

การพัฒนากระบวนการผลิตยางคอมปาวด์สายพานลำเลียงอาหารชนิดใหม่
แบบประหยัดพลังงาน

NOVEL FOODSTUFF CONVEYOR BELTS COMPOUND FOR ENERGY SAVING
ON THE DEVELOPMENT FOR MANUFACTURING PROCESS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2561

KMITL-2018-EN-D-218-146

การพัฒนากระบวนการผลิตยางคอมปาวด์สายพานลำเลียงอาหารชนิดใหม่
แบบประหยัดพลังงาน

NOVEL FOODSTUFF CONVEYOR BELTS COMPOUND FOR ENERGY SAVING
ON THE DEVELOPMENT FOR MANUFACTURING PROCESS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2561
KMITL-2018-EN-D-218-146

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพัฒนากระบวนการผลิตยางคอมปาวด์สายพานลำเลียงอาหารชนิดใหม่
แบบประหยัดพลังงาน

NOVEL FOODSTUFF CONVEYOR BELTS COMPOUND FOR ENERGY SAVING
ON THE DEVELOPMENT FOR MANUFACTURING PROCESS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2561
KMITL-2018-EN-D-218-146

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NOVEL FOODSTUFF CONVEYOR BELTS COMPOUND FOR ENERGY
SAVING ON THE DEVELOPMENT FOR MANUFACTURING PROCESS



SUPHATCHAKORN LIMHENGHA

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ENGINEERING IN INDUSTRIAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2018
KMITL-2018-EN-D-218-146

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2018

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การพัฒนากระบวนการผลิตยางคอมปาวด์สายพานลำเลียงอาหารชนิดใหม่แบบประหยัดพลังงาน
นักศึกษา นายศุภัสชกรณ์ หลิมเฮงฮะ
รหัสประจำตัว 56601390
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ
พ.ศ. 2561
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภู ศรีสืบสาย

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอองค์ความรู้เกี่ยวกับการนำเทคโนโลยีกระบวนการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟมาประยุกต์ใช้ในการอุ่นยางคอมปาวด์สายพานลำเลียงอาหารก่อนการนำไปวัลคาไนซ์ในกระบวนการอัดขึ้นรูป เพื่อลดระยะเวลาและพลังงานไฟฟ้าในขั้นตอนการวัลคาไนซ์ พร้อมทั้งสามารถแก้ไขปัญหารอยตำหนิของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากกระบวนการอัดขึ้นรูป ซึ่งยางคอมปาวด์ที่ใช้ในการทดลองจะต้องมีสมบัติเป็นวัสดุไดอิเล็กตริกที่ประกอบด้วยยางธรรมชาติผสมกับสารตัวเติมระหว่างซิลิกา กับแมกนีเซียมคาร์บอเนต จากการทดลองพบว่ายางคอมปาวด์สายพานลำเลียงอาหารที่ได้จากวัตถุดิบยางธรรมชาติ ENR50 อัตราส่วน 100 phr ใส่สารตัวเติมผสมและมีปริมาณกำมะถัน 1.0 phr นั้น เป็นสูตรยางคอมปาวด์ที่เหมาะสมที่สุด ที่จะนำไปอุ่นด้วยพลังงานไมโครเวฟ 340 วัตต์ ที่คลื่นความถี่ 2.45 GHz เป็นเวลา 1 นาที ก่อนนำไปอัดขึ้นรูปด้วยระบบไฮดรอลิกที่อุณหภูมิ 150°C และใช้เวลาที่ 50% ของระยะเวลาวัลคาไนซ์ ผลที่ได้พบว่าพันธะโมเลกุลของยางคอมปาวด์มีความหนาแน่นในการเชื่อมโยงที่ดี สมบัติทางกายภาพและทางกลผ่านตามเกณฑ์มาตรฐาน พร้อมทั้งมีราคาต้นทุนวัตถุดิบของยางคอมปาวด์ที่ต่ำ สามารถลดเวลาที่ใช้ในการวัลคาไนซ์และลดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่อรอบการผลิตได้ดีกว่า เมื่อเทียบกับระบบการวัลคาไนซ์ที่ไม่ได้มีการอุ่นให้ความร้อน ในลำดับต่อมาได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการลงทุนโครงการการพัฒนากระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์สายพานลำเลียงอาหารชนิดใหม่แบบประหยัดพลังงาน โดยใช้พลังงานไมโครเวฟร่วมกับวิธีให้ความร้อนแบบดั้งเดิม ซึ่งได้ประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์สายพานลำเลียงอาหารที่ประกอบด้วยจำนวนชั้นผ้าโพลีเอสเตอร์ 3 ชั้น และได้ปรับใช้พลังงานไมโครเวฟในการอุ่น 300 วัตต์ ที่คลื่นความถี่ 2.45 GHz ระยะเวลา 2 นาที ก่อนขั้นตอนการอัดขึ้นรูปด้วยระบบไฮดรอลิกที่อุณหภูมิ 150°C เวลา 5 นาที ผลที่ได้ปรากฏว่าสามารถลดเวลาที่ใช้ในการอบสุกยางและสามารถลดพลังงานไฟฟ้าได้ 30.00% และ 49.20% ต่อรอบการผลิตตามลำดับเมื่อเทียบกับระบบการวัลคาไนซ์ที่ไม่ได้มีการอุ่นให้ความร้อน ซึ่งพบว่าคุณสมบัติทางกายภาพและทางกลของผลิตภัณฑ์ไม่เปลี่ยนแปลง พร้อมทั้งได้กำหนดระยะเวลาโครงการลงทุนที่ระยะเวลา 5 ปี เงินลงทุนทั้งสิ้น 16,500,000 บาท และโครงการมีกำลังการผลิต 102,000 เมตรต่อปี เมื่อทำการวิเคราะห์ผลตอบแทนการลงทุน มูลค่าปัจจุบันสุทธิ และระยะเวลาคืนทุน เท่ากับ 61.09%, 34,798,398.69 บาท และเป็นเวลา 1 ปี 10 เดือน ตามลำดับ ดังนั้นโครงการนี้เหมาะสมที่จะนำไปพิจารณาลงทุนในภาคอุตสาหกรรมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	NOVEL FOODSTUFF CONVEYOR BELTS COMPOUND FOR ENERGY SAVING ON THE DEVELOPMENT FOR MANUFACTURING PROCESS
Student	Mr. Suphatchakorn Limhengha
Student ID.	56601390
Degree	Doctor of Engineering
Program	Industrial Engineering
Year	2018
Thesis Advisor	Asst.Prof.Dr. Wipoo Sriseubsai

ABSTRACT

This thesis presents a technology of microwave power heating process that is applied for preheating of foodstuff conveyer belts compound (FCBc). The FCBc becomes dielectric with the content of natural rubber and fillers (silica and magnesium carbonate) prior to being vulcanized in a hydraulic molding press machine in order to minimize the processing time and energy during the vulcanization period and reduce a problem of scars caused by the molding press process. The tested results show that the FCBc obtained from ENR50 mixed with fillers of 100 phr and sulfur of 1.0 phr is the suitable combination for preheating in microwave 340 watts, the frequency of 2.45 GHz for 1 minute prior to the hydraulic molding press at 150°C and 50% of curing time. The compounding shows good density of molecule crosslink as well as qualified physical and mechanical properties while having a low cost of the raw material, heating time and cycle of production energy when compared with a non-preheating system. The next step is to study a possibility in investing on FCBc for energy saving on the development for manufacturing processes using microwave power with the traditional heating method. This study is applied in the manufacture of a foodstuff conveyer belt production where the content is 3 layers of polyester, and 300 watts, 2.45 GHz, 2 minutes prior to the hydraulic molding press at 150°C and 5 minutes of a vulcanized and 30.00% reduction of heating time, 49.20% reduction of production energy when compared with a non-preheating system and without changing the physical and mechanical properties of the product. An investment project is set for 5 years with the capital of 16,500,000 Baht and a production capacity of 102,000 meter/year. Through an analysis, the Internal Rate of Return is 61.09%; Net Present Value is 34,798,398.69 Baht while the Payback Period is within one year and 10 months. Therefore, it can be concluded that this FCBc for energy saving product of the above capacity is appropriate for a commercial operation of private sectors.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เรื่อง “การพัฒนากระบวนการผลิตยางคอมปาวด์สายพานลำเลียงอาหารชนิดใหม่แบบประหยัดพลังงาน” สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี จะต้องอาศัยแหล่งความรู้ต่างๆ ทั้งจากคำแนะนำ และการให้คำปรึกษา ทั้งในภาคทฤษฎีและภาคปฏิบัติจากบุคคลและคณะบุคคลต่างๆ ที่ขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ดังนี้

1. บิดา มารดา ผู้ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ทุกสถาบันการศึกษาที่เคยศึกษามา ที่ให้การอบรมและสั่งสอนในสิ่งที่ดีพร้อมทั้งสิ่งที่ถูกต้อง ตลอดจนส่งเสริมในด้านการศึกษาได้อย่างดีที่สุด

2. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ผู้สนับสนุนทุนการศึกษาตลอดหลักสูตรการศึกษา

3. คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ผู้สนับสนุนทุนการนำเสนอผลงานวิจัยนานาชาติ

4. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ผู้สนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาประจำปี 2560

5. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภู ศรีสืบสาย อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ที่กรุณาให้คำปรึกษา ระหว่างดำเนินการศึกษา ตลอดจนการตรวจสอบแก้ไขเอกสาร

6. รองศาสตราจารย์ ดร.ไกรพัฒน์ จินนขจร ประธานกรรมการสอบ รองศาสตราจารย์ ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ รองประธานกรรมการสอบ รองศาสตราจารย์ ดร.สกันธ์ คล่องบุญจิต และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรัตน์ อาริรัตน์ กรรมการสอบ กรุณาให้คำปรึกษา ระหว่างดำเนินการศึกษา ตลอดจนการตรวจสอบแก้ไข และกรุณาให้คำแนะนำเพิ่มเติมเพื่อความสมบูรณ์ของการจัดทำวิทยานิพนธ์

7. คุณณพรัตน์ วิชิตชลชัย และคุณอดุลย์ ณ วิเชียร ส่วนอุตสาหกรรม สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร ที่ความอนุเคราะห์เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดสอบวิเคราะห์

8. คุณหิรัญ คงเพ็ญ บริษัท ซีพี รีเทลลิงค์ จำกัด และคุณประชา ชูผล บริษัทยูเนี่ยนเบิ้ลท์ อินดัสตรีส์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ ยาง สารเคมี อุปกรณ์ และเครื่องมือในการวิจัย

9. สำหรับคุณค่าความดีและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้เขียนขอขอบแต่ผู้มีพระคุณและทุกๆ ท่านที่ให้ความกรุณาและความอนุเคราะห์ ที่ยังมีได้กล่าวถึง

ศุภัสชกรณ์ หลิมเฮงฮะ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญภาพ.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	3
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.4 ขอบเขตของการศึกษา.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1.1 ผลิตภัณฑ์สายพานลำเลียงอาหาร.....	5
2.1.2 ยางคอมปาวด์.....	7
2.1.3 พอลิเมอร์ผสม.....	17
2.1.4 พลังงานไมโครเวฟ.....	18
2.1.5 การวิเคราะห์และประเมินโครงการ.....	20
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	23
2.2.1 สารตัวเติม สารตัวเติมผสม และยางผสมระหว่าง ENR50/STR5L ที่มีผลต่อสมบัติกายภาพของยางคอมปาวด์สายพานลำเลียงอาหาร.....	23
2.2.2 พลังงานไมโครเวฟที่มีต่อสมบัติความร้อนและสมบัติกายภาพของยางคอมปาวด์สายพานลำเลียงอาหาร.....	26
2.2.3 การวิเคราะห์การลงทุนโครงการ.....	28
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	31
3.1 วัสดุยางและสารเคมี.....	31
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ในกระบวนการผลิต.....	32
3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ในกระบวนการทดสอบและมาตรฐานการทดสอบ.....	34
3.4 การเตรียมยางคอมปาวด์และการเตรียมชิ้นตัวอย่าง.....	41
3.5 การประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตผลิตภัณฑ์สายพานลำเลียงอาหาร.....	48
3.6 เครื่องมือวิเคราะห์ตัวแบบสถิติ.....	49

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.7 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์และประเมินโครงการ.....	51
3.8 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	54
บทที่ 4 ผลและการอภิปรายผล.....	55
4.1 ผลสารตัวเติม และสารตัวเติมผสมที่มีต่อสมบัติกายภาพของยางคอมปาวด์ สายพานลำเลียงอาหาร.....	55
4.2 ผลยางผสมระหว่าง ENR50/STR5L ที่มีผลต่อสมบัติกายภาพของยางคอมปาวด์ สายพานลำเลียงอาหาร.....	63
4.3 ผลสารตัวเติมผสมที่มีต่อสมบัติความร้อนของยางคอมปาวด์สายพานลำเลียงอาหาร ที่อุณหภูมิใช้งานไมโครเวฟ.....	73
4.4 ผลสารตัวเติมผสมที่มีต่อสมบัติกายภาพของยางคอมปาวด์สายพานลำเลียงอาหาร ที่อุณหภูมิใช้งานไมโครเวฟ.....	77
4.5 ผลการประยุกต์ใช้ยางคอมปาวด์สายพานลำเลียงอาหารในอุตสาหกรรมการผลิต ผลิตภัณฑ์สายพานลำเลียงอาหาร.....	86
4.6 ผลการวิเคราะห์การลงทุนโครงการ.....	97
บทที่ 5 สรุปผล.....	106
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	106
5.2 สิ่งที่ได้จากการพัฒนางานวิจัย.....	108
5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการวิจัย.....	111
เอกสารอ้างอิง.....	112
ภาคผนวก ก.....	124
ภาคผนวก ข.....	141
ภาคผนวก ค.....	153
ประวัติผู้เขียน.....	182

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่อ V ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การบวมตัวในน้ำมัน ASTM ของยางธรรมชาติ และยางธรรมชาติอีพ็อกซีไดซ์ เมื่อแช่ในน้ำมันเป็นเวลา 70 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 100°C.....	10
3.1 สัดส่วนผสมสูตรยางคอมปาวด์ 1	42
3.2 สัดส่วนผสมสูตรยางคอมปาวด์ 2	44
3.3 สัดส่วนผสมสูตรยางคอมปาวด์ 3	45
4.1 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของ ENR50 และ STR5L กับสารตัวเติมและสารตัวเติมผสม.....	55
4.2 สมบัติเชิงกลของของยางวัลคาไนซ์ ENR50 และ STR5L กับสารตัวเติมและสารตัวเติมผสม	56
4.3 สมบัติไดอิเล็กตริกของยางวัลคาไนซ์ ENR50 และ STR5L กับสารตัวเติมและสารตัวเติมผสม	59
4.4 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางผสมระหว่าง ENR50/STR5L กับสารตัวเติมผสม.....	63
4.5 สมบัติไดอิเล็กตริกของยางวัลคาไนซ์ผสมระหว่าง ENR50/STR5L กับสารตัวเติมผสม.....	64
4.6 สมบัติไดอิเล็กตริกของ FCBC ใส่และไม่ใส่สารตัวเติมผสมเมื่อไม่ผ่านพลังงานไมโครเวฟ.....	73
4.7 สมบัติไดอิเล็กตริก และค่าความลึกในการทะลุทะลวงของ FCBC ใส่และไม่ใส่สารตัวเติมผสมเมื่อไม่ผ่านพลังงานไมโครเวฟ.....	74
4.8 เปรียบเทียบราคาต้นทุนการผลิตระหว่างแบบเดิมกับแบบใหม่.....	93
4.9 ต้นทุนการผลิตผลิตภัณฑ์สายพานลำเลียงอาหารที่กำลังการผลิตต่อปีในปีแรก.....	94
4.10 จุดคุ้มทุนและปริมาณการผลิตที่จุดคุ้มทุนของกระบวนการผลิต.....	96
4.11 การกำหนดโครงสร้างการลงทุน.....	97
4.12 หนี้เงินกู้ระยะยาว.....	99
4.13 รายการจำนวนเงินผ่อนชำระเงินกู้ระยะยาวตั้งแต่ปีที่ 1-5.....	99
4.14 ค่าเสื่อมราคา.....	100
4.15 ประมาณการยอดขาย.....	100
4.16 ประมาณการต้นทุนขาย.....	101
4.17 รายการกระแสเงินสดรับสุทธิสะสมของโครงการ.....	102
4.18 ประมาณการกำไร (ขาดทุน).....	102
4.19 ประมาณการงบดุล.....	103
4.20 ประมาณการจุดคุ้มทุน.....	103
4.21 ประมาณการระยะเวลาคืนทุน.....	104
4.22 อัตราผลตอบแทนซื้อลด และมูลค่าปัจจุบันสุทธิ.....	105
ก-1 ผลทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ของ ENR50 และ STR5L กับสารตัวเติมและสารตัวเติมผสม	125
ก-2 ผลทดสอบสมบัติไดอิเล็กตริกของยางวัลคาไนซ์ ENR50 และ STR5L กับสารตัวเติมและสารตัวเติมผสม.....	125
ก-3 ผลทดสอบสมบัติการทนน้ำมันก่อนและหลังการอบเร่งด้วยความร้อนของยางวัลคาไนซ์ ENR50 และ STR5L กับสารตัวเติมและสารตัวเติมผสมคิดเป็นร้อยละของปริมาณที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อแช่ตัวอย่างในน้ำมัน IRM 903 ที่อุณหภูมิ 100°C นาน 24 ชั่วโมง.....	126

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก-4 ผลทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางผสมระหว่าง ENR50/STR5L กับสารตัวเติมผสม	126
ก-5 ผลทดสอบสมบัติไดอิเล็กตริกของยางวัลคาไนซ์ผสมระหว่าง ENR50/STR5L กับสารตัวเติมผสม.....	127
ก-6 ผลทดสอบสมบัติความแข็งก่อนและหลังการอบเร่งด้วยความร้อนของยางวัลคาไนซ์ผสมระหว่าง ENR50/STR5L กับสารตัวเติมผสม.....	127
ก-7 ผลทดสอบสมบัติความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ300 ก่อนและหลังการอบเร่งด้วยความร้อนของยางวัลคาไนซ์ผสมระหว่าง ENR50/STR5L กับสารตัวเติมผสม.....	128
ก-8 ผลทดสอบสมบัติความต้านทานแรงดึงก่อนและหลังการอบเร่งด้วยความร้อนของยางวัลคาไนซ์ผสมระหว่าง ENR50/STR5L กับสารตัวเติมผสม.....	128
ก-9 ผลทดสอบสมบัติความทนต่อแรงยืดจนขาดก่อนและหลังการอบเร่งด้วยความร้อนของยางวัลคาไนซ์ผสมระหว่าง ENR50/STR5L กับสารตัวเติมผสม.....	129
ก-10 ผลทดสอบสมบัติการทนน้ำมันก่อนและหลังการอบเร่งด้วยความร้อนของยางวัลคาไนซ์ผสมระหว่าง ENR50/STR5L กับสารตัวเติมผสม คิดเป็นร้อยละของปริมาณที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อแช่ตัวอย่างในน้ำมัน IRM 903 ที่อุณหภูมิ 100°C นาน 24 ชั่วโมง.....	129
ก-11 ผลทดสอบสมบัติความร้อนสะสมก่อนการอบเร่งด้วยความร้อนของยางวัลคาไนซ์ผสมระหว่าง ENR50/STR5L กับกับสารตัวเติมผสม.....	130
ก-12 ผลทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ของ FCBC ใส่และไม่ใส่สารตัวเติมผสม ปริมาณสารวัลคาไนซ์ที่ต่างกัน เมื่อไม่ผ่านพลังงานไมโครเวฟ.....	130
ก-13 ผลทดสอบสมบัติไดอิเล็กตริกของ FCBC ใส่และไม่ใส่สารตัวเติมผสม ปริมาณสารวัลคาไนซ์ที่ต่างกัน เมื่อไม่ผ่านพลังงานไมโครเวฟ.....	131
ก-14 ผลทดสอบอุณหภูมิของ FCBC ใส่และไม่ใส่สารตัวเติมผสม ที่เวลาต่างกัน เมื่อไม่ผ่านและผ่านพลังงานไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ต่างกัน.....	131
ก-15 ผลทดสอบอุณหภูมิของ FCBC ใส่และไม่ใส่สารตัวเติมผสม ที่ความหนาของชั้นตัวอย่างต่างกัน และที่เวลาต่างกัน เมื่อผ่านพลังงานไมโครเวฟที่ 850 วัตต์.....	132
ก-16 ผลทดสอบสมบัติความหนาแน่นพินระของ FCBC ใส่และไม่ใส่สารตัวเติมผสม ปริมาณสารวัลคาไนซ์ที่ต่างกัน เมื่อไม่ผ่านและผ่านพลังงานไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ต่างกัน.....	133
ก-17 ผลทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ของ FCBC ใส่สารตัวเติมผสม และปริมาณกำมะถันที่ 1.0 phr เมื่อนำไปผ่านการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟที่ 0, 340 และ 850 วัตต์...	134
ก-18 ผลทดสอบสมบัติความแข็งก่อนและหลังการอบเร่งด้วยความร้อนของ FCBC ใส่และไม่ใส่สารตัวเติมผสม เมื่อไม่ผ่านและผ่านพลังงานไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ต่างกัน.....	134
ก-19 ผลทดสอบสมบัติความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ300 ก่อนและหลังการอบเร่งด้วยความร้อนของ FCBC ใส่และไม่ใส่สารตัวเติมผสม เมื่อไม่ผ่านและผ่านพลังงานไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ต่างกัน.....	135

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก-20 ผลทดสอบสมบัติความต้านทานแรงดึงก่อนและหลังการอบเร่งด้วยความร้อนของ FCBC ใส่และไม่ใส่สารตัวเติมผสม เมื่อไม่ผ่านและผ่านพลังงานไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ต่างกัน....	136
ก-21 ผลทดสอบสมบัติความทนต่อแรงยึดจนขาดก่อนและหลังการอบเร่งด้วยความร้อนของ FCBC ใส่และไม่ใส่สารตัวเติมผสม เมื่อไม่ผ่านและผ่านพลังงานไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ต่างกัน	137
ก-22 ผลการเสื่อมสภาพด้วยการอบเร่งด้วยความร้อนของสมบัติเชิงกลของ FCBC ใส่และไม่ใส่สารตัวเติมผสม เมื่อไม่ผ่านและผ่านพลังงานไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ต่างกัน.....	137
ก-23 น้ำหนักและค่าต่างๆ ที่ได้จากการทดสอบเปอร์เซ็นต์การเชื่อมโยงของ FCBC ใส่และไม่ใส่สารตัวเติมผสมที่มีปริมาณสารวัลคาไนซ์ที่ต่างกัน เมื่อไม่ผ่านและผ่านพลังงานไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ต่างกัน.....	138
ข-1 ค่ามาตรฐานसानพานลำเลียงอาหารชนิดทนน้ำมันสำหรับลำเลียงอาหารทั่วไป.....	142
ข-2 ผลทดสอบระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของ FCBC ใส่สารตัวเติมผสม เมื่อผ่านพลังงานไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ต่างกัน.....	142
ข-3 ผลทดสอบสมบัติแรงยึดติดแน่นระหว่าง TCR/PE1, PE1/PE2, PE2/PE3 และ PE3/BCR กับระยะเวลาการวัลคาไนซ์.....	143
ข-4 ค่ามาตรฐานสมบัติแรงยึดติดแน่นของसानพานลำเลียงอาหารชนิดทนน้ำมันสำหรับลำเลียงอาหารทั่วไป.....	143
ข-5 ข้อกำหนดการทดสอบสมบัติแรงยึดติดแน่น.....	144
ข-6 ต้นทุนวัตถุดิบ (สูตรเดิม).....	145
ข-7 ต้นทุนวัตถุดิบ (สูตรใหม่).....	146
ข-8 ต้นทุนการผลิตผลิตภัณฑ์สายพานลำเลียงอาหารของกระบวนการผลิตแบบใหม่ในปีแรก.....	152

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 สายพานลำเลียงอาหาร.....	6
2.2 ส่วนประกอบสายพานลำเลียงอาหาร.....	6
2.3 แผนผังกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์สายพานลำเลียงอาหารและปัญหาจากกระบวนการผลิต..	6
2.4 สูตรโครงสร้างทางเคมียางธรรมชาติ.....	7
2.5 สูตรโครงสร้างทางเคมียางธรรมชาติอีพ็อกซีไคซ์.....	10
2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (T_g) กับจำนวนโมลเปอร์เซ็นต์อีพ็อกซีไคซ์ในยางธรรมชาติอีพ็อกซีไคซ์.....	10
2.7 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสม.....	17
2.8 แผนผังแสดงขั้นตอนการคัดเลือกโครงการ.....	22
3.1 เครื่องบดผสมยางแบบปิด.....	33
3.2 เครื่องบดยางสองลูกกลิ้ง.....	33
3.3 เครื่องอัดขึ้นรูปแบบขึ้นตัวอย่าง.....	33
3.4 Microwave Panasonic#NE-1756.....	33
3.5 เครื่องทดสอบเวลาการวัลคาไนซ์.....	34
3.6 เครื่องวัดสมบัติการไหลแบบพลวัต.....	34
3.7 เครื่องวิเคราะห์สมบัติเชิงกลแบบไดนามิก.....	35
3.8 เครื่องวัดความแข็ง.....	35
3.9 ชั้นทดสอบสมบัติแรงดึง.....	36
3.10 เครื่องทดสอบแรงดึง.....	36
3.11 เครื่องเน็ตเวิร์คออนไลน์เซอร์.....	38
3.12 เครื่องวัดอุณหภูมิในเนื้อยาง.....	38
3.13 เครื่องทดสอบลักษณะสัญญาณวิทยา.....	39
3.14 เครื่องทดสอบความร้อนสะสมในยาง.....	39
3.15 ตู้อบลมร้อน.....	41
3.16 ตู้อบแรงความร้อน.....	41
3.17 แผนผังกระบวนการเตรียมยางคอมปาวด์สายพานลำเลียงอาหาร.....	46
3.18 แผนผังกระบวนการเตรียมขึ้นตัวอย่าง.....	47
3.19 เครื่องทดสอบสมบัติการยืดเหนียว.....	48
3.20 ชั้นทดสอบสมบัติการยืดเหนียวและแสดงวิธีตั้ง.....	48
3.21 แสดงหน้าจอหลักโปรแกรมสำเร็จรูปการวิเคราะห์การลงทูน.....	53
3.22 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	54
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดุลัสสะสม (storage modulus, G') และค่าความเครียด (strain) ของ ENR50 และ STR5L กับสารตัวเติมและสารตัวเติมผสม ทดสอบที่อุณหภูมิ 80°C , 1 Hz.....	57

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.2 สมบัติเชิงกลพลวัตของ ENR50 และ STR5L กับสารตัวเติมและสารตัวเติมผสมทดสอบที่อุณหภูมิ -100 - 25°C, 1 Hz.	58
4.3 สมบัติการทนน้ำมันก่อนและหลังการอบเร่งด้วยความร้อนของยางวัลคาไนซ์ ENR50 และ STR5L กับสารตัวเติมและสารตัวเติมผสม คิดเป็นร้อยละของปริมาณที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อแช่ตัวอย่างในน้ำมัน IRM 903 ที่อุณหภูมิ 100°C นาน 24 ชั่วโมง.....	60
4.4 สันฐานวิทยาของยางวัลคาไนซ์ ENR50 และ STR5L กับสารตัวเติมและสารตัวเติมผสม....	62
4.5 สมบัติความแข็งก่อนและหลังการอบเร่งด้วยความร้อนของยางวัลคาไนซ์ผสมระหว่าง ENR50/STR5L กับสารตัวเติมผสม.....	65
4.6 สมบัติความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ300 ก่อนและหลังการอบเร่งด้วยความร้อนของยางวัลคาไนซ์ผสมระหว่าง ENR50/STR5L กับสารตัวเติมผสม.....	66
4.7 สมบัติความต้านทานแรงดึงก่อนและหลังการอบเร่งด้วยความร้อนของยางวัลคาไนซ์ผสมระหว่าง ENR50/STR5L กับสารตัวเติมผสม.....	67
4.8 สมบัติความทนต่อแรงยืดจนขาดก่อนและหลังการอบเร่งด้วยความร้อนของยางวัลคาไนซ์ผสมระหว่าง ENR50/STR5L กับสารตัวเติมผสม.....	68
4.9 สมบัติการทนน้ำมันก่อนและหลังการอบเร่งด้วยความร้อนของยางวัลคาไนซ์ผสมระหว่าง ENR50/STR5L กับสารตัวเติมผสม คิดเป็นร้อยละของปริมาณที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อแช่ตัวอย่างในน้ำมัน IRM 903 ที่อุณหภูมิ 100°C นาน 24 ชั่วโมง.....	69
4.10 สมบัติความร้อนสะสมก่อนการอบเร่งด้วยความร้อนของยางวัลคาไนซ์ผสมระหว่าง ENR50/STR5L กับสารตัวเติมผสม.....	70
4.11 สันฐานวิทยาของยางวัลคาไนซ์ ENR50 และ STR5L กับสารตัวเติมผสม และยางวัลคาไนซ์ผสมระหว่าง ENR50/STR5L กับสารตัวเติมผสม.....	72
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของ FCBC ใส่และไม่ใส่สารตัวเติมผสมที่เวลาต่างกัน เมื่อไม่ผ่านและผ่านพลังงานไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ต่างกัน.....	75
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของ FCBC ใส่และไม่ใส่สารตัวเติมผสม ที่ความหนาของชิ้นตัวอย่างต่างกัน และเวลาต่างกัน เมื่อผ่านพลังงานไมโครเวฟ ที่ 850 วัตต์.....	76
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของพันธะกับปริมาณกำมะถันที่ต่างกันของ FCBC ใส่และไม่ใส่สารตัวเติมผสมเมื่อไม่ผ่านและผ่านพลังงานไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ต่างกัน.....	78
4.15 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของ FCBC ใส่สารตัวเติมผสม และปริมาณกำมะถันที่ 1.0 phr เมื่อนำไปผ่านการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟที่ 0, 340 และ 850 วัตต์.....	79
4.16 สมบัติความแข็งก่อนและหลังการอบเร่งด้วยความร้อนของ FCBC ใส่และไม่ใส่สารตัวเติมผสมเมื่อไม่ผ่านและผ่านพลังงานไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ต่างกัน.....	80
4.17 สมบัติความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ300 ก่อนและหลังการอบเร่งด้วยความร้อนของ FCBC ใส่และไม่ใส่สารตัวเติมผสมเมื่อไม่ผ่านและผ่านพลังงานไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ต่างกัน.....	81

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.18 สมบัติความต้านทานแรงดึงก่อนและหลังการอบเร่งด้วยความร้อนของ FCBC ใส่และ ไม่ใส่สารตัวเติมผสมเมื่อไม่ผ่านและผ่านพลังงานไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ต่างกัน.....	82
4.19 สมบัติความทนต่อแรงยึดจนขาดก่อนและหลังการอบเร่งด้วยความร้อนของ FCBC ใส่ และไม่ใส่สารตัวเติมผสมเมื่อไม่ผ่านและผ่านพลังงานไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ต่างกัน.....	83
4.20 สมบัติการเสื่อมสภาพด้วยการอบเร่งด้วยความร้อนของสมบัติเชิงกลของ FCBC ใส่และ ไม่ใส่สารตัวเติมผสมเมื่อไม่ผ่านและผ่านพลังงานไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ต่างกัน.....	84
4.21 สันฐานวิทยาที่กำลังการขยายต่างกันของ FCBC ใส่สารตัวเติมผสมและผ่านพลังงาน ไมโครเวฟ 340 วัตต์ ที่คลื่นความถี่ 2.45 GHz เป็นเวลา 1 นาที	86
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของผลิตภัณฑ์สายพานลำเลียงอาหารเมื่อผ่าน พลังงานไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ต่างกัน.....	87
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติแรงยึดติดแน่นของ TCR/PE1, PE1/PE2, PE2/PE3 และ PE3/BCR กับระยะเวลาการวัลคาไนซ์.....	88
4.24 แผนผังกระบวนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์สายพานลำเลียงอาหารโดยใช้พลังงานไมโครเวฟ ร่วมกับวิธีให้ความร้อนแบบดั้งเดิม.....	90
4.25 แบบจำลองกระบวนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์สายพานลำเลียงอาหารโดยใช้พลังงาน ไมโครเวฟร่วมกับวิธีให้ความร้อนแบบดั้งเดิม.....	90
4.26 แบบจำลองกระบวนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์สายพานลำเลียงอาหารโดยใช้พลังงาน ไมโครเวฟร่วมกับวิธีให้ความร้อนแบบดั้งเดิมแบบระบุมาตราส่วน.....	91
4.27 จุดคุ้มทุนและปริมาณการผลิตที่จุดคุ้มทุนของกระบวนการผลิตแบบใหม่.....	96
5.1 แผนผังกระบวนการพัฒนางานวิจัย 1.....	109
5.2 แผนผังกระบวนการพัฒนางานวิจัย 2.....	110

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมยางและผลิตภัณฑ์ยาง เป็นอุตสาหกรรมหลักประเภทหนึ่งที่มีแนวโน้มในการเจริญเติบโตควบคู่ไปกับการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจและสังคมของประเทศ โดยเฉพาะการเปลี่ยนแปลงจากประเทศเกษตรกรรมเป็นประเทศอุตสาหกรรม นอกจากนี้ประเทศไทยยังเป็นผู้ผลิตและส่งออกยางธรรมชาติมากเป็นอันดับหนึ่งของโลก จากข้อมูลทางสถิติยางธรรมชาติของสถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร[1] พบว่าผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เป็นยางแปรรูปมาตรฐาน เช่น ยางแผ่นรมควัน ยางแท่ง และน้ำยางข้น เป็นต้น เพื่อส่งจำหน่ายต่างประเทศ โดยในปี พ.ศ. 2557 ประเทศไทยมีปริมาณการผลิตยางธรรมชาติประมาณ 4.32 ล้านตัน และมีการส่งออกในรูปยางแปรรูปมาตรฐานประมาณ 3.77 ล้านตัน คิดเป็นมูลค่าการส่งออก 193,749.21 ล้านบาท จากข้อมูลดังกล่าวจะเห็นได้ว่า มีการนำยางธรรมชาติมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อเพิ่มมูลค่า เพียงประมาณร้อยละ 12.54 ของปริมาณการผลิตยางธรรมชาติทั้งหมดเท่านั้น แต่ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากยางแปรรูปมาตรฐานสามารถทำรายได้ให้กับประเทศจากการส่งออกประมาณ 261,045.79 ล้านบาท คิดเป็นร้อยละ 57.40 ของมูลค่าการส่งออกยางแปรรูปมาตรฐานจำนวน 3.77 ล้านตัน ดังนั้นการแปรรูปของยางแปรรูปมาตรฐานให้เป็นผลิตภัณฑ์นั้นจึงมีความสำคัญอย่างมาก โดยปัญหาหลักของอุตสาหกรรมยางและผลิตภัณฑ์ยางส่วนใหญ่จะเกิดจากการขาดการพัฒนาเทคโนโลยี เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ทันสมัย รวมถึงการขาดแคลนบุคลากรที่มีความรู้พื้นฐานด้านเทคโนโลยียาง ทำให้ไม่มีการปรับปรุงกระบวนการผลิต ขาดการดำเนินการวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ๆ เพื่อตอบสนองความต้องการของลูกค้านำเข้าเป้าหมาย ทำให้ประเทศต้องสูญเสียงบประมาณในการนำเข้าผลิตภัณฑ์ยางจากต่างประเทศมาใช้งาน เช่น ยางรถยนต์ ถังมือยาง ถังยางอนามัย สายพานลำเลียง และอุปกรณ์ทางการแพทย์ เป็นต้น จากข้อมูลทางสถิติมูลค่าการนำเข้าของผลิตภัณฑ์ยางของสถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร[1] พบว่าในปี พ.ศ. 2557 ประเทศไทยมีการนำเข้าผลิตภัณฑ์ยาง คิดเป็นมูลค่าประมาณ 39,886.53 ล้านบาท โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลิตภัณฑ์สายพานลำเลียง มีมูลค่าของการนำเข้าสูงถึง 2,405.80 ล้านบาท คิดเป็นร้อยละ 6.03 ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ประเทศไทยควรดำเนินการวิจัยและพัฒนาองค์ความรู้เพื่อแปรรูปยางธรรมชาติให้เป็นวัสดุวิศวกรรมและแปรรูปผลิตภัณฑ์สำหรับใช้ภายในประเทศและส่งออกไปจำหน่ายต่างประเทศเพื่อแข่งขันได้ในตลาดโลก โดยมีเป้าหมายที่จะให้ประเทศไทยเป็นผู้นำ ในองค์ความรู้เรื่องยาง การผลิตวัตถุดิบ และการแปรรูปผลิตภัณฑ์โดยการเพิ่มผลิตภัณฑ์ยางรูปแบบใหม่ๆ ในการประยุกต์ใช้กับงานด้านต่างๆ มากขึ้น

ในปัจจุบันสิ่งที่สำคัญนอกเหนือจากการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพออกสู่ท้องตลาดแล้วคือ การพยายามเพิ่มผลผลิตและลดค่าใช้จ่ายในการผลิต โดยทั่วไปผลิตภัณฑ์สายพานลำเลียงอาหารถือว่าเป็นผลิตภัณฑ์ทางวิศวกรรม ที่มีความยืดหยุ่นสูง มีความบิดเบี้ยวน้อย และตัวสายพานจะมีสีขาว ใช้ยางธรรมชาติและสารตัวเติมสีขาวเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตจึงไม่ก่อมลพิษต่ออาหารที่ลำเลียง สำหรับขบวนการผลิตที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการขึ้นรูปนั้นเป็นแบบการให้ความร้อนโดยวิธีธรรมดา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งเป็นกรบ้อนความร้อนที่ผิวหน้าของชิ้นงาน บางครั้งอาจเกิดปัญหากับชิ้นงานที่มีความหนาหรือชิ้นงานที่มีส่วนประกอบหลายๆ ชิ้น เนื่องจากชิ้นงานได้รับความร้อนไม่ทั่วถึงหรือไม่สม่ำเสมอ ในขณะที่เดียวกันสมบัติการนำความร้อนของยางยังเปลี่ยนไปตามระยะเวลาและอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นกับเนื้อยางเป็นไปอย่างไม่สม่ำเสมอทำให้ยางคอมปาวด์เกิดการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โม่เลกุลยางไม่ดี และมีผลต่อสมบัติเชิงโครงสร้างและสมบัติเชิงคุณภาพของยางคอมปาวด์เปลี่ยนไปด้วย[2] นอกจากนี้ตำแหน่งที่วัสดุสัมผัสความร้อนโดยตรงอาจเกิดการเสียหายได้ เพราะใช้เวลานานจนกว่าความร้อนจะเข้าถึงภายในเนื้อวัสดุอย่างทั่วถึง ทำให้ต้องเสียพลังงานและเวลาในกระบวนการขึ้นรูปรวมถึงการควบคุมคุณภาพทำได้ยาก ด้วยเหตุนี้ในบางครั้งยังผลิตไม่ทันตามความต้องการของลูกค้าหรือหากทันตามความต้องการของลูกค้าก็ต้องใช้ค่าใช้จ่ายสูงและได้ประสิทธิภาพไม่คุ้มค่าเท่าที่ควร อันส่งผลให้เกิดแนวคิดในการหากรรมวิธีที่จะช่วยกระบวนการขึ้นรูปให้มีคุณภาพที่ดี สะอาด ใช้พลังงานอย่างคุ้มค่าและลดระยะเวลาในกระบวนการขึ้นรูปให้สั้นที่สุดเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์จำนวนมากในเวลาอันรวดเร็ว เพื่อเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิต ดังนั้นจึงได้นำแนวคิดในการนำพลังงานไมโครเวฟมาใช้ให้ความร้อนหรือการอุ่นยางคอมปาวด์สูตรยางสายพานลำเลียงอาหาร ก่อนนำเข้ากระบวนการอัดขึ้นรูปโดยสมบัติที่ดีของยางคอมปาวด์อยู่ครบถ้วนเนื่องจากพลังงานไมโครเวฟ มีการได้เปรียบหลายประการ กล่าวคือ มีประสิทธิภาพทางความร้อนและคุณภาพของผลิตภัณฑ์สูงเพราะเป็นการให้ความร้อนเชิงปริมาตร การทะลุทะลวงของพลังงานทำให้การกระจายของความร้อนสม่ำเสมอทั่วทั้งวัสดุ ใช้เวลาในการทำความร้อนสั้น พลังงานที่ใช้เป็นพลังงานสะอาดไม่มีเขม่าไอเสียไม่ก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม และเครื่องจักรมีขนาดเล็กและค่าการบำรุงรักษาต่ำเนื่องจากมีองค์ประกอบน้อยชิ้น เป็นต้น[3] การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟจะอาศัยสมบัติของการดูดกลืนพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟภายในผลิตภัณฑ์ ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่นำมาผ่านกระบวนการนี้ต้องเป็นวัสดุประเภทวัสดุไดอิเล็กตริก หมายถึงวัสดุที่ฉนวนที่มีโครงสร้างพื้นฐานทางจุลภาคมีลักษณะเป็นขั้วทางไฟฟ้า ซึ่งวัสดุไดอิเล็กตริกจะสามารถดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน ลักษณะการเกิดความร้อนจะเกิดจากแรงเสียดสีระหว่างการจัดเรียงตัวใหม่ของโม่เลกุลน้ำเมื่อดูดกลืนคลื่นส่งผลให้เกิดความร้อนขึ้นภายในทั่วทั้งเนื้อวัสดุ ส่งผลให้เกิดความร้อนภายในขึ้น ดังนั้นผลิตภัณฑ์จะถูกกระจายความร้อนจากภายในออกสู่ผิวนอก ซึ่งแตกต่างไปจากการให้ความร้อนโดยวิธีธรรมดาที่จะถ่ายเทความร้อนจากผิวนอกเข้าไปสู่ภายในผลิตภัณฑ์ จากพฤติกรรมดังกล่าวของการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟจะทำให้ผิวของผลิตภัณฑ์ไม่เสียหายหรือต่างไปจากเดิมมากนัก เนื่องจากจะทำให้เกิดการระเหยของความชื้นภายในผลิตภัณฑ์เป็นไปอย่างรวดเร็วและมีการกระจายตัวของอุณหภูมิสม่ำเสมอ สามารถลดการเกิดรอยร้าวและรอยไหม้ในผลิตภัณฑ์[4]

ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงมีการนำเทคโนโลยีกระบวนการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟมาประยุกต์ใช้ในการอุ่นยางคอมปาวด์สายพานลำเลียงอาหารที่เป็นวัสดุไดอิเล็กตริกก่อนนำไปวัลคาไนซ์ในกระบวนการอัดขึ้นรูป เพื่อลดระยะเวลาในการวัลคาไนซ์ และแก้ปัญหาการย่นตำหนิของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากกระบวนการอัดขึ้นรูปดังกล่าว อย่างไรก็ตามวิธีการแบบดั้งเดิมนั้นมีปัญหาหลักๆ คือ 1) การให้ความร้อนและแรงกดที่ผิวหน้าชิ้นงาน บางครั้งอาจเกิดปัญหากับชิ้นงานที่มีความหนาหรือชิ้นงานที่มีส่วนประกอบหลายๆ ชิ้น อันเนื่องจากโครงสร้างภายในที่ประกอบด้วยผ้าและยางน้ำกาว ซึ่งเป็นตัวประสานระหว่างยางบน ผ้า และยางล่าง ทำให้ชิ้นงานได้รับความร้อนและแรงกดที่ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีรอยตำหนิเป็นฟองอากาศและการหดตัวของชิ้นงาน และ 2) กระบวนการวัลคาไนซ์ใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการผลิตใช้ระยะเวลาานาน ซึ่งส่งผลทำให้สมบัติเชิงโครงสร้างและสมบัติเชิงคุณภาพของยาง เปลี่ยนไป พร้อมทั้งต้นทุนการผลิตที่สูงตามไปด้วย จึงเป็นที่มาของการพัฒนาวิธีการใหม่ ของกระบวนการแปรรูป เพื่อแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นดังกล่าว

ดังนั้นเพื่อให้การวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์สายพานลำเลียงอาหาร ประสบผลสำเร็จและเกิด ประโยชน์สูงสุดต่อเศรษฐกิจของประเทศอย่างชัดเจน พร้อมทั้งการนำผลงานวิจัยไปใช้นั้น ย่อมส่งผล ต่อการกระตุ้นเศรษฐกิจ และตอบสนองความเป็นอยู่ที่ดีของสังคมตลอดจนสภาพแวดล้อมที่สะอาด ปลอดภัย และเกิดนวัตกรรมของประเทศได้ ดังนั้นโครงการศึกษาการพัฒนากระบวนการผลิตยาง คอมปาวด์สายพานลำเลียงอาหารชนิดใหม่แบบประหยัดพลังงาน เป็นการนำผลงานวิจัยเชิงเทคนิค ด้านการคัดเลือกวัตถุดิบยางธรรมชาติ สารตัวเติม สารตัวเติมผสม การพัฒนาสูตรยางคอมปาวด์ และ เทคนิคกระบวนการอ่อนยางคอมปาวด์ด้วยวิธีไมโครเวฟ มาประยุกต์ใช้เพื่อการผลิตเชิงพาณิชย์ เป็น การปรับกลยุทธ์การวิจัยอุตสาหกรรมยางพาราแบบใหม่เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในการทำวิจัย และ เกิดผลสัมฤทธิ์ต่อเศรษฐกิจและสังคมของประเทศพร้อมทั้งการพัฒนาอุตสาหกรรมยางพาราเพื่อให้ เกิดมูลค่าเพิ่มสูงขึ้น

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อคัดเลือกวัตถุดิบยางธรรมชาติ สารตัวเติม และสารตัวเติมผสมที่ให้สมบัติเชิง กายภาพ สมบัติเชิงกล และสมบัติไดอิเล็กตริก ที่ดีที่สุดในการผลิตยางคอมปาวด์สายพานลำเลียง อาหารแบบประหยัดพลังงาน

1.2.2 เพื่อพัฒนาสูตรยางคอมปาวด์สายพานลำเลียงอาหารแบบประหยัดพลังงาน

1.2.3 เพื่อปรับปรุงกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์สายพานลำเลียงอาหารโดยใช้พลังงาน ไมโครเวฟร่วมกับวิธีให้ความร้อนแบบดั้งเดิม

1.2.4 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการลงทุนโครงการผลิตผลิตภัณฑ์สายพานลำเลียงอาหาร แบบประหยัดพลังงานในอุตสาหกรรม

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.3.1 การเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์สายพานลำเลียงอาหาร เพื่อลดต้นทุน วัตถุดิบ ลดระยะเวลา ลดพลังงาน และลดค่าใช้จ่ายในกระบวนการขึ้นรูป พร้อมทั้งได้ผลิตภัณฑ์ที่มี คุณภาพสามารถสร้างความเชื่อมั่นให้กับลูกค้า

1.3.2 สร้างมูลค่าเพิ่มให้กับยางธรรมชาติ โดยการพัฒนาเทคโนโลยีกระบวนการผลิต สำหรับผลิตผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติ เพื่อยกระดับคุณภาพและมาตรฐานผลิตภัณฑ์ให้แก่ อุตสาหกรรมยางไทย

1.3.3 เป็นฐานข้อมูลในการศึกษาความเป็นไปได้ในการลงทุนของโครงการการผลิตผลิตภัณฑ์ สายพานลำเลียงอาหารแบบประหยัดพลังงาน โดยการอ่อนยางคอมปาวด์ด้วยพลังงานไมโครเวฟก่อน การอัดขึ้นรูป

1.4 ขอบเขตของการศึกษา

โครงการวิจัยนี้เป็นการศึกษาการคัดเลือกวัตถุดิบยางธรรมชาติ สารตัวเติม สารตัวเติมผสม การพัฒนาสูตรยางคอมปาวด์แบบประหยัดพลังงาน และวิธีการนำเทคโนโลยีกระบวนการให้ความร้อน ด้วยพลังงานไมโครเวฟมาประยุกต์ใช้ในการอ่อนยางคอมปาวด์ที่มีโครงสร้างภายในเป็นวัสดุประเภทผ้า ที่มีการเรียงตัวหลายชั้นก่อนนำไปวัลคาไนซ์ในกระบวนการอัดขึ้นรูป โดยมีขอบเขตการวิจัยดังนี้

1.4.1 ศึกษาเชิงเทคนิคด้านกระบวนการผลิต โดยการวิเคราะห์เชิงทดลองเพื่อศึกษาสมบัติ กายภาพ สมบัติเชิงกล และสมบัติไดอิเล็กทริกของสูตรยางคอมปาวด์สายพานลำเลียงอาหารจากยางธรรมชาติผสมกับ สารตัวเติม และสารตัวเติมผสม

1.4.2 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังวัตต์ของคลื่นพลังงานไมโครเวฟที่ใช้ ต่อความหนาของ ชิ้นงานที่มีผลต่ออัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ ลักษณะการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้น ลักษณะของการ เชื่อมโยงระหว่างยางกับสารตัวเติม และสารตัวเติมผสม

1.4.3 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังวัตต์ของคลื่นพลังงานไมโครเวฟที่ใช้ ต่อสมบัติเชิงกล ก่อนและหลังการอบเร่งด้วยความร้อนของยางคอมปาวด์สายพานลำเลียงอาหารในกระบวนการอัดขึ้นรูป โดยใช้พลังงานไมโครเวฟร่วมกับวิธีให้ความร้อนแบบดั้งเดิม

1.4.4 การประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตผลิตภัณฑ์สายพานลำเลียงอาหาร

1.4.5 การวิเคราะห์การลงทุนโครงการ

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาการพัฒนากระบวนการผลิตสายพานลำเลียงอาหารชนิดใหม่แบบประหยัดพลังงาน ได้ศึกษาค้นคว้าข้อมูลจากหนังสือ เอกสารงานวิจัย วิทยานิพนธ์ และทางอินเทอร์เน็ต เป็นต้น ซึ่งจะเป็นข้อมูลเกี่ยวกับ 1) ผลิตรภัณฑ์สายพานลำเลียง 2) ส่วนผสมของยางคอมปาวด์และเทคนิคการออกสูตรยาง 3) พอลิเมอร์ผสม 4) พลังงานไมโครเวฟ 5) การวิเคราะห์การลงทุนโครงการ และ 6) งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

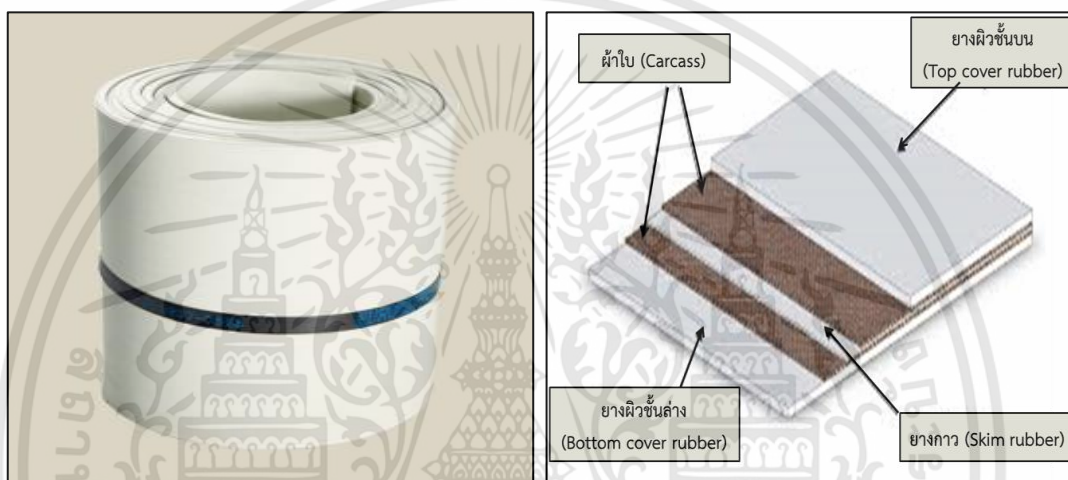
2.1.1 ผลิตรภัณฑ์สายพานลำเลียงอาหาร

สายพานลำเลียง ถือว่าเป็นผลิตรภัณฑ์ทางวิศวกรรมที่มีกระบวนการแปรรูปจากยางดิบเป็นผลิตรภัณฑ์ด้วยวิธีการอัดขึ้นรูป ซึ่งแบ่งแยกตามลักษณะการใช้งานหรือการลำเลียง เช่น สายพานลำเลียงอาหาร สายพานลำเลียงงานผงหรืองานก้อน สายพานลำเลียงกล่อง สายพานลำเลียงเศษแก้ว สายพานลำเลียงวัสดุเปียก สายพานลำเลียงวัสดุแห้ง สายพานลำเลียงอาหารสัตว์ สายพานลำเลียงกุ้ง สายพานลำเลียงกระป๋อง สายพานลำเลียงในตู้อบ และสายพานลำเลียงถ่านหิน เป็นต้น สายพานมีหน้าที่ในการเคลื่อนย้ายสินค้า ทำให้เกิดความสะดวกและรวดเร็ว ไม่สิ้นเปลืองการใช้แรงงานคนในกระบวนการผลิตต่างๆ

สายพานลำเลียงอาหาร (foodstuff conveyor belt) (ภาพที่ 2.1) เป็นสายพานที่มีความยืดหยุ่นสูง มีการบิดตัวน้อย นิยมใช้ทางธรรมชาติในการผลิตจึงไม่มีสารพิษปนเปื้อนอาหารที่ลำเลียง ตัวสายพานมีสีขาวและไม่มีส่วนผสมสารพิษที่เป็นอันตรายต่อร่างกาย สูตรยางคอมปาวด์ถูกผสมอย่างเหมาะสมโดยคำนึงถึงความสะดวกเป็นหลัก ตัวสายพานมีสีขาวทำความสะอาดได้ง่าย มีส่วนประกอบหลัก (ภาพที่ 2.2) คือ 1) ยางผิวชั้นบน (top cover) เป็นส่วนที่อยู่บนสุดและทำหน้าที่ในการรองรับวัสดุ ดังนั้น การคัดเลือกยางผิวบนให้เหมาะสมกับลักษณะของงานจะช่วยยืดอายุการใช้งานและลดต้นทุนในการผลิต ยางบนมีหลายเกรด เช่น เกรดทนการเสียดสี เกรดทนความร้อน เกรดทนน้ำมัน เกรดทนกรด-ด่าง เกรดที่ใช้กับอาหาร และเกรดทนไฟ เป็นต้น 2) ยางผิว (skim coat) เป็นยางเหลวที่มีคุณสมบัติเป็นกาวเคลือบอยู่บนผ้าโพลีเอสเตอร์ ช่วยป้องกันการหลุดร่อนของยางในและยางบน 3) ผ้าโพลีเอสเตอร์ (polyester) มีคุณสมบัติในการทนแรงดึงและรองรับน้ำหนักของวัสดุที่ติดบนผ้าโพลีเอสเตอร์มีหลายประเภทขึ้นอยู่กับเส้นใยที่ใช้ทอผ้า และ 4) ยางผิวชั้นล่าง (bottom cover) เป็นยางที่สัมผัสกับลูกกลิ้งด้านล่างโดยตรง ไม่ได้สัมผัสกับวัสดุลำเลียงเหมือนกับยางบน ความหนาของยางล่างจึงออกแบบให้บางกว่ายางบน โดยมีคุณสมบัติตามเกรดต่างๆ เช่นเดียวกับยางบน ซึ่งในปัจจุบันอุตสาหกรรมผลิตสายพานลำเลียงมีโรงงานที่ทำการผลิตอยู่น้อยราย เนื่องจากวัสดุที่ใช้ในการผลิตสายพานมีราคาค่อนข้างแพง เช่น ยางธรรมชาติ ยางสังเคราะห์ สารเคมี และผ้าใบเสริมแรง เป็นต้น พร้อมทั้งการเลือกใช้วัสดุที่เข้ากับชนิดของสายพานลำเลียงในส่วนของกระบวนการผลิตสายพานลำเลียง (ภาพที่ 2.3) ประกอบไปด้วยขั้นตอนต่างๆ หลายขั้นตอน ได้แก่ การผสมยาง

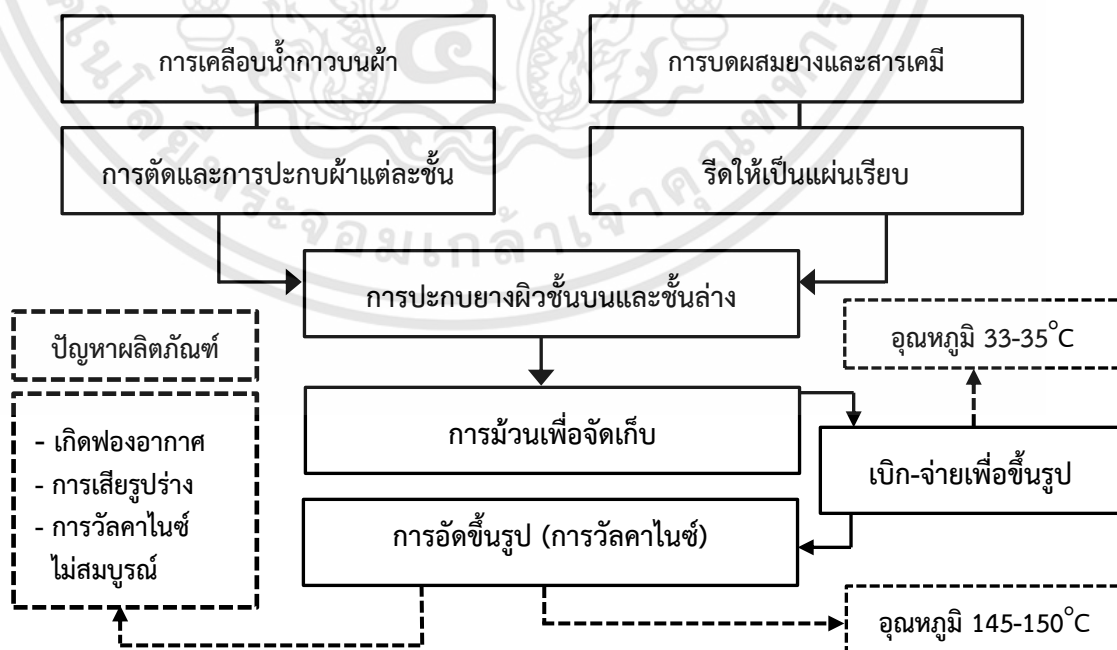
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเคลือบยางน้ำกาวและยางใน การตัดผ้า การประกบผ้า การเคลือบผิวยาง การอบสายพาน และการตรวจสอบคุณภาพ เป็นต้น จึงจำเป็นต้องมีกระบวนการผลิตที่มีประสิทธิภาพ ซึ่งในกระบวนการผลิตโดยเฉพาะกระบวนการขึ้นรูปสายพานลำเลียงมักพบปัญหาด้านคุณภาพหลายอย่างด้วยกัน เช่น ยางไม่สุก (กระบวนการวัลคาไนซ์ไม่สมบูรณ์) รูปทรงโค้งงอ การไหลของยางคอมปาวด์ไม่เต็มเข้าพิมพ์ การหดตัวของชิ้นงาน และการเกิดฟองอากาศ เป็นต้น ถ้าหากเป็นการผลิตผลิตภัณฑ์สายพานลำเลียงชนิดสีขาวในอุตสาหกรรมอาหารและยา ซึ่งประเด็นปัญหาหลักที่ควรระวัง นอกเหนือจากประเด็นปัญหาด้านคุณภาพ คือ สารเคมียางที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารต้องเป็นไปตามข้อกำหนดขององค์การอาหารและยา ประเทศสหรัฐอเมริกา



ภาพที่ 2.1 สายพานลำเลียงอาหาร [5]

ภาพที่ 2.2 ส่วนประกอบสายพานลำเลียงอาหาร [5]



ภาพที่ 2.3 แผนผังกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์สายพานลำเลียงอาหารและปัญหาจากกระบวนการผลิต

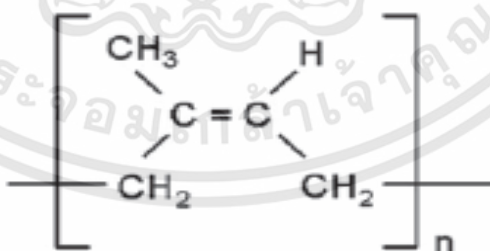
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 ยางคอมปาวด์

ยางคอมปาวด์ (rubber compound) คือ เมื่อนำยางดิบที่มีการผสมสารเคมีต่างๆ เช่น สารวัลคาไนซ์ สารตัวเร่งปฏิกิริยา สารตัวเติม เป็นต้น พร้อมทั้งจะนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ แต่ยางคอมปาวด์อยู่ในสภาวะยังสามารถไหลได้เพราะโมเลกุลของยางไม่เกิดการเชื่อมโยงเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ ดังนั้นยางคอมปาวด์จึงมีบทบาทที่สำคัญต่อกระบวนการผลิตโดยเฉพาะในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป นอกจากนี้สมบัติยางคอมปาวด์ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ชนิดของยาง ชนิดและปริมาณของสารตัวเติม และสารทำให้ยางนิ่ม เป็นต้น สมบัติที่สำคัญที่สุดและรองลงมาของยางคอมปาวด์คือ ความสามารถในการไหล สมบัติการคงรูป และความเหนียวติดกัน ตามลำดับ การจะผลิตยางคอมปาวด์ต้องอาศัยเทคโนโลยีต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นการออกสูตรเคมียาง ส่วนผสม และการผสมยาง เพื่อให้ได้ยางคอมปาวด์ที่นำไปขึ้นรูปและคงรูปเป็นผลิตภัณฑ์ยางที่มีสมบัติตามที่ต้องการ สำหรับส่วนผสมของยางคอมปาวด์ประกอบด้วย ดังนี้

2.1.2.1 ยางธรรมชาติ (natural rubber)

ยางธรรมชาติเป็นวัสดุในกลุ่มพอลิเมอร์มีสมบัติเด่นคือความยืดหยุ่น จึงมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า อีลาสโตเมอร์ (elastomers) ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมี คือ cis-1,4-polyisoprene กล่าวคือมี isoprene (C_5H_8) (ภาพที่ 2.4) โดยที่ n มีค่าตั้งแต่ 15-20,000 เนื่องจากส่วนประกอบของยางธรรมชาติเป็นไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นยางจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน และเฮกเซน เป็นต้น โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐาน (amorphous) แต่ในบางสภาวะโมเลกุลของยางสามารถจัดเรียงตัวค่อนข้างเป็นระเบียบที่อุณหภูมิต่ำหรือเมื่อถูกยืด จึงสามารถเกิดผลึก (crystallize) ได้ การเกิดผลึกเนื่องจากอุณหภูมิต่ำ (low temperature crystallization) จะทำให้ยางแข็งมากขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิสูงมากขึ้นยางก็จะอ่อนลงและกลับสู่สภาพเดิมในขณะที่การเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัว (strain induced crystallization) ทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลดี นั่นคือยางจะมีความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) ความทนต่อแรงฉีกขาด (tear resistance) และความต้านทานต่อการขัดถู (abrasion resistance) สูง[6]



ภาพที่ 2.4 สูตรโครงสร้างทางเคมียางธรรมชาติ[6]

โครงสร้างทางเคมีของโมเลกุลยางธรรมชาตินั้น ในส่วนไฮโดรคาร์บอน ซึ่งมีสูตรโครงสร้างเป็น ซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน กล่าวคือโมเลกุลยาง 1 โมเลกุลประกอบด้วยหน่วยของไอโซพรีน (C_5H_8) มาต่อกันเป็นสายเส้นตรง (linear chain) แต่หมู่ปิดสายโซ่ของโมเลกุลยางธรรมชาติยังไม่ทราบแน่ชัด เชื่อกันว่าหมู่ฟอสโฟไลปิด (phospholipid) โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อยู่ในช่วง 200,000 ถึง 400,000 g/mol และมีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลที่กว้างมาก ซึ่งทำให้ยางธรรมชาติ มีสมบัติในการแปรรูปได้ง่าย อย่างไรก็ตามในยางธรรมชาตินอกจากมีสารประกอบไฮโดรคาร์บอนแล้ว ยังมีสิ่งเจือปนอื่นๆ ประมาณ 5% โดยน้ำหนัก เช่น โปรตีน เถ้า สารที่สกัดด้วยอะซิโตน (acetone extractable) และความชื้น ยางธรรมชาติมีความหนาแน่นเท่ากับ 0.93 g/cm³ ที่อุณหภูมิ 200°C และมีอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ประมาณ - 67°C หมายความว่าหากนำยางธรรมชาติไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า - 67°C สมบัติของยางธรรมชาติจะเปลี่ยนจากที่เคยมีความยืดหยุ่นไปเป็นของแข็งเปราะเช่นเดียวกับแก้ว

สมบัติที่ดีของยางธรรมชาติ ซึ่งยางธรรมชาติถูกนำไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ มากมายเนื่องจาก 1) ความยืดหยุ่น (elasticity) ยางธรรมชาติมีความยืดหยุ่นที่สูง โดยสามารถกลับคืนสู่รูปร่างที่มีขนาดเดิมหรือใกล้เคียงได้อย่างรวดเร็ว ภายหลังการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเนื่องจากการที่มีแรงภายนอกกระทำ 2) ยางธรรมชาติมีสมบัติดีเยี่ยมในด้านการทนต่อแรงดึง (tensile strength) แม้ไม่ได้เติมสารเสริมแรงและมีความยืดหยุ่นมาก จึงเหมาะที่จะใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์บางชนิด เช่น ถุงมือ ถุงยางอนามัย และยางรัดของ เป็นต้น 3) ยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงพลวัต (dynamic properties) ที่ดี มีความยืดหยุ่น (elasticity) สูงในขณะที่มีความร้อนภายใน (heat build-up) ที่เกิดขณะใช้งานต่ำและมีสมบัติการเหนียวติด (tack) ที่ดีจึงเหมาะสำหรับการผลิตยางรถบรรทุก ยางล้อเครื่องบิน หรือใช้ผสมกับยางสังเคราะห์ในการผลิตยางรถยนต์ เป็นต้น 4) ยางธรรมชาติมีความต้านทานต่อการฉีกขาด (tear resistance) สูงทั้งที่อุณหภูมิต่ำและอุณหภูมิสูง จึงเหมาะสำหรับการผลิตยางกระป๋องน้ำร้อน เพราะในการแกะชิ้นงานออกจากเบ้าในระหว่างกระบวนการผลิตจะต้องดึงชิ้นงานออกจากเบ้าพิมพ์ในขณะที่ร้อน ยางที่ใช้จึงต้องมีค่าความทนทานต่อการฉีกขาดขณะร้อนสูง 5) การกระด้างกระดอน (rebound resilience) ยางธรรมชาติมีสมบัติการกระด้างกระดอนที่สูงมาก และในระหว่างการเปลี่ยนแปลงรูปร่างยางจะมีการสูญเสียพลังงาน (hysteresis) ที่ต่ำโดยเมื่อถูกใช้ในทางไดนามิกยางธรรมชาติก็จะมีความร้อนสะสม (heat build-up) ที่ต่ำอีกด้วยทำให้ยางธรรมชาติเหมาะสมสำหรับการผลิตยางล้อที่มีขนาดใหญ่ เช่น ยางล้อรถบรรทุก หรือยางล้อเครื่องบิน 6) ความทนทานต่อการขัดถู (abrasion resistance) ยางธรรมชาติมีความทนทานต่อการขัดถูที่ดี 7) ความเหนียวติดกัน (tack) ยางธรรมชาติมีความเหนียวติดกันที่สูง โดยเฉพาะในยางที่ไม่ได้ผ่านการคงรูปโดยสามารถยึดติดกับวัสดุอื่น เช่น โลหะและสิ่งทอได้ 8) ความเป็นฉนวนไฟฟ้า (insulation) ยางธรรมชาติมีความเป็นฉนวนไฟฟ้าที่สูงมากโดยยางธรรมชาติมีความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (specific resistivity) สูงถึง 1×10^{15} – 2×10^{15} โวลล์-ซม.[7]

สมบัติด้อยของยางธรรมชาติ แม้ยางธรรมชาติจะมีสมบัติที่ดี เหมาะสมกับการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ มากมาย แต่ยางธรรมชาติก็มีข้อเสียหลัก คือ 1) สมบัติทางเสื่อมสภาพ (aging property) เนื่องจากความร้อน โอโซน และแสงแดด ซึ่งโมเลกุลของยางธรรมชาติมีพันธะคู่ (double bond) อยู่มากทำให้มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศโดยเฉพาะเมื่อมีแสงแดดหรือความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของยางได้ง่าย แต่เมื่อเทียบกับยางไอโซพรีนสังเคราะห์แล้ว ยางธรรมชาติมีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพที่มากกว่ายางไอโซพรีนสังเคราะห์ เนื่องจากโปรตีนในยางธรรมชาติมีความสามารถในการยับยั้งการเสื่อมสภาพได้ นอกจากนี้แล้วยางธรรมชาติยังไม่ทนต่อโอโซนอีกด้วย ดังนั้นในระหว่างการผลิตผลิตภัณฑ์จึงต้องมีการเติมสารเคมีบางชนิด เพื่อยืดอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ยาง 2) ความทนทานต่อสารเคมี (chemical

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

resistance) ยางธรรมชาติไม่สามารถทนทานต่อสารเคมีที่ไม่มีขั้วได้ ยกตัวอย่างเช่น น้ำมันปิโตรเลียม หรือตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วต่างๆ เช่น เบนซีน (benzene) โทลูอีน (toluene) และเฮกเซน (hexane) เป็นต้น เนื่องจากโครงสร้างที่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนของยางธรรมชาติ ทำให้ถูกละลายได้ใน ตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว แต่ยางธรรมชาติจะทนต่อตัวทำละลายที่มีขั้ว เช่น อะซิโตน (acetone) และ แอลกอฮอล์ (alcohol) 3) สมบัติของยางธรรมชาตินั้นค่อนข้างจะมีความไม่สม่ำเสมอ เนื่องมาจาก ความแปรปรวนของยางธรรมชาติที่มีสาเหตุหลักมาจาก ความไม่สม่ำเสมอในองค์ประกอบทางเคมีที่ ประกอบอยู่ในน้ำยาง ซึ่งถูกกำหนดโดยตัวแปรทางสภาพภูมิอากาศและทางชีวภาพ เช่น ลักษณะของ ดินที่ใช้ปลูกต้นยาง ฤดูกาล สายพันธุ์ของต้นยาง อายุของต้นยาง ส่วนของต้นยางที่ถูกกรีด ความถี่ใน การกรีดต้นยาง เวลากรีดในน้ำยางและอื่นๆ อีกมากมาย ซึ่งล้วนแล้วแต่ส่งผลให้ปริมาณของ องค์ประกอบที่ไม่ใช่ยางมีความแปรปรวน ซึ่งส่งผลถึงสมบัติของยางธรรมชาติ นอกจากนี้แล้ว ปรากฏการณ์การแข็งตัวของยางระหว่างการเก็บ (storage hardening) ก็ทำให้สมบัติของยางมีความ แปรปรวนเช่นเดียวกัน 4) ยางธรรมชาติมีกลิ่นเหม็น เนื่องมาจากส่วนที่ไม่ใช่ยาง โดยเฉพาะยางบาง ประเภทต้องการกลิ่นหอม 5) ยางธรรมชาติมีสมบัติที่แข็งขึ้น เนื่องจากอากาศทำปฏิกิริยากับยาง ธรรมชาติเมื่อทำการเก็บยางธรรมชาติเป็นเวลานาน และ 6) ยางธรรมชาติมีสีดกดำ เนื่องจาก องค์ประกอบของส่วนที่ไม่ใช่ยาง[8]

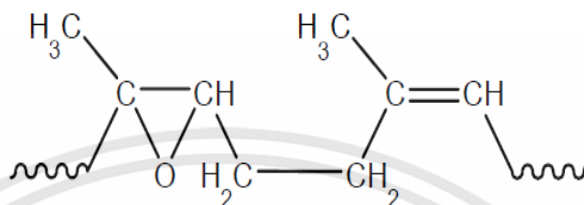
ยางแท่ง (technically classified rubber) เนื่องจากยางแผ่นและยางเครฟมีการจัด ขึ้นด้วยสายตาซึ่งให้ผลที่ไม่แน่นอน ด้วยเหตุนี้อุตสาหกรรมยางส่วนใหญ่ในปัจจุบันจึงเริ่มเปลี่ยนมาใช้ ยางแท่งหรือยางก้อนเป็นวัตถุดิบในการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ยางแทน ทั้งนี้ยางแท่งเป็นยางที่มีคุณภาพ สม่ำเสมอกว่ายางแผ่นและยางเครฟ ผ่านการทดสอบและจัดชั้นเพื่อรับรองคุณภาพตามหลักวิชาการ การจัดชั้นของยางแท่งจะพิจารณาจากปริมาณของสิ่งสกปรกที่มีอยู่ในยางเป็นสำคัญ นอกจากนี้ก็อาจ พิจารณาตัวแปรอื่นๆ ร่วมด้วย เช่น ปริมาณเถ้า และดัชนีความอ่อนตัว เป็นต้น ปัจจุบันประเทศไทยมี มาตรฐานยางแท่งเรียกว่า Standard Thai Rubber (STR) สำหรับยางแท่งเป็นยางที่ผลิตขึ้นมาโดย อาศัยหลักการคือ เริ่มต้นนำยางมาทำให้เป็นก้อนเล็กๆ เพื่อให้ง่ายต่อการชำระล้างสิ่งสกปรกออกไป ด้วยน้ำและง่ายต่อการทำให้แห้งในขั้นตอนถัดไป หลังจากการอบให้แห้งด้วยอากาศร้อน แล้วก็จะนำ ยางแท่งที่เป็นก้อนเล็กๆ เหล่านี้ไปอัดให้เป็นแท่งขนาดมาตรฐาน 330x670x170 มิลลิเมตร ที่มี น้ำหนักประมาณ 33.33 กิโลกรัม และสามารถจัดประเภทเกรดของยางแท่งจากวัตถุดิบในการผลิตได้ คือ กระบวนการผลิตยางแท่งที่ใช้น้ำยางสดเป็นวัตถุดิบ เช่น ถ้าต้องการผลิตยางแท่งเกรด STR XL หรือ STR 5L ซึ่งมีสีจางมาก (L ย่อมาจาก ligh และ XL ย่อมาจาก extra light) จำเป็นต้องใช้น้ำยาง สดเป็นวัตถุดิบ และใช้กรดฟอร์มิกในการทำให้อนุภาคยางจับตัวกันภายใต้สภาวะที่ควบคุมอย่างดี[9]

2.1.2.2 ยางธรรมชาติอีพอกซิไดซ์ (epoxidized natural rubber: ENR) [6,10]

ENR มีการผลิตในทางการค้า เช่น ENR-25 และ ENR-50 โดย ENR-25 หมายถึง ยาง ธรรมชาติที่มีจำนวนโมล 25% เกิดการอีพอกซิเดชัน และ ENR-50 หมายถึง ยางธรรมชาติที่มีจำนวน โมล 50% เกิดการอีพอกซิเดชัน และ ENR เป็นยางที่นำยางธรรมชาติมาปรับโครงสร้างโดยใช้สารเคมี จำพวกกรดเปอร์ออกซี (peroxy acid) มีสูตรโครงสร้างทางเคมีแสดงตามภาพที่ 2.5 ซึ่ง ENR จะมี ลักษณะเป็นสีน้ำตาลเข้มกว่ายางธรรมชาติปกติ ซึ่งสามารถเตรียมได้ทั้งชนิดน้ำยางและยางแท่ง โดยมีการผลิตขึ้นเพื่อปรับปรุงสมบัติบางประการของยางธรรมชาติให้ดีขึ้น เช่น ทำให้ยางมีความเป็นขั้วมากขึ้น สามารถทนต่อน้ำมันและตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วได้ดี ขึ้นเมื่อระดับการอีพอกซิเดชันเพิ่มขึ้น (ตารางที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1)[10] สามารถทนต่อโอโซน และการซึมผ่านของอากาศได้ดี เพราะพันธะคู่ในโครงสร้างยางธรรมชาติมีปริมาณน้อยลง อย่างไรก็ตามก็จะมีสมบัติบางประการที่ดีกว่ายางธรรมชาติ เช่น มีความยืดหยุ่นต่ำลง และหากนำไปเชื่อมโยงโมเลกุลด้วยกำมะถัน ENR จะไม่ทนความร้อน นอกจากนี้ยังพบว่า ENR ที่เสริมแรงด้วยซิลิกาจะมีสมบัติคล้ายยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยเขม่าดำอีกด้วย

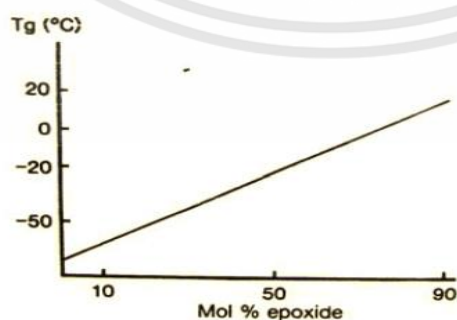


ภาพที่ 2.5 สูตรโครงสร้างทางเคมียางธรรมชาติอีพ็อกไซด์[5]

ตารางที่ 2.1 การบวมตัวในน้ำมัน ASTM ของยางธรรมชาติ และยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์เมื่อแช่ในน้ำมันเป็นเวลา 70 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 100°C [10]

น้ำมัน	การเปลี่ยนแปลงปริมาตร (%)		
	NR	ENR 25	ENR 50
ASTM No 1	95	10	-5
ASTM No 2	145	70	15
ASTM No 3	210	125	35

สมบัติและการใช้งาน ENR มีสมบัติส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับปริมาณหมู่อีพอกไซด์ที่มีในโครงสร้าง มีความต้านทานต่อแรงดึงสูงเช่นเดียวกับยางธรรมชาติ กล่าวคือจะเกิดผลึกขณะได้รับแรงดึง และที่ระดับปริมาณของวงแหวนอีพอกไซด์ต่างกันจะมีผลทำให้อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (T_g) แตกต่างกันกล่าวคือ เมื่อระดับการเกิดปฏิกิริยาอีพอกไซด์เพิ่มขึ้นทุกๆ 1 mol% จะทำให้ค่า T_g มีค่าเพิ่มขึ้น 1°C ความสัมพันธ์ระหว่างค่า T_g กับจำนวนโมลเปอร์เซ็นต์อีพอกไซด์แสดงในภาพที่ 2.6 [10]



ภาพที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (T_g) กับจำนวนโมลเปอร์เซ็นต์อีพอกไซด์ในยางธรรมชาติอีพอกไซด์[10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมบัติที่สำคัญของ ENR คือ 1) ENR มีออกซิเจนอยู่ในโครงสร้างโมเลกุล ทำให้ยางมีความเป็นขี้ผึ้งมากขึ้นสามารถทนทานต่อน้ำมันได้เช่นเดียวกับยางไนไตรล์ 2) สามารถทนทานต่อโอโซนและการซึมของอากาศดีใกล้เคียงกับยางบิวไทล์ เพราะพันธะคู่ในโครงสร้างยางธรรมชาติมีปริมาณลดน้อยลง และมีกลุ่มของอีพอกไซด์เกิดขึ้นแทนที่พันธะคู่ ทำให้โมเลกุลของยางเคลื่อนที่ได้ยากขึ้น และ 3) ผลิตภัณฑ์ยางที่เชื่อมโยงโมเลกุลด้วยกำมะถัน มีความต้านทานต่อความร้อนไม่ดี ยางจะมีความแข็งเพิ่มขึ้น เนื่องจากโครงสร้างยางตรงตำแหน่งที่มีออกซิเจนมารวมตัวกันเป็นวงแหวนที่ไม่แข็งแรง วงแหวนจะเปิดออกและเกิดการเชื่อมโยงแบบพันธะอีเทอร์เกิดขึ้น (ether crosslink)

2.1.2.3 สารทำให้ยางคงรูป (vulcanizing agents) [11]

สารที่ทำให้ยางคงรูปเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ต้องผสมลงไปในยางเพื่อทำให้ยางเกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่เรียกว่าปฏิกิริยาวัลคาไนซเซชันหรือปฏิกิริยาคงรูป การเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวจะส่งผลทำให้โมเลกุลของยางเกิดการเชื่อมโยงกันเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ ซึ่งจะทำให้ยางเปลี่ยนสภาพจากอ่อน เหนียวหนืด และไหลได้แบบเทอร์โมพลาสติกไปเป็นยางคงรูปที่มีความยืดหยุ่น มีความทนทาน และมีสมบัติที่เสถียรไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมากนักสำหรับสารทำให้ยางคงรูปที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้แก่ sulfur หรือ กำมะถันเป็นธาตุเคมีในตารางธาตุที่มีสัญลักษณ์ "S" และเลขอะตอม 16 เป็นอโลหะที่มีอยู่ทั่วไป ไม่มีรสหรือกลิ่น และมีวาเลนซ์ได้มากมาย กำมะถันในรูปแบบปกติเป็นของแข็งสีเหลืองที่เป็นผลึก ในธรรมชาติสามารถพบได้ในรูปธาตุเอง หรือแร่ซัลไฟด์และซัลเฟต โดยทั่วไปปริมาณของกำมะถันที่ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วง 0.5- 3 phr (ปริมาณที่ใช้จะขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสารเร่งปฏิกิริยา รวมถึงสมบัติของยางคงรูปที่ต้องการ) และกำมะถันที่ใช้ในยางเป็นกำมะถันที่มีขนาดอนุภาคเล็ก ซึ่งขนาดอนุภาคยิ่งเล็กจะทำให้กำมะถันกระจายในยางได้ทั่วถึงดีขึ้น ทำให้ยางเกิดการคงรูปได้ทั่วถึง และยางที่คงรูปแล้วจะมีสมบัติสูงด้วยการใส่กำมะถันลงในยางจะใส่หลังสุดในจำนวนสารเคมีทั้งหมด เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการคงรูปก่อนกำหนด

