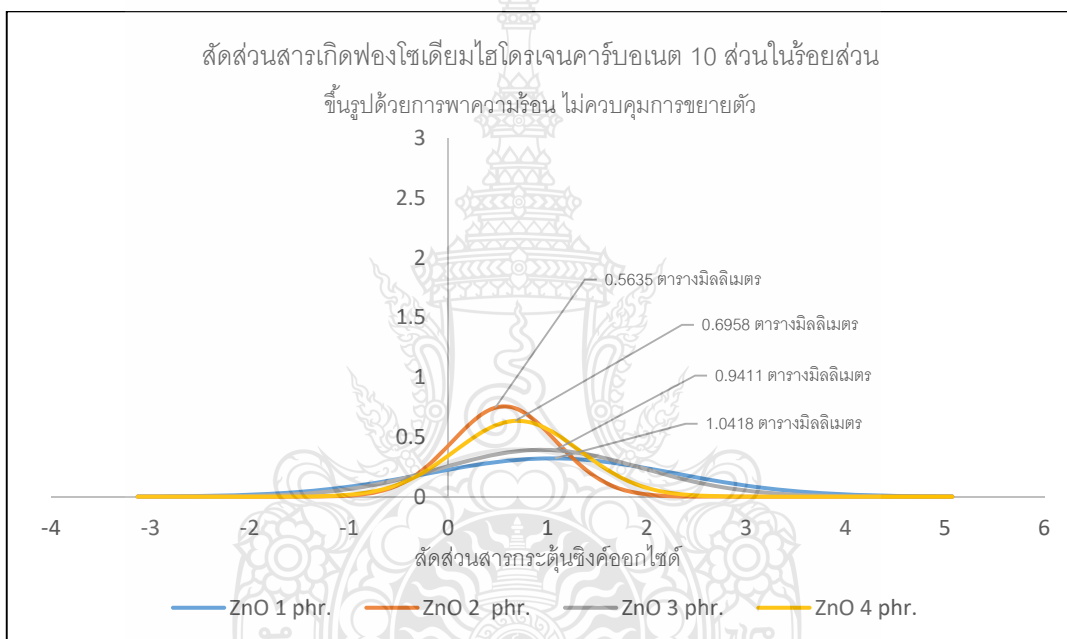
**รูปที่ 4.19** กราฟแสดงขนาดพื้นที่เฉลี่ย และความสม่ำเสมอของฟองโฟมในยางธรรมชาติ ขึ้นรูปด้วยการพาความร้อน ไม่ควบคุมการขยายตัว สัตว์ส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 2 3 และ 4 ส่วนในร้อยส่วน กับสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 5 ส่วนในร้อยส่วน

จากรูป 4.19 สัตว์ส่วนสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตไฮโดรเจนคาร์บอเนต 5 ส่วนในร้อยส่วน กับสัตว์ส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 2 3 และ 4 ส่วนในร้อยส่วนพบค่าเฉลี่ยขนาดฟองโฟม 1.0482 0.5672 0.5754 และ 0.4128 ตารางมิลลิเมตรตามลำดับ



สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 ส่วนในร้อยละส่วนมีขนาดพื้นที่ฟองโพนเฉลี่ยใหญ่ และการกระจายตัวของขนาดฟองโพนมีมากที่สุดเพราะการให้ความร้อนแบบการพาลักษณะธรรมชาติ (Free convection heat transfer) ระยะเวลาเริ่มคงรูป (scorch time) หรือ เคียวดีเลย์ (Cure delay) หรือ อินดักชั่น (Induction) มีระยะเวลานาน ความหนืดของเนื้อยางเมทริกซ์ (Matrix) เกิดขึ้นช้า

สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 4 ส่วนในร้อยละส่วนมีขนาดพื้นที่ฟองโพนเฉลี่ย และการกระจายตัวของขนาดฟองโพนมากที่สุดเพราะปริมาณสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ที่มาก ระยะเวลาเริ่มคงรูป (scorch time) หรือ เคียวดีเลย์ (Cure delay) หรือ อินดักชั่น (Induction) จะมีระยะเวลาล้าน ระยะเวลาการเกิดฟองโพนในขณะความหนืดของเนื้อยางเมทริกซ์ (Matrix) เกิดขึ้นเร็ว

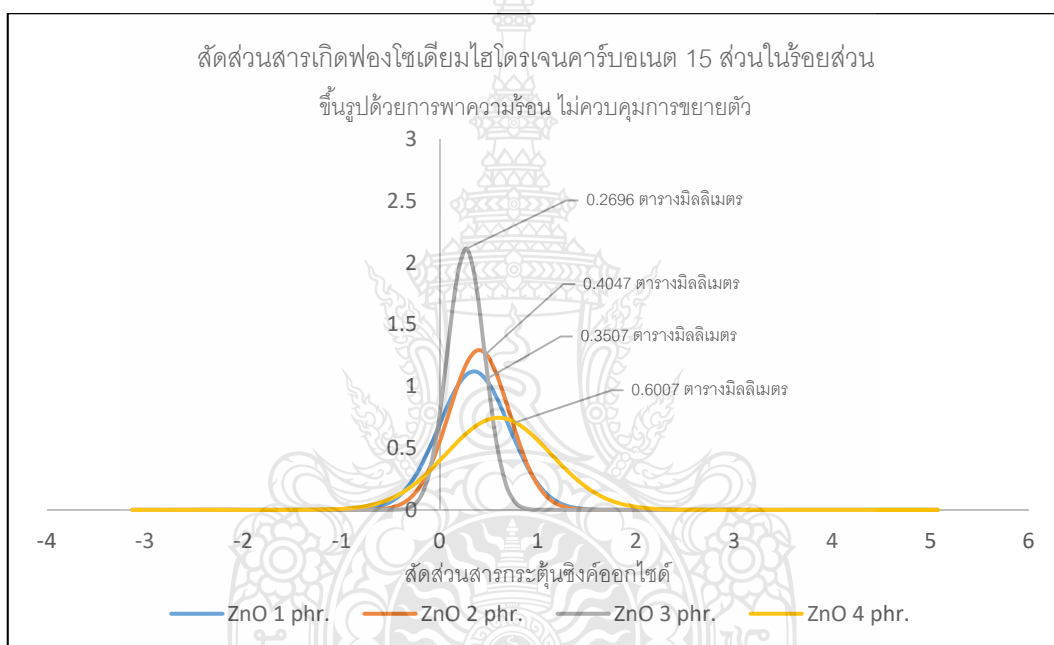


รูปที่ 4.20 กราฟแสดงขนาดพื้นที่เฉลี่ย และความสม่ำเสมอของฟองโพนในยางธรรมชาติ ขึ้นรูปด้วยการพาความร้อน ไม่ควบคุมการขยายตัว สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 2 3 และ 4 ส่วนในร้อยละส่วน กับสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 10 ส่วนในร้อยละส่วน

จากรูป 4.20 สัดส่วนสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตไฮโดรเจนคาร์บอเนต 10 ส่วนในร้อยละส่วน กับสัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 2 3 และ 4 ส่วนในร้อยละส่วนพบค่าเฉลี่ยขนาดฟองโพน 1.0418 0.5636 0.9411 และ 0.6958 ตารางมิลลิเมตรตามลำดับ

สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 ส่วนในร้อยละส่วนมีขนาดพื้นที่ฟองโพนเฉลี่ยใหญ่ และการกระจายตัวของขนาดฟองโพนมีมากที่สุดเพราะการให้ความร้อนแบบการพาลักษณะธรรมชาติ (Free convection heat transfer) ระยะเวลาเริ่มคงรูป (scorch time) หรือ เคียวดีเลย์ (Cure delay) หรือ อินดักชั่น (Induction) มีระยะเวลานาน ความหนืดของเนื้อยางเมทริกซ์ (Matrix) เกิดขึ้นช้า

สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 2 ส่วนในร้อยละมีขนาดพื้นที่ฟองโฟมเฉลี่ย และการกระจายตัวขนาดของขนาดฟองโฟมน้อยที่สุดเพราะปริมาณสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ที่มาก ระยะเวลาเริ่มคงรูป (scorch time) หรือ เคียวดีเลย์ (Cure delay) หรือ อินดักชั่น (Induction) จะมีระยะเวลานั้น ระยะเวลาการเกิดฟองโฟมในขณะความหนืดของเนื้อยางเมทริกซ์ (Matrix) เกิดขึ้นเร็วสัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 2 ส่วนในร้อยละ ขนาดพื้นที่ฟองโฟมเฉลี่ยที่พบ 0.5635 ตารางมิลลิเมตร อาจไม่เป็นไปตามทฤษฎีอาจเนื่องจากข้อจำกัดในการผสมยางโฟมคอมปาวด์ที่การกระจาย และแตกตัวของสารเคมีไม่สม่ำเสมอ การไม่สามารถกำจัดสิ่งระเหย เนื่องจากการผสมต้องอุณหภูมิต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันไม่ให้สารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนเกิดการสลายตัว



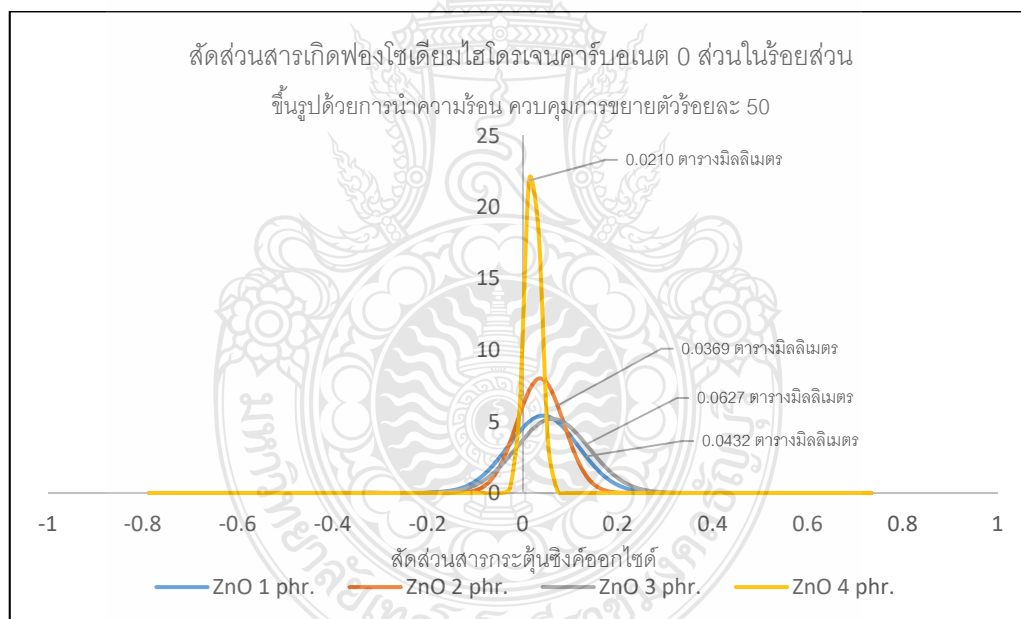
รูปที่ 4.21 กราฟแสดงขนาดพื้นที่เฉลี่ย และความสม่ำเสมอของฟองโฟมในยางธรรมชาติ ขึ้นรูปด้วยการพาคความร้อน ไม่ควบคุมการขยายตัว สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 2 3 และ 4 ส่วนในร้อยละ กับสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 15 ส่วนในร้อยละ

จากรูป 4.21 สัดส่วนสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตไฮโดรเจนคาร์บอเนต 15 ส่วนในร้อยละ กับสัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 2 3 และ 4 ส่วนในร้อยละพบค่าเฉลี่ยขนาดฟองโฟม 0.3507 0.4047 0.2696 และ 0.6007 ตารางมิลลิเมตรตามลำดับ

สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 4 ส่วนในร้อยละมีขนาดพื้นที่ฟองโฟมเฉลี่ยใหญ่ และการกระจายตัวขนาดของขนาดฟองโฟมมีมากที่สุด เพราะในช่วงเคียวดีเลย์ (Cure delay) หรือ อินดักชั่น (Induction) สารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตเริ่มแตกตัวที่อุณหภูมิ 50 องศา ที่การแตกตัวที่อุณหภูมิ

ดังกล่าวค่าความหนืดของยางเมทริกซ์ (Matrix) ยังมีค่าน้อยฟองโพนที่เกิดจึงมีขนาดใหญ่ และกระจายตัวมาก และในช่วงเคียวพีเรียด (Cure period) เป็นช่วงที่ความหนืดของยางเมทริกซ์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ฟองโพนคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดมีขนาดเล็ก ตามสัดส่วนของสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตที่มากขึ้นแทรกอยู่ระหว่างสายโซ่โมเลกุล ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลจึงถูกขัดขวางจากฟองก๊าซขนาดเล็ก ทำให้ความหนืดของยางเมทริกซ์ (Matrix) ลดลง หรือเกิดการรีเวิร์สชั่น (Reversion)

สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 3 ส่วนในร้อยละมีขนาดพื้นที่ฟองโพนเฉลี่ย และการกระจายตัวของขนาดของฟองโพนน้อยที่สุดเพราะปริมาณสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ที่มาก สารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตแตกตัวให้โซเดียมคาร์บอเนต ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) เมื่อละลายน้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) มีฤทธิ์เป็นด่างแก่ และสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ช่วยลดระยะเวลาเริ่มคงรูป (scorch time) หรือ เคียวดีเลย์ (Cure delay) หรือ อินดักชั่น (Induction) ให้สั้นลง ทำให้ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลสูง ความหนืดของเนื้อยางเมทริกซ์ (Matrix) เกิดขึ้นเร็ว ฟองโพนที่เกิดจึงมีขนาดเล็ก ละเอียดย และกระจายตัวสม่ำเสมอ



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงขนาดพื้นที่เฉลี่ย และความสม่ำเสมอของฟองโพนในยางธรรมชาติ ขึ้นรูปด้วยการนำความร้อน ควบคุมการขยายตัวร้อยละ 50 สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 2 3 และ 4 ส่วนในร้อยละ กับสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 0 ส่วนในร้อยละ

จากรูป 4.22 สัดส่วนสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตไฮโดรเจนคาร์บอเนต 0 ส่วนในร้อยส่วน กับสัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 2 3 และ 4 ส่วนในร้อยส่วนพบค่าเฉลี่ยขนาดฟองโฟม 0.0432 0.0369 0.0627 และ 0.0210 ตารางมิลลิเมตรตามลำดับ

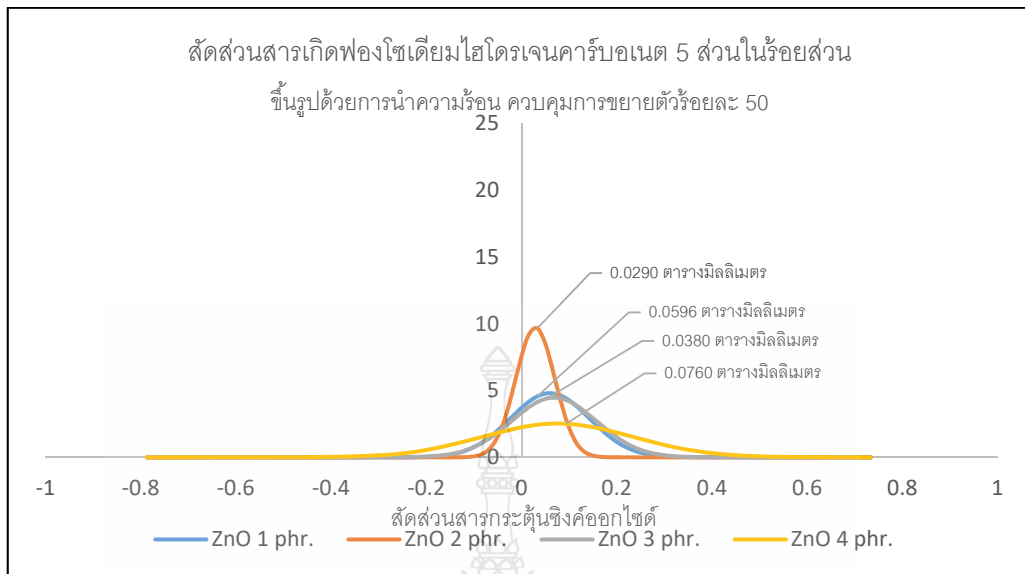
สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 และ 3 ส่วนในร้อยส่วนมีขนาดพื้นที่ฟองโฟมเฉลี่ยใหญ่ และการกระจายตัวขนาดของขนาดฟองโฟมมีมากใกล้เคียงกันเพราะการให้ความร้อนแบบการนำ (Conduction heat transfer) ระยะเวลาเริ่มคงรูป (scorch time) หรือ เคียวดีเลย์ (Cure delay) หรือ อินดักชั่น (Induction) มีระยะเวลานาน ความหนืดของเนื้อยางเมทริกซ์ (Matrix) เกิดขึ้นช้า

สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 4 ส่วนในร้อยส่วนมีขนาดพื้นที่ฟองโฟมเฉลี่ย และการกระจายตัวขนาดของขนาดฟองโฟมน้อยที่สุดเพราะปริมาณสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ที่มาก ระยะเวลาเริ่มคงรูป (scorch time) หรือ เคียวดีเลย์ (Cure delay) หรือ อินดักชั่น (Induction) จะมีระยะเวลาน้อย ระยะเวลาการเกิดฟองโฟมในขณะความหนืดของเนื้อยางเมทริกซ์ (Matrix) เกิดขึ้นเร็ว

ความแปรปรวนของขนาดเฉลี่ยฟองโฟม อาจเกิดจากระบบการถ่ายเทความร้อนให้กับยางโฟมคอมปาวด์ หรือพรีเคอร์เซอร์ (Precursor) ที่วางในแม่พิมพ์ ความแตกต่างระยะห่างจากผิวแม่พิมพ์เมื่อวางยางโฟมคอมปาวด์ หรือพรีเคอร์เซอร์ (Precursor) ที่บริเวณด้านล่างการถ่ายเทความร้อนจะเกิดในลักษณะการนำความร้อน (Conduction heat transfer) ระหว่างผิวแม่พิมพ์กับยางโฟมคอมปาวด์ หรือพรีเคอร์เซอร์ (Precursor) ส่วนด้านบนเป็นการถ่ายเทความร้อนจากผิวแม่พิมพ์ด้านบนกับยางโฟมคอมปาวด์ หรือพรีเคอร์เซอร์ (Precursor) จะเกิดในลักษณะการพาความร้อน (Free convection heat transfer) ที่ระยะห่างระหว่าง กล่าวคือแหล่งความร้อนจากผิวแม่พิมพ์จะนำสู่ตัวกลางที่เป็นอากาศ และอากาศจะพาความร้อนมาถ่ายเทให้กับยาง การเกิดลักษณะนี้จะทำให้เกิดความแตกต่างระหว่าง การกระจายของอุณหภูมิของชั้นยางคอมปาวด์ หรือพรีเคอร์เซอร์ (Precursor) ด้านบนและล่าง ที่มีต่อความหนาแน่นของการทำปฏิกิริยาการเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุล สมบัติเชิงกล หรือสัญญาณวิทยา ความแปรปรวนจะเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต และสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ที่เพิ่ม

ปัจจัยความแปรปรวนของค่าความหนาแน่นรวมอีกประการคือขนาดของความหนาแน่นงานยางโฟมคอมปาวด์ หรือพรีเคอร์เซอร์ (Precursor) ตามข้อกำหนดควบคุมการขยายตัว ร้อยละ 50 ด้วยพิกัดความเผื่อความหนาแน่นของชั้นงานยางโฟมคอมปาวด์ หรือพรีเคอร์เซอร์ (Precursor)  $6.5 \pm 0.5$  มิลลิเมตร ความหนาแน่นของชั้นงานที่เตรียมก่อนการขึ้นรูปจะอยู่ระหว่าง 6.0 – 7.0 มิลลิเมตร หรือเทียบเป็นการขยายตัวระหว่าง ร้อยละ 46.5 – 53.8

ปัจจัยอีกประการอาจเกิดได้จากเนื่องจากข้อจำกัดในการผสมยางโฟมคอมปาวด์ที่การกระจายและแตกตัวของสารเคมีไม่สม่ำเสมอ การไม่สามารถกำจัดสิ่งระเหย เนื่องจากการผสมต้องอุณหภูมิต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันไม่ให้สารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนเกิดการสลายตัว



**รูปที่ 4.23** กราฟแสดงขนาดพื้นที่เฉลี่ย และความสม่ำเสมอของฟองโฟมในยางธรรมชาติ ขึ้นรูปด้วยการนำความร้อน ควบคุมการขยายตัวร้อยละ 50 สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 2 3 และ 4 ส่วนในร้อยละ กับสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 5 ส่วนในร้อยละ

จากรูป 4.23 สัดส่วนสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตไฮโดรเจนคาร์บอเนต 5 ส่วนในร้อยละ กับสัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 2 3 และ 4 ส่วนในร้อยละ พบค่าเฉลี่ยขนาดฟองโฟม 0.0596 0.0290 0.0380 และ 0.0760 ตารางมิลลิเมตรตามลำดับ

สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 4 ส่วนในร้อยละ มีขนาดพื้นที่ฟองโฟมเฉลี่ยใหญ่ และการกระจายตัวของขนาดฟองโฟมมีมากที่สุด เพราะในช่วงเคียวดีเลย์ (Cure delay) หรือ อินดักชัน (Induction) สารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตเริ่มแตกตัวที่อุณหภูมิ 50 องศา ที่การแตกตัวที่อุณหภูมิดังกล่าวค่าความหนืดของยางเมทริกซ์ (Matrix) ยังมีค่าน้อย ฟองโฟมที่เกิดจึงมีขนาดใหญ่ และกระจายตัวมาก และในช่วงเคียวพีเรียด (Cure period) เป็นช่วงที่ความหนืดของยางเมทริกซ์ (Matrix) เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ฟองโฟมคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดมีขนาดเล็ก

