



รายงานผลการวิจัย

เรื่อง

ผลกระทบของระบบการคงรูปยางด้วยกำมะถันที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของ
วัสดุผสมระหว่างดินและน้ำยางคอมพาวนด์

Effect of sulfur vulcanization system on physical properties of
clay / compound latex composite

โดย

นภัสภ์ จันทรมณี และ คณะ

มหาวิทยาลัยแม่โจ้

2559



รายงานผลการวิจัย

เรื่อง ผลกระทบของระบบการคงรูปยางด้วยกำมะถันที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของ
วัสดุผสมระหว่างดินและน้ำยางคอมพาวนด์
Effect of sulfur vulcanization system on physical properties of clay /
compound latex composite

ได้รับการจัดสรรงบประมาณวิจัย ประจำปี 2558
จำนวน 228,000 บาท

หัวหน้าโครงการ	นางสาวนภัสส์ จันทรัมย์
ผู้ร่วมโครงการ	นางจิตินันท์ รัตนพรหม นายภควัฒร์ คำสุข

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัย เรื่อง ผลกระทบของระบบการคงรูปยางด้วยกำมะถันที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของวัสดุผสมระหว่างดินผสมน้ำยางคอมพาวนด์ (Effect of sulfur vulcanization system on physical properties of clay/compound latex composite) ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก สำนักวิจัยและส่งเสริมวิชาการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ประจำปีงบประมาณ 2558 ผู้วิจัยขอขอบคุณ สาขาวิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่อนุเคราะห์เรื่องสถานที่และอุปกรณ์บางอย่างที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย

ผู้วิจัย

สารบัญ

	หน้า
สารบัญตาราง	ข
สารบัญภาพ	ค
บทคัดย่อ	1
Abstract	2
คำนำ	3
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	5
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการ	14
ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการวิจัย	22
สรุปผลการวิจัย	36
เอกสารอ้างอิง	37
ภาคผนวก	39

สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
ตารางที่ 1	CV, SEV and EV vulcanization system	8
ตารางที่ 2	Vulcanizate structures and properties	9
ตารางที่ 3	สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	14
ตารางที่ 4	เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	14
ตารางที่ 5	สูตรการเตรียมน้ำยางคอมพาวนด์ของระบบการคงรูปด้วยกำมะถัน	15
ตารางที่ 6	ความสัมพันธ์ของความยาวรอยลึก $\square$ และปริมาตรของตัวอย่างชิ้นงาน ที่ถูกขัดออก $\square$	21
ตารางที่ 7	ค่าความทนแรงอัดของชิ้นงานดินผสมน้ำยางคอมพาวนด์	28

สารบัญรูปภาพ

ภาพ		หน้า
ภาพที่ 1	Structural diagram of an elastomer	6
ภาพที่ 2	ลักษณะพันธะเชื่อมโยงโดยใช้กำมะถัน	7
ภาพที่ 3	ขั้นตอนการเตรียมน้ำดินผสมน้ำยางคอมพาวนด์	16
ภาพที่ 4	การทำงานของเครื่องมือทดสอบความทนการขัดถูสึก	19
ภาพที่ 5	การวัดความยาวของรอยสึก ($\square$) และมุม (∞)	19
ภาพที่ 6	Weibull plot สำหรับระบบกำมะถันปกติ (CV)	23
ภาพที่ 7	Weibull plot สำหรับระบบกิ่งประสิทธิภาพ (SEV)	24
ภาพที่ 8	Weibull plot สำหรับระบบประสิทธิภาพ (EV)	25
ภาพที่ 9	การเปรียบเทียบค่าความทนแรงดัดเทียบกับอัตราส่วนระหว่าง สารตัวเร่งต่อกำมะถัน	26
ภาพที่ 10	Weibull plot สำหรับระบบกำมะถันปกติ (CV 1/1.5) ที่ใช้ปริมาณ น้ำยางคอมพาวนด์ร้อยละ 3 – 7	27
ภาพที่ 11	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนแรงดัดกับอัตราส่วนปริมาณ สารตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาณกำมะถัน	30
ภาพที่ 12	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของชิ้นงานที่ถูกขัดออกของแต่ละตัวอย่าง กับอัตราส่วนปริมาณสารตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาณกำมะถัน	31
ภาพที่ 13	ความสัมพันธ์ระหว่างการบวมพองกับจำนวนชั่วโมงในการแช่โทลูอิน	32
ภาพที่ 14	ความสัมพันธ์ระหว่างความทนแรงดัดและความทนแรงอัด	33
ภาพที่ 15	ความสัมพันธ์ระหว่างความทนการขัดถูและความทนแรงดัด	34
ภาพที่ 16	ความสัมพันธ์ระหว่างความทนการขัดถูและความทนแรงอัด	35

ผลกระทบของระบบการคงรูปร่างด้วยกำมะถันที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของ
วัสดุผสมระหว่างดินและน้ำยางคอมพาวนด์

Effect of sulfur vulcanization system on physical properties of
clay / compound latex composite

นภัส จันทรมี¹ จิตินันท์ รัตนพรหม² และภควัฒร์ คำสุข¹

Napat Chantaramee Tithinun Rattanaplome and Pakawat Chamsuk

¹ สาขาวิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จ.เชียงใหม่ 50290

² สาขาวิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จ.เชียงใหม่ 50290

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลระบบการคงรูปร่างด้วยกำมะถันที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของวัสดุผสมระหว่างดินและน้ำยางคอมพาวนด์ โดยการปรับอัตราส่วนระหว่างกำมะถันและซิงค์ไดเอทิลไดไทโอคาร์บาเมตซึ่งทำหน้าที่เป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อนำวัสดุผสมระหว่างดินและน้ำยางคอมพาวนด์ ร้อยละ 9 ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมงแล้ว พบว่า การวัลคาไนซ์ด้วยระบบการคงรูปแบบปกติ ที่ใช้อัตราส่วนระหว่างกำมะถันต่อซิงค์ไดเอทิลไดไทโอคาร์บาเมต เป็น 1 : 1.5 แสดงค่าความทนแรงดัด 21.28 เมกะปาสกาล ค่าความทนแรงอัด 22.97 เมกะปาสกาล ซึ่งเป็นค่าที่สูงกว่าที่ทดสอบได้จากการใช้ระบบการคงรูปแบบกึ่งประสิทธิภาพหรือแบบประสิทธิภาพ ขณะที่ปริมาตรที่ถูกขับออกก่อนข้างต่ำกว่ากรณีวัลคาไนซ์ด้วยระบบการคงรูปแบบกึ่งประสิทธิภาพและแบบประสิทธิภาพ โดยเป็นผลมาจากการวัลคาไนซ์ด้วยระบบการคงรูปแบบปกตินั้น มีการเชื่อมโยงพันธะในปริมาณมากกว่า

คำสำคัญ : ดินผสมน้ำยางคอมพาวนด์ การวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน สมบัติทางกายภาพ

Abstract

In this study, the effects of sulfur vulcanization system on the physical properties of clay/compound latex composites were investigated by varying the sulfur to zinc diethyldithiocarbamate ratio. The specimens were made from clay with 9 wt% of the compound latex and heat treatment at 150 °C 12 hours. It is evident that conventional vulcanization system using sulfur to zinc diethyldithiocarbamate ratio of 1:1.5 gives excellent flexural strength (21.28 MPa) and compressive strength (22.97 MPa), while abrasion resistance is relatively low compared to others vulcanization system i.e., semi-efficient vulcanization system, efficient vulcanization system. It was a result of the conventional vulcanization system provide higher amount of crosslinking.

Key words : Clay-compound latex composite, Sulfur vulcanization, Physical properties

คำนำ

อุตสาหกรรมเซรามิกแบบดั้งเดิมในประเทศไทย มีต้นทุนการผลิตหลักได้แก่ วัตถุดิบ พลังงาน แรงงาน และค่าเสื่อมราคา ข้อมูลจากรายงานการศึกษาฉบับสมบูรณ์ โครงการจัดทำแผนแม่บทอุตสาหกรรมรายสาขา (สาขาเซรามิกและแก้ว) ซึ่งให้เห็นว่าต้นทุนการผลิตของอุตสาหกรรมเซรามิกแบบดั้งเดิมขึ้นอยู่กับประเภทผลิตภัณฑ์ อย่างไรก็ตามภาพรวมของต้นทุนทางด้านวัตถุดิบคิดเป็นสัดส่วนตั้งแต่ร้อยละ 22 – 58 ต้นทุนพลังงานมีสัดส่วนร้อยละ 8 – 20 ต้นทุนแรงงานมีสัดส่วนร้อยละ 8 – 38 และต้นทุนค่าเสื่อมราคามีสัดส่วนร้อยละ 6 – 10 [1]

ในอุตสาหกรรมเซรามิกขนาดกลางและขนาดเล็กจะใช้ก๊าซเหลว (Liquid petroleum gas, LPG) เป็นเชื้อเพลิงหลักในการผลิต ขณะที่อุตสาหกรรมขนาดใหญ่จะมีการนำก๊าซธรรมชาติ (Natural gas, NG) มาใช้ร่วมด้วย เชื้อเพลิงดังกล่าวมีการปรับราคาขึ้นลงตามราคาน้ำมันปิโตรเลียมในตลาดโลก ในช่วงเวลาที่ผ่านมาราคาก๊าซ LPG ปรับตัวสูงขึ้นและมีแนวโน้มที่จะปรับตัวสูงขึ้นอีกเป็นระยะๆ ประกอบกับปัจจุบันรัฐบาลมีนโยบายยกเลิกการตรึงราคาก๊าซ LPG ที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรม (ของขวัญ 9 ขึ้นจากมาร์ค - คำมั่นสัญญา 9 มกราคม 54, มติชนรายวัน ประจำวันที่ 11 มกราคม 2554, หน้า 2) นโยบายดังกล่าว กลุ่มเซรามิกต่างได้แสดงความวิตกกังวลและชี้แจงว่าจะกระทบต่ออุตสาหกรรมเซรามิกขนาดกลางและขนาดเล็กถึงขั้นขาดทุนและจะเกิดการเลิกจ้างงานในที่สุด (มติชนรายวัน ประจำวันที่ 13 มกราคม 2554, หน้า 5)

การแก้ปัญหาด้านต้นทุนพลังงานนั้นมีแนวทางจัดการหลากหลายวิธี อาทิ การปรับปรุงประสิทธิภาพเตาเผาลดการสูญเสียความร้อนจากเตา การใช้ถ่านหินสะอาดเป็นเชื้อเพลิงทดแทน การพัฒนาเนื้อดินและเคลือบเพื่อเผาอุณหภูมิต่ำ ตลอดจนการทำเซรามิกไม่เผา (Ceramic – like state without firing) ซึ่งแนวทางการจัดการต่างๆ โดยเฉพาะแนวทางของการพัฒนาเนื้อดินและการทำเซรามิกไม่เผานั้นควรต้องคงไว้ซึ่งวิธีการหรือขั้นตอนการผลิตดั้งเดิมที่สถานประกอบการได้ดำเนินการอยู่ ทั้งในด้านการเตรียมและการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ เป็นต้น

นภัสส์ จันทรมี และคณะ [2, 3] ศึกษาการใช้พอลิเมอร์ธรรมชาติเป็นตัวเชื่อมประสานในดินเพื่อเพิ่มความทนแรงดัดของชิ้นงาน ผลการศึกษานี้ได้ข้อมูลสมบัติทางกายภาพของระบบที่ประกอบด้วยดินและน้ำยางคอมพาวนด์ โดยมีสัดส่วนการใช้น้ำยางคอมพาวนด์ต่ำกว่าร้อยละ 10 ผลการศึกษาอิทธิพลของปริมาณน้ำยางคอมพาวนด์ พบว่า การเพิ่มปริมาณน้ำยางคอมพาวนด์ทำให้ค่าความทนแรงดัด (Flexural strength) เพิ่มขึ้น ขณะที่การดูดซึมน้ำลดลง และจากการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิอบและเวลาอบที่มีต่อสมบัติทางกายภาพ

พบว่า การใช้อุณหภูมิอบสูงขึ้นและการใช้เวลาอบนานขึ้นมีแนวโน้มทำให้ชิ้นงานมีค่าความทนแรงดัดเพิ่มขึ้น ขณะที่การดูดซึมน้ำลดลงเช่นเดียวกัน โดยสัดส่วนระหว่างดินผสมสำเร็จรูปและน้ำยางคอมพาวนด์ที่เหมาะสมที่สุดในขอบเขตที่ศึกษา คือ สูตรที่มีการใช้น้ำยางคอมพาวนด์ร้อยละ 9 อบที่อุณหภูมิ 150 °C นาน 12 ชั่วโมง ซึ่งให้ค่าความทนแรงดัด 25.4 เมกะปาสกาล การดูดซึมน้ำร้อยละ 2.11 ความหนาแน่นทั้งก้อน 1.68 – 1.79 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ดัชนีความทนการกร่อน 99.98 ค่าความทนแรงดัดหลังบ่ม 23.1 เมกะปาสกาล และค่าความทนแรงดัดเมื่อชุ่มน้ำ 15.5 เมกะปาสกาล ซึ่งค่าความทนแรงดัดของระบบที่ศึกษานี้สูงกว่าค่าของชิ้นงานที่ไม่เติมน้ำยางคอมพาวนด์และเฝ้าที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส (7.4 เมกะปาสกาล) ทั้งยังสูงกว่าการใช้พอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ ดังเช่น ข้อมูลจากงานวิจัยของ Lee, K. C. กล่าวคือ

Lee, K. C. และคณะ [4] ศึกษาสมบัติทางกายภาพของอิฐที่ทำจากวัสดุผสมระหว่างดินและพอลิเมอร์หลายชนิด อาทิ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ พอลิไวนิลไพโรไลไดน และ คาร์บอกซิลเมททิลเซลลูโลส ซึ่งพบว่า วัสดุผสมระหว่างดินผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ด้วยอัตราส่วนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักดิน และไม่ผ่านการให้ความร้อน จะมีค่าการรับกำลังอัด และค่าความทนแรงดัดสูงที่สุด โดยมีค่าเป็น 16.57 เมกะปาสกาล และ 3.02 เมกะปาสกาล ตามลำดับ ในขณะที่ตัวอย่างควบคุมซึ่งไม่มีการผสมพอลิเมอร์เลยนั้นจะมีค่าการรับกำลังอัดเพียง 5.01 เมกะปาสกาล และค่าความทนแรงดัดเป็น 1.3 เมกะปาสกาล เท่านั้น

จากข้อมูลข้างต้น การนำพอลิเมอร์ โดยเฉพาะน้ำยางพาราซึ่งเตรียมในรูปของน้ำยางคอมพาวนด์ผสมกับดิน สามารถช่วยเพิ่มคุณสมบัติในการยึดเกาะตัวของดิน เพื่อผลิตเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรง ทนต่อสภาพแวดล้อม โดยการใช้วิธีการอบที่อุณหภูมิต่ำเพื่อให้ยางเกิดการวัลคาไนซ์แทนการเผาที่อุณหภูมิสูง ซึ่งคณะผู้วิจัยเห็นความเป็นไปได้ในการผลิตสินค้าเลียนแบบเซรามิกบางประเภทโดยเฉพาะอย่างยิ่งเซรามิกแบบดั้งเดิม กลุ่มเอิร์ทเทนแวร์ ที่ต้องใช้อุณหภูมิเผา 900 -1100 องศาเซลเซียส

อย่างไรก็ตามการศึกษาเบื้องต้นดังที่กล่าว [2] กำหนดสัดส่วนผสมสำหรับการเตรียมน้ำยางคอมพาวนด์คงที่ โดยใช้ปริมาณสารทำให้ยางคงรูป 1.5 ส่วนในร้อยละของยาง (phr) สารตัวเร่งให้ยางคงรูป 1 phr สารตัวกระตุ้น 1.5 phr และสารเพิ่มความเสถียร 0.4 phr ดังนั้นสำหรับงานวิจัยนี้จึงมุ่งประเด็นศึกษาผลกระทบจากการปรับสูตรน้ำยางคอมพาวนด์ ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของวัสดุผสมระหว่างดินและน้ำยางคอมพาวนด์

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

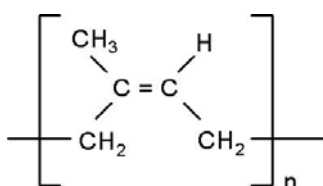
ศึกษาผลของการปรับสูตรน้ำยางคอมพาวนด์ ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของวัสดุผสมระหว่างดินและน้ำยางคอมพาวนด์

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบผลของการปรับสูตรน้ำยางคอมพาวนด์ ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของวัสดุผสมระหว่างดินและน้ำยางคอมพาวนด์
2. แลกเปลี่ยนความรู้ระหว่างหน่วยงาน เช่น สาขาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ และสาขาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร ตลอดจนผู้ประกอบการที่สนใจ

การตรวจเอกสาร

ยางธรรมชาติ (Natural rubber : NR) ที่ถูกนำมาใช้งานส่วนใหญ่เป็นยางที่ได้จากต้นยางพารา หรือที่เรียกว่า *Hevea brasiliensis* มีชื่อทางเคมี คือ cis-1,4-Polyisoprene และมีโครงสร้างทางเคมี ดังนี้



cis-1,4-Polyisoprene

ยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลสูงเฉลี่ยประมาณ 200,000 ถึง 500,000 มีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลกว้าง มีอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (glass transition temperature : Tg) เท่ากับ -72°C และจากลักษณะโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ ทำให้ยางธรรมชาติมีสมบัติดังต่อไปนี้

- ยางธรรมชาติมีโครงสร้างหลักที่ประกอบด้วยคาร์บอนและไฮโดรเจน ทำให้ยางธรรมชาติไม่ทนต่อน้ำมันปิโตรเลียมหรือน้ำมันพืช แต่เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี
- ยางธรรมชาติมีพันธะคู่ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา จึงสามารถวัลคาไนซ์ได้ด้วยกำมะถัน และยางทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและโอโซนได้ง่าย ซึ่งเป็นสาเหตุในการเสื่อมสภาพของยาง
- สายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติสามารถเคลื่อนไหวหักงอไปมาได้ง่าย ทำให้ยางธรรมชาติคงสภาพยืดหยุ่นได้ดี อาจสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิต่ำมาก
- โครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติมีความสม่ำเสมอสูง ทำให้ยางธรรมชาติสามารถเกิดผลึกได้ เมื่อถูกดึงยืดหรือเก็บไว้ในที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้มีความทนต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาดสูง (Morton,

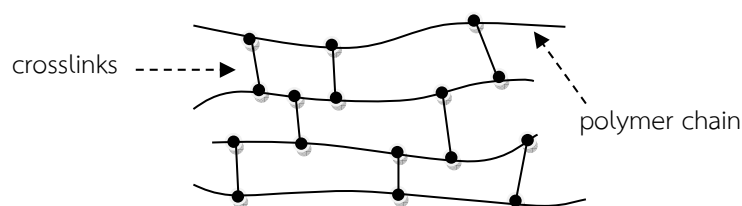
1987) และมีค่าความแข็งแรงขณะไม่วัลคาไนซ์ (Green strength) สูงและมีความเหนียวติดกัน (Building tack) ดี

- ยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลสูง ทำให้ยางแข็งเกินไปที่จะนำไปแปรรูปโดยตรง จึงต้องนำยางไปบดเพื่อให้โมเลกุลเล็กลงก่อนนำไปใช้งาน

สารทำให้ยางคงรูปเป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่ต้องผสมลงไปในยางเพื่อให้ยางเกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่เรียก “ปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เซชัน” หรือ “ปฏิกิริยาการคงรูป” การเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวทำให้โมเลกุลของยางธรรมชาติเกิดการเชื่อมโยงกันเป็นโครงสร้างคาข่าย 3 มิติ ซึ่งจะทำให้ยางเปลี่ยนสภาพจากอ่อนเหนียวหนึบ (Tacky) และไหลได้แบบเทอร์โมพลาสติกไปเป็นยางคงรูปหรือเทอร์โมเซต ที่มีความยืดหยุ่นสูง ทนทาน และมีสมบัติที่เสถียรไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมากนัก [5]

การคงรูปยางสามารถใช้สารเคมีร่วมกับความร้อน หรืออาจจะใช้รังสีหรือคลื่นพลังงาน เช่น รังสีแกมมา ถ้าอิเล็กตรอน คลื่นไมโครเวฟ เป็นต้น แต่การคงรูปโดยใช้รังสีจำเป็นต้องใช้เครื่องมือที่มีราคาแพงและใช้ได้ดีในกรณีที่เป็นการขึ้นงานบางๆ ดังนั้นการคงรูปที่มีความสำคัญในเชิงอุตสาหกรรม และได้รับความนิยม คือการใช้สารเคมีร่วมกับความร้อน สำหรับระบบการคงรูปที่ใช้สารเคมีแบ่งออกเป็น 3 ระบบหลัก ได้แก่ 1. ระบบการคงรูปด้วยกำมะถัน (Sulfur vulcanization) 2. ระบบการคงรูปด้วยเพอร์ออกไซด์ (Peroxide vulcanization) และ 3. ระบบการคงรูปด้วยสารเคมีอื่นๆ อย่างไรก็ตามระบบการคงรูปด้วยกำมะถันเป็นระบบที่ใช้กันมากที่สุดในปัจจุบัน เพราะเป็นระบบที่มีต้นทุนต่ำ การคงรูปสามารถเกิดขึ้นได้เร็ว และยางคงรูปที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่ดี ระบบนี้นิยมใช้กับยางทุกชนิดที่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุลโดยเฉพาะยางธรรมชาติ

สำหรับระบบการคงรูปด้วยกำมะถันและให้ความร้อน ปฏิกิริยาการคงรูปเริ่มเกิดขึ้นผ่านอนุมูลอิสระ ซึ่งเกิดจากการที่กำมะถันที่มีโครงสร้างแบบวงแหวนแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระ อิเล็กตรอนของอนุมูลอิสระซึ่งอยู่ที่ปลายด้านหนึ่งจะเข้าทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของยางซึ่งมีพันธะคู่ ในขณะที่อิเล็กตรอนซึ่งอยู่ที่ปลายอีกด้านหนึ่งของอนุมูลอิสระก็จะเข้าทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของยางอีกสายโซ่หนึ่ง เกิดเป็นการเชื่อมโยงทางเคมีขึ้น (ภาพที่ 1)



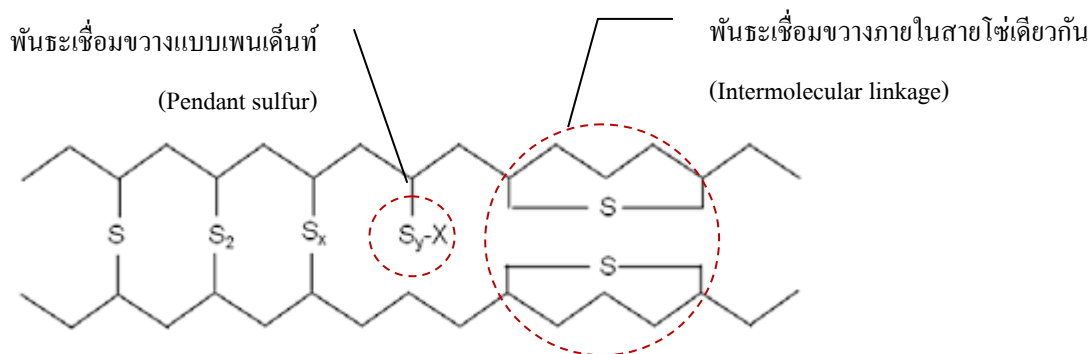
ภาพที่ 1 Structural diagram of an elastomer