2.1.2.4 สารตัวเร่งปฏิกิริยา (accelerators) [11]

สารเคมีที่เติมลงไปในยางในปริมาณเล็กน้อยเพื่อช่วยลดเวลาที่ใช้ในการคงรูปยาง และสารตัวเร่งปฏิกิริยาจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาคงรูปสัดส่วนของการใช้สารกำมะถัน/สารตัวเร่งมีความสำคัญ เพราะเป็นตัวกำหนดชนิดของพันธะเคมีที่เกิดขึ้น เช่น ถ้าใช้ปริมาณสารกำมะถันมากและใช้สารตัวเร่งน้อย เรียกว่า ระบบธรรมดาหรือ conventional vulcanization (CV system) ซึ่งจะมีพันธะเคมีแบบ polysulphide crosslink และแบบ cyclic แต่ถ้าใช้ปริมาณสารกำมะถันน้อยและใช้สารตัวเร่งมากจะได้พันธะเคมีส่วนใหญ่เป็นแบบ monosulphide crosslink เรียกระบบนี้ว่าระบบประสิทธิภาพหรือ efficient vulcanization (EV system) นอกจากนี้ 2 ระบบดังกล่าวยังมีอีกระบบหนึ่ง เรียกว่า ระบบกึ่งประสิทธิภาพ (semi-EV system) ซึ่งจะอยู่กึ่งกลางระหว่าง 2 ระบบข้างต้น สำหรับสารตัวเร่งที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้แก่

1) MBTS (2,2 ; dibenzothiazyl disulfide) หรือไดเบนโซซออะซิลไดซัลไฟด์ เป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยา ที่นิยมมากในโรงงานอุตสาหกรรมเนื่องจากเหตุผลทางการคุ้มทุนในการผลิต เพราะสารตัวเร่งนี้ราคาไม่แพงและยังทำให้ยางเกิดการคงรูปเร็วอีกด้วย MBTS จะอยู่ในกลุ่มสารตัวเร่งไทอะโซล ซึ่งเป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ได้ดีกับยางทุกประเภท ทำให้ยางมีอัตราเร็วในการคงรูปปานกลาง และยางคงรูปที่ได้จะมีสมบัติเชิงกลที่ดี และมีความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพสูง จึงนิยมใช้กับยาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ธรรมชาติในกรณีที่ต้องการให้ยางที่ได้มีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพที่ดีเมื่อได้รับการคงรูปมากเกินไป

2) TBBS (N-tert-butyl-2-benzthiazyl sulphenamide) สารเร่งกลุ่มซัลฟิनाไมด์ เป็นสารเร่งที่มี scorch time ยาวคือมี delayed action เพราะเมื่อซัลฟิनाไมด์ได้รับความร้อนจะแตกตัวออกให้ MBT และต่างออกมา ระยะเวลาที่แตกตัวออกมานี้ก่อให้เกิด delayed action ถ้าแตกตัวออกคือ MBT กับต่างยึดกันแน่นจะทำให้ delayed action ยาวขึ้น เมื่อซัลฟิनाไมด์แตกตัวจะให้ MBT ซึ่งเป็นตัวไปก่อให้เกิดการวัลคาไนซ์และต่างจะเป็นตัวกระตุ้นในสารเร่งทำงานเร็วขึ้น ดังนั้นเมื่อเริ่มเกิดการวัลคาไนซ์แล้ว จะมีปฏิกิริยาเร็วปานกลาง ให้ยางที่มีโมดูลัสสูงมาก มีสมบัติทางเชิงกลดี ให้ flat cure สมบัติหลังการ aging ดีมาก สารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มซัลฟิनाไมด์เหมาะสำหรับใช้ในการคงรูปยางด้วยระบบคงรูปแบบ EV หรือ semi-EV โดยใช้กำมะถันประมาณ 0.3-1.0 phr และสารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มนี้จะไม่ปล่อยสารเอมีนทุติยภูมิออกมาในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาอย่างคงรูป ดังนั้นจึงไม่มีสารไนโตรโซเอมีน (nitrosoamines) ซึ่งเป็นสารที่ก่อให้เกิดมะเร็งเกิดขึ้นในระหว่างการทำปฏิกิริยา

2.1.2.5 สารกระตุ้นปฏิกิริยา (activators) [11]

สารกระตุ้นปฏิกิริยา คือสารเคมีที่เติมลงไปในยางเพื่อเพิ่มอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยา คงรูป เพราะสารเคมีในกลุ่มนี้จะเข้าไปกระตุ้นสารตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีประสิทธิภาพการทำงานสูงขึ้น สารกระตุ้นปฏิกิริยาจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับสารตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ไม่เสถียร ซึ่งสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับกำมะถันที่มีอยู่ในยางอย่างรวดเร็ว ทำให้ยางมีอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาคงรูปสูงขึ้น โดยทั่วไปสารกระตุ้นปฏิกิริยาสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ สารอนินทรีย์และสารอินทรีย์

1) สารอนินทรีย์ ส่วนใหญ่เป็นออกไซด์ของโลหะ เช่น ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) และออกไซด์ของตะกั่ว ซิงค์ออกไซด์จัดเป็นสารกระตุ้นที่นิยมใช้กันมากที่สุดไนโรงงานอุตสาหกรรม และแม้ว่าการใช้ซิงค์ออกไซด์เพียงอย่างเดียวจะสามารถเพิ่มอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาคงรูปได้ ปัจจุบันปริมาณที่ใช้มีแนวโน้มลดลงคือส่วนใหญ่จะเติมลงไปประมาณ 2-4 phr โดยทั่วไปพบว่า การใช้ซิงค์ออกไซด์ เพียงแค่ 3 phr ก็เพียงพอสำหรับระบบการคงรูปส่วนใหญ่ การลดปริมาณการใช้ซิงค์ออกไซด์ลงจะส่งผลดีต่ออุตสาหกรรม เนื่องจากซิงค์ออกไซด์ มีราคาแพงและมีความหนาแน่นสูงดังนั้น หากมีการใช้ลดลงก็จะช่วยลดปัญหามลพิษที่เกิดจากการกำจัดขยะยางได้อีกด้วย

2) สารอินทรีย์ สารกระตุ้นพวกอินทรีย์ที่สำคัญคือกรดไขมัน ได้แก่ กรดสเตียริก ดังที่กล่าวไว้แล้วว่าซิงค์ออกไซด์จะทำหน้าที่ได้เต็มประสิทธิภาพก็ต่อเมื่อใช้ร่วมกับกรดสเตียริก แม้ว่ายางดิบบางชนิดอาจมีกรดไขมันอยู่เล็กน้อย เช่นในยางธรรมชาติ อย่างไรก็ตามกรดไขมันที่เกิดขึ้นต่างธรรมชาติ นี้ จะมีปริมาณที่ไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ด้วยเหตุนี้ในการออกสูตรเคมียางจึงจำเป็นต้องเติมกรดไขมันลงไปเพิ่มและ นอกจาก กรดสเตียริกจะทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาแล้วกรดชนิดนี้ยังทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่น (lubricant) ทำให้ยางมีความหนืดลดลง และ stearic acid จะถูกใช้เป็นตัวกลางในการกระจายตัวในยาง จะช่วยในการกระจายตัวของสารตัวเติมและเม็ดสีในยาง นอกจากนี้ยังทำหน้าที่ เป็นสารหล่อลื่น ช่วยไม่ให้ยางไม่ติดแม่พิมพ์ ในขณะที่อัดขึ้นรูป stearic acid คือ กรดไขมัน (fatty acid) ซึ่งเป็นประเภทกรดไขมันอิ่มตัว (saturated fatty acid) มีคาร์บอน 18 อะตอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2.6 สารตัวเติม (fillers) [11]

สารตัวเติมคือองค์ประกอบที่เติมเข้าไปในยางเพื่อจุดประสงค์หลายอย่าง เช่น เพื่อเสริมแรงให้ยางมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น เพื่อให้ยางคอมปาวด์มีสมบัติเฉพาะที่เหมาะสมกับกระบวนการผลิต เพื่อลดต้นทุน เพื่อเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของยาง ลดการพองตัวของยางในน้ำมัน และเพื่อเพิ่มอายุการใช้งาน เป็นต้น สารตัวเติมที่ใช้ในอุตสาหกรรมสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ ตามประสิทธิภาพของการเสริมแรง คือ

1) สารตัวเติมชนิดเสริมความแข็งแรง (reinforcing fillers) เป็นสารตัวเติมที่ใส่เข้าไปในยางแล้วช่วยให้ยางมีสมบัติทางกายภาพดีขึ้น คือ มีความต้านทานต่อแรงดึง ต่อการสึกหรอ และต่อการฉีกขาดสูง เป็นต้น แต่ถ้าเพิ่มปริมาณของสารตัวเติมมากขึ้น จะทำให้ยางมีสมบัติความต้านทานต่อการกระดอนลดลง ส่วนใหญ่จะมีอนุภาคขนาดเล็กประมาณ 180-600 Å เช่น เชมดำ ซิลิกา เป็นต้น ซิลิกาเป็นสารตัวเติมอีกชนิดหนึ่งที่นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมยาง โดยเฉพาะในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีสีหรือผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความโปร่งแสงและมีสมบัติเชิงกลที่ดี แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากบนพื้นผิวของซิลิกามีหมู่ไฮดรอกซิล (หมู่ -OH) หรือหมู่ซิลานอลอยู่ในปริมาณมาก ทำให้มีความเป็นขั้วสูง ซิลิกาจึงแตกตัวและเข้ากับยางที่ไม่มีขั้วได้ยาก นอกจากนี้หมู่ซิลานอลดังกล่าวยังสามารถดูดซับสารกระตุ้นปฏิกิริยา ทำให้ยางเกิดการวัลคาไนซ์ได้ช้าลงและมีระดับของการวัลคาไนซ์ต่ำลง ดังนั้นจึงต้องแก้ปัญหาด้วยการเติมสารเคมีที่สามารถทำปฏิกิริยาได้ง่ายกับหมู่ซิลานอล เช่น ไดเอทิลีนไกลคอล (DEG) โพลีเอทิลีนไกลคอล (PEG) ไทรเอทานอลามีน (triethanolamine) หรือเฮกซะเมทิลีนเททระมีน (hexamethylene tetramine, HEXA) รวมถึงการเติมสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีฤทธิ์เป็นด่าง เช่น DPG หรือ DOTG ลงไปในสูตรเคมียางด้วย นอกจากนี้ยังต้องมีการเติมสารเคมีที่เรียกว่า สารคู่ควบไซเลน (silane coupling agent) ลงไปเพื่อเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างยางกับซิลิกา ทำให้ซิลิกาแตกตัวและกระจายตัวในยางได้ง่ายยิ่งขึ้น กระบวนการผลิตเป็นไปได้อย่างรวดเร็วและยางวัลคาไนซ์มีสมบัติเชิงกลและพลวัตดีขึ้น ตัวอย่างของสารคู่ควบไซเลนที่ใช้กันมาก ได้แก่ ไทรเอทอกซีซิลิลโพรพิลเททระซัลไฟด์ (bis-(3-triethoxysilylpropyl)-tetrasulfide; Si-69) เมอร์แคปโตโพรพิลไตรเมทอกซีซิลเลน (mercaptopropyl-trimethoxysilane; A-189) ไทโอไซยานาโตโพรพิลไตรเมทอกซีซิลเลน (3-thiocyanato-propyl-triethoxysilane; Si-264) เป็นต้น

2) สารตัวเติมชนิดกึ่งเสริมความแข็งแรง (semi-reinforcing filler) เป็นสารตัวเติมประเภทที่ใส่เข้าไปในยางแล้ว ช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับยางบ้าง สารตัวเติมเหล่านี้จะมีขนาดอนุภาคปานกลางเช่น แมกนีเซียมคาร์บอเนต ($MgCO_3$) ซึ่งเป็นสารตัวเติมกึ่งเสริมแรงที่มีลักษณะเป็นผงละเอียด นอกจากจะช่วยเสริมแรงแล้วยังช่วยให้ยางคอมปาวด์ที่ได้จากการอัดผ่านตายมีความแข็งแรงมากขึ้น จึงลดการเสีรูปร่างในระหว่างการอบคงรูปในระบบเปิด

2.1.2.7 สารทำให้ยางนิ่มและสารช่วยในกระบวนการผลิต (plasticizer, softeners and processing aids) [11]

สารทำให้ยางนิ่ม หมายถึงสารเคมีที่เติมลงไปในยางแล้วทำให้ยางเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ดียิ่งขึ้นหรือมีความหนืดต่ำลง ทำให้กระบวนการผลิตเป็นไปได้อย่างรวดเร็วยิ่งขึ้น นอกจากจะช่วยลดความหนืดของยางคอมปาวด์แล้ว สารทำให้ยางนิ่มยังช่วยปรับปรุงสมบัติความเหนียวตืด ทำให้สารตัวเติมกระจายตัวในยางได้ดีขึ้น และช่วยปรับปรุงสมบัติการหักงอที่อุณหภูมิต่ำของยางได้ด้วย สารในกลุ่มนี้จึงช่วยลดระยะเวลาและพลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิต การเลือกใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิดของสารทำให้ยางนิ่มจำเป็นต้องพิจารณาปัจจัยหลายอย่างประกอบกัน เช่น ความเข้ากันได้กับยาง ประสิทธิภาพ การตกสี และราคา เป็นต้น สำหรับสารช่วยในกระบวนการผลิต (processing aids) คือองค์ประกอบที่เติมเข้าไปในยางเพื่อช่วยให้กระบวนการผลิตในขั้นตอนต่างๆ เป็นไปได้ง่ายยิ่งขึ้น สารในกลุ่มนี้จึงช่วยลดระยะเวลาและพลังงานที่ใช้ในการผลิต ได้แก่ สารทำให้ยางเหนียวติดกัน (tackifiers) สารกลุ่มนี้นอกจากจะทำให้ยางคอมพาวด์เหนียวมากขึ้นแล้ว ยังทำให้ยางมีความเหนียวลดลง เพราะสารกลุ่มนี้จะมีสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิสูงจึงทำหน้าที่ป้อนสารทำให้ยางนิ่มด้วย

1) น้ำมันมีเนอรัล (mineral oils) น้ำมันมีเนอรัลจัดเป็นสารทำให้ยางนิ่มกลุ่มที่มีความสำคัญมากที่สุดเพราะมีราคาถูกและสามารถผสมเข้ากับยางได้หลากหลายชนิด สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มย่อยตามลักษณะโครงสร้างเคมี คือ น้ำมันพาราฟินิก (paraffinic oil) น้ำมันแนพเทนิค (naphthenic oil) และน้ำมันอะโรมาติก (aromatic oil) สำหรับน้ำมันพาราฟินิกคือสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดหนึ่งที่มีอะตอมของคาร์บอนต่อกันแบบอะลิฟาติก (aliphatic) คือเรียงต่อกันเป็นสายโซ่ตรงหรือมีกิ่งสาขาด้วยพันธะเท่านั้น น้ำมันพาราฟินิกจึงจัดเป็นน้ำมันที่อึดตัว

2) ปีโตรเลียมเรซิน เป็นสารทำให้ยางเหนียวติดกันที่มีราคาไม่แพงแต่ก็มีประสิทธิภาพในการทำยางเหนียวไม่สูงมากนัก จึงจำเป็นต้องเติมลงไปในยางในปริมาณที่สูง (อาจสูงถึง 10 phr หรือมากกว่านั้น) เรซินชนิดนี้ประกอบด้วยสารประกอบอินทรีย์หลายชนิดผสมกัน เช่น ไซโคลเพนทาไดเอิน (cyclopentadiene) ไดไซโคลเพนทาไดเอิน (dicyclopentadiene) สไตรีน (styrene) เมทิลสไตรีน (methylstyrene) อินดีน (indene) และเมทิลอินดีน (methylindene) ด้วยเหตุนี้เรซินชนิดนี้จึงเข้ากันได้ดีกับยางหลากหลายชนิด

2.1.2.8 สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (antidegradants) [11]

ยางส่วนใหญ่ที่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุลจะเสื่อมสภาพได้ง่าย โดยเฉพาะในภาวะการใช้งานที่ต้องสัมผัสกับแสงแดด ออกซิเจน โอโซน ความร้อน หรือโลหะที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (metal catalysis) รวมทั้งการใช้งานที่ต้องมีการหักงอเชิงกลตลอดเวลา (mechanical flexing) ดังนั้น การเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นเพื่อให้ได้ยางที่มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน เมื่อเกิดการเสื่อมสภาพ สมบัติต่างๆของยางก็จะด้อยลง การเสื่อมสภาพที่เกิดขึ้นอาจสังเกตเห็นได้จากการแข็งตัว (embrittlement) การอ่อนตัว (softening) รวมถึงการล้าตัวหรือการขยายตัวของรอยแตก (fatigue process) โดยทั่วไป การเสื่อมสภาพจะเกิดได้เร็วยิ่งขึ้นที่อุณหภูมิสูงหรือในภาวะที่มีการปนเปื้อนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชัน เช่น โลหะทองแดง (Cu) และแมงกานีส (Mn) เป็นต้น

1) การเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากออกซิเจน ซึ่งอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่เร่งปฏิกิริยาออกซิเดชัน การเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากออกซิเจนไม่เพียงเกิดขึ้นที่ผิวยางเท่านั้นแต่ยังเกิดขึ้นได้ทั่วทั้งก้อนยาง โดยทั่วไปการเสื่อมสภาพจากออกซิเจนอาจทำให้ยางอ่อนตัวลง (เพราะโมเลกุลของยางถูกตัดขาด) หรืออาจทำให้ยางแข็งขึ้น (เพราะเกิดการเชื่อมโยงมากขึ้น) ก็ได้ และการเปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นแบบใดนั้นก็ขึ้นอยู่กับชนิดของยางด้วย ดังนั้นสารป้องกันการเสื่อมสภาพในกลุ่มนี้ส่วนใหญ่เป็นอนุพันธ์ของฟีนอล เช่น BHT ซึ่ง BHT มีขนาดโมเลกุลเล็ก (ระเหยได้ง่าย) จึงเหมาะที่จะนำไปใช้เฉพาะในที่อุณหภูมิต่ำเท่านั้น และยังมีประสิทธิภาพในการป้องกันการเกิด crazing ได้ดีอีกด้วย

2) การเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากโอโซน ยางคงรูปที่มีพันธะคู่ในโมเลกุลเมื่อใช้งานในสภาวะที่ถูกยึดออกภายใต้สภาพอากาศทั่วไปจะเกิดรอยแตกขึ้นอย่างช้าๆ ในทิศทางที่ตั้งฉากกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทิศทางการความเค้นและรอยแตกนี้จะขยายตัวอย่างช้าๆ จนกระทั่งทำให้ยางเกิดการประลัย เช่นเดียวกับในกรณีของการล้าตัว สาเหตุหลักที่ทำให้เกิดรอยแตกขนาดเล็กๆ เหล่านี้คือโอโซน โดยทั่วไปรอยแตกจะไม่เกิดขึ้นถ้ายังไม่อยู่ในสภาวะที่ถูกยึดและปริมาณของรอยแตกต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามระดับการยึดตัวของยาง ปัจจัยสำคัญที่มีผลกระทบต่อการศึกษาอันเนื่องมาจากโอโซนของยางได้แก่อุณหภูมิและความชื้นในอากาศ เนื่องจากโอโซนจะเข้าทำปฏิกิริยากับยางที่ตำแหน่งพันธะคู่ ดังนั้นยางที่อึดตัวจึงมีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากโอโซนสูงเป็นพิเศษ สำหรับกลไกการเสื่อมสภาพเนื่องจากโอโซนคือ เมื่อโอโซนเข้าทำปฏิกิริยากับยางที่พันธะคู่เกิดเป็นโอโซนไนด์ (ozonide) ดังนั้นโอโซนไนด์ที่เกิดขึ้นจะไม่เสถียรและว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ทำให้มันเกิดการแตกตัว (เกิดการตัดขาดของสายโซ่โพลีเมอร์) หากยางอยู่ในสภาวะที่ถูกดึงกลไกดังกล่าวจะทำให้ยางเกิดการรอยแตกในทิศตั้งฉากกับแรงดึงและรอยแตกที่เกิดขึ้นก็จะลึกขึ้นเรื่อยๆ หากปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง สำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีสีอ่อนการเติมไข (wax) ลงไปจึงเป็นทางเลือกที่ดีในการปกป้องยางจากโอโซน เพราะไขจะบลูมออกมาและเกิดเป็นฟิล์มบางเคลือบอยู่ที่บริเวณพื้นผิวของยางจึงป้องกันไม่ให้โอโซนเข้าทำปฏิกิริยากับยาง อย่างไรก็ตามหากแผ่นฟิล์มนี้ถูกทำลาย ประสิทธิภาพในการป้องกันยางจากโอโซนก็จะลดลง การใช้ไขเพียงอย่างเดียวจึงไม่มีประสิทธิภาพสูงเพียงพอในการป้องกันผลิตภัณฑ์ที่ถูกนำไปใช้งานในเชิงพลวัต ตัวอย่างของไขที่นิยมใช้ในการป้องกันยางจากโอโซนส่วนใหญ่เป็นไขปิโตรเลียม (petroleum waxes) เช่นไขพาราฟิน (paraffine waxes)

2.1.2.9 สีอนินทรีย์ (inorganic pigment) [11]

สีอนินทรีย์ส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นผงที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะค่อนข้างต่ำ ดังนั้นสีอนินทรีย์จึงจัดเป็นสารตัวเติมไม่เสริมแรง อย่างไรก็ตามในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีสีส่วนใหญ่จะทำการเติมผงสีลงไปปริมาณเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ด้วยเหตุนี้การเติมสีเหล่านี้ลงไปจึงไม่ส่งผลกระทบต่อสมบัติของยางคงรูปมากนัก เนื่องจากสีอนินทรีย์ไม่ละลายในยาง ดังนั้นจึงไม่ก่อให้เกิดปัญหาการบลูม แม้ว่าสีอนินทรีย์จะให้ความสว่างสดใสมากกว่าสีอินทรีย์ แต่ว่าสีประเภทนี้มีความทนทานต่อสภาพอากาศและสารเคมีต่างๆ สูงกว่าสีอินทรีย์มาก

1) ไทเทเนียมไดออกไซด์ (titanium dioxide, TiO_2) เป็นสีอนินทรีย์ที่ให้สีขาวสว่าง มีค่าดัชนีหักเหสูง เสถียร และไม่เป็นพิษ จึงนิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมยาง แต่โดยทั่วไปจะเติมลงไปเพียงเล็กน้อยก็จะได้ความสามารถในการให้สีขาวสว่างและเมื่อให้คู่กับสีชนิดอื่นๆ จะทำให้สีนั้นๆ มีความสดใสมากยิ่งขึ้น ไทเทเนียมไดออกไซด์แบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดตามลักษณะโครงสร้างของผลึกคือ อะนาเทส (anatase) ซึ่งมีความหนาแน่นประมาณ 3.9 g/cm^3 และรูไทล์ (rutile) ซึ่งมีความหนาแน่นประมาณ 3.9 g/cm^3 สีที่มีโครงสร้างแบบอะนาเทสจะทำให้ยางมีสีขาวสว่างมากเป็นพิเศษ แม้ว่าโครงสร้างแบบรูไทล์จะให้สีที่ไม่สว่างเท่าแบบอะนาเทสแต่ทำให้ยางคงรูปมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าและมีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากแสงแดดและสภาพแวดล้อมสูงกว่า

2.1.2.10 สารคู่ควบไซเลน (silane coupling agent) [11]

ซิลิกาไม่มีหมู่ฟังก์ชันเคมีอินทรีย์ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาอยู่บนพื้นผิว (มีเพียงหมู่ซิลานอลอยู่ในปริมาณมาก) ทำให้ซิลิกาไม่มีความเป็นขั้วสูง ซิลิกาจึงเข้ากับยางที่ไม่มีขั้วได้ยาก ดังนั้นจึงต้องมีการเติมสารเคมีที่เรียกว่าสารคู่ควบไซเลนลงไปเพื่อเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างยางกับซิลิกา การเติมสารคู่ควบไซเลนจึงทำให้อันตรกิริยาระหว่างอนุภาคของซิลิกาตกลง ซิลิกาจึงแตกตัวและกระจายตัวในยาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 พอลิเมอร์ผสม [13]

2.1.3.1 ประเภทของพอลิเมอร์ผสม ซึ่งพอลิเมอร์ผสม (polymer blend) เป็นการนำพอลิเมอร์ ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปมาผสมเข้าด้วยกัน ประเภทของพอลิเมอร์ผสมสามารถแบ่งตามลักษณะวิทยาได้เป็น 3 ประเภท

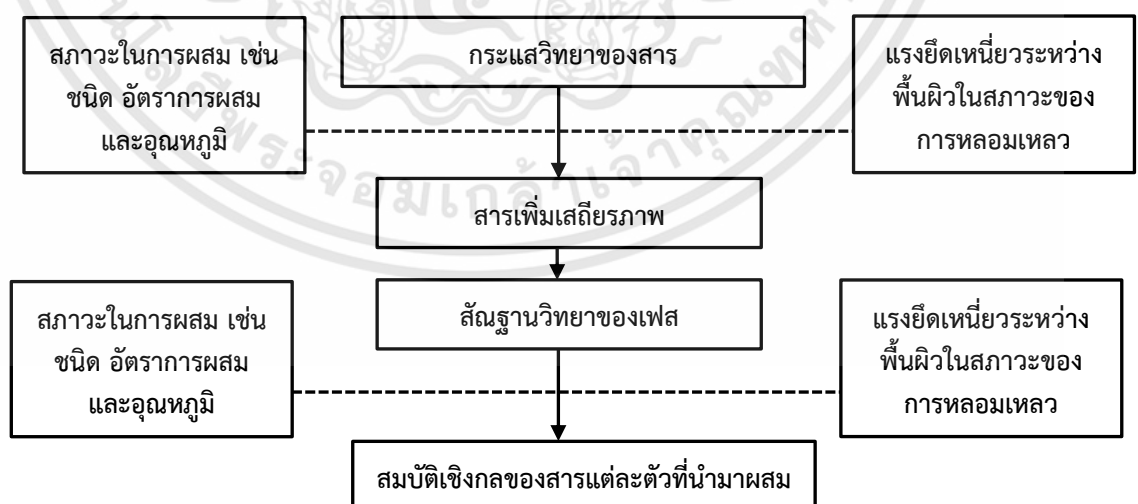
1) พอลิเมอร์ผสมที่สามารถเข้ากันได้เป็นเนื้อเดียวกันในระดับโมเลกุล (miscible blend) พอลิเมอร์ผสมประเภทนี้สามารถมองเห็นเป็นวัฏภาคเดียวกัน โดยที่โมเลกุลของพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดจะมีหมู่ฟังก์ชันที่แตกต่างกัน ทำให้เกิดแรงดึงดูดกัน สมบัติของพอลิเมอร์ผสมนี้จะมีลักษณะคล้ายกับโคพอลิเมอร์แบบสุ่ม (random copolymer)

2) พอลิเมอร์ผสมที่ไม่สามารถเข้ากันได้เป็นเนื้อเดียวกันในระดับโมเลกุล (immiscible blend) พอลิเมอร์ผสมประเภทนี้จะแยกออกจากกันเป็น 2 วัฏภาคอย่างเห็นได้ชัดเจนในระดับจุลภาค โดยพอลิเมอร์ที่มีปริมาณน้อยจะเป็นวัฏภาคกระจาย พอลิเมอร์ที่มีปริมาณมากจะเป็นวัฏภาคต่อเนื่อง

3) พอลิเมอร์ผสมที่สามารถเข้ากันได้บางส่วนในระดับโมเลกุล (partially miscible blend) พอลิเมอร์ผสมประเภทนี้อาจรวมเข้ากันได้เล็กน้อย พอลิเมอร์ชนิดหนึ่งอาจแทรกเข้าไปอยู่ในวัฏภาคของพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง ซึ่งทำให้วัฏภาคมีแรงยึดเหนี่ยวมากขึ้น ดังนั้นสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่ได้จะดีขึ้น

2.1.3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสม

การเตรียมพอลิเมอร์ผสมต้องพิจารณาถึงความเข้ากันได้ (compatibility) ของการผสม ซึ่งการผสมพอลิเมอร์ที่เข้ากันไม่ดีจะส่งผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสม ทำให้เกิดการแยกเฟสของพอลิเมอร์แต่ละชนิดอย่างชัดเจน โดยแต่ละเฟสจะมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างกันต่ำ ดังนั้นพอลิเมอร์ผสมที่ได้จะมีสมบัติเชิงกลและสมบัติอื่นๆ ต่ำกว่าพอลิเมอร์เดิมที่นำมาผสมโดยปัจจัยที่มีผลต่อการผสมดังแสดงในภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสม[13]

การเตรียมวัสดุยางใหม่ๆ เพื่อใช้งานเฉพาะทางในปัจจุบันมีแนวโน้มพัฒนาจากยางเบลนด์ โดยการผสมยางชนิดต่างๆ เข้าด้วยกัน แล้วควบคุมให้เกิดรูปร่างเฟส ขนาดของเฟส การยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสของพอลิเมอร์ต่างชนิดที่ต้องการ ทำให้สามารถผลิตวัสดุพอลิเมอร์ชนิดใหม่ที่มีสมบัติหลากหลาย ที่สามารถสนองความต้องการในการใช้งานในรูปแบบต่างๆ ได้ ซึ่งใช้เทคโนโลยีการเบลนด์อย่างง่าย ๆ ไม่มีความซับซ้อน การลงทุนและความพยายามที่มากกว่ายางสังเคราะห์ยางชนิดใหม่ สมบัติที่ได้รับการปรับปรุงเนื่องจากการเบลนด์ เช่น ความง่ายในการแปรรูป (processability) การทนทานต่อความร้อนและสารเคมี ทนทานต่อการกระแทกและการดึง และสมบัติเชิงกลอื่นๆ เป็นต้น ในการเตรียมยางเบลนด์จะพิจารณาความเข้ากันได้ (compatibility) ของการผสมเป็นหลัก ดังนั้น การเข้ากันได้จึงเป็นสิ่งสำคัญในการเตรียมยางเบลนด์ การผสมยางที่เข้ากันไม่ได้หรือเข้ากันได้ไม่ดีจะส่งผลเสียต่อสมบัติของยางเบลนด์ เนื่องจากเกิดการแยกเฟสของพอลิเมอร์แต่ละชนิดอย่างชัดเจน ซึ่งแต่ละเฟสจะมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างกันต่ำ จึงทำให้พอลิเมอร์เบลนด์ที่ได้เกิดการแตกหักได้ง่าย สมบัติเชิงกลและสมบัติอื่นๆ ต่ำกว่าพอลิเมอร์ที่นำมาเบลนด์

2.1.4 พลังงานไมโครเวฟ

2.1.4.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับไมโครเวฟ

ไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งมีความถี่อยู่ในช่วง 300 MHz – 300 GHz ในสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ไมโครเวฟมีความถี่อยู่ระหว่างช่วงความถี่ของคลื่นวิทยุกับรังสีอินฟราเรด ช่วงความถี่ถัดไปคือแสงที่ตามองเห็น ซึ่งเป็นช่วงความถี่สูง ดังนั้นไมโครเวฟจึงเป็นส่วนหนึ่งของการแผ่รังสีแบบไม่ทำให้อะตอมภายในสสารแตกตัว (non-ionizing radiations) ซึ่งคลื่นแบบนี้จะเป็นอันตรายกับสิ่งมีชีวิตน้อยมาก ไมโครเวฟจัดเป็นคลื่นที่ปลอดภัย ไม่มีสารกัมมันตรังสีตกค้างอยู่บนอาหารหรือคนที่ได้รับคลื่น แต่อย่างไรก็ตามหากได้รับคลื่นไมโครเวฟมากกว่า 5 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร (mW/cm^2) ก็อาจทำให้เกิดอันตรายต่ออวัยวะต่างๆ ได้เช่น ตาบอด และอวัยวะสุกใช้การไม่ได้ เป็นต้น[14]

สำหรับเตาไมโครเวฟบ้านจะใช้ความถี่ 2,450 MHz เท่านั้นโดยมีความยาวคลื่นในอากาศเท่ากับ 4.8 นิ้ว (12.192 cm) ปัญหาของการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟเกี่ยวข้องโดยตรงกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้า การกระจายตัวของอุณหภูมิและความชื้นรวมทั้งสมบัติของวัสดุไดอิเล็กตริก ดังนั้นจึงต้องรู้สมบัติวัสดุไดอิเล็กตริกรวมทั้งการควบคุมสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่ก่อให้เกิดความร้อนภายในวัสดุไดอิเล็กตริก ความร้อนที่เกิดขึ้นจะส่งผลถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความชื้น และสมบัติไดอิเล็กตริก ในขณะที่ไมโครเวฟแพร่ผ่านอากาศ พลังงานซึ่งพิจารณาให้มีสมบัติเหมือนอนุภาคที่ไม่มีมวลเรียกว่าโฟตอน (photon) นั้นจะแพร่ผ่านพื้นที่ว่างด้วยความเร็วแสง (3×10^8 m/s) อนุภาคจะเคลื่อนที่ในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ตั้งฉากกันเสมอและอยู่บนระนาบตั้งฉากกับทิศการเคลื่อนที่ของคลื่น สำหรับในอากาศไมโครเวฟจะแพร่กระจายด้วยความเร็วแสงซึ่งเป็นความเร็วสูงสุดที่พลังงานสามารถเดินทางได้ แต่สำหรับวัสดุเมื่อไมโครเวฟผ่านเข้าไปภายในเนื้อวัสดุที่มีความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานที่ดูดซับไว้ไปเป็นความร้อนนั้นขนาดของความยาวคลื่นจะลดลงเรื่อยๆ อันเนื่องมาจากการส่งถ่ายของพลังงานนั่นเอง โดยความหนาแน่นของสนามไฟฟ้ากำลังจะลดลงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล เมื่อเทียบกับระยะจากผิววัสดุ ความสามารถในการทะลุทะลวงของคลื่น (penetration depth) คือระยะจากผิววัสดุเข้าไปยังภายใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อวัสดุซึ่งทำให้สนามไฟฟ้ากำลังลดลงไปเป็น 0.38 เท่าจากผิววัสดุ โดยที่คลื่นนี้ยังคงแทรกสอดเข้าไปได้เมื่อเลยตำแหน่งนี้ไป การแพร่กระจายของไมโครเวฟผ่านวัสดุชนิดต่างๆ นั้นจะมีลักษณะคล้ายการแพร่กระจายของแสงผ่านวัสดุชนิดต่างๆ เช่น วัสดุที่มีความสามารถในการดูดซับ (absorber material) ส่วนมากเป็นวัสดุที่มีสมบัติเป็นฉนวน เช่น ยาง วัสดุโพลีเมอร์ เป็นต้น วัสดุประเภทนี้เมื่อไมโครเวฟส่งผ่านจะมีความสามารถในการดูดซับคลื่นบางส่วนและเกิดการสูญเสียไปเป็นพลังงานความร้อน ซึ่งความลึกที่คลื่นสามารถส่งเข้าไปภายในเนื้อวัสดุเพื่อทำให้เกิดความร้อนจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการทะลุทะลวงของวัสดุ

2.1.4.2 ความเกี่ยวข้องทางด้านอุตสาหกรรมของไมโครเวฟ

การประยุกต์ใช้กระบวนการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ เป็นวิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพสูงและเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับการพัฒนากระบวนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์สายพานลำเลียงเนื่องจากกระบวนการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟมีข้อได้เปรียบ ดังนี้ 1) ใช้เวลาสั้น ประหยัดพื้นที่และแรงงาน ช่วยลดจำนวนชิ้นงานเสียหายเนื่องจากอุปกรณ์ทำงานให้ความร้อนสม่ำเสมอ 2) มีการทะลุทะลวงของพลังงานที่ดี โดยคลื่นไมโครเวฟสามารถทะลุทะลวงเข้าไปให้ความร้อนที่ชั้นภายในและกระจายความร้อนอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน ในขณะที่กระบวนการให้ความร้อนแบบอื่นจะให้ความร้อนจากผิวด้านนอก ซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายที่ผิวด้านนอกอันเนื่องมาจากอุณหภูมิที่สูงเกินไป อีกทั้งยังใช้เวลานานกว่าเนื่องจากมีข้อจำกัดในด้านการนำความร้อน ดังนั้น กระบวนการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ จึงทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ดีกว่า (อุณหภูมิสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน) 3) สามารถเลือกใช้วัสดุที่รับความร้อนได้ 4) การควบคุมความร้อนอย่างรวดเร็วด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งระบบไมโครเวฟสามารถปรับอุณหภูมิได้อย่างรวดเร็วด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้เวลาน้อยมาก 5) มีประสิทธิภาพทางความร้อนสูงและสามารถรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ดี เนื่องจากการให้ความร้อนเชิงปริมาตร ใช้ระยะเวลาในการทำความร้อนสั้น 6) ไม่ก่อให้เกิดมลภาวะ กระบวนการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ เป็นกระบวนการที่สะอาด เนื่องจากพลังงานที่ใช้เป็นพลังงานสะอาด ไม่มีเขม่าไอเสีย ไม่เกิดมลภาวะ ซึ่งต่างจากกระบวนการให้ความร้อนอื่นๆ ที่ต้องใช้เชื้อเพลิงในการเผาไหม้ และ 7) อุปกรณ์ที่ใช้มีขนาดเล็กและมีค่าบำรุงรักษาต่ำ เป็นต้น

ปัจจุบันกระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟได้ถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายในงานอุตสาหกรรมอาหาร นอกจากนี้ยังมีการใช้ในอุตสาหกรรมยาง ซึ่งใช้การวัลคาไนซ์ด้วยไมโครเวฟกันอย่างกว้างขวางเพราะว่า สะดวก มีประสิทธิภาพสูง และคุ้มค่าในเรื่องพลังงานและเงิน เนื่องจากพลังงานไมโครเวฟทำให้เกิดความร้อนเชิงปริมาตรและเวลาในการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิสั้นกว่าระบบทั่วไปโดยความร้อนที่ไหลผ่านไปยังผิวของยางจะเคลื่อนที่เร็วกว่ามาก พลังงานจากไมโครเวฟสามารถให้ความร้อนแก่ยางสูงถึง 100 เท่า เร็วกว่าวิธีการกระบวนการทำความร้อนแบบธรรมดา และลดเวลาในกระบวนการผลิตลงซึ่งมีความจำเป็นอย่างมากต่อการปรับปรุงความสามารถในการผลิต

2.1.4.3 อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างสนามไฟฟ้ากับวัสดุไดอิเล็กตริก

เมื่อไมโครเวฟตกกระทบบัวัสดุไดอิเล็กตริก พลังงานบางส่วนจะถูกส่งผ่าน บางส่วนจะสะท้อนกลับ และบางส่วนถูกดูดซับไว้โดยตัววัสดุ หลังจากนั้นจะค่อยๆ เปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน ความร้อนที่เกิดขึ้นเกิดจากการเสียดสีกันของโมเลกุลที่มีขั้วภายในตัววัสดุที่พยายามจัดเรียงตัวใหม่ตามการสลับขั้วของสนามไฟฟ้า พลังงานที่เกิดขึ้นในวัสดุมีความสัมพันธ์กับความถี่ของแหล่งกำเนิด dielectric loss ของวัสดุและความเข้มของสนามไฟฟ้ากำลังสองที่วัสดุได้รับ และสามารถระบุชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของวัสดุและกระบวนการผลิตที่สามารถใช้กับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟอย่างมีประสิทธิภาพ และเข้าใจถึงกลไกการเกิดอันตรกิริยาของไมโครเวฟได้ หลังจากนั้นนำเอาการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟมาใช้ประโยชน์อย่างเต็มที่ในรูปแบบที่เป็นลักษณะเฉพาะตัวของไมโครเวฟ[14] ที่ความถี่ 2.45 GHz สนามไฟฟ้าจะทำให้โมเลกุลของน้ำหมุนเพื่อจัดเรียงตัวใหม่ 10^9 ครั้ง/วินาที ทำให้เกิดความร้อนมากขึ้นซึ่งสามารถเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วได้ถึง $10^{\circ}\text{C}/\text{วินาที}$ น้ำซึ่งเป็นตัวที่ทำให้เกิดความร้อนได้โดยตรงมีอยู่มากในวัสดุชีวภาพ อย่างไรก็ตามยังคงเป็นปัจจัยรองลงมาจากปัจจัยที่เกิดจากตัววัสดุ

เมื่อวัสดุที่เป็นฉนวนไฟฟ้าหรือ วัสดุไดอิเล็กตริก เช่น ไม้ กระจก พลาสติก ถูกนำเข้าไปในสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โมเลกุลของวัสดุไดอิเล็กตริกจะหมุนเคลื่อนที่หลายล้านครั้ง (4,900 ล้านครั้งต่อวินาทีสำหรับไมโครเวฟที่ความถี่ 2,450 MHz) โดยจะเคลื่อนที่ตามการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้า ซึ่งภายในวัสดุไดอิเล็กตริกจะมี dipole ของแต่ละโมเลกุลเรียงตัวอยู่อย่างไม่เป็นระเบียบ ซึ่ง dipole ในแต่ละโมเลกุลจะประกอบไปด้วยขั้วบวกและขั้วลบ เมื่อมีสนามไฟฟ้าวิ่งผ่านวัสดุไดอิเล็กตริกทำให้ dipole ในแต่ละโมเลกุลจะเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบและสลับขั้วตามการเปลี่ยนแปลงของคลื่น ซึ่งจากการสลับขั้วไปมาอย่างรวดเร็วของ dipole ทำให้เกิดการเสียดสีกัน ชนกันกับโมเลกุลตัวอื่นๆ เกิดพลังงานออกมาในรูปของความร้อนภายในโมเลกุล และเนื่องจากโมเลกุลอยู่ในวัสดุ ดังนั้นเมื่อเกิดความร้อนจากตัวโมเลกุลด้านใน แล้วค่อยส่งความร้อนออกมาด้านนอก จึงทำให้สามารถอธิบายได้ว่าทำไมไมโครเวฟจึงร้อนจากด้านในออกมาทางด้านนอก

2.1.5 การวิเคราะห์และประเมินโครงการ [15]

สำหรับการวิเคราะห์การลงทุนโครงการนั้น เป็นการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการจัดสรรทรัพยากรของโครงการที่กำลังพิจารณาว่า จะให้ผลประโยชน์ต่อโครงการ เพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบการพิจารณาตัดสินใจในการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่จำกัดให้ได้รับผลประโยชน์ต่อส่วนรวมมากที่สุด ผลการวิเคราะห์จะปรากฏออกมาในรูปของผลประโยชน์ที่คาดว่าจะได้ สูง หรือต่ำกว่าค่าใช้จ่ายที่ต้องเสียไป ถ้าผลประโยชน์ที่ได้สูงกว่าค่าใช้จ่าย โครงการนั้นก็จะเป็นโครงการที่ดี แต่ถ้าผลประโยชน์ต่ำกว่าค่าใช้จ่าย จะเป็นโครงการที่ไม่ดี การวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐกิจจึงมีส่วนช่วยในการตัดสินใจที่จะยอมรับ หรือไม่ยอมรับโครงการ ดังนั้นการวิเคราะห์ตัดสินใจเลือกลงทุนโครงการต่างๆ บางครั้งต้องการจะทราบว่าจำนวนผลผลิตที่จะผลิตคุ้มทุนควรเป็นเท่าไรเพื่อเป็นเครื่องช่วยในการตัดสินใจจุดคุ้มทุน (break-even analysis) คือจุดที่รายได้กับรายจ่ายเท่ากัน นั่นคือกำไรเป็นศูนย์นั่นเอง การวิเคราะห์จุดคุ้มทุนเป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของต้นทุน รายได้ และผลกำไรที่ปริมาณการผลิตต่างๆ การวิเคราะห์จุดคุ้มทุนเหมาะสมกับโครงการระยะสั้น เงื่อนไขต่างๆ ไม่เปลี่ยนแปลงตลอดโครงการ เพราะถ้ามีการเปลี่ยนแปลงก็จะมีผลทำให้การตัดสินใจคลาดเคลื่อนได้

การประเมินโครงการลงทุนนั้นใช้เครื่องมือได้หลายเครื่องมือในแต่ละเครื่องมือมีข้อดีข้อด้อยแตกต่างกันไป อย่างไรก็ตามปัจจุบันวิธีที่นิยมใช้กันมากคือ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (net present value method) และอัตราผลตอบแทนจากการลงทุน (internal rate of return method) ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบกระแสเงินสดรับ (cash inflows) เทียบกับกระแสเงินสดจ่ายลงทุน (cash outflows) ในรูปของมูลค่าปัจจุบันสุทธิ และร้อยละของผลตอบแทน หากใช้ 2 เครื่องมือนี้นในการตัดสินใจคัดเลือกโครงการผลการยอมรับหรือปฏิเสธโครงการจะไปในทิศทางเดียวกัน คือ โดยปกติโครงการที่มีกระแสเงินสดรับสุทธิตามค่ามากกว่า 0 จะมีร้อยละผลตอบแทนจากการลงทุนมากกว่าอัตราผลตอบแทนขั้นต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่ำ ในการตัดสินใจคัดเลือกโครงการมักขึ้นอยู่กับปัจจัยที่แตกต่างกันไปตามลักษณะของโครงการ ขั้นตอนการใช้เครื่องมือเพื่อทำการคัดเลือกโครงการโดยทั่วไปเป็นดังนี้ (ภาพที่ 2.8)

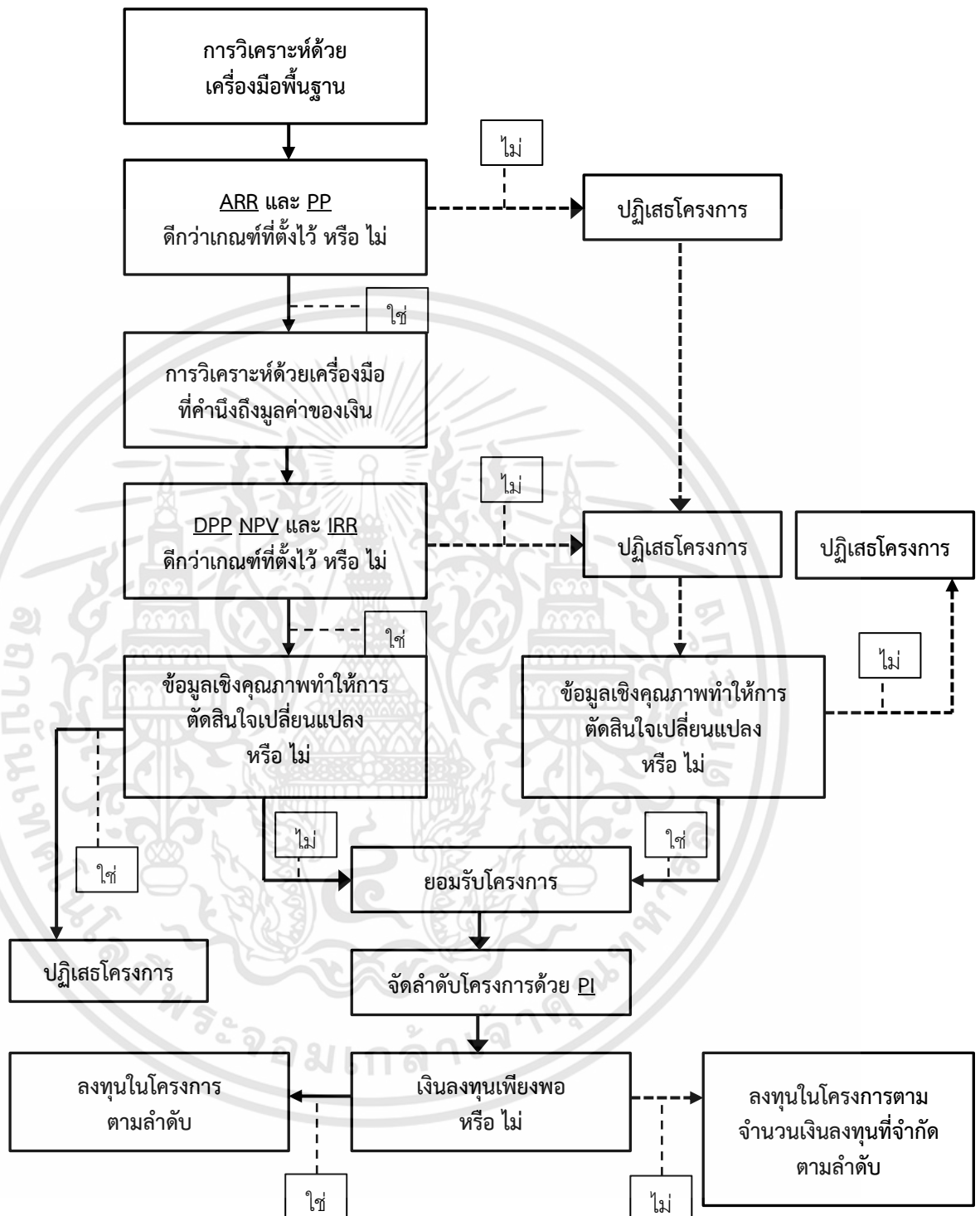
2.1.5.1 พิจารณาข้อมูลเชิงปริมาณ ประกอบด้วย

1) เครื่องมือทางการเงินที่ไม่คำนึงถึงมูลค่าของเงิน ได้แก่ ผลตอบแทนถัวเฉลี่ย (the average rate of return method: ARR) และระยะเวลาคืนทุน (payback period method: PP) โดยเปรียบเทียบกับผลตอบแทนและระยะเวลาคืนทุนที่กำหนดไว้ล่วงหน้าของโครงการในลักษณะคล้ายคลึงกัน

2) เครื่องมือทางการเงินที่คำนึงถึงมูลค่าของเงิน ได้แก่ ระยะเวลาคืนทุนที่คำนึงถึงค่าเงิน (discounted payback period method: DPP) ผลตอบแทนจากการลงทุน (the internal rate of return method: IRR) และมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (the net present value method: NPV) โดยทำการเปรียบเทียบกับอัตราผลตอบแทนขั้นต่ำที่ต้องการ

2.1.5.2 พิจารณาข้อมูลเชิงคุณภาพ โดยพิจารณาปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องอื่น เช่น โครงการบางชนิดแม้มีผลตอบแทนจากการลงทุนน้อยกว่าผลตอบแทนขั้นต่ำที่ต้องการ แต่การลงทุนนั้นเป็นสิ่งจำเป็นในระยะยาว หรือการลงทุนนั้นเปิดโอกาสให้มีการลงทุนโครงการอื่นต่อเนื่อง เป็นต้น

2.1.5.3 ตัดสินใจคัดเลือกโครงการ โดยทั่วไปหากมีเงินลงทุนเพียงพอจะคัดเลือกโครงการที่มีผลการคำนวณจากเครื่องมือต่างๆ ที่น่าพอใจ ในกรณีที่มีเงินลงทุนจำกัด จำนวนเงินลงทุนในแต่ละโครงการแตกต่างกัน และจำเป็นต้องคัดเลือกโครงการเพียงบางโครงการอาจพิจารณาผลตอบแทนต่อการลงทุนจากดัชนีการทำการกำไร (profitability index method: PI) เพื่อจัดลำดับโครงการเลือกลงทุนด้วย



ภาพที่ 2.8 แผนผังแสดงขั้นตอนการคัดเลือกโครงการ[15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 สารตัวเติม สารตัวเติมผสม และยางผสมระหว่าง ENR50/STR5L ที่มีผลต่อสมบัติกายภาพของยางคอมปาวด์สายพานลำเลียงอาหาร

สายพานลำเลียงอาหาร ถือว่าเป็นผลิตภัณฑ์ทางวิศวกรรม ที่มีความยืดหยุ่นสูง มีความบิดเบี้ยวน้อย และตัวสายพานจะมีสีขาว ใช้ยางธรรมชาติเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตจึงไม่ก่อมลพิษต่ออาหารที่ลำเลียง และไม่มีสารผสมสารเคมีที่เป็นอันตรายต่อร่างกาย ซึ่งประเด็นปัญหาหลักที่ควรระมัดระวัง ที่นอกเหนือจากประเด็นปัญหาดังกล่าวคือ ต้องเป็นวัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารตามข้อกำหนดขององค์การอาหารและยา ประเทศสหรัฐอเมริกา ดังนั้นตัวสูตรยางคอมปาวด์ถูกผสมมาอย่างเหมาะสมโดยคำนึงความสะดวกเป็นหลัก ตัวสายพานมีสีขาวเพื่อจะทำได้ทำความสะอาดได้ง่ายจึงจำเป็นต้องมีกรรมวิธีการเตรียมวัสดุที่มีประสิทธิภาพ ซึ่งการเตรียมวัสดุใหม่ๆ เพื่อใช้งานเฉพาะทางในปัจจุบัน มีแนวโน้มพัฒนาจากยางเบลนด์โดยการผสมยางชนิดต่างๆ เข้าด้วยกัน แล้วควบคุมให้เกิดรูปร่างเฟส ขนาดของเฟส การยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสของพอลิเมอร์ต่างชนิดที่ต้องการ ทำให้สามารถผลิตวัสดุพอลิเมอร์ชนิดใหม่ที่มีสมบัติหลากหลาย ที่สามารถสนองความต้องการในการใช้งานในรูปแบบต่างๆ ได้ ซึ่งใช้เทคโนโลยีการเบลนด์อย่างง่ายๆ ไม่มีความซับซ้อน การลงทุนและความพยายามที่มากกว่าการสังเคราะห์ยางชนิดใหม่ สมบัติที่ได้รับการปรับปรุงเนื่องจากการเบลนด์ เช่น ความง่ายในการแปรรูป (processability) การทนทานต่อความร้อนและสารเคมี ทนทานต่อการกระแทกและการดึง และสมบัติเชิงกลอื่นๆ เป็นต้น ในการเตรียมยางเบลนด์จะพิจารณาความเข้ากันได้ (compatibility) ของการผสมเป็นหลัก[16] ดังนั้นการเข้ากันได้จึงเป็นสิ่งสำคัญในการเตรียมยางเบลนด์ การผสมยางที่เข้ากันไม่ได้หรือเข้ากันได้ไม่ดี จะส่งผลเสียต่อสมบัติของยางเบลนด์ เนื่องจากเกิดการแยกเฟสของพอลิเมอร์แต่ละชนิดอย่างชัดเจน ซึ่งแต่ละเฟสจะมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างกันต่ำ จึงทำให้พอลิเมอร์เบลนด์ที่ได้เกิดการแตกหักได้ง่าย สมบัติเชิงกลและสมบัติอื่นๆ ต่ำกว่าพอลิเมอร์เดิมที่นำมาเบลนด์ สำหรับเทคโนโลยียางผสม (rubber blend technology) เป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายในปัจจุบันเนื่องจาก 1) สามารถรวมเอาสมบัติเด่นของยางแต่ละชนิดเข้าไว้ด้วยกันได้โดยไม่ต้องใช้วิธีที่ซับซ้อน ซึ่งแตกต่างจากการตัดแปรทางเคมีในโมเลกุลของยาง ซึ่งมีขั้นตอนที่ยุ่งยากและซับซ้อนกว่า และ 2) สามารถช่วยลดต้นทุนทางการผลิต เช่นการนำยางที่มีราคาถูกกว่าผสมกับยางที่มีราคาแพงกว่า อย่างไรก็ตาม การนำเทคโนโลยียางผสมไปประยุกต์ใช้จำเป็นต้องทำด้วยความระมัดระวัง เพราะสมบัติของยางเบลนด์นั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ อาทิเช่น สัดส่วนการผสม (blend ratio) แรงยึดติดระหว่างวัฏภาค (interfacial adhesion) การกระจายตัวของสารเคมีและการเชื่อมโยงในแต่ละวัฏภาค (distribution of chemicals and crosslinks between the rubber phases) และลักษณะทางสัณฐานวิทยา (morphology)[17] โดยทั่วไปลักษณะทางสัณฐานวิทยาสามารถใช้เป็นตัวชี้วัดถึงระดับความเข้ากันได้ของยางผสม กล่าวคือยางผสมที่มีขนาดของวัฏภาคยางที่กระจายตัวเล็กกว่า จะแสดงถึงความเข้ากันได้ของวัฏภาคยางที่ดีกว่า (เมื่อเปรียบเทียบที่สัดส่วนการผสมเท่ากัน) ส่งผลให้ได้ยางเบลนด์ที่มีสมบัติดีขึ้น[18-20]

ยางธรรมชาติเป็นสารประกอบพอลิเมอร์ ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่เกิดจากพันธะโคเวเลนต์ของหน่วยย่อยที่เรียกว่าไอโซพรีนและเมื่อหน่วยย่อยดังกล่าวเกิดการเชื่อมโยงเป็นโมเลกุล จะจัดเรียงตัวแบบ cis-1,4 Configuration[21,22] โครงสร้างโมเลกุลของไอโซพรีนยังสามารถเกิดกระบวนการพอลิเมอไรเซชันเป็นเอกสารที่สว่นไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลิเมอร์โรเซชันทำให้ได้ยางที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ความยืดหยุ่นดี ความบริสุทธิ์สูง เหมาะกับการผลิตผลิตภัณฑ์หลากหลายรูปแบบ[22] ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติแตกต่างกันไปตามวัตถุประสงค์การใช้งาน เช่น ทนความร้อน ทนน้ำมัน ด้านทานการนำไฟฟ้า เป็นต้น โดยทั่วไปยางธรรมชาติอาจมีการเสียสภาพเนื่องจากความร้อน โอโซน ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง รังสีและสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม[21-23] ยางธรรมชาติเป็นพอลิเมอร์ที่มีพันธะคู่ชนิดไม่มีขั้ว จึงไม่สามารถทนต่อน้ำมันหรือตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วได้ แต่ยางธรรมชาติมีสมบัติเด่น คือ มีความยืดหยุ่นสูงและมีสมบัติเชิงกลที่ดี[24-26] ในปัจจุบันมีการผลิตยางธรรมชาติที่มีการดัดแปรโครงสร้างในเชิงการค้าในประเทศไทย คือยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (epoxidized natural rubber : ENR) เป็นยางที่ได้จากการเติมออกซิเจนเข้าไปในโมเลกุลของยางตรงบริเวณพันธะคู่เกิดเป็นวงแหวนอีพอกไซด์ โดยผ่านปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันซึ่งมีระดับของการเกิดอีพอกซิเดชันตั้งแต่ร้อยละ 10-50 ดังนั้นยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ได้จึงมีความเป็นขั้วสูงกว่ายางธรรมชาติทั่วไป ทำให้ทนต่อความร้อนและน้ำมันได้ดีขึ้น โดยเกรดที่มีระดับอีพอกซิเดชันสูงถึงร้อยละ 50 จะแสดงความเป็นขั้วสูง ซึ่งจะมีความเป็นขั้วสูงเทียบเท่ากับยางไนไตรล์ (acrylonitrile butadiene rubber, NBR) ที่มีปริมาณอะคริโลไนไตรล์ปานกลาง[27] การเตรียมยาง ENR นี้สามารถเตรียมได้ทั้งในรูปของน้ำยางและยางแห้ง ถึงแม้ยางธรรมชาติจะถูกดัดแปรทำให้ได้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มี 50 โมลเปอร์เซ็นต์ แต่ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ยังสามารถเกิด strain crystallization ได้ ดังนั้นจึงทำให้ยาง ENR มีความทนแรงดึงสูง และเมื่อได้ทำการศึกษายาง ENR ด้วย X-ray diffraction พบว่ายาง ENR สามารถเกิด strain crystallization ได้ปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันเป็น stereospecific จึงทำให้พอลิเมอร์ที่ได้มี cis-1,4 configuration โดยออกซิเจนอะตอมของยาง ENR สามารถใส่ลงได้พอดีกับ crystal lattice ของยางธรรมชาติโดยไม่ทำให้เกิดความเครียดขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อมีโมลเปอร์เซ็นต์มากกว่า 50 โมลเปอร์เซ็นต์ปริมาณความเป็นผลึกจะลดลง[28] ซึ่งกล่าวได้ว่ายางธรรมชาติอีพอกไซด์เป็นรูปแบบใหม่ สำหรับการปรับปรุงโครงสร้างทางเคมีของน้ำยางธรรมชาติ เป็นผลทำให้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์มีสมบัติทางกายภาพคล้ายกับยางสังเคราะห์[29] และยาง ENR50 มีค่าความหนืดมูนิอยู่ในช่วง 75-90 หน่วย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องบดก่อนที่จะนำไปผสมกับสารเคมีต่างๆ (pre-mastication)[30] และพบว่าค่าความหนืดมูนิของยางธรรมชาติอีพอกไซด์จะลดลงอย่างรวดเร็วจนกระทั่งมีค่าเท่ากับยางธรรมชาติเมื่อผ่านการบดเป็นเวลา 3-5 นาที ส่วนความสามารถในการทนต่อตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว และสมบัติเชิงกลหลังผ่านการอบเร่งด้วยความร้อนของพอลิเมอร์ผสมจะมีค่าลดลง เมื่อสัดส่วนยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ผสมลดลง[31] ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความจริงที่ว่ายางธรรมชาติไม่ทนความร้อนและน้ำมัน ดังนั้นพอลิเมอร์ผสมที่มีโครงสร้างใกล้เคียงกับยางธรรมชาติมากขึ้นก็ย่อมจะมีสมบัติดังกล่าวด้วย และยังมีการศึกษายางธรรมชาติอีพอกไซด์อีกมากมาย ส่วนใหญ่เป็นการศึกษาเกี่ยวกับ วิธีการผลิต[32-34] สมบัติของยางดิบในด้านการไหล[35] สมบัติเชิงกล โครงสร้างสัณฐานวิทยา ลักษณะการวัลคาไนซ์[36-43] การใช้ร่วมกับยางชนิดอื่น[31,44,45] และ การใช้ร่วมกับสารตัวเติมชนิดสีดำ[46] เป็นต้น นอกจากนี้การปรับปรุงความเข้ากันได้ของผสมทั้งสองชนิดนี้มีหลายวิธี เช่น การใช้สารช่วยให้เข้ากัน (compatibilizer)[18,47,48] การปรับปรุงแรงยึดติดระหว่างผิวภาค (interfacial strength) ให้สูงขึ้นโดยการปรับเปลี่ยนระบบการคงรูปและชนิดของสารตัวเร่ง[49] การปรับเปลี่ยนสถานะในการผสม[19] การปรับเปลี่ยนอัตราส่วนความหนืด (viscosity ratio) ของยางทั้งสองชนิดก่อนที่จะนำมาผสมกัน เนื่องจากการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนความหนืดของพอลิเมอร์ผสมจะส่งผลต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยา[50-52] แม้ว่ายางธรรมชาติเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยางที่มีสมบัติเชิงกลที่ดีเยี่ยมและมีความยืดหยุ่นสูง เพราะสามารถตกผลึกได้เมื่อได้รับการดึงยืด แต่เนื่องจากยางธรรมชาติจัดเป็นยางที่ไม่มีขั้วจึงไม่สามารถทนต่อน้ำมันหรือตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วได้ในทางตรงกันข้ามกัน ยางธรรมชาติอพอกไซค์มีสมบัติเชิงกลที่ดี แต่เป็นยางที่มีความเป็นขั้วสูง ดังนั้นจึงมีสมบัติความทนทานต่อน้ำมันอยู่ในเกณฑ์ที่ดี ด้วยเหตุนี้ การนำยางสองชนิดนี้มาผสมกันจึงควรส่งผลทำให้ยางผสมที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่ดีเยี่ยมและความทนทานน้ำมันที่ดี อย่างไรก็ตาม การไม่เข้ากันของยางธรรมชาติกับยางธรรมชาติอพอกไซค์ เนื่องจากยางทั้งสองชนิดมีความเป็นขั้วที่ต่างกัน จึงทำให้แรงดึงผิวระหว่างรอยต่อของวัฏภาค (interfacial tension) มีค่าสูง ทำให้ยางทั้งสองจึงผสมกันได้น้อยในบริเวณนี้ และวัฏภาคกระจายตัว (dispersed phase) ที่ได้ก็มีขนาดใหญ่ซึ่งส่งผลต่อสมบัติเชิงกล นอกจากนี้ความเป็นขั้วที่แตกต่างกันของยางทั้งสองชนิดยังเป็นเหตุให้เกิดการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอของสารวัลคาไนซ์ในวัฏภาคของยางทั้งสองชนิด ทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยงมากเกินไปในวัฏภาคหนึ่งและอาจจะน้อยเกินไปในอีกวัฏภาคหนึ่ง นอกจากนี้ยังอาจเกิดการกระจายตัวที่ไม่เท่ากันของสารตัวเติมเสริมแรงในวัฏภาคของยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอพอกไซค์ มีผลให้สมบัติเชิงกลของยางเบลนด์ไม่ดีเท่าที่ควร และพบว่าอัตราส่วนของการเบลนด์ (blending ratio) มีอิทธิพลต่อสมบัติเชิงกล นอกจากนี้ยังพบว่ายางธรรมชาติอพอกไซค์ที่เสริมแรงด้วยการเติมซิลิกาจะมีสมบัติคล้ายกับยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยเขม่าดำ[46]

สำหรับสารตัวเติมในยางก็เป็นสิ่งที่มีความสำคัญเช่นกันเพราะว่าสารตัวเติมสามารถช่วยในการลดต้นทุน การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางฟิสิกส์และเชิงกลของยาง ช่วยในกระบวนการผลิต ลดการบวมพองตัวของยางในน้ำมัน เพิ่มการนำไฟฟ้า และเพิ่มอายุการใช้งานของยาง เป็นต้น ทั้งนี้มีการศึกษาการนำวัสดุอื่นๆ มาใช้เป็นสารตัวเติมในยางกันอย่างหลากหลาย เช่น การศึกษาสมบัติของยางที่ใช้ถ่านกัมมันต์เป็นสารตัวเติม เนื่องจากถ่านกัมมันต์ประกอบหลักคือซิลิกา ซึ่งใช้เป็นสารตัวเติมในอุตสาหกรรมยาง การใช้ถ่านกัมมันต์เป็นสารตัวเติมจะทำให้ระยะเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูปและระยะเวลาในการวัลคาไนซ์สั้นลง[53-54] ความแข็งแรงดึง ระยะยืดเมื่อขาด ความต้านทานต่อการฉีกขาด และความต้านทานต่อการสึกหรอมีค่าลดลง แต่โมดูลัสและความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้น[54-56] และการใช้ organo-montmorillonite ซึ่งเป็นสารตัวเติมสีขาวปริมาณเพียง 10 phr จะทำให้ยางคอมโพสิตมีสมบัติเชิงกลใกล้เคียงกับยางคอมโพสิตที่เติมเขม่าดำ 40 phr[57] ปัจจุบันสารซิลิกาและสารแมกนีเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติมชนิดสีขาวนิยมใช้กับผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติเพื่อเป็นสารตัวเติมในการผลิตผลิตภัณฑ์บางประเภทที่ต้องการทั้งสมบัติที่ดีและความมีสีสันทนในตัว ซึ่งสารตัวเติมแมกนีเซียมคาร์บอเนตเป็นผงละเอียดมีประสิทธิภาพเป็นสารกึ่งเสริมแรงทำให้ยางมีสมบัติต้านแรงดึง ต้านทานแรงฉีกขาด และต้านการสึกหรอได้สูง[58] และโดยทั่วไปแล้ว ซิลิกาจะมีขนาดอนุภาคเล็ก จึงทำให้ความแข็ง แรงดึง ระยะยืดเมื่อขาดมีค่าใกล้เคียงกับเขม่าดำ แต่ความต้านทานการสึกหรอและโมดูลัสต่ำกว่ากรณีที่ใช้เขม่าดำ เพราะซิลิกามีผิวเป็นสารอินทรีย์มากทำให้มีการยึดกับยางไม่ตึง[58] ผิวของซิลิกามีพันธะไฮโดรเจน จะเกิดการดูดสารตัวเร่งที่ผิวของ ซิลิกาได้ จะทำให้ระยะเวลาที่ยางเริ่มการคงรูปและระยะเวลาการวัลคาไนซ์สั้นลง สมบัติ ความแข็ง แรงดึง ระยะยืดเมื่อขาด ความต้านทานต่อการฉีกขาด และความต้านทานต่อการสึกหรอมีค่าลดลง แต่ค่าโมดูลัส และความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสารซิลิกาเพิ่มขึ้น และพบว่าการใช้สารซิลิกาเป็นสารตัวเติมชนิดเสริมแรง สามารถลดค่าการบวมพองในน้ำมันได้[59] การเติมสารควบคู่ไซเลนในสารซิลิกา จะช่วยให้การยึดกันระหว่างสารตัวเติมกับยางดีขึ้น ทำให้สมบัติเชิงกลดีขึ้นด้วย วิธีใช้สารควบคู่ไซเลน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้โดยการผสมสารตัวเติมกับสารควบคู่ไซเลนแล้วจึงค่อยผสมกับยาง หรืออาจเอาสารควบคู่ไซเลนใส่เข้าไปในยางขณะผสมกับสารตัวเติมก็ได้[60] นอกจากนี้การเติมสารควบคู่ไซเลนจะช่วยทำให้ความแข็ง แรงดึง มอดูลัส และความต้านทานต่อการฉีกขาดมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย[55,56,61] การใส่สารตัวเติมลงไปในยางเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยางให้ผลในลักษณะ “additive effect” ซึ่งเป็นผลรวมจากปัจจัยหลัก 4 ประการคือ 1) polymer network หรือพันธะเชื่อมโยงภายในยางซึ่งขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยง และความสมบูรณ์ของพันธะที่เกิดขึ้น 2) hydrodynamic effect หรือปริมาณสารตัวเติม การใส่อนุภาคของแข็งลงไปในยางทำให้ยางมีความหนืดเพิ่มขึ้น โดยปริมาณและรูปร่างของอนุภาคมีผลให้ยางมีความหนืดแตกต่างกัน 3) In-rubber structure หรือ rubber-filler interaction ซึ่งเป็นอันตรกิริยาระหว่างสารตัวเติมกับยาง และ 4) filler-filler interaction หรืออันตรกิริยาระหว่างผิวของอนุภาคสารตัวเติมเองซึ่งก่อให้เกิดการเกาะกลุ่มกันของสารตัวเติมเป็น filler network มีผลให้ยางคอมพาวด์มีค่า elastic modulus สูง [62-63]

2.2.2 พลังงานไมโครเวฟที่มีต่อสมบัติความร้อนและสมบัติกายภาพของยางคอมพาวด์สายพานลำเลียงอาหาร

ที่มาของปัญหาที่พบในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมสายพานลำเลียงอาหารคือการวัลคาไนซ์ (การสุก) ของยางที่ไม่เท่ากันตลอดความหนาของชิ้นงาน การหดตัวของชิ้นงาน และการเกิดฟองอากาศ นับว่าเป็นปัญหาหลักระดับต้นๆ ของผลิตภัณฑ์ ซึ่งสาเหตุของปัญหาดังกล่าวส่วนใหญ่เกิดจากขั้นตอนและเทคนิคในกระบวนการขึ้นรูป อย่างไรก็ตามวิธีการที่ใช้อยู่ทั่วไปส่วนใหญ่เป็นการให้ความร้อนโดยวิธีธรรมดา ซึ่งเป็นการป้อนความร้อนที่ผิวหน้าของชิ้นงาน บางครั้งอาจเกิดปัญหากับชิ้นงานที่มีความหนาหลายๆ เนื่องจากชิ้นงานได้รับความร้อนไม่ทั่วถึงหรือไม่สม่ำเสมอ ในขณะที่เกี่ยวกับสมบัติการนำความร้อนของยางยังเปลี่ยนไปตามระยะเวลาและอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นกับเนื้อยางเป็นไปอย่างไม่สม่ำเสมอทำให้ยางคอมพาวด์เกิดการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุลยางไม่ดี และมีผลต่อสมบัติเชิงโครงสร้างและสมบัติเชิงคุณภาพของยางคอมพาวด์เปลี่ยนไปด้วย[2] นอกจากนี้ตำแหน่งที่วัสดุสัมผัสความร้อนโดยตรงอาจเกิดการเสียหายได้ เพราะใช้เวลานานจนกว่าความร้อนจะเข้าถึงภายในเนื้อวัสดุอย่างทั่วถึง ด้วยเหตุนี้ทำให้ต้องเสียพลังงานและเวลาในกระบวนการขึ้นรูปรวมถึงการควบคุมคุณภาพทำได้ยาก ทำให้มีแนวคิดในการนำพลังงานไมโครเวฟมาใช้ทดลองให้ความร้อนหรือการอุ่นยางคอมพาวด์สูตรยางสายพานลำเลียงอาหารก่อนนำเข้ากระบวนการอัดขึ้นรูป โดยสมบัติที่ดีของยางคอมพาวด์อยู่ครบถ้วน เนื่องจากพลังงานไมโครเวฟ มีการได้เปรียบหลายประการ กล่าวคือ มีประสิทธิภาพทางความร้อนและคุณภาพของทางความร้อนสูงเพราะเป็นการให้ความร้อนเชิงปริมาตร และการทะลุทะลวงของพลังงานทำให้การกระจายของความร้อนสม่ำเสมอทั่วทั้งวัตถุ ใช้เวลาในการทำความร้อนสั้น พลังงานที่ใช้เป็นพลังงานสะอาดไม่มีเขม่าไอเสีย ไม่ก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม เครื่องจักรมีขนาดเล็กและค่าการบำรุงรักษาต่ำเนื่องจากมีองค์ประกอบน้อยชิ้น เป็นต้น[3]

การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟจะอาศัยสมบัติของการดูดกลืนพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟภายในผลิตภัณฑ์ ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่นำ มาผ่านกระบวนการนี้ต้องเป็นวัสดุประเภทวัสดุไดอิเล็กทริก หมายถึงวัสดุที่ฉนวนที่มีโครงสร้างพื้นฐานทางจุลภาคมีลักษณะเป็นขั้วทางไฟฟ้าซึ่งอันตรกิริยาระหว่างขั้วและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าส่งผลทำให้เกิดความร้อนภายในชิ้น ดังนั้นผลิตภัณฑ์จะถูกกระจาย

ความร้อนจากภายในออกสู่ผิวนอก ซึ่งหลักการนี้จะทำให้ผิวของผลิตภัณฑ์ไม่เสียหายหรือต่างไปจากเดิมมากนัก เนื่องจากวิธีการดังกล่าวของระบบนี้จะทำให้เกิดการระเหยของความชื้นภายในผลิตภัณฑ์เป็นไปอย่างรวดเร็วและมีการกระจายตัวของอุณหภูมิสม่ำเสมอ สามารถลดการเกิดรอยร้าวและรอยไหม้ในผลิตภัณฑ์ ซึ่งการใช้พลังงานจากคลื่นไมโครเวฟจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานทางอุตสาหกรรมได้หลายประเภท[4] วิธีไมโครเวฟ เป็นกระบวนการนำเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพสูงโดยการใช้คลื่นไมโครเวฟที่มีค่าความถี่และระดับพลังงานที่เหมาะสมต่อการทำลายพันธะคาร์บอน-คาร์บอน (carbon-carbon bond) พันธะคาร์บอน-ซัลเฟอร์ (carbon-sulfur bond) และพันธะซัลเฟอร์-ซัลเฟอร์ (sulfur-sulfur bond) ระดับพลังงานของคลื่นไมโครเวฟที่เหมาะสมนั้นจะอยู่ในช่วง 915 ถึง 2450 แมกกะเฮิร์ต (MHz) ยางที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชันที่มีหมู่ที่มีขั้ว จะมีความเหมาะสมกับเทคนิคไมโครเวฟมากที่สุด เนื่องจากหมู่ที่แสดงควมมีขั้วสามารถตอบสนองต่อคลื่นไมโครเวฟได้ดี ยางที่นิยมใช้ในกระบวนการนี้ ได้แก่ ยางสังเคราะห์พอลิเอทิลีน-พโรพิลีน (Ethylene-propylene diene rubber, EPDM) ยางบิวทิล (Butyl rubber, IIR) หรือยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (epoxidized natural rubber : ENR) เป็นต้น[64,65] และการศึกษาการวัลคาไนซ์ยางผสมระหว่างยางรีครีมกับยางธรรมชาติโดยมีเขม่าดำเป็นสารเสริมแรง พบว่าการใช้คลื่นไมโครเวฟในการวัลคาไนซ์เซชันนั้นมีผลกระทบต่อชนิดของพันธะเชื่อมขวางที่เกิดขึ้นในยาง โดยพันธะเชื่อมขวางที่เกิดจากการวัลคาไนซ์เซชันมีแนวโน้มที่จะเป็น mono- และ di-sulfidic crosslink มากกว่ายางในสูตรเดียวกันที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์เซชันด้วยความร้อนแบบปกติ เนื่องจากกระบวนการที่ทำให้วัสดุร้อนขึ้นของไมโครเวฟนั้นเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและการทำความร้อนด้วยวิธีนี้จะทำให้บริเวณกึ่งกลางชิ้นงานเป็นบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงที่สุดและค่อนข้างมีอุณหภูมิใกล้เคียงกันเกือบทั้งชิ้นงาน ซึ่งต่างจากกระบวนการให้ความร้อนของวัสดุตามปกติที่เป็นการส่งผ่านความร้อนจากด้านนอกเข้าไปสู่ด้านในเนื้อวัสดุ[66-68] นอกจากนี้สายโซ่โมเลกุลของยางอาจจะเกิดการเสื่อมสภาพ ได้เนื่องจากการได้รับพลังงานความร้อนสูง หรือจะมีลักษณะรีเวอร์ชัน คือปรากฏการณ์ที่จำนวนพันธะก้ามะถันที่เชื่อมโยงโมเลกุลของยางลดลงเมื่อได้รับความร้อนสูงเกินไปหรือวัลคาไนซ์ที่นานเกินไป และยังเป็นสาเหตุให้สมบัติทางกายภาพของยางวัลคาไนซ์ลดลงด้วย[69,70]

อย่างไรก็ตามแต่ก็ยังม้งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการนำพลังงานไมโครเวฟมาใช้ดูลักษณะของยางธรรมชาติที่ใส่และไม่ใส่เขม่าดำ[71] ยางล้อรถยนต์โดยการแยกออกมาเป็นคาร์บอน[72] การแตกพันธะเคมีของเศษยางวัลคาไนซ์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ[73] การศึกษาเกี่ยวกับวิธีการและอุปกรณ์สำหรับให้ความร้อนแก่วัสดุด้วยพลังงานไมโครเวฟ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกระบวนการดีวัลคาไนซ์ (De-vulcanization) ของชิ้นส่วนที่เป็นเศษยางโดยการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ พบว่าเศษยางที่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยพลังงานไมโครเวฟสามารถนำกลับมารีไซเคิลเป็นยางชนิดใหม่ได้[74] หรือการนำคลื่นไมโครเวฟมาใช้ในการศึกษาสมบัติไดอิเล็กตริกของยางธรรมชาติก่อนและหลังการวัลคาไนซ์[75] การศึกษาลักษณะการเชื่อมโยงของโมเลกุลยางในกระบวนการวัลคาไนซ์ด้วยพลังงานไมโครเวฟ[76] การศึกษาลักษณะการวัลคาไนซ์ยาง[77] และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการเชื่อมโยงโมเลกุลยางกับพลังงานไมโครเวฟโดยวิธีไมโครเวฟแบบอิมมูมิงค์[78] นอกจากนี้ได้มีการนำพลังงานไมโครเวฟมาผสมกับการอบด้วยลมร้อนแบบดั้งเดิม (conventional heating) ในการวัลคาไนซ์ท่อยาง (rubber hose) โดยใช้สองขั้นตอนคือ ใช้การพรีวัลคาไนซ์ (pre-vulcanization) ด้วยพลังงานไมโครเวฟและการวัลคาไนซ์เซชันด้วยวิธีดั้งเดิมโดยการนำพาความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผ่านตัวกลางที่เป็นตัวให้ความร้อนพบว่าการใช้คลื่นไมโครเวฟให้ความร้อนจากพลังงานไมโครเวฟและแบบลมร้อนนั้นจะช่วยลดระยะเวลาการเคียว (cure time) ของยางได้ เนื่องจากพลังงานไมโครเวฟจะช่วยทำให้ยางเกิดความร้อนจากชั้นงานด้านในสู่ด้านนอกภายในระยะเวลาอันรวดเร็ว และพอผ่านชั้นงานตัวอย่างดังกล่าวไปยังตู้อบด้วยลมร้อนอย่างต่อเนื่องนั้น จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่สามารถขึ้นรูปได้รวดเร็ว และประหยัดพลังงานเมื่อเทียบกับกระบวนการวัลคาไนซ์แบบดั้งเดิม[79] และมีการใช้พลังงานไมโครเวฟสำหรับอุ้งยางคอมปาวด์นั้นมีการใช้ในบริษัท Avontyre Ltd. ที่ผลิตยางต้นสำหรับรถฟอร์คลิฟ สามารถลดเวลาการอัดขึ้นรูปยางคอมปาวด์ขนาด 30 กิโลกรัมจาก 120 นาทีลงเหลือเพียง 70 นาที ด้วยการอุ้งยางให้ร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟเป็นเวลา 10 นาทีก่อนการอัดขึ้นรูป[80] ยังมีการศึกษาการวัลคาไนซ์ยางผสมระหว่างยางธรรมชาติ (natural rubber) และยางบิวตะไดอิน (butadiene rubber) ที่มีเขม่าดำเป็นสารเสริมแรงโดยใช้ลำแสงอิเล็กตรอน (electron beam) และคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลำแสงอิเล็กตรอน พบว่าถ้ามีการใช้คลื่นไมโครเวฟมาร่วมในการวัลคาไนซ์เซชันด้วยนั้น จะทำให้ลดเวลาในการเกิดการวัลคาไนซ์เซชันลงเป็นอย่างมาก[81]