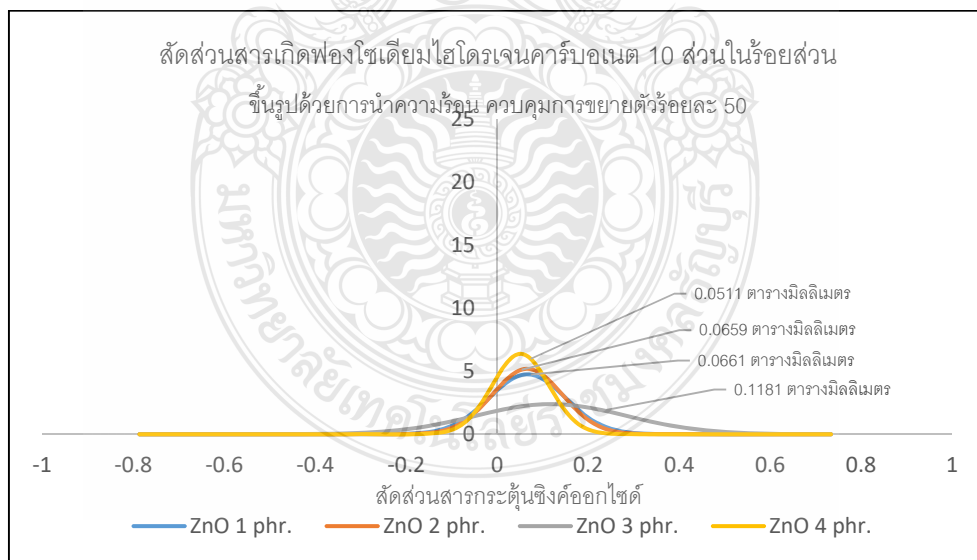
สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 2 ส่วนในร้อยละ มีขนาดพื้นที่ฟองโฟมเฉลี่ย และการกระจายตัวของขนาดฟองโฟมน้อยที่สุด เพราะสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตแตกตัวให้โซเดียมคาร์บอเนต ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) เมื่อละลายน้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) มีฤทธิ์เป็นด่างแก่ และสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ช่วยให้ระยะเวลาเริ่มคงรูป (scorch time) หรือ เคียวดีเลย์ (Cure delay) หรือ อินดักชัน (Induction) มีระยะเวลาสั้นลง

ความแปรปรวนของขนาดเฉลี่ยฟองโฟม อาจเกิดจากระบบการถ่ายเทความร้อนให้กับยางโฟมคอมปาวด์ หรือพรีเคอร์เซอร์ (Precursor) ที่วางในแม่พิมพ์ ความแตกต่างระยะห่างจากผิวแม่พิมพ์เมื่อวางยางโฟมคอมปาวด์ หรือพรีเคอร์เซอร์ (Precursor) ที่บริเวณด้านล่างการถ่ายเทความร้อนจะเกิดใน

ลักษณะการนำความร้อน (Conduction heat transfer) ระหว่างผิวแม่พิมพ์กับยางโพลีคอมปาวด์ หรือพรีเคอร์เซอร์ (Precursor) ส่วนด้านบนเป็นการถ่ายเทความร้อนจากผิวแม่พิมพ์ด้านบนกับยางโพลีคอมปาวด์ หรือพรีเคอร์เซอร์ (Precursor) จะเกิดในลักษณะการพาความร้อน (Free convection heat transfer) ที่ระยะห่างระหว่าง กล่าวคือแหล่งความร้อนจากผิวแม่พิมพ์จะนำสู่ตัวกลางที่เป็นอากาศ และอากาศจะพาความร้อนมาถ่ายเทให้กับยาง การเกิดลักษณะนี้จะทำให้เกิดความแตกต่างระหว่าง การกระจายของอุณหภูมิของชิ้นงานยางโพลีคอมปาวด์ หรือพรีเคอร์เซอร์ (Precursor) ด้านบนและล่าง ที่มีต่อความหนาแน่นของการทำปฏิกิริยาการเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุล สมบัติเชิงกล หรือสัณฐานวิทยา ความแปรปรวนจะเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต และสารกระตุ้น ซิงค์ออกไซด์ที่เพิ่ม

ปัจจัยความแปรปรวนของค่าความหนาแน่นรวมอีกประการคือขนาดของความหนาแน่นชิ้นงานยางโพลีคอมปาวด์ หรือพรีเคอร์เซอร์ (Precursor) ตามข้อกำหนดควบคุมการขยายตัว ร้อยละ 50 ด้วยพิกัดความเผื่อความหนาแน่นของชิ้นงานยางโพลีคอมปาวด์ หรือพรีเคอร์เซอร์ (Precursor)  $6.5 \pm 0.5$  มิลลิเมตร ความหนาแน่นของชิ้นงานที่เตรียมก่อนการขึ้นรูปจะอยู่ระหว่าง 6.0 – 7.0 มิลลิเมตร หรือเทียบเป็นการขยายตัวระหว่าง ร้อยละ 46.5 – 53.8

ปัจจัยอีกประการอาจเกิดได้จากเนื่องจากข้อจำกัดในการผสมยางโพลีคอมปาวด์ที่การกระจายและแตกตัวของสารเคมีไม่สม่ำเสมอ การไม่สามารถกำจัดสิ่งระเหย เนื่องจากการผสมต้องอุณหภูมิต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันไม่ให้สารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตเกิดการสลายตัว



รูปที่ 4.24 กราฟแสดงขนาดพื้นที่ที่เฉลี่ย และความสม่ำเสมอของฟองโพนในยางธรรมชาติ ขึ้นรูปด้วยการนำความร้อน ควบคุมการขยายตัวร้อยละ 50 สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 2 3 และ 4 ส่วนในร้อยละ กับสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 10 ส่วนในร้อยละ



จากรูป 4.24 สัดส่วนสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตไฮโดรเจนคาร์บอเนต 10 ส่วนในร้อยละ กับสัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 2 3 และ 4 ส่วนในร้อยละพบค่าเฉลี่ยขนาดฟองโฟม 0.0661 0.0659 0.01181 และ 0.0511 ตารางมิลลิเมตรตามลำดับ

สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 3 ส่วนในร้อยละมีขนาดพื้นที่ฟองโฟมเฉลี่ยใหญ่ และการกระจายตัวขนาดของขนาดฟองโฟมมีมากที่สุด เพราะในช่วงเคียวดีเลย์ (Cure delay) หรือ อินดักชั่น (Induction) สารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตเริ่มแตกตัวที่อุณหภูมิ 50 องศา ที่การแตกตัวที่อุณหภูมิดังกล่าวค่าความหนืดของยางเมทริกซ์ (Matrix) ยังมีค่าน้อยฟองโฟมที่เกิดจึงมีขนาดใหญ่ และกระจายตัวมาก และในช่วงเคียวพีเรียด (Cure period) เป็นช่วงที่ความหนืดของยางเมทริกซ์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ฟองโฟมคาร์บอเนตไดออกไซด์ที่เกิดมีขนาดเล็ก ตามสัดส่วนของสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตที่มากขึ้นแทรกอยู่ระหว่างสายโซ่โมเลกุล ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลจึงถูกขัดขวางจากฟองก๊าซขนาดเล็ก ทำให้ความหนืดของยางเมทริกซ์ (Matrix) ลดลง หรือเกิดการรีเวิร์สชั่น (Reversion)

สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 4 ส่วนในร้อยละมีขนาดพื้นที่ฟองโฟมเฉลี่ย และการกระจายตัวขนาดของขนาดฟองโฟมน้อยที่สุด เพราะสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตแตกตัวให้โซเดียมคาร์บอเนต ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) เมื่อละลายน้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) มีฤทธิ์เป็นด่างแก่ และสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ช่วยให้ระยะเวลาเริ่มคงรูป (scorch time) หรือ เคียวดีเลย์ (Cure delay) หรือ อินดักชั่น (Induction) มีระยะเวลาสั้นลง

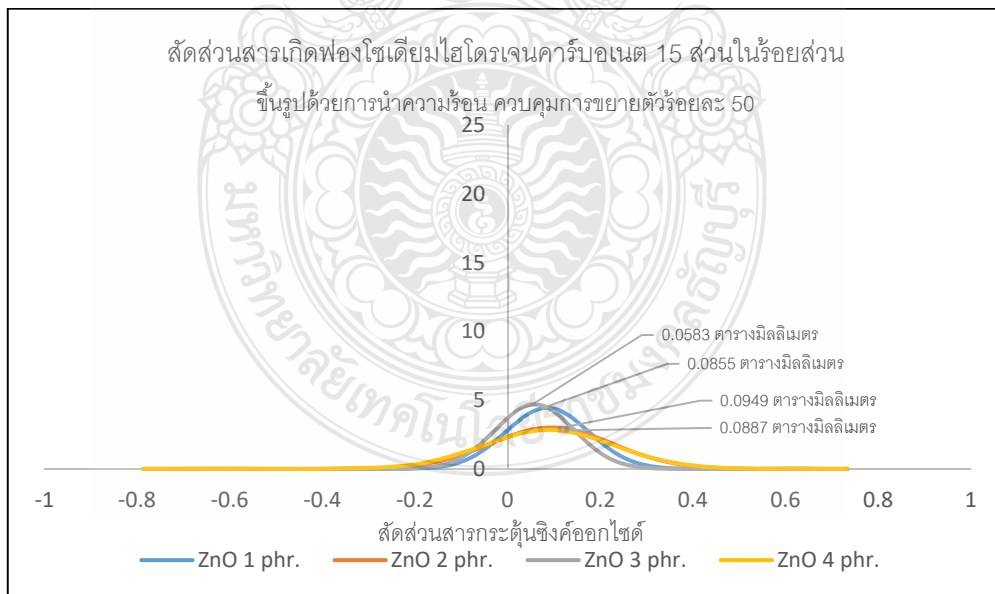
ความแปรปรวนของขนาดเฉลี่ยฟองโฟม อาจเกิดจากระบบการถ่ายเทความร้อนให้กับยางโฟมคอมปาวด์ หรือพรีเคอร์เซอร์ (Precursor) ที่วางในแม่พิมพ์ ความแตกต่างระยะห่างจากผิวแม่พิมพ์เมื่อวางยางโฟมคอมปาวด์ หรือพรีเคอร์เซอร์ (Precursor) ที่บริเวณด้านล่างการถ่ายเทความร้อนจะเกิดในลักษณะการนำความร้อน (Conduction heat transfer) ระหว่างผิวแม่พิมพ์กับยางโฟมคอมปาวด์ หรือพรีเคอร์เซอร์ (Precursor) ส่วนด้านบนเป็นการถ่ายเทความร้อนจากผิวแม่พิมพ์ด้านบนกับยางโฟมคอมปาวด์ หรือพรีเคอร์เซอร์ (Precursor) จะเกิดในลักษณะการพาความร้อน (Free convection heat transfer) ที่ระยะห่างระหว่าง กล่าวคือแหล่งความร้อนจากผิวแม่พิมพ์จะนำสู่ตัวกลางที่เป็นอากาศ และอากาศจะพาความร้อนมาถ่ายเทให้กับยาง การเกิดลักษณะนี้จะทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างการกระจายของอุณหภูมิของชั้นยางคอมปาวด์ หรือพรีเคอร์เซอร์ (Precursor) ด้านบนและล่างที่มีต่อความหนาแน่นของการทำปฏิกิริยาการเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุล สมบัติเชิงกล หรือสัณฐานวิทยา ความแปรปรวนจะเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต และสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ที่เพิ่ม

ปัจจัยความแปรปรวนของค่าความหนาแน่นรวมอีกประการคือขนาดของความหนาขึ้นงานยางโฟมคอมปาวด์ หรือพรีเคอร์เซอร์ (Precursor) ตามข้อกำหนดควบคุมการขยายตัว ร้อยละ 50 ด้วยพิกัดความเผื่อความหนาของชั้นงานยางโฟมคอมปาวด์ หรือพรีเคอร์เซอร์ (Precursor)  $6.5 \pm 0.5$  มิลลิเมตร

ความหนาของชั้นงานที่เตรียมก่อนการขึ้นรูปจะอยู่ระหว่าง 6.0 – 7.0 มิลลิเมตร หรือเทียบเป็นการขยายตัวระหว่าง ร้อยละ 46.5 – 53.8

ปัจจัยอีกประการอาจเกิดได้จากเนื่องจากข้อจำกัดในการผสมยางพอมคอมปาวด์ที่การกระจายและแตกตัวของสารเคมีไม่สม่ำเสมอ การไม่สามารถกำจัดสิ่งระเหย เนื่องจากการผสมต้องอุณหภูมิต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันไม่ให้สารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนเกิดการสลายตัวจากรูป 4.25 สัดส่วนสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตไฮโดรเจนคาร์บอเนต 15 ส่วนในร้อยละ กับสัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 2 3 และ 4 ส่วนในร้อยละ พบค่าเฉลี่ยขนาดฟองพอม 0.0855 0.0949 0.0583 และ 0.0887 ตารางมิลลิเมตรตามลำดับ

สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 4 ส่วนในร้อยละมีขนาดพื้นที่ฟองพอมเฉลี่ยใหญ่ และการกระจายตัวขนาดของขนาดฟองพอมมีมากที่สุด เพราะในช่วงเคียวดีเลย์ (Cure delay) หรือ อินдукชัน (Induction) สารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตเริ่มแตกตัวที่อุณหภูมิ 50 องศา ที่การแตกตัวที่อุณหภูมิดังกล่าวค่าความหนืดของยางเมทริกซ์ (Matrix) ยังมีค่าน้อยพองพอมที่เกิดจึงมีขนาดใหญ่ และกระจายตัวมาก และในช่วงเคียวพีเรียด (Cure period) เป็นช่วงที่ความหนืดของยางเมทริกซ์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ฟองพอมคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดมีขนาดเล็กตามสัดส่วนของสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตที่มากขึ้นแทรกอยู่ระหว่างสายโซ่โพลิเมอร์ ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสายโซ่โพลิเมอร์จึงถูกขัดขวางจากฟองก๊าซขนาดเล็ก ทำให้ความหนืดของยางเมทริกซ์ (Matrix) ลดลง หรือเกิดการรีเวิร์ตชัน (Reversion)



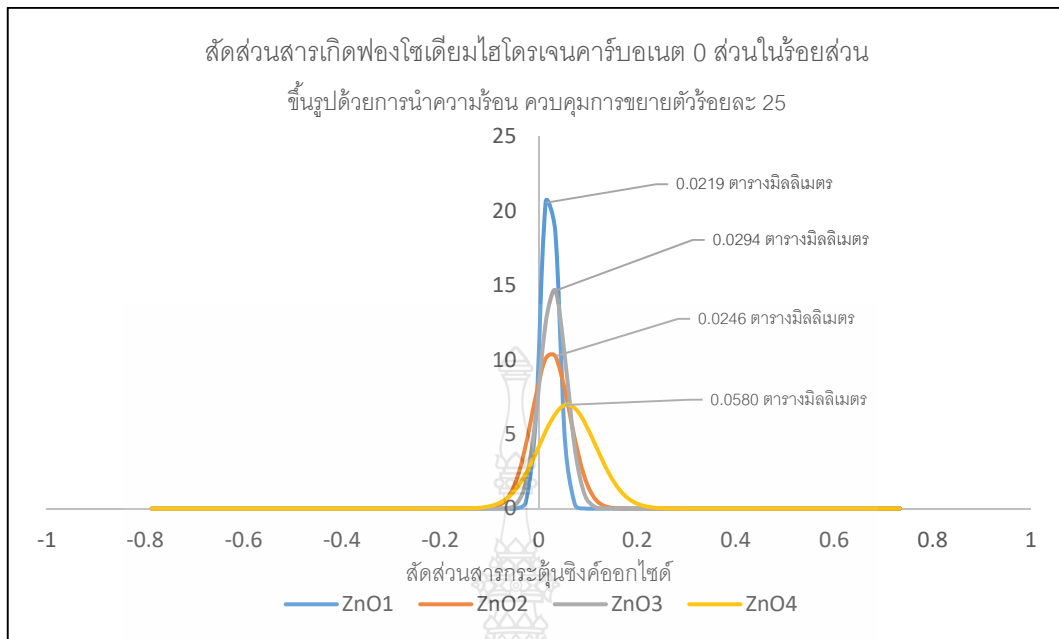
รูปที่ 4.25 กราฟแสดงขนาดพื้นที่เฉลี่ย และความสม่ำเสมอของฟองพอมในยางธรรมชาติ ขึ้นรูปด้วยการนำความร้อน ควบคุมการขยายตัวร้อยละ 50 สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 2 3 และ 4 ส่วนในร้อยละ กับสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 15 ส่วนในร้อยละ



สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 2 และ 3 ส่วนในร้อยละมีขนาดพื้นที่ฟองโพลีเมอริส และการกระจายตัวขนาดของขนาดฟองโพลีเมอริสที่น้อยที่สุด เพราะสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตแตกตัวให้โซเดียมคาร์บอเนต ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) เมื่อละลายน้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) มีฤทธิ์เป็นด่างแก่ ระยะเวลาเริ่มคงรูป (scorch time) หรือเคียวดีเลย์ (Cure delay) หรือ อินดักชั่น (Induction) มีระยะเวลาสั้น และสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ทำให้ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลสูง ความหนืดของเนื้อยางเมทริกซ์ (Matrix) เกิดขึ้นเร็ว ฟองโพลีเมอริสที่เกิดจึงมีขนาดเล็ก ละเอียด และกระจายตัวสม่ำเสมอ ความแปรปรวนของขนาดเฉลี่ยฟองโพลีเมอริส อาจเกิดจากระบบการถ่ายเทความร้อนให้กับยางโพลีคอมพาวด์ หรือพรีเคอร์เซอร์ (Precursor) ที่วางในแม่พิมพ์ ความแตกต่างระยะห่างจากผิวแม่พิมพ์เมื่อวางยางโพลีคอมพาวด์ หรือพรีเคอร์เซอร์ (Precursor) ที่บริเวณด้านล่างการถ่ายเทความร้อนจะเกิดในลักษณะการนำความร้อน (Conduction heat transfer) ระหว่างผิวแม่พิมพ์กับยางโพลีคอมพาวด์ หรือพรีเคอร์เซอร์ (Precursor) ส่วนด้านบนเป็นการถ่ายเทความร้อนจากผิวแม่พิมพ์ด้านบนกับยางโพลีคอมพาวด์ หรือพรีเคอร์เซอร์ (Precursor) จะเกิดในลักษณะการพาความร้อน (Free convection heat transfer) ที่ระยะห่างระหว่าง กล่าวคือ แหล่งความร้อนจากผิวแม่พิมพ์จะนำสู่ตัวกลางที่เป็นอากาศ และอากาศจะพาความร้อนมาถ่ายเทให้กับยาง การเกิดลักษณะนี้จะทำให้เกิดความแตกต่างระหว่าง การกระจายของอุณหภูมิของชั้นยางคอมพาวด์ หรือพรีเคอร์เซอร์ (Precursor) ด้านบนและล่างที่มีต่อความหนาแน่นของการทำปฏิกิริยาการเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุล สมบัติเชิงกล หรือสัณฐานวิทยา ความแปรปรวนจะเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต และสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ที่เพิ่ม

ปัจจัยความแปรปรวนของค่าความหนาแน่นรวมอีกประการคือขนาดของความหนาแน่นขึ้นงานยางโพลีคอมพาวด์ หรือพรีเคอร์เซอร์ (Precursor) ตามข้อกำหนดควบคุมการขยายตัว ร้อยละ 50 ด้วยพิกัดความเผื่อความหนาแน่นของชั้นงานยางโพลีคอมพาวด์ หรือพรีเคอร์เซอร์ (Precursor)  $6.5 \pm 0.5$  มิลลิเมตร ความหนาแน่นของชั้นงานที่เตรียมก่อนการขึ้นรูปจะอยู่ระหว่าง 6.0 – 7.0 มิลลิเมตร หรือเทียบเป็นการขยายตัวระหว่าง ร้อยละ 46.5 – 53.8

ปัจจัยอีกประการอาจเกิดได้จากเนื่องจากข้อจำกัดในการผสมยางโพลีคอมพาวด์ที่การกระจายและแตกตัวของสารเคมีไม่สม่ำเสมอ การไม่สามารถกำจัดสิ่งระเหย เนื่องจากการผสมต้องอุณหภูมิต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนเกิดการสลายตัว



**รูปที่ 4.26** กราฟแสดงขนาดพื้นที่เฉลี่ย และความสม่ำเสมอของฟองโฟมในยางธรรมชาติ ขึ้นรูปด้วยการนำความร้อน ควบคุมการขยายตัวร้อยละ 25 สัดส่วนสารกระตุ้นซึ่งคือออกไซด์ 1 2 3 และ 4 ส่วนในร้อยละ กับสารเกิดฟองโซเดียมไฮดรเจนคาร์บอเนต 0 ส่วนในร้อยละ