แต่ปฏิกิริยาดังกล่าวจะเกิดขึ้นได้ช้ามาก จึงต้องอาศัยสารเคมีอื่นเข้ามาทำหน้าที่เป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยา (Accelerator) และสารกระตุ้นปฏิกิริยา (Activator) สารตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นสารเคมีที่ทำหน้าที่เร่งอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาการควบรูปโดยตรง ส่วนสารกระตุ้นปฏิกิริยาเป็นสารเคมีที่จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับสารตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้สารตัวเร่งปฏิกิริยามีประสิทธิภาพในการทำงานสูงขึ้นซึ่งจะช่วยทำให้ยางมีระดับการควบรูปสูงและมีสมบัติเชิงกลที่ดี การเชื่อมโยงทางเคมีอาจเกิดขึ้นได้หลายรูปแบบ เช่น การเชื่อมโยงที่เกิดผ่านพันธะมอนอซัลฟิดิก (Monosulfidic crosslinks) พันธะไดซัลฟิดิก (Disulfidic crosslinks) หรือการเชื่อมโยงผ่านพันธะพอลิซัลฟิดิก (Polysulfidic crosslinks) ในทางทฤษฎี รูปแบบหรือโครงสร้างของการเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นในระหว่างการควบรูปขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร เช่น อัตราส่วนของกำมะถันต่อสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ ชนิดและปริมาณสารตัวเร่งปฏิกิริยา สารกระตุ้นปฏิกิริยา และระยะเวลาการควบรูป เป็นต้น [6]

ระบบการควบรูปด้วยกำมะถันสามารถแบ่งออกเป็น 3 ระบบ ดังต่อไปนี้ [5, 7]

1. ระบบกำมะถันปกติ (Conventional vulcanization system หรือ CV)

พันธะเชื่อมโยงจะมีกำมะถันหลายอะตอม การเชื่อมโยงนี้ทำให้ยางคอมพาวนด์มีสมบัติเชิงกลที่ดี (ความต้านทานแรงดึง ความต้านทานต่อการฉีกขาด ความต้านทานต่อการล้า) แต่ถ้าอบที่อุณหภูมิสูงเกินไป สมบัติจะลดลงเนื่องจากเกิดรีเวอร์ชัน และเสื่อมสภาพ การเกิดพันธะเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยางด้วยกำมะถัน และจำนวนอะตอมของกำมะถันที่ใช้ในการสร้างพันธะเชื่อมโยงหนึ่งครั้งนั้นจะแตกต่างกัน ถ้ามีการใช้กำมะถัน 1 อะตอมต่อพันธะเชื่อมโยงจะเรียก พันธะมอนอซัลฟิดิก ($-S-$) แต่หากเป็นพันธะที่มีกำมะถัน 2 อะตอมต่อการเชื่อมโยงเรียก พันธะไดซัลฟิดิก ($-S_2-$) และหากเป็นพันธะที่มีจำนวนกำมะถันมากกว่า 2 อะตอมเรียก พันธะพอลิซัลฟิดิก ($-S_x-$) ซึ่งการเชื่อมโยงในระบบนี้จะทำให้ได้การเชื่อมโยงที่มีกำมะถันอยู่หลายอะตอม ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ลักษณะพันธะเชื่อมโยงโดยใช้กำมะถัน

2. ระบบประสิทธิภาพ (Efficient vulcanization system หรือ EV)

เป็นระบบที่มีการปรับปรุงให้มีการใช้กำมะถันอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยเพิ่มสัดส่วนของสารตัวเร่งปฏิกิริยาต่อกำมะถันให้สูงขึ้น หรือใช้ระบบสารให้กำมะถัน (Sulfur donor) โดยประมาณร้อยละ 80 ของพันธะเชื่อมโยงจะมีกำมะถันอยู่เพียง 1 อะตอม ซึ่งทำให้ยางคอมพาวนด์ที่ได้มีสมบัติเชิงกลด้อยกว่าระบบกำมะถันปกติ แต่มีความต้านทานต่อการเกิดรีเวอร์ชันได้ดีกว่า มีความต้านทานต่อความร้อน และต้านทานต่อการเสื่อมสภาพเมื่อถูกออกซิไดซ์

3. ระบบกึ่งประสิทธิภาพ (Semi-efficient vulcanization system หรือ SEV)

เป็นระบบที่ใช้ปริมาณของกำมะถันและสารตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในปริมาณระหว่างการใช้กำมะถันและสารตัวเร่งปฏิกิริยาในระบบกำมะถันปกติและระบบประสิทธิภาพ ทำให้ยางคอมพาวนด์มีสมบัติเชิงกลและความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพอยู่ระหว่างระบบกำมะถันปกติและระบบประสิทธิภาพ

ปริมาณกำมะถันและสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้สำหรับแต่ละระบบ สรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 1 และปริมาณพันธะเชื่อมโยงแบบต่างๆ พร้อมตัวอย่างสมบัติบางประการแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 1 CV, SEV and EV vulcanization system [5]

Type	Sulfur (S, phr)	Accelerator (A, phr)
Conventional vulcanization system (CV)	1.5 – 2.5	0.5 – 1.0
Semi-efficient vulcanization system (SEV)	0.5 – 1.2	1.5 – 2.5
Efficient vulcanization system (EV)	0 – 0.2	2.5 – 3.5

ตารางที่ 2 Vulcanizate structures and properties [7]

Features	System		
	CV	SEV	EV
Poly- and disulfidic crosslinks (%)	95	50	20
Monosulfidic crosslinks (%)	5	50	80
Reversion resistance	Low	Medium	High
Heat aging resistance	Low	Medium	High
Fatigue resistance	High	Medium	Low
Tear resistance	High	Medium	Low
Compression set (%)	High	Medium	Low

จากตารางที่ 2 สมบัติของยางที่ผ่านการคงรูปแต่ละระบบจะมีความแตกต่างกัน โดยยางที่ผ่านการคงรูประบบกำมะถันปกติ มีความต้านทานต่อแรงดึง การกระดอน (Rebound resilience) และความต้านทานต่อการขัดถูที่ดี แต่มีข้อด้อยในด้านของความต้านทานการเสื่อมสภาพจากความร้อน (Heat aging resistance) และความต้านทานต่อการยุบตัวจากแรงอัด (Compression set) เนื่องจากพันธะเชื่อมขวางที่เกิดขึ้นเป็นพันธะพอลิซัลฟิดิกซึ่งมีพลังงานพันธะที่ค่อนข้างต่ำ (206 kJ/mol) เมื่อเทียบกับพันธะเชื่อมขวางแบบมอนอซัลฟิดิก หรือ ไดซัลฟิดิก (279 kJ/mol)

ในการวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติด้วยกำมะถันหรือสารที่ทำให้กำมะถันมีสารเคมีที่จำเป็นต้องใช้ร่วมกันในการวัลคาไนซ์ยาง ดังนี้ [5-9]

1. สารตัวเร่ง (Accelerator) ในการวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติโดยใช้กำมะถันเพียงอย่างเดียว ต้องใช้กำมะถันในปริมาณมากและการวัลคาไนซ์ต้องใช้เวลาานาน แม้ว่าจะใช้อุณหภูมิในการวัลคาไนซ์สูง ผลลัพท์ยางที่ได้มีสีคล้ำ และเมื่อวางทิ้งไว้กำมะถันจะซึมมาอยู่ที่ผิวผลลัพท์ จึงนำสารตัวเร่งมาใช้ร่วมกับกำมะถัน ทำให้ลดเวลาในการวัลคาไนซ์ลงอย่างมาก อุณหภูมิในการวัลคาไนซ์ก็ลดลงเช่นกัน และปริมาณกำมะถันที่ใช้เพื่อให้ได้สมบัติเชิงกลสูงสุดก็ลดลง สารตัวเร่งมีอิทธิพลต่อการเกิดการเชื่อมโยงในยางธรรมชาติ สารตัวเร่งแบ่งได้หลายกลุ่ม ดังนี้

1.1 กลุ่มไดไธโอคาร์บาเมต (Dithiocarbamate) แบ่งออกเป็นสามกลุ่มย่อยคือ กลุ่มเกลือแอมโมเนียม (Ammonium salt) กลุ่มเกลือโซเดียม (Sodium salt) และกลุ่มเกลือซิงค์ (Zinc salt) สารตัวเร่งกลุ่มนี้จัด

อยู่ในสารตัวเร่งที่มีความเร็วในการวัลคาไนซ์สูง และสารตัวเร่งกลุ่มนี้มักใช้เป็นตัวเร่งสำหรับน้ำยาง อุนหภูมิที่ใช้วัลคาไนซ์ไม่เกิน 125°C ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพโปร่งใส ขาว มีสีน้ำตาลใส ตัวอย่างใช้ สารตัวเร่งกลุ่มนี้ เช่น ZDPC, ZDEC, ZDBC, ZDMC เป็นต้น

1.2 กลุ่มแซนเทท (Zanthate) เป็นสารตัวเร่งที่วัลคาไนซ์ยางได้เร็วมาก (เร็วกว่ากลุ่มเกลือแอมโมเนีย ของไดโซโอคาร์บาเมต) ส่วนใหญ่ใช้ในอุตสาหกรรมน้ำยาง ไม่นิยมใช้ยางแท่ง อุนหภูมิที่ใช้วัลคาไนซ์ ประมาณ 80-100°C เพื่อให้ได้การวัลคาไนซ์แบบพลาโต (Plateau curve) ตัวอย่างสารตัวเร่งกลุ่มนี้ได้แก่ SIX, ZIX, ZBX

1.3 กลุ่มไธยูเรม (Thiuram) จัดเป็นสารตัวเร่งที่มีความเร็วสูงพิเศษ ยางจะสก็อช (Scorch) และวัลคาไนซ์ช้ากว่ากลุ่มไดโซโอคาร์บาเมต สารกลุ่มนี้สามารถใช้ได้หลายรูปแบบ เช่น ใช้เป็นสารตัวเร่งด้วยตัวเองตามลำพัง โดยไม่ต้องใช้กำมะถันก็สามารถวัลคาไนซ์ยางได้เช่นกัน ที่เรียกว่า Thiuram vulcanization แต่ยางที่ได้มีค่ามอดูลัสต่ำ หรือใช้ปนกับกำมะถันในปริมาณเล็กน้อย (เป็นการวัลคาไนซ์แบบระบบอีวี) จะได้ยางที่มีสมบัติการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดต่ำและทนความร้อน หรือใช้เป็นตัวเร่งเสริมเพื่อกระตุ้นสารตัวเร่งอื่น เช่น TMTD, TMTM, TETD, DPTS เป็นต้น และสารกลุ่มนี้จำเป็นต้องใช้ชั่งค็อกออกไซด์กระตุ้นการทำงาน แต่ไม่จำเป็นต้องมีกรดไขมันได้ อุนหภูมิที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ ประมาณ 125-135°C มักใช้กับผลิตภัณฑ์ที่โปร่งใส สีขาว หรือสีต่างๆ และใช้กับผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์

1.4 กลุ่มไธอาโซล (Thiazole) เป็นสารตัวเร่งที่มีความเร็วในการวัลคาไนซ์ปานกลาง ถ้าใช้ไธอาโซลเป็นสารตัวเร่งเดียวล้วนๆ ยางที่ได้จะมีความปลอดภัยในการผลิตมากกว่าใช้สารตัวเร่งที่มีความเร็วสูงอื่นๆ ตัวอย่างสารกลุ่มไธอาโซล เช่น MBTS, MBT, ZMBT เป็นต้น (โดย MBTS และ MBT ช่วยให้น้ำยางนิ่มลงในขณะที่ทำการบดผสมด้วย ส่วน ZMBT มีความเร็วในการวัลคาไนซ์มากกว่า MBTS จึงนิยมใช้กับน้ำยาง) ยางที่ใช้สารกลุ่มนี้สามารถวัลคาไนซ์ได้ทุกรูปแบบของการวัลคาไนซ์ โดยเฉพาะใช้กับเครื่องอัด ถ้าใช้สารกลุ่มนี้ร่วมกับสารตัวเร่งกลุ่มอื่น เช่น ไดโซโอคาร์บาเมตและไธยูเรม จะทำให้วัลคาไนซ์ได้เร็วขึ้น การใช้ไธอาโซลจำเป็นต้องมีชั่งค็อกออกไซด์และกรดไขมันร่วมด้วย

1.5 กลุ่มซัลฟิनाไมด์ (Sulphenamide) เป็นสารตัวเร่งที่ delay action หรือให้เวลาสก็อชยาวกว่าไธอาโซล เพราะเมื่อได้รับความร้อน ซัลฟิनाไมด์จะแตกตัวให้ MBT และ เมสออกมา โดยที่ MBT จะทำให้เกิดการวัลคาไนซ์และเบสเป็นตัวกระตุ้นให้สารตัวเร่งทำงานเร็วขึ้นมอดูลัสสูงขึ้น สารกลุ่มนี้ เช่น CBS, TBBS, DCBS, Vulcavit AZ เป็นต้น การใช้ซัลฟิनाไมด์ร่วมกับไดโซโอคาร์บาเมตหรือไธยูเรม จะทำให้วัลคาไนซ์ได้เร็วขึ้น และจำเป็นต้องมีชั่งค็อกออกไซด์อย่างน้อย 3 phr และกรดไขมันร่วมด้วย

เพื่อให้ประสิทธิภาพสูงสุด ซัลฟิनाไมด์เป็นสารตัวเร่งที่ทำให้ยางมีค่ามอดูลัสสูงมากและมีสมบัติเชิงกลดี รวมทั้งให้การวัลคาไนซ์แบบพลาโต (หรือ flat cure) แต่ซัลฟิनाไมด์จะเกิดการสลายตัวได้ง่ายเมื่ออยู่ใกล้ความชื้นหรือไอน้ำ ซึ่งจะทำให้ยางเกิดสก๊อชได้ง่ายขึ้นและวัลคาไนซ์ช้าลง

1.6 กลุ่มกัวนิดิน (guanidine) เป็นสารตัวเร่งที่วัลคาไนซ์ได้ช้า มักเป็นสารตัวเร่งเสริม เหมาะที่จะใช้กับยางหนาเพราะต้องใช้เวลาวัลคาไนซ์นาน สารกลุ่มนี้ เช่น DPG, DOTG ออกตะ-โททิลไบกัวนิดิน (o-totylbiguanidine) เป็นต้น

การใช้สารตัวเร่ง 2 ชนิดในระบบเดียวกัน เป็นการเสริมประสิทธิภาพ (synergism) ให้สารตัวเร่งทำงานได้ดีขึ้น เช่น ใช้ TMTD คู่กับ CBS ทำให้ยางวัลคาไนซ์ได้เร็วขึ้น และยางที่ได้มีสมบัติการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดและความต้านทานต่อการบ่มเร่งดีกว่าในกรณีที่ใช้ซัลเฟอร์กับ CBS เพียงอย่างเดียว

2. สารกระตุ้น (activator) คือ สารที่ช่วยเสริมให้สารตัวเร่งทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงขึ้นอาจเป็นสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ สารอนินทรีย์เป็นสารกระตุ้นที่สำคัญและนิยมใช้ คือ ซิงค์ออกไซด์ ส่วนสารกระตุ้นที่เป็นสารอินทรีย์ที่สำคัญ คือ กรดไขมัน เช่น กรด สเตียริก กรดลอริก กรดปาล์มมิก เป็นต้น และในบางครั้งถ้าไม่มีสารกระตุ้น จะไม่มีการวัลคาไนซ์เกิดขึ้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้สารกระตุ้นเพื่อให้ยางวัลคาไนซ์ได้อย่างสมบูรณ์

สมบัติของยางธรรมชาติวัลคาไนซ์

1. ความแข็ง

ยางธรรมชาติสามารถวัลคาไนซ์ให้มีความแข็งต่างๆกันได้มาก ตั้งแต่นุ่มมาก (เช่น 30-50 IRHD) ไปจนถึงความแข็งของอีโบนี (98+IRHD) การปรับความแข็งของยางธรรมชาติทำได้โดยการปรับเปลี่ยนปริมาณของสารตัวเติมหรือเปลี่ยนปริมาณกำมะถัน ในช่วงของการใช้ปริมาณในกำมะถัน 10-20 phr จะให้ยางที่มีความแข็งคล้ายหนัง เหมาะสำหรับงานกระเบื้องงานปูพื้นและยางลูกกลิ้ง แต่จะมีความแข็งต่ำและเสื่อมสภาพได้ง่าย

2. ความทนทานต่อแรงดึง

ยางธรรมชาติมีโครงสร้างโมเลกุลที่สม่ำเสมอ จึงสามารถเกิดผลึกได้เมื่อถูกดึงยืดทำให้ยางธรรมชาติมีความทนทานต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาดสูง แม้ไม่มีสารตัวเติมยางธรรมชาติก็ยังคงมีความแข็งแรงสูง (ถึงประมาณ 30 MPa) ทำให้ยางธรรมชาติมีความเหมาะสมในการผลิตกันชนที่มีความบาง นุ่ม และแข็งแรงได้ เช่น ถูมือผ่าตัด ลูกโป่ง ถูยางอนามัย สายยางยืด และยางรัด เป็นต้น เนื่องจากยางธรรมชาติมีความแข็งแรงในตัวเองสูง จึงสามารถใช้สารตัวเติมราคาถูก เช่น แคลเซียมคาร์บอเนตและดินขาว ในผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการความแข็งแรงเป็นสมบัติหลัก เช่น ยางรองพื้นรถ ยางปูพื้น และยางรองขาเก้าอี้ เป็นต้น ทำให้ยาง

ธรรมชาติมีต้นทุนในการผลิตต่ำกว่ายางชนิดอื่น สำหรับการใส่สารตัวเติมชนิดเสริมประสิทธิภาพที่มีราคาแพง เช่น เชม์คาร์บอนและซิลิกา จะใช้ในกรณีที่ต้องการความแข็งแรงสูงเช่น ดอกยางรถยนต์และพื้นส้นรองเท้าที่มีคุณภาพสูง ยางหุ้มสายพานลำเลียงที่ใช้ลำเลียงสารที่ทำให้ยางมีความสึกหรอสูง เช่น แร่โลหะหรือกรวด เป็นต้น

3. ความสามารถในการยืด

ยางธรรมชาติที่ไม่ใส่สารตัวเติม สามารถยืดได้ถึงประมาณ 1000% หรือมากกว่านั้น ความสามารถในการยืดของยางธรรมชาติจะลดลงตามปริมาณของสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้นและตามปริมาณของพันธะเชื่อมโยงสมบัติในการยืดได้สูงนี้ ทำใหยางธรรมชาติสามารถใช้ในการทำผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความยืดสูง เช่น เส้นยางยืด ยางรัดของและลูกโป่ง เป็นต้น

4. ความต้านทานต่อการฉีกขาด

ยางธรรมชาติมีความสามารถในการเกิดผลึกได้ดี ทำให้มีความต้านทานต่อการฉีกขาดได้สูงกว่ายางอื่นๆ ยกเว้นยางพอลิยูรีเทนที่เชื่อมโยงด้วยพันธะไฮโดรเจน ความต้านทานของการฉีกขาดของยางธรรมชาติจะเพิ่มขึ้นเมื่อใส่สารตัวเติมเสริมประสิทธิภาพร่วมด้วย

4. ความสามารถในการกระเด็นตัวและฮิสเทอรีซิสลอส (hysteresis loss)

ยางธรรมชาติมีความกระเด็นตัวสูงกว่ายางอื่นๆ ยกเว้นยางบิวทาไดอิน ยางธรรมชาติมีความกระเด็นตัวสูงถึงร้อยละ 70 เมื่อไม่มีสารตัวเติม และจะมีค่าลดลงตามปริมาณสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้น ความกระเด็นตัวสูงของยางธรรมชาติ แสดงให้เห็นว่า ยางธรรมชาติไม่สะสมพลังงานไว้ในตัวเมื่อได้รับแรงกระทำ ทำให้ความร้อนสะสมในยางธรรมชาติน้อยกว่ายางอื่นๆ จึงเหมาะสมในการใช้ทำดอกยางรถบรรทุก ซึ่งมีความหนามาก ถ่ายเทความร้อนได้มาก นอกจากนี้มีความกระเด็นตัวสูงและฮิสเทอรีซิสต่ำของยางธรรมชาติ สามารถทำให้ลดลงได้โดยการใส่สารตัวเติม

5. การใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ

ยางธรรมชาติสามารถหักงอได้แม้อยู่ในสถานะอุณหภูมิต่ำ การใช้งานที่อุณหภูมิต่ำจะใช้ได้ในช่วงสั้นๆ แต่ถ้าเป็นเวลานาน เช่น มากกว่า 1-2 วัน จะเกิดผลึกขึ้น อัตราการเกิดผลึกจะสูงสุดที่อุณหภูมิ 26 °C การใส่น้ำมันลงในยางธรรมชาติ ทำให้สามารถใช้งานที่อุณหภูมิต่ำลงไปจากเดิมได้อีก

6. ความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพ

พันธะคู่ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาซึ่งทำให้เกิดการวัลคาไนซ์ได้อย่างรวดเร็วเมื่อใช้กำมะถัน เป็นจุดอ่อนที่ทำให้ออกซิเจนและโอโซนเข้าทำปฏิกิริยาได้ง่าย ทำใหยางธรรมชาติไม่เหมาะกับงานหลายชนิดที่ต้องการความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อุณหภูมิสูงและมีโอโซนอยู่ด้วย จึงมีการเติมสารแอนติออกซิแดนท์และสารตัวเร่งประเภทไฮดรอกซิลลงในยางธรรมชาติ และอบในระยะเวลาสั้นที่อุณหภูมิไม่สูงเกินไป

เพื่อให้ยางมีความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพดีขึ้น แต่ความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพของยางธรรมชาติก็ยังน้อยกว่ายางสังเคราะห์

7. ความทนทานต่อความร้อน

สภาวะการใช้งานยางธรรมชาติค่อนข้างจะจำกัด เพราะในสภาวะที่รุนแรง จะทำให้อายุการใช้งานของยางธรรมชาติสั้นลง ยางธรรมชาติไม่เหมาะกับการใช้งานที่อุณหภูมิสูงถึง 7°C เป็นระยะเวลานาน โดยเฉพาะยางบาง ซึ่งมีพื้นที่ที่ต้องสัมผัสกับบรรยากาศเป็นบริเวณกว้าง และยางธรรมชาติไม่เหมาะกับการใช้งานที่ต้องยึดภายในบรรยากาศที่มีโอโซนอยู่ จึงมีการใช้สารแอนติออกซิแดนท์และสารแอนติโอโซนแทนที่เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพของยางธรรมชาติในกรณีที่ต้องสัมผัสกับออกซิเจนและโอโซน และการทำให้ยางธรรมชาติทนทานต่อความร้อนดีขึ้นสามารถทำได้หลายวิธี เช่น เลือกระบบและวิธีการวัลคาไนซ์ ระบบสารตัวเติม และระบบแอนติออกซิแดนท์ หรืออาจใช้ทั้ง 3 วิธีพร้อมๆ กันได้ กล่าวคือ ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบอีวีหรือเปอร์ออกไซด์หรือยูรีเทน ทำใหยางมีความทนทานต่อความร้อนดีขึ้น รวมทั้งการวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิต่ำลง จะทำใหยางสุกน้อยลง และการใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติม จะทำใหยางทนทานต่อความร้อนได้มากขึ้นและการใช้แอนติออกซิแดนท์ผสมกัน จะทำใหยางธรรมชาติทนต่อความร้อนได้นานขึ้น