2.2.3 การวิเคราะห์การลงทุนโครงการ

สำหรับการประเมินโครงการหรือการประเมินความคุ้มค่าในการลงทุนจะทำให้ทราบถึงความเป็นไปได้ของโครงการในแต่ละทางเลือก ซึ่งวิธีในการประเมินโครงการจะวิเคราะห์ความอยู่รอดโดยพิจารณามูลค่าปัจจุบันสุทธิ (net present value: NPV) การวิเคราะห์จุดคุ้มทุน (break-even analysis) การวิเคราะห์อัตราผลตอบแทน (rate of return : ROR) และการวิเคราะห์ความไวในการลงทุน (sensitivity analysis) เป็นต้น นอกจากนี้ในการทำโครงการยังต้องคำนึงถึงปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลต่อโครงการเช่น อัตราเงินเฟ้อ และ อัตราการแลกเปลี่ยน ในการวิเคราะห์ความอยู่รอดของโครงการโดยวิเคราะห์เพื่อการเปรียบเทียบทางเลือกในการลงทุน สามารถวิเคราะห์ได้โดยวิธีคงที่ (static) และวิธีการไม่คงที่ (dynamic) ตัวแปรที่ทำให้วิธีการทั้งสองแตกต่างกัน คือ กระแสเงินสด (cash flow) ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา เนื่องมาจากอัตราดอกเบี้ย ซึ่งวิธีการแบบไม่คงที่ เป็นเครื่องมือเพื่อการตัดสินใจในเชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม การประมาณการทางการเงินของโครงการจะใช้วิธีการมูลค่าของเงินเทียบเท่าปัจจุบันสุทธิ[82] การวิเคราะห์อัตราผลตอบแทน (rate of return: ROR) อัตราผลตอบแทนเป็นตัวประเมินโครงการที่สำคัญซึ่งใช้กันทั่วไปในภาคธุรกิจและการลงทุนซึ่งจะทำให้ทราบถึงอัตราผลตอบแทนต่อช่วงเวลาหรือความสามารถในการทำกำไรของโครงการ การประเมินอัตราผลตอบแทนต่ำเกินไปส่งผลให้ต้นทุนโครงการ (capital cost) ของโครงการสูง ถ้าประเมินสูงไปจะส่งผลให้ต้นทุนโครงการต่ำแต่ต้นทุนการดำเนินงานจะสูง การหาอัตราผลตอบแทนสามารถหาผ่านวิธีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ ซึ่งอัตราดอกเบี้ยที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิมีค่าเท่ากับศูนย์ ก็คืออัตราผลตอบแทนภายในโครงการ (Internal rate of return: IRR) จากการประเมินโครงการต่างๆที่ใช้ในการประเมินการลงทุนตั้งแต่การตัดสินใจทางการเงินจะใช้ศึกษาค่าสำคัญทางเศรษฐศาสตร์ เช่น มูลค่าปัจจุบันสุทธิ มูลค่าเพิ่มเชิงเศรษฐศาสตร์และอัตราผลตอบแทนจากการลงทุน สามารถเชื่อมโยงเข้ากับการวิเคราะห์ความไวต่อการลงทุน โดยเฉพาะ การแสดงถึงความสำคัญของความแตกต่างในการวัดผล (differential importance measure: DIM) เกี่ยวกับความสัมพันธ์ในการวิเคราะห์ความยืดหยุ่นและความไวของการลงทุน เป็นเทคนิคในการประเมินด้วยการตัดค่ากระแสเงินสด แสดงถึงผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยรวมของมูลค่าปัจจุบันสุทธิและอัตราผลตอบแทนจากการลงทุนบนความไวของการเปลี่ยนแปลงในกระแสเงินสด ผลเฉพาะถูกใช้ในรูปแบบของการประเมินมูลค่าของโครงการภายใต้ความเสี่ยงที่อยู่รอดได้[83]

ได้มีการศึกษาความเป็นไปได้ของการตั้งโรงงานผลิตถุงมือยางทางการแพทย์ที่ใช้ในการตรวจโรค (examination gloves) เพื่อการส่งออกที่จังหวัดสงขลา ได้ทำการศึกษาโดยครอบคลุม 4 ประเด็น คือ การศึกษาด้านการตลาด ด้านเทคนิค ด้านการเงิน และด้านเศรษฐกิจ ซึ่งการวิเคราะห์ด้านการเงินได้ทำการศึกษาถึงการลงทุนในโครงการ แหล่งที่มาของเงินทุน ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน ความสามารถทางการเงินของโครงการ และการวิเคราะห์ผลตอบแทนการลงทุน เนื่องจากมีอายุโครงการถึง 11 ปี เพื่อให้การคำนวณต้นทุน และผลประโยชน์ในแต่ละปี มีค่าใกล้เคียงกับความเป็นจริง การวิเคราะห์ถึงความเป็นไปได้ของโครงการจึงเลือกใช้เกณฑ์การตัดสินใจแบบปรับค่าเวลาทั้ง 3 แบบ คือ วิธีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (net present value: NPV) อัตราผลตอบแทนต่อค่าใช้จ่าย (benefit-cost ratio: BCR) และอัตราผลตอบแทนของโครงการ (internal rate of return: IRR) โครงการนี้ใช้เงินลงทุนทั้งสิ้น 66.5 ล้านบาทจากการวิเคราะห์พบว่าได้ NPV เท่ากับ 44.25 ล้านบาท BCR เท่ากับ 1.04 และ IRR เท่ากับ 16.8% ระยะเวลาคืนทุน (payback period: PB) 6 ปี จากการวิเคราะห์พบว่าโครงการมีความเป็นไปได้ทางธุรกิจ[84] ศึกษาความเป็นไปได้ของการตั้งโรงงานผลิตถุงมือยางทางการแพทย์ผลการศึกษาพบว่า นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด อำเภอเมือง จังหวัดระยองเป็นพื้นที่ที่เหมาะสมแก่การก่อตั้งโรงงานผลิตถุงมือยางทางการแพทย์ เนื่องจากเป็นพื้นที่ที่มีความพร้อมในด้านปัจจัยพื้นฐานการผลิต และยังคงอยู่ใกล้กับท่าเรือมาบตาพุด กับท่าเรือแหลมฉบัง จังหวัดระยองมีการปลูกยางพารากันมาก มีโรงงานผลิตน้ำยางชั้นหลายแห่ง มีแรงงานเพียงพอ สำหรับการวิเคราะห์โครงการ ณ อัตราคิดลดร้อยละ 12 ต่อปี จากการวิเคราะห์ทางการเงิน พบว่ามูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) เท่ากับ 120.5813 ล้านบาท อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อค่าใช้จ่าย (BCR) เท่ากับ 1.135 อัตราผลตอบแทนทางการเงินของโครงการ (IRR) เท่ากับ 25.23% ระยะเวลาคืนทุน (PB) เท่ากับ 5.32 ปี โดยโครงการนี้ใช้เงินลงทุนทั้งสิ้น 126.7430 ล้านบาท ซึ่งจะเห็นได้ว่าโครงการยังมีความเป็นไปได้ในการลงทุน ส่วนการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐกิจ พบว่า โครงการมีความคุ้มค่าในการลงทุน[85] ศึกษาความเป็นไปได้ของการจัดตั้งโรงงานผลิตยางรีเคลมจากถุงมือเสียในนิคมอุตสาหกรรมภาคใต้ ซึ่งได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ 5 ด้านได้แก่ ด้านการตลาด ด้านสิ่งแวดล้อม ด้านการจัดการ ด้านเทคนิค และด้านการเงิน ซึ่งการศึกษาด้านการตลาดนั้น ผู้วิจัยได้เริ่มศึกษาสภาพวัตถุดิบ ภาวะคู่แข่งและพฤติกรรมผู้บริโภคได้แก่ข้อเด่น ข้อด้อย และความต้องการของผู้บริโภค มาออกแบบส่วนประกอบทางการตลาด ออกแบบตลาดเป้าหมาย และพยากรณ์การขาย เป็นต้น หลังจากรู้จักกำลังการผลิตของโรงงานแล้ว ผู้วิจัยก็เริ่มศึกษาด้านเทคนิค และด้านสิ่งแวดล้อมพร้อมกันเนื่องจากโรงงานตั้งอยู่ในนิคมอุตสาหกรรมภาคใต้ เพราะฉะนั้นการสร้างโรงงานพร้อมทั้งด้านสิ่งแวดล้อมต้องปฏิบัติตามเงื่อนไขของการนิคมอุตสาหกรรมภาคใต้ซึ่งได้ออกแบบและวางผังเครื่องจักรในโรงงาน โดยโรงงานมีพื้นที่ขนาด 3-2-93.7 ไร่ และด้านการจัดการซึ่งจะศึกษาด้านการสรรหา การจัดตำแหน่งงานพร้อมทั้งค่าตอบแทน และการวางแผนผังองค์กร เป็นต้น และสุดท้ายเป็นการศึกษาด้านการเงิน ซึ่งได้วิเคราะห์โครงการ 10 ปีต้องใช้เงินลงทุนทั้งสิ้น 18,427,950 บาทประกอบด้วยเงินลงทุนส่วนของผู้ถือหุ้น 10,377,950 บาท และเงินกู้จากสถาบันทางการเงิน 8,050,000 บาท (อัตราส่วนการลงทุน 56% : 44%) อัตราดอกเบี้ยเงินกู้ 7.50% เป็นระยะเวลา 10 ปีภายใต้ข้อสมมติที่ตั้งขึ้น ได้ผลการตอบแทนการลงทุน (IRR)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

32.62% ค่ามูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) 28,898,936.21 บาท และระยะเวลาในการคืนทุนประมาณ 3 ปี 5 เดือน[86] ศึกษาความเป็นไปได้ของการลงทุนผลิตแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก: กรณีศึกษาอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ โดยพิจารณาความเป็นไปได้ทางด้านอุปสงค์ เทคนิค และเศรษฐศาสตร์ ของการลงทุนโครงการ เพื่อลดการนำเข้าแม่พิมพ์จากต่างประเทศในระยะยาว ผลการวิจัยพบว่า แม่พิมพ์ซึ่งเป็นกลุ่มเป้าหมายทางด้านอุปสงค์คือ กลุ่มแม่พิมพ์สำหรับผลิตที่มีกลไกการทำงาน ขนาดแรงอัด 1-100 ตัน โดยแม่พิมพ์ถูกแบ่งตามลักษณะเฉพาะเป็น 8 กลุ่ม เพื่อใช้เป็นกลุ่มเป้าหมายในการศึกษา และได้พยากรณ์ความต้องการต่อปีของแม่พิมพ์ในแต่ละกลุ่มผลิตภัณฑ์ด้วยวิธีการพยากรณ์แบบปรับเรียบ exponential อย่างง่าย ในการศึกษาความเป็นไปได้ทางด้านเทคนิคได้นำผลของการพยากรณ์มาใช้เป็นเป้าหมายในการกำหนดขนาดของโครงการซึ่งโครงการซึ่งโครงการมีความสามารถในการผลิตแม่พิมพ์มากที่สุด 68 ชุดต่อปี นอกจากนี้ได้ศึกษาขั้นตอนในการผลิตแม่พิมพ์ และกำหนดปัจจัยสำคัญในการทำโครงการ ได้แก่ โปรแกรมในการออกแบบ วัสดุ แรงงาน เครื่องจักรในการผลิต และพื้นที่ในการทำโครงการ ในการศึกษาความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ในการลงทุนโครงการ ระยะเวลาการวิเคราะห์ 10 ปี มูลค่าปัจจุบันสุทธิของกระแสเงินสดสุทธิในโครงการเท่ากับ 34,830,268 บาท อัตราผลตอบแทนภายในที่ร้อยละ 30.24 ต่อปี ซึ่งมีค่ามากกว่าอัตราผลตอบแทนการลงทุนขั้นต่ำที่ร้อยละ 16 และระยะเวลาการคืนทุน 5 ปี 1 เดือน ในด้านการวิเคราะห์ความไวของการเปลี่ยนแปลง อัตราผลตอบแทนภายในโครงการ พบว่า อัตราผลตอบแทนภายในโครงการมีความไวของการเปลี่ยนแปลง มูลค่าการนำเข้าแม่พิมพ์ และอัตราแลกเปลี่ยนมากกว่า การเปลี่ยนแปลงราคาวัสดุ อย่างไรก็ตามเมื่อมูลค่าการนำเข้าแม่พิมพ์ลดลงถึงร้อยละ 25 และ อัตราแลกเปลี่ยนลดลงถึงระดับ 0.225 บาทต่อเยน โครงการสามารถให้อัตราผลตอบแทนที่สูงกว่า อัตราผลตอบแทนขั้นต่ำที่ร้อยละ 16 จึงเป็นโครงการที่คุ้มค่าการลงทุน[87] ศึกษาความเป็นไปได้เชิงเทคนิคในการผลิตเมทิลเอสเทอร์จากไขมันในในระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดปาล์ม ซึ่งในส่วนแรกจากการศึกษาความเป็นไปได้ในเชิงเทคนิคด้านกระบวนการผลิต ภายหลังจากการปรับปรุงคุณภาพเมทิลเอสเทอร์โดยการกลั่นใสที่อุณหภูมิ 275-400⁰ C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์เท่ากับ 98.694% โดยมีกรดไขมันอิสระ ไดกลีเซอไรด์ และโมโนกลีเซอไรด์ ตกค้างอยู่ 0.824%, และ 0.482% ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสอดคล้องกับค่าเมทิลเอสเทอร์มาตรฐาน DIN E 51606 ของประเทศเยอรมนี สำหรับเปอร์เซ็นต์ผลได้เป็น 96.44% ในกระบวนการเอสเทอริฟิเคชัน และลดลงเป็น 80.67% ในกระบวนการกลั่นใสในขั้นสุดท้ายได้ทำการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ โดยกำหนดระยะเวลาโครงการ 10 ปี กำลังการผลิต 1 ตันไขมันเสียต่อวัน เมื่อทำการวิเคราะห์ผลตอบแทนการลงทุน มีผลตอบแทนภายในโครงการ (IRR) เท่ากับ 21% มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) ของโครงการเท่ากับ 14,635,377.35 บาท ระยะเวลาในการคืนทุนภายใน 4.10 ปี อัตราส่วนผลได้และต้นทุน (B/C) เท่ากับ 2.03 เงินลงทุนทั้งสิ้น 13,000,000 บาท จากผลการวิเคราะห์พบว่า ผลตอบแทนการลงทุน (IRR) สูงกว่าอัตราผลตอบแทนต่ำสุด (MARR) 18% ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า โครงการนี้เหมาะสมที่ภาคเอกชนจะนำไปพิจารณาลงทุนได้[88]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุยางและสารเคมี

3.1.1 ยางธรรมชาติ STR5L (Standard Thai Rubber, 5L) จำหน่ายโดย บริษัทผลองอุตสาหกรรมน้ำยางชั้น จำกัด

3.1.2 ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ 50 (Epoxidized Natural Rubber, 50: ENR50) จำหน่ายโดยบริษัทเมืองใหม่ กัททรี จำกัด (มหาชน)

3.1.3 สารตัวเติม ใช้เพื่อลดต้นทุนวัตถุดิบและปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพ จำหน่ายโดยบริษัท จี เอส พี โปรดักส์ จำกัด

3.1.3.1 ซิลิกา (ultrasil 233, silica, SiO_2) เป็นสารตัวเติมเสริมแรง

3.1.3.2 แมกนีเซียมคาร์บอเนต (magnesium carbonate, MgCO_3) เป็นสารตัวเติมเสริมแรง

3.1.4 สารกระตุ้นปฏิกิริยา ใช้เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาลูกคาไนซ์ จำหน่ายโดยบริษัทซันนี่ เวิลด์ เคมีคอล จำกัด

3.1.4.1 ซิงค์ออกไซด์ (zinc oxide, ZnO) ทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นมีลักษณะเป็นผงสีขาวละเอียด เป็นเกรดที่ใช้ในอุตสาหกรรมยาง

3.1.4.2 กรดสเตียริก (stearic acid) ทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นสำหรับตัวเร่งในยางมีลักษณะเป็นเกล็ดสีขาวอมเหลือง เป็นเกรดที่ใช้ในอุตสาหกรรมยาง

3.1.5 สารตัวเร่งปฏิกิริยา ใช้เป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยาลูกคาไนซ์ จำหน่ายโดยบริษัทอินโนเวชั่น เคมีคอล จำกัด

3.1.5.1 บิวทิลเบนโซไทอะโซลซัลไฟน์ (N-tert-butyl-2-benzothiazyl sulfonamide, TBBS) ทำหน้าที่เป็นสารตัวเร่งมีลักษณะเป็นเม็ดสีขาว เป็นเกรดที่ใช้ในอุตสาหกรรมยาง

3.1.5.2 ไดเบนโซไทอะซัลไฟด์ (dibenzothiazyl disulfide, MBTS)

3.1.6 สารทำให้ยางคงรูป จำหน่ายโดยบริษัทอินโนเวชั่น เคมีคอล จำกัด

3.1.6.1 กำมะถัน (sulfur) ทำหน้าที่เป็นสารวัลคาไนซ์ (vulcanizing agent) มีลักษณะเป็นผงสีเหลือง

3.1.7 สารป้องกันการเสื่อมสภาพจากโอโซน จำหน่ายโดยบริษัทอินโนเวชั่น เคมีคอล จำกัด

3.1.7.1 ไชพาราฟิน (paraffin wax) มีลักษณะเป็นของแข็งสีขาว

3.1.8 สารป้องกันการเสื่อมสภาพจากอากาศ จำหน่ายโดยบริษัทอินโนเวชั่น เคมีคอล จำกัด

3.1.8.1 ไดบิวทิลครีโซล (2,6-Di-tert. butyl-p-cresol, BHT)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.9 สารทำให้ยางนิ่ม บริษัทเบ็นเบเยอร์ เคมีคอล (ประเทศไทย) จำกัด

3.1.9.1 น้ำมันพาราฟินนิค (parafinic oil 105) ทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสม มีลักษณะเป็นของเหลวชั้นสีขาว

3.1.10 สารทำให้ยางเหนียวติดกัน บริษัทเบ็นเบเยอร์ เคมีคอล (ประเทศไทย) จำกัด

3.1.10.1 นีโอโฟเรซิน (neoflow L-90 resins)

3.1.11 สารคู่ควบไซเลน (เพิ่มอันตรกิริยาสารตัวเติม) บริษัทอินโนเวชั่น เคมีคอล จำกัด

3.1.11.1 couplink 89: Bis-[3-(triethoxysilyl) propyl]-tetrasulfide silane

3.1.12 สารกระตุ้นสารตัวเติม บริษัทเบ็นเบเยอร์ เคมีคอล (ประเทศไทย) จำกัด

3.1.12.1 PEG 4000: polyethylene glycol

3.1.13 สีสอนินทรีย์ จำหน่ายโดยบริษัทซันนิเวลด์ เคมีคอล จำกัด

3.1.13.1 ทิทาเนียม (titanium dioxide: TiO_2)

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ในกระบวนการผลิต

3.2.1 เครื่องบดผสมยางแบบปิด

เครื่องบดผสมยางแบบปิด (internal mixer) เป็นเครื่องจักรที่ใช้ในการบดผสมยางและสารเคมีต่างๆ เข้าด้วยกันที่ความเร็วของโรเตอร์เท่ากับ 60 รอบต่อนาที ทำการบดผสมที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และความจุของห้องผสม 3 ลิตร ผลิตโดย Brabender® GmbH&Co. KG, Duisburg, ประเทศเยอรมัน (ภาพที่ 3.1)

3.2.2 เครื่องบดผสมยางแบบเปิด

เครื่องบดยางสองลูกกลิ้ง (two roll mill) เป็นเครื่องจักรที่ใช้ในการบดผสมยางและสารเคมีต่างๆ เข้าด้วยกัน ลูกกลิ้งมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 นิ้ว ความยาว 15 นิ้ว ขนาด 8 x 20 นิ้ว พร้อมทั้งสามารถปรับช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งทั้งสองให้กว้าง 150-280 มิลลิเมตร ความเร็วของการหมุนลูกกลิ้งหน้าต่อลูกกลิ้งหลัง 18 : 20 รอบ/นาที และทำการบดผสมที่อุณหภูมิ 70-75 องศาเซลเซียส ผลิตโดย Yong Fong Machinery Co., Ltd. ประเทศไทย (ภาพที่ 3.2)

3.2.3 เครื่องอัดขึ้นรูปแบบขึ้นตัวอย่าง

เป็นเครื่องมือสำหรับอัดขึ้นรูปแบบขึ้นตัวอย่างยางเข้าบ้ำพิมพ์โดยใช้ระบบไฮดรอลิก (compression molding hydraulic) ขนาดแผ่นอัด 16x16 นิ้ว ให้ความร้อนด้วยระบบไฟฟ้า 3 เฟส อุณหภูมิที่ใช้ 150 องศาเซลเซียส แต่สามารถปรับอุณหภูมิได้ถึง 399 องศาเซลเซียส ความดันที่ใช้อัดสูงสุด 200 kg/cm^2 ผลิตโดย Tang-master Co., Ltd. ประเทศไต้หวัน (ภาพที่ 3.3)

3.2.4 ตู้อบไมโครเวฟ

ตู้อบไมโครเวฟสำหรับให้ความร้อน ใช้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า 220 V, 50 Hz, single phase และอัตราการใช้กำลังไฟฟ้า 12.8 A, 2780 W ประกอบด้วยแมกนีตรอนซึ่งเป็นแหล่งกำเนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลื่นไมโครเวฟที่ระดับความถี่ 2.45 GHz และกำลังวัตต์ที่ใช้ในการทดลองคือ defrost-340 W, medium- 850 W และ high- 1700 W มีมิติด้านนอก (W x D x H) : 422 x 580 x 337 mm มิติด้านใน (W x D x H) : 330 x 310 x 175 mm น้ำหนัก 30 กิโลกรัม และใช้เวลาในการปรับความร้อน : HI, MDE power = 15 min, DEF power = 30 min ผลิตโดย Panasonic Co., Ltd, Japan. (ภาพที่ 3.4)



ภาพที่ 3.1 เครื่องบดผสมยางแบบปิด [89]



ภาพที่ 3.2 เครื่องบดยางสองลูกกลิ้ง [90]



ภาพที่ 3.3 เครื่องอัดขึ้นรูปแบบขึ้นตัวอย่าง [91]



ภาพที่ 3.4 Microwave Panasonic#NE-1756 [92]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ในกระบวนการทดสอบและมาตรฐานการทดสอบ

3.3.1 การทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ (cure time, min)

การทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางคอมปาวด์โดยใช้มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 5289-07a ซึ่งลักษณะการวัลคาไนซ์ที่ศึกษา ได้แก่ ได้แก่ แรงบิดต่ำสุด (M_L) แรงบิดสูงสุด (M_H) ค่า torque difference ($M_H - M_L$) ระยะเวลายางเริ่มวัลคาไนซ์ (scorch time, t_{s1}) และ ระยะเวลาวัลคาไนซ์ (cure time, t_{c90}) โดยใช้เครื่อง Moving Disc Rheometer (MDR) รุ่น Monsanto MDR 2000, Japan (ภาพที่ 3.5) นอกจากนี้สามารถนำผลของระยะเวลาวัลคาไนซ์ ระยะเวลายางเริ่มวัลคาไนซ์ มาคำนวณค่าดัชนีอัตราการวัลคาไนซ์ (cure rubber index, CIR) ได้ จากสมการที่ 3.1[93]

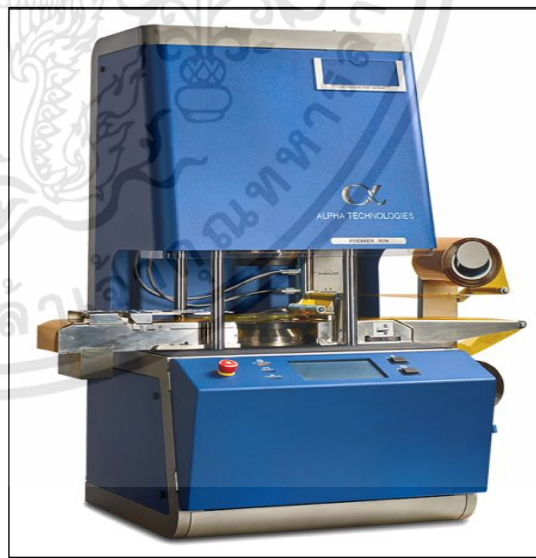
$$CIR = \frac{100}{\text{ระยะเวลาวัลคาไนซ์} - \text{ระยะเวลาเริ่มวัลคาไนซ์}} \quad (3.1)$$

3.3.2 การทดสอบการไหลของยาง (rubber process analyzer: RPA, KPa)

การทดสอบสมบัติการไหลตัวของยางผสมระหว่าง ENR50, STR5L กับสารตัวเติม และทดสอบโดยใช้เครื่อง rubber process analyzer: RPA 2000 (Alpha Technologies, Akron, USA) แสดงตามภาพที่ 3.6 ซึ่งเป็นเครื่องมือวัดสมบัติการไหลตัวของพอลิเมอร์ โดยสามารถระบุปรับ ช่วงความถี่ในการทดสอบ 1 Hz. ค่าแรงบิด strain ในการทดสอบ 0.56-500% และอุณหภูมิในการทดสอบ 80 °C ตามมาตรฐาน ASTM D6204 D6048 ตัวอย่างประมาณ 30 กรัม



ภาพที่ 3.5 เครื่องทดสอบเวลาการวัลคาไนซ์ [94]



ภาพที่ 3.6 เครื่องวัดสมบัติการไหลแบบพลวัต [95]

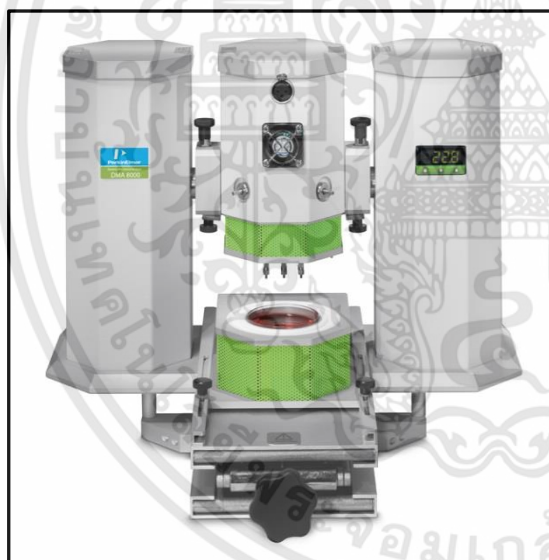
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของวัสดุเชิงกลแบบไดนามิก (dynamic mechanical analysis: DMA, Pa)

เป็นการทดสอบความเข้ากันได้ของยางผสมระหว่าง ENR50, STR5L กับสารตัวเติม โดยเลือกใช้วิธี dynamic mechanical analysis: DMA และทดสอบโดยใช้เครื่อง DMA 8000, Perkin Elmer Inc., Waltham, USA แสดงตามภาพที่ 3.7 ซึ่งเป็นเครื่องวิเคราะห์เชิงความร้อนโดยการวัดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารตัวอย่าง และศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของตัวอย่าง โดยการเตรียมชิ้นทดสอบรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด $30 \times 10 \times 2 \text{ mm}^3$ ทำการทดสอบช่วงอุณหภูมิ -100 ถึง 25°C ควบคุมอุณหภูมิด้วยไนโตรเจนเหลว อัตราการให้ความร้อน $5^\circ\text{C}/\text{min}$ ที่ความถี่ 1 Hz.

3.3.4 การทดสอบสมบัติความแข็ง (hardness, shore A)

การทดสอบหาค่าความแข็งของยางที่ผ่านการคงรูปแล้วด้วยเครื่อง shore Instrument, รุ่น 716, USA. ดังแสดงภาพที่ 3.8 การทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D2240-05 (2010) โดยชิ้นทดสอบที่ใช้ควรมีความหนาอย่างน้อย 6 mm และชิ้นทดสอบต้องมีพื้นผิวเรียบและขนานกับพื้นผิวสัมผัสของเข็มที่กดลงบนชิ้นทดสอบ เงื่อนไขที่สำคัญของการทดสอบคือ อุณหภูมิ 25°C และมีความชื้นสัมพัทธ์ 50%



ภาพที่ 3.7 เครื่องวิเคราะห์สมบัติเชิงกลแบบไดนามิก [96]

ภาพที่ 3.8 เครื่องวัดความแข็ง [97]

3.3.5 การทดสอบสมบัติการดึง (tensile test)

การทดสอบสมบัติการดึงเป็นการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D412-06ae2 (Die C) โดยชิ้นทดสอบจะมีรูปทรงแบบดัมเบลล์ โดยมีรูปร่างและขนาดดังแสดงในภาพที่ 3.9 ชิ้นทดสอบจะถูกทดสอบสมบัติการดึงด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine, UTM) รุ่น Instron Model-5565, USA ดังภาพที่ 3.10 ใช้ load cell ขนาด 1000 N อัตราการดึงคงที่ 500 mm/min นอกจากนี้ยังได้ทดสอบสมบัติด้านการดึงของยางที่ผ่านการคงรูปเร่งด้วยความร้อน โดยอบชิ้นตัวอย่างที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง เมื่อนำชิ้นตัวอย่างออกจากตู้อบให้ตั้งทิ้งไว้อีกอย่างน้อย 16 ชั่วโมง ก่อนนำไปทดสอบสมบัติ และสมบัติที่ทำการศึกษา ได้แก่

3.3.5.1 สมบัติการต้านทานแรงดึง (tensile strength, MPa), หมายถึง ความเค้นดึงสูงสุด หรือความเค้นดึงเมื่อขาด สามารถคำนวณดังสมการที่ 3.2 ดังนี้

$$TS = F_u / A \quad (3.2)$$

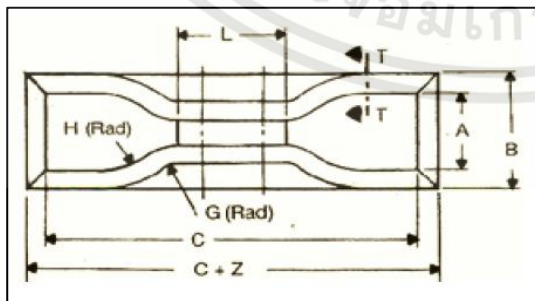
3.3.5.2 สมบัติความทนต่อแรงยืดจนขาด (elongation at break, %) หมายถึง ความยืดเมื่อขาด หรือความยืดสูงสุด สามารถคำนวณดังสมการที่ 3.3 ดังนี้

$$EB = [(L_u - L_0) / L_0] \times 100 \quad (3.3)$$

3.3.5.3 สมบัติความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 300 (modulus at 300% elongation, MPa) หมายถึง อัตราส่วนของความเค้นต่อความเครียดที่ระยะยืดที่ 300% สามารถคำนวณดังสมการที่ 3.4 ดังนี้

$$M = (F / A) / \epsilon \quad (3.4)$$

เมื่อ	TS	คือ ความแข็งแรงดึง (MPa)	A	คือ พื้นที่หน้าตัดเดิม (mm ²)
	EB	คือ ระยะยืดเมื่อขาด	L _u	คือ ความยาวเมื่อขาด (mm)
	M	คือ โมดูลัสที่ระยะยืดที่กำหนด (MPa)	L ₀	คือ ความยาวเดิม (mm)
	F _u	คือ แรงดึงสูงสุด (N)	ε	คือ ความเครียด
	F	คือ แรงดึงที่ทำให้ยางยืดออกจนได้ระยะยืดที่กำหนด (N)		



ภาพที่ 3.9 ชิ้นทดสอบสมบัติแรงดึง [98]



ภาพที่ 3.10 เครื่องทดสอบแรงดึง [98]

3.3.6 การทดสอบสมบัติไดอิเล็กตริก (dielectric properties)

เครื่องมือวัดค่าสมบัติไดอิเล็กตริกในวัสดุโดยทั่วไปเรียกว่าเครื่องเน็ตเวิร์กอนาลิเซอร์ (net-work analyzer) (ภาพที่ 3.11) ซึ่งมี 1) รายละเอียดชุดอุปกรณ์ประกอบด้วย หัววัด เครื่องตรวจจับ สัญญาณไมโครเวฟ สายส่งข้อมูลจากหัววัดไปยังเครื่องตรวจจับสัญญาณ อุปกรณ์ตั้งค่ามาตรฐาน และซอฟต์แวร์ใช้งาน 2) สมบัติของหัววัด ประกอบด้วย ช่วงความถี่ในการใช้วัด 1.5-2.6 GHz และความแม่นยำในการวัด (ไม่รวมผลจากหน้าสัมผัสวัสดุทดสอบและการสูญเสียจากสายส่งข้อมูล) ประมาณ 2% ในส่วนของจำนวนจริง และ 5% ในส่วนของจำนวนจินตภาพ 3) สมมติฐานขนาดวัสดุทดสอบ ประกอบด้วยมีขนาดเป็นอนันต์ ไม่มีสภาพแม่เหล็ก มีสมบัติสม่ำเสมอทั่ววัสดุ วัสดุต้องมีความเป็นเนื้อเดียวกัน ถ้าไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ผลการวิเคราะห์จะถูกเฉลี่ยโดยความเข้มของสนามไฟฟ้ามากที่สุด ณ บริเวณศูนย์กลางภายในหัววัด และหัววัดต้องทาบทนกับวัสดุที่ถูกทดสอบ และ 4) ขนาดวัสดุทดสอบ ประกอบด้วย เส้นผ่าศูนย์กลางต้องมากกว่า 6.5 เซนติเมตร ความหนาต้องมากกว่า 1 เซนติเมตร และค่าสมบัติไดอิเล็กตริกมากที่สุดที่วัดได้คือ 100[99] ขั้นตอนการวัดค่าสมบัติไดอิเล็กตริกเริ่มจาก นำตัวอย่างชิ้นงานมาเตรียมให้มีความหนาประมาณ 1 เซนติเมตรและเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.50 เซนติเมตร หลังจากนั้นทำการวัด 5 จุดต่อหนึ่งชิ้นงานพร้อมทั้งนำมาหาค่าเฉลี่ยที่ได้เพื่อที่จะเป็นตัวแทนของสมบัติไดอิเล็กตริกของตัวอย่างคอมพาวด์ และนำไปคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ลอสแทนเจนต์[100] ค่าความลึกในการทะลุทะลวง[101] และปริมาณความร้อนภายในต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร[102] ตามสมการที่ 3.5, 3.6 และ 3.7 ตามลำดับ

$$\tan\delta = \frac{\epsilon''_r}{\epsilon'_r} \quad (3.5)$$

เมื่อ $\tan\delta$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ลอสแทนเจนต์
 ϵ''_r คือ ค่าไดอิเล็กตริกลอสแฟกเตอร์สัมพัทธ์
 ϵ'_r คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์

$$D_p = \frac{1}{\frac{2\pi f}{U} \sqrt{\frac{\epsilon'_r(\sqrt{1+(\tan\delta)^2}-1)}{2}}} \quad (3.6)$$

เมื่อ D_p คือ ค่าความลึกในการทะลุทะลวงของคลื่น
 f คือ ค่าความถี่คลื่นไมโครเวฟ (Hz)
 U คือ ค่าความเร็วคลื่นไมโครเวฟ (3×10^8 m/s)

$$Q = \omega \epsilon_0 \epsilon''_r E^2 = 2\pi \cdot f \cdot \epsilon_0 \epsilon''_r (\tan\delta) E^2 \quad (3.7)$$

เมื่อ Q คือ ปริมาณความร้อนภายในต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (W/m^3)
 E คือ ค่าความเข้มสนามไฟฟ้า (V/m)
 ω คือ ความเร็วเชิงมุมของคลื่นไมโครเวฟ (rad/s)
 ϵ_0 คือ คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของที่ว่าง (F/M)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.7 การทดสอบพฤติกรรมทางความร้อน (thermal behavior, °C)

นำชิ้นตัวอย่างให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ โดยการปรับกำลังวัตต์กับระยะเวลาตามวัตถุประสงค์ของการทดลองและทำการวัดอุณหภูมิความร้อนในเนื้ออย่างด้วยเครื่อง testo 925 (Testo AG Germany, 0560.9250, 33762315/812) (ภาพที่ 3.12) ทำการวัด 5 จุดต่อหนึ่งชิ้นตัวอย่าง หลังจากนั้นนำมาหาค่าเฉลี่ย และศึกษาในส่วนของสมบัติทางความร้อนต่อไป



ภาพที่ 3.11 เครื่องเน็ตเวิร์คไมโครเวฟ [103] ภาพที่ 3.12 เครื่องวัดอุณหภูมิในเนื้ออย่าง [104]

3.3.8 การทดสอบลักษณะพื้นฐานวิทยา

ทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM: Scanning Electron Microscopy) FEI, Quanta 400, FEG. (ภาพที่ 3.13) จะใช้ในการศึกษาพื้นผิวของชิ้นงานของยางวัลคาไนซ์ที่อัดเป็นแผ่นมาตัดเป็นชิ้นนำไปแช่ในไนโตรเจนเหลว หักเมื่อยางเปราะโดยไม่ต้องมีการเคลือบผิวเพื่อรักษาเนื้ออย่างให้คงรูปในสภาพเดิม แล้วนำไปส่องดูบริเวณผิวหน้าที่เกิดจากการหักชิ้นตัวอย่าง เพื่อสังเกตการกระจายตัวของอนุภาค การยึดติดอนุภาค ลักษณะพื้นผิวของชิ้นตัวอย่าง โดยหลักการของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด คือ ภายในคอลัมน์ของเครื่องจะมีแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมา โดยควบคุมจำนวนอิเล็กตรอนนั้นด้วยศักย์ไฟฟ้าที่มีค่าสูงและใช้เลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า โฟกัสให้อิเล็กตรอนนั้นตกกระทบบนชิ้นงานและเมื่ออิเล็กตรอนตกกระทบบนชิ้นงานจะเกิดอันตรกิริยาได้สัญญาณแบบต่างๆ เช่น สัญญาณจากอิเล็กตรอนในชิ้นงานที่หลุดออกมา อิเล็กตรอนที่กระดอนกลับหรือเอ็กซ์เรย์สัญญาณแต่ละชนิดจะถูกจับโดยดีเทคเตอร์แปลผลเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าและแปลเป็นภาพในที่สุด

3.3.9 การทดสอบสมบัติความร้อนสะสม (heat build-up properties, °C)

ความร้อนสะสมในยาง เป็นการสะสมของพลังงานความร้อน ซึ่งมีผลทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นในผลิตภัณฑ์ เนื่องจากเกิดการเสียดทานขึ้นภายในเมื่อผลิตภัณฑ์ถูกกระทำให้เสียรูปซ้ำๆ กันอย่างรวดเร็ว การสูญเสียสมบัติของยางเนื่องจากความร้อนสะสม เรียกว่า ความล้า (fatigue) สมบัตินี้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำเป็นสำหรับผลิตภัณฑ์ประเภท ยางล้อรถยนต์ สายพาน และยางพันลูกกลิ้ง เครื่องมือที่ใช้วัดความร้อนสะสมในยาง คือเครื่อง Goodrich Flexometer ยี่ห้อ techpro ผลิตจาก USA. (ภาพที่ 3.14) ซึ่งจะทำงานในลักษณะใช้แรงกด แรงเฉือน หรือรวมทั้งสองอย่าง โดยใช้แรงทั้งแบบ static และ dynamic การทดสอบจะใช้มาตรฐาน ASTM D623-07 Method A จะทำโดยขึ้นทดสอบที่มีรูปร่างเป็นแท่งทรงกระบอก เส้นผ่าศูนย์กลาง 17.8 มิลลิเมตร. สูง 25 มิลลิเมตร มากดและคลายภายใต้สภาวะความเร็วของแรงที่กด - คลาย บนขึ้นทดสอบ 1,800 รอบต่อนาที ระยะการกด 4.45 มิลลิเมตร เวลาทดสอบ 25 นาทีบันทึกอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นระหว่างการทดสอบ และการคำนวณผลตามสมการที่ 3.8 ดังนี้

$$\text{heat build-up} = t_f - t_o \quad (3.8)$$

เมื่อ t_o คือ อุณหภูมิเมื่อเริ่มทดสอบ, °C
 t_f คือ อุณหภูมิหลังเสร็จสิ้นการทดสอบ, °C



ภาพที่ 3.13 เครื่องทดสอบลักษณะสัญญาณวิทยา ภาพที่ 3.14 เครื่องทดสอบความร้อนสะสมในยาง [105] [106]

3.3.10 การทดสอบสมบัติความต้านทานน้ำมัน (swelling properties, %)

ในการทดสอบสามารถทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D471-12 ซึ่งขึ้นทดสอบสมบัติความต้านทานน้ำมันมีขนาดความกว้าง 1 นิ้ว ความยาว 2 นิ้ว และความหนา 2 มิลลิเมตร โดยทำการชั่งน้ำหนักขึ้นทดสอบทั้งในอากาศ และในน้ำ แล้วบันทึกน้ำหนักไว้ จากนั้นนำขึ้นทดสอบแช่น้ำมัน IRM 903 ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส โดยใช้ Heating Oven, Memmert # UFE 800, Germany (ภาพที่ 3.15) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และลำดับต่อไปทำการชั่งน้ำหนักขึ้นทดสอบที่ผ่านการแช่น้ำมันทั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในอากาศ และในน้ำ นำผลที่ได้ไปคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาณและการคำนวณผลตามสมการที่ 3.9 ดังนี้

$$\Delta V = \frac{(m_3 - m_4) - (m_1 - m_2)}{(m_1 - m_2)} \times 100 \quad (3.9)$$

เมื่อ	ΔV	คือ การเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาตร, %
	m_1	คือ น้ำหนักของชิ้นทดสอบก่อนแช่น้ำมันชิ่งในอากาศ, กรัม
	m_2	คือ น้ำหนักของชิ้นทดสอบก่อนแช่น้ำมันชิ่งในน้ำ, กรัม
	m_3	คือ น้ำหนักของชิ้นทดสอบหลังแช่น้ำมันชิ่งในอากาศ, กรัม
	m_4	คือ น้ำหนักของชิ้นทดสอบหลังแช่น้ำมันชิ่งในน้ำ, กรัม

3.3.11 การทดสอบสมบัติความหนาแน่นของพันธะ (cross-linked, $\text{mol}/\text{cm}^3 \times 10^4$)

วิธีการหาค่าเปอร์เซ็นต์การเชื่อมโยง (% crosslinking) นำชิ้นงานตัวอย่างที่ได้จากการผ่านและไม่ผ่านความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟซึ่งมีขนาดความกว้าง 1 นิ้ว ความยาว 2 นิ้ว และความหนา 2 มิลลิเมตร นำไปชั่งและบันทึกโดยใช้เป็นน้ำหนักก่อนแช่สารละลายโทลูอีน จากนั้นแช่ในสารละลายโทลูอีนปริมาตร 30 มิลลิลิตรประมาณ 7 วัน นำมาชั่งน้ำหนักและต่อน้ำมาอบที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมงโดยใช้ heating oven, Memmert # UFE 800, Germany (ภาพที่ 3.15) นำมาใส่โถดูดความชื้น ทำการชั่งน้ำหนักอีกครั้ง และคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์การเชื่อมโยงตามสูตรในสมการที่ 3.10[102,107]

$$\eta_{\text{swell}} = \frac{-\ln(1-V_r) - V_r - \chi V_r^2}{V_m \left(V_r^{1/3} - \frac{V_r}{2} \right)} \quad (3.10)$$

เมื่อ	V_r	คือ ค่าสัดส่วนโดยปริมาตรของยางในสถานะเจลที่บวมตัวสมดุล
	χ	คือ พารามิเตอร์การทำงานร่วมกันระหว่างยางกับสารละลาย (0.406)
	V_m	คือ ค่าปริมาตรโทลูอีน ($106.8 \text{ cm}^3/\text{mol}$)
	η_{swell}	คือ ค่าเปอร์เซ็นต์การบวมตัวของยาง, (%)

3.3.12 การเสื่อมสภาพด้วยการอบเร่งด้วยอากาศร้อน

การทดสอบการเสื่อมสภาพด้วยการอบเร่งด้วยอากาศร้อนของยางคอมพาวด์สายพานลำเลียงอาหารใส่และไม่ใส่สารตัวเติมผสมนั้นทำการทดสอบด้วยการอบเร่งด้วยตู้อบที่อุณหภูมิ 100°C โดยใช้ ageing oven ueshima # AG103, Japan. (ภาพที่ 3.16) เป็นเวลา 22 ชั่วโมงและตั้งไว้ให้เย็นเป็นเวลา 24 ชั่วโมงก่อนการนำมาทดสอบสมบัติ ความแข็ง ความเค้นแรงดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 300 การต้านแรงดึง และความทนต่อแรงยืดจนขาด และนำไปคำนวณหาจำนวนร้อยละของการเก็บรักษาตามสมการที่ 3.11[108]

$$\% \text{ retention} = \frac{\text{สมบัติทางกลหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน}}{\text{สมบัติทางกลก่อนการบ่มเร่งด้วยความร้อน}} \times 100 \quad (3.11)$$



ภาพที่ 3.15 ตู้อบลมร้อน [109]

ภาพที่ 3.16 ตู้อบเร่งความร้อน [110]

3.4 การเตรียมยางคอมปาวด์และการเตรียมชิ้นตัวอย่าง

3.4.1 ศึกษาอิทธิพลสารตัวเติม และสารตัวเติมผสมที่มีต่อสมบัติกายภาพของยางคอมปาวด์สายพานลำเลียงอาหาร

จากสูตรการผสมยางคอมปาวด์ตามตารางที่ 3.1 ทำการบดผสมยางกับสารเคมีต่างๆ ตามขั้นตอนของมาตรฐาน ASTM D3184-89 และยางคอมปาวด์ที่ได้นั้นเตรียมโดยระบบการคงรูปแบบกึ่งประสิทธิภาพ (semi-efficient vulcanization: semi-EV) ซึ่งการบดผสมยางกับสารเคมีต่างๆ ด้วยเครื่องบดแบบสองลูกกลิ้งขนาด 8x20 นิ้ว ความเร็วของโรเตอร์หน้าต่อหลัง 18:20 รอบต่อนาที อุณหภูมิในการบดผสม 60-75°C ตามรายละเอียดดังนี้

3.4.1.1 นำยาง ENR50 บดให้นิ่ม ใช้เวลา 5 นาที

3.4.1.2 นำยาง STR5L บดให้นิ่ม ใช้เวลา 4 นาที

3.4.1.3 นำยางจากข้อ 3.4.1.1 เติมสารเคมีดังนี้ 1) SiO₂, couplink 89, PEG 4000 และ parafinic oil 105 ใช้เวลา 4 นาที 2) เติม ZnO และ stearic acid ใช้เวลา 2 นาที 3) เติม TiO₂ และ neofow L90 ใช้เวลา 2 นาที และ 4) เติม paraffin wax และ BHT ใช้เวลา 1 นาที

3.4.1.4 นำยางจากข้อ 3.4.1.1 เติมสารเคมีดังนี้ 1) MgCO₃ และ parafinic oil 105 ใช้เวลา 4 นาที 2) เติม ZnO และ stearic acid ใช้เวลา 2 นาที 3) เติม TiO₂ และ neofow L90 ใช้เวลา 2 นาที และ 4) เติม paraffin wax และ BHT ใช้เวลา 1 นาที

3.4.1.5 นำยางจากข้อ 3.4.1.1 เติมสารเคมีดังนี้ 1) SiO₂, MgCO₃, couplink 89,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PEG 4000 และ parafinic oil 105 ใช้เวลา 8 นาที 2) เติม ZnO และ stearic acid ใช้เวลา 2 นาที 3) เติม TiO₂ และ neofow L90 ใช้เวลา 2 นาที และ 4) เติม paraffin wax และ BHT ใช้เวลา 1 นาที

3.4.1.6 นำยางจากข้อ 3.4.1.2 และปฏิบัติตามขั้นตอนตามข้อ 3.4.1.3, 3.4.1.4 และ 3.4.1.5 ตามลำดับ

และนำยางคอมปาวด์ผสมสารตัวเร่งและสารวัลคาไนซ์ใช้เวลา 2 นาที และตัดมี้วนยาง 6 ครั้ง ตามมาตรฐาน ASTM D3184-89 และรีดออกมาเป็นแผ่นเรียบมีความหนาประมาณ 1 เซนติเมตร และทำการตัดยางคอมปาวด์เพื่อนำไปทดสอบหาเวลาที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ด้วยเครื่อง Moving Die Rheometer (Monsanto, Model MDR 2000, Japan) และวางตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ตามมาตรฐาน ASTM D3182 ก่อนนำไปขึ้นรูปโดยการใช้แม่แบบด้วยเครื่องอัดแบบขึ้นตัวอย่างที่อุณหภูมิ 150°C ตามเวลาที่ได้จากทดสอบหาเวลาที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ และแรงดัน 15 MPa แล้วนำไปทดสอบสมบัติของยางที่ผ่านการวัลคาไนซ์ต่อไป

ตารางที่ 3.1 สัดส่วนผสมสูตรยางคอมปาวด์ 1

Raw materials	phr ^a					
	SiO ₂ /ENR ^b	SiO ₂ /STR ^c	MgCO ₃ /ENR	MgCO ₃ /STR	SiO ₂ /MgCO ₃ /ENR	SiO ₂ /MgCO ₃ /STR
ENR50	100	-	100	-	100	-
STR5L	-	100	-	100	-	100
SiO ₂	40	40	-	-	40	40
MgCO ₃	-	-	40	40	40	40
TiO ₂	8	8	8	8	8	8
ZnO	3	3	3	3	3	3
Stearic acid	1	1	1	1	1	1
Parafinic oil 105	8	8	8	8	8	8
Neofow L90	5	5	5	5	5	5
Paraffin wax	1	1	1	1	1	1
BHT	2	2	2	2	2	2
^d Couplink 89	4	4	-	-	4	4
^e PEG 4000	2.4	2.4	-	-	2.4	2.4
MBTS	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
TBBS	1	1	1	1	1	1
Sulfur	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Total	177.5	177.5	171.5	171.5	217.5	217.5

^a Part per hundred parts by weight of rubber dry basis (phr)

^b E; Epoxidized Natural Rubber,50 :ENR50

^c S; Standard Thai Rubber,5L :STR 5L

^d silane coupling agent

^e filler activators

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 ศึกษาอิทธิพลของผสมระหว่าง ENR50/STR5L ที่มีต่อสมบัติกายภาพของยางคอมปาวด์สายพานลำเลียงอาหาร

จากสูตรการผสมยางคอมปาวด์ตามตารางที่ 3.2 ทำการบดผสมยางกับสารเคมีต่างๆ ตามขั้นตอนของมาตรฐาน ASTM D3184-89 และยางคอมปาวด์ที่ได้ก็นั้นเตรียมโดยระบบการคงรูปแบบกึ่งประสิทธิภาพ (semi-efficient vulcanization: semi-EV) ซึ่งการบดผสมยางกับสารเคมีต่างๆ ด้วยเครื่องบดแบบสองลูกกลิ้งขนาด 8x20 นิ้ว ความเร็วของโรเตอร์หน้าต่อหลัง 18:20 รอบต่อ นาที อุณหภูมิในการบดผสม 60-75°C ตามรายละเอียดดังนี้

3.4.2.1 นำยาง ENR50 บดให้นิ่ม ใช้เวลา 5, 4, 3 และ 2 นาที สำหรับสูตร E100:S0, E75:S25, E50:S50 และ E25:S75 ตามลำดับ

3.4.2.2 นำยาง STR5L บดให้นิ่ม ใช้เวลา 4, 3, 2 และ 1 นาที สำหรับสูตร E0:S100, E25:S75, E50:S50 และ E75:S25 ตามลำดับ

3.4.2.3 นำยางจากข้อ 3.4.2.1 และ 3.4.2.2 มาผสมเข้าด้วยกันอีก 1 นาที สำหรับสูตร E75:S25, E50:S50 และ E25:S75

3.4.2.4 เติม SiO₂, MgCO₃, couplink 89, PEG 4000 และ paraffinic oil 105 ใช้เวลา 8 นาที

3.4.2.5 เติม ZnO และ stearic acid ใช้เวลา 2 นาที

3.4.2.6 เติม TiO₂ และ neofow L90 ใช้เวลา 2 นาที

3.4.2.7 เติม paraffin wax และ BHT ใช้เวลา 1 นาที

3.4.2.8 ตัดม้วนยาง 6 ครั้ง

3.4.2.9 เติม MBTS, TBBS และ Sulfur ใช้เวลา 2 นาที

เมื่อบดผสมตามขั้นตอนเสร็จเรียบร้อยแล้วให้รีดออกมาเป็นแผ่นเรียบมีความหนาประมาณ 1 ซม. ทำการตัดยางคอมปาวด์เพื่อนำไปทดสอบหาเวลาที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ด้วยเครื่อง Moving Die Rheometer (MDR) และวางตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ตามมาตรฐาน ASTM D3182 ก่อนนำไปขึ้นรูปโดยการใช้แม่แบบด้วยเครื่องอัดแบบขึ้นตัวอย่างที่อุณหภูมิ 150°C ตามเวลาที่ได้จากทดสอบหาเวลาที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ และแรงดัน 15 MPa แล้วนำไปทดสอบสมบัติของยางที่ผ่านการวัลคาไนซ์ต่อไป

ตารางที่ 3.2 สัดส่วนผสมสูตรยางคอมปาวด์ 2

Raw materials	phr ^a				
	^b E100 : ^c S0	E75 : S25	E50 : S50	E25 : S75	E0 : S100
ENR50	100	75	50	25	-
STR5L	-	25	50	75	100
SiO ₂	40	40	40	40	40
MgCO ₃	40	40	40	40	40
TiO ₂	8	8	8	8	8
ZnO	3	3	3	3	3
Stearic acid	1	1	1	1	1
Parafinic oil 105	8	8	8	8	8
Neofow L90	5	5	5	5	5
Paraffin wax	1	1	1	1	1
BHT	2	2	2	2	2
^d Couplink 89	4	4	4	4	4
^e PEG 4000	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4
MBTS	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
TBBS	1	1	1	1	1
Sulfur	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Total	217.5	217.5	217.5	217.5	217.5

^a Part per hundred parts by weight of rubber dry basis (phr)

^b E; Epoxidized Natural Rubber,50 :ENR50

^c S; Standard Thai Rubber,5L :STR 5L

^d silane coupling agent

^e filler activators

3.4.3 ศึกษาอิทธิพลสารตัวเติมผสมที่มีต่อสมบัติความร้อนของยางคอมปาวด์สายพานลำเลียงอาหารที่อุ่นด้วยพลังงานไมโครเวฟ

3.4.3.1 การเตรียมยางคอมปาวด์ จากสูตรการผสมยางคอมปาวด์ตามตารางที่ 3.3 ได้มีการเตรียมดังนี้ ทำการบดผสมยางกับสารเคมีตามขั้นตอนด้วยเครื่องแบนนบุรี (Brabender® GmbH&Co. KG, Duisburg, Germany) ที่ความเร็วของโรเตอร์เท่ากับ 60 รอบต่อนาทีทำการบดผสมที่อุณหภูมิ 70°C และเติมสารเคมีตามเวลาตามขั้นตอนตามภาพที่ 3.17 หลังจากการบดผสมยางกับสารเคมีด้วยเครื่องแบนนบุรีแล้ว จะต้องนำมาบดผสมกับเครื่องบดยางสองลูกกลิ้งตามขั้นตอนของมาตรฐาน ASTM D3184-89 และยางคอมปาวด์ที่ได้นั้นเตรียมโดยระบบการคงรูปแบบกึ่งประสิทธิภาพ (semi-efficient vulcanization: semi-EV) ซึ่งการบดผสมยางกับสารเคมีด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องบดแบบสองลูกกลิ้งขนาด 8x20 นิ้ว ความเร็วของโรเตอร์หน้าต่อหลัง 18:20 รอบต่อนาที อุณหภูมิในการบดผสม 40-45°C และเติม MBTS, TBBS และ sulfur (1, 1.5 และ 2.0 phr) ใช้เวลา 2 นาที และตัดมันยาง 6 ครั้ง เมื่อบดผสมตามขั้นตอนเสร็จเรียบร้อยให้รีดออกมาเป็นแผ่นเรียบมีความหนาประมาณ 1 ซม. ทำการตัดยางคอมปาวด์เพื่อนำไปทดสอบหาเวลาที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ด้วยเครื่อง Moving Die Rheometer (Model MDR 2000) และวางตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ตามมาตรฐาน ASTM D3182 ก่อนนำไปขึ้นรูปโดยการรีดด้วยเครื่องอัดแบบขึ้นตัวอย่างที อุณหภูมิ 150°C ตามเวลาที่ได้จากทดสอบหาเวลาที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ และแรงดัน 15 MPa แล้วนำไปทดสอบสมบัติของยางที่ผ่านการวัลคาไนซ์ต่อไป

ตารางที่ 3.3 สัดส่วนผสมสูตรยางคอมปาวด์ 3

Raw materials	phr ^a					
	^b FCBc- ^c S1.0	FCBc- S1.5	FCBc- S2.0	^d FCBcF- S1.0	FCBcF- S1.5	FCBcF- S2.0
ENR50	100	100	100	100	100	100
SiO ₂	-	-	-	40	40	40
MgCO ₃	-	-	-	40	40	40
TiO ₂	8	8	8	8	8	8
Stearic acid	1	1	1	1	1	1
ZnO	3	3	3	3	3	3
Neofow L90	5	5	5	5	5	5
Paraffin wax	1	1	1	1	1	1
BHT	2	2	2	2	2	2
Couplink89	-	-	-	2	2	2
PEG 4000	-	-	-	2.2	2.2	2.2
MBTS	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
TBBS	1	1	1	1	1	1
Sulfur	1	1.5	2	1	1.5	2
Total	122.6	123.1	123.6	206.80	207.3	207.8

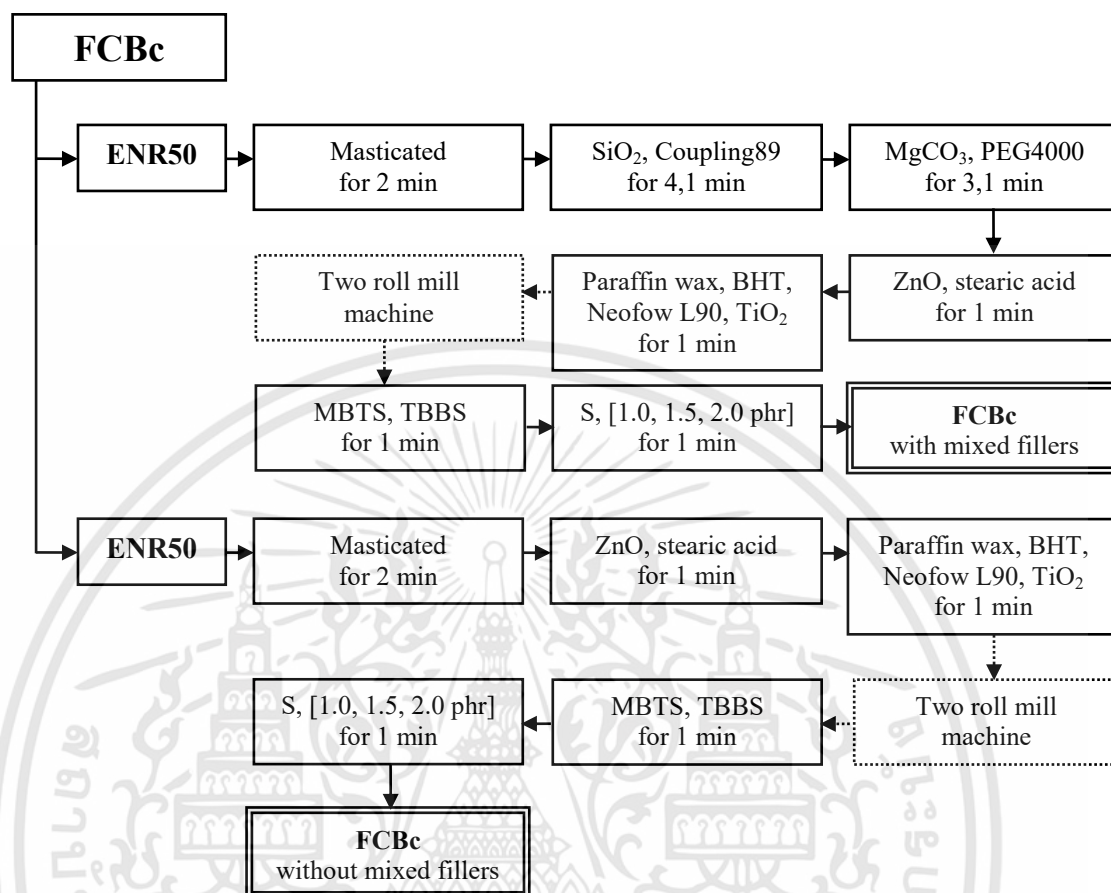
^a Part per hundred parts by weight of rubber dry basis (phr)

^b Foodstuff conveyor belts compound without mixed fillers

^c Sulfur content (part per hundred parts by dry basis weight)

^d Foodstuff conveyor belts compound with mixed fillers

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.17 แผนผังกระบวนการเตรียมยางคอมปาวด์สายพานลำเลียงอาหาร

3.4.3.2 การเตรียมชิ้นตัวอย่าง นำ FCBC ใส่และไมใส่สารตัวเติมผสมโดยเตรียมชิ้นตัวอย่างให้เป็นแผ่นสี่เหลี่ยมที่มีขนาด ความหนา 1, 2 และ 3 cm เส้นผ่าศูนย์กลาง 6.5 cm วางบนชั้นวางในเตาไมโครเวฟ ซึ่งประกอบด้วยแมกนีตรอนซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟที่ระดับความถี่ 2.45 GHz และกำลังวัตต์ที่ใช้ในการทดลองคือ defrost-340 W, medium- 850 W และ high- 1700 W หลังจากนั้นก็ให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ โดยการปรับระยะเวลาและทำการวัดอุณหภูมิความร้อนในเนื้อยางด้วยเครื่อง testo 925 (Testo AG Germany, 0560.9250, 33762315/812) ทำการวัด 5 จุดต่อหนึ่งชิ้นงาน

3.4.4 ศึกษาอิทธิพลสารตัวเติมผสมที่มีต่อสมบัติกายภาพของยางคอมปาวด์สายพานลำเลียงอาหารที่อุ่นด้วยพลังงานไมโครเวฟ

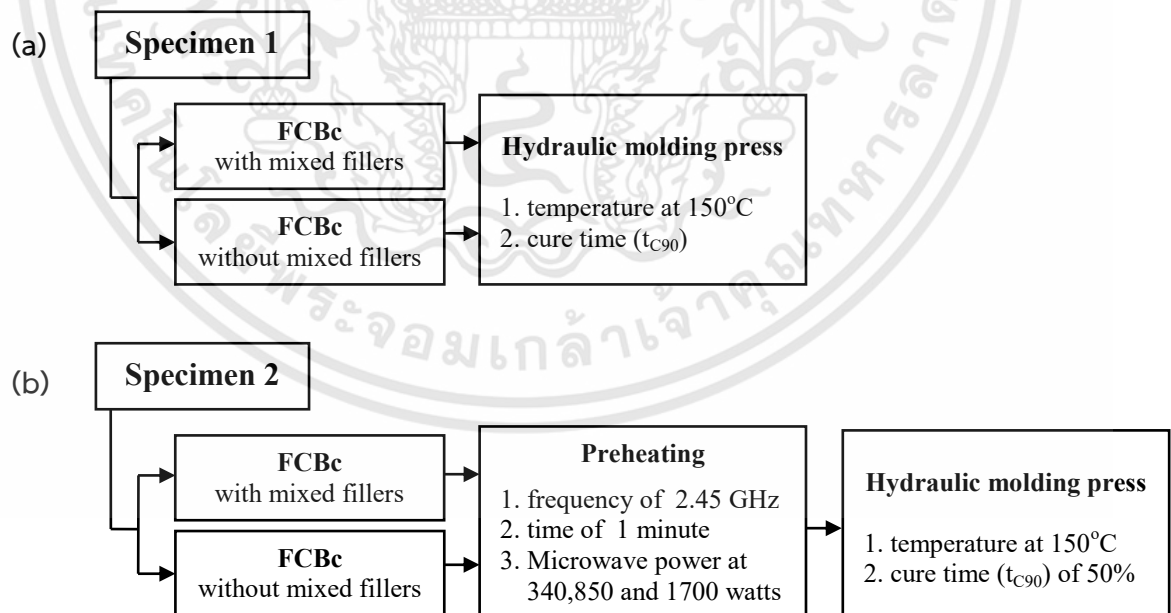
3.4.4.1 การเตรียมยางคอมปาวด์ จากสูตรการผสมยางคอมปาวด์ตามตารางที่ 3.3 และทำการบดผสมตามภาพที่ 3.17 และปฏิบัติตามขั้นตอนตามข้อ 3.4.3.1

3.4.4.2 การวัดคาบเวลาของยางคอมปาวด์ที่ผ่านการอุ่นด้วยพลังงานไมโครเวฟ สำหรับงานวิจัยในครั้งนี้ได้ดัดแปลงการลดระยะเวลาในการอบสุกยางเป็น 50% ของระยะเวลาของวัดคาบเวลา (t_{c90}) จากการศึกษาการใช้พลังงานไมโครเวฟสำหรับอุ่นยางคอมปาวด์นั้นมีการใช้ในบริษัท Avon

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

tyre Ltd. ที่ผลิตยางตันสำหรับรถฟอร์คลิฟ สามารถลดเวลาการอัดขึ้นรูปยางคอมปาวด์ขนาด 30 กิโลกรัมจาก 120 นาทีลงเหลือเพียง 70 นาที ด้วยการอุ่นยางให้ร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟเป็นเวลา 10 นาทีก่อนการอัดขึ้นรูป[80] และการสร้างต้นแบบเครื่องอุ่นอย่างตันด้วยคลื่นไมโครเวฟพบว่าเครื่องต้นแบบสร้างขึ้นเพื่อใช้ในการอุ่นอย่างขนาด 30 กิโลกรัม ซึ่งพบว่าสามารถอุ่นอย่างที่มีอุณหภูมิเริ่มต้นเฉลี่ย 32 องศาเซลเซียสให้มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็นอุณหภูมิเฉลี่ย 70 ± 10 องศาเซลเซียสภายในเวลา 23 นาที และเมื่อนำอย่างมาอบคงรูปต่อในแม่พิมพ์จะต้องใช้เวลาในการอบคงรูป 2 ชั่วโมง 20 นาทีจึงจะทำให้ยางสุกและพบจุดบกพร่องน้อยที่สุด ซึ่งสามารถลดเวลาในการอบคงรูปให้น้อยลงจากกระบวนการผลิตแบบเดิมประมาณ 40 นาทีหรือคิดเป็น 22.22% จากกระบวนการผลิตเดิม[111] นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการอุ่นยางด้วยคลื่นไมโครเวฟสำหรับงานอัดเบ้าอย่างหนา พบว่าการใช้คลื่นไมโครเวฟแบบคลื่นผสมในการอุ่นยางก่อนการอัดเบ้าอย่างหนานั้น สามารถลดเวลาในการอบสุกยางลง 31.20% และพลังงานที่ใช้จะลดลง 41.11% มีอัตราการทะลุทะลวงที่ดีกับยางขนาด 3.5 กิโลกรัม ลักษณะทรงกระบอกสูง 7 นิ้ว และมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 นิ้ว ในการทดสอบ[112]

3.4.4.3 การเตรียมชิ้นตัวอย่าง เตรียมชิ้นตัวอย่างที่มีขนาด $150 \times 150 \text{ cm}^2$ และความหนา 4 mm. จำนวน 2 ชุด ซึ่งตัวอย่างชุดที่ 1 ไม่ผ่านพลังงานความร้อนไมโครเวฟ ดังนั้นจึงนำมาอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกที่อุณหภูมิ 150°C และเวลาตาม ระยะเวลาอย่างวัลคาไนซ์ (t_{c90}) และตัวอย่างชุดที่ 2 นำ FCBC ที่ใส่และไม่ใส่สารตัวเติมผสมมาอุ่นให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟที่ 340, 850 และ 1,700 วัตต์ ความถี่ 2.45 GHz เป็นเวลา 1 นาที ก่อนการนำมาอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกที่อุณหภูมิ 150°C และเวลา 50% ของระยะเวลาอย่างวัลคาไนซ์ (t_{c90}) แสดงดังภาพที่ 3.18



ภาพที่ 3.18 แผนผังกระบวนการเตรียมชิ้นตัวอย่าง (a) ชิ้นตัวอย่างแบบไม่ผ่านพลังงานความร้อนไมโครเวฟ (b) ชิ้นตัวอย่างแบบผ่านพลังงานความร้อนไมโครเวฟ

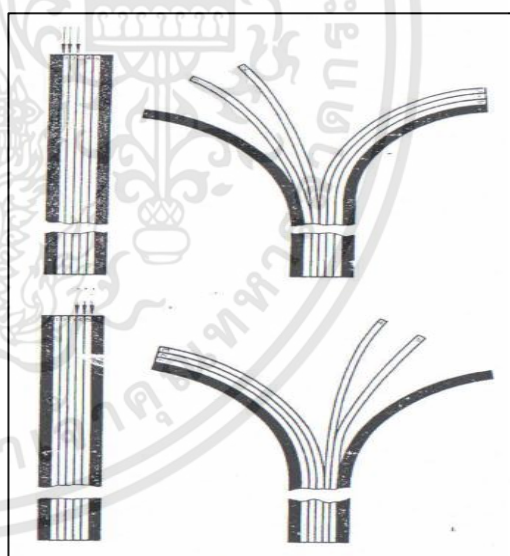
3.5 การประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์สายพานลำเลียงอาหาร

3.5.1 การทดสอบสมบัติการยึดเหนี่ยว (ค่าแรงยึดติดแน่น) (adhesion strength, Kgf)

เป็นการทดสอบโดยการแยกระหว่างชั้นของไส้ในด้วยกัน และวัสดุหุ้มกับไส้ใน สำหรับการทดสอบในครั้งนี้ได้ดัดแปลงการทดสอบสมบัติจากมาตรฐานการทดสอบ มอก.147-2530 เนื่องจากมีข้อจำกัดด้านมิติของท่อโม่โครเวฟที่ใช้ในการทดลอง โดยจะต้องตัดชิ้นตัวอย่างสายพานลำเลียงในตำแหน่งที่ห่างจากขอบไม่น้อยกว่า 100 มิลลิเมตร จำนวนชิ้นตัวอย่าง 4 ชิ้น และมีขนาดความกว้าง 25 ± 0.5 มิลลิเมตร และยาวอย่างน้อยที่สุด 300 มิลลิเมตร (เพื่อให้ชิ้นทดสอบถูกแยกออกได้ 100 มิลลิเมตร) และนำไปอบในท่อโม่โครเวฟตามสภาวะที่กำหนด ซึ่งได้จากการทดลอง หลังจากนั้นนำไปอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก ก่อนนำไปทดสอบสมบัติจะต้องวางชิ้นตัวอย่างให้เย็นที่อุณหภูมิห้องโดยปกติให้ทำการทดสอบสายพานลำเลียงจากการผลิตไม่น้อยกว่า 5 วัน ซึ่งทำการทดสอบด้วยเครื่อง Universal Testing Machine Gothech AI-7000 M, Japan (ภาพที่ 3.19) และทดสอบที่อุณหภูมิห้อง 30 ± 2 องศาเซลเซียส โดยที่ปลายของชิ้นทดสอบให้ดึงแยกวัสดุหุ้มจากชั้นแรกให้ยาวพอที่จะใส่เข้าไปในหัวจับแล้วดึงแยกชิ้นทดสอบแสดงดังภาพที่ 3.20 ด้วยความเร็วของหัวจับ 100 มิลลิเมตรต่อนาทีและชิ้นทดสอบจะต้องไม่ได้รับการค้ำจุน และให้คำนวณค่าเฉลี่ยจากการทดสอบทั้ง 4 ชิ้นตัวอย่าง



ภาพที่ 3.19 เครื่องทดสอบสมบัติการยึดเหนี่ยว
[113]



ภาพที่ 3.20 ชิ้นทดสอบสมบัติการยึดเหนี่ยว
และแสดงวิธีดึง [114]

3.6 เครื่องมือวิเคราะห์ตัวแบบสถิติ

การทดสอบสมมติฐาน

สมมติฐานทางสถิติ คือ การกำหนดพารามิเตอร์ของการแจกแจงความน่าจะเป็นของมัชฌิมสองมัชฌิมขึ้นไป เพื่อทดสอบความแตกต่างหรือเท่ากันของมัชฌิม ตัวอย่างเช่นในการทดสอบมัชฌิมที่หนึ่ง ว่ามีค่าเท่ากับมัชฌิมที่สองหรือไม่จะสามารถเขียนได้ดังนี้ $H_0 : \mu_1 = \mu_2$ และ $H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$ โดยที่ μ_1 เป็นมัชฌิมของสิ่งตัวอย่างกลุ่มที่หนึ่งและ μ_2 เป็นมัชฌิมของสิ่งตัวอย่างกลุ่มที่สอง ประโยคที่ว่า $H_0 : \mu_1 = \mu_2$ เรียกว่า “สมมติฐานหลัก (null hypothesis)” และ $H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$ เรียกว่า “สมมติฐานรอง (alternative hypothesis)” การทดสอบในที่นี้เป็น การทดสอบแบบ 2 ด้าน เนื่องจาก $\mu_1 < \mu_2$ หรือ $\mu_1 > \mu_2$ ก็ได้ ในการทดสอบสมมติฐานอาศัยวิธีการในการสุ่มตัวอย่าง H_0 การคำนวณค่าสถิติที่ใช้ในการทดสอบที่เหมาะสมและทำการสรุปเพื่อปฏิเสธหรือยอมรับ นอกจากนี้ยังต้องมีการกำหนดกลุ่มของค่าที่จะนำไปสู่การปฏิเสธ H_0 ซึ่ง กลุ่มของค่าที่เรียกว่า “พื้นที่วิกฤต” หรือ “พื้นที่ของการปฏิเสธ” ของการทดสอบ

การใช้ P-Value ในการทดสอบสมมติฐาน

วิธีรายงานผลของการทดสอบสมมติฐานวิธีหนึ่ง คือ การแสดงว่าสมมติฐานหลักจะถูกปฏิเสธหรือไม่ที่ค่า α หรือระดับนัยสำคัญที่กำหนด ตัวอย่างเช่น เราสามารถบอกได้ว่า $H_0 : \mu_1 = \mu_2$ ถูกปฏิเสธที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 คำกล่าวสรุปมักจะไม่เพียงพอ เพราะไม่ได้บอกให้ผู้ตัดสินใจรู้ว่าค่าทดสอบทางสถิติที่คำนวณได้ตกอยู่ที่ใดบนพื้นที่วิกฤต ยิ่งกว่านั้นการหาผลลัพธ์โดยวิธีนี้อาจจะไม่เป็นที่พึงพอใจ เนื่องจากผู้ทำการทดลองบางคนอาจไม่ต้องการใช้ระดับความเสี่ยงที่ $\alpha = 0.05$ ดังนั้นวิธีการของ P-Value ได้ถูกนำมาใช้อย่างมากเพื่อหลีกเลี่ยงความยุ่งยากดังกล่าว P-Value คือ ความน่าจะเป็นที่ค่าทดสอบทางสถิติ จะมีค่าเป็นอย่างน้อยที่จะทำให้ค่านี้ มีค่ามากเท่ากับค่าสังเกตในทางสถิติเมื่อสมมติฐานหลักเป็นจริง ดังนั้น P-Value นี้จะแสดงถึงน้ำหนักของหลักฐานที่จะใช้ในการปฏิเสธ H_0 และผู้ตัดสินใจสามารถสร้างข้อสรุปที่ระดับนัยสำคัญอื่นๆ ได้นอกจากนี้ยังสามารถนิยาม P-Value ว่าเป็นเหมือนกับค่าที่น้อยที่สุดของระดับนัยสำคัญซึ่ง นำไปสู่การปฏิเสธสมมติฐานหลัก H_0 ก็ได้ ปกติแล้วนิยามที่จะบอกว่าค่าทดสอบทางสถิติมีนัยสำคัญก็ต่อเมื่อ สมมติฐานหลัก H_0 ถูกปฏิเสธ ดังนั้น อาจพิจารณาว่า P-Value ว่าเป็นค่า α ที่น้อยที่สุดซึ่ง ทำให้ข้อมูลมีนัยสำคัญเมื่อรู้ค่า P-Value แล้ว ผู้ตัดสินใจก็สามารถทราบว่ามีนัยสำคัญอย่างไร โดยไม่ต้องอาศัยการวิเคราะห์ข้อมูลซึ่งมีการกำหนดระดับนัยสำคัญไว้ก่อน

3.6.1 การทดสอบสมมติฐานของผลต่างของค่าเฉลี่ยจากค่าสังเกตที่จัดเป็นคู่ : โปรแกรม Minitab[115]

การทดสอบสมมติฐานของผลต่างของค่าเฉลี่ยจากค่าสังเกตที่จัดเป็นคู่ (Paired t test) เป็นการทดสอบสมมติฐานที่ต้องการหาค่าความแตกต่างของประชากรสองกลุ่มที่มีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย โดยกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบจะต้องสามารถจับคู่กันได้ (paired) แล้วหาค่าความแตกต่างของกลุ่มตัวอย่างทีละคู่เพื่อทดสอบสมมติฐาน ซึ่งการแจกแจงของความแตกต่างจะต้องเป็นการแจกแจงแบบปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างสำหรับการทดลอง ต้องการทดสอบสมบัติความแข็งของยางคอมปาวด์วัลคาไนซ์ผสมระหว่าง ENR50/STR5L กับสารตัวเติมผสม ก่อนและหลังการอบเร่งด้วยความร้อน ว่ามีความแตกต่างกันหรือไม่ โดยทดสอบที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ขั้นตอนที่ 1: กำหนดสมมติฐานหลัก สมมติฐานรอง และระดับนัยสำคัญที่ใช้ในการตัดสินใจ

H_0 = อัตราส่วนของยางคอมปาวด์ผสมระหว่าง ENR50/STR5L ไม่มีความแตกต่างต่อสมบัติความแข็งก่อนและหลังการอบเร่งด้วยความร้อน

H_1 = อัตราส่วนของยางคอมปาวด์ผสมระหว่าง ENR50/STR5L มีความแตกต่างต่อสมบัติความแข็งก่อนและหลังการอบเร่งด้วยความร้อน

α = ทดสอบที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ดังนั้น $H_0 : \mu_d = 0, H_1 : \mu_d \neq 0, \alpha = 0.05$

ขั้นตอนที่ 2 : ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วย Paired t

1. Stat -> Basic Statistics -> Paired t...
2. เลือก Each sample is in a column เพราะข้อมูลเรียงอยู่ในคอลัมน์เดียวกัน แล้วเลือกข้อมูลที่ต้องการวิเคราะห์ โดยเลือกคอลัมน์ของชุดข้อมูลที่ต้องการ
3. เลือก Options... จะปรากฏหน้าต่าง Paired t : options
4. ใส่ค่าความเชื่อมั่นในช่อง Confidence level: ซึ่งค่าความเชื่อมั่นมีค่าเท่ากับ $1-\alpha$ โดยทั่วไปค่าระดับความเชื่อมั่นมีค่าเท่ากับ 95% และเลือกประเภทของสมมติฐานรองที่ต้องการทดสอบ แล้วเลือก OK
5. เลือก Graphs... จะปรากฏหน้าต่าง Paired t: Graphs
6. เลือกชนิดของกราฟที่ต้องการให้แสดงผล แล้วเลือก OK
7. เลือก Ok เพื่อเริ่มการประมวลผล

ขั้นตอนที่ 3 : ผลการวิเคราะห์

P-Value ที่ได้จากการคำนวณ

มีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 : ให้ยอมรับสมมติฐานหลัก และปฏิเสธสมมติฐานรอง

มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 : ให้ปฏิเสธสมมติฐานหลัก และยอมรับสมมติฐานรอง

3.6.2 การทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของทรีทเมนต์ทั้งหมดทีละคู่ โดยใช้วิธีของฟิชเชอร์ (Fisher's Least Significant Difference: LSD) [115]

เทคนิคการวิเคราะห์ความแปรปรวนเป็นการทดสอบว่า จะมีค่าเฉลี่ยของประชากร k กลุ่มแตกต่างกันหรือไม่ ถ้าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (significant) ก็จะบอกเพียงว่ามีค่าเฉลี่ยอย่างน้อย 1 คู่ที่มีค่าแตกต่างกันแต่จะไม่บอกว่าเป็นคู่ใด ซึ่งเราจะต้องทำการทดสอบหลังการวิเคราะห์ (post hoc test) ดังนั้นวิธี Least-Significant Different (LSD) คือวิธีการเปรียบเทียบพหุคูณแบบ LSD หรือ Fisher's Least-Significant Different เป็นเทคนิคที่ R.A. Fisher ได้พัฒนาขึ้นหรือเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยประชากรครั้งละหลายคู่ หรือเป็นวิธีเปรียบเทียบผลต่างของค่าเฉลี่ยที่น้อยที่สุด โดยใช้หลัก t-test คำนวณได้โดยสมการที่ 3.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{LSD} = t_{\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\text{MSE} \left(\frac{1}{n_i} + \frac{1}{n_j} \right)} \quad (3.12)$$

เมื่อ MSE แทนค่าความแปรปรวนจาก one way ANOVA

n_i แทนจำนวนข้อมูลกลุ่มที่ i

n_j แทนจำนวนข้อมูลกลุ่มที่ j

วิธี LSD มีขั้นตอนดังนี้

1. คำนวณค่า LSD

2. คำนวณความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ย $\bar{x}_i - \bar{x}_j$

3. นำค่า $|\bar{x}_i - \bar{x}_j|$ เปรียบเทียบกับค่า LSD

3.1 ถ้า ค่า $|\bar{x}_i - \bar{x}_j| > \text{ค่า LSD}$ แสดงว่า $\mu_i \neq \mu_j$