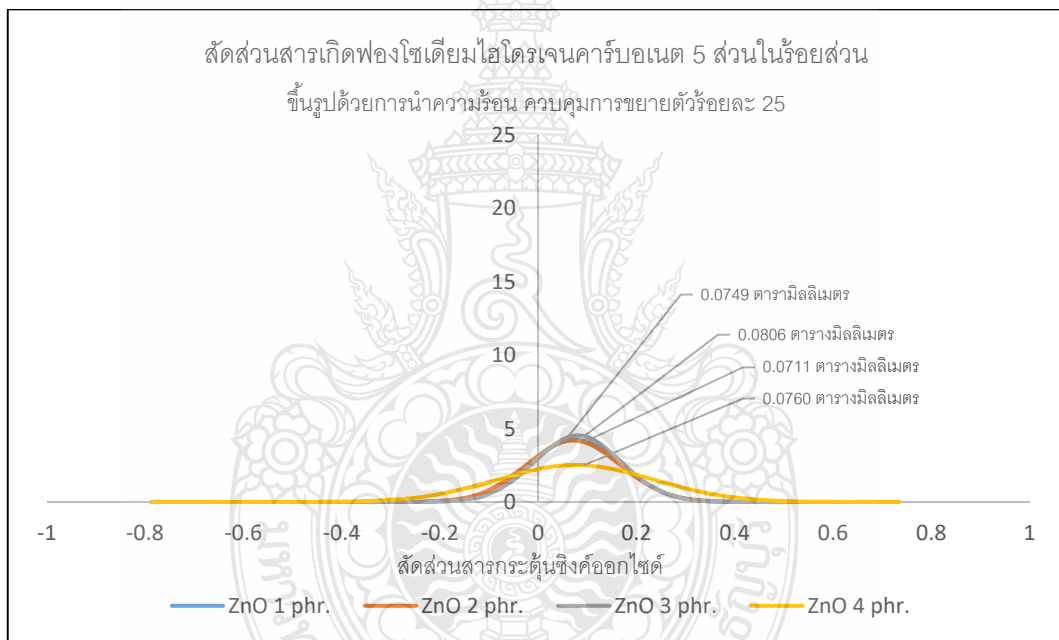
จากรูป 4.26 สัดส่วนสารเกิดฟองโซเดียมไฮดรเจนคาร์บอเนตไฮดรเจนคาร์บอเนต 0 ส่วนในร้อยละ กับสัดส่วนสารกระตุ้นซึ่งคือออกไซด์ 1 2 3 และ 4 ส่วนในร้อยละพบค่าเฉลี่ยขนาดฟองโฟม 0.0219 0.0246 0.0294 และ 0.0580 ตารางมิลลิเมตรตามลำดับ

สัดส่วนสารกระตุ้นซึ่งคือออกไซด์ 4 ส่วนในร้อยละมีขนาดพื้นที่ฟองโฟมเฉลี่ยใหญ่ และการกระจายตัวขนาดของขนาดฟองโฟมมีมาก สัดส่วนสารกระตุ้นซึ่งคือออกไซด์ 1 ส่วนในร้อยละมีขนาดพื้นที่ฟองโฟมเฉลี่ย และการกระจายตัวขนาดของขนาดฟองโฟมน้อยที่สุด ความแปรปรวนของขนาดเฉลี่ยฟองโฟมอาจเกิดจากระบบการถ่ายเทความร้อนให้กับยางโฟม คอมปาวด์ หรือพรีเคอร์เซอร์ (Precursor) ที่วางในแม่พิมพ์ ความแตกต่างระยะห่างจากผิวแม่พิมพ์เมื่อวางยางโฟมคอมปาวด์ หรือพรีเคอร์เซอร์ (Precursor) ที่บริเวณด้านล่างการถ่ายเทความร้อนจะเกิดในลักษณะการนำความร้อน (Conduction heat transfer) ระหว่างผิวแม่พิมพ์กับยางโฟมคอมปาวด์ หรือพรีเคอร์เซอร์ (Precursor) ส่วนด้านบนเป็นการถ่ายเทความร้อนจากผิวแม่พิมพ์ด้านบนกับยางโฟมคอมปาวด์ หรือพรีเคอร์เซอร์ (Precursor) จะเกิดในลักษณะการพาความร้อน (Free convection heat transfer) ที่ระยะห่างระหว่าง กล่าวคือแหล่งความร้อนจากผิวแม่พิมพ์จะนำสู่ตัวกลางที่เป็นอากาศ และอากาศจะพาความร้อนมาถ่ายเทให้กับยาง การเกิดลักษณะนี้ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่าง การกระจายของอุณหภูมิของชั้นยางคอมปาวด์ หรือพรีเคอร์เซอร์ (Precursor) ด้านบนและล่างที่มีต่อความหนาแน่นของการทำปฏิกิริยาการเชื่อมโยงสายโซ่

โมเลกุล สมบัติเชิงกล หรือสัณฐานวิทยา ความแปรปรวนจะเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต และสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ที่เพิ่ม

ปัจจัยความแปรปรวนของค่าความหนาแน่นรวมอีกประการคือขนาดของความหนาขึ้นงานยางโฟมคอมปาวด์ หรือพรีเคอร์เซอร์ (Precursor) ตามข้อกำหนดควบคุมการขยายตัว ร้อยละ 50 ด้วยพิกัดความเพื่อความหนาของขึ้นงานยางโฟมคอมปาวด์ หรือพรีเคอร์เซอร์ (Precursor)  $9.75 \pm 0.5$  มิลลิเมตร ความหนาของขึ้นงานที่เตรียมก่อนการขึ้นรูปจะอยู่ระหว่าง 9.25 – 10.25 มิลลิเมตร หรือเทียบเป็นการขยายตัวระหว่าง ร้อยละ 71.15– 78.84

ปัจจัยอีกประการอาจเกิดได้จากเนื่องจากข้อจำกัดในการผสมยางโฟมคอมปาวด์ที่การกระจายและแตกตัวของสารเคมีไม่สม่ำเสมอ การไม่สามารถกำจัดสิ่งระเหย เนื่องจากการผสมต้องอุณหภูมิต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันไม่ให้สารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนเกิดการสลายตัว



รูปที่ 4.27 กราฟแสดงขนาดพื้นที่เฉลี่ย และความสม่ำเสมอของฟองโฟมในยางธรรมชาติ ขึ้นรูปด้วยการนำความร้อน ควบคุมการขยายตัวร้อยละ 25 สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 2 3 และ 4 ส่วนในร้อยละ กับสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 5 ส่วนในร้อยละ

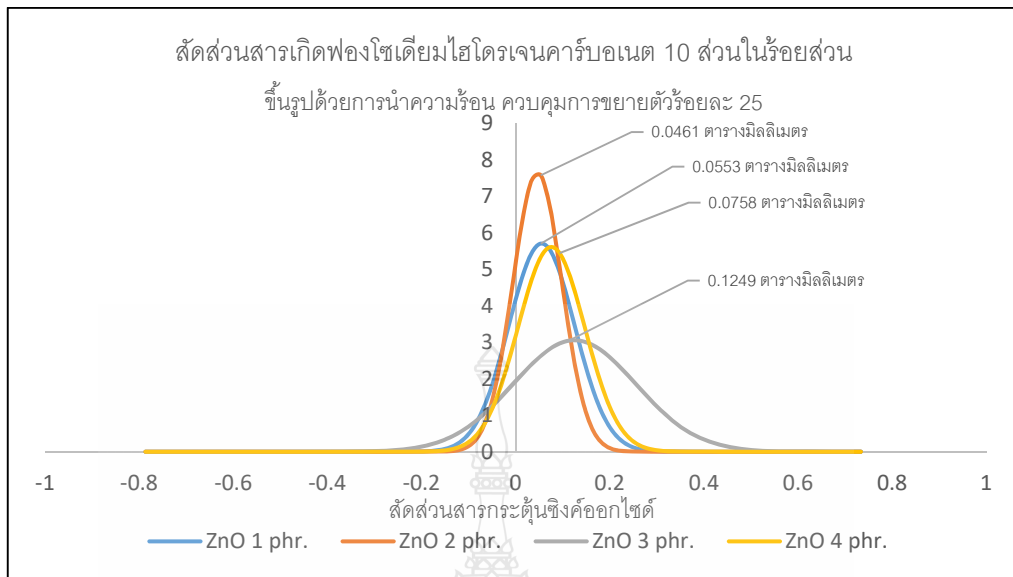
จากรูป 4.27 สัดส่วนสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตไฮโดรเจนคาร์บอเนต 0 ส่วนในร้อยละ กับสัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 2 3 และ 4 ส่วนในร้อยละพบค่าเฉลี่ยขนาดฟองโฟม 0.0806 0.0749 0.0711 และ 0.0760 ตารางมิลลิเมตรตามลำดับ

สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 4 ส่วนในร้อยละมีขนาดพื้นที่ฟองโพนเฉลี่ยใหญ่ และการกระจายตัวขนาดของขนาดฟองโพนมีมาก เพราะในช่วงเคียวดีเลย์ (Cure delay) หรือ อินดักชัน (Induction) สารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตเริ่มแตกตัวที่อุณหภูมิ 50 องศา ที่การแตกตัวที่อุณหภูมิดังกล่าวค่าความหนืดของยางเมทริกซ์ (Matrix) ยังมีค่าน้อยฟองโพนที่เกิดจึงมีขนาดใหญ่ และกระจายตัวมาก และในช่วงเคียวพีเรียด (Cure period) เป็นช่วงที่ความหนืดของยางเมทริกซ์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ฟองโพนคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดมีขนาดเล็ก ตามสัดส่วนของสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตที่มากขึ้นแทรกอยู่ระหว่างสายโซ่โมเลกุล ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลจึงถูกขัดขวางจากฟองก๊าซขนาดเล็ก ทำให้ความหนืดของยางเมทริกซ์ (Matrix) ลดลง หรือเกิดการรีเวิร์สชัน (Reversion)

สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 2 และ 3 ส่วนในร้อยละมีขนาดพื้นที่ฟองโพนเฉลี่ย และการกระจายตัวขนาดของขนาดฟองโพนน้อยใกล้เคียงกันทั้งหมด ความแปรปรวนของขนาดเฉลี่ยฟองโพนอาจเกิดจากระบบการถ่ายเทความร้อนให้กับยางโพน คอมปาวด์ หรือพรีเคอร์เซอร์ (Precursor) ที่วางในแม่พิมพ์ ความแตกต่างระยะห่างจากผิวแม่พิมพ์เมื่อวางยางโพนคอมปาวด์ หรือพรีเคอร์เซอร์ (Precursor) ที่บริเวณด้านล่างการถ่ายเทความร้อนจะเกิดในลักษณะการนำความร้อน (Conduction heat transfer) ระหว่างผิวแม่พิมพ์กับยางโพนคอมปาวด์ หรือพรีเคอร์เซอร์ (Precursor) ส่วนด้านบนเป็นการถ่ายเทความร้อนจากผิวแม่พิมพ์ด้านบนกับยางโพนคอมปาวด์ หรือพรีเคอร์เซอร์ (Precursor) จะเกิดในลักษณะการพาความร้อน (Free convection heat transfer) ที่ระยะห่างระหว่าง กล่าวคือแหล่งความร้อนจากผิวแม่พิมพ์จะนำสู่ตัวกลางที่เป็นอากาศ และอากาศจะพาความร้อนมาถ่ายเทให้กับยาง การเกิดลักษณะนี้จะทำให้เกิดความแตกต่างระหว่าง การกระจายของอุณหภูมิของชั้นยางคอมปาวด์ หรือพรีเคอร์เซอร์ (Precursor) ด้านบนและล่างที่มีต่อความหนาแน่นของการทำปฏิกิริยาการเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุล สมบัติเชิงกล หรือสัญญาณวิทยา ความแปรปรวนจะเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต และสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ที่เพิ่ม

ปัจจัยความแปรปรวนของค่าความหนาแน่นรวมอีกประการคือขนาดของความหนาแน่นงานยางโพนคอมปาวด์ หรือพรีเคอร์เซอร์ (Precursor) ตามข้อกำหนดควบคุมการขยายตัว ร้อยละ 50 ด้วยพิกัดความเผื่อความหนาแน่นของชั้นงานยางโพนคอมปาวด์ หรือพรีเคอร์เซอร์ (Precursor)  $9.75 \pm 0.5$  มิลลิเมตร ความหนาแน่นของชั้นงานที่เตรียมก่อนการขึ้นรูปจะอยู่ระหว่าง 9.25 – 10.25 มิลลิเมตร หรือเทียบเป็นการขยายตัวระหว่าง ร้อยละ 71.15– 78.84

ปัจจัยอีกประการอาจเกิดได้จากเนื่องจากข้อจำกัดในการผสมยางโพนคอมปาวด์ที่การกระจายและแตกตัวของสารเคมีไม่สม่ำเสมอ การไม่สามารถกำจัดสิ่งระเหย เนื่องจากการผสมต้องอุณหภูมิต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนเกิดการสลายตัว



**รูปที่ 4.28** กราฟแสดงขนาดพื้นที่เฉลี่ย และความสม่ำเสมอของฟองโพนในยางธรรมชาติ ขึ้นรูปด้วยการนำความร้อน ควบคุมการขยายตัวร้อยละ 25 สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 2 3 และ 4 ส่วนในร้อยละ กับสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 10 ส่วนในร้อยละ

จากรูป 4.28 สัดส่วนสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตไฮโดรเจนคาร์บอเนต 0 ส่วนในร้อยละ กับสัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 2 3 และ 4 ส่วนในร้อยละ พบค่าเฉลี่ยขนาดฟองโพน 0.0553 0.0461 0.1249 และ 0.0758 ตารางมิลลิเมตรตามลำดับ

สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 3 ส่วนในร้อยละ มีขนาดพื้นที่ฟองโพนเฉลี่ยใหญ่ และการกระจายตัวขนาดของขนาดฟองโพนมีมาก เพราะในช่วงเคียวดีเลย์ (Cure delay) หรือ อินดักชั่น (Induction) สารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตเริ่มแตกตัวที่อุณหภูมิ 50 องศา ที่การแตกตัวที่อุณหภูมิดังกล่าวค่าความหนืดของยางเมทริกซ์ (Matrix) ยังมีค่าน้อยฟองโพนที่เกิดจึงมีขนาดใหญ่ และกระจายตัวมาก และในช่วงเคียวพีเรียด (Cure period) เป็นช่วงที่ความหนืดของยางเมทริกซ์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ฟองโพนคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดมีขนาดเล็ก ตามสัดส่วนของสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตที่มากขึ้นแทรกอยู่ระหว่างสายโซ่โมเลกุล ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลจึงถูกขัดขวางจากฟองก๊าซขนาดเล็ก ทำให้ความหนืดของยางเมทริกซ์ (Matrix) ลดลง หรือเกิดการรีเวิร์ชัน (Reversion)

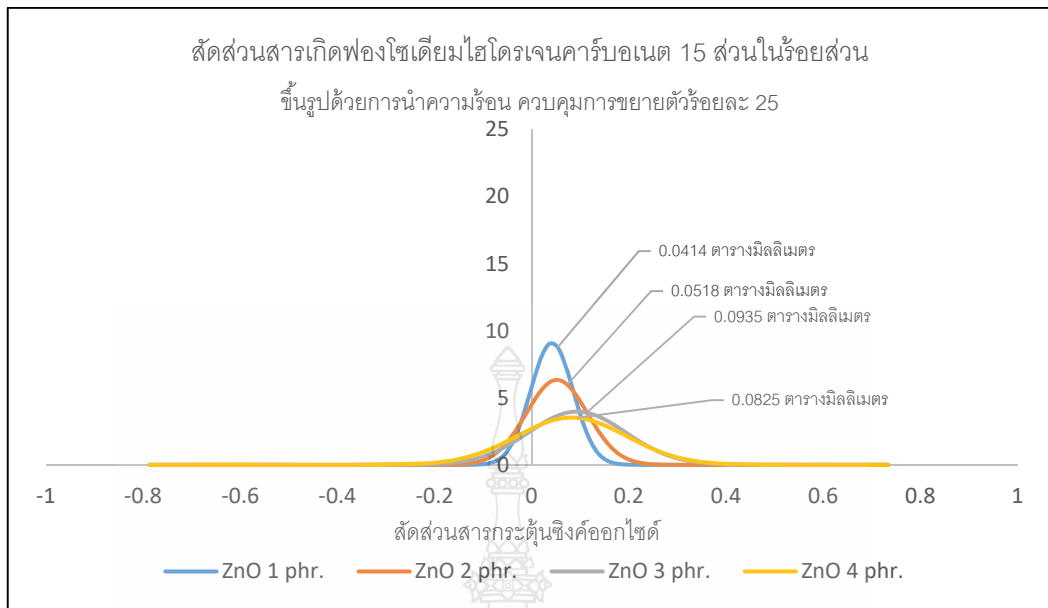
สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 2 ส่วนในร้อยละ มีขนาดพื้นที่ฟองโพนเฉลี่ย และการกระจายตัวขนาดของขนาดฟองโพนน้อยที่สุด เพราะสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตแตกตัวให้โซเดียมคาร์บอเนต ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) เมื่อละลายน้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) มีฤทธิ์เป็นด่างแก่ ระยะเวลาเริ่มคงรูป (scorch time) หรือ เคียวดีเลย์ (Cure delay) หรือ อินดักชั่น (Induction) มีระยะเวลาสั้น และสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ช่วยทำให้ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลสูง ความหนืดของเนื้อยางเมทริกซ์ (Matrix) เกิดขึ้น

เร็ว ฟองโฟมที่เกิดจึงมีขนาดเล็ก ละเอียด และกระจายตัวสม่ำเสมอ ความแปรปรวนของขนาดเฉลี่ยฟองโฟม อาจเกิดจากระบบการถ่ายเทความร้อนให้กับยางโฟม คอมปาวด์ หรือพรีเคอร์เซอร์ (Precursor) ที่วางในแม่พิมพ์ ความแตกต่างระยะห่างจากผิวแม่พิมพ์เมื่อวางยางโฟมคอมปาวด์ หรือพรีเคอร์เซอร์ (Precursor) ที่บริเวณด้านล่างการถ่ายเทความร้อนจะเกิดในลักษณะการนำความร้อน (Conduction heat transfer) ระหว่างผิวแม่พิมพ์กับยางโฟมคอมปาวด์ หรือพรีเคอร์เซอร์ (Precursor) ส่วนด้านบนเป็นการถ่ายเทความร้อนจากผิวแม่พิมพ์ด้านบนกับยางโฟมคอมปาวด์ หรือพรีเคอร์เซอร์ (Precursor) จะเกิดในลักษณะการพาความร้อน (Free convection heat transfer) ที่ระยะห่างระหว่าง กล่าวคือ แหล่งความร้อนจากผิวแม่พิมพ์จะนำสู่ตัวกลางที่เป็นอากาศ และอากาศจะพาความร้อนมาถ่ายเทให้กับยาง การเกิดลักษณะนี้ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่าง การกระจายของอุณหภูมิของชั้นยางคอมปาวด์ หรือพรีเคอร์เซอร์ (Precursor) ด้านบนและล่างที่มีต่อความหนาแน่นของการทำปฏิกิริยาการเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุล สมบัติเชิงกล หรือสัณฐานวิทยา ความแปรปรวนจะเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต และสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ที่เพิ่ม

ปัจจัยความแปรปรวนของค่าความหนาแน่นรวมอีกประการคือขนาดของความหนาแน่นงานยางโฟมคอมปาวด์ หรือพรีเคอร์เซอร์ (Precursor) ตามข้อกำหนดควบคุมการขยายตัว ร้อยละ 50 ด้วยพิกัดความเผื่อความหนาแน่นของชั้นงานยางโฟมคอมปาวด์ หรือพรีเคอร์เซอร์ (Precursor)  $9.75 \pm 0.5$  มิลลิเมตร ความหนาแน่นของชั้นงานที่เตรียมก่อนการขึ้นรูปจะอยู่ระหว่าง 9.25 – 10.25 มิลลิเมตร หรือเทียบเป็นการขยายตัวระหว่าง ร้อยละ 71.15– 78.84

ปัจจัยอีกประการอาจเกิดได้จากเนื่องจากข้อจำกัดในการผสมยางโฟมคอมปาวด์ที่การกระจายและแตกตัวของสารเคมีไม่สม่ำเสมอ การไม่สามารถกำจัดสิ่งระเหย เนื่องจากการผสมต้องอุณหภูมิต่ำกว่า 5 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันไม่ให้สารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนเกิดการสลายตัวจากรูป 4.29 สัดส่วนสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตไฮโดรเจนคาร์บอเนต 0 ส่วนในร้อยละ กับสัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 2 3 และ 4 ส่วนในร้อยละพบค่าเฉลี่ยขนาดฟองโฟม 0.0414 0.0518 0.0825 และ 0.0935 ตารางมิลลิเมตรตามลำดับ

สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 3 และ 4 ส่วนในร้อยละมีขนาดพื้นที่ฟองโฟมเฉลี่ยใหญ่ และการกระจายตัวของขนาดฟองโฟมมีมาก เพราะในช่วงเคียวดีเลย์ (Cure delay) หรือ อินดักชั่น (Induction) สารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตเริ่มแตกตัวที่อุณหภูมิ 50 องศา ที่การแตกตัวที่อุณหภูมิดังกล่าวค่าความหนืดของยางเมทริกซ์ (Matrix) ยังมีค่าน้อยฟองโฟมที่เกิดจึงมีขนาดใหญ่ และกระจายตัวมาก และในช่วงเคียวพีเรียด (Cure period) เป็นช่วงที่ความหนืดของยางเมทริกซ์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ฟองโฟมคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดมีขนาดเล็ก ตามสัดส่วนของสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตที่มากขึ้นแทรกอยู่ระหว่างสายโซ่โมเลกุล ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลจึงถูกขัดขวางจากฟองก๊าซขนาดเล็ก ทำให้ความหนืดของยางเมทริกซ์ (Matrix) ลดลง หรือเกิดการรีเวิร์สชั่น (Reversion)