โดยแนวคิดการใช้น้ำยางคอมพาวนด์เป็นตัวเชื่อมประสานในดินนั้น สมบัติของวัสดุผสมที่เตรียมได้จึงขึ้นอยู่กับสมบัติของยางคอมพาวนด์เป็นสำคัญ และเนื่องจากการใช้ความร้อนระดับการอบเป็นการทำให้เกิดการคงรูปเพื่อเชื่อมโมเลกุลของยางให้เป็นโครงสร้างตาข่าย (ซึ่งไม่ใช่การเผาไหม้เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนเฟสของดิน) พันธะเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นจึงเป็นสิ่งที่กำหนดสมบัติในภาพรวมของวัสดุผสมที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ ดังนั้น การศึกษาผลกระทบของการปรับสูตรน้ำยางคอมพาวนด์ตามระบบการคงรูปยางด้วยกัมมะถันทั้งแบบปกติ แบบกึ่งประสิทธิภาพ และแบบประสิทธิภาพ จะทำใหได้ข้อมูลพื้นฐานสำหรับการตัดสินใจประยุกต์ใช้งานวัสดุผสมดังกล่าวต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

สารเคมีและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ชื่อสารเคมี	บริษัทผู้ผลิต	ประเทศ
ดินผสมสำเร็จรูป	บริษัท คอมพาวด์เคลย์ จำกัด	ไทย
พอลิเมอร์ธรรมชาติ (LK460)	บริษัท ลักกี้โพร จำกัด	ไทย
ดิสเพอร์ชันของกำมะถัน	-	-
ดิสเพอร์ชันของซิงก์ไดออกไซด์ ไคโทโอคาร์	-	-
บามัค		
ดิสเพอร์ชันของซิงก์ออกไซด์	-	-
โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์	Ajax Finchem Pty Ltd	นิวซีแลนด์
โซเดียมซัลเฟต	PanreacQuimica S.L.U.	สหภาพยุโรป
โทลูอิน	Merck	เยอรมัน

ตารางที่ 4 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือ-อุปกรณ์	บริษัทผู้ผลิตและรุ่น	ประเทศ
แม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์	-	-
เครื่องบดผสม	-	-
เครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง	Adam(PGW 4502E)	สหรัฐอเมริกา
ตู้อบลมร้อน	Memmert oven (UN30)	เยอรมัน
เครื่องทดสอบความแข็งแรงแบบแรงกระทำ 3 จุด	Lloyd (LRX 5K)	อังกฤษ
เครื่องทดสอบความทนแรงอัด	Matest (1500 KN 2 GAUGES)	อิตาลี
เครื่องทดสอบความทนการขัดถูลึก	Gabbrielli	อิตาลี
	(Deep Unglazed Abrasimetes)	

วิธีการทดลอง

การทำขั้นตอนทดสอบจะเตรียมขึ้นจากของผสมระหว่างน้ำดินผสมน้ำยางคอมพาวนด์ซึ่งกวนผสมให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน โดยลำดับขั้นตอนของการเตรียมส่วนผสม การเตรียมชิ้นงาน ตลอดจนการทดสอบ มีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

ตอนที่ 1 การเตรียมส่วนผสม

1.1 การเตรียมน้ำดิน

เตรียมจากดินผสมสำเร็จรูปผสมน้ำ ใช้โซเดียมซิลิเกต เป็นสารช่วยกระจายตัว บดผสมด้วยเครื่องบดมิลล์ เป็นเวลา 30 นาที และควบคุมให้มีค่าความถ่วงจำเพาะ 1.70 ± 0.01

1.2 การเตรียมน้ำยางคอมพาวนด์

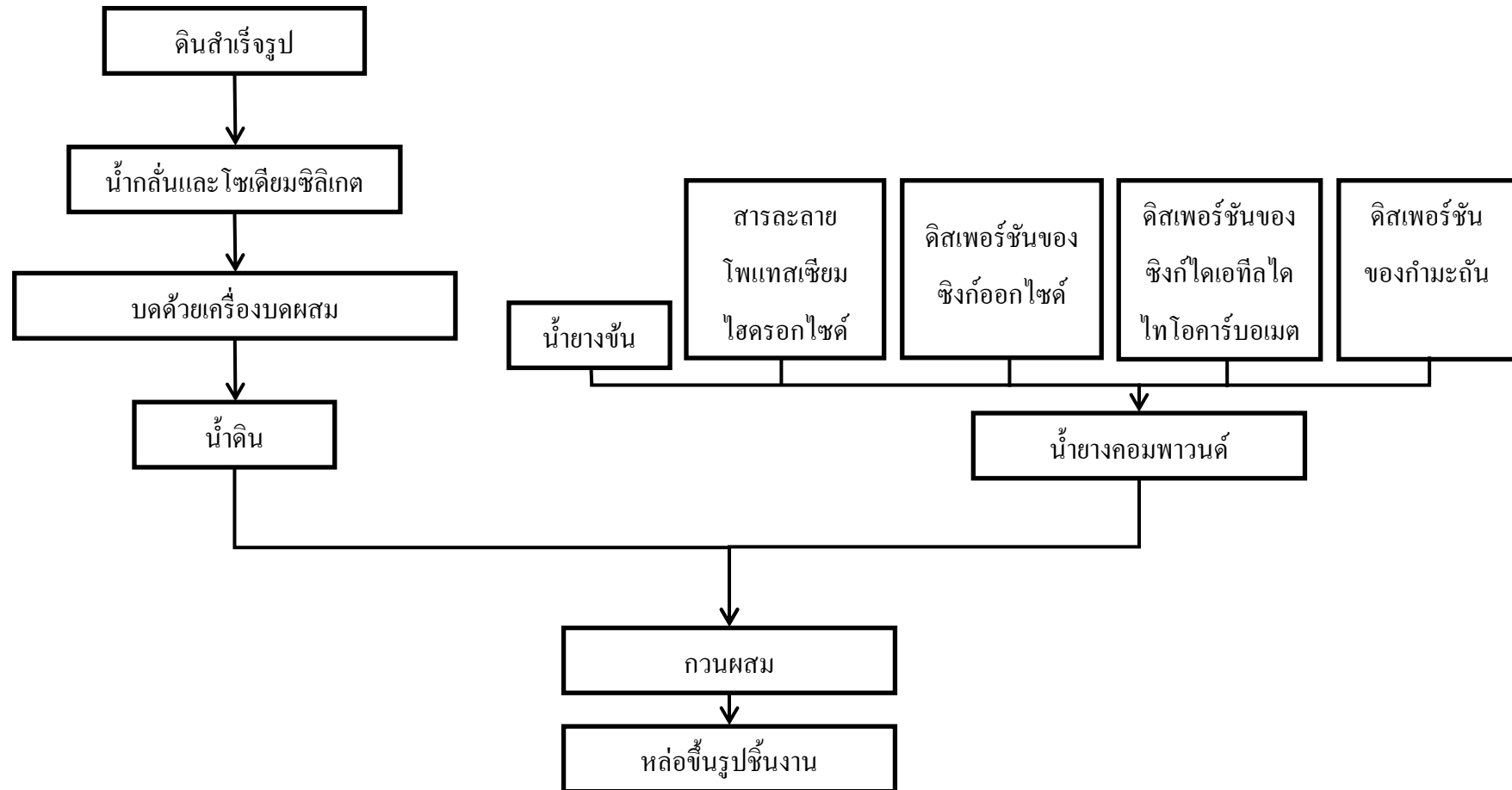
เตรียมได้จากการนำน้ำยางข้น ผสมกับสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ คิสเพอร์ชันของซิงก์ออกไซด์ คิสเพอร์ชันของซิงก์ไดเอทิลโคไทโอคาร์บาเมต และคิสเพอร์ชันของกำมะถัน ตามสัดส่วนแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 สูตรการเตรียมน้ำยางคอมพาวนด์ของระบบการคงรูปด้วยกำมะถัน

ยางและสารเคมี	น้ำหนักแห้ง (phr)		
	CV	SEV	EV
60% น้ำยางข้น	100	100	100
10% สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์	0.4	0.4	0.4
50% คิสเพอร์ชันของซิงก์ออกไซด์	1.5	1.5	1.5
50% คิสเพอร์ชันของซิงก์ไดเอทิลโคไทโอคาร์บาเมต	0.5-1.0	1.5-2.5	2.5-3.5
50% คิสเพอร์ชันของกำมะถัน	1.5 – 2.5	0.5 – 1.2	0 – 0.2

จากนั้นนำน้ำดินผสมกับน้ำยางคอมพาวนด์โดยใช้น้ำยางคอมพาวนด์ร้อยละ 9 โดยน้ำหนักของน้ำดิน และกวนให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกันนาน 10 นาที

สรุปขั้นตอนการเตรียมน้ำดินผสมน้ำยางคอมพาวนด์แสดงดังแผนภาพในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ขั้นตอนการเตรียมน้ำดินผสมน้ำยางคอมพาวนด์

ตอนที่ 2 การเตรียมชิ้นงานทดสอบความทนแรงดัดและการทดสอบแรงดัด

2.1 นำน้ำดินผสมกับน้ำยางคอมพาวนด์ร้อยละ 9 โดยใช้ระบบการคงรูปด้วยกัมมะดันแบบปกติ ระบบการคงรูปแบบกึ่งประสิทธิภาพ และระบบการคงรูปแบบประสิทธิภาพ ตามตารางที่ 5 หล่อในแม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์ ด้วยวิธีหล่อต้น ให้ชิ้นงานทดสอบเป็นรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตรและยาว 12 เซนติเมตร จากนั้นทิ้งชิ้นงานให้แห้งและอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

2.2 การทดสอบความทนแรงดัด

ในการทดสอบใช้เครื่อง Lloyd รุ่น LRX 5K มีขนาดน้ำหนักกด 5 กิโลนิวตัน การทดสอบใช้ระยะห่างระหว่างจุดรองรับชิ้นงานทดสอบ 8 เซนติเมตร ทำการบันทึกน้ำหนักกด และเส้นผ่านศูนย์กลางเพื่อนำไปคำนวณค่าความทนแรงดัด โดยใช้สมการที่ 1 จากนั้นวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ โดยใช้สมการที่ 2

$$\square = \frac{8FL}{D^3} \quad (1)$$

- เมื่อ ☐ คือ ค่าความทนแรงดัด
- ☐ คือ แรงกระทำที่ทำให้ชิ้นทดสอบหัก
- ☐ คือ ความยาวของแท่งชิ้นทดสอบ
- ☐ คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นทดสอบ

$$F = 1 - \exp \left[-V \left(\frac{\sigma - \sigma_0}{\sigma_0} \right)^m \right] \quad (2)$$

- เมื่อ ☐ คือ โอกาสการแตกหัก
- ☐ คือ ปริมาตรที่รับความเค้น ($V=1$)
- σ คือ ค่าความทนแรงดัด
- ☐ คือ ค่าความทนแรงดัดโอกาสแตกหักเป็นศูนย์ ($\square = 0$)
- ☐ คือ ค่าความทนแรงดัดที่โอกาสแตกหักเท่ากับร้อยละ 63
- ☐ คือ ค่าคงที่แสดงการกระจายตัวของข้อมูล (Weibull modulus)

ตอนที่ 3 การเตรียมชิ้นงานทดสอบความทนแรงอัดและการทดสอบแรงอัด

3.1 นำน้ำดินผสมน้ำยางคอมพาวนด์ร้อยละ 9 โดยใช้ระบบการคงรูปด้วยกัมมันต์แบบปกติ ระบบการคงรูปแบบกึ่งประสิทธิภาพ และระบบการคงรูปแบบประสิทธิภาพ ตามตารางที่ 5 หล่อลงในแม่พิมพ์สแตนเลส ด้วยวิธีหล่อต้น ให้ชิ้นงานทดสอบมีขนาด $4 \times 6.5 \times 14$ เซนติเมตร ตามมาตรฐาน มอก.77-2545 อิฐก่อสร้างสามัญจากนั้นทิ้งชิ้นทดสอบให้แห้งแล้วอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

3.2 การทดสอบความทนแรงอัด

ทดสอบความทนแรงอัด ตามมาตรฐาน มอก. 77-2545 อิฐก่อสร้างสามัญโดยชิ้นทดสอบจะต้องมีผิวหน้าชิ้นงานเรียบ นำเข้าเครื่องทดสอบความทนแรงอัดโดยใช้ไม้อัดหนาประมาณ 4 มิลลิเมตร รองชิ้นทดสอบไว้ทั้งข้างบนและข้างล่าง และเพิ่มอัตราแรงอัด 14 เมกะนิวตันต่อตารางเมตร ในระยะเวลา 1 นาที หรือจนชิ้นทดสอบพังทลาย ทำการบันทึกน้ำหนักกดและพื้นที่รับแรง เพื่อนำไปคำนวณหาค่าความทนแรงอัด โดยใช้สมการที่ 3

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3)$$

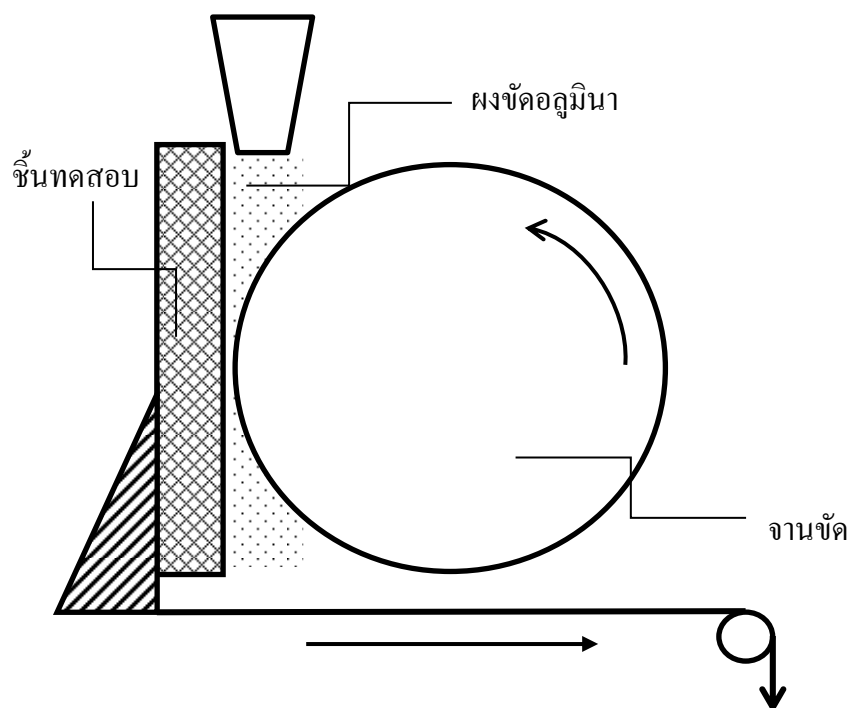
- เมื่อ σ คือ ค่าความทนแรงอัด
- ☐ คือ แรงกระทำที่ทำให้ชิ้นทดสอบหัก
- ☐ คือ พื้นที่บริเวณรับแรง

ตอนที่ 4 การเตรียมชิ้นงานทดสอบความทนการขัดถูและการทดสอบการขัดถู

4.1 นำน้ำดินผสมน้ำยางคอมพาวนด์ร้อยละ 9 โดยใช้ระบบการคงรูปด้วยกัมมันต์แบบปกติ ระบบการคงรูปแบบกึ่งประสิทธิภาพและระบบการคงรูปแบบประสิทธิภาพ ตามตารางที่ 5 หล่อลงในแม่พิมพ์สแตนเลส ด้วยวิธีหล่อต้น ให้ชิ้นงานทดสอบมีขนาด $10 \times 10 \times 2$ เซนติเมตร จากนั้นทิ้งชิ้นทดสอบให้แห้งและอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

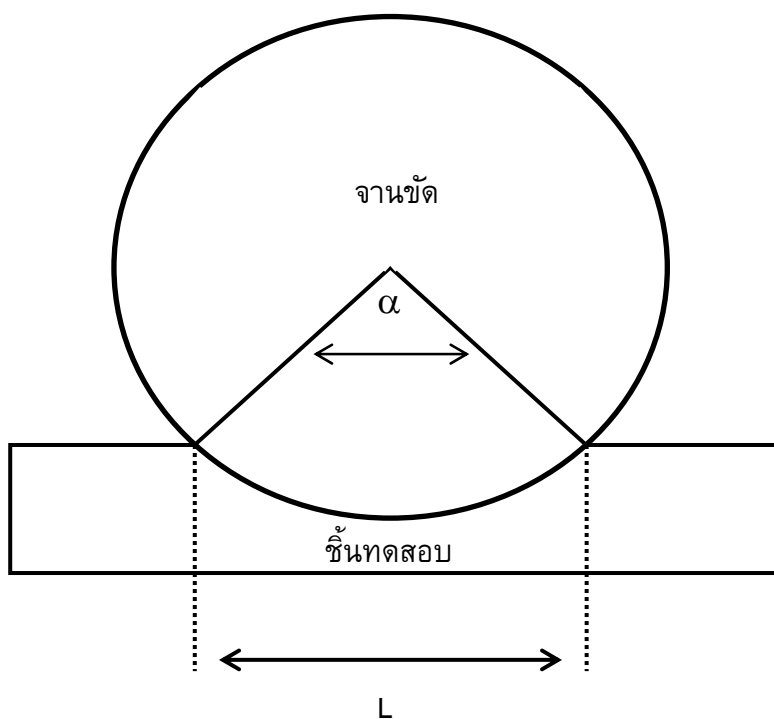
4.2 การทดสอบความทนการขัดถู

ทดสอบความทนการขัดถูตามมาตรฐาน มอก. 2398 เล่มที่ 6-2551 วิธีหาความทนการขัดถูสำหรับกระเบื้องชนิดไม่เคลือบ โดยติดชิ้นทดสอบเข้าเครื่องทดสอบ ดังภาพที่ 4 โดยให้ชิ้นทดสอบสัมผัสตั้งฉากกับจานขัดขณะหมุน และใส่ผงขัดอลูมินาสีขาว ลงไปบริเวณที่มีการขัดด้วยอัตราเร็ว 100 ± 10 กรัมต่อ 100 รอบ หมุนจานขัดจำนวน 150 รอบ จากนั้นนำชิ้นทดสอบออก



ภาพที่ 4 การทำงานของเครื่องมือทดสอบความทนการขัดถู [10]

วัดความยาวของรอยสึก ดังภาพที่ 5 เพื่อนำไปคำนวณปริมาตรที่ถูกขัดออก โดยใช้สมการที่ 4 และสมการที่ 5



ภาพที่ 5 การวัดความยาวของรอยสึก (L) และมุม (α) [10]

$$V = \left(\frac{\pi\alpha}{180} - \sin \alpha \right) \frac{hd^2}{8} \quad (4)$$

โดยที่

$$\sin (0.5\alpha) = \frac{L}{d} \quad (5)$$

- เมื่อ α คือ มุมที่วัดได้จากจุดศูนย์กลางของจานขีด ทำมุมกับรอยลึก
- ☐ คือ ความหนาของจานขีด
- ☐ คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของจานขีด
- ☐ คือ ความยาวของรอยลึก

ความสัมพันธ์ของความยาวรอยลึก ☐ และปริมาตรที่ถูกขีดออก ☐ ที่คำนวณแล้วแสดงสรุปในตาราง

ที่ 6

ตารางที่ 6 ความสัมพันธ์ของความยาวรอยลึก $\square$ และปริมาตรของตัวอย่างชิ้นงานที่ถูกกัดออก $\square$

$\square$ (mm)	$\square$ (mm ³)	$\square$ (mm)	$\square$ (mm ³)	$\square$ (mm)	$\square$ (mm ³)	$\square$ (mm)	$\square$ (mm ³)	$\square$ (mm)	$\square$ (mm ³)
20	67	30	227	40	540	50	1062	60	1851
20.5	72	30.5	238	40.5	561	50.5	1094	60.5	1899
21	77	31	250	41	582	51	1128	61	1947
21.5	83	31.5	262	41.5	603	51.5	1162	61.5	1996
22	89	32	275	42	626	52	1196	62	2046
22.5	95	32.5	288	42.5	649	52.5	1232	62.5	2097
23	102	33	302	43	672	53	1268	63	2149
23.5	109	33.5	316	43.5	696	53.5	1305	63.5	2202
24	116	34	330	44	720	54	1342	64	2256
24.5	123	34.5	345	44.5	746	54.5	1380	64.5	2310
25	131	35	361	45	771	55	1419	65	2365
25.5	139	35.5	376	45.5	798	55.5	1459	65.5	2422
26	147	36	393	46	824	56	1499	66	2479
26.5	156	36.5	409	46.5	852	56.5	1541	66.5	2537
27	165	37	427	47	880	57	1583	67	2596
27.5	174	37.5	444	47.5	909	57.5	1625	67.5	2656
28	184	38	462	48	938	58	1689	68	2717
28.5	194	38.5	481	48.5	968	58.5	1713	68.5	2779
29	205	39	500	49	999	59	1758	69	2842
29.5	215	39.5	520	49.5	1030	59.5	1804	69.5	2906

ตอนที่ 5 การเตรียมชิ้นงานทดสอบการบวมพองของน้ำยางคอมพาวนด์

5.1 เตรียมน้ำยางคอมพาวนด์ระบบการคงรูปด้วยกำมะถันแบบปกติ แบบกึ่งประสิทธิภาพ และแบบประสิทธิภาพ ตามตารางที่ 5 หล่อลงในแม่พิมพ์พิมพ์สแตนเลส หรือกระจกเพื่อให้ชิ้นงานมีลักษณะเป็นฟิล์มบาง ทิ้งชิ้นทดสอบให้แห้ง และอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นตัดชิ้นงานให้มีขนาด 1×1 เซนติเมตร แล้วชั่งน้ำหนักชิ้นทดสอบ ($\square$)

5.2 การทดสอบการบวมพอง [11]

ในการทดสอบนี้ เป็นการทดสอบหาเปอร์เซ็นต์การบวมพอง โดยนำชิ้นทดสอบแช่ในโทลูอีน เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำขึ้นมาชั่งน้ำหนัก ($\square$) ทำเช่นนี้ จนกระทั่งเปอร์เซ็นต์การบวมพองคงที่และคำนวณเปอร์เซ็นต์การบวมพองตามสมการที่ 6

$$\% \text{ Swelling} = \left(\frac{W - W_0}{W_0} \right) \times 100 \quad (6)$$

เมื่อ $\square$ คือ น้ำหนักของชิ้นทดสอบก่อนแช่โทลูอีน
 $\square$ คือ น้ำหนักของชิ้นทดสอบหลังแช่โทลูอีน