3.2. ถ้า ค่า $|\bar{x}_i - \bar{x}_j| \leq \text{ค่า LSD}$ แสดงว่า $\mu_i = \mu_j$

3.7 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์และประเมินโครงการ

การวิเคราะห์และประเมินโครงการเป็นการประเมินภาพรวมทั้งหมดของโครงการ ซึ่งขอ
นำเสนอการวิเคราะห์และประเมินโครงการเพื่อตัดสินใจลงทุนด้านการเงิน โดยใช้เครื่องมือในการ
วิเคราะห์และประเมินโครงการ 5 วิธี ได้แก่ 1) วิธีอัตราผลตอบแทนถัวเฉลี่ย 2) วิธีระยะเวลาคืนทุน
3) วิธีผลตอบแทนจากการลงทุน 4) วิธีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ และ 5) วิธีดัชนีการกำกับกำไร[15]

3.7.1 วิธีอัตราผลตอบแทนถัวเฉลี่ย (the average rate of return method: ARR)

เป็นลักษณะของการเปรียบเทียบกำไรสุทธิที่หลังภาษีที่เกิดขึ้นเทียบกับเงินลงทุนสุทธิ
ถัวเฉลี่ยของโครงการนั้น สำหรับโครงการวิจัยมีการลงทุนเพียงครั้งเดียวการคำนวณหาอัตราผลตอบแทน
ถัวเฉลี่ยจึงใช้เงินลงทุนครั้งแรกแทนการใช้เงินลงทุนถัวเฉลี่ยได้ คำนวณได้โดยสมการที่ 3.13

$$\text{อัตราผลตอบแทนถัวเฉลี่ย (\%)} = \frac{\text{กำไรสุทธิเฉลี่ยต่อปี}}{\text{เงินลงทุนเริ่มแรก}} \quad (3.13)$$

3.7.2 วิธีระยะเวลาคืนทุน (payback period method: PP)

เป็นการพิจารณาโครงการลงทุนจากมูลค่าเงินลงทุนที่เสียไปกับระยะเวลาที่จะได้รับ
ประโยชน์จากการลงทุนคืน สำหรับผลตอบแทนหรือกระแสเงินสดรับสุทธิหลังภาษีเท่ากันทุกปีตลอด
อายุโครงการ จะคำนวณได้โดยสมการที่ 3.14

$$\text{งวดเวลาคืนทุน (ปี)} = \frac{\text{เงินลงทุนครั้งแรก}}{\text{เงินสดเข้าสุทธิต่อปีหลังภาษี}} \quad (3.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.3 วิธีผลตอบแทนจากการลงทุน (the internal rate of return method: IRR)

เป็นการคำนวณหาอัตราผลตอบแทนที่จะได้รับจากการลงทุนในโครงการ อัตราผลตอบแทนนี้จะเป็นอัตราที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิเท่ากับ 0 หรือผลตอบแทนที่ได้รับเท่ากับเงินลงทุนครั้งแรก สามารถคำนวณได้สมการที่ 3.15

$$I - \left(\sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+r)^t} \right) = 0 \quad (3.15)$$

- I คือ เงินจ่ายลงทุนครั้งแรก
 C_t คือ กระแสเงินสดได้รับสุทธิในแต่ละงวด
 t คือ ปีที่ 1 ถึงปีที่ n
 n คือ จำนวนงวดดอกเบี้ย/จำนวนปี
 r คือ อัตราดอกเบี้ย/อัตราผลตอบแทน

เมื่อทราบอัตราผลตอบแทนจากการลงทุน จะทำการตัดสินใจยอมรับโครงการก็ต่อเมื่ออัตราผลตอบแทนจากการลงทุนนั้นสูงกว่าอัตราผลตอบแทนที่ต้องการ (required rate of return) หรือมากกว่าต้นทุนเงินทุน (cost of capital)

3.7.4 วิธีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (the net present value method: NPV)

วิธีนี้จะคำนวณหาผลต่างระหว่างมูลค่าปัจจุบันของผลตอบแทนที่คาดว่าจะได้รับในอนาคตตามอัตราผลตอบแทนขั้นต่ำที่ต้องการ หรือต้นทุนเงินทุนกับต้นทุนเงินทุนเริ่มแรก สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.16 ดังนี้

$$NPV = \left(\sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+r)^t} \right) - I \quad (3.16)$$

- NPV คือ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ
 I คือ เงินจ่ายลงทุนครั้งแรก
 C_t คือ กระแสเงินสดได้รับสุทธิในแต่ละงวด
 t คือ ปีที่ 1 ถึงปีที่ n
 n คือ จำนวนงวดดอกเบี้ย/จำนวนปี
 r คือ อัตราดอกเบี้ย/อัตราผลตอบแทน

การตัดสินใจยอมรับโครงการขึ้นอยู่กับกระแสเงินสดสุทธิมีค่าเป็นบวกหรือไม่ หากมีค่าเป็นบวกแสดงว่าผลตอบแทนจากการลงทุนนั้นสูงกว่าอัตราผลตอบแทนที่ต้องการ (required rate of return) หรือมากกว่าต้นทุนเงินทุน (cost of capital)

3.7.5 วิธีดัชนีการทำกำไร (profitability index method: PI)

ดัชนีกำไรเป็นอัตราส่วนระหว่างมูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดเข้าสู่สุทธิกับกระแสเงินสดจ่ายลงทุนครั้งแรก สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.17 ดังนี้

$$PI = \frac{\left(\sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+K)^t} \right)}{I} \quad (3.17)$$

- PI คือ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ
 I คือ เงินจ่ายลงทุนครั้งแรก
 K คือ อัตราดอกเบี้ย/อัตราผลตอบแทนที่ต้องการ
 Ct คือ กระแสเงินสดได้รับสุทธิในแต่ละงวด
 t คือ ปีที่ 1 ถึงปีที่ n
 n คือ จำนวนงวดดอกเบี้ย/จำนวนปี

การตัดสินใจยอมรับโครงการลงทุนจะพิจารณาเช่นเดียวกับการคำนวณกระแสเงินสดสุทธิ หากค่าดัชนีการทำกำไรมากกว่า 1 แสดงว่ามีกระแสเงินสดเข้ามากกว่าเงินลงทุนเริ่มแรก

สำหรับการวิเคราะห์การลงทุนโครงการ เพื่อความสะดวก รวดเร็ว และความแม่นยำในการคำนวณ ผู้วิจัยจึงได้นำโปรแกรมสำเร็จรูปการวิเคราะห์การลงทุน (investment analysis, Version 2.0 Beta) มาช่วยในการวิเคราะห์ ซึ่งโปรแกรมสำเร็จรูปจะประกอบด้วยสองส่วนหลักคือ input และ output แสดงดังภาพที่ 3.21

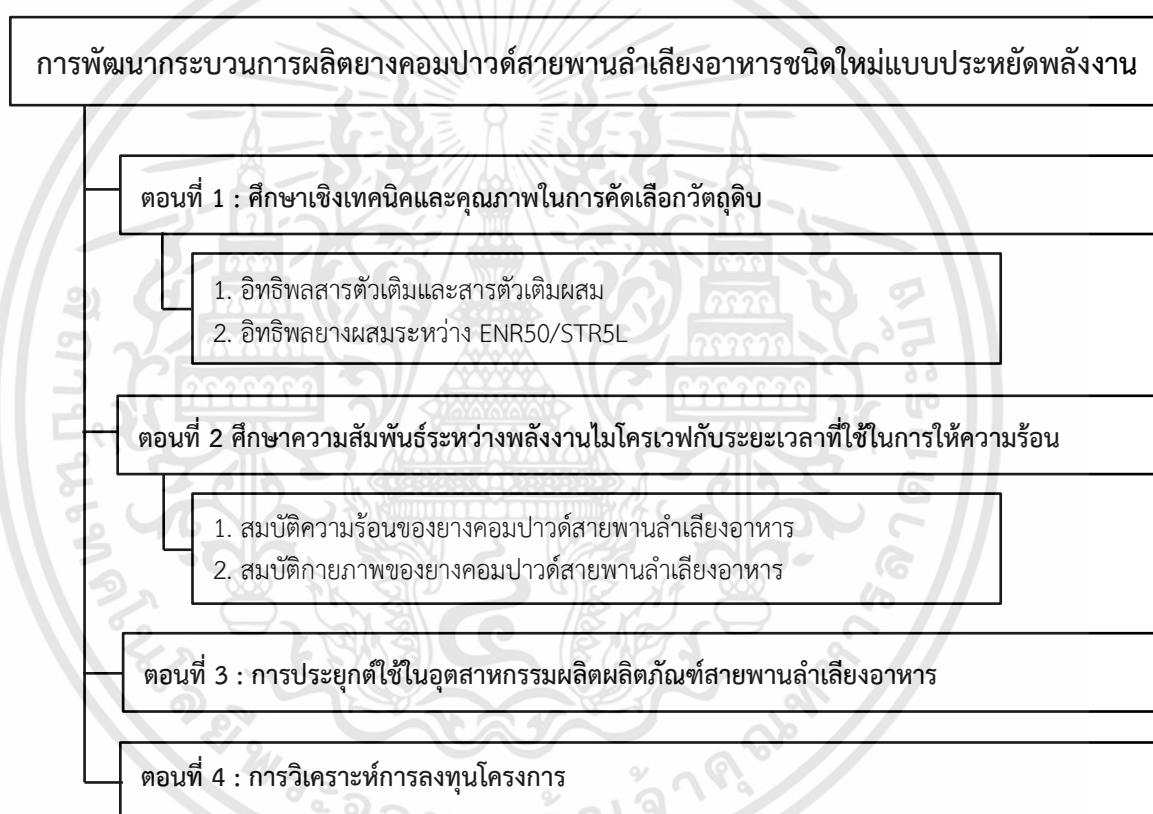


ภาพที่ 3.21 แสดงหน้าจอหลักของโปรแกรมสำเร็จรูปการวิเคราะห์การลงทุน[116]

เอกสารนี้เป็นเอกสารทบทวนวิชาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูญาติเหเนาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

สำหรับงานวิจัยในครั้งนี้เป็นการศึกษาการคัดเลือกวัตถุดิบยางธรรมชาติ และสารตัวเติม เพื่อพัฒนาสูตรยางคอมปาวด์สายพานลำเลียงอาหารแบบประหยัดพลังงาน และวิธีการนำเทคโนโลยีกระบวนการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟมาประยุกต์ใช้ในการอุ่นยางคอมปาวด์ พร้อมทั้งการวิเคราะห์การลงทุน โดยมี 4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย ประกอบด้วย 1) ศึกษาเชิงเทคนิคและคุณภาพในการคัดเลือกวัตถุดิบ 2) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานไมโครเวฟกับระยะเวลาที่ใช้ในการให้ความร้อน 3) การประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตผลิตภัณฑ์สายพานลำเลียงอาหาร และ 4) การวิเคราะห์การลงทุนโครงการ แสดงดังภาพที่ 3.22



ภาพที่ 3.22 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

บทที่ 4

ผลและการอภิปรายผล

4.1 ผลสารตัวเติม และสารตัวเติมผสมที่มีต่อสมบัติกายภาพของยางคอมปาวด์สายพานลำเลียงอาหาร

4.1.1 ลักษณะการวัลคาไนซ์

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดลองเกี่ยวกับลักษณะการวัลคาไนซ์ พบว่า SiO_2/ENR และ SiO_2/STR จะให้ค่าระยะเวลาในการวัลคาไนซ์ที่สูงกว่า เนื่องจากขั้นตอนการบดผสมระหว่างยางกับสารเคมีในการทดลองครั้งนี้ได้มีลำดับขั้นตอนการผสมคือ ยาง ซิลิกา ไฮเลน PEG และน้ำมัน เข้าด้วยกันก่อนที่จะนำยางมาสเตอร์แบทที่ได้ไปผสมกับสารเคมีชนิดอื่นๆ ซึ่งจะทำให้การยึดเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนของซิลิกาลดน้อยลง มีผลให้สารตัวเติมกระจายตัวในยางได้ดีขึ้น นอกจากนี้ยังมีผลให้หมู่ซิลิลอกเซน (siloxane, $-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$) และหมู่ซิลินอล (silanol, $-\text{Si}-\text{OH}$) บนโครงสร้างบริเวณพื้นผิวของซิลิกาเกิดปฏิกิริยากับไฮเลน และ PEG ได้ดีขึ้นมีผลทำให้พื้นผิวซิลิกามีสภาพขี้วลดลง (มีการแตกออกของสารเชื่อมขวางโดยเฉพาะการเชื่อมขวางที่เป็น polysulphide) หรือมีความเป็น hydrophobic มากขึ้น[59] จึงสามารถเข้ากับยางได้ดีกว่าและลดปัญหาการดูดซับสารตัวเร่งของซิลิกา จึงทำให้มีระยะเวลาวัลคาไนซ์ที่นานกว่า MgCO_3/ENR , MgCO_3/STR , $\text{SiO}_2/\text{MgCO}_3/\text{ENR}$ และ $\text{SiO}_2/\text{MgCO}_3/\text{STR}$ พร้อมทั้งส่งผลให้ขั้นตอนการวัลคาไนซ์ยางคอมปาวด์สายพานลำเลียงอาหารเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

และนอกจากนี้ยังพบว่า $\text{SiO}_2/\text{MgCO}_3/\text{ENR}$ จะให้ค่าระยะเวลาในการวัลคาไนซ์ที่สูง และ ค่าดัชนีอัตราการวัลคาไนซ์ (CRI) ที่ต่ำกว่า $\text{SiO}_2/\text{MgCO}_3/\text{STR}$ เนื่องจากหมู่ไฮดรอกซิลใน ENR50 เป็นหมู่ที่มีความเป็นขี้วจึงทำให้เกิดการกระตุ้นพันธะคู่ที่อยู่ใกล้ๆ ให้เกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนไปยังพันธะคู่ในหน่วยของไอโซพรีน ทำให้เกิดความว่องไวในการทำปฏิกิริยาการเชื่อมโยงจึงทำให้ค่าดัชนีอัตราการวัลคาไนซ์ที่สั้นกว่า STR5L[117] เมื่อพิจารณาถึงความแตกต่างของแรงบิดเตลต้า (MH-ML) พบว่า SiO_2/STR , SiO_2/ENR และ $\text{SiO}_2/\text{MgCO}_3/\text{ENR}$ มีค่ามากกว่า MgCO_3/ENR และ MgCO_3/STR แสดงให้เห็นถึงระดับความเชื่อมโยงที่สูงขึ้น

ตารางที่ 4.1 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของ ENR50 และ STR5L กับสารตัวเติมและสารตัวเติมผสม

Sample	M_L (lb.in)	M_H (lb.in)	M_H-M_L (lb.in)	t_{s2} (min)	t_{c90} (min)	CRI (min^{-1})
SiO_2/ENR	0.7	9.4	8.7	2.6	7.6	20.0
SiO_2/STR	1.8	10.0	8.2	3.2	7.7	22.2
MgCO_3/ENR	0.4	6.7	6.3	2.7	3.6	111.1
MgCO_3/STR	1.3	7.9	6.6	1.9	2.7	125.0
$\text{SiO}_2/\text{MgCO}_3/\text{ENR}$	1.5	11.3	9.8	2.0	6.2	23.8
$\text{SiO}_2/\text{MgCO}_3/\text{STR}$	3.2	14.6	11.4	1.6	4.3	37.0

4.1.2 สมบัติเชิงกล

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดลองเกี่ยวกับสมบัติเชิงกล พบว่า SiO_2/ENR , MgCO_3/ENR , $\text{SiO}_2/\text{MgCO}_3/\text{ENR}$ จะมีค่าสมบัติเชิงกลที่ดีเนื่องจาก ยางธรรมชาติ ENR50 เป็นยางธรรมชาติที่มีขี้ผึ้ง[118] ซึ่งจะสามารถช่วยเพิ่มการกระจายตัวของซิลิกาและแมกนีเซียมคาร์บอเนตให้ดีขึ้นใน rubber matrix ขึ้นได้ เพราะจากความเป็นขี้ผึ้งของยางทำให้เกิดแรงกระทำระหว่างยางและสารตัวเติมทั้งสองชนิดมากขึ้น[119] และยางธรรมชาติ ENR50 เป็นยางธรรมชาติที่มีค่าความหนืดสูงกว่ายางธรรมชาติชนิด STR5L[118] ซึ่งความหนืดสูงในยางจะทำให้ซิลิกาและแมกนีเซียมคาร์บอเนตแตกตัวได้ดีเนื่องจากมีค่าแรงเฉือนที่เกิดขึ้นเข้าไปทำลายโครงสร้างทุติยภูมิในระหว่างกระบวนการบดผสมยางกับสารตัวเติม และการดูดซับสารเคมีของซิลิกาได้ดี เนื่องจากบนพื้นผิวของซิลิกามีหมู่ไฮดรอกซิลหรือหมู่ไฮดรอกไซด์ (-OH) อยู่ในปริมาณมาก พื้นผิวของซิลิกาจึงมีความเป็นขี้ผึ้งและมีความว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมีต่างๆ สูง ดังนั้นซิลิกาจึงมีแนวโน้มที่จะดูดซับสารเคมีต่างๆ ที่มาเกาะบนผิวได้ดี พร้อมทั้งซิลิกาสามารถเสริมแรงในยางได้ดีเพราะมีขนาดของอนุภาคปฐมภูมิเล็กและมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง[58] แสดงว่าการบดผสมทำให้สารตัวเติมเข้ากับยางและการกระจายตัวของสารเคมีในยางได้ดี ดังนั้นจึงทำให้การเข้ากันได้ดีขึ้น ส่งผลให้ความเค้นแรงดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 300 (MPa) การต้านแรงดึง (MPa) และความทนต่อแรงยืดจนขาด (%) ของยางวัลคาไนซ์ดีขึ้นตามไปด้วย

ตารางที่ 4.2 สมบัติเชิงกลของของยางวัลคาไนซ์ ENR50 และ STR5L กับสารตัวเติมและสารตัวเติมผสม

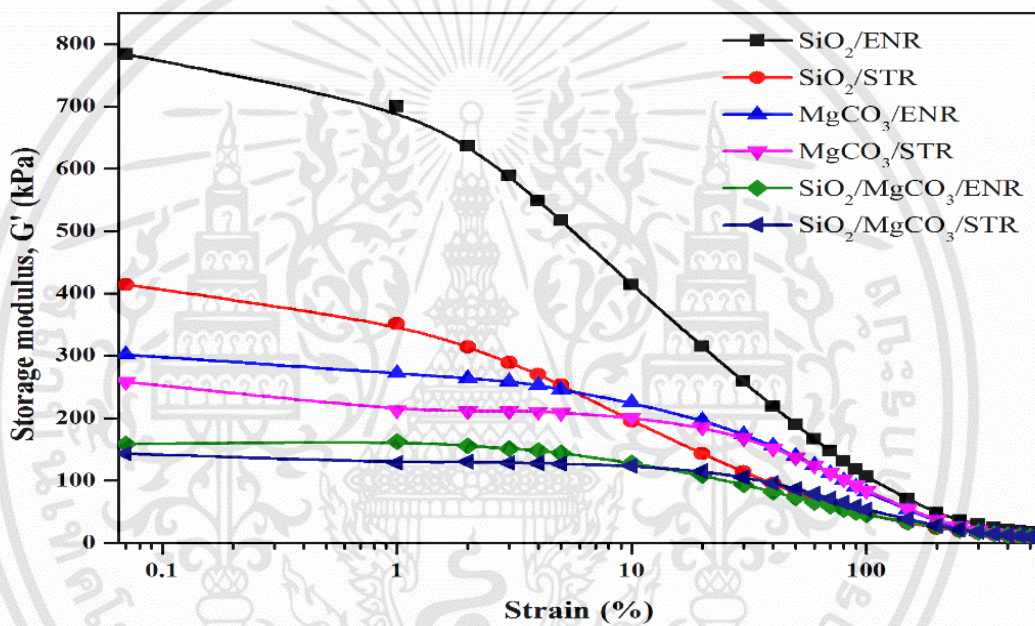
Mix symbol	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	100% modulus (MPa)	300% modulus (MPa)
SiO_2/ENR	21.59±0.43	657.09±7.64	1.24±0.08	4.11±0.37
SiO_2/STR	18.57±2.33	625.98±21.00	1.11±0.04	4.20±0.09
MgCO_3/ENR	17.16±2.60	729.23±13.53	1.17±0.08	4.81±0.25
MgCO_3/STR	14.77±1.26	657.09±6.56	1.64±0.02	5.18±0.10
$\text{SiO}_2/\text{MgCO}_3/\text{ENR}$	15.85±3.17	534.36±52.34	1.36±0.11	5.20±0.44
$\text{SiO}_2/\text{MgCO}_3/\text{STR}$	14.40±1.23	574.70±4.87	1.64±0.10	5.18±0.31

4.1.3 สมบัติเชิงกลแบบพลวัต

ภาพที่ 4.1 แสดงผลการทดลองเกี่ยวกับสมบัติเชิงกลแบบพลวัต ซึ่งแสดง storage modulus ที่ฟังก์ชันของ strain amplitude สำหรับสูตรยางคอมพาวด์สายพานลำเลียงอาหารที่มีการเติมสารตัวเติม 2 ชนิด คือ SiO_2 , MgCO_3 และ mixed filler ($\text{SiO}_2+\text{MgCO}_3$) ลงในยางธรรมชาติ ซึ่งแบ่งเป็น 2 ชนิดเช่นกัน นั่นคือ ยางธรรมชาติที่ไม่มีขี้ผึ้ง (STR5L) และยางธรรมชาติที่มีขี้ผึ้ง (ENR50) เป็นต้น เมื่อพิจารณาจากกราฟจะเห็นได้ว่าการเติมสารตัวเติมลงในยางธรรมชาติพบว่าที่ % strain ต่ำๆ หรือก่อน 1% strain นั้น ทุกสูตรยางจะแสดงค่า storage modulus ที่สูง และเมื่อ % strain เพิ่มขึ้นพบว่า storage modulus ลดลง เนื่องจากเมื่อเพิ่ม % strain ทำให้โครงข่ายสารตัวเติมที่เกาะกันเป็นกลุ่มก้อน (agglomerate) เกิดการแตกตัวออก ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงของค่าโมดูลัสสะสมตามเปอร์เซ็นต์การผิดรูปเป็นปรากฏการณ์ที่เรียกว่า “Payne effect”[120] ดังนั้นการใช้สารตัวเติม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่างชนิดกันหรือปริมาณสารตัวเติมต่างกันจะทำให้ยางมีโมดูลัสสะสมและแสดง Payne effect ต่างกัน ส่วนของ strain dependent storage modulus เกิดจากส่วนของอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคสารตัวเติม (filler-filler interaction) มีผลให้ยางคอมปาวด์มีค่า elastic modulus สูง[63] เมื่อพิจารณาสูตรยางคอมปาวด์ พบว่า storage modulus ของสูตร $\text{SiO}_2/\text{MgCO}_3/\text{ENR}$ สูงกว่าสูตร $\text{SiO}_2/\text{MgCO}_3/\text{STR}$ ทั้งนี้เนื่องจากสูตรดังกล่าวเป็นสูตรการผสมสารตัวเติมสองชนิดทำให้สารตัวเติมเกาะกลุ่มกันมากกว่าการเติมเพียงชนิดเดียว ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะสัณฐานวิทยา นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าการเติมสารตัวเติมผสมลงในยางที่ไม่มีขั้วหรือ STR5L นั้นแสดงค่า storage modulus ต่ำกว่ายาง ENR50 เป็นเพราะความเป็นขั้วของเมทริกซ์ยาง ENR50 ส่งผลต่อการกระจายตัวของสารตัวเติมนั้นคือสารตัวเติมผสมจะกระจายตัวได้ดีกว่าในยาง STR5L

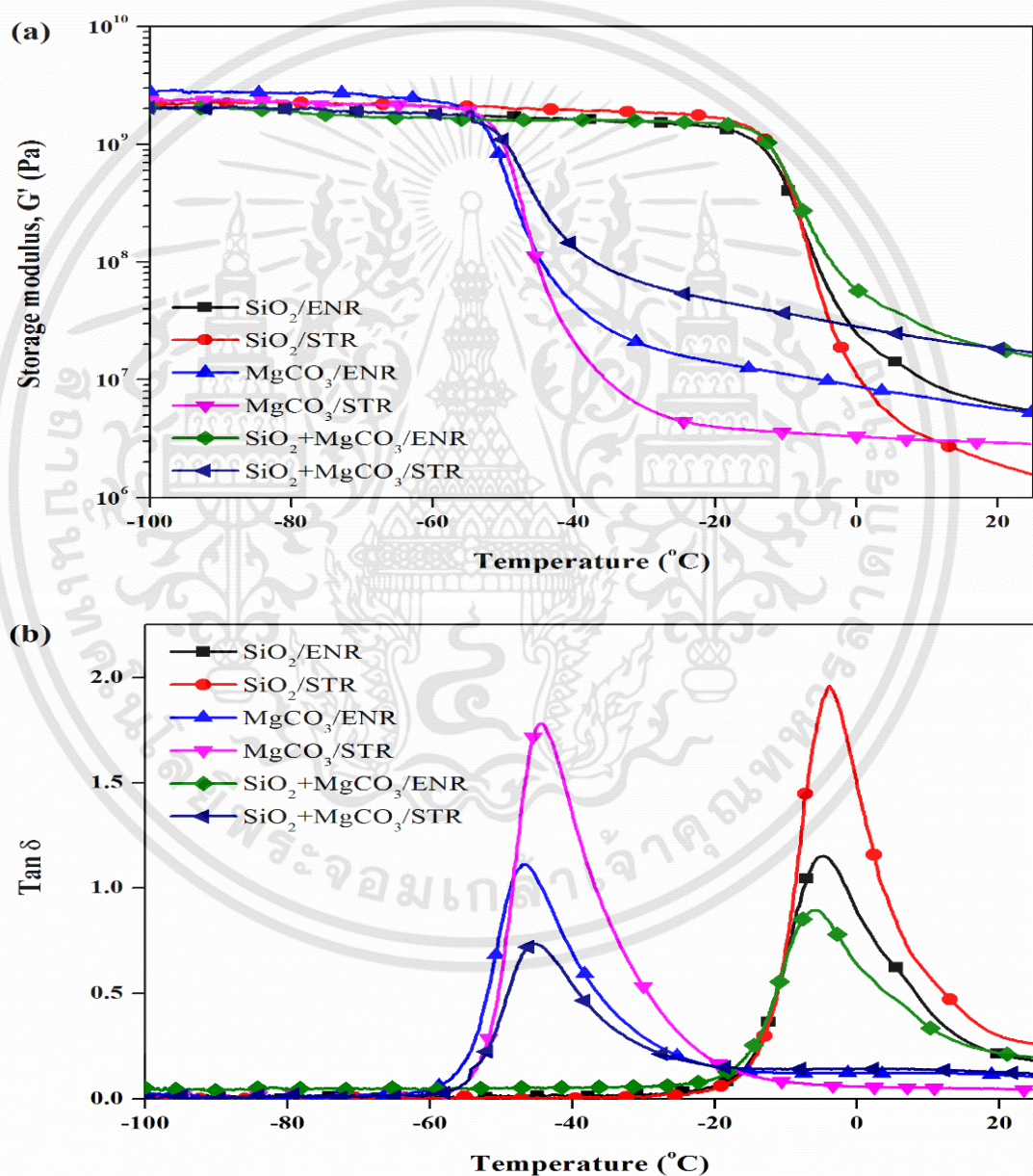


ภาพที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสสะสม (storage modulus, G') และค่าความเครียด (strain) ของ ENR50 และ STR5L กับสารตัวเติมและสารตัวเติมผสม ทดสอบที่อุณหภูมิ 80°C , 1 Hz.

ภาพที่ 4.2 แสดงผลการทดลองเกี่ยวกับสมบัติเชิงกลแบบพลวัต ซึ่งแสดง storage modulus และ tan delta ต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง จากภาพที่ 4.2(a) พบว่า storage modulus ลดลงอย่างรวดเร็ว ณ อุณหภูมิหนึ่ง นั้นแสดงถึงการเปลี่ยนสถานะจาก glassy state ไปเป็น rubbery state โดยจากสูตรยางคอมปาวด์สายพานลำเลียงอาหารทั้ง 6 สูตร จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ สูตร SiO_2/ENR , SiO_2/STR และ $\text{SiO}_2/\text{MgCO}_3/\text{ENR}$ จะแสดงค่า storage modulus สูงกว่า MgCO_3/ENR , MgCO_3/STR , และ $\text{SiO}_2/\text{MgCO}_3/\text{STR}$ เนื่องจาก SiO_2 ทำหน้าที่เป็นสารตัวเติมเสริมแรงให้กับยาง STR5L และ ENR50 ได้ดีกว่า MgCO_3 นอกจากนี้ภาพที่ 4.2(b) Tan delta ซึ่งจุดสูงสุดของพีค Tan delta บ่งชี้ถึงอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะของวัสดุจากแก้วเป็นยางเรียกว่า T_g (glass transitions temperatures) พบว่า T_g ของสูตร SiO_2/ENR , SiO_2/STR และ $\text{SiO}_2/\text{MgCO}_3/\text{ENR}$ สูงกว่า MgCO_3/ENR , MgCO_3/STR , และ $\text{SiO}_2/\text{MgCO}_3/\text{STR}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจาก SiO_2 มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า MgCO_3 จึงส่งผลให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างสารตัวเติมกับยาง (rubber-filler interaction) ของยางทั้งสองชนิดได้ดีกว่า จึงแสดงค่า T_g สูงกว่าสารตัวเติม MgCO_3 เนื่องจากสารตัวเติมที่มีขนาดเล็ก จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง ทำให้มีพื้นที่ที่จะเกิดอันตรกิริยา ระหว่างยางกับสารตัวเติมเพิ่มสูงขึ้น[121] และนอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบชนิดของยางเมื่อเติมสารตัวเติมผสม ($\text{SiO}_2+\text{MgCO}_3$) พบว่าการเติมสารตัวเติมผสม ($\text{SiO}_2+\text{MgCO}_3$) ลงในยาง ENR50 แสดงค่า T_g สูงกว่าการเติมในยาง STR5L ทั้งนี้เนื่องจากความเป็นขั้วของเมตริกซ์ทำให้ยาง ENR50 ซึ่งมีขั้วเกิดอันตรกิริยากับสารตัวเติมได้ดีกว่า นั่นคือเพิ่มการเกิด rubber-filler interactions[122,123]



ภาพที่ 4.2 สมบัติเชิงกลพลวัตของ ENR50 และ STR5L กับสารตัวเติมและสารตัวเติมผสมทดสอบที่อุณหภูมิที่ -100 - 25 °C, 1 Hz. (a) ค่ามอดูลัสสะสม (storage modulus, G') และ (b) ค่าแทนเดลต้า (tan δ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4 สมบัติไดอิเล็กตริก

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดลองเกี่ยวกับสมบัติไดอิเล็กตริก พบว่าค่า ϵ'_r , ϵ''_r และค่า $\tan \delta$ ของ $\text{SiO}_2/\text{MgCO}_3/\text{ENR}$, SiO_2/ENR และ MgCO_3/ENR ที่จะมีค่าสูงกว่าอย่าง $\text{SiO}_2/\text{MgCO}_3/\text{STR}$, SiO_2/STR และ MgCO_3/STR ซึ่งแสดงให้เห็นว่า STR5L เป็นยางธรรมชาติมีโครงสร้างโมเลกุลแบบพันธะคู่ชนิดไม่มีขั้ว[26] และไม่สามารถดูดคลื่นไมโครเวฟได้ดีเหมือนยาง ENR50 เนื่องจากยาง STR5L มีโมเลกุลขนาดใหญ่พร้อมทั้งการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลแต่ละสายโซ่ยังไม่เป็นระเบียบ ดังนั้นการเคลื่อนที่หรือการเคลื่อนตัวโมเลกุลเพื่อจัดเรียงตัวตามสนามไฟฟ้าจึงทำได้ค่อนข้างช้าและยาก ดังนั้นการใส่สารตัวเติมซิลิกา แมกนีเซียมคาร์บอเนต และ สารซิลิกาผสมกับแมกนีเซียมคาร์บอเนต เพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับพลังงานให้มีมากขึ้นเพราะสารตัวเติมดังกล่าวสามารถดูดซับพลังงานไมโครเวฟได้ดีเพราะมีความเป็นขั้วทางไฟฟ้า สำหรับสารตัวเติมซิลิกาจะมีหมู่ไฮดรอกซิล (Si-OH) อยู่ที่พื้นผิวในปริมาณมาก ซึ่งหมู่ไฮดรอกซิลเหล่านี้จะทำให้พื้นผิวซิลิกามีความเป็นกรดและมีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีและมีความเป็นขั้วไฟฟ้าค่อนข้างสูง[59] จึงส่งผลให้ซิลิกาเป็นสารตัวเติมที่มีความเป็นขั้วสูงกว่าสารตัวเติมแมกนีเซียมคาร์บอเนต

จากการทดลองยังพบว่า $\text{SiO}_2/\text{MgCO}_3/\text{ENR}$ จะให้ค่า ϵ'_r , ϵ''_r และค่า $\tan \delta$ สูงที่สุดคือ 2.555, 0.0169×10^3 และ 0.006617×10^3 ตามลำดับ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ENR50 มีโครงสร้างโมเลกุลแบบมีขั้ว เมื่อใส่สารซิลิกาผสมกับแมกนีเซียมคาร์บอเนต ซึ่งทำให้สามารถดูดคลื่นพลังงานไมโครเวฟและเปลี่ยนเป็นความร้อนได้ดียิ่งขึ้นแสดงให้เห็นว่าปริมาณสารตัวเติมผสมที่เติมลงไปส่งผลทำให้ ENR50 โดยปกติจะจัดว่าเป็นวัสดุที่มีขั้วกลายมาเป็นวัสดุที่มีขั้วเพิ่มมากขึ้น ซึ่งค่าสมบัติไดอิเล็กตริกที่สูงขึ้นจะส่งผลให้สามารถประหยัดพลังงานในกระบวนการอุ่นยางคอมพาวด์สายพานลำเลียงอาหารด้วยพลังงานไมโครเวฟ

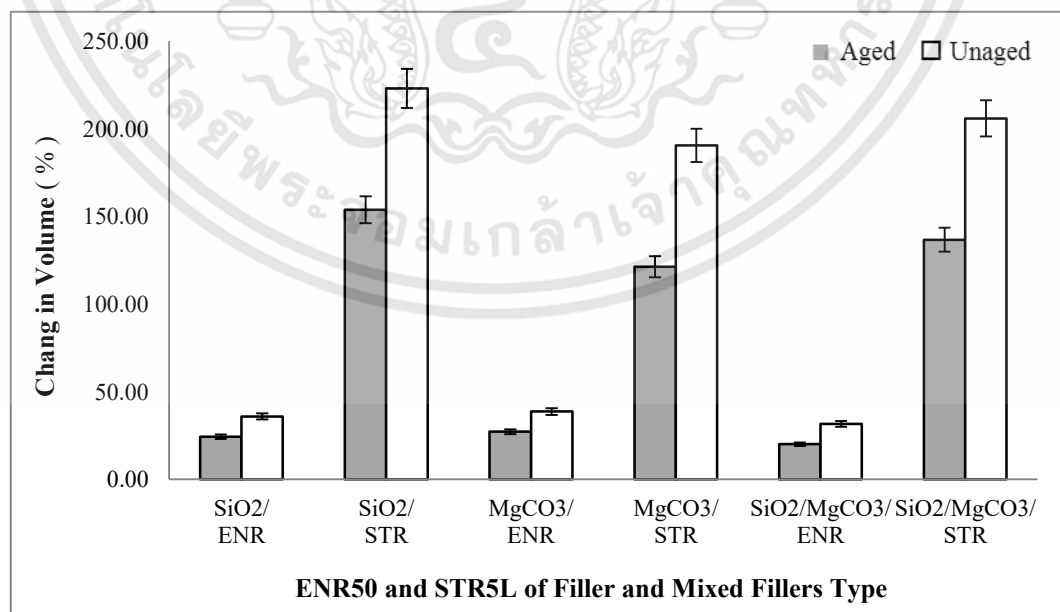
ตารางที่ 4.3 สมบัติไดอิเล็กตริกของยางวัลคาไนซ์ ENR50 และ STR5L กับสารตัวเติมและสารตัวเติมผสม

Mix symbol	Relative dielectric constant (ϵ'_r)	Relative loss factor (ϵ''_r) ($\times 10^{-3}$)	Loss tangent coefficient ($\tan \delta$) ($\times 10^{-3}$)
SiO_2/ENR	2.400	0.0149	0.006194
SiO_2/STR	2.321	0.0119	0.005137
MgCO_3/ENR	2.490	0.0131	0.005276
MgCO_3/STR	2.369	0.0097	0.004114
$\text{SiO}_2/\text{MgCO}_3/\text{ENR}$	2.555	0.0169	0.006617
$\text{SiO}_2/\text{MgCO}_3/\text{STR}$	2.427	0.0139	0.005717

4.1.5 ลักษณะการบวมพองในน้ำมัน

ภาพที่ 4.3 แสดงผลการทดลองเกี่ยวกับลักษณะการบวมพองในน้ำมัน พบว่าค่าลักษณะการบวมพองในน้ำมันของ $\text{SiO}_2/\text{MgCO}_3/\text{ENR}$, SiO_2/ENR และ MgCO_3/ENR ที่สภาวะก่อนและหลังการอบเร่งด้วยความร้อนจะมีต่ำกว่า $\text{SiO}_2/\text{MgCO}_3/\text{STR}$, SiO_2/STR และ MgCO_3/STR ซึ่งเนื่องจาก ENR50 เป็นยางธรรมชาติที่ได้จากการเติมออกซิเจนเข้าไปในโมเลกุลตรงบริเวณพันธะคู่ทำให้เกิดเป็นวงแหวนอีพอกไซด์โดยผ่านปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันซึ่งมีระดับของการเกิดอีพอกซิเดชันที่ร้อยละ 50 จึงทำให้มีความเป็นขี้ผึ้งสูงกว่า STR5L เพราะ STR5L เป็นพอลิเมอร์ที่มีพันธะคู่ชนิดไม่มีขี้ผึ้ง จึงไม่สามารถทนต่อน้ำมันหรือตัวทำละลายที่ไม่มีขี้ผึ้งได้[124] แต่ ENR50 มีลักษณะเด่นคือทนต่อความร้อนและสมบัติความต้านทานการพองตัวในน้ำมันได้ดี[125] จึงทำสมบัติหลังการอบเร่งด้วยความร้อนมีสมบัติลักษณะการบวมพองในน้ำมันต่ำกว่าก่อนการอบเร่งด้วยความร้อน และเมื่อนำ ENR50 มาผสมกับสารตัวเติมผสมระหว่างซิลิกากับแมกนีเซียมคาร์บอเนตซึ่งเป็นสารตัวเติมเสริมแรงและกึ่งเสริมแรงจะทำให้ได้ค่าความต้านทานต่อการบวมพองในน้ำมันต่ำสุด อันเนื่องมาจากสารตัวเติมผสมต่างก็มีสมบัติลดการบวมพองในน้ำมันได้[59]

เมื่อ ENR50 ซึ่งมีความเป็นขี้ผึ้งสูงจะทำปฏิกิริยาได้ดีกับพื้นผิวของสารตัวเติมที่มีหมู่ฟังก์ชันที่มีขี้ผึ้งโดยเฉพาะกับสารตัวเติมซิลิกาที่มีหมู่ฟังก์ชันเคมีจำพวกออกไซด์ของโลหะหรือหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) เป็นองค์ประกอบอยู่บนพื้นผิว นอกจากนี้เมื่อเกิดอันตรกิริยาระหว่าง ENR50 กับสารตัวเติมผสม จะส่งผลให้ยางคอมพาวด์มีความเป็นขี้ผึ้งเพิ่มขึ้นทำให้ความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างสูงขึ้น เนื่องจากโครงสร้างของสายโซ่โมเลกุลยางเคลื่อนที่ได้ยากมากขึ้น จะส่งผลให้สามารถทนต่อน้ำมันและตัวทำละลายที่ไม่มีขี้ผึ้งได้ดี[30] ซึ่งค่าสมบัติลักษณะการบวมพองในน้ำมันของ $\text{SiO}_2/\text{MgCO}_3/\text{ENR}$ มีค่าต่ำลงมากที่สุดจะส่งผลให้อาหารที่ล้าเสี่ยงบนสายพานล้าเสี่ยงอาหารจะมีความปลอดภัยสูง



ภาพที่ 4.3 สมบัติการทนน้ำมันก่อนและหลังการอบเร่งด้วยความร้อนของยางวัลคาไนซ์ ENR50

และ STR5L กับสารตัวเติมและสารตัวเติมผสม คิดเป็นร้อยละของปริมาณที่เปลี่ยนแปลง ไปเมื่อแช่ตัวอย่างในน้ำมัน IRM 903 ที่อุณหภูมิ 100 °C นาน 24 ชั่วโมง ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

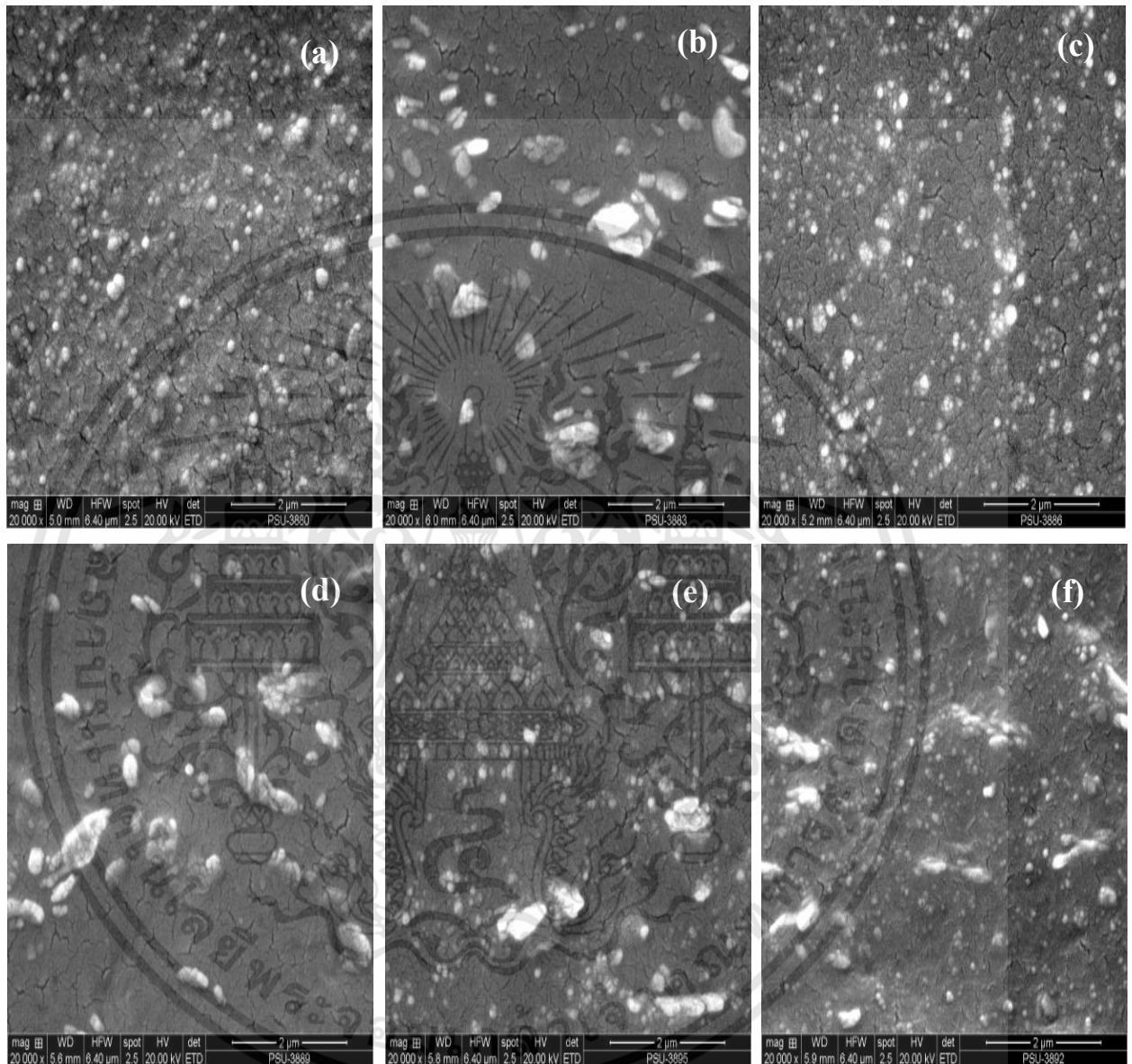
4.1.6 ลักษณะสัณฐานวิทยา

ภาพที่ 4.4 (a)-(f) แสดงภาพถ่ายบริเวณพื้นที่หน้าตัดของยางวัลคาไนซ์ที่นำไปหักในไนโตรเจนเหลวด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ด้วยกำลังขยาย 2,000 เท่า โดยภาพที่ 4.4 (a)-(f) เป็นยางวัลคาไนซ์ของ SiO_2/ENR , SiO_2/STR , MgCO_3/ENR , MgCO_3/STR , $\text{SiO}_2/\text{MgCO}_3/\text{ENR}$ และ $\text{SiO}_2/\text{MgCO}_3/\text{STR}$ ตามลำดับ

ภาพที่ 4.4 (a) เนื่องจาก ENR50 มีความเป็นขี้ผึ้งซึ่งสามารถช่วยเพิ่มการกระจายตัวของซิลิกาให้ดีขึ้นได้เพราะความมีขี้ผึ้งจะทำให้เกิดแรงกระทำระหว่างยางและสารตัวเติม [118,119] และ ENR50 มีค่าความหนืดสูงกว่า STR5L ซึ่งความหนืดสูงในยางจะทำให้ซิลิกาแตกตัวได้ดีเนื่องจากมีค่าแรงเฉือนที่เกิดขึ้นเข้าไปทำลายโครงสร้างทุติยภูมิในระหว่างกระบวนการบดผสมยางกับสารตัวเติม [118] ส่งผลให้สารตัวเติมเข้ากับยางและการกระจายตัวได้ดี ภาพที่ 4.4 (b) อนุภาคสารตัวเติมซิลิกามีการเกาะกันเป็นก้อนเล็กๆ มีลักษณะการกระจายตัวและระยะห่างของการกระจายตัวอยู่ในระยะใกล้กันและสม่ำเสมอ ซึ่งเป็นลักษณะการกระจายตัวได้ดี และลักษณะของอนุภาคมีการฝังตัวในยางคอมพาวด์ ภาพที่ 4.4 (c) อนุภาคสารตัวเติมมีการเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนเล็ก ปานกลางและใหญ่ สลับกันไป มีลักษณะการกระจายตัวและระยะห่างของการกระจายตัวอยู่ในระยะห่างกันและไม่เป็นระเบียบ ซึ่งเป็นลักษณะการกระจายตัวไม่ดีเนื่องจากสารแมกนีเซียมคาร์บอเนต เป็นสารตัวเติมที่เสริมแรงที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ มีความเป็นขี้ผึ้งน้อยกว่าสารซิลิกา ส่งผลให้การบดผสมระหว่างยางและสารตัวเติมเข้ากันได้ไม่ดีเนื่องจาก ENR50 มีขี้ผึ้งสูง และ ภาพที่ 4.4 (d) ลักษณะของอนุภาคสารตัวเติมมีการฝังตัวแบบตื้นๆ ในยางคอมพาวด์ เนื่องจาก STR5L ไม่มีขี้ผึ้ง และความเป็นขี้ผึ้งที่แตกต่างกันเป็นเหตุให้เกิดการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้การยึดเกาะกันระหว่างอนุภาคของสารตัวเติมผสมกับเนื้อยางอยู่ในลักษณะที่ไม่ดี และลักษณะการยึดเกาะที่ไม่ดีจะส่งผลให้สมบัติเชิงกลที่ลดลง ภาพที่ 4.4 (a), (b), (c) และ (d) มีผิวหน้าที่มีลักษณะแตกเป็นร่างแห ที่มีลักษณะคล้ายกันแสดงว่าความต่อเนื่องระหว่างเฟสยางกับสารตัวเติมมีน้อย ทำให้การส่งถ่ายแรงจากเฟสยางไปสู่สารตัวเติมลดลง ส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลง

ภาพที่ 4.4 (e) มีลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคสารตัวเติมผสมระหว่างซิลิกากับแมกนีเซียมคาร์บอเนตที่สม่ำเสมอและกระจายตัวได้ดี ลักษณะผิวหน้าเรียบ จะส่งผลถึงความต่อเนื่องระหว่างเฟสยางกับสารตัวเติมผสม จะมีความต่อเนื่องเพิ่มขึ้น ประกอบกับสารคู่ควบไซเลนที่เติมลงไป ในสูตรยางคอมพาวด์นี้ จะช่วยปรับปรุงพันธะระหว่างยางและสารตัวเติมผสม ทำให้เนื้อยางมีความต่อเนื่องมากขึ้น การส่งถ่ายแรงจากเฟสยางไปสู่สารตัวเติมผสมดีขึ้นทำให้สมบัติเชิงกลดีขึ้น [61] และยังพบว่าบริเวณพื้นผิวไม่เกิดลักษณะเป็นรอยหลุมที่เกิดจากการหลุดของอนุภาค แสดงว่าการยึดเกาะกันระหว่างอนุภาคของสารตัวเติมผสมกับเนื้อยางอยู่ในลักษณะที่ดีเช่นกัน นอกจากนี้การเกาะตัวกันระหว่างอนุภาคของสารตัวเติมผสมจะทำให้ระยะการสัมผัสกันระหว่างอนุภาคชิดกันมากขึ้นส่งผลให้การเกาะกลุ่มกันของอนุภาคมีการเกาะกลุ่มกันดีและกระจายตัวได้เพิ่มขึ้น และจากการชิดกันระหว่างอนุภาคส่งผลให้เกิดการเกาะตัวเป็นร่างแหและเกิดผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคได้ดี ลักษณะเช่นนี้จะส่งผลทำให้ค่าสมบัติเชิงกลสูงขึ้น [61] ภาพที่ 4.4 (f) ซึ่งมีลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคสารตัวเติมผสม ไม่สม่ำเสมอ และยังพบว่าบริเวณพื้นผิวเกิดลักษณะเป็นรอยหลุมที่เกิดจากการหลุดของอนุภาคในระดับเล็กปานกลาง แสดงว่าการยึดเกาะกันระหว่างอนุภาคของสารตัวเติมผสมกับเนื้อยาง

อยู่ในลักษณะที่ไม่ดี อันเนื่องมาจากความไม่มีขีดของยางธรรมชาติ STR5L ทำให้การกระจายตัวของสารเคมีไม่ดี จะส่งผลให้สมบัติเชิงกลของยางวัลคาไนซ์ลดลง[61]



ภาพที่ 4.4 สัณฐานวิทยาของยางวัลคาไนซ์ ENR50 และ STR5L กับสารตัวเติมและสารตัวเติมผสม (a) SiO_2/ENR , (b) SiO_2/STR , (c) MgCO_3/ENR , (d) MgCO_3/STR , (e) $\text{SiO}_2/\text{MgCO}_3/\text{ENR}$, และ (f) $\text{SiO}_2/\text{MgCO}_3/\text{STR}$,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลยางผสมระหว่าง ENR50/STR5L ที่มีผลต่อสมบัติกายภาพของยางคอมปาวด์สายพานลำเลียงอาหาร

4.2.1 ลักษณะการวัลคาไนซ์

ได้ทำการศึกษาผลของยางผสมระหว่าง ENR50/STR5L ในอัตราส่วน 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 และ 0:100 กับสารตัวเติมผสมระหว่างสารซัลฟิคาบกับแมกนีเซียมคาร์บอเนตที่ปริมาณรวม 80 ส่วน ที่มีผลต่อลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางคอมปาวด์ จากตารางที่ 4.4 แสดงผลการทดลองเกี่ยวกับเกี่ยวกับลักษณะการวัลคาไนซ์ จะเห็นได้ว่าลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางคอมปาวด์ของยาง ENR50 และ STR5L ในสารตัวเติมผสมซัลฟิคาบกับแมกนีเซียมคาร์บอเนตตามอัตราส่วน 100:0 และ 0:100 พบว่า ยาง ENR50 มีค่า torque difference และระยะเวลาวัลคาไนซ์ที่ต่ำกว่า และระยะเวลาที่ยางเริ่มวัลคาไนซ์ที่สูงกว่า STR5L และเมื่อพิจารณาถึงลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางคอมปาวด์ตามอัตราส่วนระหว่าง ENR50 :STR5L ที่ 75:25, 50:50 และ 25:75 พบว่าค่า torque difference และระยะเวลาวัลคาไนซ์ มีแนวโน้มสูงขึ้นและระยะเวลาที่ยางเริ่มวัลคาไนซ์มีแนวโน้มลดลงตามอัตราส่วนที่ลดลงของยาง ENR50 เนื่องจากยางชนิด ENR50 เป็นยางที่มีขี้ผึ้ง ซึ่งจะสามารถช่วยเพิ่มการกระจายตัวของซัลฟิคาและแมกนีเซียมคาร์บอเนตระหว่างการผสมระหว่างยางกับสารเคมีให้ดีขึ้นได้ เพราะจากความเป็นขี้ผึ้งของยางทำให้เกิดแรงกระทำระหว่างยางกับสารเคมีมากขึ้น ดังนั้นจึงทำให้การผสมเข้ากันได้ดีกว่า STR5L[30] และมีการใส่สารควบคู่ไซเลนในสูตรยางคอมปาวด์ซึ่งมีผลทำให้พื้นผิวซัลฟิคาที่มีสภาพขี้ผึ้งลดลง (มีการแตกออกของสารเชื่อมขวางโดยเฉพาะการเชื่อมขวางที่เป็น polysulphide) หรือมีความเป็น hydrophobic มากขึ้น[59] จึงสามารถเข้ากับยางได้ดีกว่าและลดปัญหาการดูดซับสารตัวเร่งของซัลฟิคา ซึ่งจะทำให้ยาง ENR50 มีระยะเวลาวัลคาไนซ์ที่มากกว่า และมีระยะเวลาวัลคาไนซ์ที่น้อยกว่ายาง STR5L จะส่งผลให้การวัลคาไนซ์ของยางคอมปาวด์เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 4.4 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางผสมระหว่าง ENR50/STR5L กับสารตัวเติมผสม

Sample	M_L (lb.in)	M_H (lb.in)	M_H-M_L (lb.in)	t_{s1} (min)	t_{c90} (min)
E100: S0	2.44	11.92	9.48	3.20	7.48
E75: S25	2.45	11.98	9.53	3.22	7.48
E50: S50	2.88	12.59	9.71	3.04	8.00
E25: S75	2.44	12.20	9.76	2.36	8.26
E0: S100	2.02	12.18	10.16	2.52	8.48

4.2.2 สมบัติไดอิเล็กตริก

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดลองเกี่ยวกับสมบัติไดอิเล็กตริก พบว่าค่า ϵ' , ϵ'' , และค่า $\tan \delta$ ของยางวัลคาไนซ์ ENR50 ที่ 100% มีค่าสูงที่สุด เนื่องจาก ENR50 เป็นยางธรรมชาติที่ได้จากการเติมออกซิเจนเข้าไปในโมเลกุลของยางตรงบริเวณพันธะคู่เกิดเป็นวงแหวนอีพอกไซด์โดยผ่านเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันโดยมีระดับของการเกิดอีพอกซิเดชันตั้งแต่ 10-50 ดังนั้นยาง ENR50 ที่ได้จึงมีความเป็นขั้วสูงกว่า STR5L[126] และ ENR50 มีโครงสร้างโมเลกุลแบบมีขั้วซึ่งทำให้การบดผสมกับสารตัวเติมประเภทมีขั้วคือสารซิลิกาและแมกนีเซียมคาร์บอเนตเข้ากันได้ง่ายขึ้นเพราะจากความเป็นขั้วของยางทำให้เกิดแรงกระทำระหว่างยางกับสารเคมีมากขึ้น[30] จึงทำให้อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างยางกับสารตัวเติมผสมมีค่าค่อนข้างสูง และเมื่อพิจารณาค่า $\tan \delta$ ของยางวัลคาไนซ์จะมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนของ ENR50 ลดลงเนื่องจากความเป็นขั้วที่แตกต่างกันของ ENR50 และ STR5L ยังเป็นสาเหตุให้เกิดการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอของสารวัลคาไนซ์ในวัฏภาคของยางทั้งสองชนิด ทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยงมากเกินไปในวัฏภาคหนึ่งและอาจจะน้อยเกินไปในอีกวัฏภาคหนึ่ง[46] และพบว่าอัตราส่วนการผสม มีอิทธิพลต่อสมบัติไดอิเล็กตริก นอกจากนี้ยังอาจเกิดการกระจายตัวที่ไม่เท่ากันของสารตัวเติมผสมในวัฏภาคของ ENR50 และ STR5L เนื่องจากสารตัวเติมทั้งสองชนิดมีขนาดอนุภาคที่ต่างกัน

ตารางที่ 4.5 สมบัติไดอิเล็กตริกของยางวัลคาไนซ์ผสมระหว่าง ENR50/STR5L กับสารตัวเติมผสม

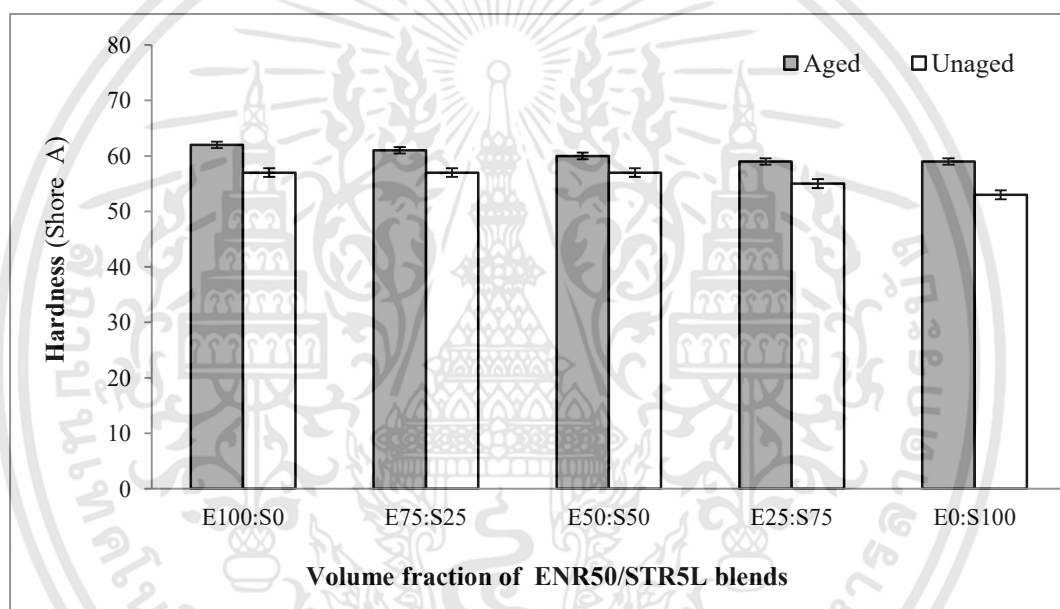
Mix symbol	Relative dielectric constant (ϵ_r')	Relative loss factor (ϵ_r'') ($\times 10^{-3}$)	Loss tangent coefficient ($\tan \delta$) ($\times 10^{-3}$)
E100: S0	2.555	0.0169	0.006617
E75: S25	2.548	0.0158	0.006187
E50: S50	2.417	0.0149	0.006177
E25: S75	2.436	0.0138	0.005677
E0: S100	2.427	0.0139	0.005717

4.2.3 สมบัติความแข็ง

ภาพที่ 4.5 แสดงผลการทดลองเกี่ยวกับสมบัติความแข็ง จากการทดลองพบว่ายาง ENR50 จะมีค่าความแข็งสูงกว่ายาง STR5L ทั้งก่อนและหลังการบ่มแรงด้วยความร้อน และ ENR50 ที่ 100% ในสภาวะหลังการบ่มแรงด้วยอากาศร้อนจะมีสมบัติความแข็งที่สูง และ ENR50/STR5L ผสม ที่ 25-75% มีแนวโน้มที่ลดลง เนื่องด้วยยาง ENR50 เป็นยางที่ได้จากการเติมออกซิเจนไปในโมเลกุลของยาง ตรงบริเวณพันธะคู่เกิดเป็นวงแหวนอีพอกไซด์ โดยผ่านปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน (epoxidation) โดยมีระดับของการเกิดอีพอกซิเดชันร้อยละ 50 จึงมีความเป็นขั้วสูงกว่ายางธรรมชาติทั่วไป ทำให้ทนต่อความร้อนได้ดีกว่ายาง STR5L[126] แต่ในสภาวะก่อนการบ่มแรงด้วยอากาศร้อนของ ENR50/STR5L ผสม ที่ ENR50 ที่ 50-75% จะมีค่าความแข็งคงที่และมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยที่ 25% ดังนั้นสมบัติความแข็งในสภาวะก่อนและหลังการบ่มแรงด้วยอากาศร้อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อปริมาณ ENR50 เพิ่มขึ้น จะเห็นได้ว่าการเพิ่มอัตราส่วนยาง ENR50 จะนำไปสู่การเพิ่มความแข็งตึง (stiffness) เป็นผลให้การเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ลดลง[31] ส่งผลให้ค่าความแข็งสูงขึ้น นอกจากนี้จากผลการทดลองยังพบว่าสมบัติค่าความแข็ง หลังการบ่มแรงจะมีค่าสูงกว่าก่อนการบ่มแรงด้วยความร้อนทุกอัตราส่วน ซึ่งอาจเป็นผลสืบเนื่องมาจากการบ่มแรงด้วยความร้อนเป็นสภาวะ

ที่ทำให้เกิดการเชื่อมขวาง (crosslink) ที่ดีของซัลเฟอร์กับคาร์บอน ซึ่งได้มาจากการออกซิเดชันของซัลไฟด์[32,125] นอกจากนี้การทดลองได้เลือกใช้ระบบการเชื่อมโยงโมเลกุลหรือระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ (semi-efficient vulcanization : semi-EV) จะทำให้ยางคอมปาวด์มีความปลอดภัยต่อกระบวนการผลิตสูงกว่า มีความทนทานต่อการเสื่อมได้ดีกว่าเมื่อได้รับการคงรูปนานเกินไป (ทนทานต่อความร้อนได้ดีกว่า) อย่างไรก็ตามยางคงรูปที่ได้ก็มีความยืดหยุ่นต่ำกว่า[58] ก็ จะส่งผลให้ยางมีสมบัติความแข็ง เพิ่มขึ้นหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน

การทดสอบสมมติฐานของตัวแบบทางสถิติพบว่าค่า P-Value มีค่าเท่ากับ 0.001 ซึ่งน้อยกว่าค่าระดับนัยสำคัญ (α) จึงสามารถสรุปได้ว่าไม่ยอมรับสมมติฐานหลัก คือ ค่าเฉลี่ยของสมบัติความแข็งของยางคอมปาวด์วัลคาไนซ์ทุกอัตราส่วนผสมระหว่าง ENR50/STR5L กับสารตัวเติมผสมก่อนและหลังการอบเร่งด้วยความร้อนมีความแตกต่างที่ระดับนัยสำคัญ 0.05



ภาพที่ 4.5 สมบัติความแข็งก่อนและหลังการอบเร่งด้วยความร้อนของยางวัลคาไนซ์ผสมระหว่าง ENR50/STR5L กับสารตัวเติมผสม

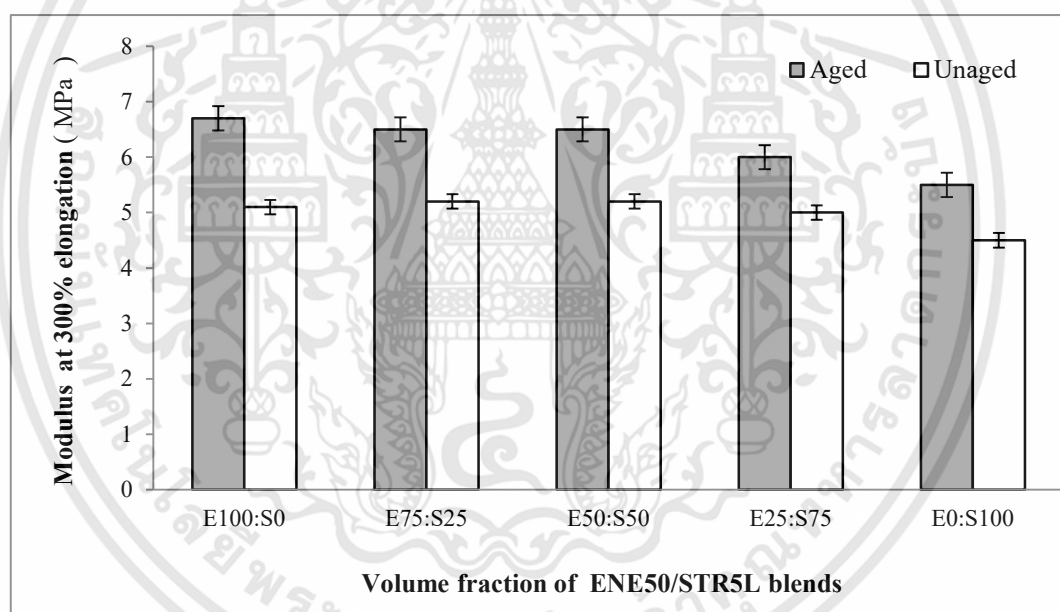
4.2.4 สมบัติความเค้นแรงดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 300

ภาพที่ 4.6 แสดงผลการทดลองเกี่ยวกับสมบัติความเค้นแรงดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 300 ซึ่งพบว่า ENR50 และ ENR50/STR5L ผสม ในสภาวะหลังการบ่มเร่งจะมีสมบัติความเค้นแรงดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 300 ที่สูงกว่าสภาวะก่อนการบ่มเร่งด้วยความร้อนในทุกอัตราส่วนซึ่งอาจเป็นผลสืบเนื่องมาจากการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่เป็นสภาวะที่ทำให้เกิดการเชื่อมขวางที่ดีของซัลเฟอร์กับคาร์บอน ซึ่งได้มาจากการออกซิเดชันของซัลไฟด์[32,125] และในสภาวะก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนของยาง ENR50/STR5L ผสม โดย ENR50 ที่ 50-75% มีสมบัติความเค้นแรงดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 300 ที่คงที่ และมีแนวโน้มลดลงที่ 25% ดังนั้นสมบัติความแข็งในสภาวะก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยอากาศร้อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อปริมาณ ENR50 เพิ่มขึ้นซึ่งการทดลองครั้งนี้ได้ใช้สารตัวเชื่อม (coupling agent) คือสารคู่ควบไซเลน (silane coupling agent) และสารกระตุ้นสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเติม (filler activators) คือสาร PEG 4000 ลงไปในยางคอมปาวด์ซึ่งก็จะช่วยลดอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคของซิลิกา ทำให้โครงสร้างทุติยภูมิของซิลิกาถูกทำลายได้ง่ายขึ้นในระหว่างกระบวนการผสมนั้น จึงทำให้ซิลิกาแตกตัวและกระจายในยางได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้ยางคอมปาวด์มีความเหนียวลดลงและทำให้กระบวนการผลิตเป็นไปได้ง่ายขึ้นและสารเคมีเหล่านี้ยังช่วยลดการดูดซับสารตัวเร่งปฏิกิริยาหรือสารกระตุ้นปฏิกิริยาของรูปโดยเฉพาะสารประกอบเชิงซ้อนของสังกะสี (Zn complex) บนพื้นผิวของซิลิกา จึงทำให้ปฏิกิริยาของรูปเกิดขึ้นได้เร็ว จะทำให้เกิดการกีดขวางการเคลื่อนที่ของโซโมเลกุลยาง ดังนั้นความยืดหยุ่นของยางก็จะน้อยลง[58] ก็จะทำให้ยางมีความแข็งเพิ่มขึ้นหลังการบ่มเร่งด้วยอากาศร้อน จะส่งผลทำให้ยางวัลคาไนซ์มีสมบัติความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 300 เพิ่มขึ้นอีกด้วย

การทดสอบสมมติฐานของตัวแบบทางสถิติพบว่าค่า P-Value มีค่าเท่ากับ 0.001 ซึ่งน้อยกว่าค่าระดับนัยสำคัญ (α) จึงสามารถสรุปได้ว่าไม่ยอมรับสมมติฐานหลักคือ ค่าเฉลี่ยของสมบัติความเค้นแรงดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 300 ของยางคอมปาวด์วัลคาไนซ์ทุกอัตราส่วนผสมระหว่าง ENR50/STR5L กับสารตัวเติมผสมก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนมีความแตกต่างที่ระดับนัยสำคัญ 0.05



ภาพที่ 4.6 สมบัติความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 300 ก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนของยางวัลคาไนซ์ผสมระหว่าง ENR50/STR5L กับสารตัวเติมผสม

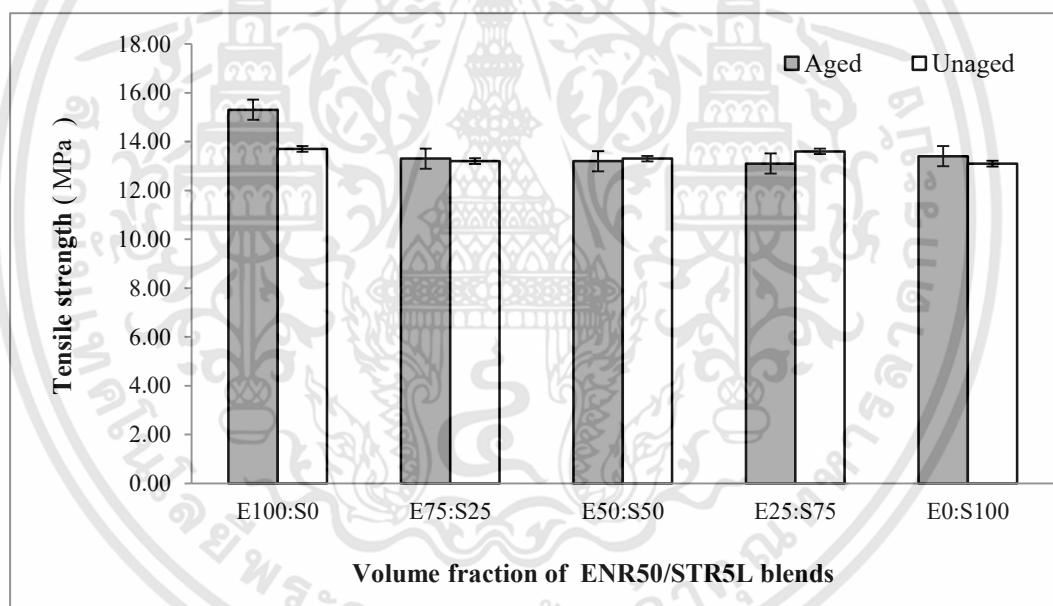
4.2.5 สมบัติการต้านทานแรงดึง

ภาพที่ 4.7 แสดงผลการทดลองเกี่ยวกับสมบัติการต้านทานแรงดึงในสภาวะหลังการบ่มเร่งด้วยอากาศร้อน พบว่า ENR50 ที่ 100% จะมีสมบัติต้านทานแรงดึงที่สูง เนื่องจากเมื่อยาง ENR50 ได้รับความร้อนจะทำให้ห่วงแหวนอีพอกไซด์เปิดออก ซึ่งสามารถทำให้เกิดการเชื่อมขวางโมเลกุลของยาง ENR50 ด้วยพันธะอีเทอร์และไซคลิกอีเทอร์ จะทำให้ปริมาณการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลสูงขึ้น [127] จะส่งผลให้สมบัติการต้านทานแรงดึงสูงขึ้นตามไปด้วย และ ENR50/STR5L ผสมที่ 75-25% สมบัติต้านทานแรงดึงจะมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อปริมาณ ENR50 ลดลง เนื่องจาก ENR50 สามารถเกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

strain crystallization ได้[28] ดังนั้นจึงทำให้ยาง ENR50 มีสมบัติการต้านแรงดึงสูงกว่ายาง STR5L สำหรับในสภาวะก่อนการบ่มเร่งด้วยอากาศร้อน ENR50/SR5L ผสมที่ 25-75% มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อปริมาณ ENR50 ลดลงหรือ STR5L เพิ่มขึ้นเนื่องจากในสภาวะที่ไม่มีปัจจัยการบ่มเร่งด้วยความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้องนั้น ยาง STR5L มีโครงสร้างโมเลกุลที่สม่ำเสมอทำให้สามารถเกิดผลึกได้เมื่อมีแรงยืด[31] ดังนั้นจึงทำให้ยาง STR5L มีสมบัติการต้านแรงดึงสูงตามอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น

การทดสอบสมมติฐานของตัวแบบทางสถิติพบว่าค่า P-Value มีค่าเท่ากับ 0.221 ซึ่งมากกว่าค่าระดับนัยสำคัญ (α) จึงสามารถสรุปได้ว่ายอมรับสมมติฐานหลักคือ ค่าเฉลี่ยของสมบัติการต้านทานแรงดึง ของยางคอมปาวด์วัลคาไนซ์ผสมระหว่าง ENR50/STR5L ในอัตราส่วน 75:25, 50:50, 25:75 และ 0:100 กับสารตัวเติมผสมก่อนและหลังการอบเร่งด้วยความร้อนไม่มีความแตกต่างที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 สำหรับที่อัตราส่วน 100:0 พบว่าค่า P-Value มีค่าเท่ากับ 0.047 ซึ่งน้อยกว่าค่าระดับนัยสำคัญ (α) จึงสามารถสรุปได้ว่าไม่ยอมรับสมมติฐานหลัก แสดงว่าค่าเฉลี่ยของสมบัติการต้านทานแรงดึงของยางคอมปาวด์ก่อนและหลังการอบเร่งด้วยความร้อนมีความแตกต่างที่ระดับนัยสำคัญ 0.05



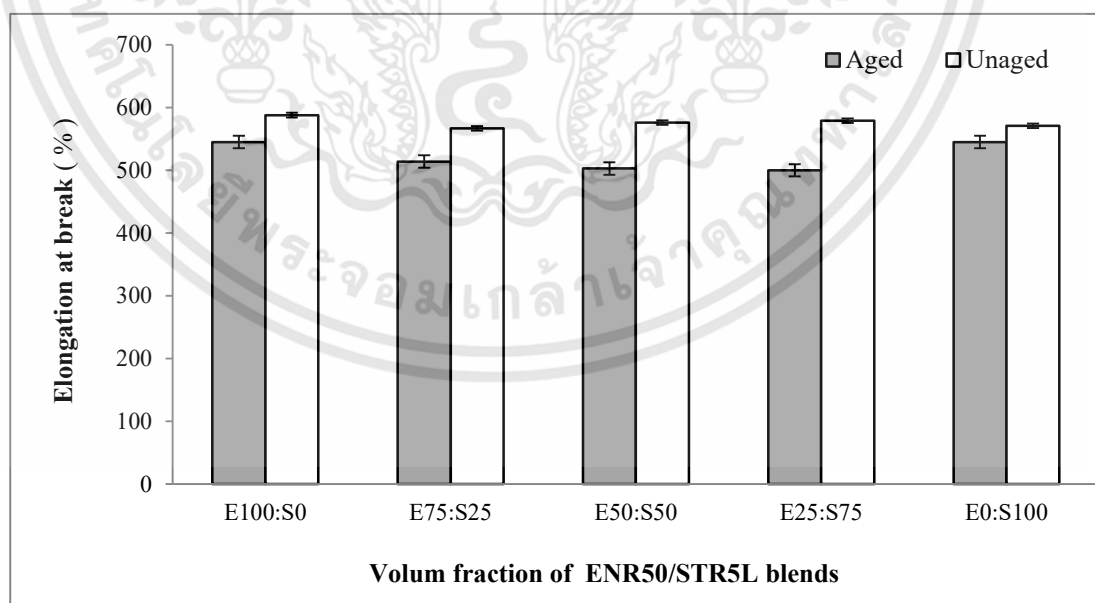
ภาพที่ 4.7 สมบัติความต้านทานแรงดึงก่อนและหลังการอบเร่งด้วยความร้อนของยางวัลคาไนซ์ผสมระหว่าง ENR50/STR5L กับสารตัวเติมผสม

4.2.6 สมบัติความทนต่อแรงยืดจนขาด

ภาพที่ 4.8 แสดงผลการทดลองเกี่ยวกับสมบัติความทนต่อแรงยืดจนขาดในสภาวะก่อนการบ่มเร่งด้วยอากาศร้อน พบว่า ENR50 ที่ 100% จะมีสมบัติความทนต่อแรงยืดจนขาดที่สูงกว่าสภาวะหลังการบ่มเร่งด้วยอากาศร้อน เนื่องจากยาง ENR50 มีออกซิเจนอยู่ในโครงสร้างโมเลกุล จึงทำให้ยางมีความเป็นขี้วมาก ซึ่งจะส่งผลให้พันธะคู่ในโครงสร้างโมเลกุลมีปริมาณลดน้อยลง และมีกลุ่มของอีพอกไซด์เกิดขึ้นแทนพันธะคู่ ทำให้โมเลกุลของยางเคลื่อนที่ได้ยากขึ้น[31] ENR50 มีค่าความหนืดสูงกว่า STR5L ซึ่งความหนืดสูงจะทำให้สารตัวเติมแตกตัวได้ดีเนื่องจากมีค่าแรงเฉือนที่เกิดขึ้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เข้าไปทำลายโครงสร้างทุติยภูมิในระหว่างกระบวนการบดผสมยางกับสารตัวเติม[118] ทำให้สารตัวเติมเข้ากับยางและการกระจายตัวของสารเคมีในยางได้ดี และสารตัวเติมสามารถเสริมแรงในยางได้ดี เพราะ มีขนาดของอนุภาคปฐมภูมิเล็กและมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง เมื่อเติมลงไป ENR50 จะทำให้มีความทนทานต่อแรงยืดจนขาดสูงขึ้น และ ENR50/STR5L ผสมที่ 25-75% สมบัติความทนต่อแรงยืดจนขาดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ ENR50 ลดลงหรือ STR5L เพิ่มขึ้น เนื่องจาก STR5L มีโครงสร้างโมเลกุลที่สามารถเกิดผลึกได้เมื่อมีแรงยืด ดังนั้นสมบัติความทนต่อแรงยืดจนขาดมีค่าสูงตามอัตราส่วนที่ STR5L เพิ่มขึ้น และในสภาวะหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน ENR50 และ STR5L ที่ 100% จะมีค่าเท่ากัน และเมื่อ ENR50/STR5L ผสมมีปริมาณ ENR50 ลดลง จาก 75 ถึง 25% จะทำให้สมบัติความทนต่อแรงยืดจนขาดลดลงด้วยเนื่องจากในขณะที่บ่มเร่งด้วยความร้อน ทำให้เกิดการสลายพันธะของพันธะเชื่อมโยงของยางเบลนด์ที่เกิดขึ้นในการเชื่อมโยงใหม่ของโมเลกุลยาง และการตัดโซ่โมเลกุลยางอาจจะเกิดขึ้นได้ การสลายพันธะของพันธะเชื่อมโยงในยางเบลนด์ เนื่องจากความร้อนยังทำให้ความยืดหยุ่นของยางผสมลดลงอีกด้วย[128] แสดงว่าหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน ยางเบลนด์มีความแข็งแรงสูงขึ้นที่เป็นเช่นนี้คาดว่าเกิดจากปฏิกิริยาการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุล (intermolecular reaction) และหรือปฏิกิริยาการเชื่อมโยงภายในสายโซ่โมเลกุล (intermolecular reaction) ที่เพิ่มขึ้นในยาง STR5L เพราะระหว่างการบ่มเร่งในสภาวะที่มีออกซิเจน ยางจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation reaction) ซึ่งก่อให้เกิดการเสื่อมสภาพ (degradation)[129]

การทดสอบสมมติฐานของตัวแบบทางสถิติพบว่าค่า P-Value มีค่าเท่ากับ 0.001 ซึ่งน้อยกว่าค่าระดับนัยสำคัญ (α) จึงสามารถสรุปได้ว่าไม่ยอมรับสมมติฐานหลักคือ ค่าเฉลี่ยของสมบัติความทนต่อแรงยืดจนขาด ของยางคอมปาวด์วัลคาไนซ์ทุกอัตราส่วนผสมระหว่าง ENR50/STR5L กับสารตัวเติมผสมก่อนและหลังการอบเร่งด้วยความร้อนมีความแตกต่างที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

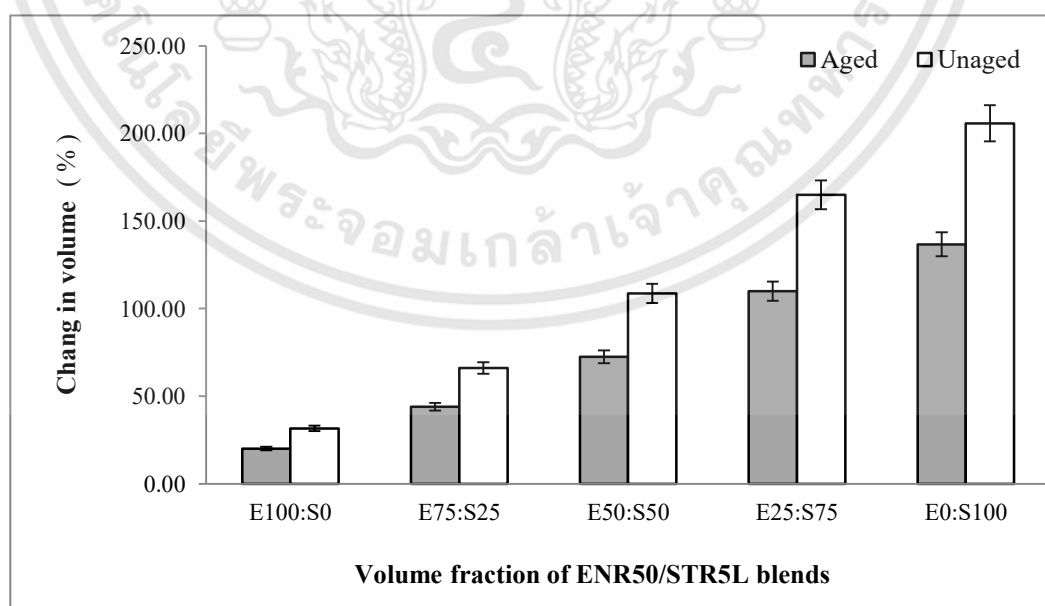


ภาพที่ 4.8 สมบัติความทนต่อแรงยืดจนขาดก่อนและหลังการอบเร่งด้วยความร้อนของยางวัลคาไนซ์ผสมระหว่าง ENR50/STR5L กับสารตัวเติมผสม