**รูปที่ 4.29** กราฟแสดงขนาดพื้นที่เฉลี่ย และความสม่ำเสมอของฟองโฟมในยางธรรมชาติ ขึ้นรูปด้วยการนำความร้อน ควบคุมการขยายตัวร้อยละ 25 สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 2 3 และ 4 ส่วนในร้อยละส่วน กับสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 15 ส่วนในร้อยละส่วน

สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 ส่วนในร้อยละส่วนมีขนาดพื้นที่ฟองโฟมเฉลี่ย และการกระจายตัวของขนาดของขนาดฟองโฟมน้อยที่สุด ความแปรปรวนของขนาดเฉลี่ยฟองโฟม อาจเกิดจากระบบการถ่ายเทความร้อนให้กับยางโฟม คอมปาวด์ หรือพรีเคอร์เซอร์ (Precursor) ที่วางในแม่พิมพ์ ความแตกต่างระยะห่างจากผิวแม่พิมพ์เมื่อวางยางโฟมคอมปาวด์ หรือพรีเคอร์เซอร์ (Precursor) ที่บริเวณด้านล่างการถ่ายเทความร้อนจะเกิดในลักษณะการนำความร้อน (Conduction heat transfer) ระหว่างผิวแม่พิมพ์กับยางโฟมคอมปาวด์ หรือพรีเคอร์เซอร์ (Precursor) ส่วนด้านบนเป็นการถ่ายเทความร้อนจากผิวแม่พิมพ์ด้านบนกับยางโฟมคอมปาวด์ หรือพรีเคอร์เซอร์ (Precursor) จะเกิดในลักษณะการพาความร้อน (Free convection heat transfer) ที่ระยะห่างระหว่าง กล่าวคือแหล่งความร้อนจากผิวแม่พิมพ์จะนำสู่ตัวกลางที่เป็นอากาศ และอากาศจะพาความร้อนมาถ่ายเทให้กับยาง การเกิดลักษณะนี้จะทำให้เกิดความแตกต่างระหว่าง การกระจายของอุณหภูมิของชั้นยางคอมปาวด์ หรือพรีเคอร์เซอร์ (Precursor) ด้านบนและล่างที่มีต่อความหนาแน่นของการทำปฏิกิริยาการเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุล สมบัติเชิงกล หรือ สันฐานวิทยา ความแปรปรวนจะเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต และสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ที่เพิ่ม

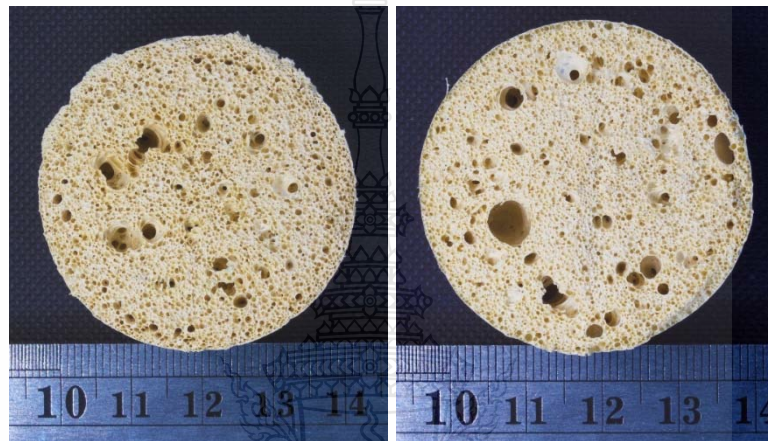
ปัจจัยความแปรปรวนของค่าความหนาแน่นรวมอีกประการคือขนาดของความหนาแน่นงานยางโฟมคอมปาวด์ หรือพรีเคอร์เซอร์ (Precursor) ตามข้อกำหนดควบคุมการขยายตัว ร้อยละ 50 ด้วยพิกัดความเผื่อความหนาแน่นของชั้นงานยางโฟมคอมปาวด์ หรือพรีเคอร์เซอร์ (Precursor)  $9.75 \pm 0.5$



มิลลิเมตร ความหนาของชิ้นงานที่เตรียมก่อนการขึ้นรูปจะอยู่ระหว่าง 9.25 – 10.25 มิลลิเมตร หรือเทียบเป็นการขยายตัวระหว่าง ร้อยละ 71.15– 78.84

ปัจจัยอีกประการอาจเกิดได้จากเนื่องจากข้อจำกัดในการผสมยางพอมคอมปาวด์ที่การกระจายและแตกตัวของสารเคมีไม่สม่ำเสมอ การไม่สามารถกำจัดสิ่งระเหย เนื่องจากการผสมต้องอุณหภูมิต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนเกิดการสลายตัว

#### 4.2.5 สัณฐานวิทยา (Morphology)



(ก)

(ข)



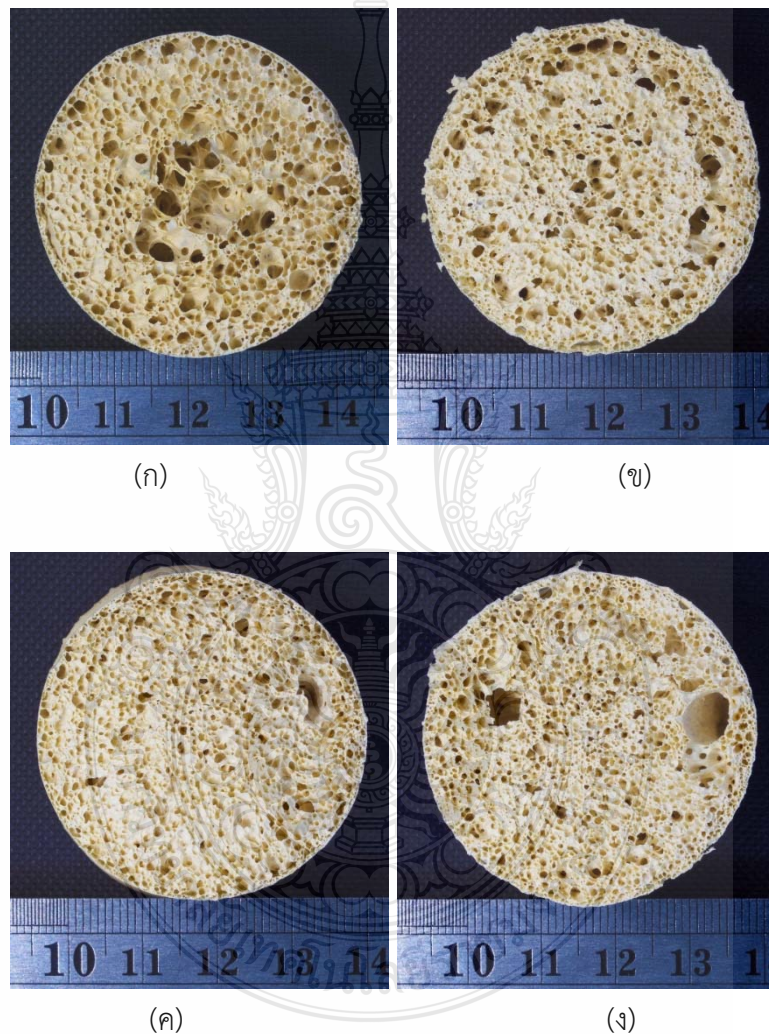
(ค)

(ง)

**รูปที่ 4.30** ภาพถ่ายแสดงโฟมยางขึ้นรูปแบบการพาคความร้อน ไม่ควบคุมการขยายตัว สัณฐานสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอนेट 0 ส่วนในร้อยละ (ก) สัณฐานสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 ส่วนในร้อยละ (ข) สัณฐานสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 2 ส่วนในร้อยละ (ค) สัณฐานสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 3 ส่วนในร้อยละ (ง) สัณฐานสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 4 ส่วนในร้อยละ



จากรูปที่ 4.30 เมื่อพิจารณาด้วยสายตาพบว่าขนาดของฟองโพนมีขนาดใหญ่ขึ้นตามสัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 2 ส่วนในร้อยละมีขนาดฟองที่เล็ก ละเอียดมากที่สุด สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 4 ส่วนในร้อยละมีขนาดฟองที่หยาบที่สุด ลักษณะฟองโพนที่พบเป็นแบบเปิด เมื่อสังเกตบริเวณขอบด้านข้างพบฟองโพนละเอียดขนาดเล็กลงกว่าด้านในเนื่องจาก การกระจายของความร้อนจากภายนอกทำให้เกิดการเริ่มคงรูป และคงรูปก่อนด้านในทำให้ฟองโพนมีขนาดเล็ก



**รูปที่ 4.31** ภาพถ่ายแสดงโพนยางขึ้นรูปแบบการพาความร้อน ไม่ควบคุมการขยายตัว สัดส่วนสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 5 ส่วนในร้อยละ (ก) สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 ส่วนในร้อยละ (ข) สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 2 ส่วนในร้อยละ (ค) สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 3 ส่วนในร้อยละ (ง) สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 4 ส่วนในร้อยละ

จากรูปที่ 4.31 เมื่อพิจารณาด้วยสายตาพบว่าขนาดของฟองโพลีเมอร์กึ่งกลางตามสัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น แสดงว่าสัดส่วนสารกระตุ้นที่เพิ่มขึ้นทำให้ระยะเวลาเริ่มคงรูป และคงรูปเกิดขึ้นเร็ว สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 3 และ 4 ส่วนในร้อยละมีขนาดฟองที่เล็ก ละเอียดมากที่สุด สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 ส่วนในร้อยละมีขนาดฟองที่หยาบที่สุด ลักษณะฟองโพลีเมที่พบเป็นแบบเปิด เมื่อสังเกตบริเวณขอบด้านข้างพบฟองโพลีเมละลายขนาดเล็กลงกว่าด้านในเนื่องจากการกระจายของความร้อนจากภายนอกทำให้เกิดการเริ่มคงรูป และคงรูปก่อนด้านในทำให้ฟองโพลีเมมีขนาดเล็ก



รูปที่ 4.32 ภาพถ่ายแสดงโพลีเมอย่างขึ้นรูปแบบการพาความร้อน ไม่ควบคุมการขยายตัว สัดส่วนสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 10 ส่วนในร้อยละ (ก) สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 ส่วนในร้อยละ (ข) สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 2 ส่วนในร้อยละ (ค) สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 3 ส่วนในร้อยละ (ง) สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 4 ส่วนในร้อยละ

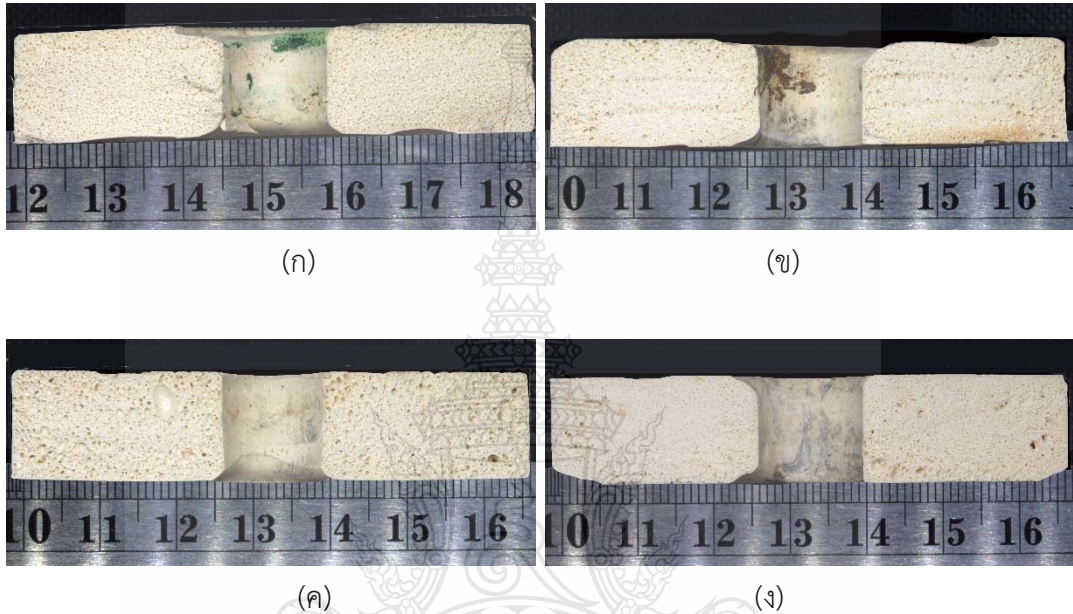


จากรูปที่ 4.32 เมื่อพิจารณาด้วยสายตาพบว่าโพนยางที่มีสัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 2 3 และ 4 ส่วนในร้อยละมีขนาดฟองโพนใกล้เคียงกัน ลักษณะฟองโพนที่พบเป็นแบบเปิด เมื่อสังเกตบริเวณขอบด้านข้างพบฟองโพนละเอียดขนาดเล็กมากกว่าด้านในเนื่องจากการกระจายของความร้อนจากภายนอกมีมาก และนานกว่าทำให้เกิดการเริ่มคงรูป และคงรูปก่อนด้านในทำให้ฟองโพนมีขนาดเล็ก



**รูปที่ 4.33** ภาพถ่ายแสดงโพนยางขึ้นรูปแบบการพาความร้อน ไม่ควบคุมการขยายตัว สัดส่วนสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 15 ส่วนในร้อยละ (ก) สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 ส่วนในร้อยละ (ข) สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 2 ส่วนในร้อยละ (ค) สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 3 ส่วนในร้อยละ (ง) สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 4 ส่วนในร้อยละ

จากรูปที่ 4.33 เมื่อพิจารณาด้วยสายตาพบว่าสัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 2 และ 3 ส่วนใน ร้อยส่วนมีฟองโฟมมีเล็กเท่ากัน สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 4 ส่วนในร้อยส่วนมีขนาดฟองโฟมใหญ่ ที่สุด แสดงว่าเกิดการรีเวิร์ชัน (Reversion) ลักษณะฟองโฟมที่พบเป็นแบบเปิด เมื่อสังเกตบริเวณขอบ ด้านข้างพบฟองโฟมละเอียดขนาดเล็กละเอียดขนาดเล็กละเอียดมากกว่าด้านในเนื่องจากการกระจายของความร้อนจากภายนอก ทำให้เกิดการเริ่มคงรูป และคงรูปก่อนด้านในทำให้ฟองโฟมมีขนาดเล็ก



รูปที่ 4.34 ภาพถ่ายแสดงโฟมอย่างขึ้นรูปแบบการพาความร้อน ควบคุมการขยายตัว ร้อยละ 50 สัดส่วน สารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 0 ส่วนในร้อยส่วน (ก) สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 ส่วนในร้อยส่วน (ข) สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 2 ส่วนในร้อยส่วน (ค) สัดส่วนสาร กระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 3 ส่วนในร้อยส่วน (ง) สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 4 ส่วนในร้อยส่วน

จากรูปที่ 4.34 เมื่อพิจารณาด้วยสายตาพบว่าสัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 4 ส่วนในร้อยส่วน มีฟองโฟมละเอียดที่สุด สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 3 ส่วนในร้อยส่วนมีขนาดฟองโฟมหยาบที่สุด ลักษณะฟองโฟมที่พบเป็นแบบปิด เมื่อสังเกตบริเวณขอบด้านบนพบฟองโฟมหยาบมากกว่าด้านใน เนื่องจากการนำความร้อนเกิดที่ด้านล่างก่อนทำให้เกิดการเริ่มคงรูป และคงรูปก่อนด้านบนฟองโฟมได้ จึงมีความละเอียด



(ก)

(ข)



(ค)

(ง)

**รูปที่ 4.35** ภาพถ่ายแสดงโฟมยางขึ้นรูปแบบการพาความร้อน ควบคุมการขยายตัว ร้อยละ 50 สัดส่วนสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 5 ส่วนในร้อยละ (ก) สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 ส่วนในร้อยละ (ข) สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 2 ส่วนในร้อยละ (ค) สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 3 ส่วนในร้อยละ (ง) สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 4 ส่วนในร้อยละ

จากรูปที่ 4.35 เมื่อพิจารณาด้วยสายตาพบว่าสัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 2 ส่วนในร้อยละ มีฟองโฟมละเอียดที่สุด สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 ส่วนในร้อยละ มีขนาดฟองโฟมหยาบที่สุด ลักษณะฟองโฟมที่พบเป็นแบบปิด เมื่อสังเกตบริเวณขอบด้านบนพบฟองโฟมหยาบมากกว่าด้านใน เนื่องจากการนำความร้อนเกิดที่ด้านล่างก่อนทำให้เกิดการเริ่มคงรูป และคงรูปก่อนด้านบนฟองโฟมได้ จึงมีความละเอียด





(ก)

(ข)

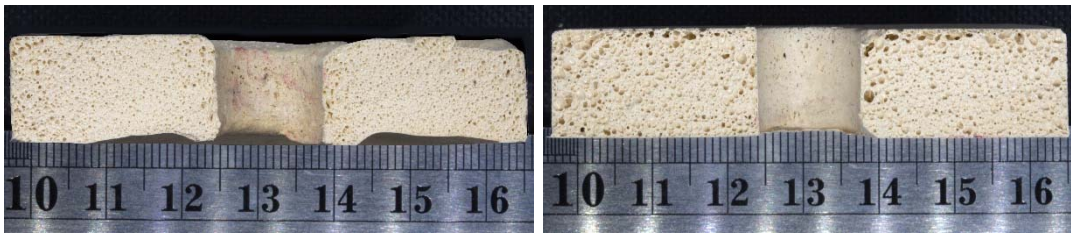


(ค)

(ง)

**รูปที่ 4.36** ภาพถ่ายแสดงโฟมยางขึ้นรูปแบบการพาความร้อน ควบคุมการขยายตัว ร้อยละ 50 สัดส่วนสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 10 ส่วนในร้อยละ (ก) สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 ส่วนในร้อยละ (ข) สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 2 ส่วนในร้อยละ (ค) สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 3 ส่วนในร้อยละ (ง) สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 4 ส่วนในร้อยละ

จากรูปที่ 4.36 เมื่อพิจารณาด้วยสายตาพบว่าสัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 2 และ 4 ส่วนในร้อยละมีฟองโฟมละเอียดใกล้เคียงกัน สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 และ 3 ส่วนในร้อยละมีขนาดฟองโฟมหยาบใกล้เคียงกัน ลักษณะฟองโฟมที่พบเป็นแบบปิด เมื่อสังเกตบริเวณขอบด้านบนพบฟองโฟมหยาบมากกว่าด้านในเนื่องจากการนำความร้อนเกิดที่ด้านล่างก่อนทำให้เกิดการเริ่มคงรูป และคงรูปก่อนด้านบนฟองโฟมได้จึงมีความละเอียด



(ก)

(ข)



(ค)

(ง)

**รูปที่ 4.37** ภาพถ่ายแสดงโฟมยางขึ้นรูปแบบการพาความร้อน ควบคุมการขยายตัว ร้อยละ 50 สัดส่วนสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 15 ส่วนในร้อยละ (ก) สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 ส่วนในร้อยละ (ข) สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 2 ส่วนในร้อยละ (ค) สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 3 ส่วนในร้อยละ (ง) สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 4 ส่วนในร้อยละ

จากรูปที่ 4.37 เมื่อพิจารณาด้วยสายตาพบว่าสัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 2 และ 4 ส่วนในร้อยละมีฟองโฟมละเอียดใกล้เคียงกัน สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 และ 3 ส่วนในร้อยละมีขนาดฟองโฟมหยาบใกล้เคียงกัน ลักษณะฟองโฟมที่พบเป็นแบบปิด เมื่อสังเกตบริเวณขอบด้านบนพบฟองโฟมหยาบมากกว่าด้านในเนื่องจากการนำความร้อนเกิดที่ด้านล่างก่อนทำให้เกิดการเริ่มคงรูป และคงรูปก่อนด้านบนฟองโฟมได้จึงมีความละเอียด



(ก)

(ข)



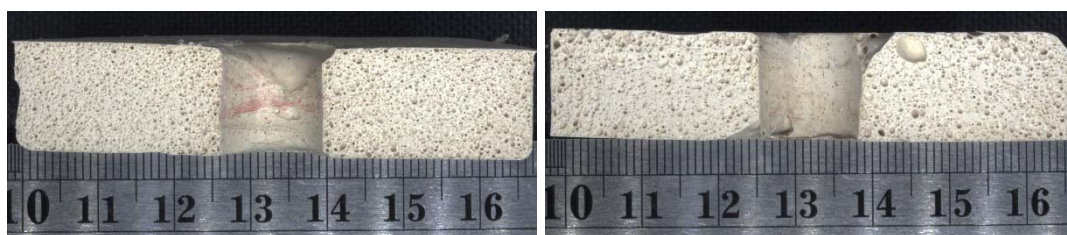
(ค)

(ง)

**รูปที่ 4.38** ภาพถ่ายแสดงโฟมยางขึ้นรูปแบบการพาความร้อน ควบคุมการขยายตัว ร้อยละ 25 สัดส่วนสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 0 ส่วนในร้อยละ (ก) สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 ส่วนในร้อยละ (ข) สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 2 ส่วนในร้อยละ (ค) สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 3 ส่วนในร้อยละ (ง) สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 4 ส่วนในร้อยละ

จากรูปที่ 4.38 เมื่อพิจารณาด้วยสายตาพบว่าสัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 และ 3 ส่วนในร้อยละมีฟองโฟมละเอียดใกล้เคียงกัน สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 2 และ 4 ส่วนในร้อยละมีขนาดฟองโฟมหยาบใกล้เคียงกัน ลักษณะฟองโฟมที่พบเป็นแบบปิด เมื่อสังเกตบริเวณขอบด้านบนพบฟองโฟมหยาบมากกว่าด้านในเนื่องจากการนำความร้อนเกิดที่ด้านล่างก่อนทำให้เกิดการเริ่มคงรูป และคงรูปก่อนด้านบนฟองโฟมได้จึงมีความละเอียด