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการวิจัย

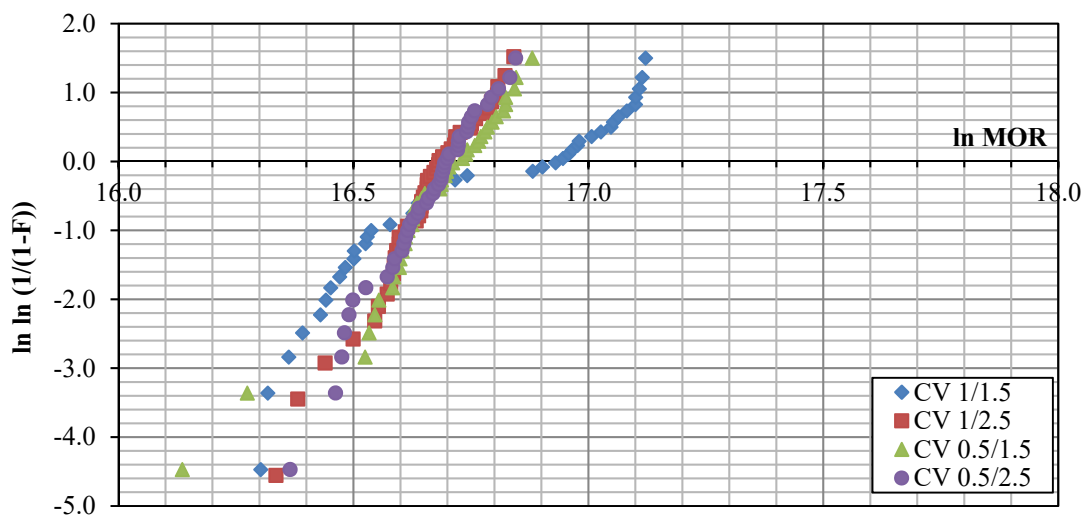
ตอนที่ 1 ผลการทดสอบความทนแรงดัด

ผลการทดสอบความทนแรงดัดของตัวอย่างที่ใช้ น้ำยางคอมพาวนด์ร้อยละ 9

จากการนำชิ้นงานทดสอบซึ่งเตรียมจากน้ำดินผสมน้ำยางคอมพาวนด์ร้อยละ 9 โดยน้ำหนักของน้ำดินจำนวน 10 สูตร แบ่งเป็นระบบกำมะถันปกติ (CV) 4 สูตร ระบบกึ่งประสิทธิภาพ (SEV) 4 สูตร และระบบประสิทธิภาพ 2 สูตร อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ไปทดสอบความทนแรงดัดโดยใช้การทดสอบแบบแรงกระทำสามจุด แต่ละสูตรกำหนดใช้จำนวนชิ้นงานทดสอบไม่ต่ำกว่า 20 ตัวอย่าง เพื่อใช้ในการทำสถิติการแจกแจงข้อมูลแบบไวบูลล์ ผลการทดสอบความทนแรงดัด ได้ข้อมูลดังต่อไปนี้ คือ น้ำหนักกด และ ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานบริเวณที่แตกหัก เพื่อกำหนดหาค่าความทนแรงดัดของชิ้นงานทดสอบโดยใช้สมการที่ (1) ซึ่งได้สรุปข้อมูลแสดงในภาคผนวก ก (ตารางที่ ก.1 ถึง ก.10)

เมื่อทำการกำหนดหาค่าความทนแรงดัดของชิ้นงานในแต่ละสูตรแล้ว จัดเรียงลำดับข้อมูลใหม่ของค่าความทนแรงดัดน้อยสุดไปหาค่าความทนแรงดัดมากที่สุด ลำดับที่ $i=1$ จนถึง $i=n$ คำนวณค่า $\square\square\square\left(\frac{1}{1-\square}\right)$ และ

□□□ ผลการทดสอบสำหรับระบบก้ำมะถันปกติ (CV) ระบบกึ่งประสิทธิภาพ (SEV) และระบบประสิทธิภาพ (EV) แสดงด้วยกราฟการกระจายแบบไวบูลล์ในภาพที่ 6 - 8 ตามลำดับ



ภาพที่ 6 Weibull plot สำหรับระบบก้ำมะถันปกติ (CV)

จากภาพที่ 6 แสดงข้อมูลดังต่อไปนี้

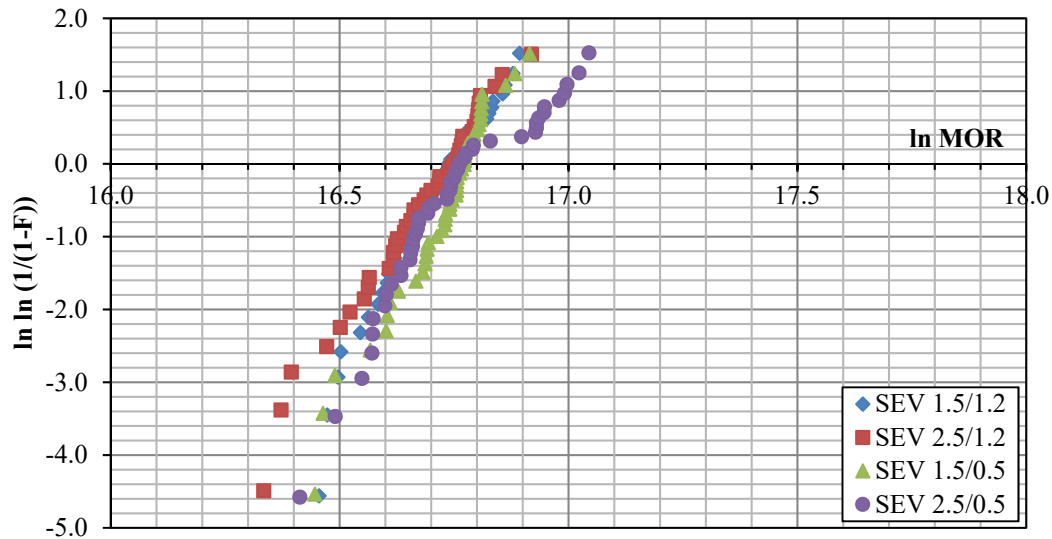
สูตร CV 1/1.5 แสดงค่าความทนแรงค้ำ (□□) 21.33 เมกกะปาสกาล ค่าคงที่การกระจายข้อมูล (Weibull modulus, □) เท่ากับ 4

สูตร CV 1/2.5 แสดงค่าความทนแรงค้ำ (□□) 18.06 เมกกะปาสกาล ค่าคงที่การกระจายข้อมูล (Weibull modulus, □) เท่ากับ 12

สูตร CV 0.5/1.5 แสดงค่าความทนแรงค้ำ (□□) 18.36 เมกกะปาสกาล ค่าคงที่การกระจายข้อมูล (Weibull modulus, □) เท่ากับ 9

สูตร CV 0.5/2.5 แสดงค่าความทนแรงค้ำ (□□) 18.06 เมกกะปาสกาล ค่าคงที่การกระจายข้อมูล (Weibull modulus, □) เท่ากับ 12

เนื่องจากค่าคงที่การกระจายข้อมูลเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความผันแปรของข้อมูล ค่าคงที่การกระจายข้อมูลที่ต่ำ (เช่น สูตร CV 1/1.5 ที่มี □ = 4 หรือ สูตร CV 0.5/1.5 ที่มี □ = 9) หมายถึงข้อมูลชุดนั้นๆ มีความแตกต่างระหว่างค่าข้อมูลสูงสุดและข้อมูลต่ำสุดมาก เมื่อเทียบกับข้อมูลที่มีค่าคงที่การกระจายตัวสูงกว่า (เช่น สูตร CV 1/2.5 ที่มี □ = 12 หรือ สูตร CV 0.5/2.5 ที่มี □ = 12)



ภาพที่ 7 Weibull plot สำหรับระบบกึ่งประสิทธิภาพ (SEV)

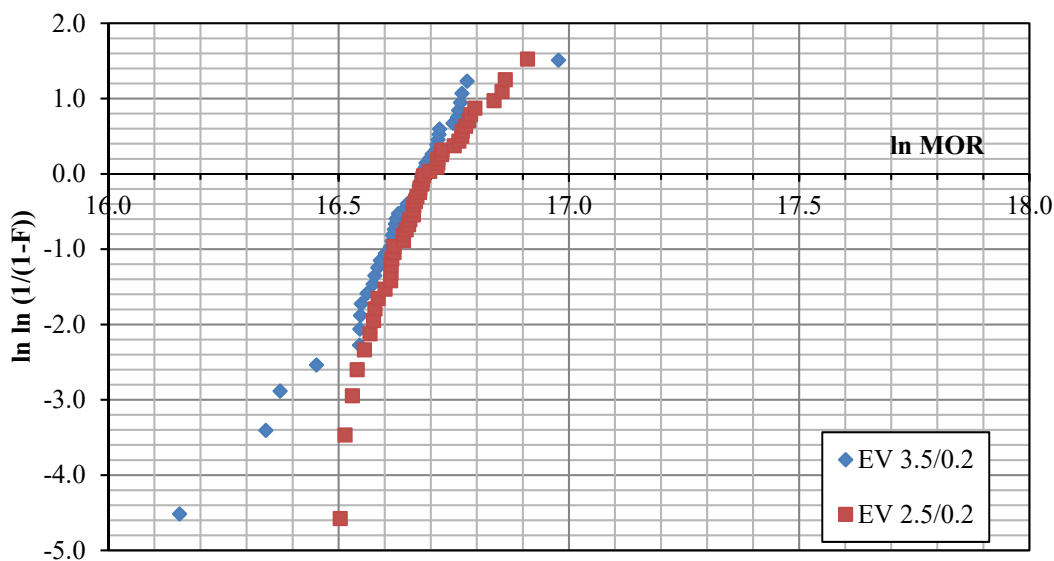
จากภาพที่ 7 แสดงข้อมูลดังต่อไปนี้

สูตร SEV 1.5/1.2 แสดงค่าความทนแรงดัด (σ_{SEV}) 18.77 เมกกะปาสกาล ค่าคงที่การกระจายข้อมูล (Weibull modulus, m) เท่ากับ 11

สูตร SEV 2.5/1.2 แสดงค่าความทนแรงดัด (σ_{SEV}) 18.64 เมกกะปาสกาล ค่าคงที่การกระจายข้อมูล (Weibull modulus, m) เท่ากับ 10

สูตร SEV 1.5/0.5 แสดงค่าความทนแรงดัด (σ_{SEV}) 19.35 เมกกะปาสกาล ค่าคงที่การกระจายข้อมูล (Weibull modulus, m) เท่ากับ 12

สูตร SEV 2.5/0.5 แสดงค่าความทนแรงดัด (σ_{SEV}) 20.15 เมกกะปาสกาล ค่าคงที่การกระจายข้อมูล (Weibull modulus, m) เท่ากับ 8



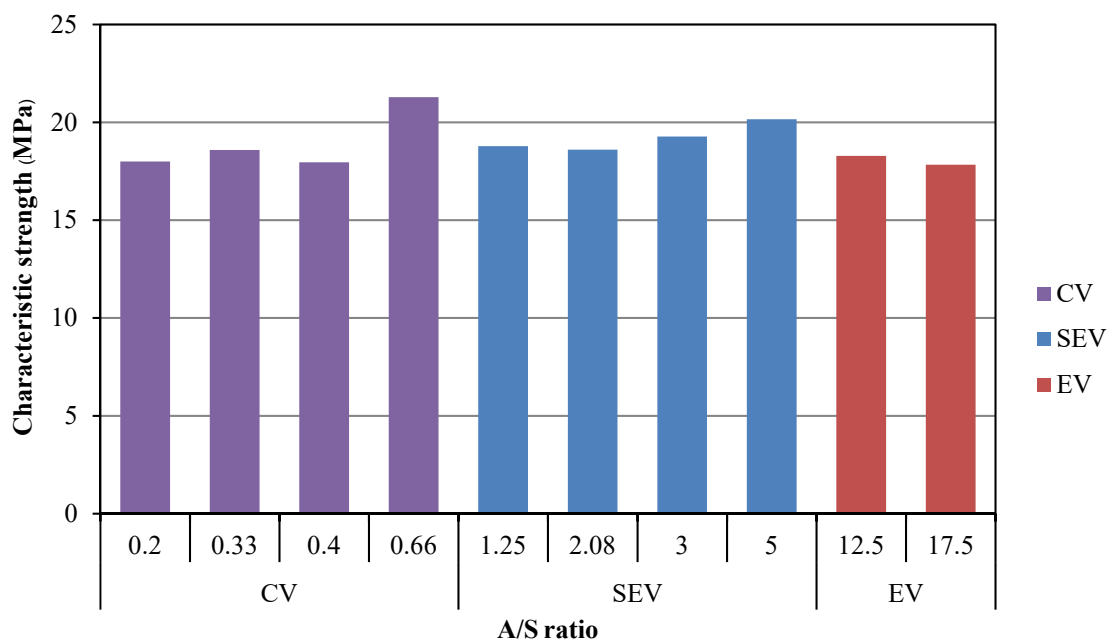
ภาพที่ 8 Weibull plot สำหรับระบบประสิทธิภาพ (EV)

จากภาพที่ 8 แสดงข้อมูลดังต่อไปนี้

สูตร EV 3.5/0.2 แสดงค่าความทนแรงดัด (σ_b) 17.77 เมกกะปาสคาล ค่าคงที่การกระจายข้อมูล (Weibull modulus, m) เท่ากับ 9

สูตร EV 2.5/0.2 แสดงค่าความทนแรงดัด (σ_b) 18.38 เมกกะปาสคาล ค่าคงที่การกระจายข้อมูล (Weibull modulus, m) เท่ากับ 13

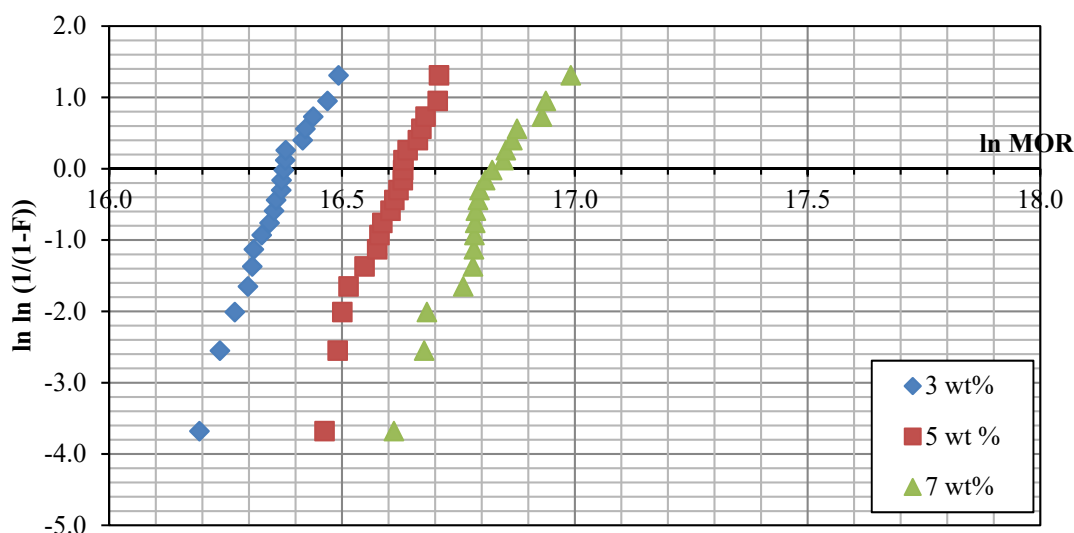
ภาพที่ 9 แสดงผลของอัตราส่วนระหว่างสารตัวเร่งต่อกำมะถัน ที่มีต่อค่าความทนแรงดัดของตัวอย่างแต่ละระบบซึ่งอบที่อุณหภูมิคงที่ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ซึ่งพบว่า ค่าความทนแรงดัด (σ_b) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่าอัตราส่วนระหว่างสารตัวเร่งต่อกำมะถัน ยกเว้นในระบบประสิทธิภาพ (EV) ที่ค่าความทนแรงดัด (σ_b) มีแนวโน้มลดลง โดยในระบบกำมะถันปกติ (CV) ที่อัตราส่วนสารตัวเร่งต่อกำมะถันเท่ากับ 0.66 จะให้ค่าความทนแรงดัด (σ_b) สูงสุดเป็น 21.33 เมกกะปาสคาล ระบบกึ่งประสิทธิภาพ (SEV) ที่อัตราส่วนสารตัวเร่งต่อกำมะถันเท่ากับ 5 จะให้ค่าความทนแรงดัด (σ_b) สูงสุดเป็น 20.04 เมกกะปาสคาล



ภาพที่ 9 การเปรียบเทียบค่าความทนแรงดัดเทียบกับอัตราส่วนระหว่างสารตัวเร่งต่อกำมะถัน

ผลการทดสอบความทนแรงดัดของตัวอย่าง สูตร CV 1/1.5 ที่ใช้น้ำยางคอมพาวนด์ร้อยละ 3-7

จากการนำชิ้นงานทดสอบระบบกำมะถันปกติ (CV 1/1.5) ซึ่งเตรียมจากน้ำดินผสมน้ำยางคอมพาวนด์ร้อยละ 3 – 7 โดยน้ำหนักของน้ำดิน อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ทดสอบความทนแรงดัดโดยใช้การทดสอบแบบแรงกระทำสามจุด ผลการทดสอบความทนแรงดัด ได้ข้อมูล น้ำหนักกด และขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานบริเวณที่แตกหัก เพื่อกำหนดหาความทนแรงดัดของชิ้นงานทดสอบสรุปข้อมูลแสดงในภาคผนวก ข (ตารางที่ ข.1 ถึง ข.3) ผลการทดสอบแสดงด้วยกราฟการกระจายแบบไวบูลล์ในภาพที่ 10



ภาพที่ 10 Weibull plot สำหรับระบบก้ำมะถันปกติ (CV 1/1.5) ที่ใช้ปริมาณน้ำยางคอมพาวนด์ร้อยละ 3 – 7

จากภาพที่ 10 แสดงข้อมูลดังต่อไปนี้

สูตร CV 1/1.5 ที่ผสมน้ำยางคอมพาวนด์ร้อยละ 3 แสดงค่าความทนแรงดัด ($\square$) 13.13 เมกะปาสคาล
ค่าคงที่การกระจายข้อมูล (Weibull modulus, $\square$) เท่ากับ 16

สูตร CV 1/1.5 ที่ผสมน้ำยางคอมพาวนด์ร้อยละ 5 แสดงค่าความทนแรงดัด ($\square$) 16.75 เมกะปาสคาล
ค่าคงที่การกระจายข้อมูล (Weibull modulus, $\square$) เท่ากับ 17

สูตร CV 1/1.5 ที่ผสมน้ำยางคอมพาวนด์ร้อยละ 7 แสดงค่าความทนแรงดัด ($\square$) 20.93 เมกะปาสคาล
ค่าคงที่การกระจายข้อมูล (Weibull modulus, $\square$) เท่ากับ 13

โดยเมื่อเทียบกับสูตร CV 1/1.5 ที่ผสมน้ำยางคอมพาวนด์ร้อยละ 9 ซึ่งมีค่าความทนแรงดัด ($\square$) 21.33 เมกะปาสคาล สามารถระบุได้ว่า ปริมาณน้ำยางคอมพาวนด์ที่เหมาะสมสำหรับการใช้เป็นสารเชื่อมประสานคือร้อยละ 9 โดยน้ำหนัก

ตอนที่ 2 ผลการทดสอบความทนแรงอัด

ผลการทดลองการทดสอบความทนแรงอัดของชิ้นงานดินผสมน้ำยางคอมพาวนด์ร้อยละ 9 อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมงจำนวน 10 สูตร แสดงข้อมูลในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ค่าความทนแรงอัดของชิ้นงานดินผสมน้ำยางคอมพาวนด์ จำนวน 10 สูตร

สูตร	A/S	แรงที่ใช้กด (kN)	พื้นที่ (mm ²)	σ (MPa)	ค่าเฉลี่ย $\pm$ SD.
CV 0.5 : 2.5	0.2	118	7366	16.02	18.56 $\pm$ 2.26
		150	7308	20.53	
		138	7434	18.56	
CV 0.5 : 1.5	0.33	166	7366	22.54	21.38 $\pm$ 1.74
		172	7740	22.22	
		144	7434	19.37	
CV 1 : 2.5	0.4	171	7366	23.21	23.61 $\pm$ 1.26
		186	7434	25.02	
		172	7611	22.60	
CV 1 : 1.5	0.66	170	7366	23.08	22.97 $\pm$ 0.85
		164	7434	22.06	
		178	7493	23.76	
SEV 1.5 : 1.2	1.25	180	7434	24.21	24.35 $\pm$ 0.13
		182	7434	24.48	
		178	7308	24.36	
SEV 2.5 : 1.2	2.08	168	7375	22.78	18.95 $\pm$ 2.12
		164	7308	22.44	
		142	7493	18.95	
SEV 1.5 : 0.5	3	150	7434	20.18	19.98 $\pm$ 2.10
		162	7375	21.97	
		130	7308	17.79	

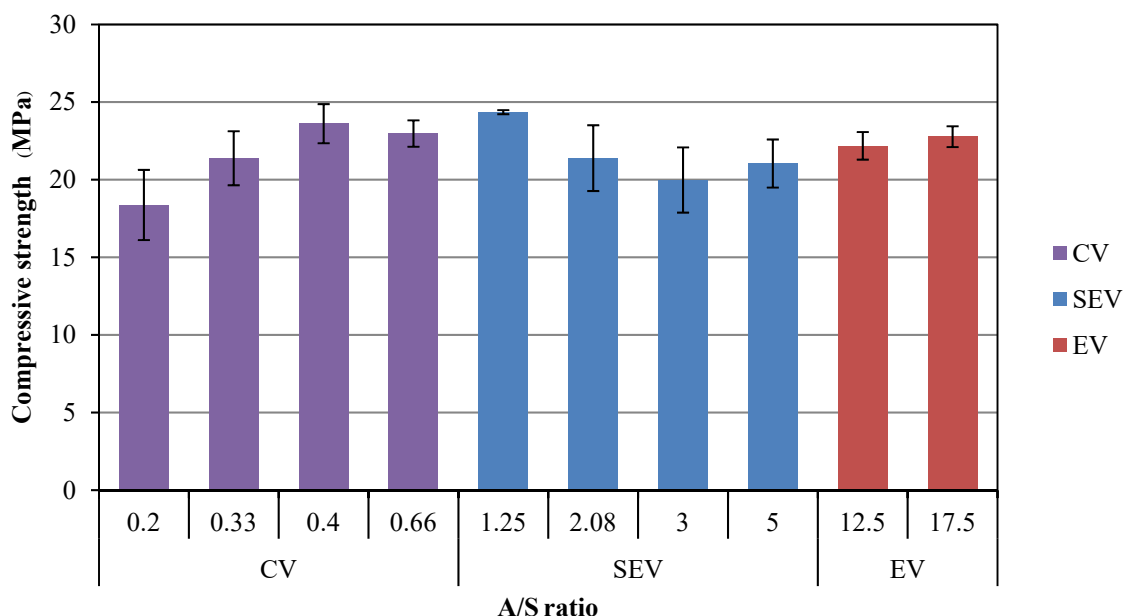
ตารางที่ 7 แสดงค่าความทนแรงอัดชิ้นงานดินผสมน้ำยางคอมพาวนด์ จำนวน 10 สูตร (ต่อ)

สูตร	A/S	แรงที่ใช้กด (kN)	พื้นที่ (mm ²)	σ (MPa)	ค่าเฉลี่ย $\pm$ SD.
SEV 2.5 : 0.5	5	168	7493	22.42	21.04 $\pm$ 1.55
		144	7434	19.37	
		160	7500	21.33	
EV 2.5 : 0.2	12.5	168	7434	22.60	22.18 $\pm$ 0.89
		160	7560	21.16	
		168	7375	22.78	
EV 3.5 : 0.2	17.5	172	7308	23.54	22.77 $\pm$ 0.67
		164	7308	22.44	
		166	7434	22.33	

จากภาพที่ 11 ในการวัดค่าในซียงด้วยกัมมะถันแบบปกติ (CV) เมื่ออัตราส่วน A/S เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ค่าความทนแรงอัดมีค่าเพิ่มมากขึ้น แต่เมื่ออัตราส่วน A/S มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0.4 ค่าความทนแรงอัดคงที่ดังเช่นอัตราส่วน A/S เท่ากับ 0.2 และ 0.4 มีการเปลี่ยนแปลงของค่าความทนแรงอัดเพิ่มมากขึ้นจาก 18.37 เมกะปาสกาล เป็น 23.61 เมกะปาสกาล ตามลำดับแต่ในช่วงอัตราส่วน A/S เท่ากับ 0.33 และ 0.66 ส่งผลให้ค่าความทนแรงอัดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ให้ค่า 21.38 และ 22.97 เมกะปาสกาล ตามลำดับ