4.2.7 ลักษณะการบวมพองในน้ำมัน

ภาพที่ 4.9 แสดงผลการทดลองเกี่ยวกับลักษณะการบวมพองในน้ำมัน พบว่าสูตรยางคอมปาวด์ที่มียางธรรมชาติ STR5L เพียงชนิดเดียว เมื่อทำการทดสอบลักษณะการบวมพองในน้ำมัน โดยใช้น้ำมัน IRM 903 ที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง พบว่ามีการบวมพองในน้ำมันคิดเป็นร้อยละการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรมีค่าสูงถึงร้อยละ 205.80 ในขณะที่สูตรยางคอมปาวด์ที่มียาง ENR50 เพียงชนิดเดียวมีค่าร้อยละ 31.60 แต่เมื่อมีการผสมระหว่างยาง ENR50 :STR5L ที่อัตราส่วน 25:75, 50:50, และ 75:25 phr ซึ่งการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเนื่องจากการบวมพองในน้ำมันก็ลดลงตามสัดส่วนของยาง ENR50 ที่เพิ่มขึ้นหรือตามสัดส่วนยางธรรมชาติ STR5L ที่ลดลงเป็นร้อยละ 165, 108.70 และ 66.10 ตามลำดับ พบว่าลักษณะเด่นของยาง ENR50 คือ มีความเป็นขี้ผึ้งสูงกว่ายางธรรมชาติทั่วไป ทำให้ทนต่อความร้อน และสมบัติความต้านทานการพองตัวในน้ำมันได้ดี [125] ซึ่งเกี่ยวเนื่องมาจากยาง ENR50 มีออกซิเจนอยู่ในโครงสร้างโมเลกุล ทำให้ยางมีความเป็นขี้ผึ้งมากขึ้น จะส่งผลให้สามารถทนต่อความร้อนและตัวทำละลายที่ไม่มีขี้ผึ้งได้ดี เพราะพันธะคู่ในโครงสร้างยางธรรมชาติมีปริมาณลดน้อยลงและมีกลุ่มของอีพอกไซด์ที่เกิดขึ้นแทนที่พันธะคู่ ทำให้โมเลกุลของยางเคลื่อนที่ได้ยากมากขึ้น [30] ประกอบกับสารตัวเติมผสมระหว่างซิลิกากับแมกนีเซียมคาร์บอเนต ต่างก็มีสมบัติลดการบวมพองในน้ำมัน ซึ่งในการทดลองนี้ได้ใช้สารไซเลนทำหน้าที่เป็น coupling agent ช่วยให้การยึดกันระหว่างสารตัวเติมกับยางได้ดีขึ้น ดังนั้นจะช่วยให้ยางผสมมีความต้านทานต่อการบวมพองในน้ำมันดีขึ้น

การทดสอบสมมติฐานของตัวแบบทางสถิติพบว่าค่า P-Value มีค่าเท่ากับ 0.001 ซึ่งน้อยกว่าค่าระดับนัยสำคัญ (α) จึงสามารถสรุปได้ว่าไม่ยอมรับสมมติฐานหลักคือ ค่าเฉลี่ยของการบวมพองในน้ำมัน ของยางคอมปาวด์วัลคาไนซ์ทุกอัตราส่วนผสมระหว่าง ENR50/STR5L กับสารตัวเติมผสมก่อนและหลังการอบเร่งด้วยความร้อนมีความแตกต่างที่ระดับนัยสำคัญ 0.05



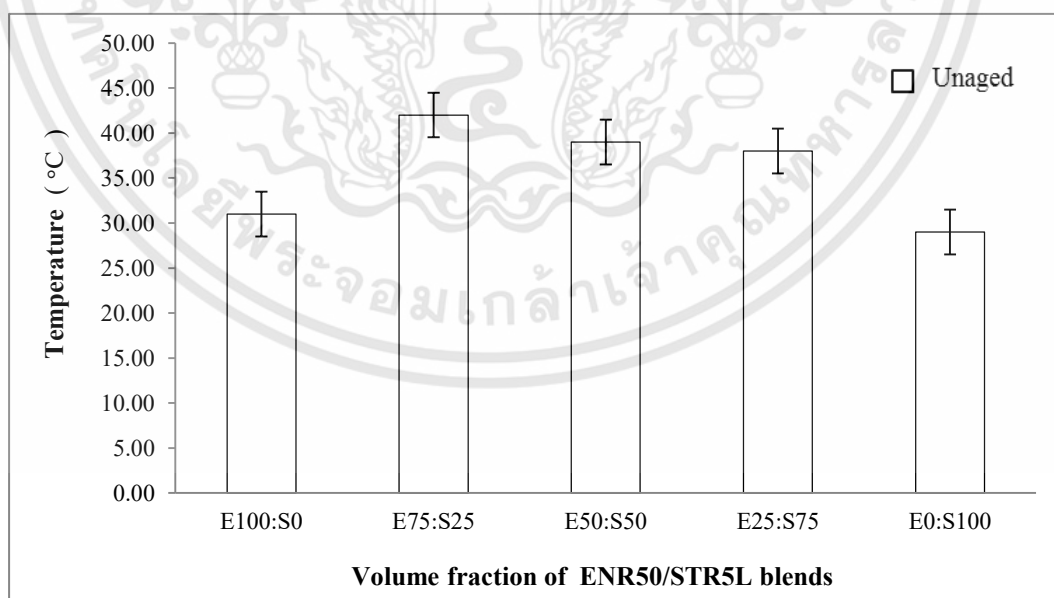
ภาพที่ 4.9 สมบัติการทนน้ำมันก่อนและหลังการอบเร่งด้วยความร้อนของยางวัลคาไนซ์ผสมระหว่าง ENR50/STR5L กับสารตัวเติมผสม คิดเป็นร้อยละของปริมาณที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อแช่ตัวอย่างในน้ำมัน IRM 903 ที่อุณหภูมิ 100°C นาน 24 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่โดยไม่หวังผลตอบแทนใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.8 สมบัติความร้อนสะสมในยาง

ภาพที่ 4.10 แสดงผลการทดลองเกี่ยวกับความร้อนสะสมในยาง ของยาง ENR50 และ STR5L ในสารตัวเติมผสมระหว่างซิลิกากับแมกนีเซียมคาร์บอเนต พบว่ายางวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติ STR5L มีสมบัติความร้อนสะสมต่ำกว่ายาง ENR50 ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบคือ 29 และ 31 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เมื่อได้ทำการแปรปริมาณอัตราส่วนยางผสม ENR50 กับ STR5L ที่อัตราส่วน 75:25, 50:50 และ 25:75 ตามลำดับ พบว่าเมื่อปริมาณอัตราส่วนผสมยาง ENR50 ลดลงและยางธรรมชาติ STR5L เพิ่มขึ้นทำให้คุณสมบัติค่าความร้อนสะสมในยางมีแนวโน้มที่จะค่อยๆ ลดลง คือ 42, 39 และ 38 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เนื่องจากยาง ENR50 มีออกซิเจนอยู่ในโครงสร้างโมเลกุล จึงทำให้ยางมีความเป็นขี้วมาก ซึ่งจะส่งผลให้พันธะคู่ในโครงสร้างโมเลกุลมีปริมาณลดน้อยลง และมีกลุ่มของอีพอกไซด์เกิดขึ้นแทนพันธะคู่ ทำให้โมเลกุลของยางเคลื่อนที่ได้ยากขึ้น[31] จึงส่งผลให้สมบัติด้านการสะสมความร้อนในยาง ENR50 สูงกว่ายางธรรมชาติ STR5L ในการทดลองนี้ได้ใช้กำมะถันเป็นสารวัลคาไนซ์ และสารตัวเร่งปฏิกิริยากลุ่มซัลฟิनाไมด์กับกลุ่มไทอาโซล จะส่งผลให้ยาง ENR50 ที่เชื่อมโยงโมเลกุลด้วยกำมะถัน มีความต้านทานต่อความร้อนไม่ดี ยางจะมีความแข็งเพิ่มขึ้นเนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลยางตรงตำแหน่งที่มีออกซิเจนมารวมตัวกันเป็นวงแหวนไม่แข็งแรง วงแหวนจะเปิดออกและเกิดการเชื่อมโยงเกิดขึ้น[30]

การทดสอบสมมติฐานของตัวแบบทางสถิติวิธี LSD (Fisher's Least-Significant Different) ของสมบัติความร้อนสะสมในยางก่อนการอบเร่งด้วยความร้อนของยางวัลคาไนซ์ผสมระหว่าง ENR50/STR5L กับสารตัวเติมผสม ซึ่งพบว่าสามารถเปรียบเทียบรายคู่ที่มีความแปรปรวนเท่ากันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ได้จำนวน 3 กลุ่มคือ A (75:25 กับ 50:50), B (50:50 กับ 25:75) และ C (100:0 กับ 0:100)

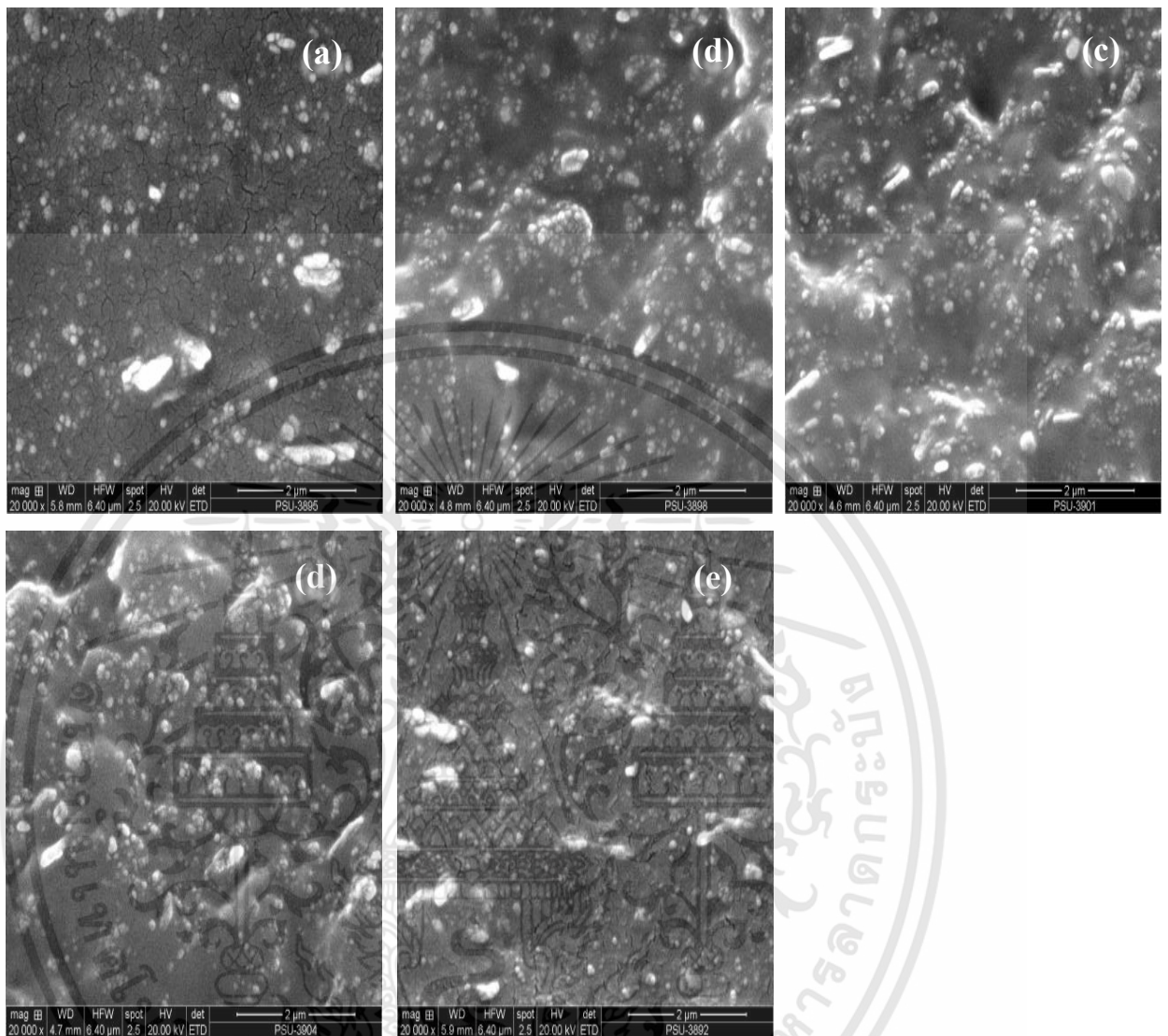


ภาพที่ 4.10 สมบัติความร้อนสะสมก่อนการอบเร่งด้วยความร้อนของยางวัลคาไนซ์ผสมระหว่าง ENR50/STR5L กับสารตัวเติมผสม

4.2.9 ลักษณะสัณฐานวิทยา

ภาพที่ 4.11 (a)-(e) แสดงภาพถ่ายบริเวณพื้นที่หน้าตัดของยางวัลคาไนซ์ที่นำไปหักในไนโตรเจนเหลวด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) ด้วยกำลังขยาย 2,000 เท่า โดยภาพที่ 4.11 (a) และ (e) เป็นยางวัลคาไนซ์ของยาง ENR50 และ STR5L เพียงชนิดเดียว และภาพที่ 4.11 (b), (c) และ (d) เป็นยางวัลคาไนซ์ของยางผสมระหว่าง ENR50 :STR5L ที่ 75:25, 50:50 และ 25:75 phr ตามลำดับ ที่ใช้สารตัวเติมผสมซิลิกา กับแมกนีเซียมคาร์บอเนต จากการศึกษาพบว่า ภาพที่ 4.11 (a) ยาง ENR50 เพียงอย่างเดียว มีลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคสารตัวเติมผสมระหว่างซิลิกา กับแมกนีเซียมคาร์บอเนตที่สม่ำเสมอและกระจายตัวได้ดี ลักษณะผิวหน้าเรียบ จะส่งผลถึงความต่อเนื่องระหว่างเฟสยางกับสารตัวเติมผสม จะมีความต่อเนื่องเพิ่มขึ้น ประกอบกับสารค้ำเคลือบที่เติมลงไป ในสูตรยางคอมปาวด์นี้ จะช่วยปรับปรุงพันธะระหว่างยางและสารตัวเติมผสม ทำให้เนื้อยางมีความต่อเนื่องมากขึ้น การส่งถ่ายแรงจากเฟสยางไปสู่สารตัวเติมผสมดีขึ้นทำให้สมบัติเชิงกลดีขึ้น[61] และยังพบว่าบริเวณพื้นผิวไม่เกิดลักษณะเป็นรอยหลุมที่เกิดจากการหลุดของอนุภาค แสดงว่าการยึดเกาะกันระหว่างอนุภาคของสารตัวเติมผสมกับเนื้อยางอยู่ในลักษณะที่ดีเช่นกัน นอกจากนี้การเกาะตัวกันระหว่างอนุภาคของสารตัวเติมผสมจะทำให้ระยะการสัมผัสกันระหว่างอนุภาคชิดกันมากขึ้นส่งผลให้การเกาะกลุ่มกันของอนุภาคมีการเกาะกลุ่มกันดีและกระจายตัวได้เพิ่มขึ้น และจากการชิดกันระหว่างอนุภาคส่งผลให้เกิดการเกาะตัวเป็นร่างแหและเกิดผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคได้ดี ลักษณะเช่นนี้จะส่งผลทำให้ค่าสมบัติเชิงกลสูงขึ้น[61]

ภาพที่ 4.11 (b), (c) และ (d) สำหรับยางผสมระหว่าง ENR50 กับ STR5L ที่ 75:25, 50:50 และ 25:75 phr ตามลำดับ มีลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคสารตัวเติมผสมที่สม่ำเสมอ การกระจายตัวได้ดี แต่ลักษณะผิวหน้าไม่เรียบ ดังนั้นสามารถเรียงลำดับจากมากไปหาน้อยคือ ภาพที่ 4.11 (b), (c) และ (d) ตามลำดับ แสดงถึงการแยกเฟสกันของยางธรรมชาติสองชนิด และยังพบว่าบริเวณพื้นผิวเกิดลักษณะเป็นรอยหลุมที่เกิดจากการหลุดของอนุภาคในระดับเล็กน้อย แสดงว่าการยึดเกาะกันระหว่างอนุภาคของสารตัวเติมผสมกับเนื้อยางอยู่ในลักษณะที่ไม่ดี และลักษณะการยึดเกาะได้ไม่ดีจะแปรผันตรงกับปริมาณอัตราส่วนของยาง ENR50 ที่ลดลง ภาพที่ 4.11 (e) ยางธรรมชาติ STR5L เพียงอย่างเดียวมีลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคสารตัวเติมผสม ไม่สม่ำเสมอ จะส่งผลให้สมบัติเชิงกลของยางวัลคาไนซ์ลดลงและยังพบว่าบริเวณพื้นผิวเกิดลักษณะเป็นรอยหลุมที่เกิดจากการหลุดของอนุภาคในระดับเล็กปานกลาง แสดงว่าการยึดเกาะกันระหว่างอนุภาคของสารตัวเติมผสมกับเนื้อยางอยู่ในลักษณะที่ไม่ดี อันเนื่องมาจากความไม่มีขั้วของยางธรรมชาติ STR5L ทำให้การกระจายตัวของสารเคมีไม่ดี[61] ส่งผลให้สมบัติเชิงกลที่ต่ำโดยเฉพาะค่าความแข็ง และสมบัติความเค้นดึงเมื่อยืดร้อยละ 300



ภาพที่ 4.11 สัณฐานวิทยาของยางวัลคาไนซ์ ENR50 และSTR5L กับสารตัวเติมผสม และยางวัลคาไนซ์ผสมระหว่าง ENR50/STR5L กับสารตัวเติมผสม a) E100:S0, b) E75:S25, c) E50:S50, d) E25:S75 และ e) E0:S100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลสารตัวเติมผสมที่มีต่อสมบัติความร้อนของยางคอมปาวด์สายพานลำเลียงอาหารที่อุ่นด้วยพลังงานไมโครเวฟ

4.3.1 ลักษณะการวัลคาไนซ์ยางคอมปาวด์เมื่อไม่ผ่านพลังงานไมโครเวฟ

ตารางที่ 4.6 แสดงผลการทดลองเกี่ยวกับลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางคอมปาวด์สายพานลำเลียงอาหาร (FCBc) เมื่อไม่ผ่านพลังงานไมโครเวฟ จะเห็นได้ว่าสมบัติการวัลคาไนซ์ของ FCBc ใส่สารตัวเติมผสมจะมีค่าสูงกว่าที่ไม่ใส่สารตัวเติมผสม ซึ่งแสดงว่าการเพิ่มสัดส่วนของสารตัวเติมผสมทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นในลักษณะ filler-filler interaction เนื่องจากอิทธิพลของพื้นที่ผิวหรือขนาดอนุภาคและจากสภาพขั้วที่ลดลงของสารตัวเติมผสมทำให้อนุภาคเกิดแรงกระทำต่อกันและเกิดการเกาะกันเป็นก้อนเล็กๆ กระจายตัวได้ดี ส่งผลให้ค่าโมดูลัสสูงขึ้น[63,130] และการใส่สารตัวเติมผสมใน FCBc เป็นการเพิ่มความเป็นกรดจะทำให้การดูดซับสารตัวเร่งได้เร็วขึ้น จะส่งผลให้ระยะเวลาวัลคาไนซ์ (t_{c90}) เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ FCBc ที่ไม่ใส่สารตัวเติมผสม นอกจากนี้ FCBc ที่ไม่ใส่และใส่สารตัวเติมผสมมีค่าระยะเวลาวัลคาไนซ์ (t_{s2}) ระยะเวลาวัลคาไนซ์ (t_{c90}) และ cure rate index (CRI) ลดลงเมื่อปริมาณสารวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้น ในขณะที่การเพิ่มสัดส่วนของสารวัลคาไนซ์ทำให้ค่า torque difference ($M_H - M_L$) เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าน่าจะมีระดับการเชื่อมโยงที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณสารวัลคาไนซ์ที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.6 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของ FCBc ใส่และไม่ใส่สารตัวเติมผสม เมื่อไม่ผ่านพลังงานไมโครเวฟ

Formulas	M_L (lb.in)	M_H (lb.in)	$M_H - M_L$ (lb.in)	t_{s2} (min)	t_{c90} (min)	CRI (min^{-1})
FCBc-S1.0	0.32	4.60	4.28	3.53	5.73	45.45
FCBc-S1.5	0.35	5.61	5.26	3.02	5.42	41.67
FCBc-S2.0	0.41	6.60	6.19	2.67	5.20	39.53
FCBcF-S1.0	5.99	19.79	13.80	3.86	10.20	15.77
FCBcF-S1.5	5.81	22.39	16.58	3.20	10.15	14.39
FCBcF-S2.0	5.24	26.93	21.69	2.56	10.12	13.23

4.3.2 สมบัติไดอิเล็กตริก

ตารางที่ 4.7 แสดงผลการทดลองเกี่ยวกับสมบัติไดอิเล็กตริก พบว่าค่า ϵ' , ϵ'' , และค่า $\tan \delta$ ของ FCBc ใส่สารตัวเติมผสมจะมีค่าสูงกว่าที่ไม่ใส่สารตัวเติมที่ ซึ่งแสดงว่า FCBc ไม่ใส่สารตัวเติมผสมมีความสามารถในการแปรเปลี่ยนพลังงานที่วัสดุดูดซับพลังงานไมโครเวฟ (Q) มีค่าน้อยเมื่อใส่สารตัวเติมผสมลงไปส่งผลให้ FCBc กลายเป็นวัสดุที่สามารถดูดซับพลังงานไมโครเวฟได้มากขึ้น เนื่องจากซิลิกาเป็นสารตัวเติมเสริมแรงและแมกนีเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติมกึ่งเสริมแรงที่มีความเป็นขั้ว เมื่อนำสารตัวเติมผสมที่มีความเป็นขั้วทำการผสมกับ ENR50 ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่มีความเป็นขั้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเมื่อผ่านคลื่นพลังงานไมโครเวฟเข้าไปใน FCBC ที่มีสารตัวเติมกระจายตัวอยู่ ดังนั้น FCBC จะสามารถดูดซับพลังงานไมโครเวฟและเปลี่ยนเป็นความร้อนได้ดียิ่งขึ้น และจะเพิ่มสูงขึ้นตามโครงสร้างและพื้นที่ผิวของสารตัวเติมผสมที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าปริมาณสารตัวเติมผสมที่เติมลงไปส่งผลทำให้ ENR50 โดยปกติจะจัดว่าเป็นวัสดุที่มีขั้วกลายมาเป็นวัสดุที่มีขั้วเพิ่มมากขึ้น[131] ซึ่งสอดคล้องกับที่มีการใส่สารตัวเติมเข้ามาต่ำลงไปในยางธรรมชาติ ทำให้เกิดความร้อนขึ้นได้[4,132] ทั้งนี้เนื่องจาก FCBC ดังกล่าวจะดูดซับพลังงานไมโครเวฟและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนได้เพิ่มมากขึ้น ทำให้ค่าความลึกในการทะลุทะลวงน้อยลง เนื่องจากเมื่อคลื่นไมโครเวฟทะลุผ่านวัสดุไดอิเล็กตริกจะถูกดูดซับและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน ซึ่งเรียกว่าการกำเนิดปริมาณความร้อนภายในต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (Q) ซึ่งจะสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กภายในวัสดุไดอิเล็กตริก[132,133] โดยค่าของการกำเนิดปริมาณความร้อนภายในต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร เมื่อสมมติให้ไม่มีการสูญเสียสนามแม่เหล็ก แสดงได้ดังสมการที่ (1) และจากตารางที่ 4.7 ได้มีการแปรสัดส่วนปริมาณกำมะถันระหว่าง 1.0, 1.5 และ 2.0 phr ในแต่ละสูตร ซึ่งจากการทดลองพบว่าปริมาณกำมะถันที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ค่าสมบัติทางไดอิเล็กตริกมีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย

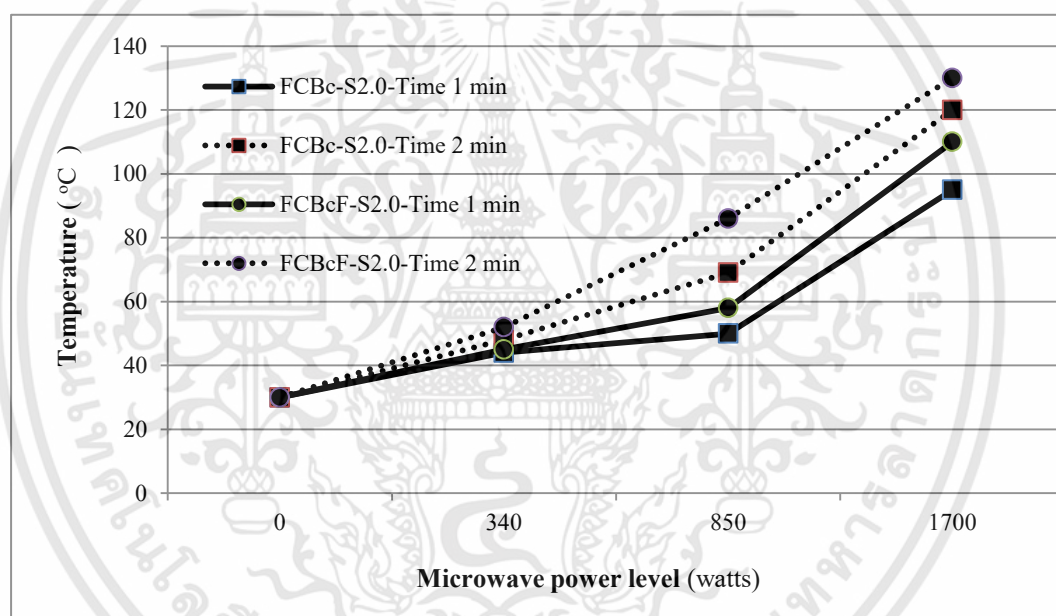
ตารางที่ 4.7 สมบัติไดอิเล็กตริก และค่าความลึกในการทะลุทะลวงของ FCBC ใส่และไม่ใส่สารตัวเติมผสม เมื่อไม่ผ่านพลังงานไมโครเวฟ

Mix symbol	Relative dielectric constant (ϵ'_r)	Relative loss factor (ϵ''_r)($\times 10^{-3}$)	Loss tangent coefficient ($\tan \delta$)($\times 10^{-3}$)	Penetration Depth (D_p) (meter)
FCBC-S1.0	1.978	0.0124	0.006269	0.444251
FCBC-S1.5	1.929	0.0123	0.006376	0.442490
FCBC-S2.0	1.990	0.0128	0.006432	0.426784
FCBCF-S1.0	2.160	0.0143	0.006620	0.400447
FCBCF-S1.5	2.002	0.0133	0.006643	0.414340
FCBCF-S2.0	2.631	0.0177	0.006727	0.357358

4.3.3 อิทธิพลพลังงานไมโครเวฟที่มีต่ออุณหภูมิและเวลาของ FCBC ใส่และไม่ใส่สารตัวเติมผสม

นำ FCBC ใส่และไม่ใส่สารตัวเติมผสมมีขนาดความหนาของชิ้นทดสอบที่ 2 เซนติเมตร และมีปริมาณกำมะถัน 2.0 phr มาทำการศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนภายใต้พลังงานไมโครเวฟ โดยการควบคุมกำลังวัตต์ของคลื่นพลังงานไมโครเวฟที่มีค่ากำลังวัตต์ต่างๆ กันคือ 340, 850 และ 1,700 วัตต์ ความถี่ 2.45 GHz และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการเกิดความร้อนใน FCBC ซึ่ง ภาพที่ 4.12. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของ FCBC เมื่อกำลังวัตต์ที่ใช้แตกต่างกัน เพื่อหาสภาวะกำลังวัตต์ที่เหมาะสมในการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟแก่ FCBC ใส่และไม่ใส่สารตัวเติมผสม ดังนั้นเมื่อให้ความร้อนที่กำลังวัตต์ต่างกันพบว่าเมื่อกำลังวัตต์ที่ใช้มากขึ้น

ทำให้เวลาที่ FCBC ได้รับความร้อนจะใช้น้อยลง เนื่องจากความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (E) ที่เพิ่มขึ้นทำให้โมเลกุลของยางคอมปาวด์ดูดซับพลังงานไมโครเวฟและแปลงเป็นความร้อนได้มากขึ้นตามลำดับและมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากอัตราการเปลี่ยนพลังงานไมโครเวฟเป็นพลังงานความร้อนมีมากกว่าในขณะที่การถ่ายเทความร้อนภายในชิ้นยางคอมปาวด์ยังมีค่าเท่าเดิม[134] และยังพบอีกว่า FCBC ใส่สารตัวเติมผสมจะให้ความร้อนที่มากกว่าที่ไม่ใส่สารตัวเติมผสมเมื่อกำลังวัตต์และระยะเวลาที่ใช้เท่ากัน เนื่องจากสารตัวเติมผสมที่ใช้เป็นวัสดุไดอิเล็กตริก เมื่อคลื่นไมโครเวฟผ่าน FCBC ที่มีส่วนผสมของวัสดุไดอิเล็กตริกผสมอยู่ จะดูดซับและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนได้ดีกว่า FCBC ที่ไม่มีวัสดุไดอิเล็กตริกผสมอยู่[135] ดังนั้นจากผลการทดลองสรุปว่า ในการให้ความร้อนแก่ FCBC ใส่และไม่ใส่สารตัวเติมผสมด้วยพลังงานไมโครเวฟที่ 340-850 วัตต์ที่ระยะเวลา 1 และ 2 นาที มีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้กับผลิตภัณฑ์สายพานลำเลียงอาหาร เนื่องจากใช้เวลาในการให้ความร้อนน้อยและชิ้นงานไม่เกิดการเสียรูป

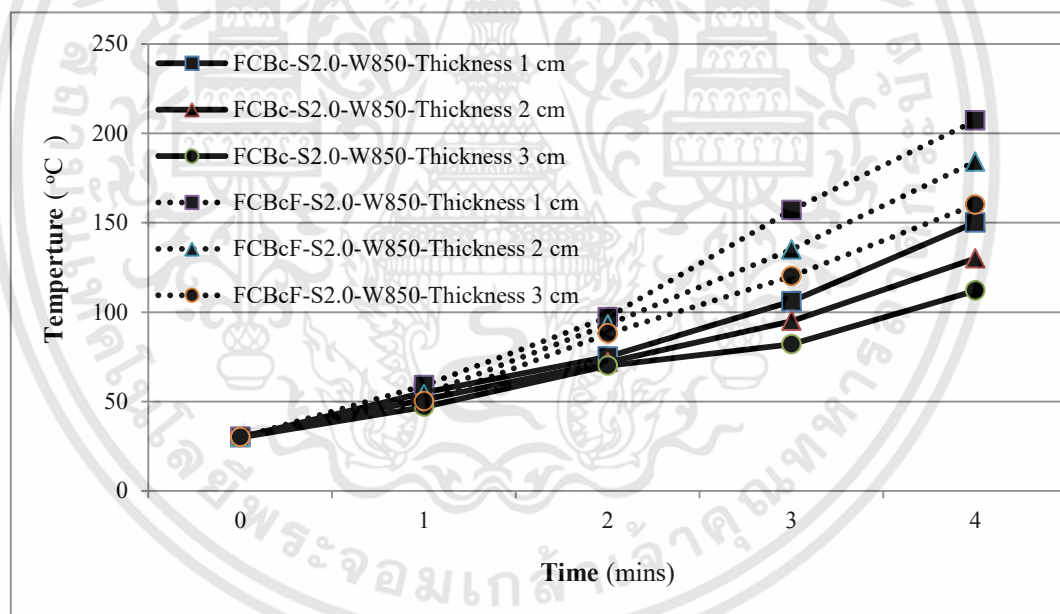


ภาพที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของ FCBC ใส่และไม่ใส่สารตัวเติมผสม ที่เวลาต่างกัน เมื่อไม่ผ่านและผ่านพลังงานไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ต่างกัน

4.3.4 อิทธิพลความหนาชิ้นงานที่มีผลต่ออุณหภูมิและเวลาของ FCBC ใส่และไม่ใส่สารตัวเติมผสมภายใต้กระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ

นำ FCBC ใส่และไม่ใส่สารตัวเติมผสม และมีปริมาณกำมะถัน 2.0 phr มาทำการศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนภายใต้พลังงานไมโครเวฟ โดยจะควบคุมกำลังวัตต์ของคลื่นไมโครเวฟที่ 850 วัตต์ ความถี่ 2.45 GHz และดูความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และเวลาในการเกิดความร้อนใน FCBC ใส่และไม่ใส่สารตัวเติมผสมที่ความหนาชิ้นงานต่างกันที่ 1, 2 และ 3 เซนติเมตร ตามลำดับ ดังนั้นภาพที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และเวลาของ FCBC ใส่และไม่ใส่สารตัวเติมผสม เมื่อความหนาของชิ้นงานต่างกัน ซึ่งพบว่าเมื่อให้ความร้อนแก่ FCBC ที่กำลังวัตต์ 850 วัตต์เท่ากันที่

ระยะเวลา 1, 2, 3 และ 4 นาที ที่ความหนาของชิ้นงานมากกว่า พบว่าระยะเวลาที่ FCBC ได้รับความร้อนจะใช้มากกว่าด้วย และยังพบอีกว่า FCBC ที่ใส่สารตัวเติมผสมจะให้ความร้อนที่มากกว่าที่ไม่ใส่สารตัวเติมผสม เนื่องจากสารตัวเติมซิลิกาและแมกนีเซียมคาร์บอเนตที่ใช้เป็นวัสดุไดอิเล็กตริก ดังนั้นเมื่อคลื่นพลังงานไมโครเวฟผ่าน FCBC จะสามารถดูดซับและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนได้ดีกว่า เพราะสมบัติไดอิเล็กตริกเป็นสมบัติที่แสดงถึงความสามารถในการดูดซับพลังงานไมโครเวฟและการผลิตพลังงานความร้อนที่เกิดจากการดูดซับพลังงานไมโครเวฟ[135] เพราะฉะนั้นการให้ความร้อนด้วยคลื่นพลังงานไมโครเวฟนั้น ความร้อนจะแพร่ผ่านชิ้นงานจากภายในสู่ภายนอกและมีผลโดยตรงต่อความหนาของชิ้นงานคือ ความหนาของชิ้นงานน้อยกว่าจะใช้ระยะเวลาต่ำกว่า ดังนั้นมิติความหนาของชิ้นงานจะส่งผลต่อการกระจายอุณหภูมิอย่างชัดเจน ในกรณีที่ความหนาของชิ้นงานน้อย (ความหนา 1, 2 และ 3 เซนติเมตร) พบว่าการดูดกลืนพลังงานไมโครเวฟและอุณหภูมิจะมีค่าสูงตรงบริเวณด้านล่าง เนื่องจากยางธรรมชาติ มีค่าความลึกทะลุทะลวงมาก ในขณะที่ยางธรรมชาติคอมปาวด์มีความหนาน้อยส่งผลให้พลังงานส่วนใหญ่ส่งผ่านตัววัสดุไป และมีพลังงานบางส่วนเกิดการเรโซแนนซ์ที่บริเวณผิวรอยต่อวัสดุและอากาศบริเวณด้านล่างส่งผลให้เกิดพลังงานสูงขึ้นในชิ้นงานที่มีความหนามาก [136]



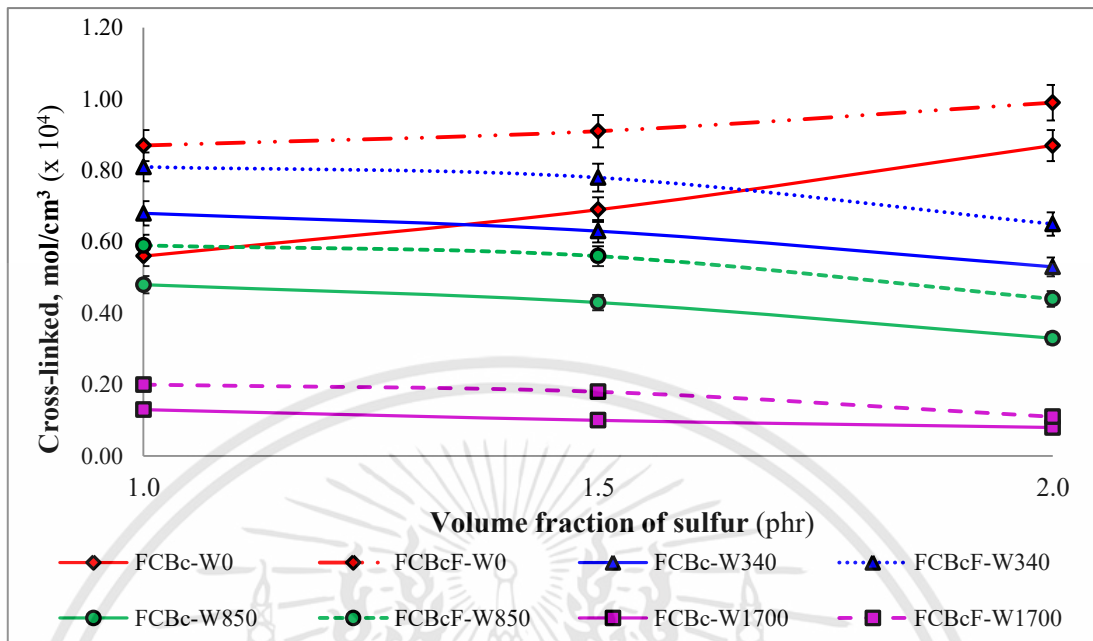
ภาพที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของ FCBC ใส่และไม่ใส่สารตัวเติมผสม ที่ความหนาของชิ้นตัวอย่างต่างกัน และเวลาต่างกัน เมื่อผ่านพลังงานไมโครเวฟที่ 850 วัตต์

4.4 ผลสารตัวเติมผสมที่มีต่อสมบัติกายภาพของยางคอมปาวด์สายพานลำเลียงอาหารที่อุณหภูมิห้อง

4.4.1 ความหนาแน่นของพันธะ

ภาพที่ 4.14. แสดงผลการทดลองเกี่ยวกับความหนาแน่นของพันธะ พบว่าเมื่อปริมาณกำมะถันเพิ่มขึ้นจะทำให้เปอร์เซ็นต์การเชื่อมโยงใน FCBC ใส่สารตัวเติมผสมที่ไม่ผ่านพลังงานไมโครเวฟมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งกำมะถันมีปริมาณมากจะทำให้เกิดการเชื่อมโยงสูงตามไปด้วยเนื่องจากปริมาณสัดส่วนกำมะถันที่เติมลงไป จะทำให้ความหนาแน่นของพันธะยางกับสารตัวเติมเพิ่มขึ้นด้วย [99] นอกจากนี้พบว่า FCBC ใส่สารตัวเติมผสมเมื่อผ่านพลังงานไมโครเวฟจะมีค่าความหนาแน่นของพันธะสูงกว่า FCBC ไม่ใส่สารตัวเติมผสมทุกระดับพลังงานไมโครเวฟ ซึ่งแสดงว่า FCBC ไม่ใส่สารตัวเติมผสมมีความสามารถในการแปรเปลี่ยนพลังงานไมโครเวฟที่วัสดุดูดซับเป็นพลังงานความร้อนได้น้อย เมื่อใส่สารตัวเติมผสมลงไปส่งผลให้ FCBC กลายเป็นวัสดุไดอิเล็กทริกและเมื่อผ่านคลื่นพลังงานไมโครเวฟ จะสามารถดูดซับพลังงานไมโครเวฟและเปลี่ยนเป็นความร้อนได้ดียิ่งขึ้น และจะเพิ่มสูงขึ้นตามโครงสร้างและพื้นที่ผิวของสารตัวเติมผสมที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าปริมาณสารตัวเติมผสมที่เติมลงไปส่งผลทำให้ ENR50 โดยปกติจะจัดว่าเป็นวัสดุที่มีขี้ กลายมาเป็นวัสดุที่มีขี้เพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับที่มีการใส่สารตัวเติมเข้ามาต่ำลงไปในยางธรรมชาติ ทำให้เกิดความร้อนขึ้นได้ [4,32] และเมื่อนำ FCBC ไม่ใส่และใส่สารตัวเติมผสมไปผ่านการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟที่ 340, 850 และ 1700 วัตต์ พบว่าเมื่อปริมาณกำมะถันที่สัดส่วนปริมาณ 1.0 phr จะให้ค่า % crosslinking สูงที่สุด และมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยที่ 1.5 phr และมีแนวโน้มที่ลดลงอย่างเห็นผลที่ชัดเจนที่ 2.0 phr ตามลำดับ เนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณสัดส่วนกำมะถันใน FCBC ที่ผ่านความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟที่กำลังวัตต์และเวลาที่เท่าเดิม จะส่งผลให้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิของ FCBC จะเพิ่มขึ้นไปด้วยเนื่องจากพลังงานไมโครเวฟจะช่วยทำให้เกิดความร้อนจากชิ้นงานด้านในสู่ด้านนอกภายในระยะเวลาอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะทำให้การดูดซับพลังงานไมโครเวฟมีมากขึ้นทำให้เกิดความร้อนภายในมากขึ้น จะทำให้ FCBC ดูดซับพลังงานไมโครเวฟและแปลงเป็นพลังงานความร้อนได้มากขึ้นตามลำดับ ในขณะที่การถ่ายเทความร้อนภายใน FCBC ยังมีค่าเท่าเดิม ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ความหนาแน่นของพันธะของยางวัลคาไนซ์ลดลง เป็นการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนของพันธะที่เกิดการเชื่อมโยงด้วยกำมะถันทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุล และการตัดสายโซ่โมเลกุลของยาง ที่สำคัญยังเป็นสาเหตุให้สมบัติทางกายภาพของยางวัลคาไนซ์ด้อยลงด้วย [70]

ดังนั้น FCBC ไม่ใส่และใส่สารตัวเติมผสมและมีปริมาณกำมะถันที่ 1.0 phr เป็นวัตถุดิบยางคอมปาวด์สายพานลำเลียงอาหารที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งจะนำไปศึกษาสมบัติเชิงกลก่อนและหลังการอบเร่งด้วยอากาศร้อนที่พลังงานไมโครเวฟ 340, 850 และ 1,700 วัตต์ต่อไป นอกจากนี้จากตารางที่ 3.3 สัดส่วนผสมสูตรยางคอมปาวด์ 3 พบว่า FCBC ใส่สารตัวเติมผสมมีราคาต้นทุนวัตถุดิบที่ต่ำกว่าที่ไม่ใส่สารตัวเติมผสม



ภาพที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของพันธะกับปริมาณกำมะถันที่ต่างกันของ FCBC ใส่และไม่ใส่สารตัวเติมผสม เมื่อไม่ผ่านและผ่านพลังงานไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ต่างกัน

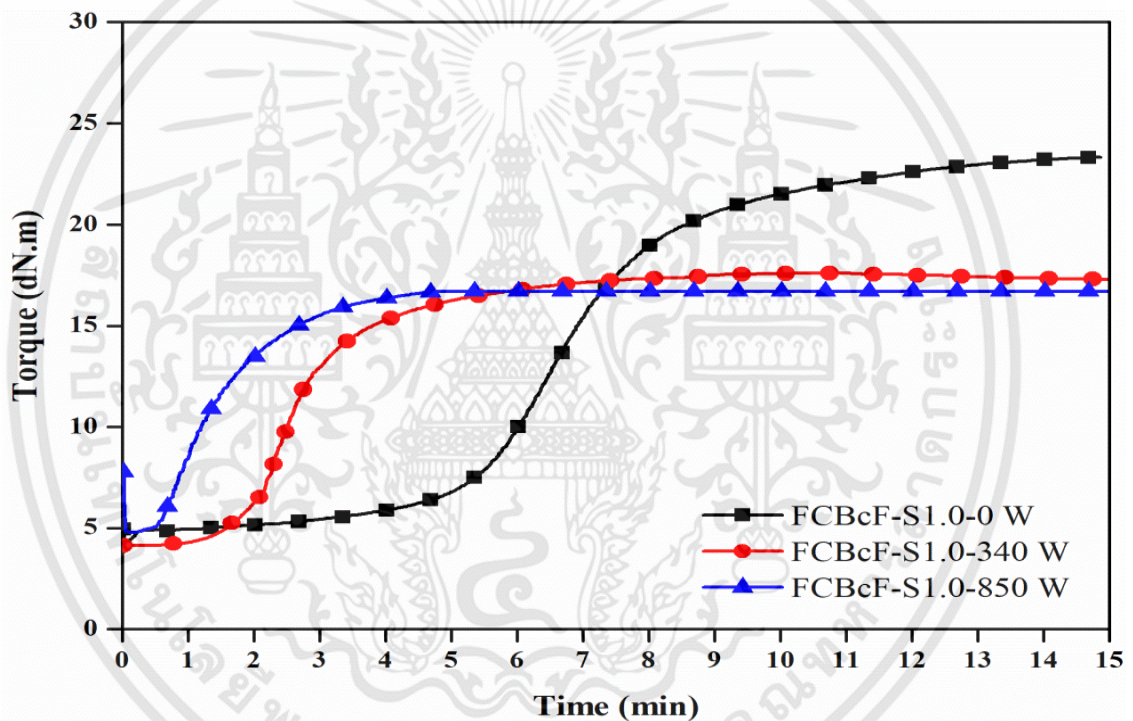
4.4.2 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางคอมปาวด์เมื่อผ่านพลังงานไมโครเวฟ

ภาพที่ 4.15 แสดงลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางคอมปาวด์ที่ผสมสารตัวเติมผสมและปริมาณกำมะถันที่ 1.0 phr. นำไปผ่านการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟที่ 0, 340 และ 850 วัตต์ พบว่ายางคอมปาวด์ที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟจะมีระยะเวลาวัลคาไนซ์ (t_{c90}) ที่สูงกว่ายางคอมปาวด์ที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟที่ 340 และ 850 วัตต์ ตามลำดับ และระยะเวลาวัลคาไนซ์ (t_{c90}) มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟที่กำลังวัตต์สูงขึ้นตามลำดับ เนื่องจากในขณะอุ่นยางคอมปาวด์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ (microwave heating) นั้นคลื่นไมโครเวฟจะแทรกสอดเข้าไปในเนื้อยางคอมปาวด์ที่ผสมสารตัวเติมผสมซึ่งเป็นวัสดุที่มีขั้ว หรือจะดูดซับพลังงานไมโครเวฟและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนได้มากขึ้น จึงทำให้โซโมเลกุลของยางคอมปาวด์สั่นอย่างรุนแรง จึงเป็นเหตุให้เกิดการเสียดสีกันระหว่างโซโมเลกุลทำให้เกิดความร้อนขึ้นและส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลยางลดลงด้วย ดังนั้นจึงทำให้ยางคอมปาวด์มีการกระจายความร้อนอย่างทั่วถึงภายในเวลาอันรวดเร็ว[111] ซึ่งเมื่อนำยางคอมปาวด์ที่มีร้อนอย่างทั่วถึง ไปทดสอบสมบัติการวัลคาไนซ์ด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบตายเคลื่อนที่ (MDR) ซึ่งมีแรงเสียดทานต่ำกว่า พร้อมทั้งมีการถ่ายเทความร้อนจากตายสู่ยางคอมปาวด์ได้อย่างรวดเร็วเพราะขึ้นทดสอบมีขนาดเล็ก[137] จึงส่งผลให้ระยะเวลาวัลคาไนซ์ของยางคอมปาวด์ลดลง แต่เวลาที่ยางเริ่มวัลคาไนซ์ (scorch time) มีค่าลดลง ซึ่งไม่ส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยในกระบวนการผลิตสายพานลำเลียงอาหาร และเหตุผลอีกประเด็นหนึ่งคือเมื่อยางคอมปาวด์ซึ่งมีส่วนผสมของยางธรรมชาติที่มีขั้วและมีพันธะคู่ ซึ่งมีความไวในการเกิดปฏิกิริยา ดังนั้นเมื่อเติมกำมะถันเป็นสารวัลคาไนซ์และให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ จึงเกิดการแตกพันธะคู่ออกกลายเป็นพันธะเดี่ยวซึ่งมีความอึดตัวมากกว่า ทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อให้มีการเชื่อมขวางกันระหว่างโมเลกุลของยางเพิ่มขึ้นส่งผลให้ระยะเวลาวัลคาไนซ์ (t_{c90}) มีค่าลดลง[138] แสดงว่าการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟที่กำลังวัตต์เหมาะสมสามารถทำให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างพันธะโมเลกุลยางคอมปาวด์ได้

สำหรับระยะเวลาวัลคาไนซ์ที่ใช้ในกระบวนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางโดยทั่วไป จะใช้ระยะเวลาวัลคาไนซ์ (t_{c90}) จากเครื่องรีโอมิเตอร์แบบดรายเคลื่อนที่ (MDR) และบวกเวลาเพิ่มประมาณ 5-10% เพื่อให้ยางคอมปาวด์เกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ที่สมบูรณ์ 100% ดังนั้นพบว่ายางคอมปาวด์ชนิดใหม่ที่ได้จากการผสมระหว่างยางธรรมชาติ ENR50 : ซิลิกา : แมกนีเซียมออกไซด์ ในอัตราส่วน 100:40:40 phr และปริมาณกำมะถันที่ 1.0 phr นำไปผ่านการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟที่กำลัง 340 วัตต์ สามารถลดระยะเวลาวัลคาไนซ์ (t_{c90}) ได้ประมาณ 50% เมื่อเทียบกับยางคอมปาวด์ที่ไม่ได้ผ่านพลังงานไมโครเวฟในสภาวะเดียวกัน

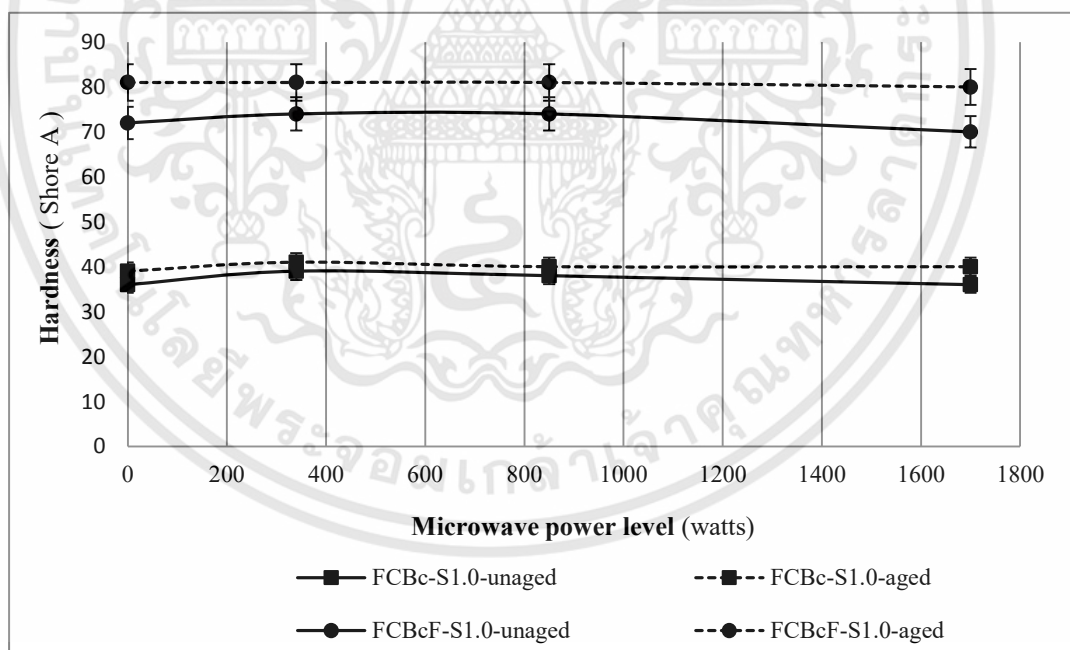


ภาพที่ 4.15 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของ FCBC ใส่สารตัวเติมผสม และปริมาณกำมะถันที่ 1.0 phr เมื่อนำไปผ่านการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟที่ 0, 340 และ 850 วัตต์

4.4.3 สมบัติความแข็ง (Hardness)

ภาพที่ 4.16 แสดงผลการทดลองเกี่ยวกับสมบัติความแข็ง พบว่า FCBC ใส่สารตัวเติมผสม ในสภาวะก่อนและหลังการบ่มแรงจะให้สมบัติความแข็งที่สูงกว่า FCBC ไม่ใส่สารตัวเติมผสม ในสภาวะก่อนและหลังการบ่มแรงทุกระดับกำลังวัตต์ เนื่องจากในการวิจัยครั้งนี้ได้ใช้สารตัวเติมซิลิกาและแมกนีเซียมคาร์บอเนต ซึ่งเป็นสารตัวเติมเสริมแรงและกึ่งเสริมแรงสำหรับผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกล โดยที่ผิวของซิลิกาประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลและไฮดรอกซิลที่มีคุณสมบัติทำให้พื้นผิวมีความเป็นขี้และเป็นกรดทำให้ดูดความชื้นได้ดี[58] เพราะฉะนั้นสารตัวเติมซิลิกาและ

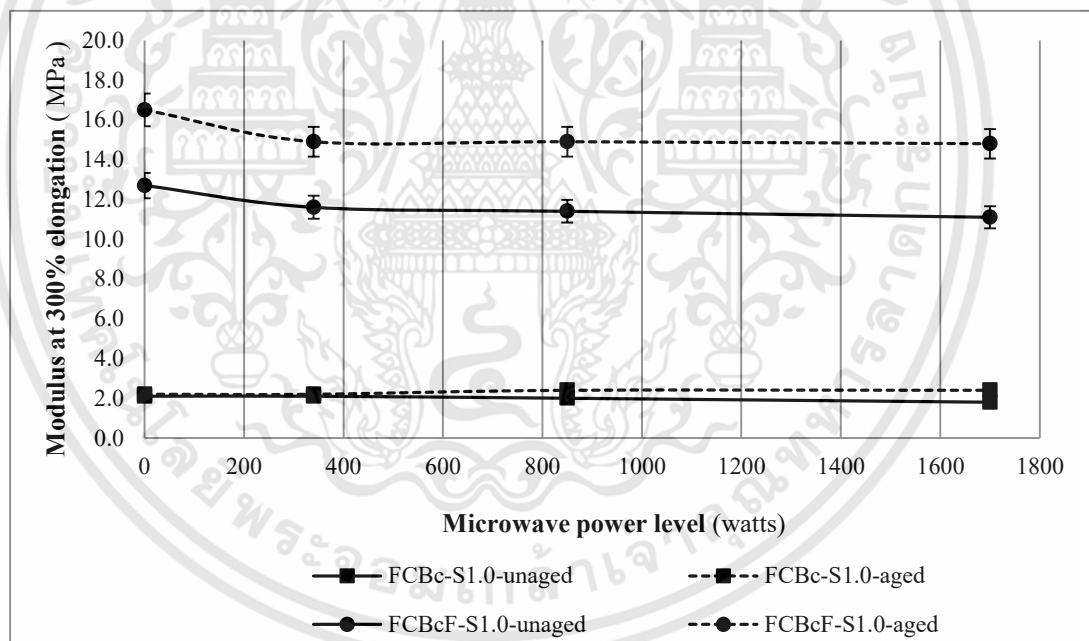
แมกนีเซียมคาร์บอเนตเป็นวัสดุไดอิเล็กตริกที่เหมาะสม ซึ่งวัสดุไดอิเล็กตริกที่เหมาะสมจะช่วยลดการสะท้อนของคลื่นไมโครเวฟบริเวณผิวหน้าของวัสดุทำให้คลื่นไมโครเวฟทะลุผ่านเข้าไปในวัสดุนั้นมากขึ้น[130] จะทำให้วัสดุไดอิเล็กตริกดูดซับคลื่นไมโครเวฟเมื่อทะลุผ่านได้มากขึ้น และสามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนได้มากกว่า FCBC ไม้ใส่สารตัวเติมผสมในสภาวะก่อนและหลังการบ่มเร่ง จึงส่งผลให้ FCBC ใสสารตัวเติมผสมเมื่อผ่านพลังงานไมโครเวฟจะมีคุณสมบัติความแข็งที่ดี ทั้งนี้สารตัวเติมผสมยังทำให้เกิดการกีดขวางการเคลื่อนที่ของโซโมเลกุลยาง ดังนั้นความยืดหยุ่นของยางก็จะน้อยลง ก็จะทำให้ยางมีความแข็งเพิ่มขึ้นหลังการบ่มเร่งด้วยอากาศร้อน[58] อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของพลังงานไมโครเวฟจาก 340 ถึง 850 วัตต์ ส่งผลให้สมบัติความแข็งมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย เนื่องจากการดูดซับพลังงานไมโครเวฟที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงานจะเป็นลักษณะการเกิดความร้อนเชิงปริมาตร (Q) ที่เกิดขึ้นในระดับโมเลกุล หลังจากที่เกิดความร้อนขึ้นจากภายในแล้วก็จะกระจายสู่ภายนอก[99] ดังนั้นความร้อนที่เกิดขึ้นจึงกระจายอย่างสม่ำเสมอ การแตกพันธะคู่ออกกลายเป็นพันธะเดี่ยว และความชื้นไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ทำให้การเชื่อมต่อกับโมเลกุลของกำมะถันจึงเกิดแบบสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงานจึงทำให้เกิดการเชื่อมโยงพันธะได้ดีกว่า และเมื่อเพิ่มพลังงานไมโครเวฟที่ 1700 วัตต์ จะส่งผลให้สมบัติความแข็งลดลง ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในยางธรรมชาติโดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูง และอาจจะเกิดจากการสลายพันธะซัลเฟอร์ที่เชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล[139]



ภาพที่ 4.16 สมบัติความแข็งก่อนและหลังการอบเร่งด้วยความร้อนของ FCBC ใสและไม่ใส่สารตัวเติมผสม เมื่อไม่ผ่านและผ่านพลังงานไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ต่างกัน

4.4.4 สมบัติความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 300

ภาพที่ 4.17 แสดงผลการทดลองเกี่ยวกับสมบัติความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 300 พบว่า FCBC ใส่สารตัวเติมผสมในสภาวะก่อนและหลังการอบเร่งด้วยความร้อนเมื่อผ่านพลังงานไมโครเวฟและไมผ่านพลังงานไมโครเวฟจะให้สมบัติความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 300 ที่ดีกว่า FCBC ไม่ใส่สารตัวเติมผสมในสภาวะเดียวกันและมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดจน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสารตัวเติมผสมจะช่วยให้ค่าความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 300 เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก FCBC ใส่สารตัวเติมผสมจะมีความเป็นวัสดุไดอิเล็กตริกสูง เมื่อคลื่นพลังงานไมโครเวฟเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในวัสดุทำให้การดูดซับและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนที่มากกว่า[68] อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของพลังงานไมโครเวฟจาก 340 ถึง 1,700 วัตต์ ส่งผลให้สมบัติความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 300 มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเมื่อกำลังไมโครเวฟเพิ่มขึ้นทำให้ความเข้มของสนามไฟฟ้ามากขึ้นส่งผลให้การดูดซับพลังงานไมโครเวฟมีมากขึ้นตามไปด้วย[68] ทำให้เกิดความร้อนที่ภายในระดับโมเลกุลเพิ่มมากขึ้น เป็นสาเหตุทำให้พันธะที่เชื่อมโยงโมเลกุลของ FCBC ลดลง [99] หรือในกรณีพลังงานไมโครเวฟสูงเกินไปอาจจะส่งผลให้เกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนของพันธะที่เกิดการเชื่อมโยงด้วยกัมมันต์ ซึ่งจะเป็สาเหตุทำให้พันธะการเชื่อมโยงของ FCBC มีระดับการวัลคาไนซ์ลดลง[70]

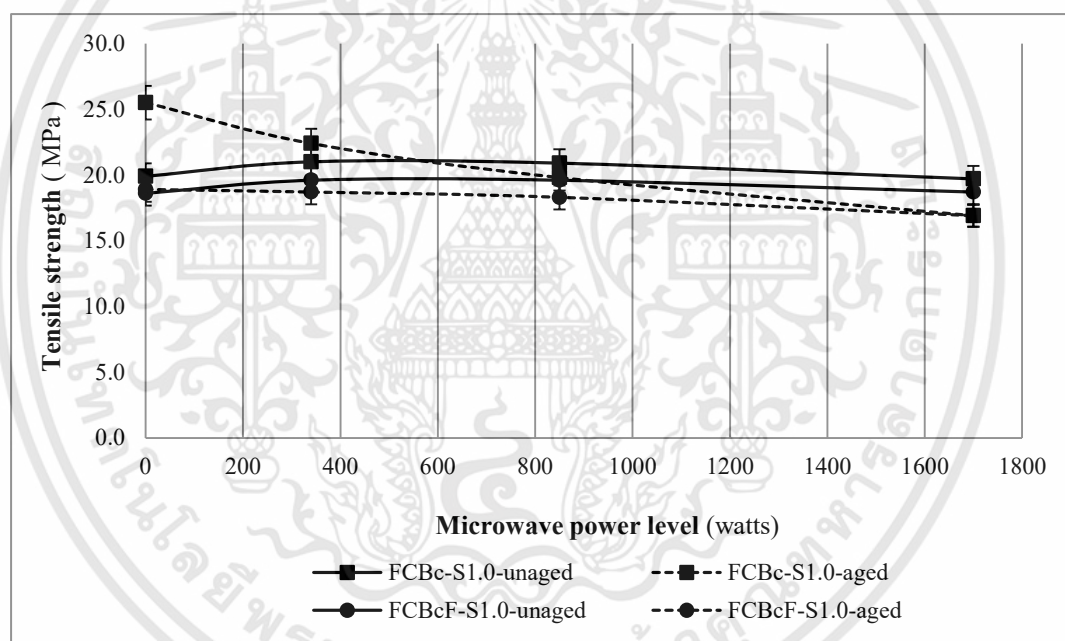


ภาพที่ 4.17 สมบัติความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ300 ก่อนและหลังการอบเร่งด้วยความร้อนของ FCBC ใส่และไม่ใส่สารตัวเติมผสม เมื่อไม่ผ่านและผ่านพลังงานไมโครเวฟที่ก้ำำลังวัตต์ต่างกัน

4.4.5 สมบัติความต้านทานแรงดึง

ภาพที่ 4.18 แสดงผลการทดลองเกี่ยวกับสมบัติความต้านทานแรงดึง พบว่าพลังงานไมโครเวฟที่ 340 วัตต์ พบว่า FCBC ไม่ใส่สารตัวเติมผสมในสภาวะหลังการอบเร่งด้วยอากาศร้อน จะให้สมบัติการต้านทานแรงดึงที่ดีกว่าในสภาวะก่อนการอบเร่งด้วยอากาศร้อน เนื่องจากปกติโครงสร้างเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของ ENR50 ที่ยังไม่เติมสารเคมีจะมีพันธะคู่อยู่และมีขั้วไฟฟ้า ซึ่งมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาทำให้ทนต่อความร้อนได้ดีเมื่อเติมกำมะถันเพียงอย่างเดียว[126] และคาดว่าเกิดจากปฏิกิริยาการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุล หรือปฏิกิริยาการเชื่อมโยงภายในสายโซ่โมเลกุล ที่เพิ่มขึ้นภายในเพราะระหว่างการอบเร่งด้วยความร้อนในสถานะที่มีออกซิเจนจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน จะทำให้เกิดการเชื่อมโยงที่สูงขึ้น[129] จึงส่งผลทำให้มีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงที่สูงขึ้นหลังการอบเร่งด้วยความร้อนส่งผลให้มีสมบัติการต้านแรงดึงสูงขึ้น เมื่อเพิ่มพลังงานไมโครเวฟที่ 850 ถึง 1700 วัตต์พบว่า FCBC ใส่และไม่ใส่สารตัวเติมในสถานะหลังการอบเร่งด้วยอากาศร้อนจะส่งผลให้สมบัติการต้านแรงดึงที่ลดลงมากกว่าในสถานะก่อนการอบเร่งด้วยความร้อน แสดงว่าพลังงานไมโครเวฟสูงขึ้นไปทำให้สมบัติการต้านแรงดึงลดลง เนื่องจากเมื่อเพิ่มกำลังไมโครเวฟทำให้ความชื้นของสนามไฟฟ้ามากขึ้นส่งผลให้การดูดซับพลังงานไมโครเวฟและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนภายในมากขึ้น[68] และนอกจากนี้การบ่มเร่งด้วยความร้อนจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันซึ่งก่อให้เกิดการเสื่อมสภาพแบบการตัดสายโซ่โมเลกุลเกิดขึ้นใน FCBC [128]

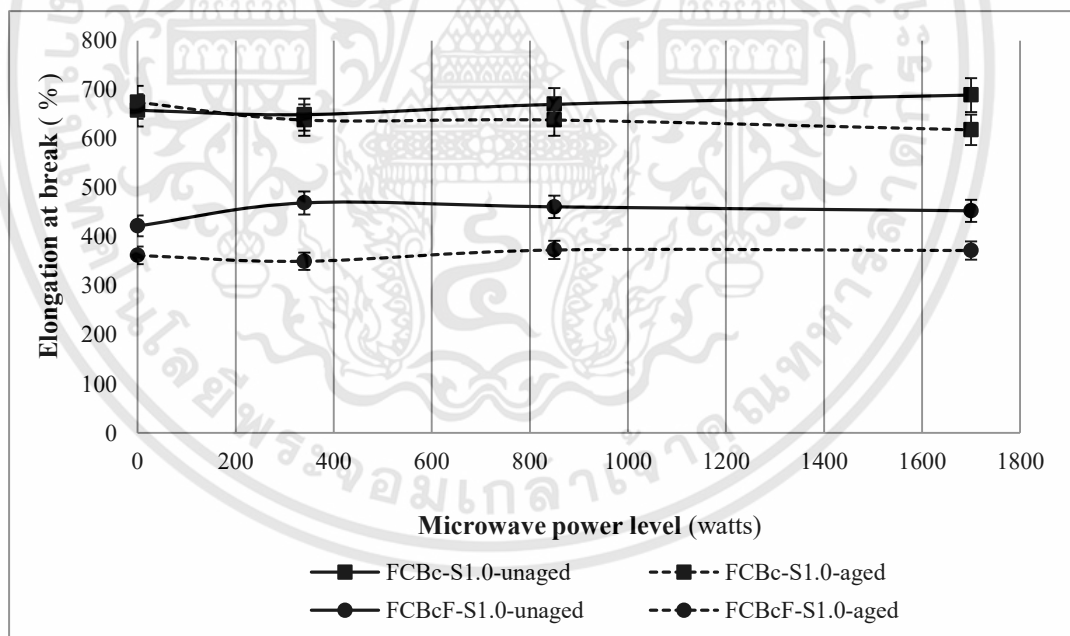


ภาพที่ 4.18 สมบัติความต้านทานแรงดึงก่อนและหลังการอบเร่งด้วยความร้อนของ FCBC ใส่และไม่ใส่สารตัวเติมผสม เมื่อไม่ผ่านและผ่านพลังงานไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ต่างกัน

4.4.6 สมบัติความทนต่อแรงยึดจนขาด

ภาพที่ 4.19 แสดงผลการทดลองเกี่ยวกับสมบัติความทนต่อแรงยึดจนขาด พบว่า FCBC ไม่ใส่สารตัวเติมผสมในสถานะก่อนและหลังการอบเร่งด้วยอากาศร้อน จะให้สมบัติความทนต่อแรงยึดจนขาดที่ดีในทุกระดับพลังงานไมโครเวฟ เนื่องจากไม่มีสารตัวเติมผสมจึงมีความเป็นวัสดุไดอิเล็กตริกที่ต่ำ ดังนั้นเมื่อคลื่นพลังงานไมโครเวฟทะลุผ่านเข้าไปในวัสดุจะทำให้การดูดซับและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนที่ต่ำ[68] ในทำนองเดียวกัน FCBC ใส่สารตัวเติมผสมในสถานะก่อนและหลังการอบเร่งด้วยอากาศร้อนจะมีความเป็นวัสดุไดอิเล็กตริกที่สูงกว่าหรือมีขั้วไฟฟ้าที่สูง ดังนั้นเมื่อคลื่นเอกซเรย์เป็นเอกซเรย์ที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไมโครเวฟทะลุผ่านจะถูกเปลี่ยนพลังงานของคลื่นที่ดูดซับไว้เป็นพลังงานความร้อน และการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นเป็นไปอย่างรวดเร็วทำให้การดูดซับและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนที่มากกว่าทำให้เกิดความร้อนที่ระดับโมเลกุลเพิ่มมากขึ้น เป็นสาเหตุทำให้พันธะที่เชื่อมโยงโมเลกุลของยางวัลคาไนซ์ลดลง[139] นอกจากนี้การใส่สารตัวเติมผสม จะทำให้ยางมีความต่อเนื่องของเฟสยางน้อยลง และอาจเกิดการกระจายตัวไม่ดีหรือไม่สม่ำเสมอ และปริมาณสารตัวเติมผสม จะส่งผลให้เกิดการเข้าไปกีดขวางการเคลื่อนที่ของโมเลกุลยาง ทำให้ยางมีความแข็งตึงและความเปราะ เพิ่มมากขึ้น ทำให้สมบัติความทนต่อแรงยืดจนขาดลดลง[53,140,141] และการเพิ่มพลังงานไมโครเวฟจาก 340 ถึง 1,700 วัตต์ส่งผลให้ FCBC ใส่และไม่ใส่สารตัวเติมผสมที่สภาวะหลังการบ่มเร่งจะทำให้สมบัติความทนต่อแรงยืดจนขาดลดลงเมื่อกำลังวัตต์ที่สูงขึ้น เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นเป็นไปอย่างรวดเร็วประกอบกับมีการเพิ่มกำลังวัตต์ที่สูงขึ้นจะส่งผลให้ความร้อนเพิ่มมากขึ้น เป็นสาเหตุทำให้ความหนาแน่นของพันธะลดลง จึงเกิดสภาวะการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนหรือจะมีลักษณะริเวอร์ชันคือปรากฏการณ์ที่จำนวนพันธะก้ำะมันที่เชื่อมโยงของยางลดลงเมื่อได้รับความร้อนสูงเกินไปหรือการวัลคาไนซ์ที่นานเกินไปและยังเป็นสาเหตุให้สมบัติทางกายภาพของยางวัลคาไนซ์ลดลงด้วย [69,70] นอกจากนี้ในขณะอบเร่งด้วยความร้อน ทำให้เกิดการสลายพันธะของปฏิกิริยาการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุล และปฏิกิริยาการตัดสายโซ่โมเลกุล ดังนั้นการสลายพันธะของพันธะเชื่อมโยงใน FCBC ใส่สารตัวเติมผสม เนื่องจากความร้อนจะทำให้ความยืดหยุ่นลดลงอีกด้วย [128]

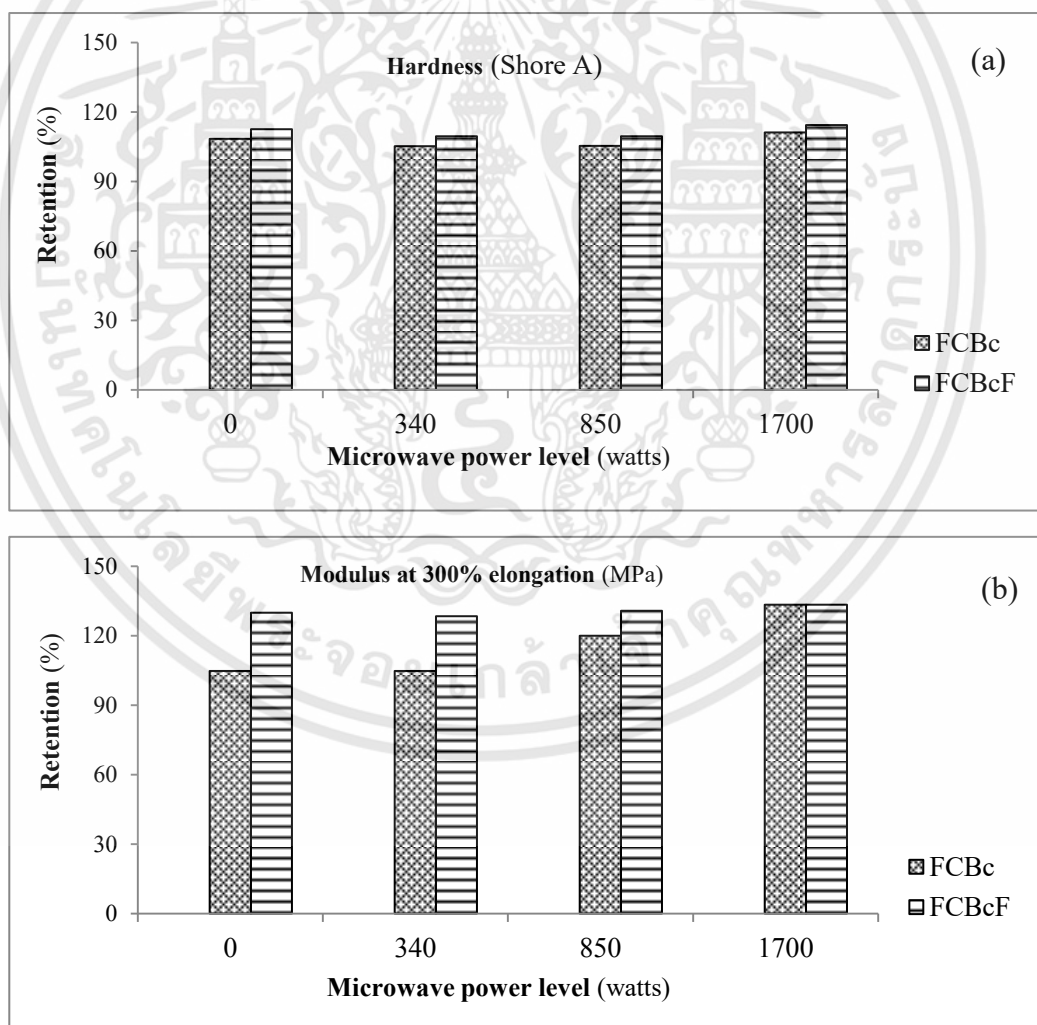


ภาพที่ 4.19 สมบัติความทนต่อแรงยืดจนขาดก่อนและหลังการอบเร่งด้วยความร้อนของ FCBC ใส่และไม่ใส่สารตัวเติมผสม เมื่อไม่ผ่านและผ่านพลังงานไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ต่างกัน

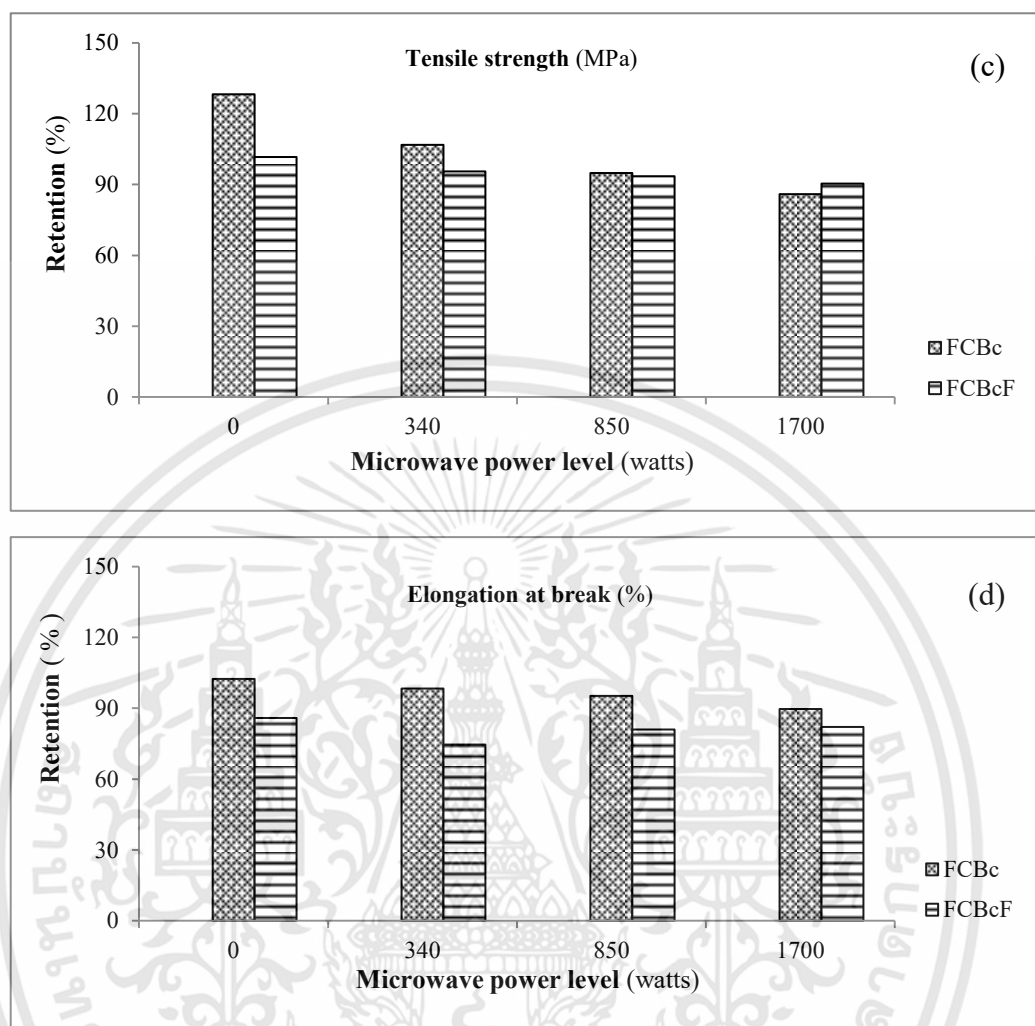
4.4.7 การเสื่อมสภาพด้วยการอบเร่งด้วยความร้อน

ภาพที่ 4.20 แสดงผลการทดลองเกี่ยวกับการเสื่อมสภาพด้วยการอบเร่งด้วยความร้อน พบว่าเมื่อพลังงานไมโครเวฟเพิ่มขึ้นจาก 340 ถึง 1700 วัตต์ จะส่งผลให้สมบัติความแข็ง และความเค้นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดึงเมื่อมีการยืดออกร้อยละ 300 มี % retention ของ FCBC ใส่สารตัวเติมผสมจะมีค่าเพิ่มขึ้น และสูงกว่าไม่ใส่สารตัวเติมผสม ทั้งนี้เนื่องจากสารตัวเติมผสมจะส่งผลให้เกิดการเข้าไปกีดขวางการเคลื่อนที่ของโมเลกุลยางทำให้ยางมีความแข็งตึง และความเปราะเพิ่มขึ้น หรือความยืดหยุ่นของยางลดน้อยลง ประกอบกับ FCBC ใส่สารตัวเติมผสมจะมีความเป็นวัสดุไดอิเล็กตริกสูงเมื่อคลื่นพลังงานไมโครเวฟเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในวัสดุทำให้การดูดซับและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนได้มากกว่า ทำให้เกิดความร้อนที่ภายในระดับโมเลกุลที่เพิ่มมากขึ้น เป็นสาเหตุทำให้พันธะที่เชื่อมโยงโมเลกุลลดลง และในลำดับต่อมาพบว่าเมื่อพลังงานไมโครเวฟลดลงจาก 1700 ถึง 340 วัตต์ จะส่งผลให้สมบัติการต้านแรงดึง และความทนต่อแรงยืดจนขาด มี % retention ของ FCBC ใส่สารตัวเติมผสมจะมีค่าต่ำกว่า FCBC ไม่ใส่สารตัวเติมผสม เนื่องจาก FCBC ไม่ใส่สารตัวเติมผสม จะส่งผลให้โมเลกุลของยางมีการเคลื่อนที่อย่างอิสระทำให้ยางมีความแข็งตึงลดลง หรือยางมีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น และเมื่อคลื่นพลังงานไมโครเวฟเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในวัสดุทำให้การดูดซับและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนได้น้อยกว่าทำให้พันธะที่เชื่อมโยงโมเลกุลของยางไม่เปลี่ยนแปลง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.20 สมบัติการเชื่อมสภาพด้วยการอบเร่งด้วยความร้อนของสมบัติเชิงกลของ FCBc ใส่และไม่ใส่สารตัวเติมผสม เมื่อผ่านและไม่ผ่านพลังงานไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ต่างกัน