(ก)

(ข)



(ค)

(ง)

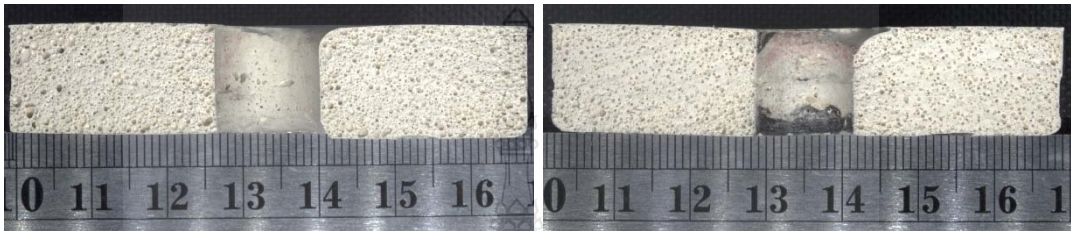
**รูปที่ 4.39** ภาพถ่ายแสดงโฟมยางขึ้นรูปแบบการพาความร้อน ควบคุมการขยายตัว ร้อยละ 25 สัดส่วนสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 5 ส่วนในร้อยละ (ก) สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 ส่วนในร้อยละ (ข) สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 2 ส่วนในร้อยละ (ค) สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 3 ส่วนในร้อยละ (ง) สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 4 ส่วนในร้อยละ

จากรูปที่ 4.39 เมื่อพิจารณาด้วยสายตาพบว่าสัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 2 3 และ 4 ส่วนในร้อยละมีฟองโฟมละเอียดใกล้เคียงกัน ลักษณะฟองโฟมที่พบเป็นแบบปิด เมื่อสังเกตบริเวณขอบโดยรอบมีความสม่ำเสมอของขนาดฟองโฟม



(ก)

(ข)

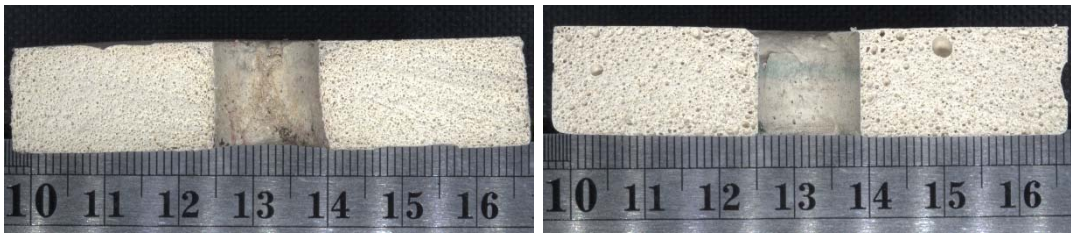


(ค)

(ง)

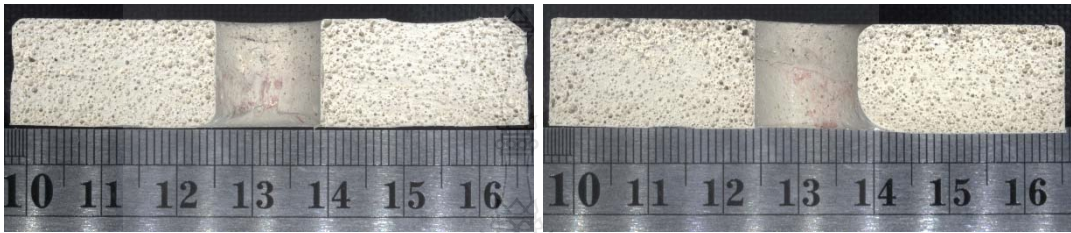
**รูปที่ 4.40** ภาพถ่ายแสดงโฟมยางขึ้นรูปแบบการพาความร้อน ควบคุมการขยายตัว ร้อยละ 25 สัดส่วนสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 10 ส่วนในร้อยละ (ก) สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 ส่วนในร้อยละ (ข) สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 2 ส่วนในร้อยละ (ค) สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 3 ส่วนในร้อยละ (ง) สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 4 ส่วนในร้อยละ

จากรูปที่ 4.40 เมื่อพิจารณาด้วยสายตาพบว่าสัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 และ 2 ส่วนในร้อยละมีฟองโฟมละเอียดใกล้เคียงกัน สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 3 และ 4 ส่วนมีฟองโฟมหยาบกว่าเล็กน้อย ลักษณะฟองโฟมที่พบเป็นแบบปิด เมื่อสังเกตบริเวณขอบโดยรอบมีความสม่ำเสมอของขนาดฟองโฟม



(ก)

(ข)



(ค)

(ง)

**รูปที่ 4.41** ภาพถ่ายแสดงโฟมยางขึ้นรูปแบบการพาความร้อน ควบคุมการขยายตัว ร้อยละ 25 สัดส่วนสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 15 ส่วนในร้อยละ (ก) สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 ส่วนในร้อยละ (ข) สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 2 ส่วนในร้อยละ (ค) สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 3 ส่วนในร้อยละ (ง) สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 4 ส่วนในร้อยละ

จากรูปที่ 4.41 เมื่อพิจารณาด้วยสายตาพบว่าสัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 ส่วนในร้อยละ มีฟองโฟมละเอียดมากที่สุด สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 2 3 และ 4 ส่วนมีขนาดฟองโฟมหยากว่า ลักษณะฟองโฟมที่พบเป็นแบบปิด เมื่อสังเกตบริเวณขอบโดยรอบมีความสม่ำเสมอของขนาดฟองโฟม

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ ทำการศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาสูตรยางโฟมคอมปาวด์สำหรับนำมาผลิตโรลลิงแบรีเออร์ จราจร และศึกษาความเป็นไปได้ในการนำยางธรรมชาติแท่งมาผลิตเป็นโรลลิงแบรีเออร์จราจรทดแทน การนำเข้าจากต่างประเทศเพื่อช่วยลดอุบัติเหตุ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นจาก 1 2 3 และ 4 ส่วนในร้อยละกับปริมาณ สารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 0 ส่วนในร้อยละ สามารถลดระยะเวลาในการเริ่มคงรูปจาก 5.03 4.42 4.31 และ 3.49 นาทีตามลำดับ และสามารถลดเวลาคงรูปจาก 6.33 6.01 5.27 และ 4.5 นาทีตามลำดับ เมื่อเพิ่มสัดส่วนสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 5 10 และ 15 ส่วนในร้อยละ สามารถลดระยะเวลาในการเริ่มคงรูปจาก 3.38 2.09 2.09 และ 2.02 นาทีตามลำดับ และสามารถลด เวลาคงรูปจาก 4.8 2.36 2.39 และ 2.31 นาทีตามลำดับ แสดงว่าเมื่อเพิ่มสัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ และสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตทำให้ระยะเวลาเริ่มคงรูป และคงรูปลดลง

5.1.2 ผลการทดสอบสมบัติการคงรูปของยางโฟมคอมปาวด์ด้วยเครื่อง MDR พบว่าสัดส่วนสาร กระตุ้นซิงค์ออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นจาก 1 2 3 และ 4 ส่วนในร้อยละกับปริมาณสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจน คาร์บอเนต 0 ส่วนในร้อยละ ผลต่างแรงบิดที่วัดได้ลดลงจาก 27.23 26.609 21.626 และ 18.199 เด ซินิวตัน-เมตร เมื่อเพิ่มสัดส่วนสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 5 10 และ 15 ส่วนในร้อยละ ผลต่างแรงบิดที่วัดได้ลดลงจาก 17.277 14.613 16.951 และ 15.579 เดซินิวตัน-เมตร ตามลำดับ แสดงว่าเมื่อเพิ่มสัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ และสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตทำให้ ความหนืดของยางโฟมคอมปาวด์ลดต่ำลงเมื่อเกิดปฏิกิริยาการคงรูป

5.1.3 การขึ้นรูปยางด้วยระบบการพาความร้อน (Free convection heat transfer) ขนาด พื้นที่ฟองโฟมที่วัดได้อยู่ในระหว่าง 1.0482 – 0.2796 ตารางมิลลิเมตร ค่าความหนาแน่นรวมอยู่ระหว่าง 0.254 – 0.3491 กรัมต่อลูกบาศก์มิลลิเมตร การขึ้นรูปด้วยระบบการนำความร้อน (Conduction heat transfer) ควบคุมอัตราการขยายตัว ร้อยละ 50 ขนาดพื้นที่ฟองโฟมที่วัดได้อยู่ในระหว่าง 0.1181 – 0.0210 ตารางมิลลิเมตรตามลำดับ ค่าความหนาแน่นรวมอยู่ระหว่าง 0.516 – 0.699 กรัมต่อลูกบาศก์ มิลลิเมตร การขึ้นรูปด้วยระบบการนำความร้อน (Conduction heat transfer) ควบคุมอัตราการขยายตัว ร้อยละ 25 ขนาดพื้นที่ฟองโฟมที่วัดได้อยู่ในระหว่าง 0.1249 – 0.0219 ตารางมิลลิเมตรตามลำดับ ค่า ความหนาแน่นรวมอยู่ระหว่าง 0.787 – 1.010 กรัมต่อลูกบาศก์มิลลิเมตร แสดงว่าการอัตราการให้ความร้อนที่ต่ำขนาดพื้นที่ฟองโฟมมีขนาดใหญ่กว่าอัตราการให้ความร้อนที่เร็ว ความหนาแน่นรวมมีค่า น้อย ค่าความต้านทานแรงกดอัดต่ำ การควบคุมอัตราการขยายตัวขนาดพื้นที่ฟองโฟมที่เกิดมีขนาด



ใกล้เคียงกัน อัตราการขยายตัว ร้อยละ 25 จำนวนฟองโฟมต่อหน่วยปริมาตรน้อย ค่าความหนาแน่นรวม และค่าความต้านทานแรงกดอัดสูง

5.14 สันฐานวิทยาการเกิดฟองที่พิจารณาด้วยสายตาจากภาพถ่ายมาโคร พบส่วนที่ได้รับความร้อนเร็ว และมากจะมีขนาดพื้นที่ฟองโฟมที่เล็ก และกระจายตัวต่ำกว่าส่วนด้านใน เนื่องจากยางเป็นวัสดุที่มีความต้านทานต่อการนำความร้อนต่ำกว่าการกระจายตัวของความร้อนตลอดความหนาของชิ้นงานมีมาก ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาการขึ้นรูป ทำให้ขนาดฟองโฟมเกิดความแตกต่างกัน การขึ้นรูปแบบการพาความร้อนไม่ควบคุมการขยายตัวลักษณะโครงสร้างเซลล์โฟมที่พบมีแบบปิด และเปิด การขึ้นรูปแบบการนำความร้อนพบโครงสร้างเซลล์โฟมเป็นแบบปิดทั้งหมด

5.1.5 การเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลยางโฟมคอมปาวด์ในงานวิจัยกับชิ้นงานตัวอย่างที่ผลิตจากต่างประเทศพบกระบวนการขึ้นรูปแบบการพาความร้อนสัดส่วนสารกระตุ้น และสารเกิดฟอง 2 และ 5 ส่วนในร้อยละตามลำดับมีค่าความหนาแน่นรวม 0.254 (0.129) กรัมต่อตารางเซนติเมตรใกล้เคียงตัวอย่างมากที่สุด กระบวนการขึ้นรูปแบบการนำความร้อนที่ควบคุมการขยายตัวร้อยละ 50 สัดส่วนสารกระตุ้น และสารเกิดฟอง 3 และ 5 ส่วนในร้อยละตามลำดับ พบค่าความแข็ง 27.6 (26.4) Shore A และสัดส่วน 1 และ 5 ตามลำดับพบค่าความต้านทานแรงกดอัด 0.194 (0.166) นิวตันต่อตารางมิลลิเมตรใกล้เคียงกับตัวอย่างมากที่สุด

5.1.6 เมื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลพบความเป็นไปในการนำยางธรรมชาติแท่งมาเป็นวัตถุดิบผลิตโรลลิงแบรีเออร์แทนพอลิเอทิลีนไวนิลอะซิเตดจากต่างประเทศได้ โดยพิจารณาจากค่าความต้านทานแรงกดอัด และลักษณะโครงสร้างฟองโฟมแบบปิดเป็นสำคัญ สูตรคอมปาวด์ที่มีความเหมาะสมที่สุดคือ สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 ส่วนในร้อยละ กับ สารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 3 ส่วนในร้อยละขึ้นรูปด้วยกระบวนการนำความร้อน 150 องศาเซลเซียส ควบคุมการขยายตัว ร้อยละ 50

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 นำยางธรรมชาติมีสมบัติแปรปรวน การนำยางธรรมชาติ หรือขี้ยางมาทำเป็นยางแท่งจะช่วยลดความแปรปรวนสมบัติน้อยลงแต่ยังคงมีเหลืออยู่ซึ่งจะส่งผลต่อความแปรปรวนเมื่อนำมาใช้เป็นวัตถุดิบ การผลิตเป็นผลิตภัณฑ์มีค่าพิถีพิถันความเผื่อสูง

5.2.2 สารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และเริ่มสลายตัวเร็วที่สุดที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ในขณะที่ผสมยางด้วยเครื่องผสมแบบลูกกลิ้งคู่ความร้อนจากการตัดเฉือนสายโซ่โมเลกุลของเนื้อยางเพื่อการผสมสารเคมีต่าง ๆ ต้องควบคุมให้ต่ำกว่าอุณหภูมิเริ่มสลายตัวของสารเกิดฟองต่ำช่วยให้เกิดฟองโฟมได้ดีในชิ้นงานที่มีความหนา

5.2.3 ยางแท่งเกรด STR 5L ถูกเลือกมาใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ การผลิตในเชิงอุตสาหกรรมที่ต้องคำนึงถึงต้นทุนอาจเลือกใช้ยางแท่งเกรด STR 20 ซึ่งมีต้นทุนราคาต่ำกว่า แต่ความแปรปรวนของสมบัติคุณภาพ สี และสิ่งเจือปนมีมากกว่า ความคลาดเคลื่อนจะพบได้มากกว่า อาจต้องมีกระบวนการเพิ่ม

5.2.4 ปริมาณสารระเหย หรือความชื้นที่ยอมให้มีได้ในยางตามมาตรฐาน STR 5L ส่งผลต่อการเกิดฟองภายในชิ้นงานทดสอบที่ไม่ได้เติมสารเกิดฟอง การควบคุมสารระเหย หรือความชื้นที่มีอยู่ภายในวัตถุดิบก่อนนำมาใช้จึงเป็นเรื่องจำเป็น

5.2.5 น้ำ หรือความชื้น อาจถูกนำมาใช้เป็นสารเกิดฟองในยางธรรมชาติแท่งซึ่งไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เหตุจากน้ำหรือความชื้นกลายเป็นไอน้ำที่ทำให้เกิดฟองโฟมภายในเนื้อยางที่อุณหภูมิตั้งแต่ 100 องศาเซลเซียส

5.2.6 การออกแบบชิ้นงานสำหรับการขึ้นรูปโฟมจากยางธรรมชาติแท่ง ต้องระวังในเรื่องของความหนาบางของชิ้นงาน บริเวณชิ้นงานที่บางขนาดของฟองโฟมที่เกิดจะมีขนาดเล็ก และสม่ำเสมอ เพราะส่วนที่บางจะเกิดการคงรูปได้เร็ว เพราะความร้อนกระจายทั่วเร็วกว่าส่วนที่หนา การเริ่มคงรูปและการคงรูปจึงแตกต่างกัน



## บรรณานุกรม

- [1] กระทรวงคมนาคม. (2556). **แผนยุทธศาสตร์กระทรวงคมนาคม พ.ศ.2554 – 2558 (ฉบับปรับปรุง)**.
- [2] กระทรวงคมนาคม. (2557). **ยุทธศาสตร์พัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านคมนาคมขนส่งของไทย พ.ศ.2558 - 2565**
- [3] กระทรวงคมนาคม. (2558). **แผนยุทธศาสตร์กระทรวงคมนาคม พ.ศ.2559**.
- [4] กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. (2559). **ยุทธศาสตร์เกษตรและสหกรณ์ ระยะ 20 ปี (พ.ศ.2560 – 2579)**.
- [5] Kyung – Whan Kim and Bu – Young Shin, “A study on the characteristics of rolling barriers”, **KSCE Journal of Civil Engineering**, Vol.8, 2004. pp. 135 – 139.
- [6] Man Gi Ko, Kee Dong Kim, and Jug Gon Sung, “Performance of dual strength median barrier system”, **KSCE Journal of Civil Engineering**, Vol.9, 2005. pp. 407 – 415.
- [7] Seongkwan Mark Lee, Seunglim Kang, Daeyoung Jang and Jaewoong Joo, “Experimental design deflection distances of longitudinal barriers in Korea”, in **12<sup>th</sup> WCTR**, 11 – 15 July 2010, Lisbon, Portugal, 2010. pp. 1 – 10.
- [8] Oh Soon – Sim. 2014. **Roadside Barrier (Model name: TB01 – Tong1 – SB4) Test Report**. Unpublished manuscript, Expressway & Transportation Research Institute, Korea.
- [9] จีรพงษ์ ประเสริฐพลกรัง. “โรลลิ่งแบร์ริเออร์ถูกกลิ้ง...สยบโค้ง”, คมชัดลึก.[ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก <http://www.komchadluek.net/news/crime/226593>, [สืบค้นเมื่อ 1 เมษายน 2560]
- [10] M. Avalle, G. Belingardi and R. Montanini, **Characterization of polymeric structural foams under compressive impact loading by means of energy – absorption diagram**, [online] Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734743X00000609>, (23 September 2018).
- [11] เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตต์, **เทคโนโลยียาง**, กรุงเทพฯ: คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542
- [12] พงษ์ธร แซ่ฮุย, **ยาง: ชนิด สมบัติ และการใช้งาน**, พิมพ์ครั้งที่ 2, ปทุมธานี: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค), 2548
- [13] พงษ์ธร แซ่ฮุย, **สารเคมียาง**, พิมพ์ครั้งที่ 2, ปทุมธานี: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค), 2548
- [14] สมเจตน์ พัชรพันธ์, **เทคโนโลยียาง**, พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [15] P.S. Liu and G.F. Chen, “**Porous Materials Processing and Applications**”, [online], Available: <https://www.sciencedirect.com/book/9780124077881/porous-materials>, (30 March 2017).



## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [16] Stephen Quinn, “Chemical blowing agents: providing production economic and physical improvements to a wide range of polymers”, **Plastics Additives and Compound**, Vol.3 Issue5, 2001. pp. 16 – 21.
- [17] Leandra Oliveira – Salmazo, Alberto Lopez – Gil, Felipe Silva – Bellucci, Aldo E. Job, Miguel A. and Rodriguez – Perez, **Natural rubber foams with anisotropic cellular structures: Mechanical properties and modeling**, [online] Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926669015304945>, (30 March 2017).
- [18] N.N. Najib, Z.M. Ariff, N.A. Manan, A.A. Bakar and C.S. Sipaut, **Effect of blowing agent concentration on cell morphology and impact properties of natural rubber foam**, [online] Available: [http://web.usm.my/jps/20-1-09/JPS%2020\(2\)%20ART%2020%20\(13-25\).pdf](http://web.usm.my/jps/20-1-09/JPS%2020(2)%20ART%2020%20(13-25).pdf), (3 April 2017).
- [19] Nuchnapa Tangboriboon, Sunisa Rortchanakarn, Karat Petcharoen and Anuvat Sirivat, **Effect of foaming agents and calcium carbonate on thermo – mechanical properties of natural rubber foams**, [online] Available: [https://www.google.co.th/search?q=Effect+of+foaming+agents+and+calcium+carbonate+on+thermo+mechanical+properties+of+natural+rubber+foams&rlz=1C1CHVZ\\_thTH661 TH 661&oq=Effect+of+foaming+agents+and+calcium+carbonate+on+thermo+mechanical+properties+of+natural+rubber+foams&aqs=chrome..69i57.33204j1j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8](https://www.google.co.th/search?q=Effect+of+foaming+agents+and+calcium+carbonate+on+thermo+mechanical+properties+of+natural+rubber+foams&rlz=1C1CHVZ_thTH661 TH 661&oq=Effect+of+foaming+agents+and+calcium+carbonate+on+thermo+mechanical+properties+of+natural+rubber+foams&aqs=chrome..69i57.33204j1j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8), (3 April 2017).
- [20] กัลทิมา เซาวิชญชัยกุล และ วัลลภ หาญณรงค์ชัย, การผลิตวัสดุดูดซับเสียงจากวัสดุผสมยางโฟมธรรมชาติและเส้นใยธรรมชาติ, [ออนไลน์], เข้าถึงได้จาก: <file:///D:/Thesis/Production%20of%20Acoustic%20Materials%20from%20%20Natural%20Rubber%20Foam%20and%20Natural%20Fiber%20Composites.pdf>, (3 เมษายน 2558)
- [21] ธนิต เบี้ยแก้ว, วรารห์ เทพาทูดี, เจษฎา อีสหะระ, รุ่งฤทธิ จงเจริญสุข และ ธนพล ปั่นดี, “เทคนิคใหม่สำหรับนํ้าไขปลา : ด้วยโปรแกรม ImageJ”, **วารสารวิชาการ มทร. สุวรรณภูมิ**, ปีที่ 3(2), 2558, หน้า 120 – 128.
- [22] ASTM International., Standard Specification for Flexible Cellular Materials – Sponge or Expanded Rubber: D1056 -14, **Annual Book of ASTM Standard**, 2014.
- [23] ASTM International., Standard Test Methods for Flexible Cellular Materials Made From Olefin Polymers: D 3575 – 00, **Annual Book of ASTM Standard**, 2000.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [23] ASTM International., Standard Test Methods for Flexible Cellular Materials Made From Olefin Polymers: D 3575 – 00, **Annual Book of ASTM Standard**, 2000.
- [24] ASTM International., Standard Test Methods for Rubber Property – Durometer Hardness: D2240 – 15, **Annual Book of ASTM Standard**, 2015
- [25] พงษ์ธร แซ่ฮ้อย และชาคริต สิริสิงห์. ยาง กระบวนการผลิตและการทดสอบ. พิมพ์ครั้งที่1. สถานที่พิมพ์ : ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2550
- [26] บริษัท แสงชัยมิเตอร์ จำกัด. 2557-2563. **หลักการถ่ายเทความร้อน**. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : [https://www.sangchaimeter.com/support\\_detail/heater-plus-1](https://www.sangchaimeter.com/support_detail/heater-plus-1) (1 มกราคม 2563)
- [27] Satori Zen. **การถ่ายเทความร้อน**. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <https://www.academia.edu/5382088/การถ่ายเทความร้อน> (1 มกราคม 2563)
- [28] วิกีพีเดีย สารานุกรมเสรี. **การถ่ายเทความร้อน**. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <https://bit.ly/39WheX6> (26 ธันวาคม 2562)
- [29] P.M. Abhilash, K. Kannan and Bijo Varkey, **Simulstion of curing of a rubber**, [online] Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921510709005601>, (1 February 2020).
- [30] George Wypych, “Handbook of foaming and blowing agents”, ChemTec Publishing, Toronto, Canada, 2560.
- [31] Tigo Ferreira and Wayne Rasband, “**ImageJ User Guide IJ 1.46r**”, U.S. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA, 2012.
- [32] Theodore L. Bergman and Adrienne s. Lavine, “**Fundamentals of Heat and Mass Transfer**”, edition 8<sup>th</sup>, John Wiley & Sons Inc., New Jersey, USA, 2017.
- [33] จินตนา ลีกิจวัฒน์, **การศึกษาวิธีการหาปริมาณไวนิลอะซีเตตในเอทิลีน-ไวนิลอะซีเตตโคโพลิเมอร์**, กรุงเทพฯ: กลุ่มงานเทคโนโลยีผลิตภัณฑ์1 กองฟิสิกส์และวิศวกรรม กรมวิทยาศาสตร์บริการ, 2540.
- [34] Johannes Rohleder and Evelyn Kroker.,F. “**Calcium Carbonate : from the Cretaceous Period into the 21<sup>st</sup> Century**”, Edition by Wolfgang Tagethoff, Birkhauser Verlag, Basel, Switzerland, 2001.
- [35] พายัพ นามประเสริฐ กาจพันธ์ สกกุลแก้ว และอรสา อ่อนจันทร์, **เครื่องหาอุณหภูมิและเวลคงรูปของยาง : โครงการฟิสิกส์และวิศวกรรม**, กรุงเทพฯ: กรมวิทยาศาสตร์บริการ, กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2549



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก  
ผลการทดสอบ



ภาคผนวก ข  
รายงานการเผยแพร่

# TEST REPORT

Issuing No. : 2014-3-039-002

## APPLICANT

Company : TAEBAEK Co., Ltd.