สำหรับการวัดค่าในซียงด้วยระบบการคงรูปแบบถึงประสิทธิภาพ (SEV) เมื่ออัตราส่วน A/S เพิ่มค่าความทนแรงอัดลดลงและค่อนข้างคงที่ดังเช่นในอัตราส่วน A/S เท่ากับ 1.25 และ 2.08 มีค่าความทนแรงอัด 24.35 และ 21.39 เมกะปาสกาล ตามลำดับ แต่เมื่ออัตราส่วน A/S เท่ากับ 3 หรือมากกว่า จะมีค่าความทนแรงอัดค่อนข้างคงที่

สำหรับการวัดค่าในซียงด้วยระบบการคงรูปแบบประสิทธิภาพ (EV) ในอัตราส่วน A/S 12.5 และ 17.5 มีค่าความทนแรงอัดไม่แตกต่างกันโดยมีค่าเท่ากับ 22.15 และ 22.77 เมกะปาสกาล ตามลำดับ

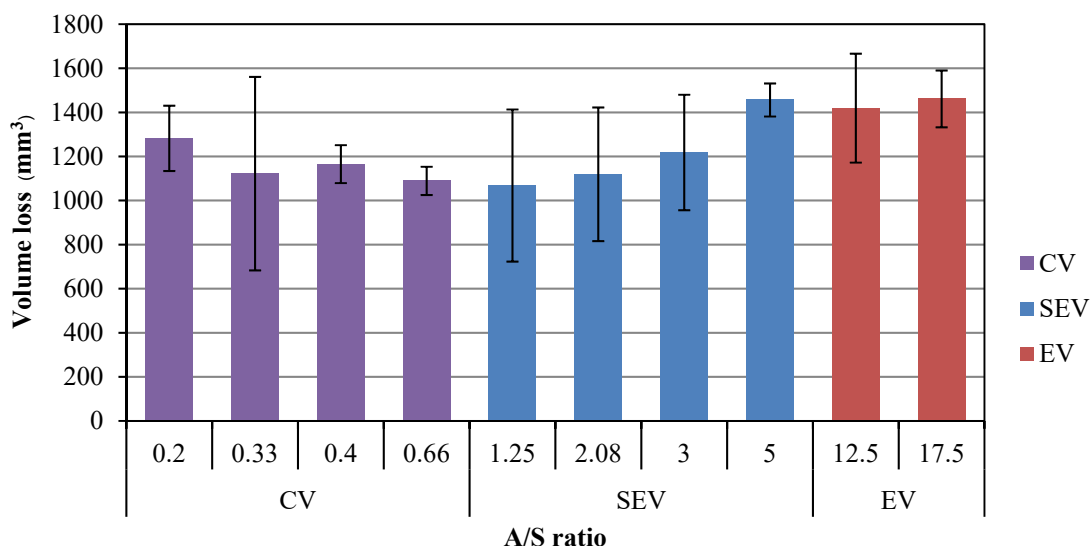


ภาพที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนแรงอัดกับอัตราส่วนปริมาตรสารตัวเร่งปฏิกิริยาต่อ ปริมาณกำมะถัน

ทั้งนี้จากข้อมูลข้างต้น พบว่าค่าความทนแรงอัด ของตัวอย่างในการทดลองนี้ มีค่าที่สูงกว่าข้อกำหนดของอิฐก่อสร้าง ตามมาตรฐาน มอก. 77- 2545 เรืองอิฐก่อสร้างสามัญ ซึ่งได้กำหนดไว้ว่า อิฐก่อสร้างควรมีค่าความทนแรงอัดต่อก้อนไม่ต่ำกว่า 17 เมกะปาสกาล และเมื่อเปรียบเทียบกับงานของ Kumar S. [12] ซึ่งได้ผลิตอิฐและ อิฐกลวงโดยใช้ ฟอสโฟอิมพซัม แก้วลอย และปูนขาว โดยใช้ปูนซีเมนต์เป็นตัวประสาน โดยมีค่าความทนแรงอัดสูงสุดเป็น 7.27 เมกะปาสกาล ดังนั้นผลการทดลองยืนยันว่าตัวอย่างที่เตรียมจากดินผสมน้ำยางคอมพาวนด์ อบที่ 150 องศาเซลเซียส นาน 12 ชั่วโมง ให้ค่าความทนแรงอัดที่สูงกว่ามาก

ตอนที่ 3 ผลการทดสอบความทนการขัดถู

การทดสอบความทนการขัดถู ทดสอบตามรายละเอียดในวิธีการทดสอบ มอก. 2398 โดยใช้ตัวอย่างทดสอบสูตรละ ไม่ต่ำกว่า 3 ชิ้น ขึ้นรูปโดยการหล่อตันเป็นชิ้นงานขนาด 10 x 10 x 1 เซนติเมตร อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ได้ผลข้อมูลดังแสดงในภาคผนวก ค (ตารางที่ ค.1) ทั้งนี้กราฟการเปรียบเทียบปริมาตรของชิ้นงานที่ถูกขัดออกของตัวอย่างแต่ละสูตร แสดงในภาพที่ 12



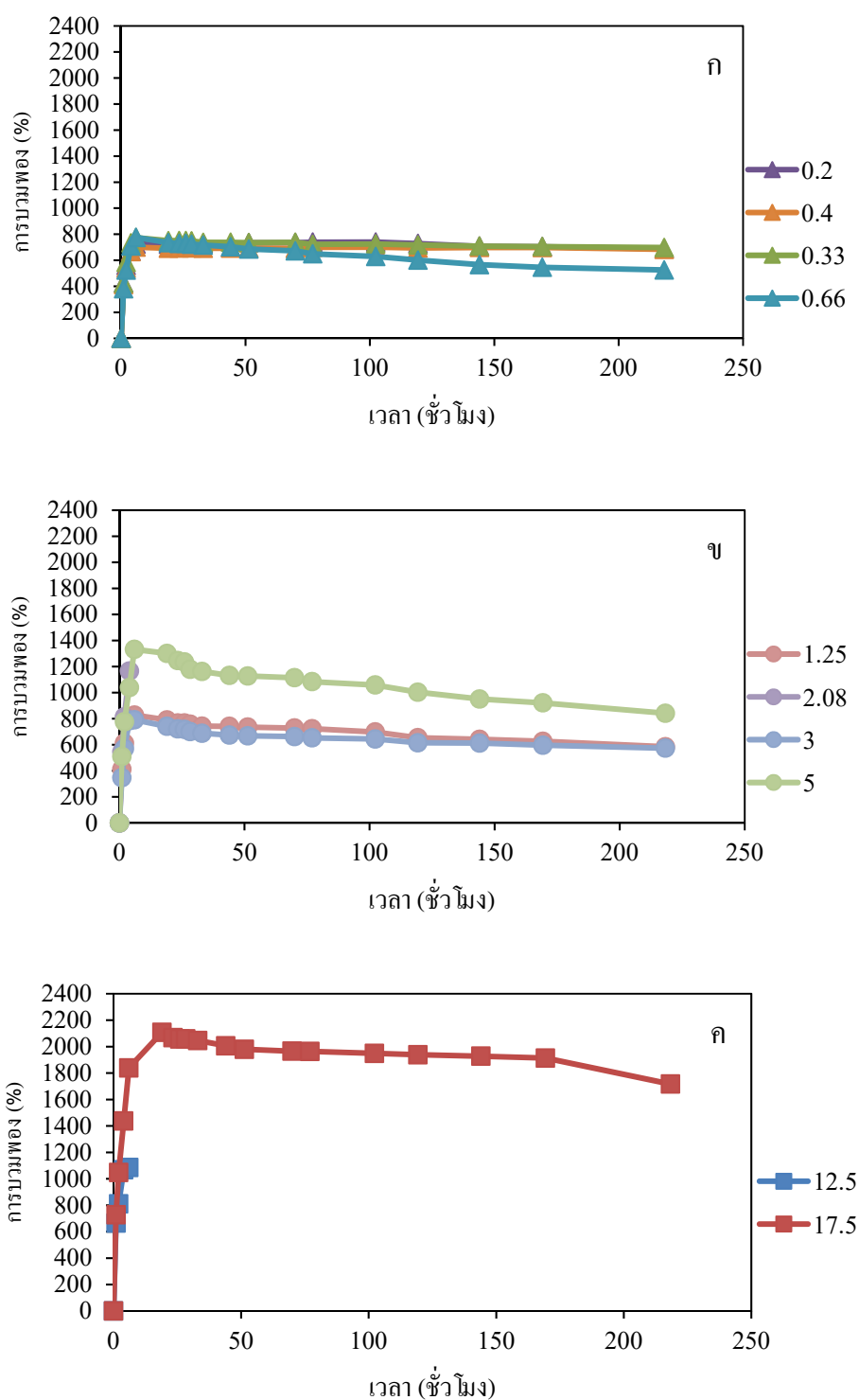
ภาพที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของชิ้นงานที่ถูกขัดออกของแต่ละตัวอย่างกับอัตราส่วน ปริมาณสารตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาณกำมะถัน

จากภาพที่ 12 สำหรับชิ้นงานทดสอบที่มีการใช้น้ำยาคอมพาวนด์ร้อยละ 9 อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ผลปรากฏแนวโน้มที่ชัดเจนสำหรับ ระบบกำมะถันปกติ (CV) 4 สูตร คือ ปริมาตรของชิ้นงานที่ถูกขัดออกมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนระหว่างสารตัวเร่งปฏิกิริยาและกำมะถันเพิ่มขึ้น ขณะที่ สำหรับระบบกึ่งประสิทธิภาพ (SEV) 4 สูตร ปริมาตรของชิ้นงานที่ถูกขัดออกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนระหว่าง สารตัวเร่งปฏิกิริยาและกำมะถันเพิ่มขึ้น สำหรับระบบประสิทธิภาพ 2 สูตร ปริมาตรของชิ้นงานที่ถูกขัดออกไม่ ต่างกันมากนัก อย่างไรก็ตามในภาพรวมแล้วผลการทดลองค่อนข้างไม่คงที่สำหรับทุกสูตร ยกเว้นกรณีระบบ กำมะถันปกติ สูตร CV 1/1.5 ซึ่งมีอัตราส่วนระหว่างสารตัวเร่งปฏิกิริยาและกำมะถันเป็น 0.66 และกรณีระบบ ประสิทธิภาพ สูตร SEV 2.5/0.5 ซึ่งมีอัตราส่วนระหว่างสารตัวเร่งปฏิกิริยาและกำมะถันเป็น 5 เท่านั้นที่แสดง ความคลาดเคลื่อนต่ำ อย่างไรก็ตามการใช้ระบบกำมะถันปกติ สูตร CV 1/1.5 นั้น น้ำยาคอมพาวนด์ที่ผสมลง ในระบบทำหน้าที่เสมือนเป็นตัวเชื่อมประสานระหว่างอนุภาคดินโดยแทรกตามช่องว่างและยึดเกาะอนุภาคดิน เข้าไว้ด้วยกันได้ดีกว่าของระบบประสิทธิภาพเนื่องจากปริมาตรของชิ้นงานที่ถูกขัดออกมีค่าน้อยกว่ามาก

ตอนที่ 4 ผลการทดสอบการบวมพอง

จากการทดสอบการบวมพองโดยการแช่ตัวอย่างในโทลูอีน นาน 6 ชั่วโมง ตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วน A/S เท่ากับ 2.08 และ 12.5 มีการเปื่อยยุ่ย ไม่สามารถทำการทดสอบต่อได้ ผลการทดสอบการบวมพอง จึงมีเพียง 8

สูตร สำหรับข้อมูลของการบวมพองของชั้นทดสอบแสดงในภาคผนวก ง (ตารางที่ ง.1 ถึง ง.3) โดยสรุปเป็นกราฟดังแสดงในภาพที่ 13



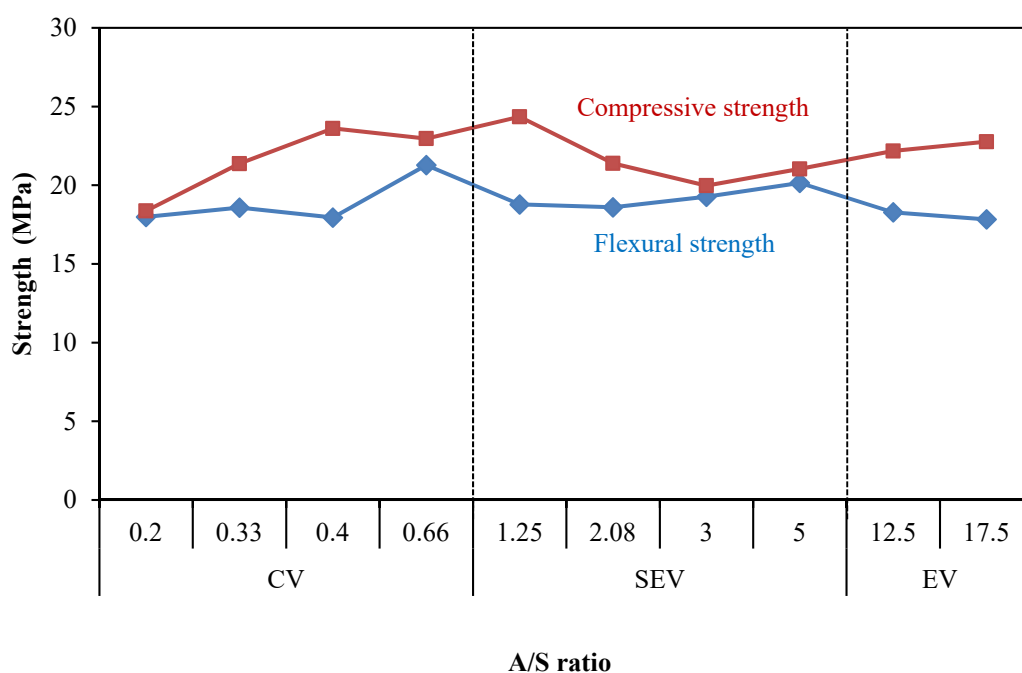
ภาพที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างการบวมพองกับจำนวนชั่วโมงในการแช่โทลูอีน

(ก) ระบบการคงรูปแบบปกติ (CV) (ข) การคงรูปแบบกึ่งประสิทธิภาพ (SEV)

และ (ค) การคงรูปแบบประสิทธิภาพ (EV)

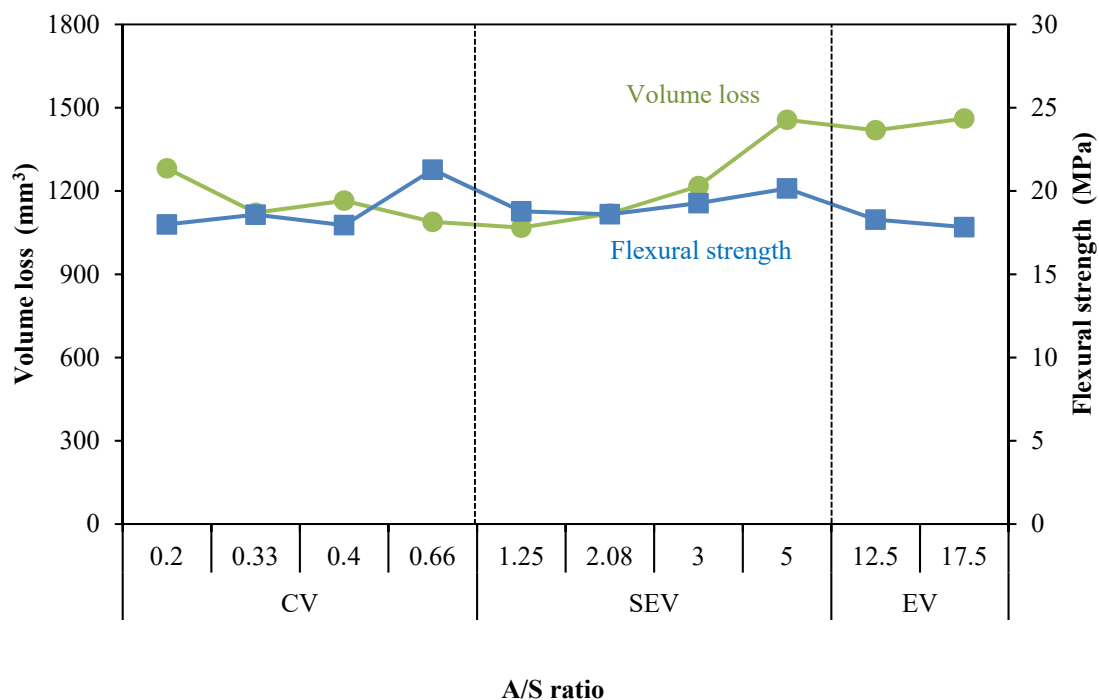
จากภาพที่ 13 (ก) พบว่า การวัดค่าในชั้นข้างด้วยระบบการคงรูปแบบปกติ (CV) นั้น เมื่ออัตราส่วน A/S อยู่ในช่วง 0.2 – 0.66 มีร้อยละการบวมพองไม่แตกต่างกัน ซึ่งร้อยละการบวมพองมีค่าต่ำกว่าระบบการคงรูปแบบกึ่งประสิทธิภาพ (SEV) และการคงรูปแบบประสิทธิภาพ (EV)

น้ำยางคอมพาวนด์ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานยึดเกาะอนุภาคดินเข้าด้วยกัน ส่งผลให้ค่าความทนแรงอัด และค่าความทนแรงดัดสูง ซึ่งในภาพรวมความทนแรงอัดมีค่าสูงกว่าความทนแรงดัด ทั้งนี้ค่าความทนแรงอัดสูงกว่ามาตรฐานข้อกำหนดของอิฐก่อสร้าง ตามมาตรฐาน มอก. 77-2545 เรื่องอิฐก่อสร้างสามัญ ซึ่งได้กำหนดไว้ว่า อิฐก่อสร้างควรมีค่าความทนแรงอัดต่อก้อนไม่ต่ำกว่า 17 เมกะปาสกาล และมีเพียงการวัดค่าในชั้นข้างด้วยระบบการคงรูปแบบปกติ (CV) เท่านั้น ที่ความทนแรงอัด และความทนแรงดัด แปรผันตรงกับอัตราส่วน A/S ดังภาพที่ 14



ภาพที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างความทนแรงดัดและความทนแรงอัด

กรณีความสัมพันธ์ระหว่างการขัดถู และความทนแรงดัด ตลอดจนความสัมพันธ์ระหว่างการขัดถู และความทนแรงอัด แสดงในภาพที่ 15 และ ภาพที่ 16 ตามลำดับ

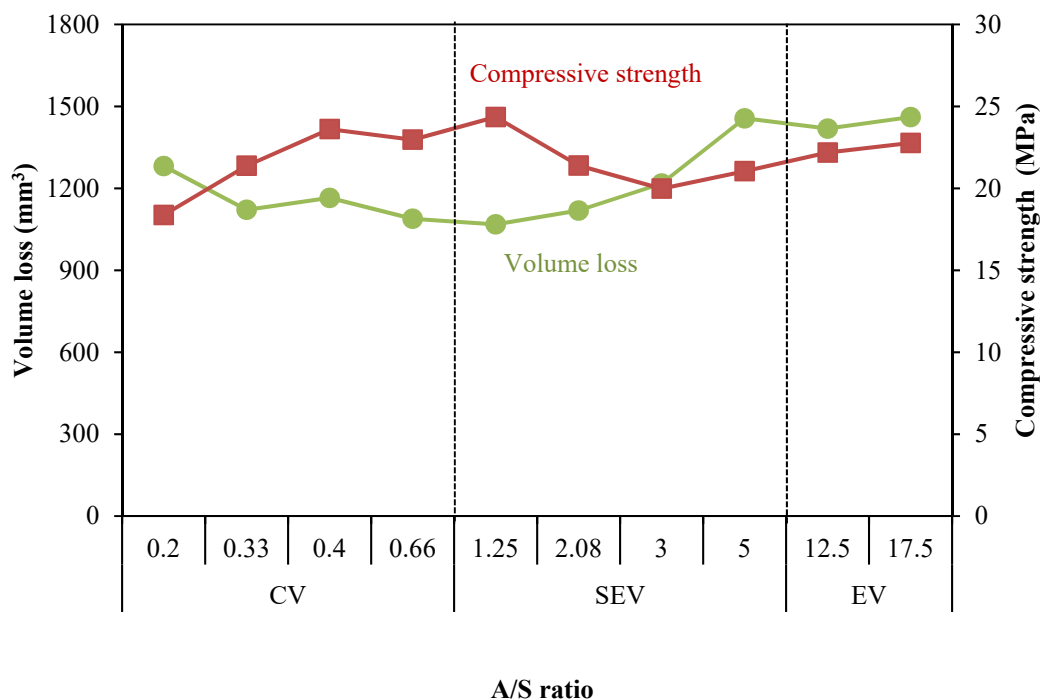


ภาพที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างความทนการขัดถูและความทนแรงดัด

จากภาพที่ 15 จะเห็นได้ว่า ในการวัดค่าในเชิงด้วยระบบการคงรูปแบบปกติ (CV) จากการทดสอบการขัดถู ปริมาตรที่ถูกขัดออกลดลงอย่างชัดเจนเมื่ออัตราส่วน A/S เพิ่มขึ้น โดยในขณะเดียวกันความทนแรงดัดมีค่าเพิ่มขึ้น

สำหรับการวัดค่าในเชิงด้วยระบบการคงรูปแบบกึ่งประสิทธิภาพ (SEV) กลับพบว่าปริมาตรที่ถูกขัดออก และความทนแรงดัดเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วน A/S

และสำหรับการวัดค่าในเชิงด้วยระบบการคงรูปแบบประสิทธิภาพ (EV) ปริมาตรที่ถูกขัดออกจะเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วน A/S แต่ค่าความทนแรงดัดลดลง



ภาพที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างความทนการขัดถูและความทนแรงอัด

จากภาพที่ 16 พบว่า สำหรับการวัดค่าในช่องด้วยระบบการคงรูปแบบปกติ (CV) ปริมาตรที่ขัดถูออกลดลงเมื่ออัตราส่วน A/S เพิ่มขึ้น ขณะที่ความทนแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้น

สำหรับการวัดค่าในช่องด้วยระบบการคงรูปแบบกึ่งประสิทธิภาพ (SEV) ปริมาตรที่ขัดถูออกเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วน A/S เพิ่ม แต่ความทนแรงอัดลดลง

แต่สำหรับการวัดค่าในช่องด้วยระบบการคงรูปแบบประสิทธิภาพ (EV) ปริมาตรที่ถูกขัดถูออกและความทนแรงอัดมีค่าเพิ่มตามอัตราส่วน A/S

การบวมพองของยาง ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล ดังเช่นงานของ N. Rattansom [13] ที่ได้ศึกษาผลของระบบการวัดค่าในช่อง ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลและการเสื่อมสภาพทางความร้อน ของยางธรรมชาติและยางรีเคิลม โดยพบว่าในการวัดค่าในช่องด้วยระบบการคงรูปแบบปกติ (CV) จะให้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่าการวัดค่าในช่องด้วยระบบการคงรูปแบบกึ่งประสิทธิภาพ (EV) และยืนยันว่าร้อยละการบวมพองส่งผลต่อสมบัติเชิงกลเช่นกัน ซึ่งผลการทดลองตามภาพที่ 13 การวัดค่าในช่องด้วยระบบการคงรูปแบบปกติ (CV) มีค่าร้อยละการบวมพองที่ต่ำ แสดงถึงปริมาณการเชื่อมโยงพันธะเกิดขึ้นมากกว่าการวัดค่าในช่องด้วยระบบการคงรูปแบบกึ่ง

ประสิทธิภาพ (SEV) และการวัดค่าในชั้นด้วยระบบการคงรูปแบบประสิทธิภาพ (EV) โดยพันธะที่เกิดขึ้นแบบพอลิซัลฟิดิก และไดซัลฟิดิก