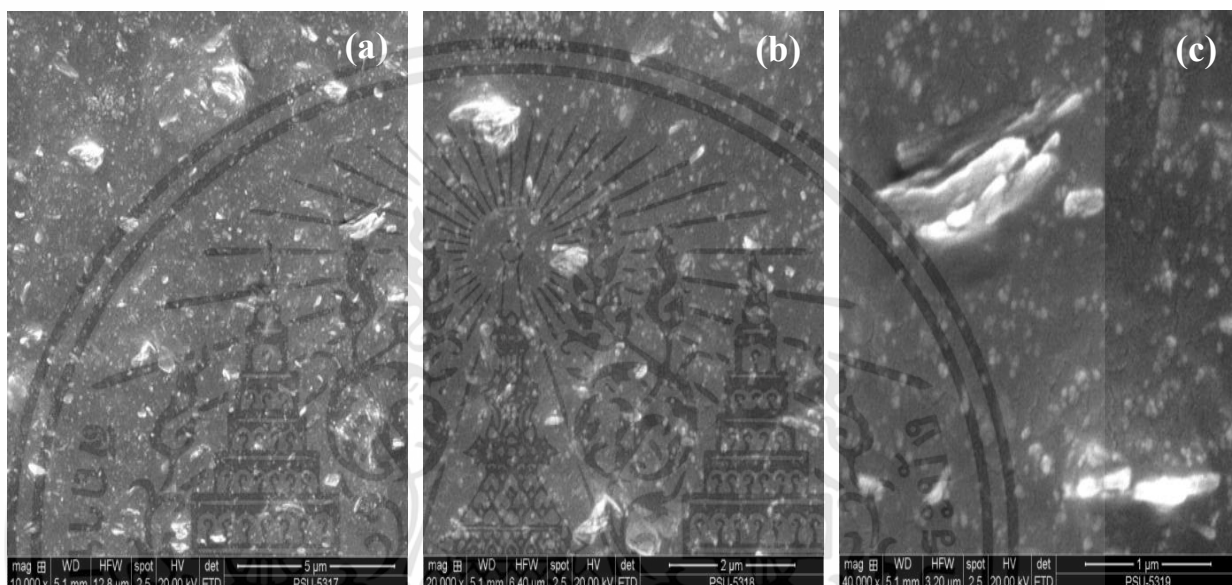
a) สมบัติความแข็ง b) สมบัติความเค้นแรงดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 300 c) สมบัติความต้านทานแรงดึง และ d) สมบัติความทนต่อแรงยืดจนขาด

4.4.8 ลักษณะสัณฐานวิทยา

ภาพที่ 4.21 (a)-(c) แสดงภาพถ่ายบริเวณพื้นที่หน้าตัดของยางวัลคาไนซ์ที่ผสมสารตัวเติมผสมระหว่างซิลิกากับแมกนีเซียมคาร์บอเนตและมีปริมาณกำมะถันที่ 1.0 phr อุณหภูมิด้วยพลังงานไมโครเวฟ 340 วัตต์ที่คลื่นความถี่ 2.45 GHz เป็นเวลา 1 นาที และนำไปหักในไนโตรเจนเหลวด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) ที่กำลังขยาย 10,000, 20,000 และ 40,000 เท่า ตามลำดับจากการศึกษาพบว่า มีลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคสารตัวเติมผสมระหว่างซิลิกากับแมกนีเซียมคาร์บอเนตที่สม่ำเสมอและกระจายตัวได้ดี ส่งผลให้เกิดการเกาะตัวเป็นร่างแหและเกิดผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคได้ดี ลักษณะเช่นนี้จะส่งผลทำให้ค่าสมบัติเชิงกลสูงขึ้น แต่ลักษณะผิวหน้าไม่เรียบ จะส่งผลถึงความต่อเนื่องระหว่างเฟสยางกับสารตัวเติมผสม[61] และยังพบว่าบริเวณพื้นผิวเกิดลักษณะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นรอยหลุมที่เกิดจากการหลุดของอนุภาคในระดับเล็กน้อยมาก แสดงว่าการยึดเกาะกันระหว่างอนุภาคของสารตัวเติมผสมกับเนื้ออย่างอยู่ในลักษณะที่ระดับดี แต่อย่างไรก็ตามลักษณะดังกล่าวก็ไม่ได้ส่งผลหรือเป็นอุปสรรคต่อการผ่านเข้าไปของพลังงานไมโครเวฟและสมบัติไดอิเล็กตริกของยางคอมปาวด์ เนื่องจากพลังงานไมโครเวฟมีการทะลุทะลวงของพลังงานที่ดี โดยคลื่นไมโครเวฟสามารถทะลุทะลวงเข้าไปให้ความร้อนที่ชั้นภายในและกระจายความร้อนอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน ซึ่งจะส่งผลให้สมบัติความหนาแน่นของพันธะระหว่างยางกับสารตัวเติมผสมเกาะติดกันได้ดี



ภาพที่ 4.21 สัณฐานวิทยาที่กำลังการขยายต่างกันของ FCBC ใส่สารตัวเติมผสม และผ่านพลังงานไมโครเวฟ 340 วัตต์ ที่คลื่นความถี่ 2.45 GHz เป็นเวลา 1 นาที a) 10,000 เท่า, b) 20,000 เท่า และ c) 40,000 เท่า

4.5 ผลการประยุกต์ใช้ยางคอมปาวด์สายพายลำเลียงอาหารในอุตสาหกรรมการผลิตผลิตภัณฑ์สายพานลำเลียงอาหาร

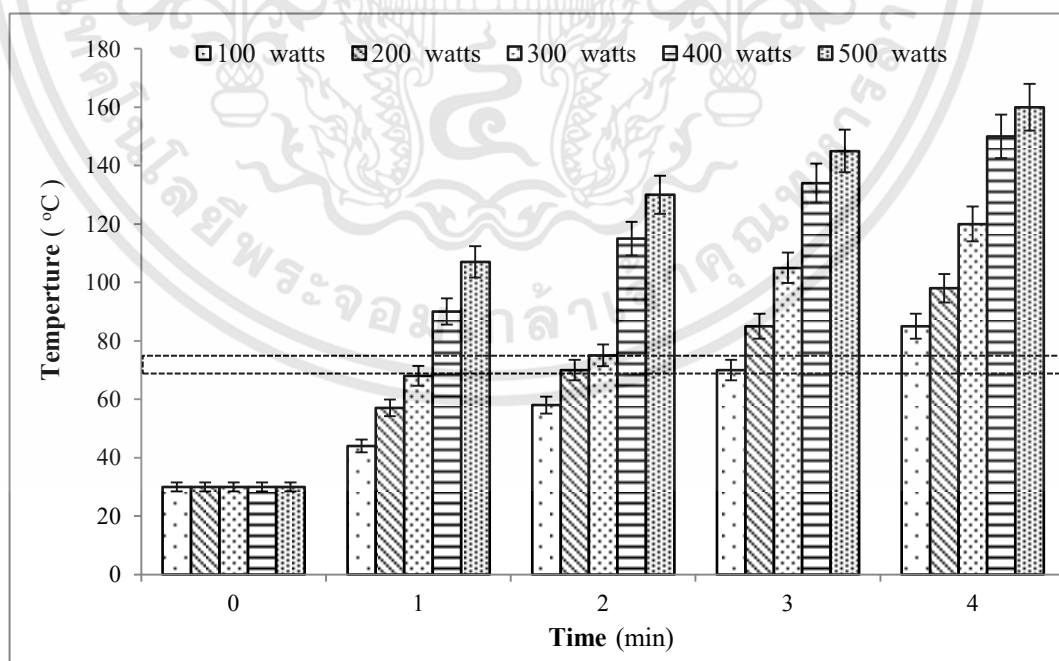
4.5.1 อิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาที่มีผลต่อสถานะการอุ่นด้วยพลังงานไมโครเวฟของผลิตภัณฑ์สายพานลำเลียงอาหาร

เป็นการศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนของสายพานลำเลียงอาหารที่ประกอบด้วยจำนวนชั้นผ้า 3 ชั้น ความหนาขอบบน 2.5 มิลลิเมตร และความหนาขอบล่าง 1.5 มิลลิเมตร ซึ่งความหนารวมเท่ากับ 7 มิลลิเมตร นำมาอุ่นด้วยพลังงานไมโครเวฟที่ 100 ถึง 500 วัตต์ ที่คลื่นความถี่ 2.45 GHz ดังนั้นตามภาพที่ 4.22 เมื่อพลังงานไมโครเวฟตกกระทบวัสดุไดอิเล็กตริกจะทำให้พลังงานบางส่วนจะถูกส่งผ่าน บางส่วนจะสะท้อนกลับ และบางส่วนถูกดูดซับไว้โดยตัววัสดุ หลังจากนั้นจะค่อยๆ เปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเสียดสีกันของสายโซ่โมเลกุลที่มีขั้วภายในตัววัสดุที่พยายามจัดเรียงตัวใหม่ตามการสลับขั้วของสนามไฟฟ้า ดังนั้นพลังงานที่เกิดขึ้นในวัสดุมีความสัมพันธ์กับความถี่ของแหล่งกำเนิด dielectric loss ของวัสดุและความเข้มของสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังสองที่วัสดุได้รับ[132] และพบว่าเมื่อเพิ่มกำลังวัตต์ให้กับชิ้นงาน ทำให้อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิก็จะเพิ่มตามไปด้วยเนื่องจากเมื่อกำลังวัตต์มากขึ้นความเข้มของสนามไฟฟ้ามากขึ้น ส่งผลให้การดูดซับพลังงานไมโครเวฟมากขึ้นตามไปด้วย[68] ซึ่งทำให้เกิดความร้อนภายในมากขึ้น ดังนั้นที่กำลังวัตต์สูงการเพิ่มอุณหภูมิมักมากขึ้นเนื่องจากความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทำให้โมเลกุลของยางคอมปาวด์ได้รับความร้อนมากขึ้นอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิจึงมีมากกว่าที่กำลังวัตต์ต่ำ และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากอัตราการเปลี่ยนพลังงานไมโครเวฟเป็นพลังงานความร้อนมีมากกว่าการสูญเสียความร้อนออกสู่ภายนอก

เวลาในการใช้อุ่นด้วยพลังงานไมโครเวฟของผลิตภัณฑ์สายพานลำเลียงอาหารจะน้อยกว่าสภาวะที่อุ่นยางคอมปาวด์สายพานลำเลียงอาหาร เนื่องจากในสภาวะประกอบของสายพานนั้นประกอบด้วย ยางผิวชั้นบน ผ้า ยางน้ำกาว ยางผิวชั้นล่าง (ตามภาพที่ 2.2 : ส่วนประกอบสายพานลำเลียง) และในแต่ละชั้นผ้าก็จะมียางน้ำกาวเคลือบอยู่ด้วยทุกชั้น ซึ่งยางน้ำกาวจะเป็นจะมีส่วนประกอบของน้ำอยู่ด้วย จะทำให้วัสดุที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบ การเกิดความร้อนเมื่อได้รับพลังงานไมโครเวฟ ซึ่งจะได้รับอิทธิพลมาจากผลของโมเลกุลของน้ำที่มีรูปแบบเป็นไดโพล เมื่อวัสดุดังกล่าวได้รับพลังงานไมโครเวฟ ดังนั้นโมเลกุลของน้ำที่อยู่ภายในตัววัสดุจะเกิดการเคลื่อนที่เพื่อจัดเรียงตัวตามสนามไฟฟ้า ทำให้เกิดการเสียดสีกันเกิดเป็นพลังงานความร้อนสูงขึ้น[100] พบว่าตามสมมติฐานพฤติกรรมของความร้อนภายในชิ้นงานต้องอยู่ในช่วง $70-75^{\circ}\text{C}$ ซึ่งจะไม่ทำให้โครงสร้างทางเคมีของยางและผ้าเสียหาย ซึ่งที่สภาวะ 100, 200 และ 300 วัตต์ ใช้ระยะเวลา 3, 2 และระหว่าง 1 ถึง 2 นาที ตามลำดับเป็นสภาวะที่เหมาะสมซึ่งสามารถเลือกใช้ได้ตามรูปแบบกระบวนการกระบวนการผลิต ดังนั้นสำหรับการทดลองในครั้งนี้ได้เลือกใช้รูปแบบกระบวนการผลิตที่สภาวะพลังงานไมโครเวฟ 300 วัตต์ ใช้ระยะเวลาในการอุ่น 2 นาที

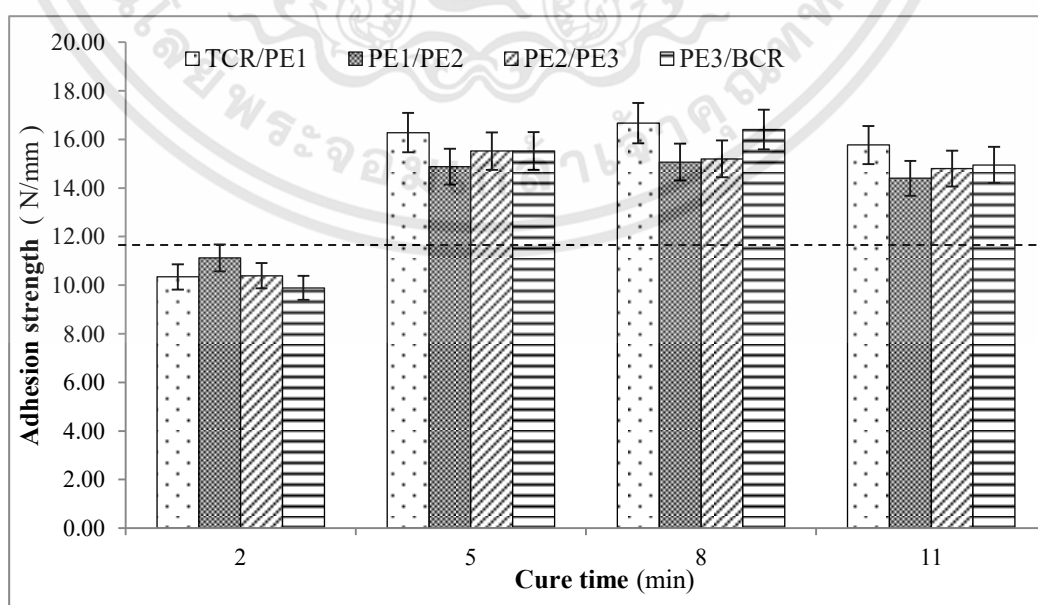


ภาพที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของผลิตภัณฑ์สายพานลำเลียงอาหาร เมื่อผ่านพลังงานไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.2 การทดสอบสมบัติแรงยึดติดแน่นเพื่อยืนยันผลการทดลอง

การทดสอบการยึดเหนี่ยวหรือการทดสอบแรงยึดติดแน่น เป็นการทดสอบโดยการแยกระหว่างชั้นของไส้ในด้วยกัน และวัสดุหุ้มกับไส้ในของสายพานลำเลียงอาหารในกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่องจากการอุ่นด้วยพลังงานไมโครเวฟที่กำลัง 300 วัตต์ ที่คลื่นความถี่ 2.45 GHz ใช้เวลา 2 นาที หลังจากนั้นนำไปอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกที่แรงดัน 200 kg/cm³ ที่อุณหภูมิ 150°C ตามระยะเวลาการวัลคาไนซ์ที่ 2, 5, 8 และ 11 นาที จากภาพที่ 4.23 พบว่าสถานะของเวลาการวัลคาไนซ์ที่ 5, 8 และ 11 นาที จะให้คุณสมบัติแรงยึดติดแน่นของ TCR/PE1, PE1/PE2, PE2/PE3 และ PE3/BCR มีค่าสูงกว่ามาตรฐานของโรงงานผู้ผลิตคือ 12 N/mm เนื่องจากการใช้พลังงานไมโครเวฟในการให้ความร้อนซึ่งเป็นการให้ความร้อนเชิงปริมาตร จะทำให้ยางมีความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและอุณหภูมิภายในเนื้อยางกระจายตัวอย่างทั่วถึงภายในเวลาอันรวดเร็วเนื่องจากความสามารถในการทะลุทะลวงของคลื่นไมโครเวฟ[68] ซึ่งกลไกความสามารถในการทะลุทะลวงของคลื่นไมโครเวฟสามารถอธิบายคือ ภายในวัสดุไดอิเล็กตริกจะมีไดโพลของแต่ละโมเลกุลเรียงตัวอยู่อย่างไม่เป็นระเบียบ ซึ่งไดโพลในแต่ละโมเลกุลจะประกอบไปด้วยขั้วบวกและขั้วลบ เมื่อมีสนามไฟฟ้าวิ่งผ่านวัสดุไดอิเล็กตริกทำให้ไดโพลในแต่ละโมเลกุลจะเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบและสลับขั้วกันตามการเปลี่ยนแปลงของคลื่นซึ่งจากการสลับขั้วไปมาอย่างรวดเร็วของไดโพลทำให้เกิดการเสียดสีกัน ชนกันกับโมเลกุลตัวอื่นๆ เกิดพลังงานออกมาในรูปของความร้อนภายในโมเลกุลและเนื่องจากโมเลกุลอยู่ภายในวัสดุดังกล่าว เมื่อเกิดความร้อนจากตัวโมเลกุลด้านใน แล้วค่อยส่งความร้อนออกมาสู่ภายนอก [4] และเมื่อพิจารณา PE1/PE2 และ PE2/PE3 พบว่าค่าแรงยึดติดแน่นมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาการวัลคาไนซ์สูงขึ้น เนื่องจากชั้นผ้าใบมีโครงสร้างโมเลกุลที่เกาะกันอย่างหลวมๆ กว่ายางคอมพาวด์ เมื่อใช้พลังงานไมโครเวฟในการให้ความร้อน จะทำให้ความร้อนจากภายในเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและกระจายตัวอย่างทั่วถึงภายในระยะเวลาอันรวดเร็วมาก เมื่อระยะเวลาเท่ากันทำให้วัสดุถ่ายเทความร้อนออกสู่อากาศภายนอกได้ช้ากว่า ประกอบกับการนำมาอัดขึ้นรูปด้วยระยะเวลาการวัลคาไนซ์ที่นานจึงเป็นสาเหตุทำให้เกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน



ภาพที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติแรงยึดติดแน่นของ TCR/PE1, PE1/PE2,

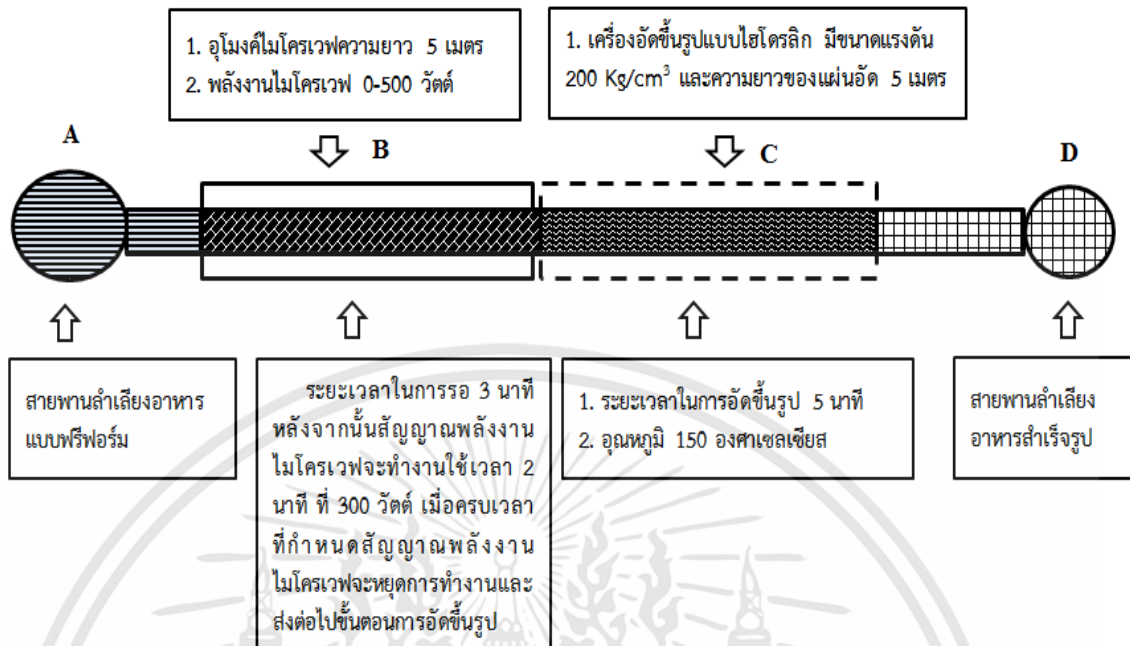
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของโรงเรียนพระยาธรรมศาสตร์แห่งประเทศไทย โดยอนุญาตให้ใช้ประโยชน์ในการค้า
PE2/PE3 และ PE3/BCR กับระยะเวลาการวัลคาไนซ์
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.3 การออกแบบกระบวนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์สายพานลำเลียงอาหารโดยใช้พลังงานไมโครเวฟร่วมกับวิธีให้ความร้อนแบบดั้งเดิม

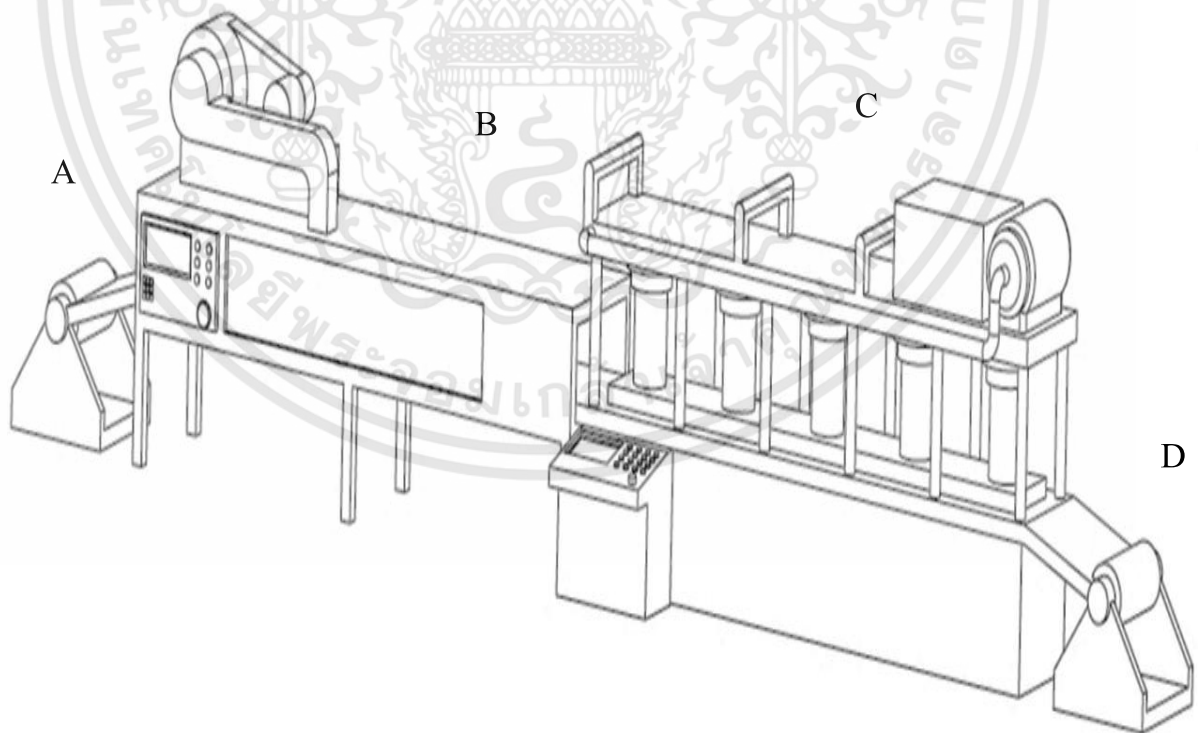
4.5.3.1 การออกแบบกระบวนการทำความร้อนแบบระบบต่อเนื่อง

คือกระบวนการแรกจะเป็นการอุ่นวัสดุโดยการใช้อุปกรณ์ไมโครเวฟ ก่อนเข้าสู่กระบวนการวัลคาไนซ์ (vulcanization process) โดยใช้ระบบอัดขึ้นรูปด้วยแผ่นความร้อน พร้อมทั้งคำนึงถึงการประหยัดพลังงาน และคุณภาพของวัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการเป็นสำคัญ[4] สำหรับระบบไมโครเวฟที่ใช้จำนวนแมกนีตรอนกำลังต่ำจำนวนหลายตัว (multiple low power magnetron) ในการให้ความร้อน จะช่วยทำให้เกิดการกระตุ้นการเกิดโหนดใหม่ ๆ ภายในควิตได้ง่ายขึ้น ทำให้รูปแบบหรือประสิทธิภาพการให้ความร้อนดีขึ้น[142,143] และระบบแบบนี้จะมีเงินลงทุนเบื้องต้นต่ำ เนื่องจากราคาแมกนีตรอนมีราคาถูก เพราะแมกนีตรอนมีกำลังต่ำและไม่มีอุปกรณ์ประกอบของระบบอื่นๆ จึงทำให้ชุดแหล่งกำเนิดคลื่นมีราคาถูก โดยระบบแบบนี้จะติดตั้งตัวแมกนีตรอนไว้รอบๆ ผนังของควิตหรือแอปพลิเคชัน ซึ่งมีความอิสระต่อกัน ถ้าระบบแบบนี้เมื่อเกิดการชำรุดเสียหายของแมกนีตรอนตัวใดตัวหนึ่ง ระบบยังทำงานได้ต่อไป หรือการปิดตัวใดตัวหนึ่งเพื่อซ่อมบำรุงทำได้ง่ายดาย ไม่จำเป็นต้องหยุดเดินเครื่องทั้งระบบและระบบสามารถที่จะเลือกปิดหรือเปิดตำแหน่งแมกนีตรอนใดก็ได้ พร้อมทั้งสามารถปรับกำลังไมโครเวฟได้อย่างสะดวก เนื่องจากเป็นระบบแยกส่วนที่มีแมกนีตรอนหลายตัว และภายในอุโมงค์มีการป้องกันไมโครเวฟหลายตำแหน่ง ทำให้ชิ้นงานได้รับพลังงานคลื่นไมโครเวฟอย่างทั่วถึงและมีช่วงเวลารับคลื่นมากขึ้น รวมทั้งมีระบบควบคุมที่มีประสิทธิภาพสูงทำให้กระบวนการทำความร้อน หรือกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเคมี (chemical reaction acceleration) เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ[132] ระบบที่ได้ออกแบบนี้เหมาะสมกับรูปแบบการทำงานที่ต้องการความต่อเนื่องของกระบวนการ ซึ่งสามารถที่จะนำชิ้นงานมาผ่านกระบวนการผลิตได้อย่างต่อเนื่อง

ภาพที่ 4.24 แสดงกระบวนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์สายพานลำเลียงอาหารโดยใช้พลังงานไมโครเวฟร่วมกับวิธีให้ความร้อนแบบดั้งเดิม คือเริ่มจากจุด (A) สายพานลำเลียงอาหารแบบเรียบแบบพีฟอร์ม (เป็นชิ้นงานที่มีการประกอบระหว่างยางคอมปาวด์กับหน้าผ้าทั้ง 3 ชั้น เสร็จเรียบร้อยแล้ว) จะไหลโดยอัตโนมัติมาที่จุด (B) คืออุโมงค์ไมโครเวฟ และใช้ระยะเวลาที่จุดนี้ 5 นาที คือจะพักรอที่จุดนี้ใช้เวลา 3 นาที (ไม่ได้จ่ายพลังงานไมโครเวฟ) และทำการอุ่นด้วยพลังงานไมโครเวฟที่ 300 วัตต์ คลื่นความถี่ที่ 2.45 GHz เป็นระยะเวลา 2 นาที หลังจากนั้นสายพานลำเลียงอาหารแบบเรียบที่ผ่านพลังงานไมโครเวฟจะไหลอัตโนมัติไปที่จุด (C) คือเครื่องอัดขึ้นรูปแบบไฮดรอลิกจะใช้ระยะเวลาในการอบสุกของยาง 5 นาที ที่อุณหภูมิ 150°C เมื่อครบตามเวลาที่กำหนดจะไหลไปจัดเก็บที่จุด (D) คือเป็นสินค้าสำเร็จรูป และสามารถจำลองแบบกระบวนการตามภาพที่ 4.25 และภาพที่ 4.26 ตามลำดับ

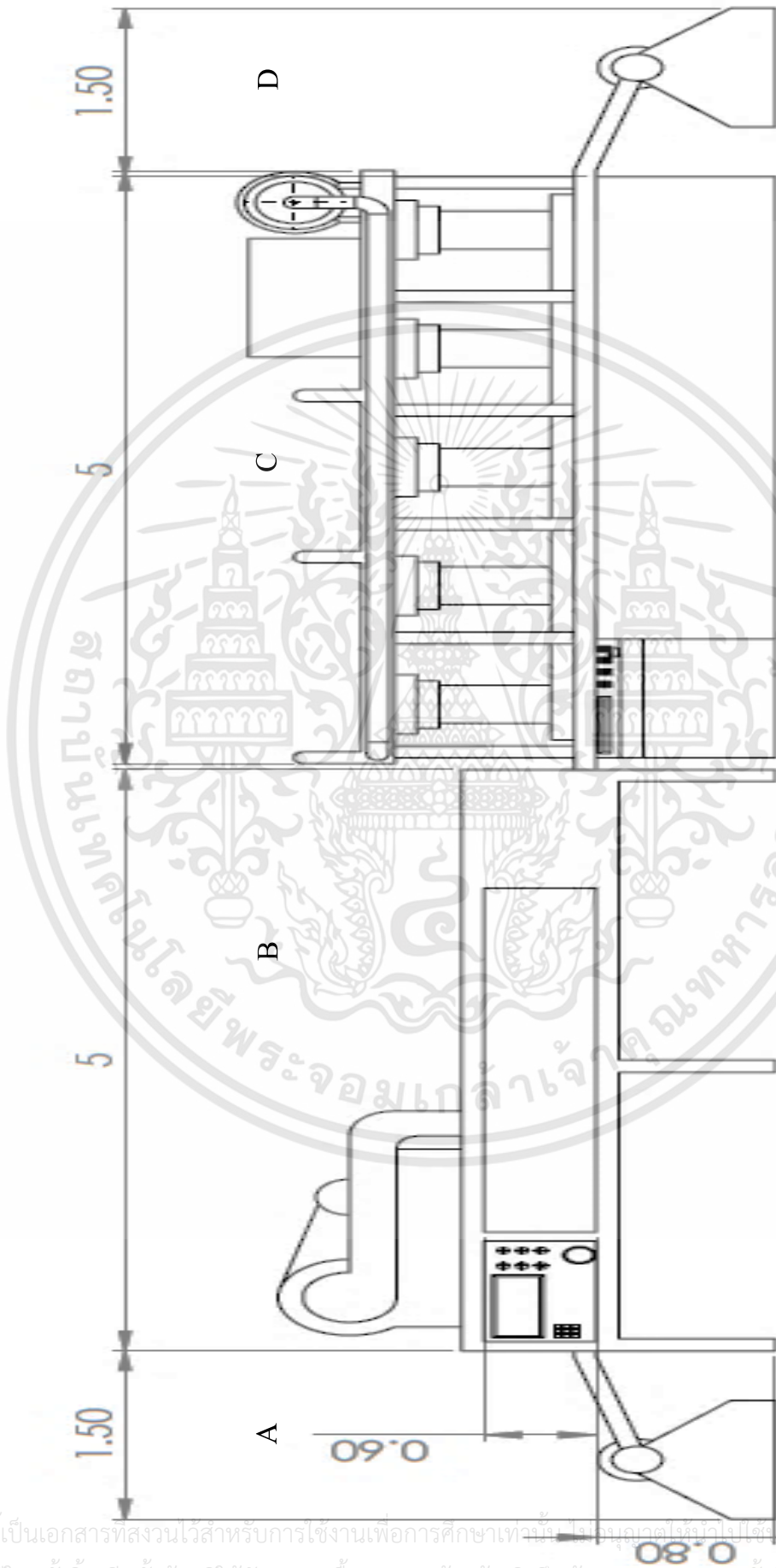


ภาพที่ 4.24 แผนผังกระบวนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์สายพานลำเลียงอาหารโดยใช้พลังงานไมโครเวฟร่วมกับวิธีให้ความร้อนแบบดั้งเดิม



ภาพที่ 4.25 แบบจำลองกระบวนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์สายพานลำเลียงอาหารโดยใช้พลังงานไมโครเวฟร่วมกับวิธีให้ความร้อนแบบดั้งเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.26 แบบจำลองกระบวนการจัดซื้อวัสดุภัณฑ์สายพานลำเลียงอาหารโดยใช้พลังงานไมโครเวฟร่วมกับวิธีให้ความร้อนแบบบูรณาตราส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.3.2 การออกแบบกระบวนการเพื่อความปลอดภัย

ในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์สายพานลำเลียงอาหารด้วยกระบวนการทำความร้อนแบบระบบผสม จะทำการออกแบบระบบทำงานเป็นกะ (batch systems) คือระบบจะมีลักษณะเป็นควาวิตี้ โดยที่ตัวแมกนีตรอนติดตั้งประกบกับตัวควาวิตี้ ดังนั้นแหล่งที่จะทำให้เกิดการรั่วก็คือบริเวณประตูเปิดและปิดของระบบ ซึ่งบริเวณเปิดและปิดจะมีซีลป้องกันรองรับขอบของประตู โดยทั่วไปบริเวณซีลประตูนี้จะออกแบบให้เป็นลักษณะที่เรียกว่า ควอเตอร์เวฟเลงโซค (quarter wavelength choke)[144] โดยจะทำการลดคลื่นที่รั่วออกให้ต่ำกว่าพิกัดที่ยอมรับได้ ซึ่งการรั่วไหลที่ระยะ 5 เซนติเมตร จากตัวเครื่องต้องมีการรั่วไหลของคลื่นไม่เกิน 5 mW/cm^2 และในขณะที่ระบบไมโครเวฟทำงานจะมีระบบอินเตอร์ลอคเพื่อที่จะทำการตัดระบบการทำงานของแหล่งจ่ายคลื่น (แมกนีตรอน) โดยอัตโนมัติ หากประตูของตัวตู้ปิดไม่สนิท หรือหากเกิดกรณีมีคลื่นรั่วออกมาจากระบบเกินพิกัดที่กำหนดไว้ ระบบอินเตอร์ลอคก็จะตัดระบบทันที

4.5.3.3 ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและการประหยัดพลังงาน

เทคโนโลยีการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ เป็นเทคโนโลยีสะอาดไม่ก่อการเกิดมลพิษทางอากาศเนื่องจากใช้พลังงานไฟฟ้าเปลี่ยนเป็นพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือไมโครเวฟ โดยใช้แมกนีตรอนเป็นตัวกำเนิดคลื่น ส่วนการประหยัดพลังงานของเทคโนโลยีการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ เนื่องจากว่าการทำความร้อนด้วยวิธีนี้มีประสิทธิภาพสูง โดยพลังงานคลื่นที่ส่งผ่านไปยังวัสดุและมีการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นในวัสดุโดยตรง ทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมในการถ่ายเทพลังงานความร้อนไม่เกิดการสูญเสีย

จากสภาวะการอุ่น FCBC ใส่สารตัวเติมผสมและมีปริมาณกำมะถันที่ 1.0 phr ด้วยพลังงานไมโครเวฟ 300 วัตต์ ที่คลื่นความถี่ 2.45 GHz เป็นเวลา 2 นาทีที่สามารถทำให้ยางคอมปาวด์มีความร้อยภายในชิ้นงานที่ 70-75 องศาเซลเซียสก่อนการอัดขึ้นรูปด้วยระบบไฮดรอลิกที่อุณหภูมิ 150°C เวลา 5 นาทีและสามารถลดเวลาที่ใช้ในการอบสุกยาง (curing time) ได้ 30% ต่อบรรณการผลิตเมื่อเทียบกับระบบที่ไม่ได้มีการอุ่นให้ความร้อน และเมื่อทำการเปรียบเทียบด้านพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ส่งผลให้ลดพลังงานจากปกติที่ไม่มีการอุ่นด้วยความร้อนได้ 49.20% ต่อบรรณการผลิต (รายละเอียดตามภาคผนวก ข: ต้นทุนกระบวนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์สายพานลำเลียงอาหาร)

4.5.4 กำลั้งการผลิต และต้นทุนการผลิต

โครงการผลิตผลิตภัณฑ์สายพานลำเลียงอาหาร มีกำลั้งการผลิต 102,000 เมตรต่อปี ซึ่งมีมิติ กว้าง x ยาว x หนา : 0.5 เมตร x 5 เมตร x 7 มิลลิเมตร สำหรับต้นทุนการผลิตจะแสดงค่าใช้จ่ายในการดำเนินกิจกรรมทางการผลิตเพื่อให้ได้มาซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ดี มีคุณภาพ ตามความต้องการของลูกค้า ดังแสดงตามตารางที่ 4.8 (รายละเอียดตามภาคผนวก ข: ราคาขายผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป ต้นทุนวัตถุดิบการผลิต ต้นทุนกระบวนการผสมยางกับสารเคมี และต้นทุนกระบวนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์สายพานลำเลียงอาหาร: เพื่อการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม และตารางที่ ข-8 ต้นทุนการผลิตผลิตภัณฑ์สายพานลำเลียงอาหารของกระบวนการผลิตแบบใหม่ในปีแรก)

ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบราคาต้นทุนการผลิตระหว่างแบบเดิมกับแบบใหม่

รายการ	รายละเอียด		การเปลี่ยนแปลง
	แบบเดิม	แบบใหม่	
1.ราคาขายผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป (บาท/ ชุด)	5,000.00	5,650.00	+ 650
2.ราคาต้นทุนวัตถุดิบ (บาท/ ชุด)	4,673.50	4,548.00	- 125.50
3.กระบวนการผสม (นาที่/ ชุด)	16	12	- 4
กำลังการผลิต (8 ชม./ ชุด)	30	40	+ 10
ค่าแรงงาน 2 คน (8 ชม./ บาท)	600	600	0
ค่าพลังงานไฟฟ้า (บาท/ ชุด)	600	450	- 150
4.กระบวนการอัดขึ้นรูป (นาที่/ ชุด)	20	5	- 15
ระยะเวลาผ่านตู้ไมโครเวฟ (นาที่/ ชุด)	0	2	+ 2
กำลังการผลิต (8 ชม./ ชุด)	24	68	+ 44
ค่าแรงงาน 2 คน (8 ชม./ บาท)	600	600	0
ค่าพลังงานไฟฟ้า (บาท/ ชุด)	7.50	3.75	- 3.75
ค่าพลังงานไฟฟ้า (ไมโครเวฟ) (บาท/ ชุด)	0	0.06	+ 0.06

4.5.5 จุดคุ้มทุนและปริมาณการผลิตที่จุดคุ้มทุน

ในการลงทุนเพื่อให้ได้ผลตอบแทนตามที่ต้องการเป็นเรื่องที่ผู้บริหารจะต้องเผชิญ โดยเฉพาะการลงทุนเพื่อขยายกิจการและการลงทุนเพื่อการปรับปรุง เนื่องจากการลงทุนที่ต้องใช้งบประมาณจำนวนมาก จึงต้องมีการวางแผนอย่างรอบคอบ สำหรับโครงการผลิตผลิตภัณฑ์สายพานลำเลียงอาหาร จึงได้มีการวิเคราะห์จุดคุ้มทุนและปริมาณการผลิตที่จุดคุ้มทุนของกระบวนการผลิตแบบเดิม แบบใหม่ และแบบประยุกต์ ซึ่งจำเป็นจะต้องมีการรวบรวมข้อมูลต้นทุนการผลิตที่มีความเกี่ยวข้องกับ กำลังการผลิต ราคาขายต่อหน่วย รายรับ ต้นทุนคงที่ ต้นทุนผันแปร และต้นทุนรวม เป็นต้น ดังนั้นจะแสดงกำลังการผลิตต่อปีในปีแรกของการลงทุน ดังแสดงรายละเอียดตามตารางที่ 4.9 สำหรับการคำนวณปริมาณที่จุดคุ้มทุน (Breakeven Quantity : Q_{BE}) = $FC / (P - V)$

Q_{BE} = ปริมาณที่จุดคุ้มทุน

FC = ต้นทุนคงที่ คือต้นทุนที่ไม่ขึ้นอยู่กับจำนวนหน่วยการผลิต

VC = ต้นทุนผันแปร คือต้นทุนที่ขึ้นอยู่กับจำนวนหน่วยการผลิต

TC = ต้นทุนรวม

P = ราคาต่อหน่วย

v = ต้นทุนผันแปรต่อหน่วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 ต้นทุนการผลิตผลิตภัณฑ์สายพานลำเลียงอาหารที่กำลังการผลิตต่อปีในปีแรก

รายการ	หน่วย	กำลังการผลิตต่อปี (ในปีแรก)	
		แบบเดิม	แบบใหม่
กำลังการผลิต	เมตร	36,000	102,000
ราคาขายผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป	เมตร/บาท	1,000	1,130
รายรับ	บาท	36,000,000	115,260,000
FC-ต้นทุนคงที่			
*เครื่องจักร ชุดเตาไมโครเวฟ	บาท	0	3,099,999.80
เงินโบนัสพนักงาน_ 3 เดือน	บาท	45,000	45,000
ประกันภัยโรงงาน	บาท	60,000	60,000
รวม-ต้นทุนคงที่	บาท	105,000	3,204,999.80
ต้นทุนคงที่ต่อหน่วย	บาท	2.92	31.42
VC-ต้นทุนผันแปร			
ค่าแรงงาน_หน่วยอัดขึ้นรูป	บาท	180,000	180,000
ค่าวัตถุดิบ_ยางคอมปาวด์	บาท	25,365,600	71,869,200
ค่าวัตถุดิบ_ผ้าโพลีเอสเตอร์	บาท	5,940,000	16,830,000
ค่าวัตถุดิบ_ยางน้ำขาว	บาท	1,440,000	4,080,000
ค่าพลังงาน_ไฟฟ้า	บาท	55,080	76,500
ค่าพลังงาน_ไมโครเวฟ	บาท	0	1,224
ค่าการตลาด	บาท	35,294	100,000
ค่าวัสดุสิ้นเปลืองโรงงาน	บาท	21,176	60,000
ค่าใช้จ่ายเบ็ดเตล็ดโรงงาน	บาท	17,647	50,000
ค่าใช้จ่ายซ่อมบำรุง	บาท	31,765	90,000
รวม-ต้นทุนผันแปร	บาท	33,086,562	93,336,924
ต้นทุนผันแปรต่อหน่วย	บาท	919.07	915.07
ต้นทุนรวม	บาท	33,191,562	96,541,923.80
ต้นทุนรวมต่อหน่วย	บาท	921.99	946.49

หมายเหตุ

1. กำลังการผลิต 300 วันต่อปี จำนวนแบบเต็มกำลังการผลิต 8 ชั่วโมงต่อวัน
2. ปริมาณการขายเท่ากับปริมาณการผลิต
3. * จำนวนจากค่าเสื่อมราคาของแต่ละปีตามสมมติฐานที่ตั้งไว้คือ คิดค่าเสื่อมเครื่องจักรที่ 5 ปีโดยวิธีเส้นตรง และปีที่ 5 เครื่องจักรมีมูลค่าซาก 1 บาท

ตารางที่ 4.10 แสดงจุดคุ้มทุนและปริมาณการผลิตที่จุดคุ้มทุนของกระบวนการผลิตสำหรับโครงการผลิตผลิตภัณฑ์สายพานลำเลียงอาหารจะมีการคำนวณตามสมมติฐาน 3 แบบคือ แบบเดิม แบบใหม่ และแบบประยุกต์ ดังนี้

1) แบบเดิม ใช้ข้อมูลของกระบวนการผลิตแบบดั้งเดิม คือ ต้นทุนคงที่ 105,000 บาท ราคาขายต่อหน่วย 1,000 บาท และต้นทุนผันแปรต่อหน่วย 919.07 บาท ซึ่งจะได้ปริมาณการผลิตที่จุดคุ้มทุนเท่ากับ 1,297.42 เมตร

วิธีแบบเดิม เหมาะสำหรับสถานประกอบการที่ไม่สามารถเพิ่มยอดการผลิตให้สูงขึ้นได้ เนื่องจากข้อจำกัดด้านกำลังการผลิตของเครื่องจักร ซึ่งเครื่องอัตโนมัติจะต้องใช้เวลาในการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่ 20 นาทีต่อผลิตภัณฑ์ 1 ชุด ถ้าหากสถานประกอบการต้องการที่จะเพิ่มกำลังการผลิตตามแผนงานประจำปี จะต้องเตรียมงบประมาณที่มีจำนวนมาก อาทิเช่น ต้องเพิ่มสายการผลิตใหม่ ดังนั้นต้นทุนที่จะเกิดขึ้นได้แก่ การสร้างอาคารโรงงาน การจ้างแรงงาน และการซื้อเครื่องจักรชุดใหม่ เป็นต้น

2) แบบใหม่ ใช้ข้อมูลของกระบวนการผลิตแบบใหม่ที่ได้จากงานวิจัยในครั้งนี้ ซึ่งเป็นการนำพลังงานไมโครเวฟเข้ามาช่วยอุ่นยางคอมพาวด์ก่อนการนำไปอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์คือ ต้นทุนคงที่ 3,204,999.80 บาท ราคาขายต่อหน่วย 1,130 บาท และต้นทุนผันแปรต่อหน่วย 915.07 บาท ซึ่งจะได้ปริมาณการผลิตที่จุดคุ้มทุนเท่ากับ 14,911.83 เมตร

วิธีแบบใหม่ เหมาะสำหรับสถานประกอบการที่ต้องการเพิ่มยอดการผลิตโดยสามารถใช้เครื่องจักรที่มีอยู่เป็นส่วนใหญ่ในกระบวนการผลิตแบบเดิม และไม่เพิ่มกำลังคน ซึ่งเพียงแต่เพิ่มขึ้นตอนในการอุ่นยางคอมพาวด์ก่อนเข้าสู่ขั้นตอนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ซึ่งใช้เวลารวมทั้งกระบวนการเป็นเวลา 7 นาทีต่อการผลิตผลิตภัณฑ์ 1 ชุด ดังนั้นสามารถเพิ่มยอดการผลิตต่อวัน (8 ชั่วโมง) จากการผลิตแบบเดิมคือ 24 ชุด เป็น 68 ชุด (ชุดละ 5 เมตร) และสามารถผลิตผลิตภัณฑ์เกรดพรีเมียม (คุณภาพสูง) ได้ พร้อมทั้งสามารถจำหน่ายได้ในราคาที่สูงกว่าแบบเดิมคือ จากราคา 1,000 บาท เป็น 1,130 บาท และยังสามารถเพิ่มฐานลูกค้ารายใหม่ได้ด้วย ซึ่งกำลังการผลิตตลอดทั้งปีทำให้สถานประกอบการสามารถมีกำไร 69.37% เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการผลิตแบบเดิม

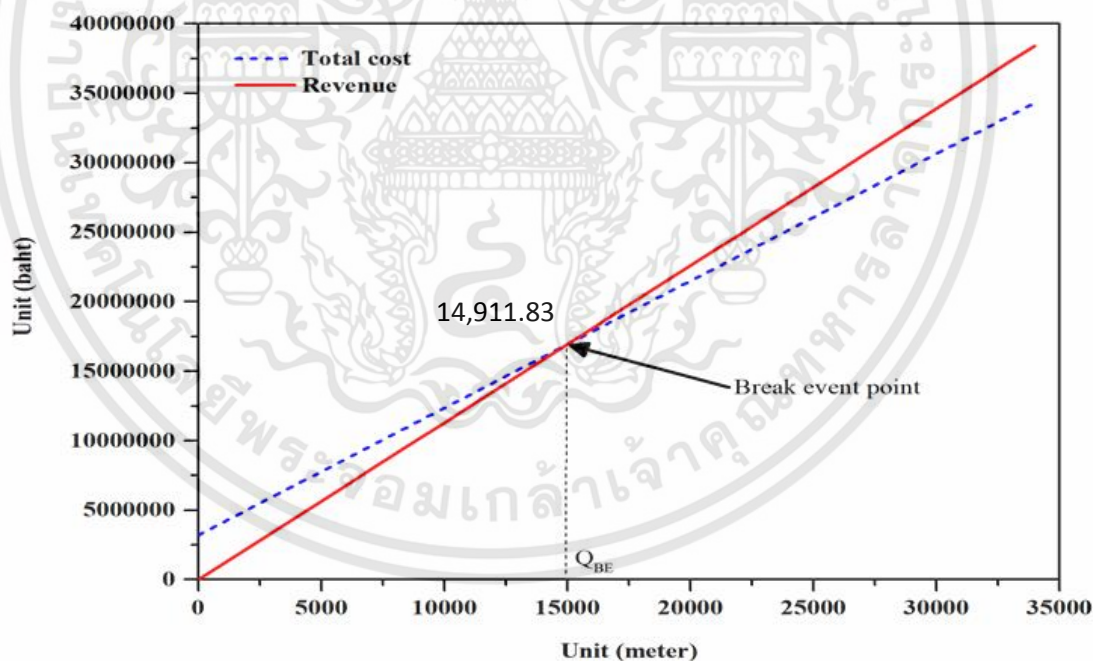
3) แบบประยุกต์ ใช้ข้อมูลราคาขายต่อหน่วยของแบบเดิมและใช้ข้อมูลต้นทุนคงที่ และต้นทุนผันแปรต่อหน่วยของแบบใหม่ คือ ต้นทุนคงที่ 3,204,999.80 บาท ราคาขายต่อหน่วย 1,000 บาท และต้นทุนผันแปรต่อหน่วย 915.07 บาท ซึ่งจะได้ปริมาณการผลิตที่จุดคุ้มทุนเท่ากับ 37,736.96 เมตร

วิธีแบบประยุกต์ เหมาะสำหรับสถานประกอบการที่ได้ทำการปรับปรุงกระบวนการผลิตจากแบบเดิมเป็นแบบใหม่เพื่อเพิ่มยอดการผลิต แต่ยังไม่สามารถเจาะฐานลูกค้าใหม่ได้จึงมีความจำเป็นต้องขายผลิตภัณฑ์ในราคาเดิมคือ 1,000 บาท ซึ่งกำลังการผลิตตลอดทั้งปีทำให้สถานประกอบการสามารถมีกำไร 20.22% เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการผลิตแบบเดิม ดังนั้นถ้าหากสถานประกอบการสามารถหาฐานลูกค้าใหม่ได้เร็วก็สามารถสร้างกำไรได้มากยิ่งขึ้น

ตารางที่ 4.10 จุดคุ้มทุนและปริมาณการผลิตที่จุดคุ้มทุนของกระบวนการผลิต

รายการ	กำลังการผลิตต่อปี						
	Q _{BE} (เมตร)	กำลังการผลิต (เมตร)	ต้นทุน (บาท)	ราคาขาย (บาท)	รายรับ (บาท)	กำไร	
						(บาท)	%
แบบเดิม	1,297.42	36,000	33,191,562	1,000	36,000,000	2,808,438	10.41
แบบใหม่	14,911.83	102,000	96,541,923.80	1,130	115,260,000	18,718,076.20	69.37
แบบประยุกต์	37,736.96	102,000	96,541,923.80	1,000	102,000,000	5,458,076.20	20.22

ภาพที่ 4.27 แสดงจุดคุ้มทุนและปริมาณการผลิตที่จุดคุ้มทุนของกระบวนการผลิตแบบใหม่ ซึ่งจะได้ปริมาณการผลิตที่จุดคุ้มทุนเท่ากับ 14,911.83 เมตร ดังนั้นสามารถกล่าวสรุปได้ว่ากระบวนการผลิตแบบใหม่ เป็นกระบวนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์สายพานลำเลียงอาหารโดยใช้พลังงานไมโครเวฟร่วมกับวิธีให้ความร้อนแบบดั้งเดิม จะสามารถทำให้สถานประกอบการได้รับกำไรจากการดำเนินงานสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการผลิตแบบเดิมและแบบประยุกต์ เนื่องจากปริมาณการผลิตมีจำนวนมากกว่าปริมาณการผลิตที่จุดคุ้มทุน จึงมีความเหมาะสมและความเป็นไปได้ที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมยางต่อไป



ภาพที่ 4.27 จุดคุ้มทุนและปริมาณการผลิตที่จุดคุ้มทุนของกระบวนการผลิตแบบใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 ผลการวิเคราะห์การลงทุนโครงการ

โครงการการพัฒนากระบวนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์สายพานลำเลียงอาหารโดยใช้พลังงานไมโครเวฟร่วมกับวิธีให้ความร้อนแบบดั้งเดิม เป็นการลงทุนเพื่อปรับปรุงแก้ไขกำลังการผลิตที่มีอยู่ ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อให้เป็นที่ยอมรับของลูกค้า หรือต้องการส่วนแบ่งของตลาดมากขึ้น การตัดสินใจในการลงทุนโดยการพิจารณาจากกระบวนการผลิตแบบเดิม ซึ่งการวิเคราะห์ด้านการเงินเป็นส่วนสำคัญที่สุดส่วนหนึ่งของการวิเคราะห์ความเป็นไปได้การลงทุนโครงการ เพราะมีความสำคัญต่อความสำเร็จของโครงการ พร้อมทั้งการบริหารทางการเงินที่ดีสามารถช่วยให้กำไรของโครงการเพิ่มขึ้น และทำให้โครงการมีการจัดการทางการเงินอย่างมีประสิทธิภาพ สามารถบรรลุเป้าหมายได้ตามขั้นตอนของการดำเนินโครงการได้ ถ้าไม่สามารถควบคุมรายจ่ายได้ ธุรกิจก็จะขาดทุน ซึ่งส่งผลให้ธุรกิจต้องหยุดการดำเนินการ หรือเลิกกิจการไป ดังนั้นธุรกิจจึงต้องมีการจัดการทางการเงินเพื่อให้บรรลุเป้าหมายแห่งการอยู่รอด และความเจริญเติบโตของโครงการ ซึ่งในการวิจัยนี้ ผู้วิจัยต้องอาศัยข้อมูล ด้านการตลาด ด้านเทคนิค ด้านสิ่งแวดล้อม และด้านการจัดการ เป็นต้น ในการพิจารณาเชิงประมาณต้นทุนและผลตอบแทนของโครงการ รายละเอียดในค่าใช้จ่ายต่างๆ นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์ถึงอัตราผลตอบแทน ระยะเวลาคืนทุน และผลด้านการเงินภายใต้ความไม่แน่นอนของเศรษฐกิจ

สำหรับการวิเคราะห์การลงทุนโครงการ เพื่อความสะดวก รวดเร็ว และความแม่นยำในการคำนวณผู้วิจัยจึงได้นำโปรแกรมสำเร็จรูปการวิเคราะห์การลงทุน (Investment Analysis, Version 2.0 Beta) มาช่วยในการวิเคราะห์ โดยแหล่งที่มาของโครงการนี้ มีเงินลงทุนทั้งสิ้น 16,500,000 บาท มีสัดส่วนการลงทุน (ส่วนของเจ้าของ : สถาบันการเงิน) คือ 3% : 97% ซึ่งประกอบด้วย ส่วนของเจ้าของ 500,000 บาท และจากสถาบันทางการเงิน 16,000,000 บาท สามารถแบ่งเป็นหนี้สินระยะยาว 15,000,000 บาทและหนี้สินระยะสั้น 1,000,000 บาท แสดงรายละเอียดตามตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 การกำหนดโครงสร้างการลงทุน

HOME		คำนวณค่าเสื่อมราคา	เงินกู้ระยะยาว	กรุณาใส่ข้อมูลเฉพาะในช่อง(เซลล์)ที่เป็นสีฟ้า	
กำหนดโครงสร้างการลงทุน					
ลำดับที่	รายการลงทุน	มูลค่าการลงทุน แยกตามแหล่งที่มาของเงินทุน (บาท)		รวมมูลค่าการลงทุน (1) + (2)	สัดส่วนการลงทุน (ตัวเลข : สถาบันการเงิน)
		(1) นำมาจากทุนของตัวเอง	(2) นำมาจากสถาบันการเงิน		
1	ที่ดิน			-	-
2	อาคารโรงงาน/สำนักงาน			-	-
3	เฟอร์นิเจอร์และตกแต่ง			-	-
4	เครื่องจักร ชุดเตาไมโครเวฟ	500,000.00	15,000,000.00	15,500,000.00	3% : 97%
5	อุปกรณ์เครื่องใช้สำนักงาน			-	-
6	ยานพาหนะ			-	-
7	อื่นๆ (ระบุ...สินทรัพย์ถาวร)			-	-
8	อื่นๆ (ระบุ...สินทรัพย์ถาวร)			-	-
9	อื่นๆ (ระบุ...สินทรัพย์ถาวร)			-	-
10	เงินสด (สำหรับใช้หมุนเวียน)		1,000,000.00	1,000,000.00	0% : 100%
	รวม	500,000.00	16,000,000.00	16,500,000.00	3% : 97%

เอกสารนี้เป็น

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.1 วิเคราะห์ประมาณการเงินลงทุนของโครงการ

ค่าใช้จ่ายในการลงทุนทั้งหมดของโครงการการพัฒนากระบวนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์สายพานลำเลียงอาหารโดยใช้พลังงานไมโครเวฟร่วมกับวิธีให้ความร้อนแบบดั้งเดิม จะแบ่งเป็น 3 ส่วน ซึ่งประกอบด้วยค่าใช้จ่ายก่อนการดำเนินการ สินทรัพย์ถาวร และเงินทุนหมุนเวียน สำหรับค่าใช้จ่ายในการลงทุนทั้งหมดของโรงงานแต่ละส่วนมีรายละเอียด ดังนี้

4.6.1.1 ค่าใช้จ่ายก่อนการดำเนินการ

สำหรับค่าใช้จ่ายก่อนการดำเนินการ ได้แก่ ค่าใช้จ่ายในการบริหาร หรือค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจากการติดต่อหน่วยงานต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างการก่อสร้าง และการติดตั้งต่างๆ ตามความต้องการของโครงการ ก่อนที่จะมีการดำเนินงานจริง ซึ่งค่าใช้จ่ายก่อนการดำเนินงานโดยประมาณ ประกอบด้วยรายการต่างๆ ดังนี้

ค่าที่ปรึกษาและค่าใช้จ่ายในการเตรียมการลงทุน	50,000	บาท
ค่าธรรมเนียมขออนุญาตต่าง ๆ	5,000	บาท
ค่าติดต่อสื่อสาร	5,000	บาท
ค่าใช้จ่ายในการกู้เงิน	25,000	บาท
ค่าใช้จ่ายในการทดลองผลิต	35,000	บาท
รวม	120,000	บาท

4.6.1.2 ค่าใช้จ่ายในสินทรัพย์ถาวร

สำหรับค่าใช้จ่ายในสินทรัพย์ถาวร ได้แก่ ค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นเพื่อการติดตั้ง และประกอบชุดเตาไมโครเวฟ ซึ่งเงินลงทุนในสินทรัพย์ถาวรโดยประมาณ ประกอบด้วยชุดเตาไมโครเวฟสำเร็จรูปจำนวน 1 ชุด ราคาชุดละ 15,500,000 บาท

4.6.1.3 เงินทุนหมุนเวียน

สำหรับเงินทุนหมุนเวียน ได้แก่ จำนวนเงินส่วนที่ต้องการใช้เพื่อในการจัดหาสินทรัพย์หมุนเวียนที่จำเป็นสำหรับการดำเนินงาน ได้แก่ วัสดุดิบ 500,000 บาท อุปกรณ์การผลิต 350,000 บาท และเงินสดในมือ 150,000 บาท ซึ่งเงินทุนหมุนเวียนของโครงการทั้งหมดโดยประมาณเท่ากับ 1,000,000 บาท

4.6.2 วิเคราะห์ประมาณการกระแสเงินสดของโครงการ

สำหรับการประมาณการกระแสเงินสดโครงการการพัฒนากระบวนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์สายพานลำเลียงอาหารโดยใช้พลังงานไมโครเวฟร่วมกับวิธีให้ความร้อนแบบดั้งเดิม จะมีรายการข้อสมมติทางการเงินเพื่อความสมบูรณ์ของโครงการ ดังนี้

4.6.2.1 ระยะเวลาการวิเคราะห์โครงการ 5 ปี

4.6.2.2 อัตราดอกเบี้ยเงินกู้ระยะยาวจากสถาบันการเงินเท่ากับ 7.25% ซึ่งได้ทำการกู้เงินมาลงทุนจำนวน 15,000,000 บาท ระยะเวลา 5 ปี โดยในช่วงประกอบและติดตั้งชุดเตาไมโครเวฟจะต้องจ่ายดอกเบี้ยให้กับสถาบันทางการเงิน ส่วนการชำระคืนเงินต้นจะเริ่มชำระตั้งแต่วันที่ 1 ของการดำเนินธุรกิจจนครบ 5 ปี ซึ่งรายละเอียดการจ่ายเงินต้นและดอกเบี้ยแสดงตามตารางที่ 4.12 และตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.12 หนี้เงินกู้ระยะยาว

กรณนำใส่ข้อมูลเฉพาะในช่อง (เซลล์) ที่เป็นสีฟ้า							
กำหนดโครงสร้างหนี้เงินกู้ระยะยาว (Fixed Loan Structure Settings)							
ชื่อธนาคาร/สถาบันการเงิน		ธนาคารพัฒนาวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม		วันที่เริ่มกู้ (Start Date)		1 ม.ค. 2560	
จำนวนเงินกู้ (Loan Amount)		15,000,000.00 บาท (มาจากหน้าการวิเคราะห์โครงสร้างการลงทุน ผลรวมในช่อง (2) โดยจะไม่รวมหนี้เงินหมุนเวียน)		อัตราดอกเบี้ย (Interest Rate)		7.25% ต่อปี	
				ระยะเวลากู้ (Period)		5 ปี	
งวดที่	ปีที่	วันที่	จำนวนเงินผ่อนชำระ (Installment)			เงินต้นคงเหลือ (Principal)	ผลรวมสะสมของ รวมเงินผ่อนชำระ
			ผ่อนชำระดอกเบี้ย	ผ่อนชำระเงินต้น	รวมเงินผ่อนชำระ		
0	0	1/01/2560				15,000,000.00	
1	1	1/02/2560	90,625.00	208,165.42	298,790.42	14,791,834.58	298,790.42
2	1	1/03/2560	89,367.33	209,423.09	298,790.42	14,582,411.49	597,580.84
3	1	1/04/2560	88,102.07	210,688.35	298,790.42	14,371,723.14	896,371.26
4	1	1/05/2560	86,829.16	211,961.26	298,790.42	14,159,761.88	1,195,161.68
5	1	1/06/2560	85,548.56	213,241.86	298,790.42	13,946,520.02	1,493,952.10
6	1	1/07/2560	84,260.23	214,530.20	298,790.42	13,731,989.83	1,792,742.52
7	1	1/08/2560	82,964.11	215,826.32	298,790.42	13,516,163.51	2,091,532.94
8	1	1/09/2560	81,660.15	217,130.27	298,790.42	13,299,033.25	2,390,323.36
9	1	1/10/2560	80,348.33	218,442.09	298,790.42	13,080,591.15	2,689,113.78
10	1	1/11/2560	79,028.57	219,761.85	298,790.42	12,860,829.30	2,987,904.20
11	1	1/12/2560	77,700.84	221,089.58	298,790.42	12,639,739.73	3,286,694.62
12	1	1/01/2561	76,365.09	222,425.33	298,790.42	12,417,314.40	3,585,485.04

ตารางที่ 4.13 รายการจำนวนเงินผ่อนชำระเงินกู้ระยะยาวตั้งแต่ปีที่ 1-5

ปีที่	จำนวนเงินผ่อนชำระ (บาท)				ผลรวมสะสม (บาท)
	ผ่อนชำระดอกเบี้ย	ผ่อนชำระเงินต้น	รวมเงินผ่อนชำระ	เงินต้นคงเหลือ	
0		1/01/2560		15,000,000.00	
1	76,365.09	222,425.33	298,790.42	12,417,314.40	3,585,485.04
2	59,692.47	239,097.95	298,790.42	9,641,035.09	7,170,970.09
3	41,770.10	257,020.33	298,790.42	6,656,650.61	10,756,455.13
4	22,504.29	276,286.13	298,790.42	3,448,561.74	14,341,940.17
5	1,794.35	296,996.07	298,790.42	0.00	17,927,425.22

4.6.2.3 การคำนวณค่าเสื่อมราคาของสินทรัพย์ถาวร มีการคิดค่าเสื่อมราคาแบบเส้นตรง และมีมูลค่าซากคงเหลือ (ทางบัญชี) ณ.ปีสุดท้ายเท่ากับ 1 บาทสำหรับค่าเสื่อมราคาชุดเตาไมโครเวฟ คิดระยะเวลา 5 ปี ซึ่งรายละเอียดการคำนวณค่าเสื่อมราคาแสดงตามตารางที่ 4 14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.14 ค่าเสื่อมราคา

รายการทรัพย์สินถาวร	จำนวนปี ใช้ประโยชน์	มูลค่าสินทรัพย์	ปีที่ 1	ปีที่ 2	ปีที่ 3	ปีที่ 4	ปีที่ 5
<input type="checkbox"/> ที่ดิน	20	-	-	-	-	-	-
<input type="checkbox"/> อาคารโรงงาน/สำนักงาน	20	-	-	-	-	-	-
<input type="checkbox"/> เฟอร์นิเจอร์และตกแต่ง	10	-	-	-	-	-	-
<input checked="" type="checkbox"/> เครื่องจักร ชุดเตาไมโครเวฟ	5	15,500,000.00	3,099,999.80	3,099,999.80	3,099,999.80	3,099,999.80	3,099,999.80
<input type="checkbox"/> อุปกรณ์เครื่องใช้สำนักงาน	5	-	-	-	-	-	-
<input type="checkbox"/> ยานพาหนะ	5	-	-	-	-	-	-
<input type="checkbox"/> อื่นๆ (ระบุ...สินทรัพย์ถาวร)	5	-	-	-	-	-	-
<input type="checkbox"/> อื่นๆ (ระบุ...สินทรัพย์ถาวร)	5	-	-	-	-	-	-
<input type="checkbox"/> อื่นๆ (ระบุ...สินทรัพย์ถาวร)	5	-	-	-	-	-	-
รวมค่าเสื่อมราคา		15,500,000.00	3,099,999.80	3,099,999.80	3,099,999.80	3,099,999.80	3,099,999.80
ค่าเสื่อมราคา (สะสม)			3,099,999.80	6,199,999.60	9,299,999.40	12,399,999.20	15,499,999.00
มูลค่าซาก			12,400,000.20	9,300,000.40	6,200,000.60	3,100,000.80	1.00

4.6.2.4 ราคาจำหน่ายผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป ราคา 5,650 บาท/ ชุด (5 เมตร) สำหรับเงินเครดิต 60 วัน ซึ่งอัตราการเพิ่มของราคาจำหน่ายในช่วงปีที่ 2-3 และ 4-5 เป็นอัตราร้อยละ 2 และ 3 ตามลำดับ ซึ่งรายละเอียดประมาณการยอดขายตามตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.15 ประมาณการยอดขาย

ลำดับ ที่	ชื่อสินค้า / บริการ	ปีที่ 1	ปีที่ 2	ปีที่ 3	ปีที่ 4	ปีที่ 5
P 1	สายพานลำเลียงอาหาร	115,260,000.00	117,565,200.00	119,916,504.00	123,513,999.12	127,219,419.09
P 2			-	-	-	-
P 3			-	-	-	-
P 4			-	-	-	-
P 5			-	-	-	-
P 6			-	-	-	-
P 7			-	-	-	-
P 8			-	-	-	-
P 9			-	-	-	-
P 10			-	-	-	-
ยอดขายรวม		115,260,000.00	117,565,200.00	119,916,504.00	123,513,999.12	127,219,419.09
Growth			2.00%	2.00%	3.00%	3.00%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.2.5 ราคาวัตถุดิบยางคอมปาวด์กิโลกรัมละ 70.46 บาท ผ้าโพลีเอสเตอร์เพื่อเสริมความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป ราคาเมตรละ 55 บาท และยางน้ำขาวเพื่อการประสานที่ดี ราคาเมตรละ 20 บาท ซึ่งอัตราการเพิ่มของราคาวัตถุดิบรวมทั้งสองประเภทในช่วงปีที่ 2-3 และ 4-5 เป็นอัตราร้อยละ 2 และ 3 ตามลำดับ

4.6.2.6 สำหรับการสูญเสียในการผลิตร้อยละ 2.00

4.6.2.7 วันปฏิบัติงาน 300 วันต่อปี

4.6.2.8 ระยะเวลาทำงานวันละ 8 ชั่วโมงต่อวัน (08.00-17.00 น.)

4.6.2.9 เงินเดือนของพนักงานฝ่ายผลิตในปีแรก 180,000 บาท พร้อมทั้งค่าจ้างเงินเดือนพนักงาน เพิ่มขึ้นทุกปีด้วยอัตรา 5% ต่อปี และค่าเงินโบนัสพนักงาน 3 เดือน และเพิ่มขึ้นทุกปีด้วยอัตราคงที่ 5% ต่อปี

4.6.2.10 โรงงานผลิตสินค้าตามยอดขาย ซึ่งในแต่ละปีจะมีกำลังการผลิตเพิ่มขึ้นในช่วงปีที่ 2-3 และในช่วงปี 4-5 เป็นอัตราร้อยละ 2 และ 3 ตามลำดับ

4.6.2.11 ค่าสาธารณูปโภค เช่น ค่าไฟฟ้า เพิ่มขึ้นทุกปีด้วยอัตรา 3% ต่อปี

4.6.2.12 ค่าใช้จ่ายทางการตลาด เพิ่มขึ้นทุกปีด้วยอัตรา 5% ต่อปี

4.6.2.13 ค่าวัสดุสิ้นเปลืองโรงงาน เพิ่มขึ้นทุกปีด้วยอัตรา 2% ต่อปี

4.6.2.14 ค่าเบี้ยประกันภัย เพิ่มขึ้นทุกปีด้วยอัตราคงที่ 2% ต่อปี

4.6.2.15 ค่าใช้จ่ายเบ็ดเตล็ด เพิ่มขึ้นทุกปีด้วยอัตรา 2% ต่อปี

4.6.2.16 ค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุง เพิ่มขึ้นทุกปีด้วยอัตรา 5% ต่อปี

จากข้อ 4.6.2.5 – 4.6.2.16 ดูรายละเอียดประมาณการต้นทุนขายตามตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.16 ประมาณการต้นทุนขาย

ประมาณการต้นทุนขาย							
ลำดับที่	รายการต้นทุน	ประเภทต้นทุน	ปี				
			ปีที่1	ปีที่2	ปีที่3	ปีที่4	ปีที่5
1	ค่าวัตถุดิบ	ต้นทุนแปรผัน	71,869,200.00	73,306,584.00	74,772,715.68	77,015,897.15	79,326,374.06
2	ค่าวัตถุดิบ ผ้าโพลีเอสเตอร์	ต้นทุนแปรผัน	16,830,000.00	17,166,600.00	17,509,932.00	18,035,229.96	18,576,286.86
3	ค่าวัตถุดิบ ยางน้ำขาว	ต้นทุนแปรผัน	4,080,000.00	4,161,600.00	4,244,832.00	4,372,176.96	4,503,342.27
4	เงินเดือน หน่วยอัตรานี้	ต้นทุนแปรผัน	180,000.00	189,000.00	198,450.00	208,372.50	218,791.13
5	ค่าพลังงาน ไฟฟ้า	ต้นทุนแปรผัน	76,500.00	78,795.00	81,158.85	83,593.62	86,101.42
6	ค่าพลังงาน ไมโครเวฟ	ต้นทุนแปรผัน	1,224.00	1,260.72	1,298.54	1,337.50	1,377.62
7	ค่าการตลาด	ต้นทุนแปรผัน	100,000.00	105,000.00	110,250.00	115,762.50	121,550.63
8	ค่าวัสดุสิ้นเปลืองโรงงาน	ต้นทุนแปรผัน	60,000.00	61,200.00	62,424.00	63,672.48	64,945.93
9	ค่าใช้จ่ายเบ็ดเตล็ดโรงงาน	ต้นทุนแปรผัน	50,000.00	51,000.00	52,020.00	53,060.40	54,121.61
10	ค่าใช้จ่ายซ่อมบำรุง	ต้นทุนแปรผัน	90,000.00	94,500.00	99,225.00	104,186.25	109,395.56
11	เครื่องจักร ชุดเผาไมโครเวฟ	ต้นทุนคงที่	3,099,999.80	3,099,999.80	3,099,999.80	3,099,999.80	3,099,999.80
12	เงินโบนัสพนักงาน	ต้นทุนคงที่	45,000.00	47,250.00	49,612.50	52,093.13	54,697.78
13	ประกันภัยโรงงาน	ต้นทุนคงที่	60,000.00	61,200.00	62,424.00	63,672.48	64,945.93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.2.17 วิเคราะห์ประมาณการกระแสเงินสดของโครงการ ตามตารางที่ 4.17 แสดงกระแสเงินสดรับสุทธิสะสมของโครงการ เมื่อพิจารณากระแสเงินสดรับสุทธิสะสมที่มาจากผลรวมของกำไรสุทธิหลังหักภาษี ค่าเสื่อมราคา เงินกู้ระยะสั้น เจ้าหนี้การค้า และหักลูกหนี้การค้าพบว่าระหว่างปีที่ 1 และปีที่ 2 ของการเริ่มต้นโครงการจะได้รับกระแสเงินสดรับครบตามจำนวนเงินที่จ่ายลงทุน ตอนเริ่มต้นกิจการเท่ากับ 16,500,000 บาทซึ่งเป็นมูลค่าที่มาจากผลรวมของกระแสเงินสดจ่าย เงินสดคืนเงินต้น และเงินสดคืนดอกเบี้ย

ตารางที่ 4.17 รายการกระแสเงินสดรับสุทธิสะสมของโครงการ

โครงการ	กระแสเงินสดรับสุทธิ (บาท)	กระแสเงินสดรับสุทธิสะสม (บาท)
ปีที่ 0	ณ.วันเริ่มดำเนินงาน	-16,500,000.00
ปีที่ 1	3,853,505.21	3,853,505.21
ปีที่ 2	15,745,091.91	19,598,597.12
ปีที่ 3	16,283,650.04	35,882,247.15
ปีที่ 4	16,920,251.89	52,802,499.04
ปีที่ 5	17,702,455.14	70,504,954.19

สำหรับการประมาณการกำไร (ขาดทุน) ประมาณการงบดุล และประมาณการจุดคุ้มทุนจากรายการข้อสมมติฐานทางการเงินดังกล่าวข้างต้น สามารถดูรายละเอียดจากตารางที่ 4.18, 4.19 และ 4.20 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.18 ประมาณการกำไร (ขาดทุน)

ประมาณการ กำไร/(ขาดทุน) (Profit & Loss)						
ลำดับที่	รายการ	ประมาณการ กำไร /				
		ปีที่1	ปีที่2	ปีที่3	ปีที่4	ปีที่5
1	ยอดขาย	115,260,000.00	117,565,200.00	119,916,504.00	123,513,999.12	127,219,419.09
2	หัก ต้นทุนแปรผัน	93,336,924.00	95,215,539.72	97,132,306.07	100,053,289.31	103,062,287.09
3	กำไร/(ขาดทุน) ขั้นต้น (1-2)	21,923,076.00	22,349,660.28	22,784,197.93	23,460,709.81	24,157,132.00
4	หัก ต้นทุนคงที่	3,204,999.80	3,208,449.80	3,212,036.30	3,215,765.41	3,219,643.51
5	กำไร/(ขาดทุน) จากการดำเนินงาน (3-4)	18,718,076.20	19,141,210.48	19,572,161.63	20,244,944.40	20,937,488.49
6	หัก ค่าเสื่อมราคา	3,099,999.80	3,099,999.80	3,099,999.80	3,099,999.80	3,099,999.80
7	หัก ดอกเบี้ยจ่าย - เงินกู้ระยะยาว	1,002,799.45	809,205.73	601,100.56	377,396.18	136,923.30
8	หัก ดอกเบี้ยจ่าย - เงินกู้ระยะสั้น	82,500.00	82,500.00	82,500.00	82,500.00	82,500.00
9	กำไร/(ขาดทุน) สุทธิ ก่อนหักภาษี (5-6-7-8)	14,532,776.95	15,149,504.95	15,788,561.27	16,685,048.42	17,618,065.39
10	หัก ภาษีเงินได้ 15%	2,179,916.54	2,272,425.74	2,368,284.19	2,502,757.26	2,642,709.81
11	กำไร/(ขาดทุน) สุทธิ (9-10)	12,352,860.41	12,877,079.21	13,420,277.08	14,182,291.16	14,975,355.58
12	กำไร/(ขาดทุน) สะสม ยกไป	12,352,860.41	25,229,939.62	38,650,216.70	52,832,507.85	67,807,863.44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.19 ประมาณการงบดุล

HOME						
ประมาณการงบดุล (Balance Sheet)						
ลำดับ ที่	รายการ	ประมาณการ ค่าไร /				
		ปีที่1	ปีที่2	ปีที่3	ปีที่4	ปีที่5
ทุนส่วนของผู้เจ้าของ (Owner)						
20	ทุน	500,000.00	500,000.00	500,000.00	500,000.00	500,000.00
21	กำไร/(ขาดทุน) สะสม ยกมา	0.00	12,352,860.41	25,229,939.62	38,650,216.70	52,832,507.85
22	กำไร/(ขาดทุน) สุทธิ	12,352,860.41	12,877,079.21	13,420,277.08	14,182,291.16	14,975,355.58
23	รวมส่วนของผู้เจ้าของ (20+21+22)	12,852,860.41	25,729,939.62	39,150,216.70	53,332,507.85	68,307,863.44
24	รวมหนี้สิน และส่วนของผู้เจ้าของ (19+23)	31,959,819.81	42,174,412.61	52,726,373.96	63,878,161.45	75,587,868.05
สินทรัพย์ - หนี้สิน & ส่วนของผู้เจ้าของ (14-24)		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
(ตรวจสอบสมการทางบัญชี)		บัญชีลงตัว	บัญชีลงตัว	บัญชีลงตัว	บัญชีลงตัว	บัญชีลงตัว

ตารางที่ 4.20 ประมาณการจุดคุ้มทุน

HOME						
ประมาณการจุดคุ้มทุน (Break Even Point)						
ลำดับที่	รายการ	ปีที่1	ปีที่2	ปีที่3	ปีที่4	ปีที่5
1	ยอดขาย	115,260,000.00	117,565,200.00	119,916,504.00	123,513,999.12	127,219,419.09
ต้นทุนขาย						
2	ต้นทุน คงที่	3,204,999.80	3,208,449.80	3,212,036.30	3,215,765.41	3,219,643.51
3	ต้นทุนแปรผัน	93,336,924.00	95,215,539.72	97,132,306.07	100,053,289.31	103,062,287.09
4	ต้นทุนรวม (FC+VC)	96,541,923.80	98,423,989.52	100,344,342.37	103,269,054.72	106,281,930.60
5	กำไร/(ขาดทุน) ขั้นต้น (1) - (3)	21,923,076.00	22,349,660.28	22,784,197.93	23,460,709.81	24,157,132.00
6	จุดคุ้มทุน	16,850,202.82	16,877,305.41	16,905,408.08	16,930,094.98	16,955,703.89

4.6.3 วิเคราะห์ผลตอบแทนด้านการลงทุน และการตัดสินใจเลือกโครงการ

จุดประสงค์ของการศึกษา คือผู้ประกอบการต้องการทราบว่าโครงการลงทุนมีความเหมาะสมด้านการเงินอย่างไร โดยพิจารณาจากผลการตอบแทนด้านการลงทุน โดยผู้วิจัยจะวิเคราะห์ผลตอบแทนด้านการลงทุน 5 ส่วนคือ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.6.3.1 อัตราผลตอบแทนถัวเฉลี่ย (Average Rate of Return: ARR)

เป็นลักษณะของการเปรียบเทียบกำไรสุทธิหลังภาษีที่เกิดขึ้นเปรียบเทียบกับเงินลงทุนสุทธิถัวเฉลี่ยของโครงการ พบว่า ARR ตลอดโครงการมีค่าเท่ากับ 82.19% แสดงดังต่อไปนี้





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 \text{อัตราผลตอบแทนถัวเฉลี่ย} &= \text{กำไรสุทธิเฉลี่ยต่อปี} / \text{เงินลงทุนเริ่มแรก} \\
 &= \frac{(67,807,863.44 / 5)}{16,500,000} \\
 &= \frac{13,561,572.69}{16,500,000} \\
 &= 0.8219 \\
 &= 82.19\%
 \end{aligned}$$

4.6.3.2 ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period: PP)

เป็นระยะเวลาที่ผลตอบแทนสุทธิจากการดำเนินกิจการมีค่าเท่ากับค่าเงินลงทุนของโครงการ จากการวิเคราะห์ผลตอบแทนด้านการลงทุนพบว่า โครงการการพัฒนากระบวนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์สายพานลำเลียงอาหารโดยใช้พลังงานไมโครเวฟร่วมกับวิธีให้ความร้อนแบบดั้งเดิม มีระยะเวลาในการคืนทุนประมาณ 1 ปี 9 เดือน 19 วัน ภายหลังจากเปิดดำเนินกิจการ ซึ่งเป็นระยะเวลาที่ไม่นานนัก แต่การพิจารณาเฉพาะระยะเวลาในการคืนทุนจะมีข้อเสียคือไม่ได้พิจารณามูลค่าของเงินที่ลดลงตามเวลา เพราะฉะนั้นจึงต้องพิจารณาค่าระยะเวลาในการคืนทุน ประกอบกับค่า NPV และค่า IRR หากเทียบกับอัตราผลตอบแทนต่ำสุดที่น่าพอใจ (The minimum attractive rate of return: MARR) อยู่ที่ 19.25% (คิดจากอัตราดอกเบี้ยเงินกู้ 7.25% + อัตราเงินเฟ้อ 2.00% + อัตราความเสี่ยง 10%) เมื่อเปรียบเทียบแล้วพบว่าค่า IRR มีค่ามากกว่าค่า MARR แสดงว่ามีผลตอบแทนที่น่าพอใจเช่นกัน ดูรายละเอียดประมาณการระยะเวลาคืนทุนตามตารางที่ 4.21