Address : 110, Sangsamganjung-gil, Yongjin-myeon, Wanju-Gun,  
Jeollabuk-do, Korea

President : OH SOON-SIM

## TEST ARTICLE

1. Facilities Name : Roadside Barrier (Model name : TB01-TONG1-SB4)
2. Appearance and Dimensions : Roller + D-Type Beam and O-Post
3. Facilities Type / Test Level : Roadside Barrier / SB4 Level
4. Test Method : Strength Performance Evaluation(Truck 14ton-15°) &  
Occupant Safety Performance Evaluation(Car 1.3ton-20°)

## EVALUATION CRITERIA

"Installation and Maintenance Guide for Roadside Safety Facilities -  
Barrier System", Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea.

We issue this test report which contains the results of vehicle crash  
test by upper evaluation criteria.

Attachment :

1. Evaluation Tables for Roadside Barrier Test Results.
2. Test Result for Horizontal bearing capacity of Post.
3. Pictures of Vehicle Trajectory and Facilities.
4. Drawing of Roadside Barrier .
5. Table for Jointly Companies.

Issuing Date : August 13<sup>th</sup> 2014

PRESIDENT OF EXPRESSWAY & TRANSPORTATION RESEARCH  
INSTITUTE, KOREA EXPRESSWAY CORPORATION

รูปที่ ก.1 เอกสารใบปะหน้าแสดงผลการทดสอบ Roadside Barrier จาก President of Expressway & Transportation Research Institute ประเทศสาธารณรัฐเกาหลี

Attachment #1 : Evaluation Tables for Safety Barrier Test Results

Facility Name	Roadside Barrier (Model Name : TB01-TONG1-SB4)		Applicant	TAEBAEK Co., Ltd. / OH SOON-SIM	
<b>INFORMATION OF SAFETY BARRIER</b>					
Type	Roadside Barrier	Test Classification	SB4	Place of Application	Roadside
Height	960 mm	Material	Steel (SS400, STK400), EVA	Foundation Form	General Hardened Ground
Appearance	Roller + D-Type Beam and O-Post	Minimum Institution Length	56 m	Horizontal bearing capacity	2.10 tonf
Note	Refer to Drawing				
<b>TEST AUTHORITY</b>					
Test Agency	Korea Expressway Corporation Research Institute		Test Site	Full-Scale Vehicle Crash Test Facility	
Test Date	Truck : Tuesday August 12 <sup>th</sup> 2014 Car : Tuesday August 12 <sup>th</sup> 2014		Test No.	SB4-140812-L SB4-140812-S	

**TEST CONDITION**

Crash Test for Strength Performance Evaluation (Test Date : August 12 <sup>th</sup> 2014)				
Vehicle Weigh (kg)	Test Velocity (km/h)	Test Angle (°)	Impact Energy (kJ)	Center of Car high (m)
14,150 (14,000)	65.3 (65)	15 (15)	155.9 (160)	-
Condition of Ground	General Hardened Ground	Foundation Form	General Hardened Ground	
Facilities Length	upper body 56m lower body 56m	Construction Method	Construction of Human power (Bolt assembly)	
Crash Test for Occupant Safety Performance Evaluation (Test Date : August 12 <sup>th</sup> 2014)				
Vehicle Weigh (kg)	Test Velocity (km/h)		Test Angle (°)	
1,317 (1,300)	80.5 (80)		20 (20)	



รูปที่ ก.2 เอกสารแสดงรายละเอียดการทดสอบ Roadside Barrier จาก President of Expressway & Transportation Research Institute ประเทศสาธารณรัฐเกาหลี



- Pictures of Vehicle Trajectory and Facilities(Continue)

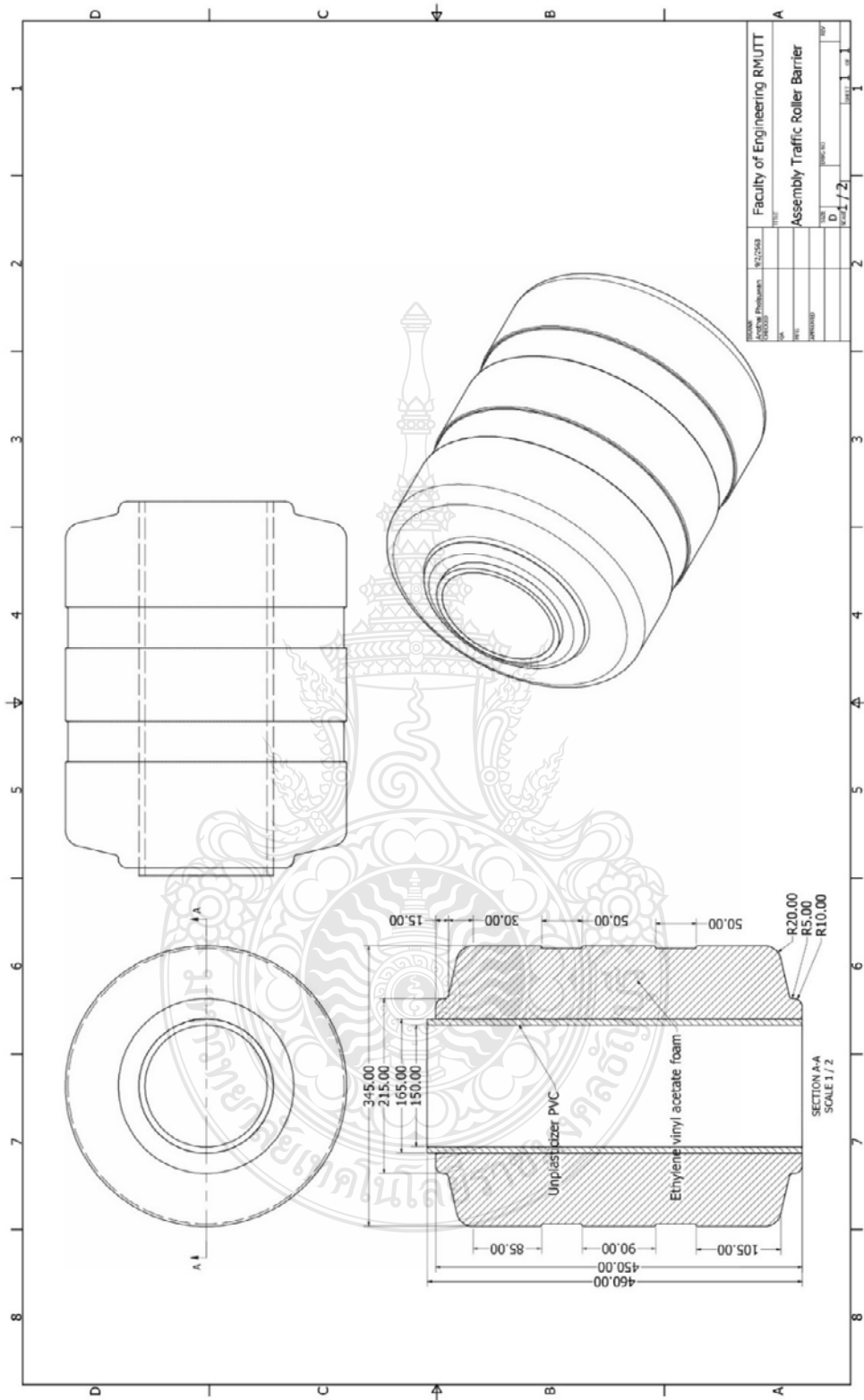


<Facilities After Car Collision>

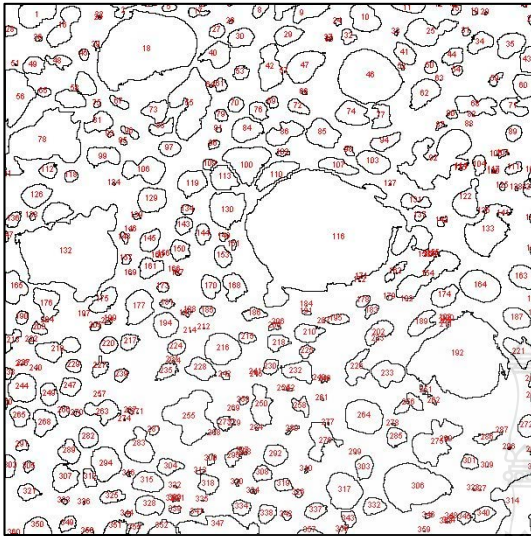


<Damage of Facilities After Car Collision>

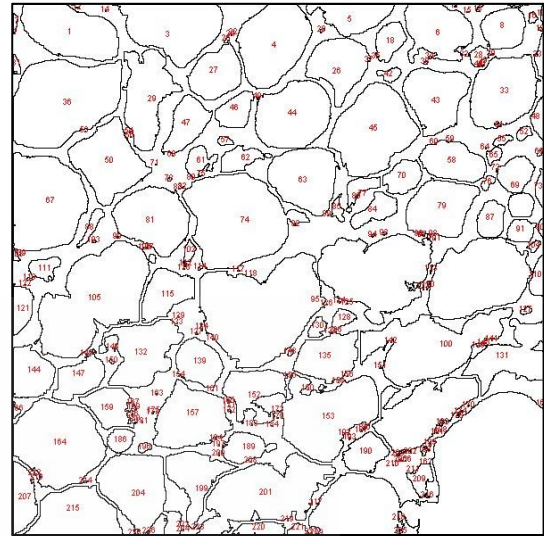
รูปที่ ก.3 เอกสารแสดงภาพถ่ายชิ้นงานทดสอบ Roadside Barrier จาก President of Expressway & Transportation Research Institute ประเทศสาธารณรัฐเกาหลี



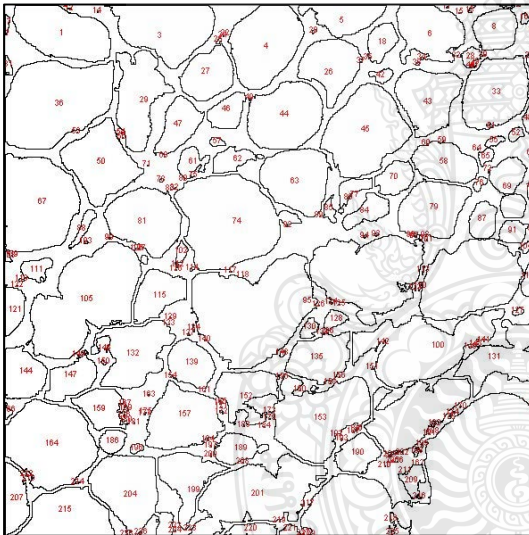
รูปที่ ก.4 แบบแสดงขนาดของชิ้นงานตัวอย่างโรลลิงแบร์ริเออร์จากต่างประเทศ



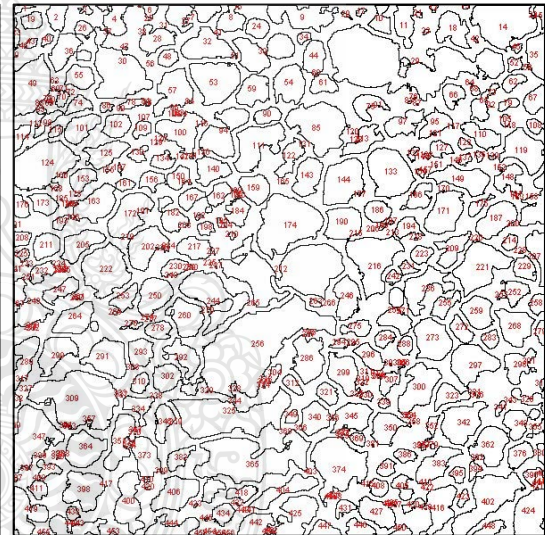
(ก)



(ข)



(ค)

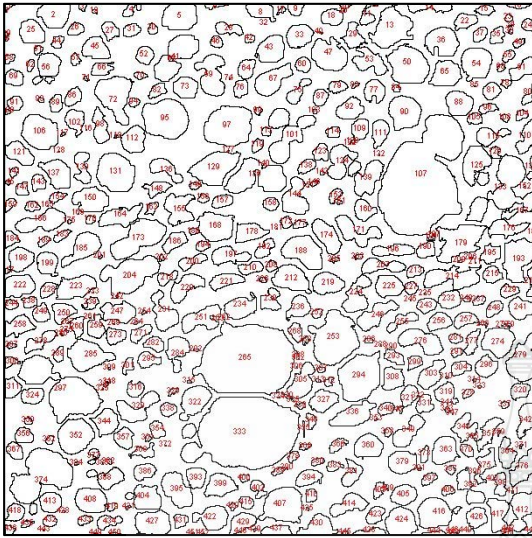


(ง)

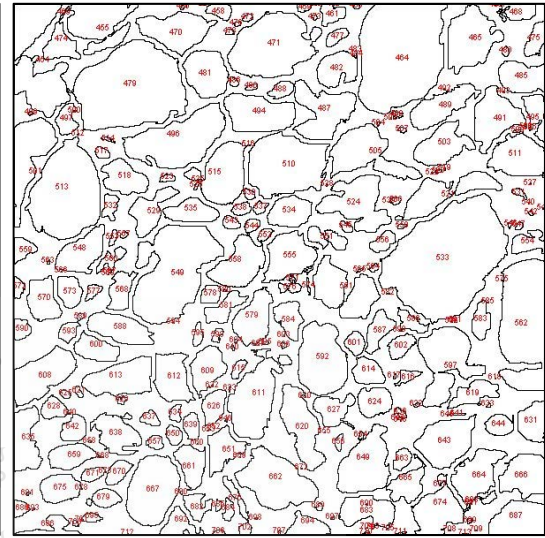
รูปที่ ก.5 ภาพถ่ายแสดงโพมยางขึ้นรูปแบบการพาความร้อน ไม่ควบคุมการขยายตัว สัตว์ส่วนสารเกิด ฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 0 ส่วนในร้อยส่วน

- (ก) สัตว์ส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 ส่วนในร้อยส่วน
- (ข) สัตว์ส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 2 ส่วนในร้อยส่วน
- (ค) สัตว์ส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 3 ส่วนในร้อยส่วน
- (ง) สัตว์ส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 4 ส่วนในร้อยส่วน

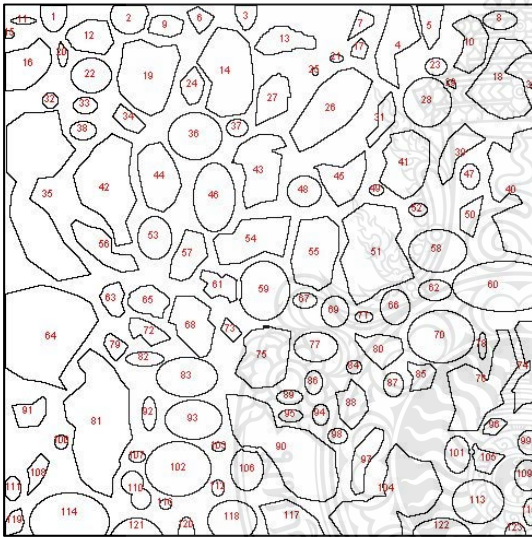




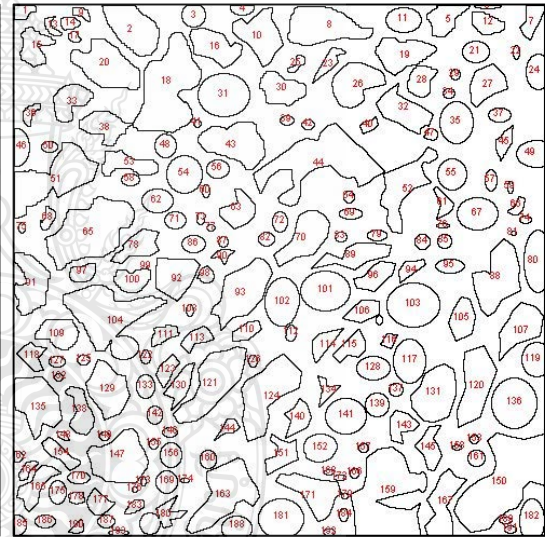
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

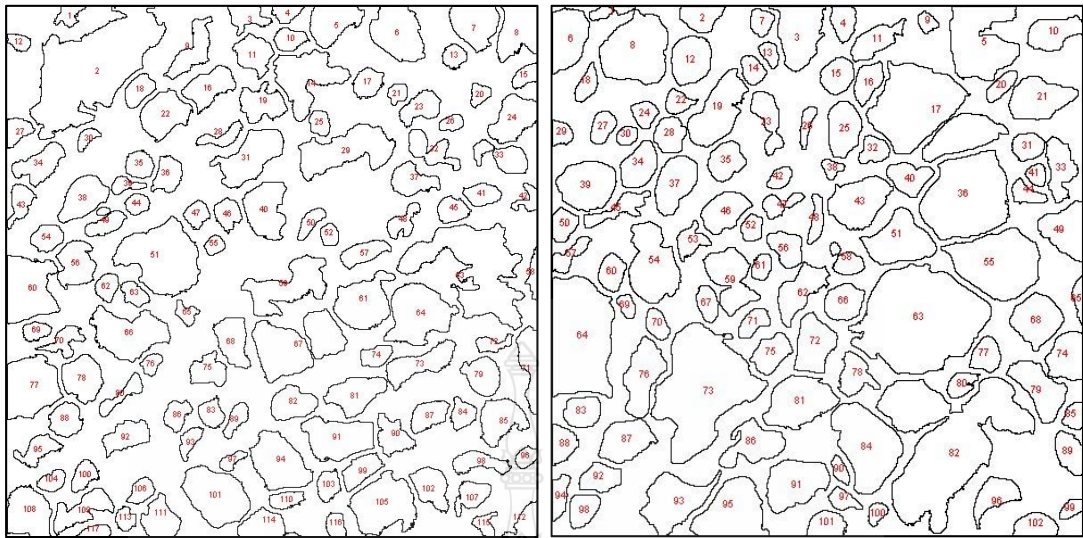
รูปที่ ก.6 ภาพถ่ายแสดงโพลียาซึนรูปแบบการพาคความร้อน ไม่ควบคุมการขยายตัว สัดส่วนสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 5 ส่วนในร้อยละ