นอกจากนั้นในงาน S. Qamarina [14] ได้ศึกษาปริมาณไดไทโอคาร์บาเมต (ZDEC) ในการวัดค่าในชั้นยางธรรมชาติด้วยระบบ กำมะถัน โดยมีการเติมสารตัวเร่งในปริมาณ 0 - 1.0 phr และใช้กำมะถันคงที่ 1 phr จากการทดลองพบว่า การเพิ่มไดไทโอคาร์บาเมต (ZDEC) จาก 0 - 0.4 phr หรือเพิ่มอัตราส่วน A/S จาก 0 - 0.4 ส่งผลให้ การทนต่อแรงดึงและ การเชื่อมขวางของพันธะ เพิ่มขึ้น แต่เมื่ออัตราส่วน A/S มากกว่า 0.4 phr พบว่า การทนต่อแรงดึง และมีการเชื่อมโยงของพันธะ เริ่มคงที่

Travas-sejdic [15] ได้ศึกษาการวัดค่าในชั้นของยางธรรมชาติที่ใช้ระบบการวัดค่าในชั้นด้วยระบบการคงรูปแบบปกติ (CV) มีสารตัวเร่งที่ต่างกัน และปริมาณกำมะถันคงที่ 2.2 phr พบว่าการใช้ไดไทโอคาร์บาเมต (ZDEC) จาก 0.7 - 1.50 phr ทำให้ความทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นตามปริมาณ ไดไทโอคาร์บาเมต (ZDEC) นอกจากนั้นการเพิ่ม อัตราส่วน A/S ส่งผลให้ปริมาณการเชื่อมโยงของพันธะเพิ่มขึ้นด้วย

ซึ่งในการศึกษา พบว่า ในการวัดค่าในชั้นด้วยระบบการคงรูปแบบปกติ (CV) ในการทดสอบความทนแรงดัด และการทดสอบความทนแรงอัด จากปริมาณสารตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น โดยปริมาณกำมะถันคงที่ ส่งผลให้ตัวอย่างแสดงค่าความทนแรงดัดเพิ่ม ขึ้นอย่างชัดเจน และการทดสอบการขัดถูก็มี ปริมาณที่ถูกขัดออกน้อยลง เนื่องจากน้ำยางคอมพาวนด์ที่เติมลงไป ช่วยยึดเกาะอนุภาคของดินเข้าด้วยกัน ถึงแม้ในการศึกษาครั้งนี้จะเป็นการเติมน้ำยาง คอมพาวนด์ ลงในน้ำดิน ซึ่งผลที่ได้ก็สอดคล้องกับงานของงาน S. Qamarina [14] และ Travas-sejdic [15] ที่เป็นการศึกษาสมบัติของน้ำยางคอมพาวนด์

สรุปผลการวิจัย

การศึกษานี้ได้ข้อมูลสมบัติทางกายภาพของระบบที่ประกอบด้วยดินผสมและน้ำยางคอมพาวนด์ โดยมีสัดส่วนการใช้ น้ำยางคอมพาวนด์ไม่เกินร้อยละ 9 ผลการศึกษาอิทธิพลของปริมาณน้ำยางคอมพาวนด์ พบว่า การเพิ่มปริมาณน้ำยางคอมพาวนด์ทำให้ค่าความทนแรงดัดเพิ่มขึ้น การใช้อุณหภูมิอบ 150 องศาเซลเซียส นาน 12 ชั่วโมง เพียงพอที่จะทำให้เกิดการแทรกของยางเข้าไประหว่างอนุภาคดิน การปรับระบบการคงรูปยางสามระบบคือ ระบบกำมะถันปกติ ระบบประสิทธิภาพ และระบบกึ่งประสิทธิภาพ ส่งผลต่อค่าความทนแรงดัด ความทนแรงอัด และความทนต่อการขัดถูของตัวอย่างอย่างชัดเจน ทั้งนี้ระบบที่เหมาะสมเป็นระบบ กำมะถันปกติที่ใช้อัตราส่วนระหว่างสารตัวเร่งปฏิกิริยาและกำมะถันเป็น 0.66

เอกสารอ้างอิง

- [1] มิ่งสรรพ ขาวสะอาด และคณะ. รายงานการศึกษาฉบับสมบูรณ์ โครงการจัดทำแผนแม่บทอุตสาหกรรมรายสาขา (สาขาเซรามิกและแก้ว). สถาบันวิจัยสังคม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 2545.
- [2] นกัศถ์ จันทรมี และ จูตินันท์ รัตนพรหม. รายงานโครงการวิจัยเรื่อง การใช้น้ำยางขึ้นเป็นตัวเชื่อมประสานสำหรับการผลิตภาชนะดินเผา. โครงการวิจัยแห่งชาติ: ยางพารา ฝ้ายอุตสาหกรรม สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย. 2554.
- [3] Chantaramee, N., Chaichana, K., Sirimongkol, P. and Rattanaplome., T., Flexural strength and hardness of clay reinforced with natural polymer. **Proceeding of the 1st Mae Fah Luang International Conference**, 2012, 1 - 5.
- [4] Lee, K. C., Her, J. H. and Kwan, S. K., Red clay composites reinforced with polymeric binders. *Construction and Building Materials*. 2008. 22: 2292 - 2298.
- [5] พงษ์ธร แซ่อูย. สารเคมียาง. พิมพ์ครั้งที่ 1. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. กรุงเทพมหานคร. 2548.
- [6] ดารณี เจริญสุข. สารเคมีที่ช่วยลดการเติมซิงก์ออกไซด์สำหรับการวัลคาไนซ์ยางด้วยระบบกัมมะถัน. วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยียาง. ปีที่ 2. ฉบับที่ 4. ตุลาคม-ธันวาคม. 2551.
- [7] Morton, M., Rubber technology. 3rd Edition. Van Nostrand Reinhold. New York. 1987.
- [8] วราภรณ์ ขจรไชยกุล. ยางธรรมชาติ : การผลิตและการใช้งาน. ห้างหุ้นส่วนซีโนดีไซน์ จำกัด. กรุงเทพมหานคร. 2549.
- [9] รัฐพงษ์ หนูหมาด. การศึกษาพันธะเชื่อมโยงและการเสื่อมสภาพของฟิล์มยางโดยเทคนิคการวัดการดูดกลืนรังสีเอกซ์. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 2552.
- [10] กระทรวงอุตสาหกรรม. กระเบื้องเซรามิก: มอก. 2398 เล่ม 6-2553. วิเคราะห์ความทนการขัดถูสำหรับกระเบื้องชนิดไม่เคลือบ. 2553.
- [11] คริณญา มูลชัย. การใช้ร่าสกัณ้ำมันเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ. รายงานการประชุมทางวิชาการ. ศูนย์การศึกษาและฝึกอบรมนานาชาติ มหาวิทยาลัยแม่โจ้, เชียงใหม่, 26-27 พฤษภาคม 2553, 437 – 444.
- [12] Kumar, S. A perspective study on fly ash–lime–gypsum bricks and hollow blocks for low cost housing development. *Construction and Building Materials*. 2002. 16: 519 - 525.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [13] Rattanasom, N., Poonsuk, A., Makmoon, T. Effect of curing system on the mechanical properties and heat aging resistance of natural rubber/tire tread reclaimed rubber blends. *Polymer Testing*. 2005. 24: 728 – 732.
- [14] Qamarina, M., Hashim, A. Zinc-complexes in natural rubber latex sulphur vulcanisation system. *Journal of Rubber Research*. 2012. 2: 80 – 92.
- [15] Travas-Sejdic, J., Jelencic, J., Bravar, M., Frobe, Z. Characterization of the natural rubber vulcanizates obtained by different accelerators. *European Polymer Journal*. 1996. 32: 1395 – 1401.

ภาคผนวก ก
ผลการทดสอบความทนแรงดัด

ตารางที่ ก.1 ผลการทดสอบความทนแรงดัดแสดงน้ำหนักกดและเส้นผ่าศูนย์กลางของชิ้นงานทดสอบสูตร
CV 1/1.5 อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส 12 ชั่วโมง

ชิ้นงาน	น้ำหนักกด (kgf)	น้ำหนักกด (kN)	เส้นผ่าศูนย์กลาง (mm)				เส้นผ่า ศูนย์กลาง เฉลี่ย (cm)	ความทน แรงดัด (MPa)
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4		
1	57.23	0.56	19.23	18.70	18.96	18.85	1.89	16.82
2	58.15	0.57	18.64	18.42	18.42	18.71	1.85	18.19
3	56.03	0.55	18.78	18.57	19.00	18.63	1.87	16.98
4	50.33	0.49	18.81	18.85	18.73	18.85	1.88	15.09
5	40.59	0.40	18.77	18.35	18.26	18.67	1.85	12.77
6	46.49	0.46	18.59	18.68	18.88	18.58	1.87	14.23
7	59.22	0.58	18.22	18.59	18.75	18.43	1.85	18.67
8	55.4	0.54	18.59	18.52	18.63	18.68	1.86	17.17
9	55.83	0.55	18.57	18.71	18.57	19.01	1.87	17.00
10	39.45	0.39	18.73	18.70	18.79	18.60	1.87	12.03
11	55.46	0.54	18.72	18.93	18.90	18.71	1.88	16.62
12	46.63	0.46	18.56	18.69	18.65	18.61	1.86	14.40
13	45.13	0.44	18.55	18.43	18.60	19.14	1.87	13.82
14	56.34	0.55	18.80	18.85	18.89	18.81	1.88	16.82
15	50.21	0.49	18.87	18.91	19.07	19.02	1.90	14.68
16	55.36	0.54	18.87	18.95	18.64	18.73	1.88	16.63
17	50.54	0.50	18.60	18.53	18.72	18.29	1.85	15.84
18	44.07	0.43	18.78	18.89	19.03	18.66	1.88	13.15
19	48.99	0.48	18.90	18.14	18.92	18.40	1.86	15.22
20	45.57	0.45	18.58	18.80	18.38	18.95	1.87	13.96
21	47.65	0.47	18.39	18.55	18.49	18.54	1.85	15.04

ตารางที่ ก.1 ผลการทดสอบความทนแรงดัดแสดงน้ำหนักกดและเส้นผ่าศูนย์กลางของชิ้นงานทดสอบสูตร
CV 1/1.5 อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส 12 ชั่วโมง (ต่อ)

ชิ้นงาน	น้ำหนักกด (kgf)	น้ำหนักกด (kN)	เส้นผ่าศูนย์กลาง (mm)				เส้นผ่า ศูนย์กลาง เฉลี่ย (cm)	ความทน แรงดัด (MPa)
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4		
22	46.51	0.46	18.87	18.96	18.72	19.21	1.89	13.66
23	47.57	0.47	18.80	18.69	18.57	18.48	1.86	14.67
24	56.78	0.56	19.02	18.55	18.57	18.58	1.87	17.38
25	68.57	0.67	17.97	17.96	17.97	17.95	1.80	23.61
26	70.21	0.69	18.32	18.30	18.28	18.27	1.83	22.89
27	71.98	0.71	18.31	18.43	18.38	18.37	1.84	23.16
28	74.52	0.73	18.67	18.65	18.46	18.37	1.85	23.35
29	66.71	0.65	18.08	18.07	18.10	18.06	1.81	22.53
30	80.85	0.79	17.99	18.07	18.15	18.12	1.81	27.29
31	66.83	0.65	17.79	17.76	17.78	17.83	1.78	23.69
32	68.99	0.68	18.40	18.52	18.40	18.49	1.85	21.91
33	81.4	0.80	18.14	18.09	18.23	18.21	1.82	27.09
34	78.04	0.76	17.98	18.06	17.96	17.99	1.80	26.72
35	82.58	0.81	18.80	18.43	18.50	18.53	1.86	25.76
36	38.96	0.38	18.53	18.45	18.54	18.63	1.85	12.21
37	82.05	0.80	18.12	18.44	18.33	18.12	1.83	26.93
38	81.05	0.79	18.44	18.59	18.55	18.48	1.85	25.48
39	75.24	0.74	18.33	18.29	18.33	18.42	1.83	24.33
40	69.23	0.68	18.65	18.64	18.54	18.58	1.86	21.46
41	85.04	0.83	18.43	18.41	18.66	18.59	1.85	26.71
42	75.74	0.74	18.04	18.34	18.11	18.04	1.81	25.35
43	85.33	0.84	18.70	18.54	18.64	18.75	1.87	26.22
44	73.85	0.72	18.15	18.13	18.05	18.11	1.81	24.81

ตารางที่ ก.2 ผลการทดสอบความทนแรงดัดแสดงน้ำหนักกดและเส้นผ่าศูนย์กลางของชิ้นงานทดสอบสูตร
CV 1/2.5 อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส 12 ชั่วโมง

ชิ้นงาน	น้ำหนักกด (kgf)	น้ำหนักกด (kN)	เส้นผ่าศูนย์กลาง (mm)				เส้นผ่า ศูนย์กลาง เฉลี่ย (cm)	ความทน แรงดัด (MPa)
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4		
1	56.52	0.55	19.07	18.74	18.75	18.84	1.89	16.84
2	58.00	0.57	18.54	18.40	18.82	18.38	1.85	18.18
3	56.54	0.55	18.74	18.82	18.82	18.89	1.88	16.93
4	48.99	0.48	18.66	18.70	19.25	18.70	1.88	14.65
5	62.74	0.61	18.45	19.05	18.79	18.91	1.88	18.84
6	65.84	0.65	18.71	18.90	18.83	19.03	1.89	19.56
7	52.61	0.52	18.61	18.77	18.85	18.62	1.87	16.02
8	50.58	0.50	18.74	18.76	18.43	19.02	1.87	15.34
9	56.44	0.55	18.54	18.88	18.51	18.97	1.87	17.16
10	58.55	0.57	18.83	18.79	18.76	18.81	1.88	17.59
11	56.11	0.55	18.54	18.64	18.96	18.62	1.87	17.15
12	52.25	0.51	18.76	18.66	18.61	18.57	1.87	16.07
13	67.30	0.66	18.92	18.76	18.64	18.84	1.88	20.24
14	43.58	0.43	18.84	19.05	18.81	18.63	1.88	13.02
15	63.76	0.62	18.86	18.68	18.79	18.56	1.87	19.39
16	60.85	0.60	18.64	18.59	18.49	18.50	1.86	19.01
17	51.47	0.50	18.39	19.08	18.45	18.43	1.86	15.99
18	52.39	0.51	18.77	18.83	18.53	18.85	1.87	15.87
19	42.62	0.42	18.81	19.01	19.00	19.12	1.90	12.43
20	66.22	0.65	18.97	18.91	18.92	18.69	1.89	19.66
21	58.06	0.57	18.64	18.51	18.74	18.63	1.86	17.92
22	56.97	0.56	18.43	18.80	18.68	18.42	1.86	17.72
23	47.16	0.46	19.03	19.02	19.03	18.77	1.90	13.80
24	54.83	0.54	18.73	18.98	18.72	18.79	1.88	16.45

ตารางที่ ก.2 ผลการทดสอบความทนแรงดัดแสดงน้ำหนักกดและเส้นผ่าศูนย์กลางของชิ้นงานทดสอบสูตร
CV 1/2.5 อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส 12 ชั่วโมง (ต่อ)

ชิ้นงาน	น้ำหนักกด (kgf)	น้ำหนักกด (kN)	เส้นผ่าศูนย์กลาง (mm)				เส้นผ่า ศูนย์กลาง เฉลี่ย (cm)	ความทน แรงดัด (MPa)
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4		
25	58.57	0.57	18.44	18.39	18.38	18.31	1.84	18.82
26	55.20	0.54	18.32	18.18	18.31	18.29	1.83	18.05
27	55.48	0.54	18.10	18.34	18.25	18.31	1.83	18.22
28	51.47	0.50	18.51	18.58	18.49	18.51	1.85	16.16
29	58.29	0.57	18.60	18.53	18.56	18.51	1.86	18.22
30	57.84	0.57	18.89	18.76	18.61	18.65	1.87	17.57
31	58.20	0.57	18.42	18.37	18.56	18.58	1.85	18.40
32	49.20	0.48	18.53	18.60	18.48	18.47	1.85	15.46
33	63.07	0.62	18.43	18.22	18.18	18.27	1.83	20.62
34	48.89	0.48	18.38	18.35	18.44	18.30	1.84	15.75
35	61.16	0.60	18.21	18.23	18.37	18.38	1.83	19.92
36	55.70	0.55	18.64	18.67	18.81	18.75	1.87	16.95
37	61.58	0.60	18.32	18.33	18.34	18.36	1.83	19.93
38	53.26	0.52	18.27	18.23	18.18	18.30	1.82	17.50
39	53.14	0.52	18.48	18.45	18.28	18.33	1.84	17.07
40	53.15	0.52	18.77	18.65	18.57	18.58	1.86	16.37
41	54.26	0.53	18.61	18.51	18.58	18.56	1.86	16.92
42	56.23	0.55	18.64	18.64	18.61	18.57	1.86	17.40
43	52.49	0.51	18.54	18.48	18.32	18.35	1.84	16.75
44	53.12	0.52	18.69	18.63	18.02	18.07	1.84	17.15
45	53.12	0.52	18.43	18.53	18.32	18.33	1.84	17.01
46	54.52	0.53	18.47	18.46	18.48	18.46	1.85	17.27
47	52.01	0.51	18.67	18.70	18.65	18.65	1.87	15.96
48	50.88	0.50	18.31	18.29	18.63	18.58	1.85	16.16

ตารางที่ ก.3 ผลการทดสอบความทนแรงดัดแสดงน้ำหนักกดและเส้นผ่าศูนย์กลางของชิ้นงานทดสอบสูตร
CV 0.5/1.5 อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส 12 ชั่วโมง

ชิ้นงาน	น้ำหนักกด (kgf)	น้ำหนักกด (kN)	เส้นผ่าศูนย์กลาง (mm)				เส้นผ่า ศูนย์กลาง เฉลี่ย (cm)	ความทน แรงดัด (MPa)
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4		
1	62.36	0.61	18.89	18.98	18.70	18.97	1.89	18.48
2	54.40	0.53	18.81	19.10	18.81	19.12	1.90	15.93
3	56.01	0.55	18.91	18.82	18.95	18.82	1.89	16.62
4	57.35	0.56	18.63	18.60	18.70	18.64	1.86	17.66
5	54.58	0.53	18.70	19.07	18.76	18.99	1.89	16.18
6	62.48	0.61	18.66	18.87	18.99	18.81	1.88	18.67
7	56.56	0.55	18.82	19.24	19.34	18.73	1.90	16.37
8	60.38	0.59	18.88	18.71	18.93	18.94	1.89	17.95
9	56.25	0.55	18.74	18.79	18.79	18.79	1.88	16.95
10	54.44	0.53	18.57	18.93	18.87	18.67	1.88	16.46
11	57.43	0.56	18.91	18.84	18.83	18.89	1.89	17.06
12	61.48	0.60	18.95	18.76	19.10	18.89	1.89	18.10
13	50.15	0.49	18.81	18.86	18.90	18.70	1.88	15.02
14	56.62	0.55	18.92	18.93	18.90	18.93	1.89	16.68
15	58.04	0.57	18.71	18.89	18.34	18.72	1.87	17.81
16	60.85	0.60	18.88	18.67	18.45	18.75	1.87	18.61
17	53.53	0.52	18.69	18.66	18.94	18.63	1.87	16.26
18	52.27	0.51	18.72	18.82	18.55	18.70	1.87	15.96
19	55.62	0.55	18.82	19.08	19.12	18.70	1.89	16.36
20	57.21	0.56	19.07	18.85	18.90	18.97	1.89	16.78
21	56.19	0.55	18.88	18.94	18.85	18.95	1.89	16.60
22	51.19	0.50	18.66	18.94	18.93	18.72	1.88	15.34
23	52.19	0.51	18.77	19.17	19.12	18.99	1.90	15.15
24	56.52	0.55	18.88	18.18	18.19	18.68	1.85	17.86

ตารางที่ ก.3 ผลการทดสอบความทนแรงดัดแสดงน้ำหนักกดและเส้นผ่าศูนย์กลางของชิ้นงานทดสอบสูตร
CV 0.5/1.5 อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส 12 ชั่วโมง (ต่อ)

ชิ้นงาน	น้ำหนักกด (kgf)	น้ำหนักกด (kN)	เส้นผ่าศูนย์กลาง (mm)				เส้นผ่า ศูนย์กลาง เฉลี่ย (cm)	ความทน แรงดัด (MPa)
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4		
25	61.97	0.61	18.64	18.76	18.51	18.60	1.86	19.13
26	33.43	0.33	18.77	18.74	18.77	18.58	1.87	10.18
27	61.85	0.61	18.45	18.85	18.32	18.81	1.86	19.16
28	55.56	0.54	18.10	18.61	18.51	18.64	1.85	17.61
29	65.12	0.64	18.53	18.55	18.48	18.76	1.86	20.26
30	60.16	0.59	18.45	18.30	18.40	18.52	1.84	19.22
31	54.44	0.53	18.89	18.29	18.93	18.63	1.87	16.65
32	63.30	0.62	18.45	18.85	18.79	18.25	1.86	19.68
33	63.24	0.62	18.64	18.62	18.64	18.80	1.87	19.38
34	65.45	0.64	18.58	18.42	18.54	18.45	1.85	20.64
35	65.49	0.64	18.63	18.86	18.70	18.77	1.87	19.86
36	65.25	0.64	18.22	18.51	18.35	18.75	1.85	20.71
37	62.83	0.62	18.49	18.73	18.51	18.66	1.86	19.49
38	66.83	0.65	18.66	18.77	18.70	18.84	1.87	20.26
39	50.23	0.49	18.68	18.60	18.68	18.62	1.86	15.47
40	66.14	0.65	18.83	18.59	18.73	18.67	1.87	20.17
41	37.73	0.37	18.40	18.67	18.79	18.56	1.86	11.69
42	58.41	0.57	18.70	18.70	18.82	18.80	1.88	17.67
43	68.89	0.68	18.21	18.47	19.30	18.33	1.86	21.44
44	65.41	0.64	18.75	19.19	18.89	19.25	1.90	18.97

ตารางที่ ก.4 ผลการทดสอบความทนแรงดัดแสดงน้ำหนักกดและเส้นผ่าศูนย์กลางของชิ้นงานทดสอบสูตร
CV 0.5/2.5 อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส 12 ชั่วโมง

ชิ้นงาน	น้ำหนักกด (kgf)	น้ำหนักกด (kN)	เส้นผ่าศูนย์กลาง (mm)				เส้นผ่า ศูนย์กลาง เฉลี่ย (cm)	ความทน แรงดัด (MPa)
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4		
1	61.22	0.60	19.01	18.47	18.80	18.96	1.88	18.36
2	56.39	0.55	18.69	18.85	18.61	19.67	1.90	16.52
3	67.42	0.66	18.63	18.54	18.57	19.21	1.87	20.45
4	54.30	0.53	18.52	18.61	18.48	18.84	1.86	16.81
5	59.96	0.59	18.50	18.45	18.44	18.83	1.86	18.73
6	63.13	0.62	18.82	18.80	18.97	18.95	1.89	18.71
7	60.53	0.59	18.70	18.92	19.30	19.01	1.90	17.66
8	55.49	0.54	19.03	18.70	18.85	19.06	1.89	16.38
9	52.92	0.52	18.84	18.79	18.87	18.54	1.88	16.00
10	65.41	0.64	18.99	18.74	19.08	18.57	1.88	19.50
11	64.43	0.63	18.53	18.92	19.14	19.28	1.90	18.84
12	69.97	0.69	18.95	19.09	18.82	18.72	1.89	20.70
13	47.26	0.46	18.63	18.85	18.81	18.58	1.87	14.38
14	57.68	0.57	18.73	19.36	18.72	18.58	1.88	17.19
15	57.64	0.56	18.60	19.15	18.89	18.42	1.88	17.41
16	54.85	0.54	18.76	18.50	18.67	18.71	1.87	16.85
17	61.75	0.61	19.13	18.82	18.66	18.89	1.89	18.33
18	65.73	0.64	18.52	18.85	18.72	18.83	1.87	19.96
19	65.00	0.64	18.70	18.85	18.69	18.78	1.88	19.66
20	62.62	0.61	18.90	19.10	18.69	18.72	1.89	18.65
21	63.50	0.62	18.90	18.73	18.90	18.80	1.88	18.97
22	59.59	0.58	19.05	18.71	18.87	18.81	1.89	17.73
23	58.39	0.57	18.75	18.57	18.65	18.86	1.87	17.80
24	57.49	0.56	18.65	18.76	18.75	18.90	1.88	17.36