ตารางที่ 4.21 ประมาณการระยะเวลาคืนทุน

HOME    						
ประมาณการระยะเวลาคืนทุน (Pay Back Period)						
(ระยะเวลาคืนทุน = ระยะเวลาที่ เงินสดรับ (สะสม) มีค่าเท่ากับเงินลงทุน ณ เริ่มโครงการ)						
ลำดับที่	รายการ	ปีที่1	ปีที่2	ปีที่3	ปีที่4	ปีที่5
1	กำไร/(ขาดทุน) สุทธิ หลังหักภาษี	12,352,860.41	12,877,079.21	13,420,277.08	14,182,291.16	14,975,355.58
2	บวก ค่าเสื่อมราคา	3,099,999.80	3,099,999.80	3,099,999.80	3,099,999.80	3,099,999.80
3	บวก เงินกู้ระยะสั้น เพิ่ม/(ลด)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	บวก เจ้าหนี้การค้า เพิ่ม/(ลด)	5,689,645.00	113,792.90	116,068.76	177,585.20	182,912.76
5	หัก ลูกหนี้การค้า เพิ่ม/(ลด)	17,289,000.00	345,780.00	352,695.60	539,624.27	555,813.00
6	เงินสดรับ (1+2+3+4-5)	3,853,505.21	15,745,091.91	16,283,650.04	16,920,251.89	17,702,455.14
7	เงินสดรับ (สะสม)	3,853,505.21	19,598,597.12	35,882,247.15	52,802,499.04	70,504,954.19
8	เงินลงทุน ณ เริ่ม โครงการ	16,500,000.00	16,500,000.00	16,500,000.00	16,500,000.00	16,500,000.00
		ยังไม่คืนทุน	คืนทุน	คืนทุน	คืนทุน	คืนทุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.3.3 มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV)

เป็นมูลค่าที่แสดงผลต่างระหว่างมูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดรับสุทธิของโครงการกับเงินลงทุนเริ่มแรก ณ อัตราผลตอบแทนที่ต้องการ หรือต้นทุนของเงินทุนของโครงการ ซึ่งกำหนดอัตราความเสี่ยงให้เท่ากับ 10% พบว่าค่า NPV ตลอดโครงการมีค่าเท่ากับ 34,798,398.69 บาท ดูรายละเอียดมูลค่าปัจจุบันสุทธิตามตารางที่ 4.22

4.6.3.4 อัตราผลตอบแทนการลงทุน (Internal Rate of Return: IRR)

เป็นอัตราผลตอบแทนที่แสดงอัตราคิดลด (discount rate) ของโครงการ ที่มีผลทำให้มูลค่าปัจจุบันของเงินสดที่ได้รับในอนาคต เท่ากับเงินลงทุนที่จ่ายไปในปัจจุบัน พบว่าค่า IRR ตลอดโครงการมีค่าเท่ากับ 61.09% ซึ่งรายละเอียดอัตราผลตอบแทนการลงทุนแสดงตามตารางที่ 4.22

ตารางที่ 4.22 อัตราผลตอบแทนขี้อลด และมูลค่าปัจจุบันสุทธิ

HOME IRR & NPV						
กรุณาใส่ข้อมูลเฉพาะในช่อง (เซลล์) ที่เป็นสีฟ้า						
อัตราผลตอบแทนขี้อลด (Internal Rate Of Return : IRR) และ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value : NPV)						
คำนวณ IRR และ NPV ณ ปีที่			5			
อัตราส่วนลดในการคำนวณ NPV (อัตราของการลงทุนอื่นที่ต้องการเทียบ)			10.0000%			
(หน่วย : บาท)						
ปีที่	เงินสด รับ/จ่ายสุทธิ	มูลค่าซาก	กระแสเงินสด	IRR	PV	NPV
0	ณ วันเริ่มดำเนินงาน		-16,500,000.00		-16,500,000.00	
1	3,853,505.21		3,853,505.21			
2	15,745,091.91		15,745,091.91			
3	16,283,650.04		16,283,650.04			
4	16,920,251.89		16,920,251.89			
5	17,702,455.14	1.00	17,702,456.14	61.0882%	51,298,398.69	34,798,398.69
6						

3.6.4.5 ดัชนีการทำกำไร (Profitability index method: PI)

ดัชนีกำไรเป็นอัตราส่วนระหว่างมูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดเข้าสุทธิต่อปีกับกระแสเงินสดจ่ายลงทุนครั้งแรก พบว่า PI ตลอดโครงการมีค่าเท่ากับ 4.19 การตัดสินใจยอมรับโครงการลงทุนจะพิจารณาดัชนีการทำกำไรมากกว่า 1 แสดงว่ามีกระแสเงินสดเข้ามามากกว่าเงินลงทุนเริ่มแรก สามารถแสดงวิธีการคำนวณ คือ ดัชนีการทำกำไร = มูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดรับ/ มูลค่าปัจจุบันของเงินลงทุน

$$\begin{aligned}
 &= \frac{(3,231,450.91) + (15,181,845.44) + (16,168,316.14) + (16,896,596.65) + (17,697,145.99)}{16,500,000} \\
 &= \frac{69,177,079.41}{16,500,000} = 4.19
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5 สรุปผล

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 อิทธิพลของสารตัวเติมและสารตัวเติมผสมที่มีต่อสมบัติยางคอมปาวด์สายพานลำเลียงอาหาร

วัตถุดิบยาง ENR50 ที่อัตราส่วน 100 phr ใส่สารตัวเติมผสม (ซิลิกากับแมกนีเซียมคาร์บอเนต) จะให้สมบัติไดอิเล็กตริกและสมบัติการทนน้ำมันดีกว่า ENR50 ที่ใส่สารตัวเติมเพียงชนิดเดียว เนื่องด้วย ENR50 ซิลิกา และแมกนีเซียมคาร์บอเนต มีโครงสร้างโมเลกุลแบบมีขั้วซึ่งทำให้สามารถดูดกลืนคลื่นพลังงานไมโครเวฟและเปลี่ยนเป็นความร้อนได้ดี ซึ่งปริมาณสารตัวเติมผสมที่เติมลงไปส่งผลทำให้ ENR50 โดยปกติจะจัดว่าเป็นวัสดุที่มีขั้วกลายเป็นวัสดุที่มีขั้วเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นทำให้ความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างสูงขึ้นจะส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลยางเคลื่อนที่ได้ยากมากขึ้น จึงสามารถทนต่อน้ำมันและตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วได้ดี และพบว่าสัญญาณวิทยามีลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคสารตัวเติมผสมที่สม่ำเสมอ การกระจายตัวได้ดี ลักษณะผิวหน้าเรียบ จะส่งผลถึงความต่อเนื่องระหว่างเฟสยางกับสารตัวเติมผสม จะมีความต่อเนื่องเพิ่มขึ้น ดังนั้นองค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการเลือกใช้วัตถุดิบยาง และสารตัวเติมผสม เพื่อการผลิตผลิตภัณฑ์ยางในอุตสาหกรรมต่อไป

5.1.2 อิทธิพลของยางผสมระหว่าง ENR50/STR5L ที่มีผลต่อสมบัติยางคอมปาวด์สายพานลำเลียงอาหาร

จากการศึกษาสมบัติเชิงกลพบว่า ENR50 ที่อัตราส่วน 100 phr ใส่สารตัวเติมผสมระหว่างซิลิกากับแมกนีเซียมคาร์บอเนตจะให้สมบัติที่ดีกว่า STR5L ที่อัตราส่วน 100 phr เพราะเกิดการเชื่อมโยงพันธะที่ีระหว่างสารตัวเติมผสมกับ ENR50 สำหรับยางผสม ENR50/STR5L ที่อัตราส่วน 75:25, 50:50 และ 25:75 phr พบว่าผลการทดสอบมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่ลดลงเมื่ออัตราส่วนผสมของยาง ENR50 ลดลง หรือยาง STR5L เพิ่มขึ้นในสมบัติค่าความแข็ง และความเค้นแรงดึง เมื่อมีการยืดร้อยละ 300 นอกจากนี้พบว่าผลการทดสอบมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนผสมของยาง ENR50 ลดลงหรือยาง STR5L เพิ่มขึ้นในสมบัติการต้านแรงดึง ความทนต่อแรงยึดจนขาด และพบว่าสัญญาณวิทยามีลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคสารตัวเติมผสมที่สม่ำเสมอ การกระจายตัวได้ดี แต่ลักษณะของผิวหน้าไม่เรียบเมื่ออัตราส่วน ENR50 ลดลงหรือยาง STR5L เพิ่มขึ้น สำหรับการทดลองมีการใช้โปรแกรม minitab มาช่วยในการวิเคราะห์ที่ระดับนัยสำคัญ จากการวิเคราะห์พบว่า สมบัติความแข็ง สมบัติความเค้นแรงดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 300 สมบัติความทนต่อแรงยึดจนขาด และลักษณะการบวมพองในน้ำมัน มีค่า P-value น้อยกว่าค่าระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงสามารถสรุปได้ว่าไม่ยอมรับสมมติฐานหลักคือ ค่าเฉลี่ยของยางคอมปาวด์วัลคาไนซ์ผสมระหว่าง ENR50/STR5L ก่อนและหลังการอบเร่งด้วยความร้อนมีความแตกต่างที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 สำหรับสมบัติการต้านทานแรงดึง มีค่า P-value มากกว่าค่าระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงสามารถสรุปได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยอมรับสมมติฐานหลักคือ ค่าเฉลี่ยของยางคอมปาวด์วัลคาไนซ์ผสมระหว่าง ENR50/STR5L ก่อนและหลังการอบเร่งด้วยความร้อนไม่มีความแตกต่างที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นองค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการเลือกใช้วัตถุดิบยางผสมกับสารตัวเติมผสม เพื่อการผลิตในอุตสาหกรรมยางต่อไป

5.1.3 อิทธิพลสารตัวเติมผสมที่มีต่อสมบัติทางความร้อนของยางคอมปาวด์สายพานลำเลียงอาหารที่อุ่นด้วยพลังงานไมโครเวฟ

ปริมาณกำมะถันที่เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มส่งผลให้สมบัติไดอิเล็กตริกของยางคอมปาวด์สายพานลำเลียงอาหารที่ใส่และไม่ใส่สารตัวเติมผสมมีเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเล็กน้อย สำหรับปัจจัยเวลาและพลังงานไมโครเวฟที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ยางคอมปาวด์สายพานลำเลียงอาหารที่ใส่สารตัวเติมผสมจะให้อุณหภูมิสูงกว่าที่ไม่ใส่สารตัวเติมผสม เนื่องจากสารตัวเติมผสมมีสมบัติไดอิเล็กตริกที่สูงกว่า ซึ่งจะมีความสามารถในการดูดซับและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนได้ดีกว่า นอกจากนี้การให้ความร้อนด้วยคลื่นพลังงานไมโครเวฟนั้น ความร้อนจะแพร่ผ่านชิ้นงานจากภายในสู่ภายนอกและมีผลโดยตรงต่อความหนาของชิ้นงาน คือความหนาของชิ้นงานน้อยกว่าจะใช้ระยะเวลาน้อยกว่า ดังนั้นพลังงานไมโครเวฟสามารถนำไปประยุกต์ใช้อุ่นยางคอมปาวด์สายพานลำเลียงอาหารใส่สารตัวเติมผสม ให้เริ่มร้อนก่อนเข้าสู่กระบวนการวัลคาไนซ์ได้ โดยปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิคือความเข้มสนามไฟฟ้า

5.1.4 อิทธิพลสารตัวเติมผสมที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของยางคอมปาวด์สายพานลำเลียงอาหารที่อุ่นด้วยพลังงานไมโครเวฟ

จากสภาวะการอุ่นยางคอมปาวด์สายพานลำเลียงอาหารใส่สารตัวเติมผสม และมีปริมาณกำมะถันที่ 1.0 phr ด้วยพลังงานไมโครเวฟ 340 วัตต์ ที่คลื่นความถี่ 2.45 GHz เป็นเวลา 1 นาที สามารถทำให้ยางคอมปาวด์มีความร้อนภายในชิ้นงานที่ 70-75 องศาเซลเซียส นั่นคือเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดก่อนการอัดขึ้นรูปด้วยระบบไฮดรอลิกที่อุณหภูมิ 150°C และเวลา 50% ของเวลาที่ใช้ในการอบสุก (t_{c90}) ยางคอมปาวด์ผสมสารตัวเติมในกระบวนการอัดขึ้นรูปแบบเดิม จากการทดลองพบว่า จะส่งผลให้คอมปาวด์สายพานลำเลียงอาหารมีความหนาแน่นของพันธะโมเลกุลในการเชื่อมโยงที่ดี พร้อมทั้งมีราคาต้นทุนของวัตถุดิบสูตรใหม่ที่ต่ำกว่าต้นทุนวัตถุดิบของสูตรเดิมที่ 2.51 บาท/กก. และสามารถลดเวลาที่ใช้ในการอบสุกยางคอมปาวด์ผสมสารตัวเติมผสมในกระบวนการอัดขึ้นรูปได้ 40% ต่อรอบการผลิต เมื่อเทียบกับระบบที่ไม่ได้มีการอุ่นให้ความร้อน และเมื่อทำการเปรียบเทียบด้านพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ ส่งผลให้ลดพลังงานจากปกติที่ไม่มีการอุ่นด้วยความร้อนได้ 49.54% ต่อรอบการผลิต โดยที่สมบัติความแข็ง และความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 300 ก่อนและหลังอบเร่งด้วยอากาศร้อนที่ระดับดี

5.1.5 การประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์สายพานลำเลียงอาหาร

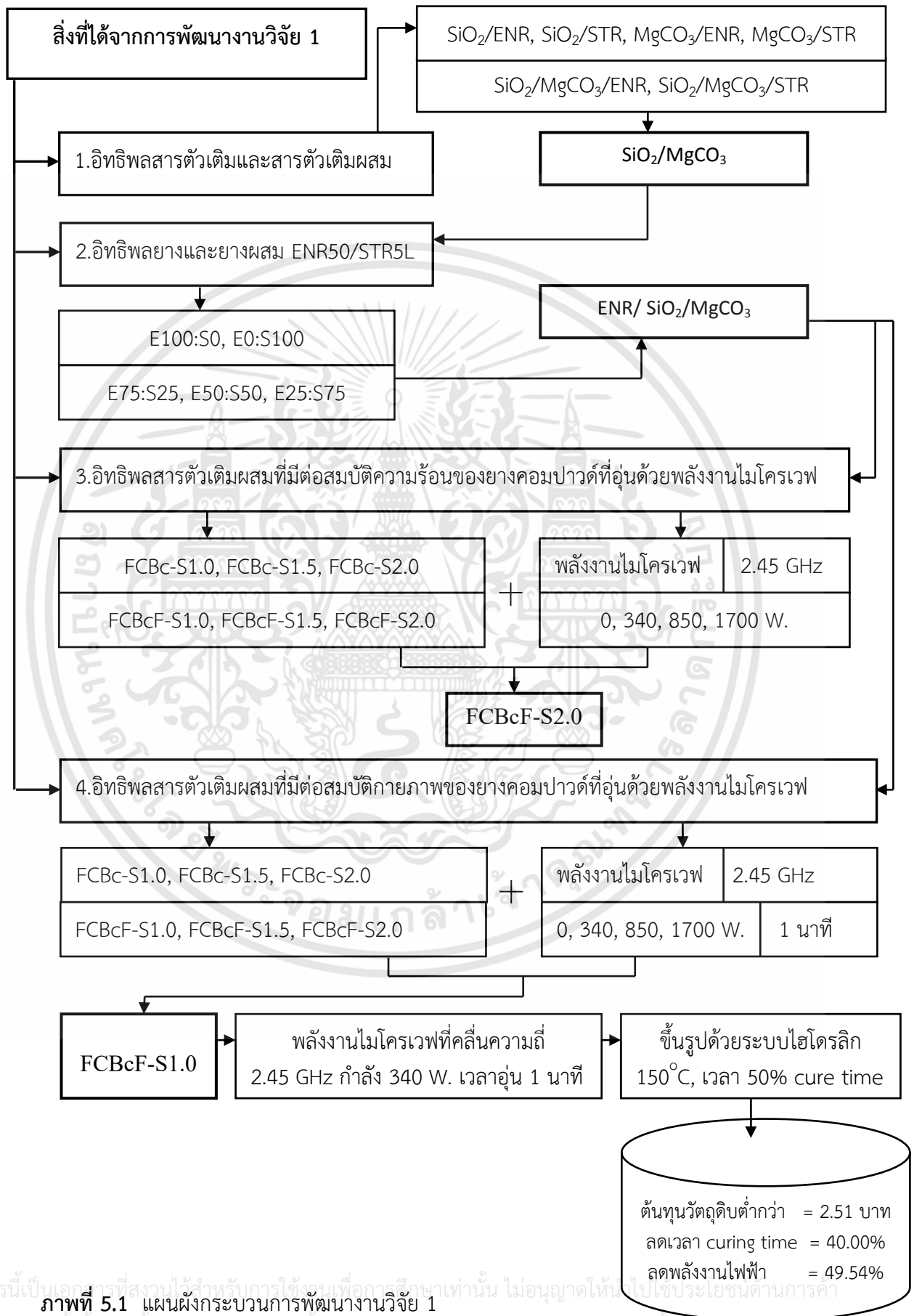
ได้ทำการประยุกต์ใช้ยางคอมปาวด์สายพานลำเลียงอาหารใส่สารตัวเติมผสม และมีปริมาณกำมะถันที่ 1.0 phr ในอุตสาหกรรมการผลิตผลิตภัณฑ์สายพานลำเลียงอาหาร ที่มีขนาดความยาว 5 เมตร และขนาดความกว้าง 0.5 เมตร ประกอบด้วยจำนวนชั้นผ้าโพลีเอสเตอร์ 3 ชั้น ความหนา ยางบน 2.5 มิลลิเมตร ความหนายางล่าง 1.5 มิลลิเมตร และระหว่างชั้นผ้ากับยางบนจะคั่นกลางด้วยยางน้ำกาว ซึ่งความหนารวมทั้งหมด เท่ากับ 7 มิลลิเมตร สามารถอุ่นด้วยพลังงานไมโครเวฟที่ 300 วัตต์ ที่คลื่นความถี่ 2.45 GHz เวลา 2 นาที และนำไปอัดขึ้นรูปด้วยระบบไฮดรอลิกที่อุณหภูมิ 150°C เวลา 5 นาที พบว่าสมบัติแรงยึดติดแน่นทุกระดับชั้นผ้ามีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานของโรงงานผู้ผลิตคือ 12 N/mm นอกจากนี้สามารถลดเวลาที่ใช้ในการอบสุกยางคอมปาวด์ผสมสารตัวเติมผสมในกระบวนการอัดขึ้นรูปได้ 30% ต่อรอบการผลิต เมื่อเทียบกับระบบที่ไม่ได้มีการอุ่นให้ความร้อน และเมื่อทำการเปรียบเทียบด้านพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ ส่งผลให้ลดพลังงานจากปกติที่ไม่มีการอุ่นด้วยความร้อนได้ 49.20% ต่อรอบการผลิต

5.1.6 ผลการวิเคราะห์การลงทุนโครงการ

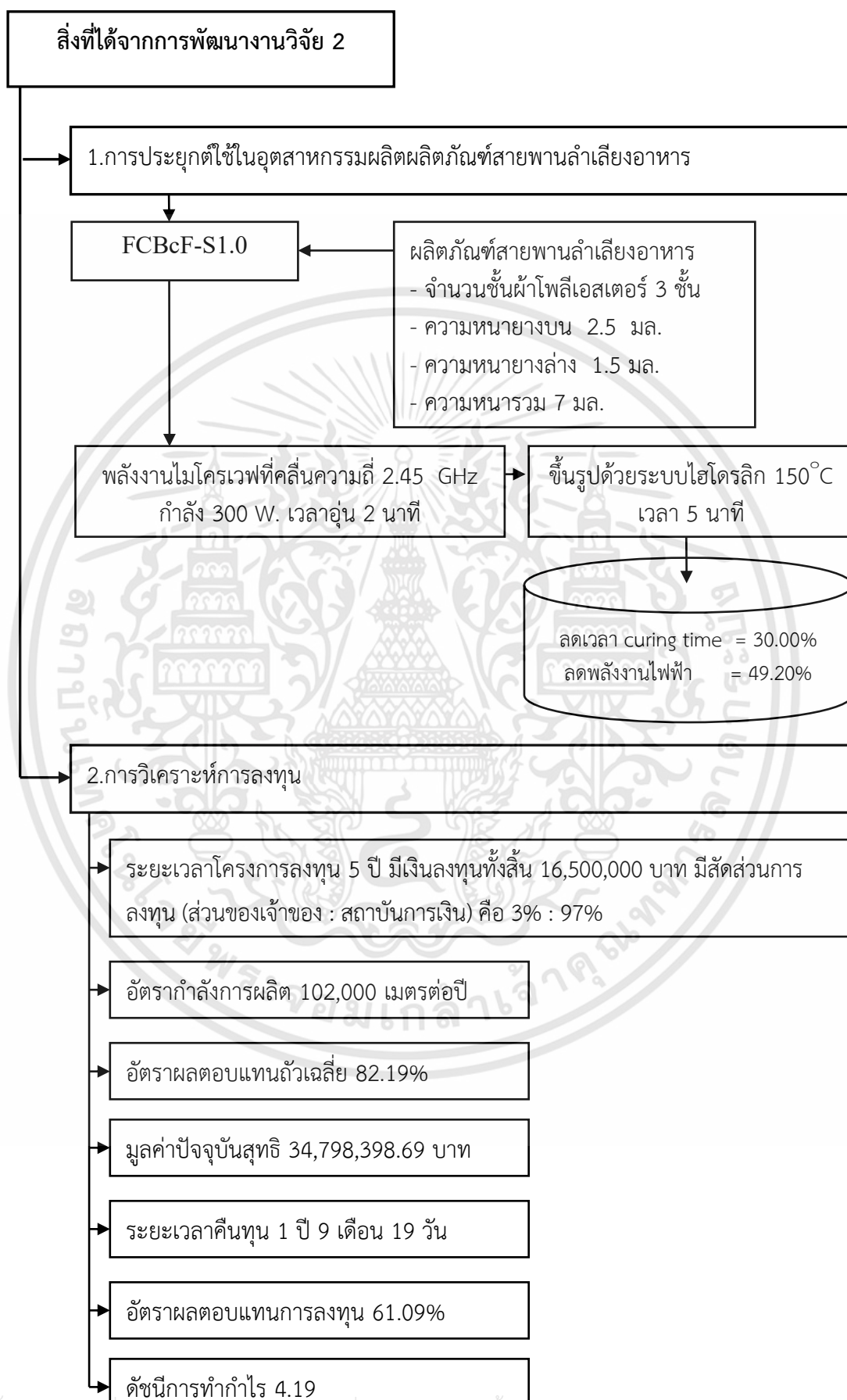
โครงการการพัฒนากระบวนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์สายพานลำเลียงอาหารโดยใช้พลังงานไมโครเวฟร่วมกับวิธีให้ความร้อนแบบดั้งเดิม ได้กำหนดระยะเวลาโครงการลงทุน 5 ปี มีเงินลงทุนทั้งสิ้น 16,500,000 บาท มีสัดส่วนการลงทุน (ส่วนของผู้ถือหุ้น : สถาบันการเงิน) คือ 3% : 97% ซึ่งประกอบด้วย ส่วนของผู้ถือหุ้น 500,000 บาท และจากสถาบันทางการเงิน 16,000,000 บาท สามารถแบ่งเป็นหนี้สินระยะยาว 15,000,000 บาทและหนี้สินระยะสั้น 1,000,000 บาท มีอัตราค่าลังการผลิต 102,000 เมตรต่อปี เมื่อทำการวิเคราะห์ผลตอบแทนการลงทุน อัตราผลตอบแทนถัวเฉลี่ยมูลค่าปัจจุบันสุทธิ ระยะเวลาคืนทุน อัตราผลตอบแทนการลงทุน และดัชนีการทำการ ซึ่งมีความเท่ากับ 82.19%, 34,798,398.63 บาท, เวลา 1 ปี 9 เดือน 19 วัน (1 ปี 10 เดือน), 61.09% และ 4.19 ตามลำดับ นอกจากนี้พบว่าผลตอบแทนการลงทุนสูงกว่าอัตราผลตอบแทนต่ำสุด (19.25%) ดังนั้นโครงการนี้เหมาะสมที่จะนำไปพิจารณาการลงทุนในภาคอุตสาหกรรมได้

5.2 สิ่งที่ได้จากการพัฒนางานวิจัย

การพัฒนากระบวนการผลิตยางคอมปาวด์สายพานลำเลียงอาหารชนิดใหม่แบบประหยัดพลังงาน เป็นการประยุกต์ใช้องค์ความรู้จากการวิจัยเพื่อการใช้งานด้านอุตสาหกรรม สามารถสรุปขั้นตอนของสิ่งที่ได้จากการพัฒนางานวิจัยซึ่งสามารถสรุปได้ตามภาพที่ 5.1 และ 5.2 ตามลำดับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะเพื่อการเรียนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ภาพที่ 5.1 แผนผังกระบวนการพัฒนางานวิจัย 1
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำเบเซ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 5.2 แผนผังกระบวนการพัฒนางานวิจัย 2

5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการวิจัย

จากงานวิจัยที่ศึกษาได้พบประเด็นปัญหาที่น่าสนใจเพิ่มเติมและสามารถเป็นแนวทางในการศึกษาวิจัยในอนาคตดังต่อไปนี้

5.3.1 ศึกษาอิทธิพลของยางผสมระหว่าง ENR50/STR5L กับสารตัวเติมสีขาวชนิดอื่น

5.3.2 ศึกษาสมบัติเชิงกลของยางผสมร่วมกับสมบัติอื่น เช่น สมบัติเชิงพลวัต สมบัติทางความร้อน และโครงสร้างทางเคมี เป็นต้น

5.3.3 ศึกษาการเพิ่มการกระจายของการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟด้วยวิธีการผสมวัสดุไดอิเล็กตริกที่เหมาะสม

5.3.4 ศึกษาสมบัติเชิงกลและค่าความชื้น (% moisture) ที่ลดลงของยางคอมปาวด์สายพานลำเลียงอาหารหลังผ่านกระบวนการอุ่นด้วยพลังงานไมโครเวฟ

5.3.5 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างช่วงระยะเวลาและการใช้พลังงาน เพื่อปรับให้เหมาะสมกับค่าความชื้น (% moisture) ของยางคอมปาวด์สายพานลำเลียงอาหารหลังผ่านกระบวนการอุ่นด้วยพลังงานไมโครเวฟ

5.3.6 การวิเคราะห์เชิงทฤษฎีสำหรับการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อการให้ความร้อนแก่ยางคอมปาวด์สายพานลำเลียงอาหารที่ระยะเวลาการวัลคาไนซ์ต่างๆ กัน

5.3.7 ศึกษาความเป็นไปได้เชิงเทคนิคและเชิงเศรษฐศาสตร์เพื่อการลงทุนอุตสาหกรรมผลิตผลิตภัณฑ์สายพานลำเลียงอาหาร

เอกสารอ้างอิง

- [1] สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร. “สถิติยางพาราไทย.”
[ออนไลน์]. สืบค้นจาก http://www.rubberthai.com/statistic/stat_index.htm.
[17 กันยายน 2557]
- [2] Roberts A.D. **Natural rubber science and technology**. Brickendonbury: Oxford University. 1988.
- [3] Ratanadecho P., Duangduen A. and Vougradubchai S. “Drying of a slip for tableware product using microwave - continuous belt furnace.”, **Drying Technology An International J.**, vol.26, 2006. pp. 589-594.
- [4] Mataxas A.C. and Meridith R.J. **Industrial microwave heating**. Peter Peregrinus, Ltd.: London. 1983.
- [5] บริษัท ยูโรรับเบอร์ จำกัด. **สายพานลำเลียงอาหาร**.
[ออนไลน์]. สืบค้นจาก <http://www.eurorubber.co.th/product005.php>.
[25 กันยายน 2557]
- [6] เสาวนีย์ ก่อวุฒิภักดิ์. **การผลิตยางธรรมชาติ**. ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี. 2546.
- [7] พงษ์ธร แซ่ฮ้อย. **ชนิดของยางและการใช้งาน**. ศูนย์วิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมของไทย.
[ออนไลน์]. สืบค้นจาก www.rubbercenter.org/files/technology.pdf.
[30 สิงหาคม 2557]
- [8] สะอาด ริยะจันทร์. **ออกซิเดชันและการแตกสลายทางแสงของยาง**. ภาควิชาวิทยาศาสตร์ พอลิเมอร์และวัสดุ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 2553.
- [9] วราภรณ์ ขจรไชยกูล . **ยางธรรมชาติ: การผลิตและการใช้งาน**. กรุงเทพมหานคร: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย. 2549.
- [10] Roberts AD. **Natural rubber and technology**. Oxford University: Press Oxford. 1990.
- [11] พงษ์ธร แซ่ฮ้อย. **สารเคมียาง**. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2550.
- [12] บุญธรรม นิธิอุทัย, พรพรรณ นิธิอุทัย และ ปรีชา ป้องภัย. **สารเคมีสำหรับยางและเทคนิคการออกสูตรยาง**. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี. 2530.
- [13] Folkes M.J. and Hopes P.S. **Polymer blends and alloys**. 3rd Edition. Chapman and Hall: London. 1993.
- [14] Schbert H. and Regier M. **The Microwave Processing of foods**. Cambridge: Woodhead. 2005.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [15] อนุรักษ์ ทองสุโขวงศ์. **การตัดสินใจเพื่อการลงทุน**. คณะบริหารธุรกิจและการบัญชี มหาวิทยาลัยขอนแก่น. [ออนไลน์]. สืบค้นจาก http://home.kku.ac.th/anuton/3526301/Doc_04.pdf. [16 ธันวาคม 2558]
- [16] Bonner J.G. and Hope P.S. **Compatibilization and reactive blending**. In polymer blends and Alloys, Folkes M.J. and Hope P.S. (eds.). Blackie Academic and Professional, London: Chapter 3. 1993.
- [17] Andrew J.T. and Kevin P.J. **Blends of natural rubber novel techniques for blending with speciality polymers**, London: Chapman and Hall. 1998.
- [18] Karnika de Silva K.G. and Micheal V.L. **Improving the morphology and properties of NR/NBR blends with NR/PMMA graft copolymers**. In Andrew J.T. and Kevin P.J. Blends of natural rubber: novel techniques for blending with speciality polymer. London: Chapman and Hall. 1998. pp.68-79.
- [19] Sirisinha C., Baulek-Limcharoen S. and Thunyarittikorn J. "Relationships among blending condition, size of dispersed phase, and oil resistance in natural rubber and nitrile rubber blends." **Journal of Applied Polymer Science.**, Vol.82, 2001. pp. 1232-1237.
- [20] Sirisinha C., Limcharoen S. and Thunyarittikorn J. "Oil resistance controlled by phase morphology in natural rubber/ nitrile rubber blends." **Journal of Applied Polymer Science.**, Vol.87, 2003. pp.83-89.
- [21] Parthasarathy M. and Klingenberg D.J. "Electrorheology: mechanisms and models." **Materials Science and Engineering R-Reports.**, Vol.17 No.2, 1996. pp.57-103.
- [22] Zhang L., Luo Y. and Hou Z. "Unprecedented isospecific 3, 4-Polymerization of isoprene by cationic rare earth metal alkyl species resulting from a binuclear precursor." **Journal of American Chemical Society.**, Vol.127 No.42, 2005. pp.14562-14563.
- [23] Liu M., liu Y., Zeng Z. and Peng T. "Preparation and characteristics of high pH-resistant sol-gel alumina-based hybrid organic-inorganic coating for solid-phase micro extraction of polar compounds." **Journal Chromatography A.**, Vol.1108 No.2, 2006. pp.149-157.
- [24] Lowry T.H. and Richardson K.S. **Solvent, mechanism and theory in organic chemistry**. 3rd Edition. New York: Harper Collins. 1987.
- [25] Najidha S., Saxena N.S., Sreeja R., Unnithan C.H. and Predeep P. "Optical and electrical characterization of SbCl₅ doped cis-1,4-polyisoprene." **Materials Letters.**, Vol.59, 2005. pp.3431-3436.

- [26] Rippel M.M., Lee L.T., Leite C.A.P. and Galembeck F. "Skim and cream natural rubber particles: colloidal properties, coalescence and film formation." **Journal of Colloid and Interface Science.**, Vol.268 No.2, 2003. pp.330-340.
- [27] Yoksan R. "Epoxidized natural rubber for adhesive applications." **Kasetsart Journal (Natural Science).**, Vol.42, 2008. pp.325-332.
- [28] Davies C.K.L, Woffe S.V., Gelling I.R. and Thomas A.G. "Strain crystallization in random copolymers produced by epoxidation of cis-1,4-Polyisoprene." **Polymer.**, Vol.24, 1983. pp.107-113.
- [29] Sadequl A.M., Ishiaku U.S. and Poh B.T. "Cure Index and Activation Energy of ENR-25 Compared with SMR L in Various Vulcanization systems." **European Polymer Journal.**, Vol.35 No.4, 1999. pp.711-719.
- [30] Gelling I.R. and Poter M. **Natural rubber science and technology.** (Roberts, A.D., ed.), Oxford University Press: Oxford, 1988. pp.359-362.
- [31] Lee S.Y., Kim J.H. and Kim B.K. "Natural rubber blends with epoxidized natural rubber." **J. Macrom. Sci.**, Vol.36, 1997. pp.579-594.
- [32] Gelling I.R. "Modification of natural rubber latex with peracetic acid." **Rubber Chemistry and Technology.**, Vol.58 No.1, 1985. pp.86-96.
- [33] Gelling I.R. "Epoxidised natural rubber." **J.Nat Rub.**, Vol.6, 1991. pp.184-205.
- [34] Lee M.S., Lodge T.P. and Macosko C.W. "Can random copolymers serve as effective polymeric compatibilizer." **J. Polym. Sci.Phy.**, Vol.35 No.17, 1997. pp.2835-2842.
- [35] Mousa A., Ishiaku U.S. and Mohd Ishak Z.A. "Rheological properties of dynamically vulcanized poly (vinyl chloride)/ epoxidized natural rubber thermoplastic elastomer: effect of processing variables." **J. Polym. Test.**, Vol.19 No.2, 2000. pp.193-204.
- [36] Gelling I.R. and Morison N.J. "Sulfur vulcanization and oxidative aging of epoxidized natural rubber." **Rubber Chemistry and Technology.**, Vol.58 No.2, 1985. pp.243-257.
- [37] Nakason C., Tobprakhon A. and Kaesarnan A. "Thermoplastic vulcanizates based on poly (methyl methacrylate) / epoxidized natural rubber blends: Mechanical, Thermal, and morphological properties." **Journal of Applied Polymer Science.**, Vol.98 No.3, 2005. pp.1251-1261.
- [38] Nakason C., Jarnthong M., Kaesarnan A. and Kiatkamjornwong S. "Influences of blend proportions and curing systems on dynamic, mechanical, and morphological properties of dynamically cured epoxidized natural rubber/high density polyethylene blends." **Polymer Engineering and Science.**, Vol.49 No.2, 2009. pp.281-292.

- [39] Klinpituksa P., Kaesaman A., Sainumsai W and Nakason C. "Cure and physical properties of natural rubber and epoxidized natural rubber compounds using various types of accelerators." **Songklanakarin J. Sci.Technol.**, Vol.25, 2003. pp.63-73.
- [40] Nakason C., Wannavilai P. and Kaesaman A. "Effect of vulcanization system on properties of thermoplastic vulcanizates based on epoxidized natural rubber/polypropylene blends." **Polym. Test.**, Vol.25, 2006. pp.34-41.
- [41] Poh B.T. and Khok G.K. "Tensile property of epoxidized natural rubber/natural rubber blends." **Polymer Plastics Technology and engineering.**, Vol.39 No.1, 2000. pp.151-161.
- [42] Tanrattanakul V., Wattanathai B., Tiangjunya A. and Muhamud P. "In-situ epoxidized natural rubber: improved oil resistance of rubber." **J. Appl. Polym. Sci.**, Vol.90, 2003. pp.261-269.
- [43] Thitithammawong A., Nakason C., Sahakaro K., and Noordermeer J. "Thermoplastic vulcanizates based on epoxidized natural rubber/polypropylene blends: Selection of optimal peroxide type and concentration in relation to mixing conditions." **European polymer Journal.**, Vol.43 No.9, 2007. pp.4008-4018.
- [44] Ishiaku U.S., Shaharum A., Ismail H. and Ishak ZAM. "The effect of an epoxidized plasticizer on the thermo-oxidative ageing of poly(vinyl chloride)/ epoxidized natural rubber thermoplastic elastomers." **Polym.Int.**, Vol.45 No.1, 1998. pp.89-91.
- [45] Johnson T. and Thomas S. "Sorption, diffusion, and permeation of chlorinated hydrocarbon vapors through natural rubber, epoxidized natural rubber and their blends." **Polymer Plastics Technology and Engineering.**, Vol.39 No.2, 2000. pp.363-380.
- [46] Nasir M. and Choo C.H. "Cure characteristics and mechanical properties of carbon black filled styrenebutadiene rubber and epoxidized natural rubber blends." **European Polymer Journal.**, Vol.25 No.4, 1989. pp.355-359.
- [47] Kongsin K. and Micheal V.L. **Improving the morphology and properties of NR/NBR blends with poly chloroprene as the compatibilizing agent.** In Andrew J.T. and Kevin P.J. Blends of natural rubber: novel techniques for blending with speciality polymer. London: Chapman and Hall. 1998. pp.80-93.
- [48] Bhattacharyya A.R., Ghosh A.K., Misra A. and Eichhorn K.J. "Reactively compatibilised polyamide 6/ ethylene-co-vinyl acetate blends: mechanical properties and morphology." **Polymer.**, Vol.46, 2005. pp.1661-1674.

- [49] Micheal V.L. **NR/NBR blends-basic problems and solutions.** In Andrew J.T. and Kevin P.J. Blends of natural rubber: novel techniques for blending with speciality polymer. London: Chapman and Hall. 1998. pp.53-67.
- [50] Fang Z.P., Ma G.W., Shentu B.Q., Cai G.P. and Xu C.W. “Influence of viscosity ratio on the morphology of PVC/PE blends.” **European Polymer Journal.**, Vol.36, 2000. pp.2309-2311.
- [51] Tol R.T., Groeninckx G., Vinckier I., Moldenaers P. and Mewis J. “Phase morphology and stability of co – continuous (PPE/PS)/ PA6 and PS/ PA6 blends: Effect of rheology and reactive compatibilization.” **Polymer.**, Vol.45 No.8, 2004. pp.2587 – 2601.
- [52] Jana S.C. and Sau M. “Effects of viscosity ratio and composition on development of morphology in chaotic mixing of polymers.” **Polymer.**, Vol.45, 2004. pp.1665–1678.
- [53] Da Costa H.M., Visconte L.L.Y., Nunes R.C.R. and Furtado C.R.G. “Mechanical and dynamic mechanical properties of rice husk ash-filled natural rubber composites.” **Journal of Applied Polymer Science.**, Vol.83 No.11, 2002. pp.2331-2346.
- [54] Sae-oui P., Rakdee C. and Thanmathom P. “Use of rice husk ash as filler in natural rubber vulcanizates: In comparison with other commercial fillers.” **Journal of Applied Polymer Science.**, Vol.83 No.11, 2002. pp.2485-2493.
- [55] Ismail H., Mega L. and Abdul Khalil H.P.S. “Effect of a silane coupling agent on the properties of white rice husk ash – polypropylene/natural rubber composites.” **Polymer International.**, Vol.50, 2001. pp.606-611.
- [56] Da costa H.M., Visconte L.L.Y., Nunes R.C.R. and Furtado C.R.G. “The effect of coupling agent and chemical treatment on rice husk ash-filled natural rubber composites.” **Journal of Applied Polymer Science.**, Vol.76, 2000. pp.1019-1027.
- [57] Assoyo M., Lopez-Manchado M.A. and Herrero B. “Orgno – montmorillonite as substitute for carbon black in natural rubber compounds.” **Polymer.**, Vol.44 No.8, 2003. pp.2447-2453.
- [58] Barlow F.W. **Rubber compounding : principles, materials and techniques.** 2nd Edition: Marcel Dekker, Inc., New York. 1993.
- [59] Sombatsompop N., Thongsang S., Markpin T. and Wimolmala E. “Fly ash particles and precipitated silica as filler in rubber. I. Untreated fillers in natural rubber and styrene butadiene rubber compound.” **Journal of Applied Polymer Science.**, Vol.93, 2004. pp.2119-2130.

- [60] Soo-Jin P. and Ki-sook C. “Fill-elastomer interactions : influence of silica coupling agent on crosslink density and thermal stability of silica of silica/rubber composites.” **Journal of colloid and interface Science.**, Vol.267, 2003. pp.86-91.
- [61] Ismail H., Nasaruddin M.N. and Ishiaku U.S. “White rice husk ash filled natural rubber compounds : the effect of multifunctional additive and silane coupling agents.” **Polymer Testing.**, Vol.18, 1999. pp.287-298.
- [62] Frohlich J., Niedermeier W. and Luginland H.D. “The effect of filler – filler and filler – elastomer interaction on rubber reinforcement.” **Composites part A :Applied Science and manufacturing.**, Vol.36 No.4, 2005. pp.449-460.
- [63] Leblanc J.L. “Rubber-filler interactions and rheological properties in filled compounds.” **Progress in Polymer Science.**, Vol.27, 2002. pp.627-687.
- [64] Mark J.E., Erman B. and Eirich F.R. **Science and technology of rubber.** 3rd Ed. Elsevier: Amsterdam, New York. 2005.
- [65] Adhikari B., De D. and Maiti S. “Reclamation and recycling of waste rubber.” **Progress in Polymer Science.**, Vol.25 No.7, 2000. pp.909-948.
- [66] Kumnuantip C. and Sombatsompop N. “Effects of reclaimed rubber content in NR/ carbon black vulcanizates using microwave irradiation system.” **The Society of Plastics Engineers: Annual Technical Conference.**, ANTEC 2005, 1-5 May. pp.3211-3215.
- [67] Sombatsompop N. and Kumnuantip C. “Comparison of physical and mechanical properties of NR/ reclaimed rubber blends vulcanized by conventional thermal or microwave irradiation methods.” **Journal of Applied Polymer Science.**, Vol.100 No.6, 2006. pp.5039-5048.
- [68] Doo-ngam N., Ratanadecho P. and Klinklai W. “Microwave preheating of natural rubber using a rectangular wave guide (MODE: TE₁₀).” **Songklanakarinn Journal Science and Technology.**, Vol.29 No.6, 2007. pp.1599–1608.
- [69] Datta R.N. and Ivany M.S. **A chemical for reversion resistance compounding.** Rubber World: 1995. 24, pp.212.
- [70] Hoover F.I. **Review of Vulcanization Chemistry.** Rubber World: Vol.24, 1999. pp.220.
- [71] Laurence L., Christopher M.L., Norman S.A., Michele E. and Robert S.W. “Use of microwave dielectric loss spectroscopy for characterization of natural rubber/carbon black composites.” **Polymer Bulletin.**, Vol.44, 2000. pp.187-194.
- [72] Dobozy J. “**Method and apparatus for recovering an elastomeric material.**” United States Patent No. 6722593, 2004.

- [73] Wicks G.G., Schulz R.L., Clark D.E. and Folz D.C. “**Microwave treatment of vulcanization rubber.**” United States Patent No. 6420457, 2002.
- [74] Anderson E.E. “**Method and apparatus for microwave heating of flowable material.**” United States Patent No. 4129768, 1978.
- [75] Bovtun V., Stark W., Kelm J., Porokhonsky V. and Yakimenko Y. “Microwave dielectric properties of rubber compounds undergoing vulcanization.” **KGK-Kautschuk and Gummi Kunststoffe.**, Vol.54 No.12, 2001. pp.673–678.
- [76] Bogdal D., Penczek P., Pielichowski J. and Prociak A. “Microwave assisted synthesis, crosslinking and process of polymeric materials.” **Advances in Polymer Science.**, Vol.163, 2003. pp.193–263.
- [77] Landini L., Araujo S.G., Lugao A.B. and Wiebeck H. “Preliminary analysis to BIR recovery using the microwave process.” **European Polymer Journal.**, Vol.43 No.6, 2007. pp.2725–2731.
- [78] Khor C.Y., Ariff Z.M., CheAni F., Abdul Mujeebu M., Abdullah M.K., Abdullah M.Z. and Joseph M.A. “Three-dimensional numerical and experimental investigations on polymer rheology in meso-scale injection molding.” **International Communications in Heat and Mass Transfer.**, Vol.37 No.2, 2010. pp.131–139.
- [79] Sejimo A. and Shigeo O. “**Method for continuously vulcanizing hoses.**” United States Patent No. 4702867. 1987.
- [80] Sutton W.H., Brooks M.H. and Chabinsky I.J. “Microwave processing of materials.” **Materials Research Society symposium proceeding.** April 5-8, 1988.
- [81] Martin D., Ighigeanu D., Mateescu E., Craciun G. and Ighigeanu A. “Vulcanization of rubber mixtures by simultaneous electron beam and microwave irradiation.” **Radiation Physics and Chemistry.**, Vol.65 No.1, 2002. pp.63-65.
- [82] Nunes K.R.A., Mahler C., Valle R. and Neves C. “Evaluation of investment in recycling centers for construction and demolition wastes in Brazilian municipalities.” **Waste Management.**, Vol.27, 2007. pp.1531-1540.
- [83] Borjonovo E. and Peccati L. “Uncertainty and global sensitivity analysis in the evaluation of investment projects.” **International Journal of Production Economic.**, Vol.104, 2006. pp.62-73.
- [84] สุนทรื วัชนเวคิน, ชาลี นิลประพันธ์, วัศสชัย สิทธิบุศย์, พิชายู จิตถาวรกุล และ กิตติศักดิ์ เทพากร. “การศึกษาความเป็นไปได้ของการจัดตั้งโรงงานผลิตถุงมือทางการแพทย์ที่ใช้ในการตรวจโรค.” วิทยานิพนธ์รัฐศาสตรมหาบัณฑิต สาขารัฐประศาสนศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์. 2544.

- [85] อุดุลย์วิทย์ สุรีย์พงษ์. “การศึกษาความเป็นไปได้ของการตั้งโรงงานผลิตถุงมือยางทางการแพทย์.” วิทยานิพนธ์เศรษฐศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเศรษฐศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2551
- [86] บุญมา อรมุต. “การศึกษาความเป็นไปได้ของการจัดตั้งโรงงานผลิตยางรีเคลมจากถุงมือเสียในนิคมอุตสาหกรรมภาคใต้.” สารนิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาการจัดการอุตสาหกรรม บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 2550.
- [87] พงศพิศ แซ่มเชื้อ. “การศึกษาความเป็นไปได้ของการลงทุนผลิตแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก: กรณีศึกษาอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์.” การศึกษาค้นคว้าอิสระวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาการจัดการวิศวกรรม บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2552.
- [88] สิริรัตน์ พิงชมพู่. “การศึกษาความเป็นไปได้เชิงเทคนิคและเชิงเศรษฐศาสตร์ในการผลิตเมทิลเอสเทอร์จากไขมันในระบอบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 2550.
- [89] Brabender GmbH & Co. KG, Buisburg. “Internal mixer.” [Online]. Available : <http://www.brabender.com/english/rubber/products/mixers/measuring-mixers.html>. [3 March 2016].
- [90] Yong Fong Machinery Co., Ltd. “Two roll mill.” [Online]. Available : http://www.yongfongthai.com/index.php?langtype=en&pageid=en_4&add=view&id=17. [3 March 2016].
- [91] Tang-Master Co., Ltd. “Compression molding hydraulic.” [Online]. Available : http://www.tang-master.com/mold_4.html. [6 March 2016].
- [92] CP Retailink Co., Ltd. “Microwave Panasonic#NE-1756.” [Online]. Available : http://www.cpretailink.co.th/mainpage/product_detail.php?pid=119&sec_id=1&cat_id=2&brand=26&bid=56&brand_pro=Panasonic&&brname=Microwave [12 March 2016].
- [93] Aprem A.S., Jose S., Thomas S., Barkoula N.M. and Kocsis J.K. “Influence of hydrothermally degraded polyester-urethane on physical and mechanical properties of chloroprene rubber.” *European Polymer Journal*. Vol.39 No.1, 2003. pp.69-76.
- [94] Alpha Technologies. “Moving Disc Rheometer.” [Online]. Available : <http://www.alpha-technologies.com/mdr-2000-moving-die-rheometer.aspx>. [7 March 2016].
- [95] Alpha Technologies. “Rubber Process Analyzer” [Online]. Available : <http://www.alpha-technologies.com/products/premier-rpa>. [7 March 2016].

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [96] Perkin Elmer, Inc. “**Dynamic Mechanical Analyzer**” [Online]. Available : http://www.perkinelmer.com/lab-solutions/resources/docs/BRO_DMA8000.pdf. [7 March 2016].
- [97] Zapmeta. “**Shore Instrument.**” [Online]. Available : <http://www.zapmeta.com/image?q=shore+a+durometer+scale+digital+hardness+tester>. [8 March 2016].
- [98] Instron European. “**Universal testing machine.**” [Online]. Available : <http://www.instron.co.uk/en-gb/products/testing-systems/universal-testing-systems>. [15 March 2016].
- [99] Makal N. and Ratanadecho P. “Microwave pre-curing of natural rubber - compounding using a rectangular wave guide.” **International Communications in Heat and Mass Transfer.**, Vol.37 No.7, 2010. pp.914-923.
- [100] Von Hippel A.R., **Dielectric materials and application**, MIT Press: Boston. 1954.
- [101] Barringer S.A., Davis E.A., Gordon J., Ayappa K.G. and Davis H.T. “Effect of sample size on the microwave heating rate: Oil vs. water.” **AIChE Journal.**, Vol. 40 No.9, 1994. pp.1433-1439.
- [102] Ratanadecho P., Aoki K. and Akahori M. “A numerical and experimental investigation of the modeling of microwave heating for liquid layers using a rectangular wave guide (effect of natural convection and dielectric properties).” **Applied Mathematical Modelling.**, Vol.26 No.3, 2002. pp.449-472.
- [103] ศูนย์วิจัยเพื่อการใช้ประโยชน์จากไมโครเวฟในงานวิศวกรรม ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต. **เครื่องเน็ตเวิร์กนาไลเซอร์.** กรุงเทพฯ : 2556.
- [104] Testo, Inc., Germany. “**Thermometer.**” [Online]. Available : <https://www.testo.com/product/0560+9250/testo-925-Type-K-Thermometer>. [20 March 2016].
- [105] FEI Corporate. “**Scanning Electron Microscopy.**” [Online]. Available : <https://www.fei.com/products/sem/quanta-sem/> [3 April 2016].
- [106] CCSi Company. “**Goodrich Flexometer.**” [Online]. Available : <http://www.ccsi-inc.com/p-flexural-bfg-flexometer.htm> [3 April 2016].
- [107] Allen T.C., Bryan B. and James L. “Characterization of polymer-filler interface in-irradiated silica-reinforced polysiloxane composites.” **Materials Research Society.**, Vol.629, 2003. FF5.14.1-FF5.14.5.

- [108] Ahmed K., Nizami S.S., Raza N.Z. and Shirin K., "Cure characteristics, mechanical and swelling properties of marble sludge filled EPDM modified chloroprene rubber blends." **Advances in Materials Physics and chemistry.**, Vol.2, 2012. pp.90-97.
- [109] KTT. Technology Outsource Co., Ltd. "**Heating Oven.**" [Online]. Available : <http://www.kttlab.com/item.php?cid=22&sid=41&pid=198>. [3 April 2016].
- [110] Ueshima Seisakusho Co., Ltd. "**Ageing Oven.**" [Online]. Available : https://www.ueshima-seisakusho.co.jp/top_en.html. [3 April 2016].
- [111] รัชดา โสภาคะยัง ณ์ฑเดชชาธร พวงเงินมาก และ เวช วิเวก. "**การออกแบบและสร้างต้นแบบเครื่องอุ่นตัวอย่างต้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ.**" รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย. กรุงเทพฯ. 2548.
- [112] ณ์ฐพงษ์ นิธิอุทัย และ ดนัยปภพ อ้ววิเชียร. หนังสืองานวิจัยยางพาราเพื่ออนาคตที่ยั่งยืน. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย. กรุงเทพฯ. 2549.
- [113] Gothech testing Machines Inc. "**Universal testing machine.**" [Online]. Available : http://www.gotech.biz/product_info?n=114. [3 April 2016].
- [114] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม.
มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมสายพานลำเลียง (มอก. 147-2530). กรุงเทพฯ : 2530.
- [115] ปรัชญา พลະพันธ์ุ. **คู่มือวิเคราะห์และการจัดการข้อมูลสถิติด้วย Minitab ฉบับมืออาชีพ.** นนทบุรี : บริษัทไอดีซี พรีเมียร์ จำกัด. 2560. พิมพ์ครั้งที่ 1
- [116] อรรถสิทธิ์ หัสสิทธิ์ธรรม. **โปรแกรมวิเคราะห์การลงทุน (Version 2.0 Beta).** กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์ บริษัทมิติภาพการพิมพ์และสติคดีโอ จำกัด. 2546.
- [117] Sadequl A.M., Ishiaku U.S. and Poh B.T. "Cure Index and Activation Energy of ENR-25 Compared with SMR L in Various Vulcanization systems." **European Polymer Journal.**, Vol.35 No.4, 1999. pp.711-719.
- [118] Gelling I.R. "Epoxidised natural rubber." **Journal International Rubber.**, Vol.6, 1991. pp.184-205.
- [119] Rattanasom N., Saowapark T. and Deeprasertkul C. "Reinforcement of natural rubber with silica/carbon black hybrid filler." **Polymer Testing.**, Vol.26, 2007. pp.369-377.
- [120] Payne, A.R., "Effect of dispersion on the dynamic properties of filler-loaded rubber." **Journal of Applied Science.** Vol.9 No.6, 1965. pp.2273-2284.
- [121] Choi, S., "Influence of the silica content on rheological behavior and cure characteristics of silica filled styrene-butadiene rubber compound." **Polymer International.** Vol.50, 2001. pp.525-530.

- [122] Thongsang, S., Vorakhan, W., Wimomala, E., Sombatsompop, N., “Dynamic mechanical analysis and tribological properties of NR vulcanizates with fly ash/precipitated silica hybrid filler.” **Tribology International**. Vol.53, 2012. pp.134-141.
- [123] Jacob, M., Francis, B., Thomas, S., Varughese, K.T., “Dynamical mechanical analysis of sisal/oil palm hybrid fiber-reinforced natural rubber composites.” **Polymer Composites**. Vol.27 No.6, 2006. pp.671-680.
- [124] Najidha S., Saxena N.S., Sreeja R., Unnithan C.H. and Predeep P. “Optical and electrical characterization of SbCl₅ doped cis-1,4-polyisoprene.” **Materials Letters.**, Vol.59, 2005. pp.3431-3436.
- [125] Baker C.S.L. and Gelling I.R. **Epoxidation natural rubber**. In development in rubber technology – 4, Whelan A. and Lee K.S. (eds.) London : Elsevier, 1987. pp.87-117.
- [126] Yoksan R. “Epoxidized natural rubber for adhesive applications.” **Kasetsart Journal (Natural Science)**., Vol.42, 2008. pp.325-332.
- [127] Roy S., Gupta B.R. and De S.K. **Epoxidized rubber in elastomer technology**. handbook Nicholas., ed, 1993. pp.635-659.
- [128] Nadkar N., Debnath S.C. and Basu D.K. “Novel method for the preparation of carboxylated nitrile rubber – natural rubber blends using bis (diisopropyl) thiophosphoryl polysulfides.” **Journal of Applied Polymer Science.**, Vol.80, 2001. pp.17-24.
- [129] Hofmann W. **Rubber technology**. handbook Munich : Hanser Publishers. 1989.
- [130] Frohlich J., Niedermeier W. and Luginsland H.D. “The effect of filler-filler and filler-elastomer interaction on rubber reinforcement.” **Composites Past A: Applied Science and Manufacturing.**, Vol.36, 2005. pp.449-460.
- [131] Brandrup J. and Immergut E.H. **Polymer handbook**. 3rd Edition., Wiley-Interscience. New York, USA. 1989.
- [132] Peter A.C. and Norman H. **The rubber formulary**. Noyes Publications, Norwich New York, USA. 1999.
- [133] Ratanadecho P., Aoki K. and Akahori M. “Experimental validation of a combined electromagnetic and thermal model for a microwave heating of multi-layered materials using a rectangular wave guide,” **ASME Journal heat transfer.**, Vol.124 No.5, 2002. pp.992–996.
- [134] Ratanadecho P. “Influences of irradiation time, particle sizes and initial moisture content during microwave drying of multi-layered capillary porous materials.” **Journal ASME Heat Transfer.**, Vol.124 No.1, 2002. pp.151–161.

- [135] Schbert H. and Regier M. **The microwave processing of food**. Woodhead Publishing Limited.: Uk. 2005.
- [136] Ratanadecho P., Aoki K. and Akahori M. "A numerical and experimental investigation of the modeling of microwave drying using a rectangular wave guide." **Drying Technology an International J.**, Vol.19 No.9, 2001. pp. 2209-2234.
- [137] วราภรณ์ ขจรไชยกูล. **ผลิตภัณฑ์ยาง: กระบวนการผลิตและเทคโนโลยี**. กรุงเทพมหานคร: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย. 2552
- [138] วารุณี กลิ่นไกล และ ผดุงศักดิ์ รัตน์เดโช. "การอ่อนยางธรรมชาติด้วยพลังงานไมโครเวฟ โดยใช้ระบบท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม : สมบัติและโครงสร้างของยางธรรมชาติ." การประชุมเครือข่ายความร่วมมือทางวิชาการนานาชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. นครนายก. 16-18 มกราคม 2552.
- [139] Varghese S., Kuriakose B. and Thomas S. "Short sisal fiber reinforced natural rubber composites: high energy radiation, thermal and ozone degradation." **Polym.Degrad. Stab.**, Vol.44, 1994. pp.55-61.
- [140] Ismail H. and Jaffri R.M. "Physico-mechanical properties of oil palm wood flour filled natural rubber composites." **Polymer Testing**., Vol.18 No.5, 1999. pp.381-388.
- [141] Ismail H., Shuhelmy S. and Edyham M.R. "The effects of a silane coupling agent on curing characteristics and mechanical properties of bamboo fiber filled natural rubber composites." **European Polymer Journal**., Vol.38 No.1, 2002. pp.39-47.
- [142] Metaxas A.C. "Applicators for Industrial Microwave Processing." **Microwave: Theory and Application in Materials Processing II, Ceramic Transactions**., Vol.36, 1993. pp 549-562.
- [143] Okress E.C. **Microwave Power Engineering**. Academic Press.: New York. Vol.2, 1968.
- [144] Philips P. **Heating with Microwaves**, Technical Library.: Springer. 1964.



ภาคผนวก ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ศึกษาอิทธิพลสารตัวเติม และสารตัวเติมผสมที่มีต่อสมบัติกายภาพของยางคอมปาวด์สายพานลำเลียงอาหาร

1.1 ผลของระบบการวัลคาไนซ์

ตารางที่ ก-1 ผลทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ของ ENR50 และ STR5L กับสารตัวเติมและสารตัวเติมผสม

Formulas	M_L (lb.in)	M_H (lb.in)	M_H-M_L (lb.in)	t_{s1} (min)	t_{s2} (min)	t_{c10} (min)	t_{c50} (min)	t_{c90} (min)
SiO ₂ /ENR	0.7	9.4	8.7	2.3	2.6	5.4	6.5	7.6
SiO ₂ /STR	1.8	10.0	8.2	3.0	3.2	5.0	6.7	7.7
MgCO ₃ /ENR	0.4	6.7	6.3	2.0	2.7	3.1	3.4	3.6
MgCO ₃ /STR	1.3	7.9	6.6	1.6	1.9	2.1	2.5	2.7
SiO ₂ /MgCO ₃ /ENR	1.5	11.3	9.8	1.8	2.0	3.9	6.0	6.2
SiO ₂ /MgCO ₃ /STR	3.2	14.6	11.4	1.5	1.6	3.5	3.6	4.3

1.2 ผลการทดสอบสมบัติไดอิเล็กทริก

ตารางที่ ก-2 ผลทดสอบสมบัติไดอิเล็กทริกของยางวัลคาไนซ์ ENR50 และ STR5L กับสารตัวเติมและสารตัวเติมผสม

Formulas	Resonant frequency (MHz)	Quality factor	Dielectric constant (ϵ'_r)	Loss factor (ϵ''_r)	Loss tangent $\tan \delta = (\epsilon''_r) / (\epsilon'_r)$
SiO ₂ /ENR	2407.26	81.13	2.39666	0.148561	0.061942
SiO ₂ /STR	2411.36	90.46	2.32125	0.119188	0.051370
MgCO ₃ /ENR	2402.17	85.88	2.49052	0.131059	0.052756
MgCO ₃ /STR	2441.83	98.42	2.36931	0.097343	0.041139
SiO ₂ /MgCO ₃ /ENR	2398.43	75.42	2.55520	0.168930	0.066168
SiO ₂ /MgCO ₃ /STR	2405.56	83.82	2.42712	0.138728	0.057166

1.3 ผลการทดสอบสมบัติการทนน้ำมัน

ตารางที่ ก-3 ผลทดสอบสมบัติการทนน้ำมันก่อนและหลังการอบเร่งด้วยความร้อนของยางวัลคาไนซ์ ENR50 และ STR5L กับสารตัวเติมและสารตัวเติมผสม คิดเป็นร้อยละของปริมาณที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อแช่ตัวอย่างในน้ำมัน IRM 903 ที่อุณหภูมิ 100°C นาน 24 ชั่วโมง

Formulas Sample No.	Chang in volume (%)							
	Unaged				Aged (100°C, 22 hours)			
	1	2	3	Mean	1	2	3	Mean
SiO ₂ /ENR	35.11	35.88	36.72	35.90	24.51	24.11	24.34	24.32
SiO ₂ /STR	223.08	222.87	222.75	222.90	153.34	154.07	153.98	153.80
MgCO ₃ /ENR	38.51	38.97	38.63	38.70	27.55	27.02	26.90	27.16
MgCO ₃ /STR	190.80	191.00	189.41	190.40	120.65	122.00	121.00	121.22
SiO ₂ /MgCO ₃ /ENR	31.93	31.20	31.67	31.60	19.58	19.44	21.19	20.07
SiO ₂ /MgCO ₃ /STR	204.76	200.83	211.81	205.80	137.08	135.88	137.05	136.67

2. ศึกษาอิทธิพลของผสมระหว่าง ENR50/STR5L ที่มีต่อสมบัติกายภาพของยางคอมปาวด์สายพานลำเลียงอาหาร

2.1 ผลของระบบการวัลคาไนซ์

ตารางที่ ก-4 ผลทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางผสมระหว่าง ENR50/STR5L กับสารตัวเติมผสม

Formulas	M _L (lb.in)	M _H (lb.in)	M _H -M _L (lb.in)	t _{s1} (min)	t _{s2} (min)	t _{c10} (min)	t _{c50} (min)	t _{c90} (min)
E100: S0	2.44	11.92	9.48	3.20	3.59	4.58	6.14	7.48
E75: S25	2.45	11.98	9.53	3.22	3.43	4.56	6.11	7.48
E50: S50	2.88	12.59	9.71	3.04	3.58	5.05	6.31	8.00
E25: S75	2.44	12.20	9.76	2.36	3.05	5.04	6.46	8.26
E0: S100	2.02	12.18	10.16	2.52	3.56	4.45	6.17	8.48

2.2 ผลการทดสอบสมบัติไดอิเล็กตริก

ตารางที่ ก-5 ผลทดสอบสมบัติไดอิเล็กตริกของยางวัลคาไนซ์ผสมระหว่าง ENR50/STR5L กับ สารตัวเติมผสม

Formulas	Resonant frequency (MHz)	Quality factor	Dielectric constant (ϵ'_r)	Loss factor (ϵ''_r)	Loss tangent $\tan \delta = (\epsilon''_r) / (\epsilon'_r)$
E100: S0	2398.43	75.42	2.55520	0.168930	0.066168
E75: S25	2399.32	78.20	2.54838	0.157795	0.061866
E50: S50	2406.48	80.88	2.41708	0.149212	0.061774
E25: S75	2405.03	83.91	2.43564	0.138316	0.056775
E0: S100	2405.56	83.82	2.42712	0.138728	0.057166

2.3 ผลการทดสอบความแข็ง

ตารางที่ ก-6 ผลทดสอบสมบัติความแข็งก่อนและหลังการอบเร่งด้วยความร้อนของยางวัลคาไนซ์ผสมระหว่าง ENR50/STR5L กับสารตัวเติมผสม

Formulas Sample No.	Hardness (Shore A)							
	Unaged				Aged (100°C, 22 hours)			
	1	2	3	Mean	1	2	3	Mean
E100: S0	59	57	55	57	61	61	64	62
E75: S25	54	58	59	57	61	62	60	61
E50: S50	56	55	60	57	60	61	59	60
E25: S75	55	54	56	55	61	59	57	59
E0: S100	53	55	51	53	57	60	60	59

2.4 ผลการทดสอบสมบัติความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 300

ตารางที่ ก-7 ผลทดสอบสมบัติความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 300 ก่อนและหลังการอบเร่งด้วยความร้อนของยางวัลคาไนซ์ผสมระหว่าง ENR50/STR5L กับสารตัวเติมผสม

Formulas Sample No.	Modulus at 300% elongation (MPa)							
	Unaged				Aged (100°C, 22 hours)			
	1	2	3	Mean	1	2	3	Mean
E100: S0	4.8	6.1	4.4	5.1	6.8	7.3	6.0	6.7
E75: S25	5.0	5.6	5.0	5.2	6.5	7.1	5.9	6.5
E50: S50	6.0	4.7	4.9	5.2	6.7	6.7	6.1	6.5
E25: S75	5.1	5.7	4.2	5.0	6.1	5.7	6.2	6.0
E0: S100	4.2	4.3	5.0	4.5	6.3	4.8	5.4	5.5

2.5 ผลการทดสอบสมบัติความต้านแรงดึง

ตารางที่ ก-8 ผลทดสอบสมบัติความต้านทานแรงดึงก่อนและหลังการอบเร่งด้วยความร้อนของยางวัลคาไนซ์ผสมระหว่าง ENR50/STR5L กับสารตัวเติมผสม

Formulas Sample No.	Tensile strength (MPa)							
	Unaged				Aged (100°C, 22 hours)			
	1	2	3	Mean	1	2	3	Mean
E100: S0	14.0	14.2	12.9	13.70	15.8	15.1	15.0	15.30
E75: S25	13.1	13.7	12.8	13.20	13.1	14.0	12.8	13.30
E50: S50	13.3	13.0	13.6	13.30	13.0	12.6	14.0	13.20
E25: S75	13.5	12.8	14.5	13.60	12.7	13.1	13.5	13.10
E0: S100	12.3	14.0	13.0	13.10	12.5	14.7	13.0	13.40

2.6 ผลการทดสอบสมบัติการทนต่อแรงยืดจนขาด

ตารางที่ ก-9 ผลทดสอบสมบัติความทนต่อแรงยืดจนขาดก่อนและหลังการอบเร่งด้วยความร้อนของยางวัลคาไนซ์ผสมระหว่าง ENR50/STR5L กับสารตัวเติมผสม

Formulas Sample No.	Elongation at break (%)							
	Unaged				Aged (100°C, 22 hours)			
	1	2	3	Mean	1	2	3	Mean
E100: S0	585	634	545	588	508	597	530	545
E75: S25	562	588	551	567	511	499	532	514
E50: S50	618	569	541	576	519	482	508	503
E25: S75	584	608	545	579	500	476	524	500
E0: S100	549	626	538	571	598	547	490	545

2.7 ผลการทดสอบสมบัติการทนน้ำมัน

ตารางที่ ก-10 ผลทดสอบสมบัติการทนน้ำมันก่อนและหลังการอบเร่งด้วยความร้อนของยางวัลคาไนซ์ผสมระหว่าง ENR50/STR5L กับสารตัวเติมผสม คิดเป็นร้อยละของปริมาณที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อแช่ตัวอย่างในน้ำมัน IRM 903 ที่อุณหภูมิ 100°C นาน 24 ชั่วโมง

Formulas Sample No.	Chang in volume (%)							
	Unaged				Aged (100°C, 22 hours)			
	1	2	3	Mean	1	2	3	Mean
E100: S0	31.93	31.20	31.67	31.60	19.58	19.44	21.19	20.07
E75: S25	70.00	67.20	61.10	66.10	44.22	43.04	44.80	44.02
E50: S50	100.23	120.11	105.76	108.70	72.14	74.07	71.20	72.47
E25: S75	162.12	160.45	172.43	165.00	110.43	108.26	111.31	110.00
E0: S100	204.76	200.83	211.81	205.80	137.08	135.88	137.05	136.67

2.8 ผลการทดสอบสมบัติความร้อนสะสมในยาง

ตารางที่ ก-11 ผลทดสอบสมบัติความร้อนสะสมก่อนการอบเร่งด้วยความร้อนของยางวัลคาไนซ์ผสมระหว่าง ENR50/STR5L กับสารตัวเติมผสม

Formulas Sample No.	Temperature (°C)							
	Unaged				Aged (100°C, 22 hours)			
	1	2	3	Mean	1	2	3	Mean
E100: S0	30.00	31.00	32.00	31.00	-	-	-	-
E75: S25	40.00	43.00	43.00	42.00	-	-	-	-
E50: S50	36.00	41.00	40.00	39.00	-	-	-	-
E25: S75	37.00	40.00	37.00	38.00	-	-	-	-
E0: S100	29.00	28.00	30.00	29.00	-	-	-	-

3. อิทธิพลสารตัวเติมผสมที่มีต่อสมบัติความร้อนของยางคอมพาวด์สูตรสายพานลำเลียงอาหารที่อุ่นด้วยพลังงานไมโครเวฟ

3.1 ผลของระบบการวัลคาไนซ์

ตารางที่ ก-12 ผลทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ของ FCBC ใส่และไม่ใส่สารตัวเติมผสม ปริมาณสารวัลคาไนซ์ที่ต่างกัน เมื่อไม่ผ่านพลังงานไมโครเวฟ

Formulas	M_L (lb.in)	M_H (lb.in)	$M_H - M_L$ (lb.in)	t_{s1} (min)	t_{s2} (min)	t_{c10} (min)	t_{c50} (min)	t_{c90} (min)
FCBc-S1.0	0.32	4.60	4.28	3.01	3.53	3.58	3.60	5.73
FCBc-S1.5	0.35	5.61	5.26	2.82	3.02	3.25	3.48	5.42
FCBc-S2.0	0.41	6.60	6.19	2.31	2.67	3.04	3.11	5.20
FCBcF-S1.0	5.99	19.79	13.80	3.18	3.86	4.15	5.43	10.20
FCBcF-S1.5	5.81	22.39	16.58	2.56	3.20	3.48	4.92	10.15
FCBcF-S2.0	5.24	26.93	21.69	2.00	2.56	2.63	4.42	10.12

3.2 ผลการทดสอบสมบัติไดอิเล็กทริก

ตารางที่ ก-13 ผลทดสอบสมบัติสมบัติไดอิเล็กทริกของ FCBc ใสและไม่ใสสารตัวเติมผสม ปริมาณสารวัลคาไนซ์ที่ต่างกัน เมื่อไม่ผ่านพลังงานไมโครเวฟ

Formulas	Resonant frequency (MHz)	Quality factor	Dielectric constant (ϵ_r')	Loss factor (ϵ_r'')	Loss tangent $\tan \delta = (\epsilon_r'') / (\epsilon_r')$
FCBc-S1.0	2438.26	92.86	1.978	0.1240	0.06269
FCBc-S1.5	2437.34	89.33	1.929	0.1230	0.06376
FCBc-S2.0	2466.59	94.72	1.990	0.1280	0.06432
FCBcF-S1.0	2451.22	92.05	2.160	0.1430	0.06620
FCBcF-S1.5	2402.52	77.08	2.002	0.1330	0.06643
FCBcF-S2.0	2409.87	79.33	2.631	0.1770	0.06727

3.3 ผลการทดสอบพฤติกรรมทางความร้อนเมื่อเวลาต่างกัน

ตารางที่ ก-14 ผลทดสอบอุณหภูมิของ FCBc ใสและไม่ใสสารตัวเติมผสม ที่เวลาต่างกัน เมื่อไม่ผ่านและผ่านพลังงานไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ต่างกัน

Temperature ($^{\circ}\text{C}$)								
Level (watts)	Time 1 min							
	Without mixed fillers (FCBc-S2.0)				With mixed fillers (FCBcF-S2.0)			
Sample No.	1	2	3	Mean	1	2	3	Mean
0	30	30	30	30	30	30	30	30
340	46	43	43	44	45	44	46	45
850	50	47	53	50	58	58	58	58
1700	96	95	94	95	109	113	108	110
	Time 2 min							
	Without mixed fillers (FCBc-S2.0)				With mixed fillers (FCBcF-S2.0)			
0	30	30	30	30	30	30	30	30
340	46	49	49	48	51	54	51	52
850	68	72	67	69	83	86	89	86
1700	120	118	122	120	129	132	129	130

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 ผลการทดสอบพฤติกรรมทางความร้อนเมื่อความหนาขึ้นตัวอย่างต่างกัน

ตารางที่ ก-15 ผลทดสอบอุณหภูมิของ FCBC ใส่และไม่ใส่สารตัวเติมผสม ที่ความหนาของขึ้นตัวอย่างต่างกัน และที่เวลาต่างกัน เมื่อผ่านพลังงานไมโครเวฟที่ 850 วัตต์

		Temperature (°C)							
Time (min)	Sample No.	W850- Thickness 1 cm				W850- Thickness 2 cm			
		Without mixed fillers (FCBc-S2.0)				With mixed fillers (FCBcF-S2.0)			
		1	2	3	Mean	1	2	3	Mean
0		30	30	30	30	30	30	30	30
1		57	53	55	55	59	59	59	59
2		75	75	75	75	97	100	94	97
3		102	110	106	106	163	153	155	157
4		149	153	148	150	204	210	207	207
		W850- Thickness 2 cm				W850- Thickness 3 cm			
		Without mixed fillers (FCBc-S2.0)				With mixed fillers (FCBcF-S2.0)			
0		30	30	30	30	30	30	30	30
1		54	49	50	51	51	54	57	54
2		70	73	73	72	90	97	92	93
3		96	93	96	95	133	130	142	135
4		128	132	130	130	184	180	188	184
		W850- Thickness 3 cm				W850- Thickness 3 cm			
		Without mixed fillers (FCBc-S2.0)				With mixed fillers (FCBcF-S2.0)			
0		30	30	30	30	30	30	30	30
1		48	43	50	47	54	46	50	50
2		74	68	68	70	84	90	90	88
3		77	87	82	82	123	120	117	120
4		108	112	116	112	160	165	155	160

4. อิทธิพลสารตัวเติมผสมที่มีต่อสมบัติกายภาพของยางคอมปาวด์สายพานลำเลียงอาหารที่อ่อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ

4.1 ผลการทดสอบความหนาแน่นของพันธะ

ตารางที่ ก-16 ผลทดสอบสมบัติความหนาแน่นพันธะของ FCBc ใส่และไม่ใส่สารตัวเติมผสม ปริมาณสารวัลคาไนซ์ที่ต่างกัน เมื่อไม่ผ่านและผ่านพลังงานไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ต่างกัน

Cross-linked, mol/cm ³ (x 10 ⁴)								
Sulfur (phr)	0 watt							
	Without mixed fillers (FCBc-W0)				With mixed fillers (FCBcF-W0)			
Sample No.	1	2	3	Mean	1	2	3	Mean
1.0	0.57	0.55	0.56	0.56	0.87	0.85	0.89	0.87
1.5	0.73	0.66	0.68	0.69	0.88	0.95	0.90	0.91
2.0	0.84	0.88	0.89	0.87	0.94	1.02	1.01	0.99
340 watts								
Without mixed fillers (FCBc-W340)				With mixed fillers (FCBcF-W340)				
1.0	0.66	0.70	0.68	0.68	0.85	0.77	0.81	0.81
1.5	0.60	0.64	0.65	0.63	0.82	0.77	0.75	0.78
2.0	0.51	0.54	0.54	0.53	0.62	0.65	0.68	0.65
850 watts								
Without mixed fillers (FCBc-W840)				With mixed fillers (FCBcF-W840)				
1.0	0.46	0.50	0.48	0.48	0.55	0.62	0.60	0.59
1.5	0.40	0.45	0.44	0.43	0.57	0.57	0.54	0.56
2.0	0.33	0.30	0.36	0.33	0.48	0.40	0.44	0.44
1700 watts								
Without mixed fillers (FCBc-W1700)				With mixed fillers (FCBcF-W1700)				
1.0	0.15	0.13	0.11	0.13	0.23	0.17	0.2	0.20
1.5	0.09	0.11	0.10	0.10	0.18	0.17	0.19	0.18
2.0	0.08	0.08	0.08	0.08	0.11	0.10	0.12	0.11

4.2 ลักษณะการวัลคาไนซ์ยางคอมปาวด์เมื่อไม่ผ่านและผ่านพลังงานไมโครเวฟ

ตารางที่ ก-17 ผลทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ของ FCBC ใส่สารตัวเติมผสม และปริมาณกำมะถัน ที่ 1.0 phr เมื่อนำไปผ่านการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟที่ 0, 340 และ 850 วัตต์

Properties	Formulas : FCBCF-S1.0 (W)		
	0	340	850
Min. torque (M_L) (lb.in)	4.83	4.13	4.92
Max. torque (M_H) (lb.in)	23.33	17.60	16.70
Delta torque (M_H-M_L) (lb.in)	18.50	16.47	11.78
Scorch time (t_{S1}) (min)	3.54	1.27	0.40
Scorch time (t_{S2}) (min)	5.02	1.41	0.48
Optimum cure time (t_{C10}) (min)	4.56	1.37	0.42
Optimum cure time (t_{C50}) (min)	6.45	2.26	1.20
Optimum cure time (t_{C90}) (min)	10.00	4.38	3.01
Optimum cure time (t_{C95}) (min)	11.37	6.01	3.36
Cure rate index (min^{-1})	16.53	32.15	38.31

4.3 ผลการทดสอบความแข็ง

ตารางที่ ก-18 ผลทดสอบสมบัติความแข็งก่อนและหลังการอบเร่งด้วยความร้อนของ FCBC ใส่และไม่ใส่สารตัวเติมผสม เมื่อไม่ผ่านและผ่านพลังงานไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ต่างกัน

Hardness (Shore A)								
Level (watts)	Without mixed fillers							
	FCBC-S1.0-unaged				FCBC-S1.0-aged			
Sample No.	1	2	3	Mean	1	2	3	Mean
0	36	35	37	36	39	38	40	39
340	38	41	38	39	43	40	40	41
850	38	38	38	38	39	39	42	40
1700	36	37	35	36	40	40	40	40
	With mixed fillers							
	FCBCF-S1.0-unaged				FCBCF-S1.0-aged			
0	73	70	73	72	81	81	81	81
340	74	75	73	74	84	79	80	81
850	73	73	76	74	82	80	81	81
1700	68	71	71	70	78	84	78	80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ผลการทดสอบสมบัติความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ300

ตารางที่ ก-19 ผลทดสอบสมบัติความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ300 ก่อนและหลังการอบเร่งด้วยความร้อนของ FCBc ใสและไม่ใสสารตัวเติมผสม เมื่อไม่ผ่านและผ่านพลังงานไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ต่างกัน

Modulus at 300% elongation (MPa)								
Level (watts)	Without mixed fillers							
	FCBc-S1.0-unaged				FCBc-S1.0-aged			
Sample No.	1	2	3	Mean	1	2	3	Mean
0	2.1	1.9	2.3	2.1	2.5	2.1	2	2.2
340	2.1	2.1	2.1	2.1	2.2	2.3	2.1	2.2
850	2.2	1.9	1.9	2.0	2.6	2.3	2.3	2.4
1700	1.9	1.5	2.0	1.8	2.4	2.6	2.2	2.4
	With mixed fillers							
	FCBcF-S1.0-unaged				FCBcF-S1.0-aged			
0	12.4	12.9	12.8	12.7	16.2	16.7	16.6	16.5
340	10.5	12.0	12.3	11.6	14.8	15.4	14.5	14.9
850	11.5	11.3	11.4	11.4	15.1	14.8	14.8	14.9
1700	10.7	12.0	10.6	11.1	14.7	14.9	14.8	14.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 ผลการทดสอบสมบัติความต้านแรงดึง

ตารางที่ ก-20 ผลทดสอบสมบัติความต้านทานแรงดึงก่อนและหลังการอบเร่งด้วยความร้อนของ FCBC ใส่และไม่ใส่สารตัวเติมผสม เมื่อไม่ผ่านและผ่านพลังงานไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ต่างกัน

Tensile strength (MPa)								
Level (watts)	Without mixed fillers							
	FCBc-S1.0-unaged				FCBc-S1.0-aged			
Sample No.	1	2	3	Mean	1	2	3	Mean
0	20.2	19.4	20.1	19.9	26.3	26.1	24.1	25.5
340	20.0	20.7	22.3	21.0	23.7	23.0	20.5	22.4
850	21.2	20.5	21.1	20.9	19.7	19.9	19.8	19.8
1700	18.8	20.3	20.0	19.7	17.5	16.9	16.3	16.9
With mixed fillers								
FCBcF-S1.0-unaged								
FCBcF-S1.0-aged								
0	17.6	19.0	19.2	18.6	19.4	19.4	17.9	18.9
340	19.9	19.2	19.7	19.6	19.0	19.0	18.1	18.7
850	19.6	20.5	18.7	19.6	18.6	18.3	18.0	18.3
1700	19.2	18.4	18.5	18.7	16.9	16.8	17.0	16.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 ผลการทดสอบสมบัติความทนต่อแรงยืดจนขาด

ตารางที่ ก-21 ผลทดสอบสมบัติความทนต่อแรงยืดจนขาดก่อนและหลังการอบเร่งด้วยความร้อนของ FCBC ใส่และไม่ใส่สารตัวเติมผสม เมื่อไม่ผ่านและผ่านพลังงานไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ต่างกัน