(ก) สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 ส่วนในร้อยละ

(ข) สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 2 ส่วนในร้อยละ

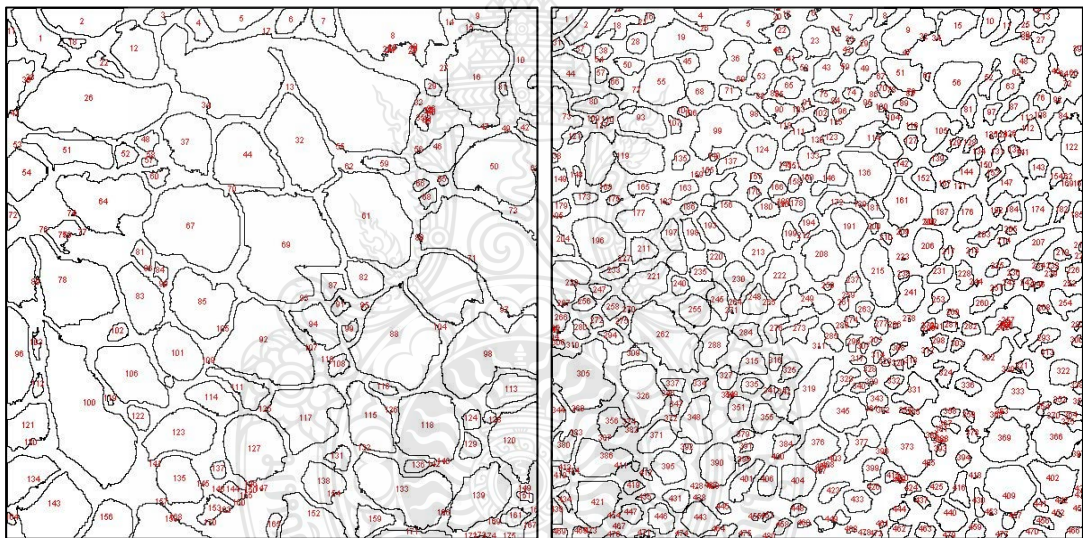
(ค) สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 3 ส่วนในร้อยละ

(ง) สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 4 ส่วนในร้อยละ



(ก)

(ข)



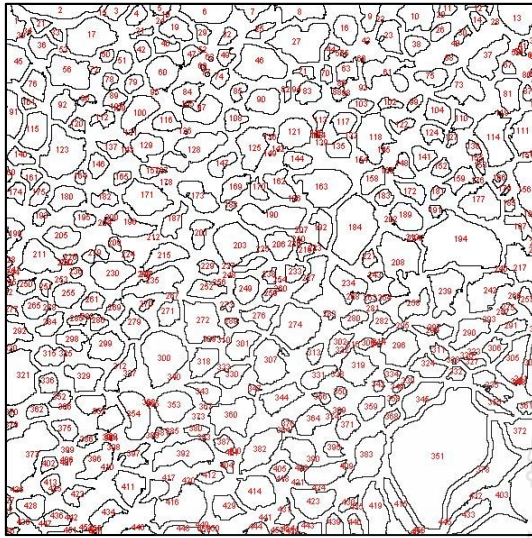
(ค)

(ง)

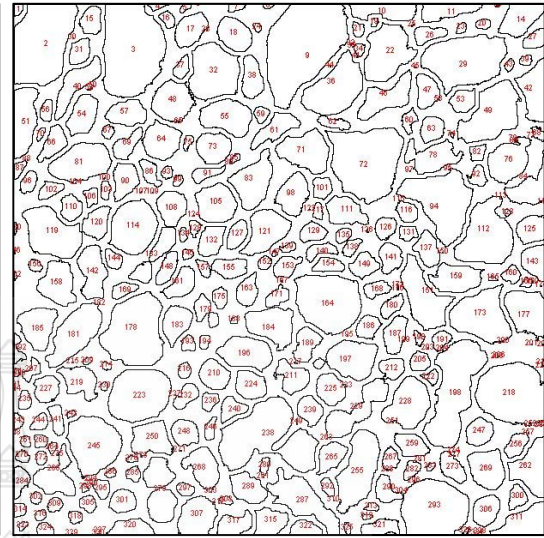
รูปที่ ก.7 ภาพถ่ายแสดงโพมยางขึ้นรูปแบบการพาความร้อน ไม่ควบคุมการขยายตัว สัตว์ส่วนสารเกิด ฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 10 ส่วนในร้อยละ

- (ก) สัตว์ส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 ส่วนในร้อยละ
- (ข) สัตว์ส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 2 ส่วนในร้อยละ
- (ค) สัตว์ส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 3 ส่วนในร้อยละ
- (ง) สัตว์ส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 4 ส่วนในร้อยละ

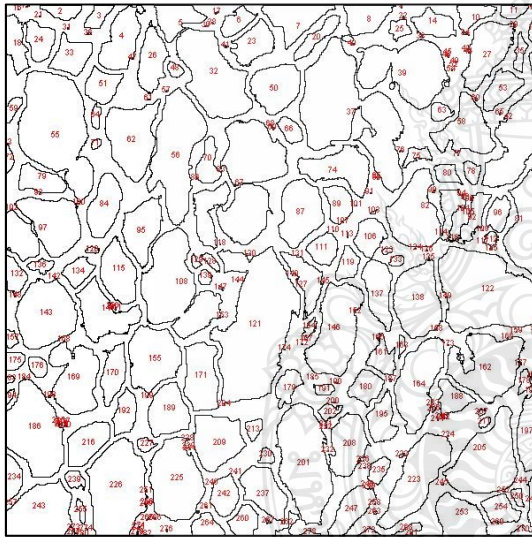




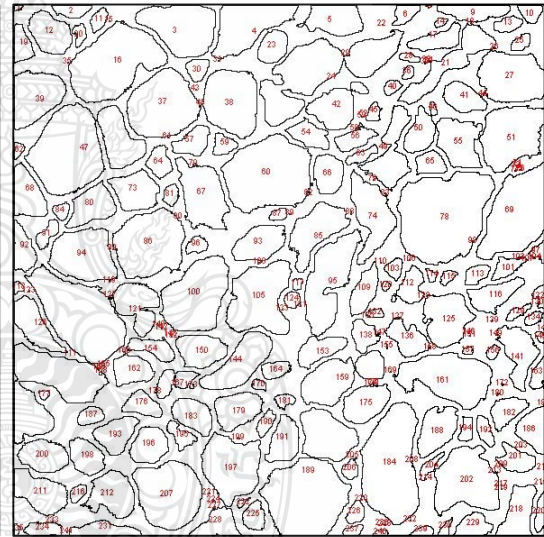
(ก)



(ข)



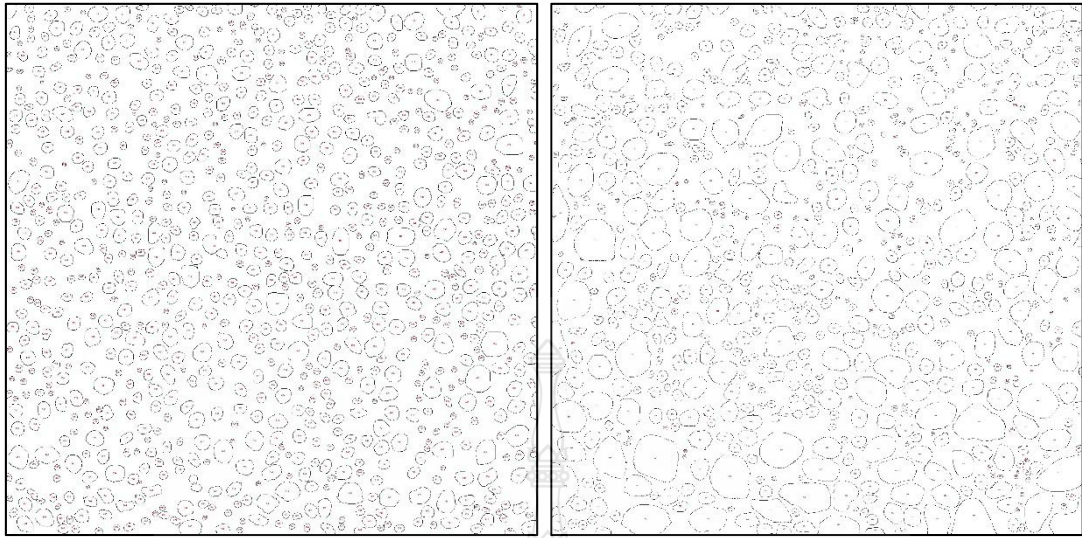
(ค)



(ง)

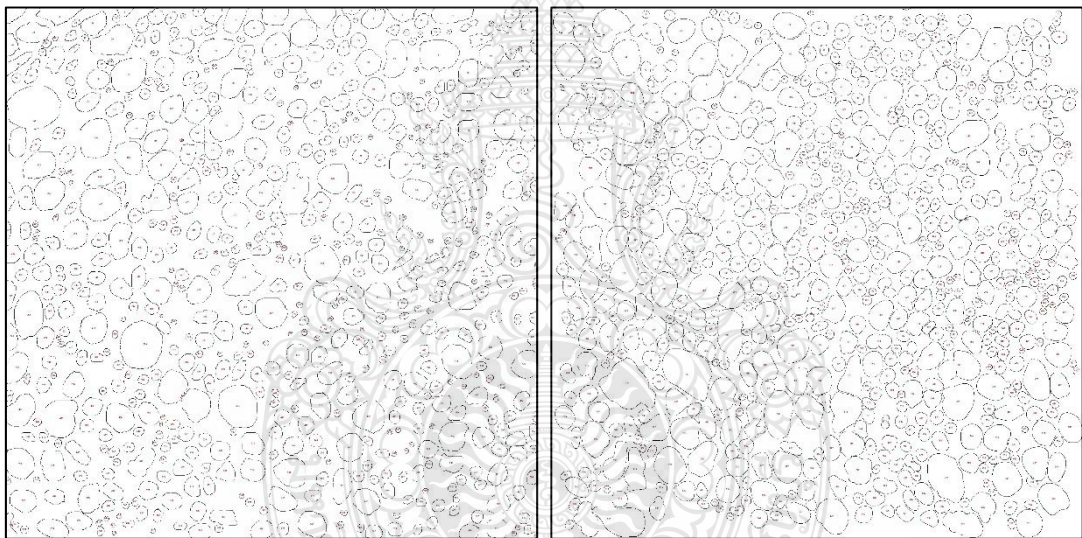
รูปที่ ก.8 ภาพถ่ายแสดงโคมวางขึ้นรูปแบบการพาความร้อน ไม่ควบคุมการขยายตัว สัตว์ส่วนสารเกิด  
ฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 15 ส่วนในร้อยละ  
(ก) สัตว์ส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 ส่วนในร้อยละ  
(ข) สัตว์ส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 2 ส่วนในร้อยละ  
(ค) สัตว์ส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 3 ส่วนในร้อยละ  
(ง) สัตว์ส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 4 ส่วนในร้อยละ





(ก)

(ข)

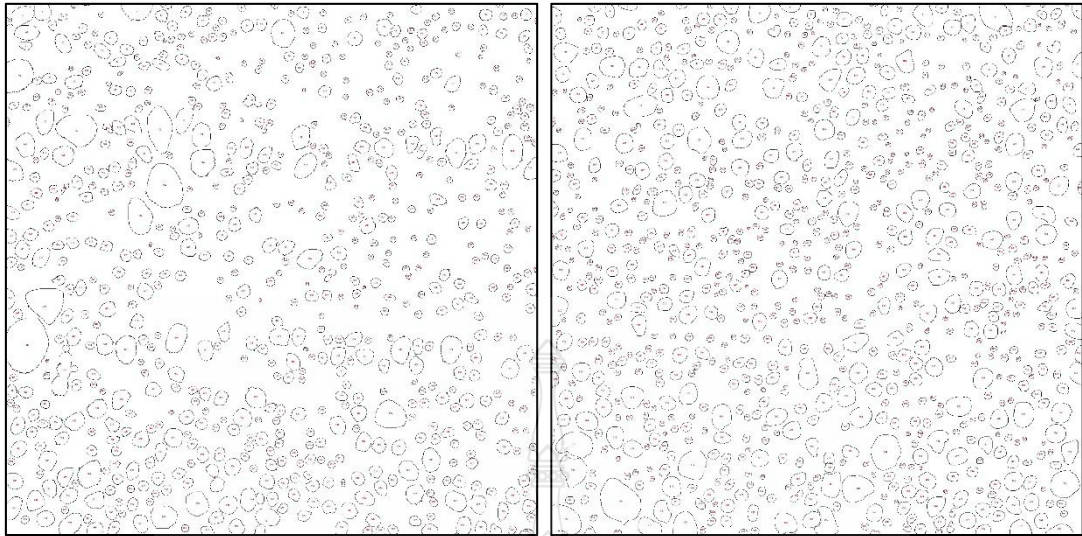


(ค)

(ง)

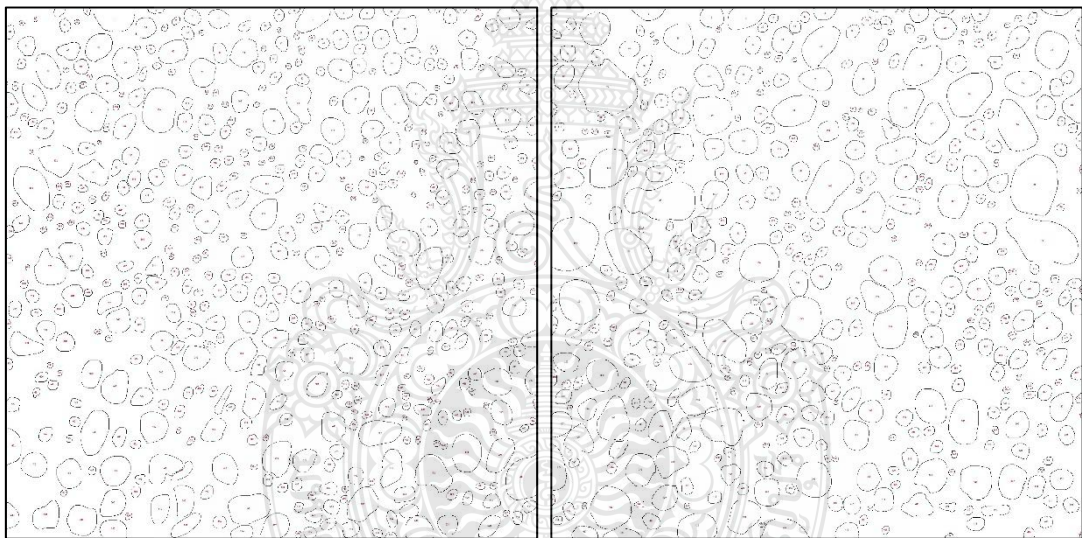
รูปที่ ก.9 ภาพถ่ายแสดงโพลียามีนขึ้นรูปแบบการพาความร้อน ควบคุมการขยายตัว ร้อยละ 50 สัดส่วน สารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 0 ส่วนในร้อยละ

- (ก) สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 ส่วนในร้อยละ
- (ข) สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 2 ส่วนในร้อยละ
- (ค) สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 3 ส่วนในร้อยละ
- (ง) สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 4 ส่วนในร้อยละ



(ก)

(ข)



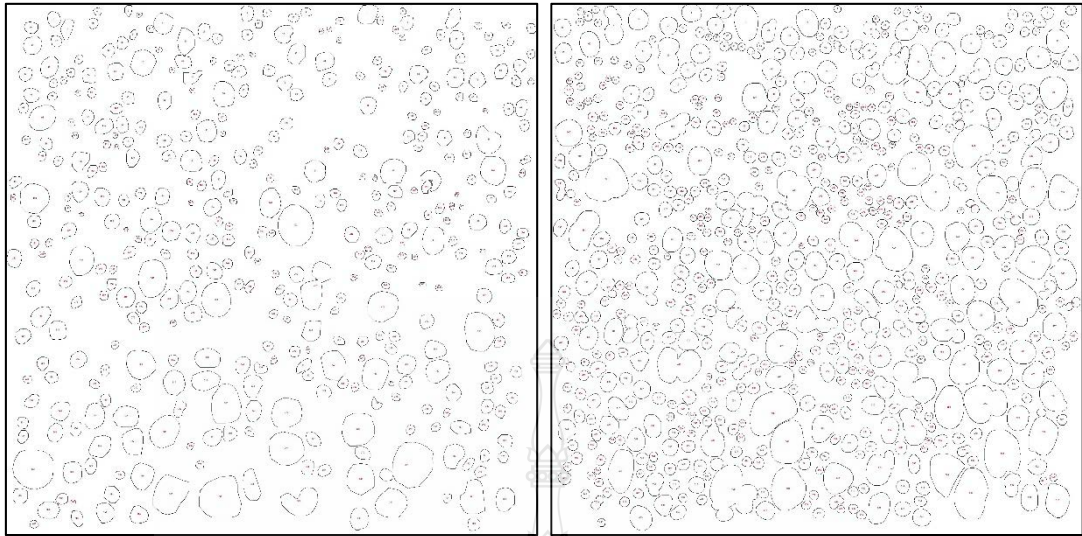
(ค)

(ง)

รูปที่ ก.10 ภาพถ่ายแสดงโพลีเมอร์ที่ขึ้นรูปแบบการพาความร้อน ควบคุมการขยายตัว ร้อยละ 50 สัดส่วน สารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 5 ส่วนในร้อยละ

- (ก) สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 ส่วนในร้อยละ
- (ข) สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 2 ส่วนในร้อยละ
- (ค) สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 3 ส่วนในร้อยละ
- (ง) สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 4 ส่วนในร้อยละ





(ก)

(ข)

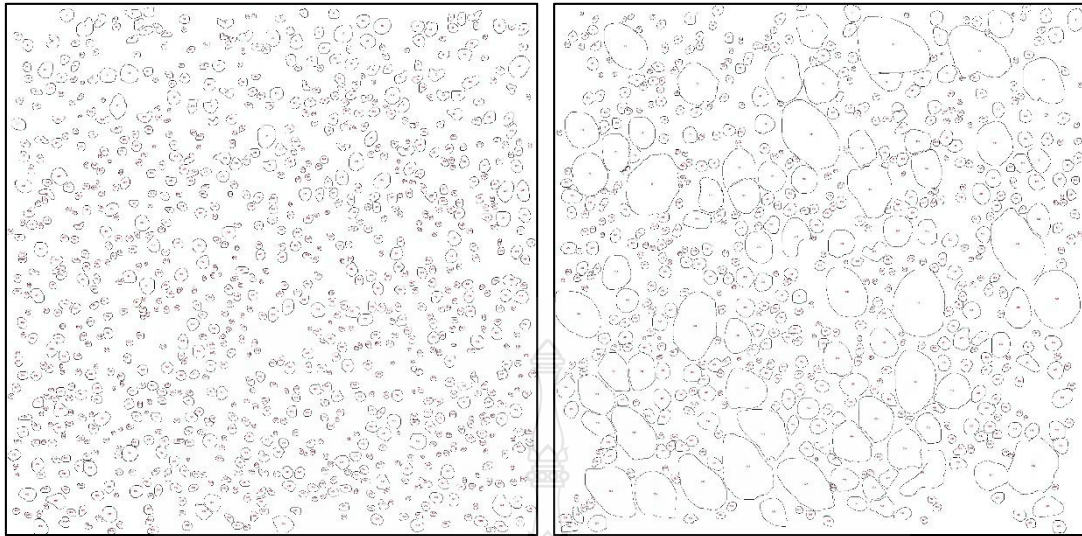


(ค)

(ง)

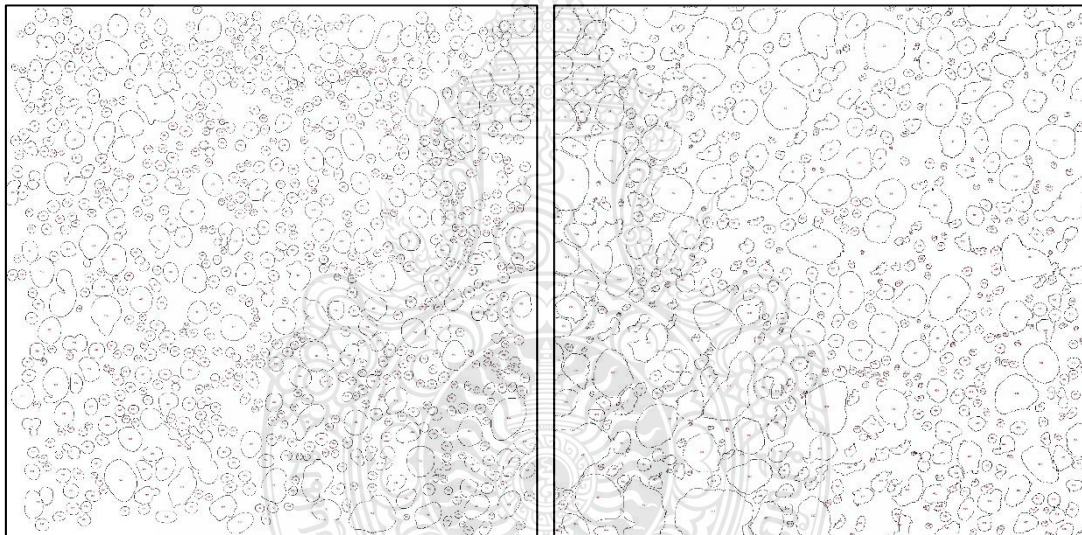
รูปที่ ก.11 ภาพถ่ายแสดงโพลีเมอร์ที่ขึ้นรูปแบบการพาความร้อน ควบคุมการขยายตัว ร้อยละ 50 สัดส่วนสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 10 ส่วนในร้อยละ

- (ก) สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 ส่วนในร้อยละ
- (ข) สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 2 ส่วนในร้อยละ
- (ค) สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 3 ส่วนในร้อยละ
- (ง) สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 4 ส่วนในร้อยละ



(ก)

(ข)