ตารางที่ ก.4 ผลการทดสอบความทนแรงดัดแสดงน้ำหนักกดและเส้นผ่าศูนย์กลางของชิ้นงานทดสอบสูตร
CV 0.5/2.5 อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส 12 ชั่วโมง (ต่อ)

ชิ้นงาน	น้ำหนักกด (kgf)	น้ำหนักกด (kN)	เส้นผ่าศูนย์กลาง (mm)				เส้นผ่า ศูนย์กลาง เฉลี่ย (cm)	ความทน แรงดัด (MPa)
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4		
25	49.12	0.48	18.72	18.26	18.29	18.31	1.84	15.75
26	44.43	0.44	18.29	18.57	18.37	18.59	1.85	14.11
27	50.52	0.50	18.73	18.40	18.05	18.21	1.83	16.32
28	56.50	0.55	18.42	18.49	18.40	18.56	1.85	17.90
29	53.53	0.52	18.30	18.56	18.23	18.55	1.84	17.12
30	59.10	0.58	18.60	18.27	18.94	18.64	1.86	18.29
31	44.84	0.44	18.33	18.55	18.35	18.48	1.84	14.30
32	55.01	0.54	18.54	18.20	18.27	18.38	1.83	17.77
33	53.37	0.52	18.45	18.57	18.59	18.65	1.86	16.65
34	51.31	0.50	18.65	18.88	18.39	18.44	1.86	15.94
35	47.14	0.46	18.46	18.75	18.46	18.69	1.86	14.64
36	58.09	0.57	18.54	18.65	18.59	18.70	1.86	17.96
37	39.12	0.38	18.26	18.34	18.20	18.27	1.83	12.81
38	52.90	0.52	18.51	18.57	18.54	18.71	1.86	16.45
39	52.45	0.51	18.68	18.56	18.58	18.61	1.86	16.25
40	55.11	0.54	18.65	18.35	18.24	18.48	1.84	17.57
41	46.73	0.46	18.55	18.60	18.48	18.73	1.86	14.52
42	57.11	0.56	18.55	18.64	18.62	18.63	1.86	17.68
43	58.76	0.58	18.65	18.53	18.49	18.60	1.86	18.32
44	44.72	0.44	17.11	18.46	18.40	18.43	1.81	15.05

ตารางที่ ก.5 ผลการทดสอบความทนแรงดัดแสดงน้ำหนักกดและเส้นผ่าศูนย์กลางของชิ้นงานทดสอบสูตร
SEV 1.5/1.2 อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส 12 ชั่วโมง

ชิ้นงาน	น้ำหนักกด (kgf)	น้ำหนักกด (kN)	เส้นผ่าศูนย์กลาง (mm)				เส้นผ่า ศูนย์กลาง เฉลี่ย (cm)	ความทน แรงดัด (MPa)
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4		
1	59.10	0.58	18.56	18.62	18.53	18.52	1.86	18.45
2	56.08	0.55	18.81	18.31	18.77	18.33	1.86	17.52
3	51.51	0.50	18.45	18.67	18.41	18.43	1.85	16.26
4	48.71	0.48	18.27	18.49	18.34	18.50	1.84	15.60
5	62.11	0.61	18.77	18.44	18.59	18.60	1.86	19.26
6	54.85	0.54	18.56	18.30	18.50	18.55	1.85	17.35
7	56.88	0.56	18.54	18.72	18.70	18.86	1.87	17.34
8	53.89	0.53	18.64	18.70	18.72	18.62	1.87	16.53
9	55.03	0.54	18.66	18.49	18.71	18.77	1.87	16.91
10	56.46	0.55	18.62	18.90	18.62	18.69	1.87	17.21
11	50.50	0.49	18.40	18.63	18.51	18.20	1.84	16.09
12	68.07	0.67	18.89	18.84	18.65	18.77	1.88	20.48
13	54.75	0.54	18.38	18.82	18.77	18.27	1.86	17.09
14	58.09	0.57	18.53	18.97	18.87	18.50	1.87	17.68
15	61.32	0.60	18.68	18.83	18.76	18.89	1.88	18.45
16	55.01	0.54	18.65	18.71	18.68	18.42	1.86	17.02
17	60.51	0.59	18.42	18.84	18.45	18.94	1.87	18.58
18	53.20	0.52	18.63	18.52	18.66	18.74	1.86	16.40
19	49.42	0.48	18.62	18.50	18.40	18.88	1.86	15.33
20	59.61	0.58	18.64	18.43	18.55	18.52	1.85	18.68
21	62.07	0.61	18.46	18.90	18.75	18.61	1.87	19.00
22	60.79	0.60	18.42	18.59	18.69	18.50	1.86	19.01
23	52.31	0.51	18.58	18.53	18.23	18.53	1.85	16.57
24	62.44	0.61	18.31	18.42	18.22	18.41	1.83	20.20

ตารางที่ ก.5 ผลการทดสอบความทนแรงดัดแสดงน้ำหนักกดและเส้นผ่าศูนย์กลางของชิ้นงานทดสอบสูตร SEV 1.5/1.2 อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส 12 ชั่วโมง (ต่อ)

ชิ้นงาน	น้ำหนักกด (kgf)	น้ำหนักกด (kN)	เส้นผ่าศูนย์กลาง (mm)				เส้นผ่า ศูนย์กลาง เฉลี่ย (cm)	ความทน แรงดัด (MPa)
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4		
25	56.99	0.56	18.46	18.77	18.79	18.50	1.86	17.59
26	72.62	0.71	18.96	18.67	18.82	18.87	1.88	21.71
27	49.80	0.49	18.90	18.82	19.08	18.86	1.89	14.69
28	54.67	0.54	18.49	18.06	18.01	18.39	1.82	17.99
29	60.55	0.59	18.96	19.11	19.09	18.69	1.90	17.72
30	68.77	0.67	18.78	18.53	18.74	18.83	1.87	20.92
31	57.15	0.56	18.19	17.99	17.98	18.42	1.81	19.09
32	67.08	0.66	18.70	19.10	18.92	18.76	1.89	19.92
33	52.43	0.51	18.97	18.64	18.36	18.93	1.87	15.94
34	64.92	0.64	18.65	18.97	19.17	18.80	1.89	19.20
35	63.31	0.62	18.82	18.74	18.61	18.83	1.88	19.17
36	49.52	0.49	19.00	18.96	18.62	19.09	1.89	14.60
37	60.91	0.60	18.71	18.80	18.78	18.80	1.88	18.37
38	59.55	0.58	18.48	18.68	18.51	18.56	1.86	18.60
39	66.06	0.65	18.71	18.64	18.72	18.56	1.87	20.30
40	43.46	0.43	18.27	18.56	18.34	18.28	1.84	14.01
41	63.40	0.62	18.96	19.17	18.97	18.94	1.90	18.42
42	60.38	0.59	18.40	18.88	19.07	18.61	1.87	18.31
43	66.96	0.66	18.93	18.90	18.85	19.11	1.89	19.64
44	54.20	0.53	18.51	19.08	18.56	19.00	1.88	16.31
45	46.96	0.46	18.72	18.68	18.77	18.75	1.87	14.26
46	69.78	0.68	18.64	18.70	18.68	18.66	1.87	21.40
47	67.67	0.66	18.73	18.78	18.80	18.76	1.88	20.43
48	68.60	0.67	18.73	18.62	18.78	18.56	1.87	21.03

ตารางที่ ก.6 ผลการทดสอบความทนแรงดัดแสดงน้ำหนักกดและเส้นผ่าศูนย์กลางของชิ้นงานทดสอบสูตร
SEV 2.5/1.2 อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส 12 ชั่วโมง

ชิ้นงาน	น้ำหนักกด (kgf)	น้ำหนักกด (kN)	เส้นผ่าศูนย์กลาง (mm)				เส้นผ่า ศูนย์กลาง เฉลี่ย (cm)	ความทน แรงดัด (MPa)
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4		
1	65.29	0.64	18.98	18.48	18.92	18.46	1.87	19.89
2	68.64	0.67	18.74	18.63	18.65	18.83	1.87	20.91
3	65.14	0.64	18.82	18.63	18.84	18.57	1.87	19.83
4	53.37	0.52	18.47	18.90	18.50	18.85	1.87	16.34
5	56.80	0.56	18.80	18.70	18.78	18.81	1.88	17.13
6	57.41	0.56	18.51	19.07	19.18	18.85	1.89	16.96
7	58.13	0.57	18.62	18.61	18.65	18.92	1.87	17.74
8	74.38	0.73	18.77	18.84	18.84	18.81	1.88	22.29
9	63.70	0.62	18.92	18.72	18.75	18.91	1.88	19.06
10	60.89	0.60	18.53	18.76	18.67	18.82	1.87	18.60
11	62.82	0.62	18.85	18.92	18.71	18.58	1.88	18.97
12	65.25	0.64	18.68	18.94	18.75	18.74	1.88	19.67
13	67.12	0.66	18.92	18.70	18.98	19.06	1.89	19.79
14	64.66	0.63	18.56	18.78	18.99	18.66	1.87	19.58
15	65.86	0.65	18.61	18.87	18.75	18.77	1.88	19.94
16	53.59	0.53	18.88	18.37	18.90	18.44	1.86	16.49
17	54.75	0.54	18.37	18.82	18.98	18.84	1.88	16.57
18	59.77	0.59	18.74	18.82	18.50	18.73	1.87	18.25
19	61.34	0.60	18.78	18.95	18.99	18.81	1.89	18.18
20	51.84	0.51	18.87	19.11	18.53	18.57	1.88	15.64
21	64.68	0.63	18.93	19.07	18.65	18.90	1.89	19.16
22	59.33	0.58	18.32	18.51	18.24	18.51	1.84	19.02
23	54.37	0.53	18.81	18.67	18.80	18.67	1.87	16.49
24	55.50	0.54	18.55	18.51	18.79	18.49	1.86	17.25

ตารางที่ ก.6 ผลการทดสอบความทนแรงดัดแสดงน้ำหนักกดและเส้นผ่าศูนย์กลางของชิ้นงานทดสอบสูตร
SEV 2.5/1.2 อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส 12 ชั่วโมง (ต่อ)

ชิ้นงาน	น้ำหนักกด (kgf)	น้ำหนักกด (kN)	เส้นผ่าศูนย์กลาง (mm)				เส้นผ่า ศูนย์กลาง เฉลี่ย (cm)	ความทน แรงดัด (MPa)
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4		
25	55.73	0.55	18.82	18.77	18.69	18.70	1.87	16.89
26	47.12	0.46	18.51	18.52	18.65	18.60	1.86	14.68
27	57.86	0.57	18.62	18.30	18.88	18.66	1.86	17.90
28	63.48	0.62	18.30	18.38	18.71	18.79	1.85	19.86
29	43.46	0.43	18.72	18.73	18.78	18.70	1.87	13.19
30	48.83	0.48	18.67	18.61	18.72	18.64	1.87	15.00
31	40.87	0.40	18.72	18.68	18.80	18.71	1.87	12.42
32	56.13	0.55	18.63	18.65	18.67	18.67	1.87	17.25
33	56.50	0.55	18.70	18.64	18.55	18.65	1.86	17.42
34	62.58	0.61	18.68	18.70	18.73	18.66	1.87	19.12
35	54.81	0.54	18.82	18.77	18.70	18.66	1.87	16.63
36	51.15	0.50	18.78	18.78	18.54	18.70	1.87	15.61
37	40.53	0.40	18.63	18.61	18.25	18.27	1.84	12.90
38	46.59	0.46	18.72	18.72	18.68	18.62	1.87	14.25
39	50.46	0.49	18.65	18.70	18.54	18.80	1.87	15.47
40	61.26	0.60	18.57	18.68	18.62	18.77	1.87	18.82
41	65.92	0.65	18.35	18.72	18.44	18.71	1.86	20.59
42	56.38	0.55	18.51	18.64	18.39	18.66	1.86	17.63
43	59.18	0.58	18.69	18.52	18.47	18.86	1.86	18.25
44	59.96	0.59	18.35	18.43	18.23	18.63	1.84	19.18
45	58.98	0.58	18.23	18.40	18.78	18.44	1.85	18.70

ตารางที่ ก.7 ผลการทดสอบความทนแรงดัดแสดงน้ำหนักกดและเส้นผ่าศูนย์กลางของชิ้นงานทดสอบสูตร SEV 1.5/0.5 อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส 12 ชั่วโมง (ต่อ)

ชิ้นงาน	น้ำหนักกด (kgf)	น้ำหนักกด (kN)	เส้นผ่าศูนย์กลาง (mm)				เส้นผ่า ศูนย์กลาง เฉลี่ย (cm)	ความทน แรงดัด (MPa)
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4		
1	61.40	0.60	18.55	18.60	18.51	18.48	1.85	19.24
2	63.15	0.62	18.61	18.76	18.67	18.74	1.87	19.29
3	63.35	0.62	18.79	18.30	18.83	18.48	1.86	19.65
4	59.65	0.58	18.59	18.93	18.50	18.89	1.87	18.12
5	59.92	0.59	18.56	18.79	18.82	18.41	1.86	18.45
6	65.88	0.65	18.72	18.73	18.84	18.72	1.88	19.94
7	58.61	0.57	18.74	18.85	18.68	18.79	1.88	17.70
8	62.03	0.61	18.65	18.81	18.58	18.80	1.87	18.90
9	67.95	0.67	18.64	18.50	18.73	18.54	1.86	21.06
10	64.92	0.64	18.76	18.70	18.90	18.69	1.88	19.61
11	51.47	0.50	18.57	18.61	18.88	18.80	1.87	15.67
12	63.25	0.62	18.78	18.92	18.74	18.83	1.88	18.94
13	63.11	0.62	18.75	18.89	18.64	18.97	1.88	18.92
14	61.26	0.60	18.72	18.66	18.74	18.75	1.87	18.64
15	60.79	0.60	18.79	18.84	18.35	18.58	1.86	18.73
16	65.19	0.64	18.44	18.89	18.41	18.93	1.87	20.00
17	58.61	0.57	18.47	18.48	18.53	18.52	1.85	18.47
18	68.62	0.67	18.44	18.57	18.48	18.68	1.85	21.48
19	59.67	0.58	18.75	19.07	18.97	18.67	1.89	17.74
20	60.97	0.60	18.47	18.55	18.51	18.69	1.86	19.05
21	63.80	0.63	18.40	18.71	18.64	18.45	1.86	19.95
22	74.14	0.73	18.76	18.81	18.88	18.84	1.88	22.19
23	62.50	0.61	18.64	18.53	18.54	18.68	1.86	19.39
24	59.24	0.58	18.75	18.96	18.92	18.76	1.88	17.66

ตารางที่ ก.7 ผลการทดสอบความทนแรงดัดแสดงน้ำหนักกดและเส้นผ่าศูนย์กลางของชิ้นงานทดสอบสูตร SEV 1.5/0.5 อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส 12 ชั่วโมง (ต่อ)

ชิ้นงาน	น้ำหนักกด (kgf)	น้ำหนักกด (kN)	เส้นผ่าศูนย์กลาง (mm)				เส้นผ่า ศูนย์กลาง เฉลี่ย (cm)	ความทน แรงดัด (MPa)
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4		
25	64.19	0.63	18.94	18.85	18.79	18.83	1.89	19.12
26	61.01	0.60	18.66	18.31	18.63	18.80	1.86	18.92
27	46.26	0.45	18.72	18.88	18.70	18.93	1.88	13.88
28	62.03	0.61	18.45	18.63	18.58	18.73	1.86	19.25
29	57.52	0.56	18.94	18.81	18.72	18.68	1.88	17.31
30	46.41	0.45	18.65	18.73	18.63	18.85	1.87	14.13
31	48.93	0.48	18.97	18.68	18.98	18.90	1.89	14.50
32	63.42	0.62	18.81	18.63	18.65	18.75	1.87	19.32
33	64.09	0.63	18.41	18.68	18.81	18.40	1.86	19.96
34	61.18	0.60	18.75	18.63	18.93	18.80	1.88	18.44
35	57.52	0.56	18.70	18.56	18.84	18.67	1.87	17.58
36	59.29	0.58	18.71	18.48	18.74	18.54	1.86	18.34
37	54.40	0.53	18.88	18.63	18.86	18.80	1.88	16.36
38	59.90	0.59	18.86	18.81	18.82	18.99	1.89	17.79
39	61.22	0.60	18.75	18.69	18.66	18.76	1.87	18.64
40	62.60	0.61	18.73	18.65	18.61	18.61	1.87	19.26
41	65.10	0.64	18.64	18.71	18.80	18.73	1.87	19.80
42	52.59	0.52	18.51	18.64	18.65	18.67	1.86	16.26
43	66.53	0.65	18.88	18.85	18.81	18.80	1.88	19.87
44	53.53	0.52	18.78	18.68	18.76	18.76	1.87	16.22
45	56.58	0.55	18.64	18.97	18.91	19.18	1.89	16.66
46	61.69	0.60	18.47	18.72	18.77	18.72	1.87	18.92
47	65.86	0.65	18.75	18.55	18.77	18.87	1.87	19.99

ตารางที่ ก.8 ผลการทดสอบความทนแรงดัดแสดงน้ำหนักกดและเส้นผ่าศูนย์กลางของชิ้นงานทดสอบสูตร SEV 2.5/0.5 อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส 12 ชั่วโมง

ชิ้นงาน	น้ำหนักกด (kgf)	น้ำหนักกด (kN)	เส้นผ่าศูนย์กลาง (mm)				เส้นผ่า ศูนย์กลาง เฉลี่ย (cm)	ความทน แรงดัด (MPa)
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4		
1	57.92	0.57	18.81	18.59	18.59	18.68	1.87	17.77
2	53.59	0.53	18.75	18.86	18.63	18.83	1.88	16.18
3	62.54	0.61	18.94	18.79	18.82	18.83	1.88	18.65
4	54.73	0.54	18.56	18.95	18.91	18.82	1.88	16.41
5	57.54	0.56	18.82	18.83	18.68	18.69	1.88	17.41
6	57.05	0.56	19.09	18.90	18.86	18.90	1.89	16.76
7	48.67	0.48	18.71	18.79	18.83	19.04	1.88	14.52
8	61.04	0.60	18.42	18.63	18.95	18.92	1.87	18.54
9	55.61	0.54	18.77	18.53	18.92	18.90	1.88	16.76
10	56.74	0.56	18.70	18.51	18.89	18.73	1.87	17.30
11	59.08	0.58	18.69	18.72	18.94	18.77	1.88	17.80
12	61.95	0.61	18.97	18.61	18.54	18.96	1.88	18.70
13	53.98	0.53	18.79	18.57	18.67	19.15	1.88	16.23
14	57.82	0.57	18.78	18.71	18.88	18.75	1.88	17.42
15	55.48	0.54	18.55	18.77	18.70	18.51	1.86	17.12
16	53.57	0.52	18.91	18.91	19.00	18.91	1.89	15.75
17	62.91	0.62	18.84	18.94	18.87	18.84	1.89	18.68
18	63.68	0.62	18.49	18.88	18.45	18.73	1.86	19.63
19	63.99	0.63	18.82	18.83	19.07	18.82	1.89	18.96
20	63.48	0.62	18.72	18.83	19.05	18.89	1.89	18.85
21	53.04	0.52	19.01	18.62	18.98	18.84	1.89	15.77
22	61.22	0.60	18.74	18.89	19.04	19.04	1.89	18.02
23	57.25	0.56	18.81	18.97	18.74	18.67	1.88	17.20
24	62.72	0.61	18.03	19.11	18.80	18.93	1.87	19.09

ตารางที่ ก.8 ผลการทดสอบความทนแรงดัดแสดงน้ำหนักกดและเส้นผ่าศูนย์กลางของชิ้นงานทดสอบสูตร SEV 2.5/0.5 อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส 12 ชั่วโมง (ต่อ)

ชิ้นงาน	น้ำหนักกด (kgf)	น้ำหนักกด (kN)	เส้นผ่าศูนย์กลาง (mm)				เส้นผ่า ศูนย์กลาง เฉลี่ย (cm)	ความทน แรงดัด (MPa)
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4		
25	55.5	0.544	17.97	18.18	17.98	18.09	1.81	18.82
26	61.36	0.601	18.35	18.11	18.17	18.1	1.82	20.37
27	78.17	0.766	18.26	18.38	18.39	18.35	1.83	25.27
28	54.02	0.529	18.15	18.23	18.9	18.48	1.84	17.19
29	66.06	0.647	18.12	17.98	18.08	17.95	1.80	22.48
30	52.65	0.516	18.32	18.41	18.3	18.25	1.83	17.09
31	64.73	0.634	17.83	17.83	17.78	18.04	1.79	22.64
32	73.39	0.719	18.4	18	18.42	18.6	1.84	23.68
33	57.9	0.567	18.12	18.13	18.15	18.28	1.82	19.26
34	67.02	0.657	18.01	18.21	18.2	18.01	1.81	22.53
35	73.93	0.725	18.12	18.19	18.09	18.15	1.81	24.73
36	58.33	0.572	18.25	18.2	18.3	18.43	1.83	19.01
37	59.37	0.582	18.29	18.36	18.34	18.25	1.83	19.30
38	70.74	0.693	18.4	18.23	18.38	18.32	1.83	22.91
39	58.84	0.577	18.4	18.59	18.43	18.6	1.85	18.53
40	70.43	0.690	18.55	18.2	18.42	18.46	1.84	22.53
41	47.75	0.468	18.46	18.23	18.34	18.42	1.84	15.39
42	64.13	0.628	18.17	17.88	17.96	18.14	1.80	21.81
43	74.42	0.729	18.42	18.43	18.26	18.24	1.83	24.09
44	47.89	0.469	18.58	18.18	18.06	18.17	1.82	15.73
45	51.92	0.509	18.26	17.88	18.22	18.19	1.81	17.37
46	69.97	0.686	18.08	18.43	18.42	18.12	1.83	22.93
47	42.07	0.412	18.32	18.27	18.51	18.57	1.84	13.44
48	73.12	0.717	18.08	18.34	18.42	18.22	1.83	23.95
49	59.43	0.582	18.14	18.15	18.25	18.37	1.82	19.58

ตารางที่ ก.9 ผลการทดสอบความทนแรงดัดแสดงน้ำหนักกดและเส้นผ่าศูนย์กลางของชิ้นงานทดสอบสูตร
EV 3.5/0.2 อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส 12 ชั่วโมง

ชิ้นงาน	น้ำหนักกด (kgf)	น้ำหนักกด (kN)	เส้นผ่าศูนย์กลาง (mm)				เส้นผ่า ศูนย์กลาง เฉลี่ย (cm)	ความทน แรงดัด (MPa)
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4		
1	56.44	0.55	18.68	18.48	18.68	18.43	1.86	17.60
2	54.87	0.54	18.97	18.62	18.64	18.89	1.88	16.53
3	62.89	0.62	18.59	18.88	18.88	18.76	1.88	18.96
4	51.92	0.51	18.95	18.90	18.78	18.59	1.88	15.58
5	55.68	0.55	18.76	18.77	18.84	18.89	1.88	16.68
6	61.63	0.60	18.77	18.94	18.97	18.92	1.89	18.22
7	58.53	0.57	18.97	18.80	18.80	18.73	1.88	17.51
8	54.89	0.54	18.81	19.12	18.89	18.80	1.89	16.21
9	55.54	0.54	18.58	18.90	18.86	18.98	1.88	16.60
10	54.93	0.54	19.00	18.94	19.05	18.92	1.90	16.04
11	57.64	0.56	18.98	19.09	19.09	18.61	1.89	16.92
12	60.20	0.59	18.57	18.64	18.90	19.03	1.88	18.12
13	52.19	0.51	18.94	18.26	18.90	18.92	1.88	15.79
14	57.82	0.57	18.90	18.65	18.68	18.70	1.87	17.55
15	57.89	0.57	18.64	18.55	18.76	18.60	1.86	17.85
16	60.47	0.59	18.89	18.85	18.75	19.01	1.89	17.95
17	52.43	0.51	18.77	18.73	18.75	18.79	1.88	15.85
18	60.61	0.59	18.87	18.84	18.84	18.75	1.88	18.13
19	51.96	0.51	18.92	18.97	18.91	18.83	1.89	15.34
20	53.47	0.52	18.70	18.60	18.68	18.44	1.86	16.57
21	51.31	0.50	18.88	18.63	18.83	18.95	1.88	15.36
22	58.61	0.57	18.65	19.02	19.03	18.73	1.89	17.44
23	58.14	0.57	18.76	18.75	18.67	18.67	1.87	17.71
24	59.16	0.58	18.87	19.07	19.17	18.89	1.90	17.21

ตารางที่ ก.9 ผลการทดสอบความทนแรงดัดแสดงน้ำหนักกดและเส้นผ่าศูนย์กลางของชิ้นงานทดสอบสูตร
EV 3.5/0.2 อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส 12 ชั่วโมง (ต่อ)

ชิ้นงาน	น้ำหนักกด (kgf)	น้ำหนักกด (kN)	เส้นผ่าศูนย์กลาง (mm)				เส้นผ่า ศูนย์กลาง เฉลี่ย (cm)	ความทน แรงดัด (MPa)
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4		
25	81.36	0.80	18.86	18.82	19.19	19.20	1.90	23.61
26	42.54	0.42	18.80	18.73	18.71	18.71	1.87	12.90
27	64.70	0.63	19.10	18.73	18.83	18.91	1.89	19.15
28	45.51	0.45	18.53	18.52	18.85	18.78	1.87	13.96
29	61.50	0.60	18.53	18.59	18.77	18.59	1.86	19.01
30	53.83	0.53	18.70	18.72	18.70	18.65	1.87	16.45
31	40.10	0.39	18.70	18.39	18.56	18.61	1.86	12.51
32	34.32	0.34	18.72	18.71	18.87	18.74	1.88	10.37
33	55.46	0.54	18.99	18.87	18.90	18.84	1.89	16.39
34	58.06	0.57	18.67	18.66	18.79	18.73	1.87	17.68
35	53.61	0.53	19.21	19.09	19.04	19.10	1.91	15.33
36	57.03	0.56	18.60	18.50	18.97	18.84	1.87	17.33
37	63.96	0.63	18.77	18.77	18.74	18.72	1.88	19.36
38	56.21	0.55	18.64	18.52	18.70	18.52	1.86	17.45
39	62.64	0.61	18.90	18.81	18.77	18.77	1.88	18.78
40	60.02	0.59	18.69	18.71	18.80	18.71	1.87	18.24
41	62.87	0.62	18.76	18.69	18.70	18.77	1.87	19.09
42	53.45	0.52	18.55	18.68	18.62	18.73	1.86	16.46
43	51.29	0.50	18.56	18.46	18.72	18.60	1.86	15.95
44	51.78	0.51	18.87	18.87	18.88	18.85	1.89	15.39
45	54.81	0.54	18.57	18.63	18.60	18.58	1.86	17.01
46	60.22	0.59	18.80	18.79	18.65	18.83	1.88	18.18

ตารางที่ ก.10 ผลการทดสอบความทนแรงดัดแสดงน้ำหนักกดและเส้นผ่าศูนย์กลางของชิ้นงานทดสอบสูตร
EV 2.5/0.2 อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส 12 ชั่วโมง

ชิ้นงาน	น้ำหนักกด (kgf)	น้ำหนักกด (kN)	เส้นผ่าศูนย์กลาง (mm)				เส้นผ่า ศูนย์กลาง เฉลี่ย (cm)	ความทน แรงดัด (MPa)
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4		
1	51.03	0.50	18.31	18.61	18.83	18.42	1.85	15.97
2	58.78	0.58	18.97	18.92	18.89	18.83	1.89	17.37
3	54.73	0.54	18.68	18.97	18.58	18.83	1.88	16.53
4	59.08	0.58	18.79	18.69	18.76	18.80	1.88	17.86
5	57.86	0.57	18.93	18.74	18.85	18.77	1.88	17.32
6	61.42	0.60	18.74	18.86	18.83	19.13	1.89	18.18
7	58.94	0.58	18.91	18.79	18.91	18.77	1.88	17.58
8	57.15	0.56	18.83	18.92	18.78	18.95	1.89	16.97
9	58.29	0.57	18.82	18.79	18.82	18.79	1.88	17.49
10	50.50	0.49	18.64	18.69	18.70	18.62	1.87	15.50
11	52.06	0.51	18.63	18.92	18.59	18.78	1.87	15.81
12	60.61	0.59	18.93	18.69	18.68	18.97	1.88	18.15
13	55.58	0.54	18.54	18.67	19.02	18.71	1.87	16.87
14	52.35	0.51	18.85	18.87	18.70	18.84	1.88	15.69
15	56.56	0.55	18.79	18.87	18.86	18.86	1.88	16.87
16	60.61	0.59	18.90	18.97	19.06	19.17	1.90	17.57
17	57.03	0.56	18.49	18.71	18.70	18.81	1.87	17.47
18	63.33	0.62	18.83	18.63	18.54	18.82	1.87	19.31
19	50.48	0.49	18.94	18.59	18.86	18.65	1.88	15.26
20	49.21	0.48	18.74	18.89	18.87	18.81	1.88	14.71
21	63.28	0.62	18.59	18.88	18.62	18.54	1.87	19.44
22	49.70	0.49	18.78	18.99	18.68	18.87	1.88	14.86
23	53.85	0.53	18.75	18.76	18.67	18.65	1.87	16.41
24	56.34	0.55	18.97	19.08	18.98	18.92	1.90	16.42

ตารางที่ ก.10 ผลการทดสอบความทนแรงดัดแสดงน้ำหนักกดและเส้นผ่าศูนย์กลางของชิ้นงานทดสอบสูตร
EV 2.5/0.2 อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส 12 ชั่วโมง (ต่อ)

ชิ้นงาน	น้ำหนักกด (kgf)	น้ำหนักกด (kN)	เส้นผ่าศูนย์กลาง (mm)				เส้นผ่า ศูนย์กลาง เฉลี่ย (cm)	ความทน แรงดัด (MPa)
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4		
25	66.39	0.65	18.66	18.18	18.78	18.41	1.85	20.90
26	54.16	0.53	18.37	18.85	18.78	18.80	1.87	16.53
27	48.16	0.47	18.23	18.20	18.36	18.14	1.82	15.86
28	58.13	0.57	18.88	18.63	18.97	19.04	1.89	17.24
29	58.02	0.57	18.67	18.61	18.87	18.76	1.87	17.63
30	56.57	0.55	18.69	18.79	18.74	18.81	1.88	17.11
31	56.11	0.55	18.62	18.62	18.71	18.68	1.87	17.24
32	53.53	0.52	18.66	18.60	18.65	18.71	1.87	16.45
33	68.38	0.67	18.68	18.91	18.73	18.88	1.88	20.54
34	63.13	0.62	18.80	18.77	18.91	18.88	1.88	18.84
35	54.36	0.53	18.53	18.53	18.47	18.57	1.85	17.06
36	52.78	0.52	18.65	18.78	18.41	18.80	1.87	16.21
37	59.79	0.59	18.74	18.62	18.80	18.73	1.87	18.18
38	63.25	0.62	18.65	18.87	18.84	18.80	1.88	19.03
39	60.20	0.59	18.60	18.69	18.60	18.97	1.87	18.33
40	54.79	0.54	18.44	18.52	18.53	18.52	1.85	17.26
41	61.08	0.60	18.75	18.47	18.39	18.50	1.85	19.17
42	63.96	0.63	18.93	18.87	18.88	18.60	1.88	19.15
43	67.92	0.67	18.59	18.56	18.74	18.53	1.86	21.05
44	60.49	0.59	18.32	18.37	18.23	18.28	1.83	19.70
45	72.08	0.71	18.75	18.76	18.71	18.47	1.87	22.09
46	66.18	0.65	18.91	19.06	18.88	18.81	1.89	19.52
47	49.91	0.49	18.79	18.59	18.93	18.70	1.88	15.10
48	54.61	0.54	18.64	18.84	18.87	18.82	1.88	16.42
49	58.86	0.58	18.44	18.20	18.90	18.73	1.86	18.35

ภาคผนวก ข
ผลการทดสอบความทนแรงดัด

ตารางที่ ข.1 ผลการทดสอบความทนแรงดัดแสดงน้ำหนักกดและเส้นผ่าศูนย์กลางของชิ้นงานทดสอบสูตร CV 1/1.5 อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส 12 ชั่วโมง เมื่อใช้ปริมาณน้ำยางคอมพาวนด์ร้อยละ 3

ชิ้นงาน	น้ำหนักกด (kg)	เส้นผ่าศูนย์กลาง (cm)					ความทนแรงดัด (MPa)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	เฉลี่ย	
1	37.60	1.861	1.887	1.887	1.890	1.88	11.27
2	42.79	1.888	1.895	1.877	1.887	1.89	12.71
3	40.79	1.875	1.875	1.874	1.880	1.88	12.33
4	36.93	1.859	1.852	1.863	1.827	1.85	11.64
5	42.15	1.875	1.860	1.875	1.870	1.87	12.86
6	41.52	1.853	1.857	1.865	1.907	1.87	12.66
7	42.66	1.899	1.894	1.809	1.888	1.87	12.97
8	39.55	1.885	1.882	1.859	1.875	1.88	11.97
9	41.48	1.861	1.861	1.854	1.852	1.86	12.93
10	36.44	1.887	1.889	1.892	1.889	1.89	10.78
11	46.16	1.870	1.899	1.899	1.869	1.88	13.77
12	41.30	1.849	1.857	1.855	1.846	1.85	12.98
13	41.20	1.905	1.891	1.888	1.888	1.89	12.12
14	40.38	1.848	1.854	1.833	1.840	1.84	12.86
15	40.14	1.853	1.864	1.855	1.850	1.86	12.54
16	48.28	1.885	1.883	1.900	1.905	1.89	14.20
17	42.11	1.911	1.899	1.903	1.923	1.91	12.08
18	44.80	1.868	1.858	1.886	1.907	1.88	13.46
19	45.33	1.847	1.840	1.857	1.813	1.84	14.54
20	46.96	1.901	1.897	1.908	1.917	1.91	13.54

ตารางที่ ข.2 ผลการทดสอบความทนแรงดัดแสดงน้ำหนักกดและเส้นผ่าศูนย์กลางของชิ้นงานทดสอบสูตร CV 1/1.5 อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส 12 ชั่วโมง เมื่อใช้ปริมาณน้ำยางคอมพาวนด์ร้อยละ 5

ชิ้นงาน	น้ำหนักกด (kg)	เส้นผ่าศูนย์กลาง (cm)					ความทนแรงดัด (MPa)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	เฉลี่ย	
1	56.84	1.851	1.840	1.850	1.848	1.85	18.00
2	52.31	1.861	1.841	1.869	1.863	1.86	16.26
3	51.82	1.896	1.873	1.851	1.850	1.87	15.88
4	48.65	1.854	1.846	1.830	1.863	1.85	15.38
5	54.16	1.870	1.879	1.873	1.878	1.88	16.40
6	52.59	1.860	1.836	1.841	1.842	1.84	16.72
7	58.63	1.862	1.870	1.865	1.862	1.86	18.04
8	48.89	1.834	1.842	1.833	1.829	1.83	15.80
9	53.32	1.856	1.857	1.863	1.840	1.85	16.70
10	46.06	1.871	1.849	1.835	1.845	1.85	14.52
11	54.18	1.860	1.858	1.857	1.879	1.86	16.71
12	50.48	1.846	1.856	1.841	1.847	1.85	15.97
13	56.17	1.903	1.852	1.865	1.845	1.87	17.25
14	47.63	1.857	1.852	1.853	1.863	1.86	14.86
15	50.64	1.902	1.909	1.902	1.900	1.90	14.66
16	55.34	1.846	1.841	1.845	1.855	1.85	17.53
17	53.24	1.847	1.840	1.860	1.840	1.85	16.87
18	55.50	1.836	1.845	1.868	1.868	1.85	17.37
19	47.83	1.893	1.898	1.893	1.881	1.89	14.11
20	54.34	1.882	1.857	1.881	1.866	1.87	13.54

ตารางที่ ข.3 ผลการทดสอบความทนแรงดัดแสดงน้ำหนักกดและเส้นผ่าศูนย์กลางของชิ้นงานทดสอบสูตร CV 1/1.5 อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส 12 ชั่วโมง เมื่อใช้ปริมาณน้ำยางคอมพาวนด์ร้อยละ 7

ชิ้นงาน	น้ำหนักกด (kg)	เส้นผ่าศูนย์กลาง (cm)					ความทนแรงดัด (MPa)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	เฉลี่ย	
1	68.46	1.826	1.813	1.831	1.826	1.82	22.51
2	52.92	1.831	1.815	1.809	1.831	1.82	17.47
3	58.13	1.822	1.802	1.804	1.816	1.81	19.53
4	53.30	1.820	1.815	1.831	1.823	1.82	17.58
5	62.30	1.807	1.803	1.801	1.811	1.81	21.12
6	60.61	1.833	1.831	1.844	1.848	1.84	19.45
7	64.66	1.851	1.852	1.865	1.888	1.86	19.92
8	52.19	1.831	1.843	1.856	1.881	1.85	16.38
9	56.86	1.810	1.819	1.814	1.813	1.81	19.01
10	58.43	1.820	1.810	1.803	1.815	1.82	19.50
11	58.57	1.810	1.818	1.818	1.831	1.82	19.41
12	61.73	1.793	1.822	1.817	1.802	1.81	20.83
13	62.05	1.839	1.834	1.813	1.831	1.83	20.23
14	67.67	1.800	1.828	1.817	1.803	1.81	22.70
15	61.44	1.831	1.856	1.839	1.842	1.84	19.62
16	71.76	1.809	1.809	1.806	1.836	1.82	23.95
17	67.00	1.842	1.853	1.839	1.841	1.84	21.33
18	62.64	1.843	1.852	1.849	1.863	1.85	19.69
19	63.27	1.865	1.861	1.868	1.865	1.86	19.28
20	66.45	1.852	1.861	1.856	1.857	1.86	20.73

ภาคผนวก ค
ผลการทดสอบความทนการกัดถูสึก

ตารางที่ ค.1 แสดงค่าความยาวรอยสึก และปริมาตรที่ถูกกัดออกของชิ้นงานทั้งหมด

สูตร	ชิ้นงานที่	ความยาวของรอยสึก (mm)	ปริมาตรที่ถูกกัดออก (mm ³)
CV 0.5 : 2.5	1	53.34	1293
	2	50.80	1114
	3	53.53	1307
	4	50.88	1120
	5	56.03	1502
	6	54.16	1354
CV 0.5 : 1.5	1	55.86	1488
	2	52.95	1264
	3	55.96	1496
	4	38.57	484
	5	42.72	659
	6	53.94	1338
CV 1 : 2.5	1	51.52	1163
	2	53.43	1299
	3	51.44	1158
	4	50.90	1121
	5	52.15	1207
	6	49.70	1043
CV 1 : 1.5	1	50.48	1093
	2	48.93	994
	3	51.75	1179

ตารางที่ ค.1 แสดงค่าความยาวรอยลึก และปริมาตรที่ถูกกัดออกของชิ้นงานทั้งหมด (ต่อ)

สูตร	ชั้นงานที่	ความยาวของรอยลึก (mm)	ปริมาตรที่ถูกกัดออก (mm ³)
SEV 1.5 : 1.2	1	52.44	1227
	2	54.37	1370
	3	53.92	1336
	4	40.23	549
	5	44.04	722
	6	52.11	1204
SEV 2.5 : 1.2	1	53.36	1294
	2	54.97	1417
	3	53.74	1322
	4	52.10	1203
	5	44.05	723
	6	44.65	753
SEV 1.5 : 0.5	1	54.56	1385
	2	53.70	1319
	3	54.04	1345
	4	43.61	701
	5	51.90	1189
	6	54.31	1366
SEV 2.5 : 0.5	1	54.88	1410
	2	56.60	1549
	3	54.76	1400
	4	55.60	1467
	5	56.49	1540
	6	54.38	1371

ตารางที่ ค.1 แสดงค่าความยาวรอยลึก และปริมาตรที่ถูกขจัดออกของชั้นงานทั้งหมด (ต่อ)

สูตร	ชั้นงานที่	ความยาวของรอยลึก (mm)	ปริมาตรที่ถูกขจัดออก (mm ³)
EV 2.5 : 0.2	1	54.13	1352
	2	56.68	1556
	3	49.74	1045
	4	54.54	1383
	5	54.55	1384
	6	59.37	1792
EV 3.5 : 0.2	1	55.90	1491
	2	56.73	1560
	3	55.81	1484
	4	55.19	1434
	5	56.92	1576
	6	52.34	1220

ภาคผนวก ง

ผลการทดสอบการบวมพองของน้ำยางคอมพาวนด์

ตารางที่ ง.1 น้ำหนัก และระยะเวลาในการแช่โทลูอีน ของชิ้นทดสอบสำหรับระบบการคงรูปด้วย
 กำมะถันแบบปกติ

เวลาแช่ (ชั่วโมง)	น้ำหนักที่ชั่งได้ (กรัม)							
	CV 0.5 : 2.5		CV 0.5 : 1.5		CV 1 : 2.5		CV 1 : 1.5	
	ชิ้นที่ 1	ชิ้นที่ 2	ชิ้นที่ 1	ชิ้นที่ 2	ชิ้นที่ 1	ชิ้นที่ 2	ชิ้นที่ 1	ชิ้นที่ 2
0.00	0.1552	0.1567	0.1606	0.1613	0.1550	0.1510	0.1733	0.1825
1.00	0.8337	0.8050	0.8744	0.8112	0.8031	0.7669	0.8729	0.8334
2.00	1.0451	1.0134	1.1227	1.0770	0.9775	0.9788	1.0701	1.1501
4.00	1.2366	1.1630	1.3611	1.3201	1.1821	1.1601	1.4032	1.4731
6.00	1.3098	1.2587	1.3925	1.4198	1.2330	1.2156	1.5381	1.5766
19.00	1.2781	1.2887	1.3665	1.3690	1.2245	1.1989	1.4702	1.4994
23.30	1.2785	1.2931	1.3706	1.3684	1.2221	1.2055	1.4745	1.4705
26.00	1.2794	1.3093	1.3782	1.3593	1.2260	1.2052	1.4747	1.4751
28.30	1.2863	1.3110	1.3735	1.3566	1.2239	1.2068	1.4672	1.4585
33.00	1.2823	1.3050	1.3464	1.3492	1.2222	1.2002	1.4443	1.4577
44.00	1.2844	1.2030	1.3463	1.3506	1.2185	1.2061	1.4052	1.4527
51.30	1.2985	1.3040	1.3425	1.3460	1.2230	1.2045	1.4006	1.3942
70.00	1.2940	1.3110	1.3461	1.3515	1.2229	1.1956	1.3470	1.3988
77.00	1.2965	1.3192	1.3186	1.3280	1.2260	1.2177	1.3277	1.3361
102.30	1.2920	1.3249	1.3266	1.3290	1.2322	1.2175	1.2894	1.3033
119.30	1.2770	1.3068	1.3121	1.3189	1.2310	1.1998	1.2325	1.2603
144.00	1.2210	1.2974	1.3021	1.3005	1.2307	1.2122	1.1411	1.2290
169.30	1.2168	1.2920	1.3024	1.2894	1.2282	1.2120	1.0973	1.2012
218.30	1.1910	1.2682	1.2971	1.2707	1.1800	1.2164	1.0965	1.1287

ตารางที่ ง.2 น้ำหนัก และระยะเวลาในการแช่โทลูอิน ของชิ้นทดสอบสำหรับระบบการคงรูป ด้วยกำมะถัน
แบบกึ่งประสิทธิภาพ

เวลาแช่ (ชั่วโมง)	น้ำหนักที่ชั่งได้ (กรัม)							
	SEV 1.5 : 1.2		SEV 2.5 : 1.2		SEV 1.5 : 0.5		SEV 2.5 : 0.5	
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2
0.00	0.1484	0.1542	0.1616	0.1705	0.1364	0.1441	0.1699	0.1757
1.00	0.7737	0.7771	1.2080	0.9248	0.5973	0.6590	1.0657	1.0430
2.00	1.0623	1.0928	1.4091	1.6303	0.8962	0.9870	1.5140	1.5155
4.00	1.3201	1.3803	1.8105	2.4081	1.2002	1.2817	1.9703	1.9660
6.00	1.3604	1.4481			1.2104	1.2920	2.4466	2.5033
19.00	1.3242	1.3709			1.1463	1.2148	2.3692	2.4745
23.30	1.2981	1.3252			1.1232	1.1836	2.3115	2.3417
26.00	1.2991	1.3255			1.1223	1.1730	2.2995	2.3172
28.30	1.2865	1.3106			1.1057	1.1413	2.1789	2.2395
33.00	1.2650	1.2862			1.0833	1.1283	2.1455	2.2190
44.00	1.2621	1.2832			1.0553	1.1180	2.0841	2.1754
51.30	1.2469	1.2816			1.0388	1.1185	2.0634	2.1824
70.00	1.2437	1.2636			1.0395	1.1006	2.0452	2.1527
77.00	1.2300	1.2621			1.0257	1.0867	2.0155	2.0775
102.30	1.1940	1.2225			0.9966	1.0925	1.9816	2.0237
119.30	1.1385	1.1430			0.9682	1.0380	1.8485	1.9676
144.00	1.1282	1.1169			0.9655	1.0341	1.8082	1.8249
169.30	1.1067	1.0912			0.9565	0.9970	1.7219	1.8090
218.30	1.0912	0.9795			0.9367	0.9529	1.6768	1.5755

ตารางที่ ง.3 น้ำหนัก และระยะเวลาในการแช่โทลูอีน ของชิ้นทดสอบสำหรับระบบการคงรูปด้วยกำมะถัน
แบบประสิทธิภาพ

เวลาแช่ (ชั่วโมง)	น้ำหนักที่ชั่งได้ (กรัม)			
	EV 2.5 : 0.2		EV 3.5 : 0.2	
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2
0.00	0.1286	0.1531	0.1560	0.1595
1.00	1.0459	1.0960	1.3407	1.2692
2.00	1.4133	1.1044	1.8383	1.7808
4.00	1.8402	1.3863	2.4635	2.3850
6.00	1.8847		3.0875	3.0283
19.00			3.4915	3.4748
23.30			3.4592	3.3782
26.00			3.4952	3.3085
28.30			3.5004	3.3073
33.00			3.4763	3.2920
44.00			3.3929	3.2506
51.30			3.3491	3.2109
70.00			3.3375	3.1766
77.00			3.3294	3.1795
102.30			3.3164	3.1450
119.30			3.2918	3.1371
144.00			3.2716	3.1240
169.30			3.2660	3.0841
218.30			2.9419	2.7874