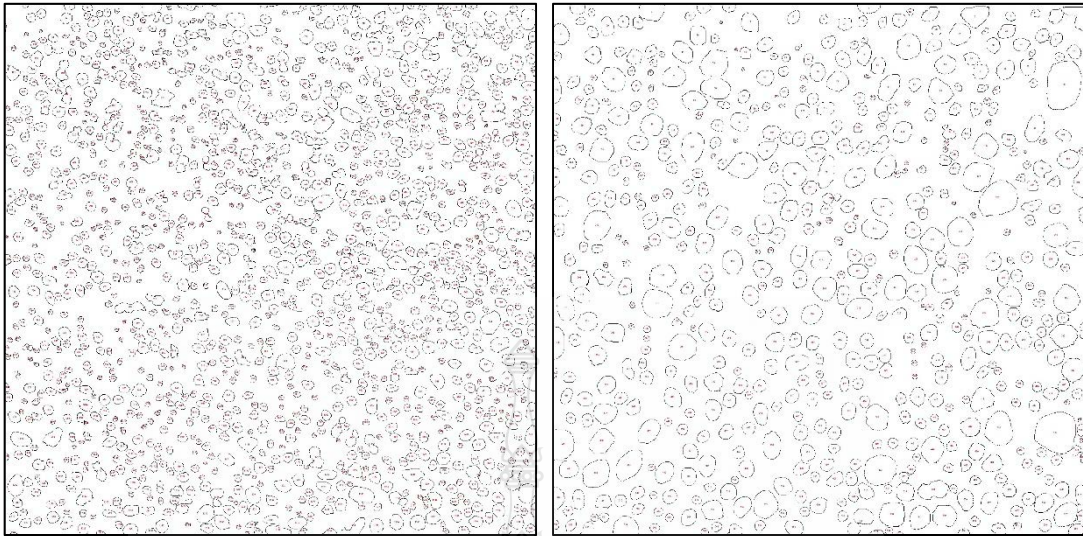
(ค)

(ง)

รูปที่ ก.12 ภาพถ่ายแสดงโพลียามายีนรูปแบบการพาความร้อน ควบคุมการขยายตัว ร้อยละ 50 สัตส่วน สารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 15 ส่วนในร้อยละ

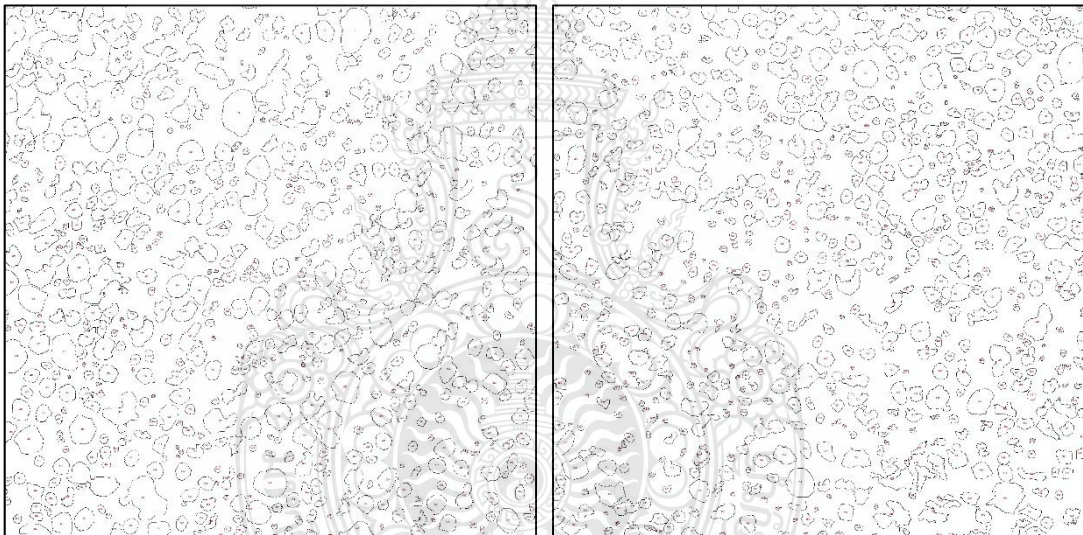
- (ก) สัตส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 ส่วนในร้อยละ
- (ข) สัตส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 2 ส่วนในร้อยละ
- (ค) สัตส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 3 ส่วนในร้อยละ
- (ง) สัตส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 4 ส่วนในร้อยละ





(ก)

(ข)

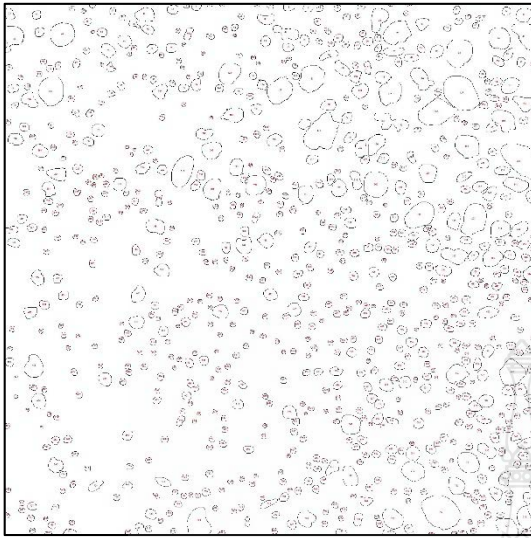


(ค)

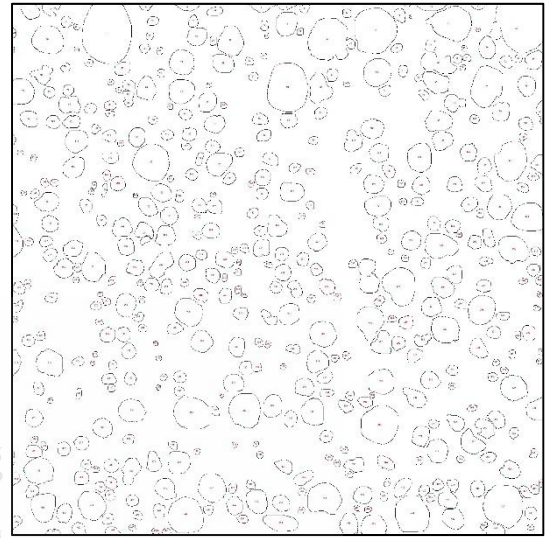
(ง)

รูปที่ ก.13 ภาพถ่ายแสดงโพลียางขึ้นรูปแบบการพาความร้อน ควบคุมการขยายตัว ร้อยละ 25 สัดส่วน สารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 0 ส่วนในร้อยละ

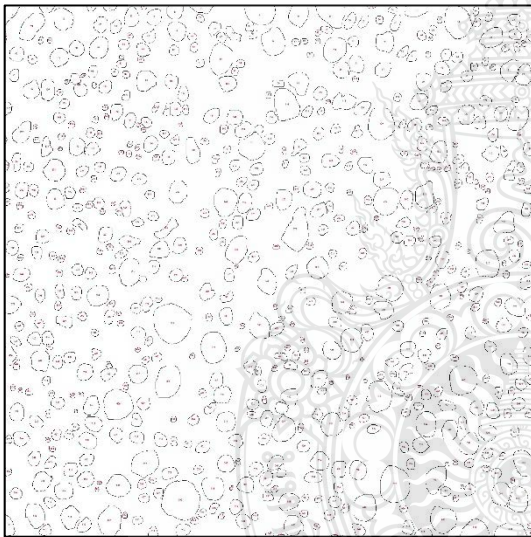
- (ก) สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 ส่วนในร้อยละ
- (ข) สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 2 ส่วนในร้อยละ
- (ค) สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 3 ส่วนในร้อยละ
- (ง) สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 4 ส่วนในร้อยละ



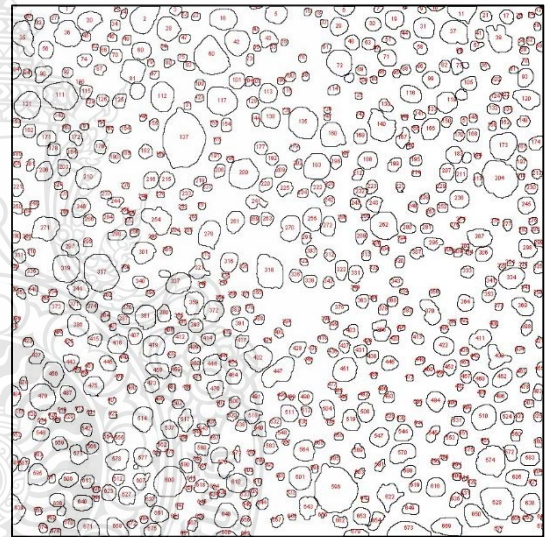
(ก)



(ข)



(ค)

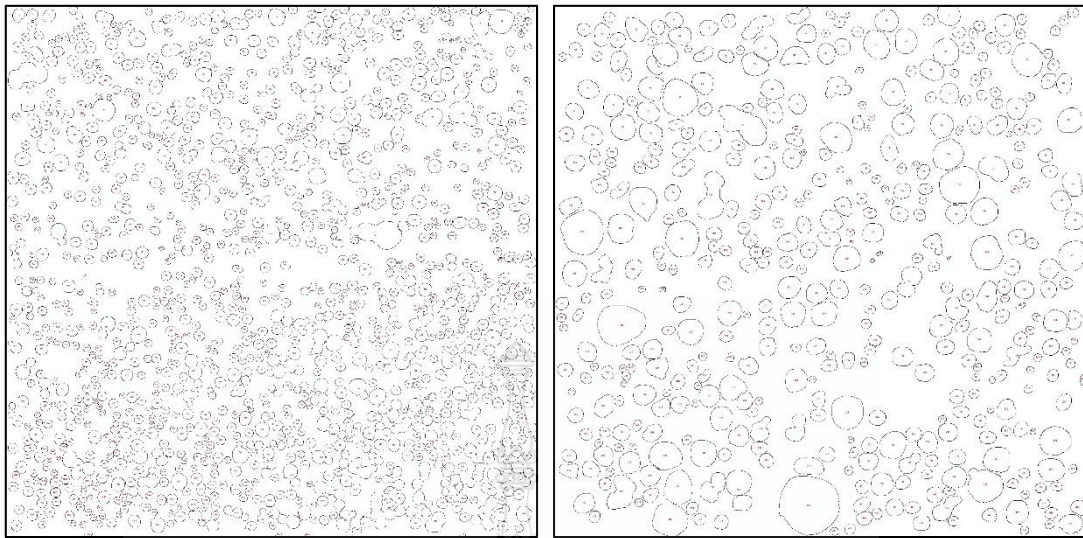


(ง)

รูปที่ ก.14 ภาพถ่ายแสดงโคมยางขึ้นรูปแบบการพาความร้อน ควบคุมการขยายตัว ร้อยละ 25 สัตส่วน  
สารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 5 ส่วนในร้อยละ

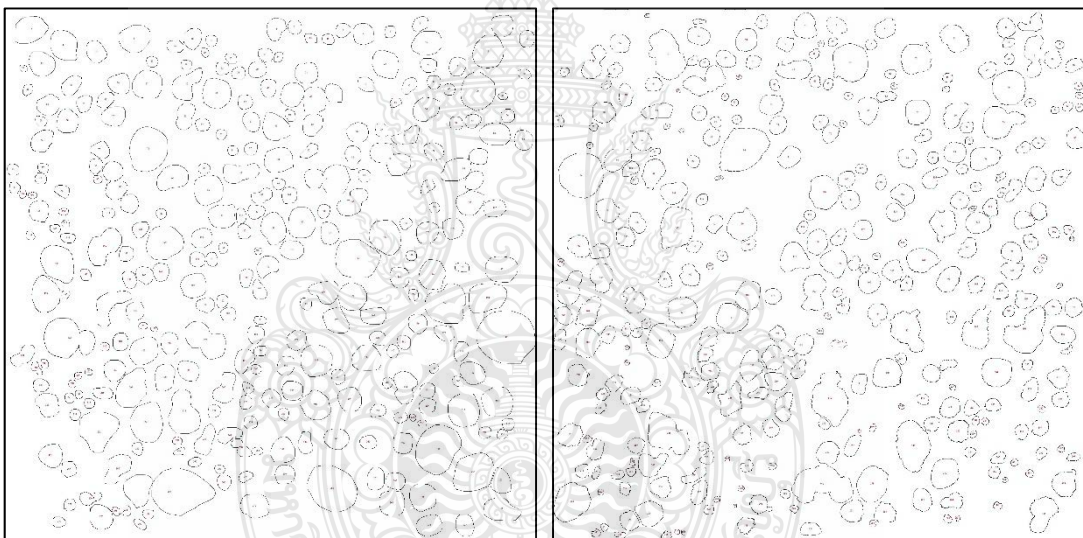
- (ก) สัตส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 ส่วนในร้อยละ
- (ข) สัตส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 2 ส่วนในร้อยละ
- (ค) สัตส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 3 ส่วนในร้อยละ
- (ง) สัตส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 4 ส่วนในร้อยละ





(ก)

(ข)

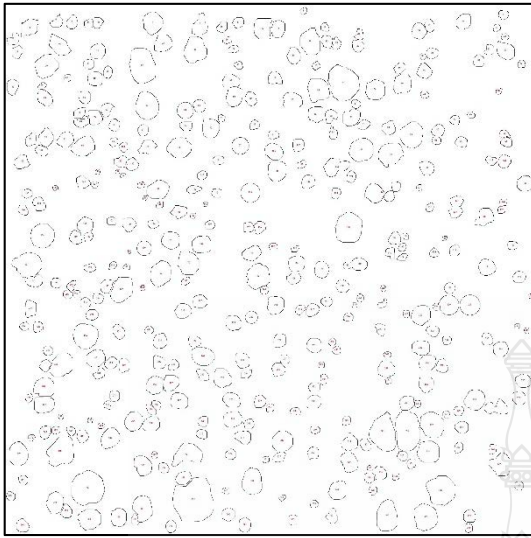


(ค)

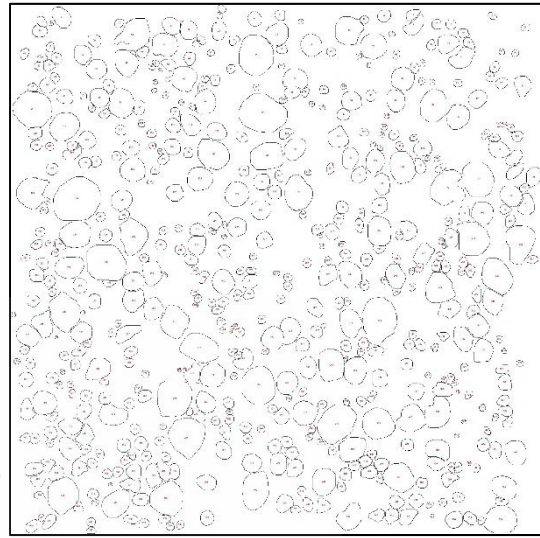
(ง)

รูปที่ ก.15 ภาพถ่ายแสดงโพลียาซึนรูปแบบการพาความร้อน ควบคุมการขยายตัว ร้อยละ 25 สัดส่วน สารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 10 ส่วนในร้อยละ

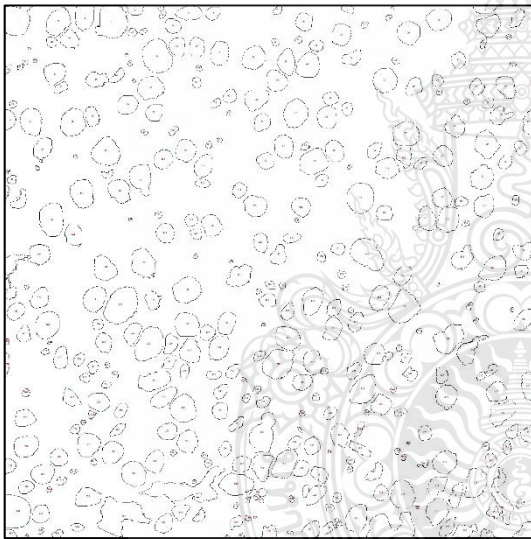
- (ก) สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 ส่วนในร้อยละ
- (ข) สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 2 ส่วนในร้อยละ
- (ค) สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 3 ส่วนในร้อยละ
- (ง) สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 4 ส่วนในร้อยละ



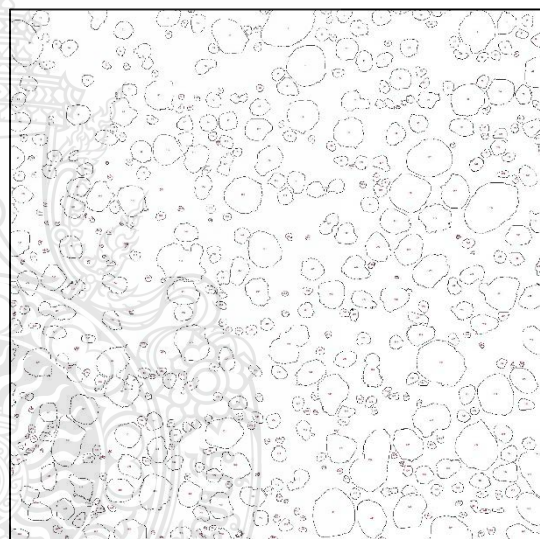
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ ก.16 ภาพถ่ายแสดงโพลียาซึนรูปแบบการพาความร้อน ควบคุมการขยายตัว ร้อยละ 25 สัดส่วนสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 10 ส่วนในร้อยละ

- (ก) สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 1 ส่วนในร้อยละ
- (ข) สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 2 ส่วนในร้อยละ
- (ค) สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 3 ส่วนในร้อยละ
- (ง) สัดส่วนสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ 4 ส่วนในร้อยละ



เรื่อง ขอเชิญเข้าร่วมประชุมวิชาการราชชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ ประจำปี 2563  
เรียน คุณอโนทัย ผลสุวรรณ และคุณศิริชัย ต่อสกุล

ตามที่ท่านได้ส่งบทความวิจัยเรื่อง “อิทธิพลของสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์กับสารเกิดฟองโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตต่อการเกิดฟองในยางธรรมชาติ” เข้าร่วมการประชุมวิชาการราชชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ ประจำปี 2563 ครั้งที่ 5 (The 5<sup>th</sup> Rajamangala Manufacturing & Management Technology Conference 2020)

บัดนี้ทางคณะกรรมการจัดงานฯ ขอแจ้งให้ท่านทราบว่าบทความวิจัยของท่าน “ได้ผ่านการพิจารณา” จากผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ (Reviewers) ให้สามารถเข้าร่วมนำเสนอในการประชุมวิชาการฯ ในระหว่างวันที่ 28 – 29 พฤษภาคม 2563 แต่เนื่องจากการแพร่ระบาดของเชื้อไวรัสโควิด-19 จึงขอเลื่อนงานประชุมไปเป็นวันที่ 3 – 4 กันยายน 2563 ณ โรงแรมเคพีแกรนด์ (K.P. Grand Hotel) ถนนตรีรัตน์ อำเภอเมือง จังหวัดจันทบุรี เพื่อเป็นเวทีแลกเปลี่ยนความรู้และประสบการณ์จากอาจารย์ นักวิจัย นักศึกษา และผู้สนใจในสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและสาขาอื่นๆที่เกี่ยวข้อง อันจะนำไปสู่การยกระดับงานวิจัยของประเทศต่อไป โดยบทความของท่านจะได้รับการตีพิมพ์ในวารสารสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการราชชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการประจำปี 2563 ครั้งที่ 5 (Proceeding of RMTC 2020)

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์พันธุ์เดช นนท์แสงโรจน์)  
รองอธิการบดี  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก  
วิทยาเขตจันทบุรี

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เทอดศักดิ์ ปุระมงคล)  
ประธานดำเนินงานประชุมวิชาการ RMTC 2020  
คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมการเกษตร  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก  
วิทยาเขตจันทบุรี



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล นายอโนทัย ผลสุวรรณ  
วัน เดือน ปีเกิด 28 มิถุนายน 2510  
ที่อยู่ 107 ม.6 ต.ดอนเปา อ.แม่วาง จ.เชียงใหม่ 50360  
การศึกษา ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งทอ)  
สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล ปีการศึกษา 2536  
ประสบการณ์ทำงาน อาจารย์ประจำคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
เบอร์โทรศัพท์ 086-7796209  
อีเมลล์ anothai.p@en.rmutt.ac.th



วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นงานวิจัยที่เกิดจากการค้นคว้าและวิจัย ขณะที่ข้าพเจ้าศึกษาอยู่ในคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ดังนั้นงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถือเป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และข้อความต่างๆในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอรับรองว่าไม่มีการคัดลอกหรือนำงานวิจัยของผู้อื่นมานำเสนอในชื่อของข้าพเจ้า

This thesis consists of research materials conducted at the Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi and hence the copyright owner. I hereby certify that the thesis does not contain any forms of plagiarism.

(นายอโณทัย ผลสุวรรณ)





หัวข้อวิทยานิพนธ์      การพัฒนาสูตรยางโฟมคอมปาวด์สำหรับผลิตโรลลิงแบรีเออร์จราจร  
Development of Natural Rubber Foam Compound for  
Traffic Rolling Barrier  
ชื่อ – นามสกุล      นายอโณทัย ผลสุวรรณ  
สาขาวิชา      วิศวกรรมการผลิต  
อาจารย์ที่ปรึกษา      รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ต่อสกุล  
ปีการศึกษา      2562

---

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยยะ ปราณิตพลกรัง, D.Eng.)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุชา วัฒนา Ph.D.)

..... กรรมการ  
(ดร.กุลชาติ จุลเพ็ญ, D.Ing.)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ต่อสกุล, D.Ing.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่      เดือน      พ.ศ.