Elongation at break (%)								
Level (watts)	Without mixed fillers							
	FCBc-S1.0-unaged				FCBc-S1.0-aged			
Sample No.	1	2	3	Mean	1	2	3	Mean
0	633	664	677	658	687	671	664	674
340	628	666	653	649	641	640	633	638
850	685	675	650	670	638	629	647	638
1700	682	696	689	689	614	622	618	618
	With mixed fillers							
	FCBcF-S1.0-unaged				FCBcF-S1.0-aged			
0	430	413	423	422	362	364	360	362
340	474	467	466	469	355	352	343	350
850	458	470	455	461	380	368	371	373
1700	454	463	442	453	375	371	370	372

4.7 ผลการทดสอบการเสื่อมสภาพด้วยการอบเร่งด้วยความร้อน

ตารางที่ ก-22 ผลการเสื่อมสภาพด้วยการอบเร่งด้วยความร้อนของสมบัติเชิงกลของ FCBCc ใส่และไม่ใส่สารตัวเติมผสม เมื่อไม่ผ่านและผ่านพลังงานไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ต่างกัน

Microwave power (watts)	Percentage retention							
	Hardness		Modulus at 300% elongation		Tensile strength		Elongation at break	
	FCBc	FCBcF	FCBc	FCBcF	FCBc	FCBcF	FCBc	FCBcF
0	108.33	112.50	104.76	129.92	128.14	101.61	102.43	85.78
340	105.13	109.46	104.76	128.45	106.67	95.41	98.31	74.63
850	105.26	109.46	120.00	130.70	94.74	93.37	95.22	80.91
1700	111.11	114.29	133.33	133.33	85.79	90.37	89.70	82.12

4.8 การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การเชื่อมโยง (crosslink density)

ตัวอย่างการทดสอบการหาค่าเปอร์เซ็นต์การเชื่อมโยงของยางคอมปาวด์สายพายลำเลียงอาหารที่ใส่สารตัวเติมผสมคือซิลิกาและแมกนีเซียมคาร์บอเนต มีปริมาณสารวัลคาไนซ์ที่ 1.0, 1.5 และ 2.0 phr ทำการอุ่นด้วยพลังงานไมโครเวฟที่ 340, 850 และ 1,700 วัตต์ (สำหรับการทดสอบการหาค่าเปอร์เซ็นต์การเชื่อมโยงของยางคอมปาวด์สายพายลำเลียงอาหารที่ไม่ใส่สารตัวเติมผสม ให้ปฏิบัติตามขั้นตอนเหมือนกับยางคอมปาวด์สายพายลำเลียงอาหารที่ใส่สารตัวเติมผสม)

ตารางที่ ก-23 น้ำหนักและค่าต่างๆ ที่ได้จากการทดสอบเปอร์เซ็นต์การเชื่อมโยงของ FCBC ใส่และไม่ใส่สารตัวเติมผสม ที่มีปริมาณสารวัลคาไนซ์ที่ต่างกัน เมื่อไม่ผ่านและผ่านพลังงานไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ต่างกัน

Formulas	V_r	α	M_0 (g.)	M_1 (g.)	M_2 (g.)
FCBc-W0_S1.0	0.157408	0.0779	0.2476	1.0763	0.2283
FCBc-W0_S1.5	0.172258	0.0816	0.2353	0.9322	0.2161
FCBc-W0_S2.0	0.189151	0.0835	0.2371	0.8559	0.2173
FCBcF-W0_S1.0	0.189140	0.0582	0.3368	0.7604	0.3172
FCBcF-W0_S1.5	0.192337	0.0589	0.2971	0.6410	0.2796
FCBcF-W0_S2.0	0.198840	0.0632	0.3688	0.9163	0.3455
FCBc-W340_S1.0	0.171479	0.0801	0.2191	0.8770	0.2013
FCBc-W340_S1.5	0.166251	0.0830	0.2410	0.9853	0.2210
FCBc-W340_S2.0	0.155362	0.0887	0.2119	0.9128	0.1931
FCBcF-W340_S1.0	0.184014	0.0582	0.2783	0.6409	0.2621
FCBcF-W340_S1.5	0.180767	0.0612	0.307	0.7125	0.2882
FCBcF-W340_S2.0	0.168326	0.0621	0.2932	0.7150	0.2750

สมการที่ใช้ในการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การเชื่อมโยง (crosslink density) คือ

$$\eta_{swell} = \frac{-\ln(1-V_r) - V_r - \chi V_r^2}{V_m \left(V_r^{\frac{1}{3}} - \frac{V_r}{2} \right)} \quad (ก.1)$$

กำหนดให้เมื่อ V_r คือ ค่าสัดส่วนโดยปริมาตรของยางคอมปาวด์สายพานลำเลียงอาหารในสถานะเจลที่บวมตัวสมดุล, χ พารามิเตอร์การทำงานร่วมกันระหว่างยางกับสารละลาย (0.406), V_m ค่าปริมาตรโมลาร์ (106.8 cm³ mol) และ η_{swell} ค่าเปอร์เซ็นต์การบวมตัวของยาง (%)

■ การคำนวณ V_r ซึ่งเป็นค่าสัดส่วนโดยปริมาตรของยางคอมปาวด์สายพานลำเลียงอาหาร ที่ใส่สารตัวเติมผสมในสถานะเจลที่บวมตัวสมดุล โดยสามารถคำนวณได้ ดังนี้

- 1) ชั่งน้ำหนักยางคอมปาวด์สายพานลำเลียงอาหารที่ใส่สารตัวเติมผสมที่มีปริมาตร 1 ตารางเซนติเมตร ก่อนแช่โทลูอีน (m_0)
- 2) ชั่งน้ำหนักยางคอมปาวด์สายพานลำเลียงอาหารที่ใส่สารตัวเติมผสม หลังแช่โทลูอีนเป็นเวลา 1 สัปดาห์ที่อุณหภูมิ 28°C (m_1)
- 3) ชั่งน้ำหนักยางคอมปาวด์สายพานลำเลียงอาหารที่ใส่สารตัวเติมผสม หลังอบที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง (m_2)

นำน้ำหนักยางคอมปาวด์สายพานลำเลียงอาหารที่ใส่สารตัวเติมผสมที่ได้มาคำนวณด้วยสมการ

$$V_r = \frac{\frac{m_0 \phi (1-\alpha)}{\rho_r}}{\frac{m_0 \phi (1-\alpha)}{\rho_r} + \frac{(m_1 - m_2)}{\rho_s}} \quad (\text{ก.2})$$

α คือ มวลที่หายไปของยางคอมปาวด์สายพานลำเลียงอาหารที่ใส่สารตัวเติมผสมระหว่างการบวมตัวหาได้จาก

$$\alpha = \frac{m_0 - m_2}{m_0}$$

ยกตัวอย่าง FCBCF-W340_S1.0 สามารถคำนวณค่า

$$\alpha = \frac{0.2783 - 0.2621}{0.2783} = 0.0582$$

ϕ คือสัดส่วนโดยมวลของเนื้อยางธรรมชาติอีพอกไซด์-50 ในชิ้นงานยางคอมปาวด์สายพานลำเลียงอาหารที่ใส่สารตัวเติมที่นำมาทดสอบ สามารถคำนวณได้จาก

$$\begin{aligned} \phi &= \frac{\text{phr ของยางธรรมชาติอีพอกไซด์-50}}{\text{phr ของสูตรยางคอมปาวด์รวม}} \\ &= \frac{100}{206.80} \\ &= 0.4835 \end{aligned}$$

ρ_r คือ ความหนาแน่นของยางธรรมชาติอีพอกไซด์-50 คอมปาวด์ (ยางคอมปาวด์สายพานลำเลียงอาหาร) ที่ใส่สารตัวเติมผสม ($\approx 0.71 \text{ kg/m}^3$)

ρ_s คือ ความหนาแน่นของโทลูอีน (0.86 kg/m^3)

นำค่าที่ได้ทั้งหมดของสูตร FCBCF-W340_S1.0

$$V_r = \frac{\frac{0.2783 * 0.4835 * (1 - 0.0582)}{0.71}}{\frac{0.2783 * 0.4835 * (1 - 0.0582)}{0.71} + \frac{(0.6409 - 0.2621)}{0.86}}$$

$$= 0.184014$$

- คำนวณค่า Flory – Huggins interaction parameter

$$X = 0.34 + \frac{V_m}{RT} + (\delta_s - \delta_p) \quad (ก.3)$$

โดย V_m คือ Molar volume ของโพลูอิน (106.8 ml./mol)

R คือ ค่าคงที่ของก๊าซ (1.987 cal./mol-k)

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (301K)

δ_s คือ solubility parameter ของโพลูอิน (8.91)

δ_p คือ solubility parameter ของยางธรรมชาติ (8.30)

แทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ ก.3 จะได้

$$X = 0.34 + \frac{106.8}{(1.987 * 301)} (8.91 - 8.30)$$

$$= 0.448927$$

นำค่า X , V_m และ V_r ของ FCBCF-W430_S1.0 แทนค่าในสมการที่ ก.1 จะได้

$$\eta_{swell} = \frac{[-\ln(1 - 0.184014)] - 0.184014 - [0.448927 * (0.184014)^2]}{106.8 \left((0.184014)^{\frac{1}{3}} - \frac{0.184014}{2} \right)}$$

$$= 0.813606E - 05$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. การประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์สายพานลำเลียงอาหาร

1.1 มาตรฐานสายพานลำเลียงอาหารชนิดทนน้ำมันสำหรับลำเลียงอาหารทั่วไป

ตารางที่ ข-1 ค่ามาตรฐานสายพานลำเลียงอาหารชนิดทนน้ำมันสำหรับลำเลียงอาหารทั่วไป

รายการ	หน่วย	ค่ามาตรฐาน
ค่าแรงดึงต่ำสุดของยาง (Tensile Strength) (Min)	MPa	15
ค่าความยืดต่ำสุดที่ขาด (Elongation At Break) (Min)	%	350
แรงยึดติดแน่น (Adhesion strength) (Min)	N/mm	12
ค่าความแข็งของยาง (Hardness)	Shore A	65-75
การบวมพองเมื่อแช่น้ำมัน (Swelling)	%	>40
อุณหภูมิที่ใช้งานสูงสุด	$^{\circ}$ C	80

ที่มา: บริษัท ยูเนียนเบิ้ลท์อินดัสตรีส์ จำกัด

1.2 ผลของอุณหภูมิและเวลา

ตารางที่ ข-2 ผลทดสอบระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของ FCBC ใส่สารตัวเติมผสมเมื่อผ่านพลังงานไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ต่างกัน

ระดับพลังงาน (วัตต์)	อุณหภูมิ ($^{\circ}$ C)				
	เวลา (นาที)				
	0	1	2	3	4
100	30	44	58	70	85
200	30	57	70	85	98
300	30	68	75	105	120
400	30	90	115	134	150
500	30	107	130	145	160

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 การทดสอบสมบัติแรงยึดติดแน่น

ตารางที่ ข-3 ผลทดสอบสมบัติแรงยึดติดแน่นระหว่าง TCR/PE1, PE1/PE2, PE2/PE3 และ PE3/BCR กับระยะเวลาการวัลคาไนซ์

ชั้นผ้า	แรงยึดติดแน่น (N/mm)			
	ระยะเวลาการวัลคาไนซ์ (นาท)			
	2	5	8	11
TCR/PE1	10.34	16.28	16.67	15.77
PE1/PE2	11.12	14.88	15.07	14.40
PE2/PE3	10.39	15.52	15.20	14.80
PE3/BCR	9.89	15.53	16.41	14.95

ตารางที่ ข-4 ค่ามาตรฐานสมบัติแรงยึดติดแน่นของसानพาน้ำเลี้ยงอาหารชนิดทนน้ำมันสำหรับน้ำเลี้ยงอาหารทั่วไป

รายการ	หน่วย	ค่ามาตรฐาน
ค่าแรงดึงระหว่างยางผิวบน กับชั้นผ้าที่ 1 (Min) Top Cover Rubber/ Polyester 1: TCR/PE1	N/mm	12
ค่าแรงดึงระหว่างชั้นผ้า1 กับชั้นผ้า 2 (Min) Polyester 1/ Polyester 2 : PE1/PE2	N/mm	12
ค่าแรงดึงระหว่างชั้นผ้า 2 กับชั้นผ้า 3 (Min) Polyester 2/ Polyester 3 : PE2/PE3	N/mm	12
ค่าแรงดึงระหว่างชั้นผ้าที่ 3 กับยางผิวล่าง (Min) Polyester 3/ Bottom Cover Rubber : PE3/BCR	N/mm	12

ที่มา: บริษัท ยูเนียนเบิ้ลท์อินดัสตรีส์ จำกัด

ตารางที่ ข-5 ข้อกำหนดการทดสอบสมบัติแรงยึดติดแน่น

รายการ	ข้อกำหนด
1. เต้าไมโครเวฟ	Model : NE-1756 Power source : 220 V, 50 Hz, Single phase Required power : 12.8 A, 2780 W Output : HI = 1700 W, MED = 850 W, DEF = 340 W Frequency : 2.45 GHz. Outer dimensions (W x D x H) : 422 x 580 x 337 mm Cavity dimensions (W x D x H) : 330 x 310 x 175 mm Net Weight : 30 Kg Timer : HI, MDE power = 15 min, DEF power = 30 min
2. ประเภทของวัสดุติบและก้ำมะถัน	FCBcF-S1.0
3. ชนิดของผ้า	ผ้าโพลีเอสเตอร์ (EP 120)
4. สายพานลำเลียงอาหารชนิดทวน น้ำมันสำหรับลำเลียงอาหารทั่วไป	1. จำนวนชั้นผ้า 3 ชั้น 2. ความหนาของผิวบน 2.5 mm. 3. ความหนาของผิวล่าง 1.5 mm. 4. ความหนารวม 7 mm.
5. เวลาอุ่น/ กำลังวัตต์ และเวลาการรอ	1. เวลาอุ่น 2 นาที 2. กำลังวัตต์ 300 วัตต์ 3. เวลาการรอในตู้อบไมโครเวฟ 3 นาที 4. อุณหภูมิที่ผิวของคอมปาวด์ 65±5 °C
6. เวลา และอุณหภูมิในการอัดขึ้นรูป	1. เวลา 5 นาที [50% ของ Cure time] 2. อุณหภูมิ 150-155°C
7. ขนาดชิ้นทดสอบ	1. ความกว้าง 25±0.5 mm. 2. ความยาว (min) 300 mm.

1.4 กำลังการผลิตต่อปี และราคาขายผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป

ผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปสายพานลำเลียงอาหาร ประกอบด้วยจำนวนชั้นผ้า 3 ชั้น ความหนาของ
บน 2.5 มิลลิเมตร และความหนาของล่าง 1.5 มิลลิเมตร ซึ่งความหนารวม เท่ากับ 7 มิลลิเมตร (มิติ
กว้าง x ยาว x หนา : 0.5 เมตร x 5 เมตร x 7 มม.)

กำลังการผลิต 102,000 เมตร/ปี

ราคาแบบเดิม 1,000.00 บาท/เมตร

ราคาแบบใหม่ 1,130.00 บาท/เมตร

ที่มาราคาขาย: บริษัทยูเนี่ยนเบิ้ลท์อินดัสตรีส์ จำกัด ณ วันที่ 30/11/2558

ส่วนต่าง = + 130 บาท/ เมตร.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ต้นทุนวัตถุดิบการผลิต

1.5.1 ต้นทุนวัตถุดิบยางคอมปาวด์ (ตามตารางที่ ข-6 และ ข-7)

ราคายางคอมปาวด์ 70.46 บาท/ กก.

ผลิตภัณฑ์สายพานลำเลียงอาหารสำเร็จรูป 1 ชุด ใช้ยางคอมปาวด์ 50 กก. = 3,523 บาท

1.5.2 ต้นทุนวัตถุดิบผ้าโพลีเอสเตอร์

ราคาผ้าโพลีเอสเตอร์ 55 บาท/ เมตร

ผลิตภัณฑ์สายพานลำเลียงอาหารสำเร็จรูป 1 ชุด ใช้ผ้าโพลีเอสเตอร์ 15 เมตร = 825 บาท

1.5.3 ต้นทุนยางน้ำกาว

ราคายางน้ำกาว 20 บาท/ เมตร

ผลิตภัณฑ์สายพานลำเลียงอาหารสำเร็จรูป 1 ชุด ใช้ยางน้ำกาว 10 เมตร = 200 บาท

ตารางที่ ข-6 ต้นทุนวัตถุดิบ (สูตรเดิม)

รายการ	ราคา (บาท/กก.)	ปริมาณที่ใช้ (phr)	ปริมาณที่ใช้ (กรัม)	ราคา (บาท)
NBR	100	70	700	70.00
STR 5L	65	30	300	19.50
ENR50	85	0	0	0.00
Silica (233)	32	40	400	12.80
Magnesium carbonate	50	20	200	10.00
CaCO ₃	30	20	200	6.00
Titanium dioxide	85	8	80	6.80
Stearic acid	85	3	30	2.55
Zinc oxide	90	1	10	0.90
Paraffinic (oil 105)	50	8	80	4.00
Neoflow L-90 resins	120	5	50	6.00
Paraffin wax	80	1	10	0.80
BHT	180	2	20	3.60
Coplink 89	250	4	40	10.00
PEG-4000	90	2.8	28	2.52
MBTS	110	0.6	6	0.66
TBBS	250	1	10	2.50
Sulphur	25	1.5	15	0.38
Total		217.9	2179	159.01
ต้นทุน (บาท/ กก.)		= 72.97 บาท/กก. (159.01÷2.179)		

ที่มา: บริษัท จี เอส พี โปรดักซ์ จำกัด (ราคา ณ วันที่ 16/07/2558)
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับผูกพันนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-7 ต้นทุนวัตถุดิบ (สูตรใหม่)

รายการ	ราคา (บาท/กก.)	ปริมาณที่ใช้ (phr)	ปริมาณที่ใช้ (กรัม)	ราคา (บาท)
NBR	100	0	0	0.00
STR 5L	65	0	0	0.00
ENR50	85	100	1000	85.00
Silica (233)	32	40	400	12.80
Magnesium carbonate	50	40	400	20.00
CaCO ₃	30	0	0	0.00
Titanium dioxide	85	8	80	6.80
Stearic acid	85	3	30	2.55
Zinc oxide	90	1	10	0.90
Paraffinic (oil 105)	50	8	80	4.00
Neoflow L-90 resins	120	2	20	2.40
Paraffin wax	80	1	10	0.80
BHT	180	2	20	3.60
Coplink 89	250	2	20	5.00
PEG-4000	90	2.2	22	1.98
MBTS	110	0.6	6	0.66
TBBS	250	1	10	2.50
Sulphur	25	1	10	0.25
Total		211.8	2118	149.24
ต้นทุน (บาท/ กก.)	= 70.46 บาท/กก. (149.24÷2.118)			

ที่มา: บริษัท จี เอส พี โปรดักส์ จำกัด (ราคา ณ วันที่ 16/07/2558)

ส่วนต่าง = - 2.51 บาท/ กก.

1.6 ต้นทุนกระบวนการบดผสมยางกับสารเคมี

1.6.1 กระบวนการบดผสม

แบบเดิม: เวลาในการบดผสมยางกับสารเคมี 16 นาที/ ชุด และอุณหภูมิ 70°C

แบบใหม่: เวลาในการบดผสมยางกับสารเคมี 12 นาที/ ชุด และอุณหภูมิ 70°C

ส่วนต่าง = - 4 นาที/ ชุด

1.6.2 กำลังการผลิต

ยางคอมปาวด์ 1 ชุด/ น้ำหนัก 50 กิโลกรัม

คำนวณจาก 480 นาที/ 8 ชม./ 1 วัน

แบบเดิม: ชุดละ 16 นาที = 480 นาที/ 16 ชุด = 30 ชุด/ 8 ชม.

แบบใหม่: ชุดละ 12 นาที = 480 นาที/ 12 ชุด = 40 ชุด/ 8 ชม.

ส่วนต่าง = +10 ชุด/ 8 ชม.

1.6.3 ค่าแรงงาน

ค่าแรงงานเฉลี่ย 1.25 บาทต่อนาที (600 บาท ÷ 480 นาที)

แบบเดิม: จำนวนพนักงาน 2 คน = 600 บาท/ 8 ชม. (2 คน x 300 บาท)

ผลิตได้ 30 ชุด/ 8 ชม.

ค่าแรงงานเฉลี่ย 20 บาท/ ชุด

แบบใหม่: จำนวนพนักงาน 2 คน = 600 บาท/ 8 ชม. (2 คน x 300 บาท)

ผลิตได้ 40 ชุด/ 8 ชม.

ค่าแรงงานเฉลี่ย 15 บาท/ ชุด

ส่วนต่าง = -5 บาท/ ชุด

1.6.4 ค่าพลังงานไฟฟ้า

เครื่องบดผสมยางแบบปิด (Internal mixer) ขนาดมอเตอร์ 500 แรงม้า

= 500 x 0.75 = 375 kw/ h.

ราคาค่ากระแสไฟฟ้าโรงงาน 3 เฟสสำหรับอุตสาหกรรมขนาดกลาง

= 6 บาท/ ยูนิต์

แบบเดิม:

ระยะเวลาในการบดผสมยางกับสารเคมี = 16 นาที/ ชุด

เวลา 60 นาที ใช้พลังงานไฟฟ้า = 375 Kw

เวลา 16 นาที ใช้พลังงานไฟฟ้า = (375 x 16)/ 60 Kw

= 100 Kw

ราคาค่าต้นทุนพลังงานไฟฟ้า/ ชุด = 6 บาท x 100 Kw

= 600 บาท/ชุด

ราคาค่าต้นทุนพลังงานไฟฟ้า 30 ชุด/ 8 ชม. = 600 บาท x 30 ชุด

= 18,000 บาท/ 8 ชม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบใหม่:

ระยะเวลาในการบดผสมยางกับสารเคมี	= 12 นาที/ ชุด
เวลา 60 นาที ใช้พลังงานไฟฟ้า	= 375 Kw
เวลา 12 นาที ใช้พลังงานไฟฟ้า	= (375 x 12)/ 60
	= 75 Kw
ราคาต้นทุนพลังงานไฟฟ้า/ ชุด	= 6 บาท x 75 Kw
	= 450 บาท/ ชุด
ราคาต้นทุนพลังงานไฟฟ้า 40 ชุด/ 8 ชม.	= 450 บาท x 40 ชุด
	= 18,000 บาท/ 8 ชม.

ส่วนต่าง = - 25 Kw/ 8 ชม.

1.7 ต้นทุนกระบวนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์สายพานลำเลียงอาหาร : เพื่องานวิจัย

1.7.1 กระบวนการอัดขึ้นรูป

กระบวนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์สายพานลำเลียงอาหารโดยใช้พลังงานไมโครเวฟร่วมกับวิธีให้ความร้อนแบบดั้งเดิม ทำการอุ่นด้วยพลังงานไมโครเวฟที่ 340 วัตต์ คลื่นความถี่ที่ 2.45 GHz เป็นเวลา 1 นาที หลังจากนั้นนำไปอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปแบบไฮดรอลิกใช้เวลาในการอบ 5 นาที ที่อุณหภูมิ 150°C

1.7.2 ค่าพลังงานไฟฟ้า

1) การคำนวณระยะเวลาในการขึ้นรูปแบบสองขั้นตอน

ระยะเวลาที่วัสดุไนซ์ที่ 90% คือ t_{c90}	= 10	นาที
ดังนั้น 50% ของ T_{c90}	= 5	นาที

ทำการอุ่นความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ ที่เวลา 1 นาที และนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปแบบไฮดรอลิก เป็นเวลา 5 นาที (เวลารวม 6 นาที)

เวลา 10 นาที คิดเป็น	= 100	%
----------------------	-------	---

เวลา 6 นาที คิดเป็น	= (6 x 100)/ 10	%
---------------------	-----------------	---

	= 60	%
--	------	---

ดังนั้น ความสามารถในการลดเวลา	= 100 - 60	%
-------------------------------	------------	---

	= 40	%
--	------	---

2) ราคาพลังงานไฟฟ้า

2.1) เครื่องอัดไฮดรอลิกใช้ปั๊มขนาดมอเตอร์ 10 แรงม้า

= 10 x 0.75 = 7.5 kw/ h.

$$\begin{aligned}
 &2.2) \quad 50\% \text{ ของระยะเวลาขบวนการที่ } 90\% \text{ คือ } t_{C90} = 5 \text{ นาที} \\
 &\text{เวลา } 60 \text{ นาที ใช้พลังงานไฟฟ้า} \quad = 7.5 \text{ Kw} \\
 &\text{เวลา } 5 \text{ นาที ใช้พลังงานไฟฟ้า} \quad = (7.5 \times 5) / 60 \text{ Kw} \\
 &\quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad = 0.625 \text{ Kw} \\
 &\text{ราคาต้นทุนพลังงานไฟฟ้า/ชุด} \quad = 6 \text{ บาท} \times 0.625 \text{ Kw} \\
 &\quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad = 3.75 \text{ บาท/ชุด}
 \end{aligned}$$

2.3) ในการอุ่นยางคอมปาวด์สายพานลำเลียงอาหาร ใช้พลังงานไมโครเวฟ 340 วัตต์ เป็นเวลา 1 นาที

$$= (1/60) \times (340/1,000) = 0.0057 \text{ Kw/ h.}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ราคาต้นทุนพลังงานไฟฟ้า/ชุด} &= 6 \text{ บาท} \times 0.0057 \text{ Kw} \\
 &= 0.0342 \text{ บาท/ชุด}
 \end{aligned}$$

2.4) ดังนั้นพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ทั้งหมด

$$= 0.625 + 0.0057 = 0.6307 \text{ Kw/ h.}$$

2.5) คำนวณการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ 100%

การใช้พลังงานไฟฟ้า 1.250 Kw/ h. คิดเป็น 100 %

การใช้พลังงานไฟฟ้า 0.6307 Kw/ h. คิดเป็น $(100 \times 0.6307) / 1.250 = 50.46 \%$

2.6) คำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่อรอบการผลิต หรือสามารถลดพลังงานไฟฟ้าต่อรอบการผลิต

$$= 100 - 50.46 \%$$

$$= 49.54 \%$$

1.8 ต้นทุนกระบวนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์สายพานลำเลียงอาหาร : เพื่อการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม

1.8.1 กระบวนการอัดขึ้นรูป

แบบเดิม: ไม่ผ่านตู้อบไมโครเวฟ

ขั้นตอนอัดขึ้นรูปใช้เวลา 20 นาที/ชุด และอุณหภูมิ 145-150°C

แบบใหม่: ผ่านตู้อบไมโครเวฟที่ 300 วัตต์ใช้เวลา 2 นาที

ขั้นตอนอัดขึ้นรูปใช้เวลา 5 นาที/ชุด และอุณหภูมิ 150-155°C

ส่วนต่าง = - 13 นาที/ชุด

1.8.2 กำลังการผลิต

ผลิตภัณฑ์สายพานลำเลียงอาหาร 1 ชุดต่อความยาว 5 เมตร

คำนวณจาก 480 นาทีต่อวัน

แบบเดิม: ชุดละ 20 นาที = 480 นาที/ 24 ชุด = 24 ชุด/ 8 ชม.

แบบใหม่: ชุดละ 7 นาที = 480 นาที/ 68 ชุด = 68 ชุด/ 8 ชม.

ส่วนต่าง = +44 ชุด/ 8 ชม.

1.8.3 ค่าแรงงาน

แบบเดิม: จำนวนพนักงาน 2 คน = 600 บาท/8 ชม. (2 คน x 300 บาท)

ผลิตได้ 24 ชุด/ 8 ชม.

ค่าแรงงานเฉลี่ย 25 บาท/ ชุด

แบบใหม่: จำนวนพนักงาน 2 คน = 600 บาท/8 ชม. (2 คน x 300 บาท)

ผลิตได้ 68 ชุด/ 8 ชม.

ค่าแรงงานเฉลี่ย 8.82 บาท/ ชุด

ส่วนต่าง = -16.18 บาท/ ชุด

1.8.4 ค่าพลังงานไฟฟ้า

1) ระยะเวลาในการขึ้นรูปแบบสองขั้นตอน

ระยะเวลาอย่างวัลคาไนซ์ที่ 90% คือ t_{c90} = 10 นาที

ดังนั้น 50% ของ T_{c90} = 5 นาที

ทำการอุ่นความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ ที่เวลา 2 นาที และนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปแบบไฮดรอลิก เป็นเวลา 5 นาที (เวลารวม 7 นาที)

เวลา 10 นาที คิดเป็น = 100 %

เวลา 7 นาที คิดเป็น = $(7 \times 100) / 10$ %

= 70 %

ดังนั้น ความสามารถในการลดเวลา = $100 - 70$ %

= 30 %

ส่วนต่าง = -30.00%

2) ราคาพลังงานไฟฟ้า

2.1) เครื่องอัดไฮดรอลิกใช้ปั๊มขนาดมอเตอร์ 10 แรงม้า

= $10 \times 0.75 = 7.5 \text{ kw/ h.}$

2.2) แบบเดิม

ระยะเวลาอย่างวัลคาไนซ์ที่ 90% คือ $t_{c90} = 10$ นาที

เวลา 60 นาที ใช้พลังงานไฟฟ้า = 7.5 Kw

เวลา 10 นาที ใช้พลังงานไฟฟ้า = $(7.5 \times 10) / 60$ Kw

= 1.250 Kw

ราคาต้นทุนพลังงานไฟฟ้า/ชุด = 6 บาท x 1.250 Kw

= 7.50 บาท/ ชุด

ราคาต้นทุนพลังงานไฟฟ้า 24 ชุด/8 ชม. = 7.50 บาท x 24 ชุด

= 180 บาท/ 8 ชม.

2.3) แบบใหม่

50% ของระยะเวลาวางวัลคาไนซ์ที่ 90% คือ $t_{c90} = 5$ นาที

เวลา 60 นาที ใช้พลังงานไฟฟ้า = 7.5 Kw

เวลา 5 นาที ใช้พลังงานไฟฟ้า = $(7.5 \times 5) / 60$ Kw
= 0.625 Kw

ราคาต้นทุนพลังงานไฟฟ้า/ ชุด = 6 บาท \times 0.625 Kw
= 3.75 บาท/ ชุด

ราคาต้นทุนพลังงานไฟฟ้า 68 ชุด/ 8 ชม. = 3.75 บาท \times 68 ชุด
= 255 บาท/ 8 ชม.

2.4) ในการอุ่นยางคอมปาวด์สายพานลำเลียงอาหาร ใช้พลังงานไมโครเวฟ 300 วัตต์ เป็นเวลา 2 นาที

= $(2/60) \times (300/1,000) = 0.01$ Kw/ h.

ราคาต้นทุนพลังงานไฟฟ้า/ ชุด = 6 บาท \times 0.01 Kw
= 0.06 บาท/ ชุด

ราคาต้นทุนพลังงานไฟฟ้า 68 ชุด/ 8 ชม. = 0.06 บาท \times 68 ชุด
= 4.08 บาท/ 8 ชม.

2.5) ดังนั้นพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ทั้งหมด

= $0.625 + 0.01 = 0.635$ Kw/ h.

2.6) คำนวณการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ 100%

การใช้พลังงานไฟฟ้า 1.250 Kw/ h. คิดเป็น 100 %

การใช้พลังงานไฟฟ้า 0.635 Kw/ h. คิดเป็น $(100 \times 0.635) / 1.250 = 50.80$ %

2.7) คำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่อรอบการผลิต หรือสามารถลดพลังงานไฟฟ้าต่อรอบการผลิต

= $100 - 50.80$ %

= 49.20 %

ส่วนต่าง = -49.20 %/ ชุด.

2.8) ต้นทุนการผลิตแบบใหม่

ตารางที่ ข-8 ต้นทุนการผลิตผลิตภัณฑ์สายพานลำเลียงอาหารของกระบวนการผลิตแบบใหม่ในปีแรก

รายการ		รายละเอียดต้นทุนการผลิต	
		ต่อชุด	ต่อปี
1.กำลังการผลิต (เมตร)	-	5	102,000
2.ราคาขายผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป/ชุด(บาท)	-	5,650	115,260,000
3.ราคาค่าต้นทุนวัตถุดิบ			
ยางคอมปาวด์ (บาท)	70.46/ กก.	3,523	71,869,200
ผ้าโพลีเอสเตอร์ (บาท)	55/ เมตร	825	16,830,000
ยางน้ำกาว (บาท)	20/ เมตร	200	4,080,000
รวม		4,548	92,779,200
4.กระบวนการอัดขึ้นรูป			
ค่าแรงงาน 2 คน (บาท)	600/ วัน	8.82	180,000
ค่าโบนัส (บาท)	3 เดือน	2.21	45,000
ค่าพลังงานไฟฟ้า (บาท)	255/ วัน	3.75	76,500
ค่าพลังงานไฟฟ้า(ไมโครเวฟ) (บาท)	4.08/ วัน	0.06	1,224
รวม		14.92	302,724
ระยะเวลาอัดขึ้นรูป (นาทีก)	-	5	-
ระยะเวลาผ่านตู้ไมโครเวฟ (นาทีก)	-	2	-
กำลังการผลิต (ชุด)	68/ วัน	-	20,400
5.ค่าเสียหาย			
ค่าทางการตลาด (บาท)		4.90	100,000
ค่าวัสดุสิ้นเปลืองโรงงาน (บาท)		2.94	60,000
ค่าเบี้ยประกันภัย (บาท)		2.94	60,000
ค่าใช้จ่ายเบ็ดเตล็ด (บาท)		2.45	50,000
ค่าใช้จ่ายซ่อมบำรุง (บาท)		4.41	90,000
รวม		17.64	360,000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Effect of Mixed Filler on Thermal Properties of Foodstuff Conveyor Belts Compound Using an Industrial Microwave Pre-heating

Suphatchakorn Limhengha^{1,a*}, Sunpasit Limnararat^{1,b} and Wipoo Sriseubsai^{1,c}

¹Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, 10520, Bangkok, Thailand

^achakorn.lim@hotmail.com, ^bsunpasit@hotmail.com, ^cwipoo.sr@kmitl.ac.th

Keywords: mixed filler, foodstuff conveyor belt, epoxidized natural rubber-50 compounding

Abstract. This study presented the utilization of microwave power for heating of epoxidized natural rubber-50 compounding (ENR50c) with and without mixed filler in which the sulfur contents were 1.0, 1.5 and 2.0 parts per hundred parts of dried rubber by weight basis, respectively. The microwave power used was varied in a range of 340-1,700 W with a constant frequency of 2.45 GHz. The mixed filler significantly affected the relative dielectric constant, relative loss factor and loss tangent coefficient. The microwave power and time strongly influenced the temperature of the specimen. The longer time and higher microwave power resulted in higher temperature of the specimen. On the contrary, the thickness of specimen inversely affected the temperature of the specimen. The lower temperature was obtained from the thicker specimen.

Introduction

A foodstuff conveyor belt is considered as an engineering rubber product with high flexibility and less twist. The belt is white. Natural rubber is the main raw material for making the belt as it does not contaminate the food during the conveyance and at the same time there is no chemical mixture that can harm a human's body. The foodstuff conveyor belt standard determines that the product's colour must be in a shade of white. Thus, it is necessary to use SiO₂ as reinforcing agent. A microwave method is a highly efficient heating technique to activate the reaction. The popular types of rubber used in this process include ethylene-propylene diene rubber, (EPDM), butyl rubber (IIR), and epoxidized natural rubber (ENR) [1,2]. The microwave method requires a suitable frequency and power in order to affect the carbon-carbon bond, carbon-sulfur bond and the sulfur-sulfur bond. There are some previous researches that investigated the effect of microwave power on the properties of natural rubber, with or without carbon black [3] from automobile tire by dividing into carbon [4] and the chemical bond breaking of the crumb rubber being vulcanized with a microwave [5]. Some research groups studied the dielectric properties of the natural rubber at the stage of pre-and post-vulcanization [6], the cross-linking of rubber in microwave curing processes [7], the vulcanization of elastomers [8], and the microwave-assisted cross-linking carried out in relation to microwave tunnels [9].

This research presents the use of microwave for heating or pre-heating the compound with and without mixed filler (silica and magnesium carbonate) by having sulfur as a vulcanized agent and by using the microwave power. The knowledge obtained from this study is the primary element that can be applied in a design of the microwave system used for improving the molding of a foodstuff conveyor belt process in order to reduce waste, yet increase the producing ability as well as enhancing the use of the domestic rubber.

Experiment

Materials and chemicals

Epoxidized natural rubber, 50 (ENR50) is manufactured by Muang Mai Guthric Co., Ltd., Phuket, Thailand. The reinforcing filler was silica (SiO₂:Ultrasil 233) and semi-reinforcing filler was magnesium carbonate (MgCO₃) which were obtained from GSP Products Co.,Ltd. Zinc oxide (ZnO), stearic acid (CH₃(CH₂)₁₆COOH) and titanium dioxide (TiO₂) were purchased from Sunny

World Chemical Co.,Ltd. Sulfur used as a curing agent is manufactured by Utids Enterprise Co., Ltd., Samutsakhon, Thailand. Paraffin wax and neoflow L-90 resins were purchased from Behn Meyer Chemical (T) Co.,Ltd. Mercaptobenzothiazole disulfide (MBTS) and N-tert-butyl-2-benzathiazole sulfonamide (TBBS) used as an accelerator are manufactured by Flexsys, Termoli, Italy. Other chemicals such as 2,6-di-tert. butyl-p-cresol (BHT), PEG 4000 used as a filler activator and couplink 89 (silane coupling agent) used as coupling agent were kindly supplied by Chemical Innovation Co., Ltd., Bangkok, Thailand.

Preparation of rubber compounds

The raw material was prepared by mixing in an internal mixer (Brabender®GmbH&Co. KG, Duisburg, Germany), with a rotor speed of 60 rpm at a temperature of 70°C. The compounding formulas are shown in Table 1. Before mixing, the rubber compounds were classified into two groups, namely (a) ENR50 without fillers: [ENR] and (b) ENR50 with fillers (using a mixture of (SiO₂) and (MgCO₃) as fillers at 80 phr): [ENRF]. A two-stage mixing procedure was employed to prepare all compounds. In the first step, ENR50 was first masticated for 3 min. The other ingredients including ZnO, stearic acid, paraffin wax, BHT, neoflow L-90 resins and TiO₂, were then sequentially added, each with a mixing step of 1 min, followed by the second step. The following order, ENR50 was first masticated for 3 min. Then, mix separately, SiO₂, MgCO₃, couplink 89 and PEG 4000 with consecutive grinding times of 5, 3, 1 and 1 min, respectively. Similarly, the other ingredients, ZnO, stearic acid, paraffines waxes, BHT, neoflow L-90 resins and TiO₂, were sequentially added, each with a mixing step of 1 min followed by the second step described below.

In the second step, after dumping the mixture from the mixing chamber, the accelerator (MBTS and TBBS) and sulfur were added into the mixture on a conventional laboratory two-roll mill size (8x20 inch) at a roller speed of 18:20 round per min (side roller : after the roller), according to ASTM designation D3184-80. The mixing temperature was 40-45°C for 6 min. The rubber compounds were prepared using a conventional vulcanization (semi-EV). Significantly, the sulfur contents were varied from 1.0, 1.5 and 2.0 parts per hundred parts of dried rubber by weight basis, respectively. Then the mixtures were sheeted out and kept at the room temperature for 24 hours before testing. The rubber compounds were then vulcanized using a compression molding machine, under a pressure of 15 MPa at 150°C, using the optimum cure time (t_{c90}) determined by a curing test with a moving die rheometer (Monsanto Rheometer, Model MDR 2000).

Dielectric properties measurement

The analyzer consists of a coaxial cavity, microwave reflectometer, 0.35 cm coaxial cable, 0.35cm female calibration, and short and open-matched load and software. The coaxial cavity is characterized in a range of 1.5–2.6 GHz with a precision of not more than 2% of the dielectric constant and 5% of the dielectric loss factor. The measured specimen should be assumed to be of infinite size, non-magnetic material with isotropic and homogeneous properties. In addition, the coaxial cavity must be in close contact to the specimen during the test [10]. The testing procedures started with testing the dielectric properties using a rubber compound specimen with a diameter of 6.50 cm and a thickness of 1.0 cm, and then measuring the rubber compound by using portable network analyzer. The five values obtained are averaged in order to represent the dielectric properties of each rubber compounding mixture.

Microwave processes and thermal behavior

The ENR50c with and without mixed fillers was cut as a flat sheet into a thickness of 1, 2 and 3 cm and diameter of 6.50 cm. The specimen was put into a microwave and heated at given interval times and the temperature of the rubber was measured by Testo 925 (Testo AG Germany, 0560.9250, 33762315/812). The temperature of each specimen was measured 5 points.

Table 1 Mixed proportions of compounding formulas (unit in phr^a)

Raw materials	ENR ^b -S1.0 ^c	ENR-S1.5	ENR-S2.0	ENRF ^d -S1.0	ENRF-S1.5	ENRF-S2.0
ENR50	100	100	100	100	100	100
SiO ₂	-	-	-	40	40	40
MgCO ₃	-	-	-	40	40	40
TiO ₂	8	8	8	8	8	8
Stearic acid	1	1	1	1	1	1
ZnO	3	3	3	3	3	3
Neofow L90	5	5	5	5	5	5
Paraffin wax	1	1	1	1	1	1
BHT	2	2	2	2	2	2
Couplink89	-	-	-	2	2	2
PEG 4000	-	-	-	2.2	2.2	2.2
MBTS	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
TBBS	1	1	1	1	1	1
Sulfur	1	1.5	2	1	1.5	2

^a part per hundred parts by weight of rubber dry basis (phr)

^b epoxidized natural rubber 50- compounding without fillers

^c sulfur content (part per hundred parts by dry basis weight)

^d epoxidized natural rubber 50- compounding with mixed fillers (SiO₂ + MgCO₃)

Results and discussion

Dielectric properties

The influence of sulfur content and mixed fillers on dielectric properties was investigated and the results obtained are presented in Table 2. It was found that the ENR50c with mixed fillers of 80 phr exhibited better dielectric properties when comparing with the ENR50c. This is because both mixed fillers and ENR50c are polar when the mixed fillers were added into the ENR50c, resulting in an increase of polarity of the ENR50c [11,12]. Therefore, the ENR50c could change the microwave power to heat energy increasingly. Considering the influence of sulfur content as shown in Table 2, it was found that sulfur did not significant affect the dielectric properties.

Table 2 Dielectric properties of compounding with and without fillers before pre-heating

Mix symbol	Relative dielectric constant (ϵ'_r)	Relative loss factor (ϵ''_r) ($\times 10^{-3}$)	Loss tangent coefficient ($\tan \delta$) ($\times 10^{-3}$)
ENR-S1.0	1.978	0.0124	0.006269
ENR-S1.5	1.929	0.0123	0.006376
ENR-S2.0	1.990	0.0128	0.006432
ENRF-S1.0	2.160	0.0143	0.006620
ENRF-S1.5	2.002	0.0133	0.006643
ENRF-S2.0	2.631	0.0177	0.006727

Effect of microwave power on temperature and time of ENR50c with and without mixed filler

2.0 cm thick ENR50c with and without mixed filler that contained sulfur of 2.0 phr was chosen as a representative to investigate the thermal behavior by using microwave power of 340, 850 and 1,700 W as well as microwave frequency of 2.45 GHz. As shown in Fig.1, it was observed that the

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ENR50c with mixed fillers showed higher temperature of specimen when specimen was heated at the same interval time and microwave power. This was attributed to the mixed filler being dielectric materials [11], therefore, the ENR50c with mixed filler could adsorbed more microwave power which then change to heat energy easily. This gave rise to a higher temperature of ENR50c with mixed filler. On the other hand, the temperature of the ENR50c with and without mixed filler increase as a function of microwave power. This was due to the increase of electromagnetic field strength that resulted in the increase in energy absorption of compound molecules [13]. Therefore, the higher temperature was obtained for the ENR50c treated at higher microwave power. From this point of view, it can be concluded that the ENR50c with and without mixed filled that treated with microwave power of 850 W for 1 and 2 min is appropriate for use as a foodstuff conveyor belt.

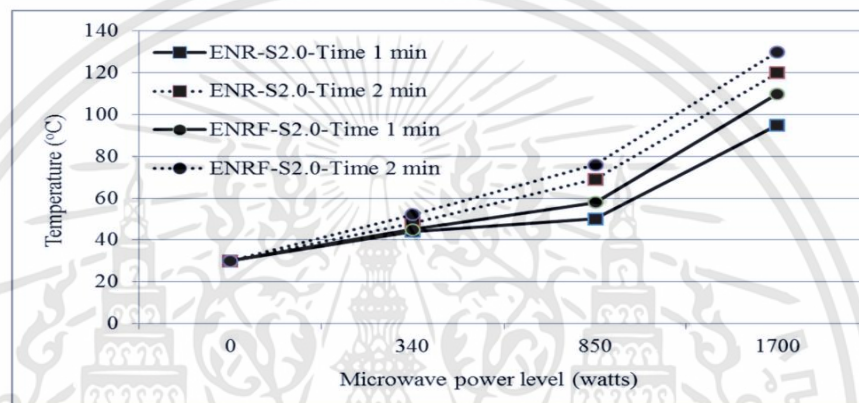


Fig.1 The relation between microwave power and temperature and time of ENR50c with and without mixed filler

Effect of the compound specimens thickness toward temperature and timing of ENR50c, with and without mixed filler under a microwave heating process

ENR50c with and without mixed filler that contained sulfur of 2.0 phr was chosen as a representative to investigate the thermal behavior by using microwave power of 850 W and microwave frequency of 2.45 GHz. The thickness of specimens was varied from 1 to 3 cm. As shown in Fig.2, the dependence of thickness' specimen on temperature can be clearly seen. It was observed that the thicker specimen exhibited lower temperature for all experimental conditions because the heat transferred slowly throughout the specimen whereas the heat transferred easily within the inner specimen [14]. In the case of thin natural rubber specimen, it was found that the absorption of microwave power and temperature was quite high at the bottom of the specimen when comparing with the natural rubber compound [15]. Considering the effect of mixed filler on the temperature of ENR50c as shown in Fig.2, it was evident that the higher temperature was obtained from the ENR50c with mixed filler when treating with the equivalent time and microwave power because the mixed filler used are dielectric materials, therefore, the ENR50c with mixed filler could adsorbed more microwave power which then change to heat energy easily as mentioned previously.

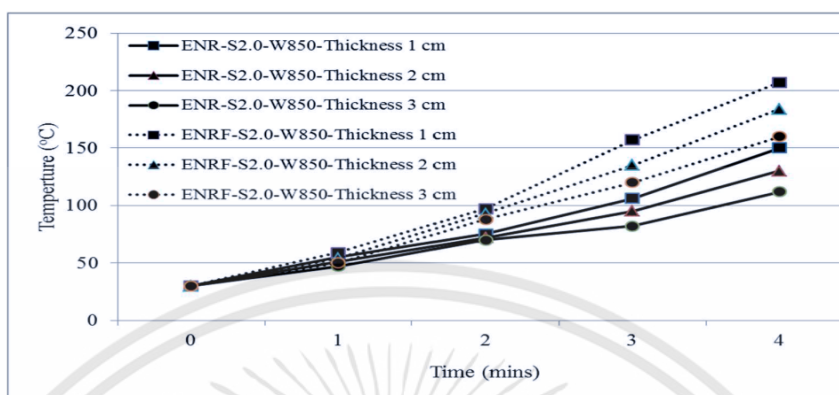


Fig.2 The relation between temperature and time of ENR50c, with and without mixed filler, at different thickness.

Conclusions

- 1) The sulfur content did not significantly affect the dielectric properties of both ENR50c and ENR50c with mixed filler.
- 2) The temperature of ENR50c with mixed filler was higher than that of the temperature of ENR50c when they were treated at equivalent time and microwave power because the mixed filler are dielectric materials that can support the change of microwave power to heat energy. Moreover, the thicker specimen showed lower temperature because the specimen could retard the heat transfer in the body.

Acknowledgments

The researcher would like to thank the Rubber Industry, Rubber Research Institution, and Agricultural Academic Department, Ministry of Agriculture and Co-operation for their support on providing rubber, chemical agents, and testing site. The gratitude also extends to CP RETAILINK Co., Ltd. Bangkok, Thailand for the use of Panasonic NE-1756 microwave, and, of course, the Faculty of Science and Industrial Technology, Prince of Songkla University for the research financial support.

References

- [1] J.E. Mark, B. Erman and F.R. Eirich, The science and technology of rubber, 3rd Ed., Elsevier Academic Press, New York, 2005, chapter 9, pp.421-427.
- [2] B. Adhikari, D. De and S. Maiti, Reclamation and recycling of waste rubber, Progress in Polymer Science, 25 (2000) 909-948.
- [3] L. Laurence, M.L. Christopher, S.A. Norman, E. Michele, F. Thompson and S.W. Robert, Use of microwave dielectric loss spectroscopy for characterization of natural rubber/carbon black composites. Polymer Bulletin, 44 (2000) 187-194.
- [4] J. Dobozy, Method and apparatus for recovering an elastomeric material, United States Patent, 6,722,593. (2004)
- [5] G.G. Wicks, R.L. Schulz, D.E. Clark and D.C. Folz, Microwave treatment of vulcanization rubber, United States Patent, 6,420,457. (2002)

- [6] V. Bovtun, W. Stark, J. Kelm, V. Porokhonsky and Y. Yakimenko, Microwave dielectric properties of rubber compounds undergoing vulcanization, *KGK-Kautschuk und Gummi Kunststoffe*, 54(12) (2001) 673–678.
- [7] D. Bogdal, P. Penczek, J. Pielichowski and A. Prociak, Microwave assisted synthesis, crosslinking and process of polymeric materials, *Advances in Polymer Science*, 163 (2003) 193–263.
- [8] L. Landini, S.G. Araújo, A.B. Lugão and H. Wiebeck, Preliminary analysis to BIIR recovery using the microwave process, *European Polymer Journal*, 47 (2007) 2725–2731.
- [9] C.Y. Khor, Z.M. Ariff, F. Che Ani, M. Abdul Mujeebu, M.K. Abdullah, M.Z. Abdullah and M.A. Joseph, Three-dimensional numerical and experimental investigations on polymer rheology in meso-scale injection molding, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37(2) (2010) 131–139.
- [10] N. Makal and P. Rattanadecho, Microwave pre-cure of natural rubber compounding using rectangular wave guide, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37 (2010) 914–923.
- [11] A.C. Mataxas, R.J. Meridith, *Industrial microwave heating*, Peter Peregrinus, Ltd. London, 1983.
- [12] A.C. Peter, N. Hewitt, *The rubber formulary*, Noyes Publications, Norwich New York, USA, 1999.
- [13] P. Rattanadecho, Influences of irradiation time, particle sizes and initial moisture content during microwave drying of multi-layered capillary porous materials, *Journal ASME Heat Transfer*, 124(1) (2002) 151–161.
- [14] H. Schbert, M. Regier, *The microwave processing of foods*. Cambridge: Woodhead, 2005.
- [15] P. Rattanadecho, K. Aoki and M. Akahori, A numerical and experimental investigation of the modeling of microwave drying using a rectangular wave guide, *Drying Technology an International J.*, 19(9) (2001) 2209–2234.

Effect of ENR50/STR5L Blends on Properties of Foodstuff Conveyor Belts Compound

SUPHATCHAKORN LIMHENGHA^{1,a*}, SUNPASIT LIMNARARAT^{1,b}
 and WIPOO SRISEUBSAI^{1,c}

¹Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, 10520, Bangkok, Thailand

^{a*}chakorn.lim@hotmail.com, ^bsunpasit@hotmail.com, ^cwipoo.sr@kmitl.ac.th

Keywords: foodstuff conveyor belts, rubber blends, mixed filler

Abstract. Natural rubber blending with nitrile rubber is the important raw material employed for the foodstuff conveyor belts formulation. This research involves the replacement of nitrile rubber with epoxidised natural rubber (ENR) aiming for food safety precaution and cost saving on the materials. This work included the investigation on the ratio of ENR with 50% epoxidation (ENR50) and natural rubber (Standard Thai Rubber 5L,STR5L). The ratios of ENR50:STR5L were 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 and 0:100. The effect of fillers, i.e. silica (SiO₂) and magnesium carbonate (MgCO₃) on the properties of rubber blends was also investigated. The vulcanizing system was semi-efficient vulcanization (Semi-EV). The study was further focused on the morphological characterization and mechanical properties. It was found that increasing the proportion of ENR50 and STR5L at 50% produced better mechanical property, however, the elongation at break increased once the ENR50 was down at 25%. Thus, this enhanced the property of the foodstuff conveyor belts compound.

Introduction

A foodstuff conveyor belt is considered an engineering rubber product that contains high flexibility. The belt is made by using a natural rubber as a raw material since the rubber is non-polluted towards the conveyed food. It becomes necessary that the material has to be efficiently prepared and the compound formula must be suitably mixed. New types of rubbers used for a special task have been developed from rubber blends. The blending method requires a simple technology, non-complication and it is more of an investment and effort than just a synthetic of a new type of the rubber. The property obtained from the blends includes process ability, heat and chemical resistance, tensile, rebound resistance, mechanical properties, etc. In preparing the rubber blends, compatibility of the mixture is the main consideration [1]. However, applying the rubber blend technology needs precaution because the rubber blend property depends on various factors of blend ratio, interfacial adhesion, distribution of chemicals and crosslinks between the rubber phase, and morphology [2]. A mixed filler in the rubber is also important because it can help in the cost saving, while the changes in the properties of physics and mechanics in the rubber help in a producing process, decreasing the swelling condition of the rubber in oil, increasing electric generating as well as increasing the rubber longevity, etc.[3]. There are many ways to improve the compatibility of these two mixed filler methods such as compatibilizer [4-6], the development of interfacial strength by adjusting the vulcanization system and the types of a reinforcing agent [7], and the changes of mixing conditions [8]. The change of the viscosity ratio of both types of rubber prior to the mixing is also considered as such ratio change of the mixed polymer can have an effect towards the character of the morphology [9-11].

Thus, this research is focused on the blend between ENR50 with STR5L in the formula of a foodstuff conveyor belt compound in which silica and magnesium carbonate are the mixed filler along with the use of silane coupling agent for the benefit of the compatibility. Moreover, a method of changing the viscosity ratio of both rubbers is used when the mixing proportions of ENR50:STR5L

are 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 and 0:100. The study is further focused on the mechanical properties of the ENR50/STR5L blends.

Experimental

Materials and chemicals

STR5L was manufactured by Chalong Latex Industry Co., Ltd., Songkhla, Thailand. ENR50 was manufactured by Muang Mai Guthric Co., Ltd., Phuket, Thailand. Silica and magnesium carbonate which were obtained from GSP Products Co., Ltd. Zinc oxide, stearic acid and titanium dioxide were purchased from Sunny World Chemical Co.,Ltd. Parafinic (oil 105), PEG 4000 and neoflow L-90 resins were purchased from Behn Meyer Chemical (T) Co.,Ltd. Other chemicals such as paraffin wax, BHT, MBTS, TBBS, couplink 89 and sulfur were all supplied by Chemical Innovation Co., Ltd.

Preparation of rubber compounds

The rubber compound formulas, shown in Table 1, were prepared using a semi-efficient vulcanization. The mixing was done on a conventional laboratory two roll mill size 8 x 20 inches, according to ASTM designation D3184-80. ENR50 was first masticated on two roll mill for 4 min. in E100 formulas, STR5L was first masticated on two roll mill for 2 min. in S100 formulas and then masticated ENR50 was mixed with STR5L in the ratios of E75:S25, E50:S50 and E25:S75, respectively. Required amount of filler (SiO_2 , MgCO_3 and mixture of SiO_2 and MgCO_3), couplink 89, PEG 4000, parafinic (oil 105), ZnO, stearic acid, TiO_2 , neoflow L-90 resins, paraffin wax and BHT were added respectively on two roll mill at a roller speed of 18:20 round per min (side roller : after the roller). The mixing temperature was 70-75°C. The accelerator (MBTS and TBBS) and sulfur were added into the mixtures on two-roll mill for 6 min. Then the mixtures were sheeted out and kept at the room temperature for 24 hours before testing.

Table 1 Mixed proportions of compounding formulas (unit in phr^a)

Raw materials	^b E100- ^c S0	E75-S25	E50-S50	E25-S75	E0-S100
ENR50	100	75	50	25	0
STR5L	0	25	50	75	100
SiO_2	40	40	40	40	40
MgCO_3	40	40	40	40	40
TiO_2	8	8	8	8	8
ZnO	3	3	3	3	3
Stearic acid	1	1	1	1	1
Parafinic oil	8	8	8	8	8
Neofow L90	5	5	5	5	5
Paraffin wax	1	1	1	1	1
BHT	2	2	2	2	2
^d Couplink89	4	4	4	4	4
^e PEG 4000	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4
MBTS	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
TBBS	1	1	1	1	1
Sulfur	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5

^apart per hundred parts by weight of rubber dry basis (phr), ^bE; epoxidized natural rubber, 50: ENR50, ^cS; standard thai rubber, 5L :STR5L, ^dsilane coupling agent and ^efiller activators

Testing and characterization

Mechanical properties

Mechanical properties: tensile strength, elongation at break, modulus and hardness were determined. A universal tensile testing machine (INSTRON,model-5565, USA.) was used to determine tensile strength, elongation at break and modulus of the samples at room temperature, with an extension speed of 500 mm/min, according to the procedure described in ASTM D412-06ae2 (Die C). Hardness was tested according to ASTM D2240-05 (2010).

Morphological Characterization

Scanning electron microscope (SEM,FEI,Quanta400) was used to study the surface of a vulcanized specimen. The rubber vulcanizations were cryogenically fractured in order to observe the dispersion of filler particles.

Results and discussion

Mechanical properties

The hardness of ENR50/STR5L blends with the mixed filler

It was found, upon increasing the quantity of ENR50 from 50 to 100%, as shown in fig.1, that the property of hardness was stable which was because of being polar of the ENR50 that enabled to increase the dispersing of silica and magnesium carbonate. The polarity within the rubber created stronger reaction between the rubber and the two mix fillers [12,13], however, when the STR5L quantity reduced from 100 to 50%, the property of hardness tended to increase which was due to the STR5L higher flexibility. Therefore, increasing the proportion of ENR50 could lead to the increasing of stiffness that further resulted in the movement reduction of the polymer chains, yet increasing the hardness[14]. The test was conducted by adding a coupling agent, silane coupling agent, and filler activators, PEG 4000, into the rubber compound to reduce the interaction among the silica particles. The silica secondary structure became easier to destroy during the mixture process and, at the same time, the silica could easily break and disperse in the rubber. The result was the viscosity reduction while the producing process became easier. These chemicals also reduced the absorption of the accelerator or the curing activator, especially Zn complex, on the silica surface that caused rapid stable action while obstructed the movement of the rubber molecule chains. Thus, the flexibility reduced which resulted in the increasing of the hardness property [3].

The modulus at 300% elongation of ENR50/STR5L blends with the mixed filler

A property of 300% elongation is the one that indicates the strength of a product upon being elongated within a specific length. The test result, as shown in fig.2, shows the highest score of the property of 300% elongation at the mixing ratio of 50:50. The reason could be from the reaction of a suitable proportion of the synergism between the polar ENR50 and the non-polar STR5L. It was also found that the value of 300% elongation increased when the quantity of ENR50 decreased from 100 to 50% and it decreased when the quantity of STR5L was higher from 50 to 100% which is called the positive and negative deviation. Such deviation was a result of the polarity differences between ENR50 and STR5L since STR5L was the non-polar polymer of a double crosslink (C=C) in the hydro carbon chains whereas ENR50 consisted of an oxirane oxygen ring which contained the polarity in its structure [15]. The increasing proportion of ENR50 led to additional stiffness which further resulted in the reduction of the polymer chains movement that subsequently increased the 300% elongation [14].

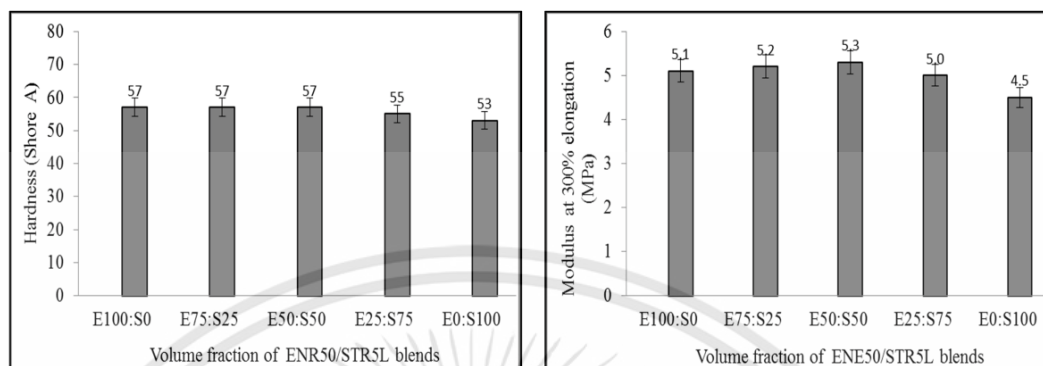


Fig.1 Hardness of ENR50/STR5L blends with the mixed filler

Fig.2 Modulus at 300% elongation of ENR50/STR5L blends with the mixed filler

The tensile strength of ENR50/STR5L blends with mixed filler

The test result, as shown in fig.3, revealed that the property of tensile strength was at the highest at the mixture ratio of 50:50 which was due to the reaction of a suitable proportion in the synergism between the polar ENR50 and the non-polar STR5L. It was additionally found that the tensile strength increased upon the decreasing of ENR50 from 100 to 50% (though it tended to clearly decrease at 75% indicating the quality of holes or breaks within the material), but it decreased when the quantity of STR5L was higher from 50 to 100%. Moreover, ENR50 possessed higher tensile strength than STR5L since it was able to strain induced crystallization and with the epoxidation into stereospecific making the obtained polymer become cis-1,4 configuration that the ENR50 oxygen atoms could properly fit in the crystal lattice of the natural rubber without causing any tension [16]. On the contrary, it could be a result from the polarity differences of ENR50 and STR5L since the STR5L molecules contained more double crosslink of carbon (C=C) while ENR50 consisted of an oxirane oxygen ring in its structure.

The elongation at break of ENR50/STR5L blends with mixed filler

Fig.4 showed the test result of using ENR50 at 100% that its property of the elongation at break was higher than the ones of ENR50/STR5L and STR5L. This was because the ENR50 had higher viscosity than the STR5L and such a high viscosity made silica and magnesium carbonate break better as there was an occurrence of cutting force destroying the secondary structure during the pounding process with the mixed fillers [12]. Subsequently, the silica chemical absorbent became better which was because the silica surface consisted of large quantity of hydroxyl or xylanol (-OH) to make its skin become polar and actively responsive to chemical reactions [3]. The silica, therefore, tended to competently absorb chemicals around the surface making the fillers mix well with the rubber while the chemicals also promptly dispersed in the rubber. Furthermore, silica was able to reinforce better in the rubber because of its small primary particles and its specific surface that once it was filled in the rubber, the vulcanized rubber contained high elongation at break. Decreasing in the ENR50 ratio could lead to the reduction of stiffness that accordingly resulted in the increasing of the molecule chains movement [14].

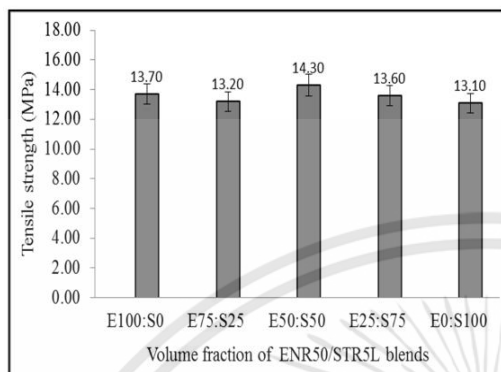


Fig.3 Tensile strength of ENR50/SR5L blends with mixed filler

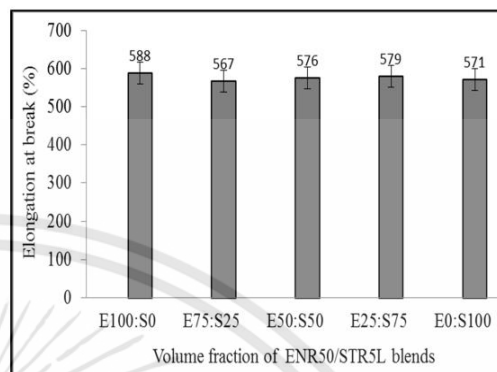


Fig.4 Elongation at break of ENR50/STR5L blends with mixed filler

Morphological characterization

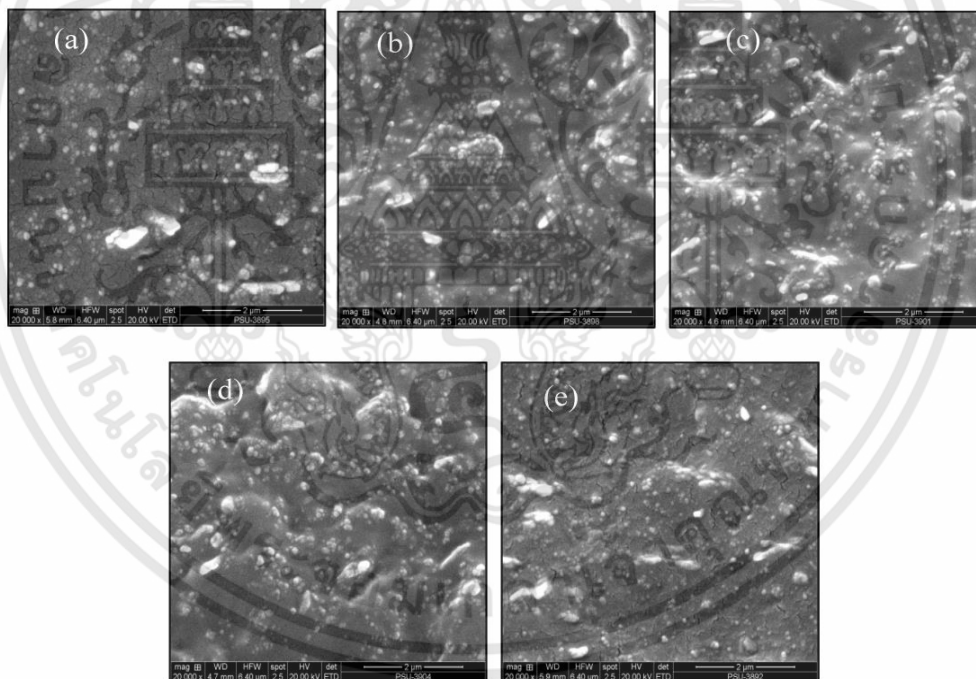


Fig.5 Morphology of ENR50/STR5L blends with mixed filler at (a)E100:S0, (b)E75:S25, (c)E50:S50, (d)E25:S75 and (e)E0:S100

Fig.5 (a) showed the morphology of ENR50, it was revealed that the mixed filler particles homogeneously dispersed in the ENR50 and the smooth surface with a little crack was observed. In this study, the couplink 89 was added into the compound so the bonding between the ENR50 and the mixed filler particles could improve, resulting in a good compatibility of the compound obtained and good mechanical properties [17]. In the case of ENR50/STR5L blends as shown in Fig.5 (b), (c) and (d), it was found that the mixed filler particles were not well dispersed in the ENR50/STR5L

blends and the surface roughness increased as a function of STR5L contents. This might be a exfoliation of small amount of the mixed filler particles from the rubbers because of a weak bonding between the mixed filler particles and rubbers when the ENR50 content decreased. Fig. 5 (e) showed the morphology of SRT5L, it was found that the surface was quite rough due to an exfoliation of the mixed filler particles from the rubbers. As we know, STR5L is non-polar rubber, therefore, the worse bonding between the mixed filler particles and STR5L occurred. This evident resulted in a reduction of mechanical properties of the specimen in this study.

Conclusion

The ENR50 showed the better mechanical properties when we compared with STR5L. This was of because the competent bonding between the mixed filler particles and ENR50, and the mixed filler particles being well dispersed in the ENR50. Furthermore, the increasing of the proportion of ENR50 and STR5L at 50% could improve the property of hardness, modulus at 300% elongation, and tensile strength whereas the decreasing of STR5L proportion at 75% disclosed better property of the elongation at break. The small reduction of mechanical properties was due to its intense surface roughness and worse bonding between the mixed filler particles and the rubber. The findings can lead to the cost saving in terms of raw materials through using the ratio of 50:50, without affecting the mechanical properties, since 100% ENR50 is more costly whereas STR5L is much cheaper. In addition, the knowledge gained from this study can be beneficial in a selection of the raw rubber materials and mixed fillers for the future rubber industry.

Acknowledgements

The researchers are grateful for the financial supports from Prince of Songkla University. The gratitude also includes the Rubber Research Institute, Department of Agriculture, Ministry of Agriculture and Cooperatives, Thailand, and Union Belt Industries Co., Ltd. for providing the experimental equipment and all research facilities.

References

- [1] J.G. Bonner, P.S. Hope, Compatibilisation and reactive blending, In polymer blends and Alloys, M.J. Folkes and P.S. Hope, (eds.). Blackie Academic and Professional, London, 1993, Chapter 3.
- [2] J.T. Andrew, P.J. Kevin, Blends of natural rubber novel techniques for blending with speciality polymers, London: Chapman and Hall, 1998.
- [3] F.W. Barlow, Rubber compounding : principles, materials and techniques. 2nd Edition, Marcel Dekker, Inc., New York, 1993.
- [4] P. Soo-Jin, C. Ki-sook, Fill-elastomer interactions : influence of silica coupling agent on crosslink density and thermal stability of silica of silica/rubber composites. Journal of colloid and interface Science, 267(2003) 86-91.
- [5] K. Kongsin, V.L. Micheal, Improving the morphology and properties of NR/NBR blends with polychloroprene as the compatibilizing agent. In J.T. Andrew and P.J. Kevin, Blends of natural rubber: novel techniques for blending with speciality polymer. London ; Chapman and Hall, 1998, pp.80-93.
- [6] A.R. Bhattacharyya, A.K. Ghosh A. Misra and K.J. Eichhorn, Reactively compatibilised polyamide 6/ ethylene-co-vinyl acetate blends: mechanical properties and morphology. Polymer, 46(2005) 1661-1674.

- [7] V.L. Micheal, NR/NBR blends-basic problems and solutions. In J.T. Andrew and P.J. Kevin, Blends of natural rubber: novel techniques for blending with speciality polymer. London ; Chapman and Hall, 1998, pp.53-67.
- [8] C. Sirisinha, S. Baulek-Limcharoen and J. Thunyarittikorn, Relationships among blending condition, size of dispersed phase, and oil resistance in natural rubber and nitrile rubber blends. *Journal of Applied Polymer Science*, 82(2001) 1232-1237.
- [9] Z.P. Fang, G.W. Ma, B.Q. Shentu, G.P.Cai and C.W. Xu, Influence of viscosity ratio on the morphology of PVC/PE blends. *European Polymer Journal*, 36(10)(2000) 2309-2311.
- [10] R. Tol, G. Groeninckx, I. Vinckier, P. Moldenaers and J. Mewis, Phase morphology and stability of co-continuous (PPE/PS)/ PA6 and PS/ PA6 blends: Effect of rheology and reactive compatibilization. *Polymer*, 45(8)(2004) 2587 – 2601.
- [11] S.C. Jana, M. Sau, Effects of viscosity ratio and composition on development of morphology in chaotic mixing of polymers. *Polymer*, 45(2004) 1665–1678.
- [12] I.R. Gelling, Epoxidised natural rubber. *J.Nat Rub.*, 6(1991) 184-205.
- [13] N. Rattanasom, T. Saowapark and C. Deeprasertkul, Reinforcement of natural rubber with silica/carbon black hybrid filler. *Polymer Testing*, 26(2007) 369-377.
- [14] S.Y. Lee, J.H. Kim and B.K. Kim, Natural rubber blends with epoxidized natural rubber. *J. Macrom. Sci.*, 36(1997) 579-594.
- [15] Y. Heping, L. Sidong and P. Zheng, Preparation and study of epoxidized natural rubber. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 58(1999) 293-299.
- [16] C.K.L. Davies, S.V. Woffe, I.R. Gelling and A.G. Thomas, Strain crystallization in random copolymers produced by epoxidation of cis-1,4-Polyisoprene. *Polymer*, 24 (1983) 107-113.
- [17] H. Ismail, M.N. Nasaruddin and U.S. Ishiaku, White rice husk ash filled natural rubber compounds : the effect of multifunctional additive and silane coupling agents. *Polymer Testing*, 18 (1999) 287-298.



NOVEL FOODSTUFF CONVEYOR BELTS COMPOUND FOR ENERGY SAVING: THE EFFECT OF MICROWAVE PRE-HEATING AND MIXED FILLERSON MECHANICAL PROPERTIES

Limhengha S.¹, Limnararat S.¹, Jangchud I.² and Sriseubsai W.¹

¹Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand

²Department of Chemistry, Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

E-Mail: kswipoo@kmitl.ac.th

ABSTRACT

This research presents an effect of microwave power being utilized in preheating of a foodstuff conveyor belts compound (FCBc), with or without mixed fillers, and sulfur at different volumes of 1.0, 1.5 and 2.0 phr respectively. Prior to hydraulic molding press at 150 °C, an FCBc is preheated for one minute through an industrial microwave system at a frequency of 2.45 GHz along with microwave power of 340, 850 and 1,700 watts whereas the cure time is a time 50%. The result shows that the FCBc with mixed fillers and 1.0 phr sulfur with microwave power at 340 watts demonstrates an effective crosslink between the rubber and the fillers which subsequently produces the FCBc that contains better mechanical properties, not only at the lower cost on raw material but also the curing time reduces to 40.20 % per production round.

Keywords: foodstuff conveyor belt compound, microwave power, mixed fillers, raw material, mechanical properties, energy saving.

INTRODUCTION

Many advantages of microwave power include its intensive heating capability and quality in a form of volumetric heating, its energy penetrating ability that leads to constant spreading of heat within an entire object whereas a heating duration is short, and more importantly, its energy is unmixed and nonpolluting to the environment. The device is small and maintenance is low as its component parts are lesser than others (Ratanadecho *et al.*, 2006). Heating with microwave depends on a wave absorbing property of an object and the object used in this process must be a dielectric material which is the material of semi-insulator with a basic structure of dipoles, the property that contains microwave absorption competency that effectively transforms into thermal energy. Such heat occurs from the force of friction during a new arrangement of leading molecules while conducting the absorption which further leads to an act of heat spreading throughout an entire material (Metaxas *et al.*, 1983). The new foodstuff conveyor belt compound of energy saving is a dielectric material consisting of epoxidized natural rubber-50 (ENR50) which is the rubber of higher dipoles than the normal one for being better heat and oil resistance (Yoksan., 2008). In addition, silica and magnesium carbonate, the white polar fillers of both reinforcing and semi reinforcing are popularly used with natural rubber as mixed fillers when better quality and colors of a product are required (Barlow., 1993, Sombatsompop *et al.*, 2004). Furthermore, there are some previous researches aimed to study various uses of microwave power to investigate different features of natural rubber, with or without carbon black (Laurence *et al.*, 2000) and chemical bond breaking of crumb rubber being vulcanized by microwave (Wicks *et al.*, 2000). The studies also include a method and tool used for heating a material with microwave power especially in a de-vulcanization process of crumb rubber through

heating with microwave power which could be recycled into a new type of rubber (Anderson., 1978), using microwave to study a dielectric property of natural rubber at the pre and post vulcanization (Bovtun *et al.*, 2001), cross-linking of rubber in microwave curing processes (Bogdal *et al.*, 2003), relations between rubber molecules crosslink and microwave energy using a method of microwave tunnels (Khor *et al.*, 2010). The conventional heating is additionally introduced by combining microwave power with hot air in order to vulcanize the rubber hose. Two steps of pre-vulcanization with microwave and conventional vulcanization are conducted enabling to rapidly mold the rubber while conducting energy saving when being compared with an original vulcanization process (Sejimo *et al.*, 1987). Practically, a method of microwave heating the compounds is used in Avon Tyre Ltd., the company that produces solid tyres for forklift trucks in which the process can reduce the duration of 30 kg. compound compression molding from 120 minutes to 70 minutes through 10 minutes microwave heating prior to the compression molding (Sutton *et al.*, 1988).

This research presents the use of microwave power at 340, 850 and 1,700 watts for one minute in preheating FCBc, with or without mixed fillers, and sulfur volumes of 1.0, 1.5, and 2.0 phr. FCBc specimens of both with and without microwave power are studied. The one with microwave power is further compressed with hydraulic molding press at 150 °C and the cure time (T_{C90}) is a time 50% in order to study the property of hardness in molecules crosslinking.

Materials and chemicals

The formulations are designed as shown in Table-1.



Table-1. Compounding formulations.

Raw materials	phr ^a					
	^b FCBc -S1.0	FCBc -S1.5	FCBc -S2.0	^d FCBcF -S1.0	FCBcF -S1.5	FCBcF -S2.0
ENR50	100	100	100	100	100	100
SiO ₂	-	-	-	40	40	40
MgCO ₃	-	-	-	40	40	40
TiO ₂	8	8	8	8	8	8
Stearic acid	1	1	1	1	1	1
ZnO	3	3	3	3	3	3
Neofow L90	5	5	5	5	5	5
Paraffin wax	1	1	1	1	1	1
BHT	2	2	2	2	2	2
Couplink89	-	-	-	2	2	2
PEG 4000	-	-	-	2.2	2.2	2.2
MBTS	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
TBBS	1	1	1	1	1	1
Sulfur	1	1.5	2	1	1.5	2
Total	122.6	123.1	123.6	206.80	207.3	207.8

^a Part per hundred parts by weight of rubber dry basis (phr), ^b Foodstuff conveyor belts compound without mixed fillers, ^c Sulfur content (part per hundred parts by dry basis weight) and ^d Foodstuff conveyor belts compound with mixed fillers

Preparation of rubber compounds

The raw material was prepared by mixing in an internal mixer (Brabender® GmbH & Co. KG, Duisburg, Germany), with a rotor speed of 60 rpm at a temperature of 70 °C. The compounding formulas are shown in Table-1. Before mixing, the rubber compounds were classified into two groups, namely (a) ENR50 without fillers: [FCBc] and (b) ENR50 with fillers (using a mixture of (SiO₂) and (MgCO₃) as fillers at 80 phr): [FCBcF]. A two-stage mixing procedure was employed to prepare all compounds. In the first step, ENR50 was first masticated for 3 min. The other ingredients including ZnO, stearic acid, Paraffin wax, BHT, Neoflow L-90 resins and TiO₂, were then sequentially added, each with a mixing step of 1 min, followed by the second step. The following order, ENR50 was first masticated for 3 min. Then, mix separately, SiO₂, MgCO₃, Couplink 89 and PEG 4000 with consecutive grinding times of 5, 3, 1 and 1 min, respectively. Similarly, the other ingredients, ZnO, Stearic acid, Paraffines waxes, BHT, Neoflow L-90 resins and TiO₂, were sequentially added, each with a mixing step of 1 min followed by the second step described below.

In the second step, after dumping the mixture from the mixing chamber, the accelerator (MBTS and TBBS) and sulfur were added into the mixture on a conventional laboratory two-roll mill size (8x20 inch) at a roller speed of 18:20 round per min (side roller : after the roller), according to ASTM designation D3184-80. The mixing temperature was 40-45 °C for 6 min. The rubber compounds were prepared using a conventional

vulcanization (semi-EV). Significantly, the sulfur contents were varied from 1.0, 1.5 and 2.0 parts per hundred parts of dried rubber by weight basis, respectively. Then the mixtures were sheeted out and kept at the room temperature for 24 hours before testing. The rubber compounds were then vulcanized using a compression molding machine, under a pressure of 15 MPa at 150 °C, using the optimum cure time (T_{C90}) determined by a curing test with a moving die rheometer (Monsanto Rheometer, Model MDR 2000).

Preparation of specimens

Two sets of specimens were prepared with a size of 150x150 mm² and a thickness of 4 mm. The first set was without microwave heating but molded with hydraulic molding press at 150 °C, according to cure time (T_{C90}). The aim for the second set was to use microwave power to heat the FCBc prior to the hydraulic molding press in order to reduce the cure time. So, FCBc with or without mixed fillers was preheated with microwave power (Panasonic NE-1756 microwave oven) at 340, 850, and 1,700 watts, a frequency of 2.45 GHz, for one minute before hydraulic molding pressing at 150 °C and cure time (T_{C90}) is a time 50%.

Testing and characterization

Curing characteristics

Curing characteristics of natural rubber/white fillers compounds were tested according to ASTM D5289-



07a using a Moving Die Rheometer (MDR Type, MONSANTO/ RHEOMETER MDR 2000, Japan.) with of Arc 0.5° at 150 °C. The optimum cure time (T_{C90}), scorch time (T_{S2}), minimum torque (ML), maximum torque (MH) and torque difference or delta torque ($\Delta H = MH - ML$) were determined based on the curing curves. The cure rate index (CRI), a parameter which indicates the speed of curing reaction, was determined from rheometric data. CRI was calculated using the following relation as shown in equation (1) (Aprem *et al.*, 2003).

$$CRI = \frac{100}{\text{Cure time} - \text{Scorch time}} \quad (1)$$

Crosslink density characteristics

The specimen was cut to a rectangular shape dimension of 1x1 cm² and weighted both before and after soaking in 30 ml of toluene for 7 days. These weights were used to calculate cross-linked content as shown in equation (2) (Ratanadecho *et al.*, 2002, Allen *et al.*, 2003).

$$\eta_{\text{swell}} = \frac{-\ln(1-V_r) - V_r \chi V_r^2}{V_m(V_r^{1/3} - V_r/2)} \quad (2)$$

V_r is the volume fraction of rubber in swollen gel, χ is the rubber-solvent interaction parameter (0.406), V_m is the molar volume of toluene (106.8 cm³ mol) and η_{swell} is the swelling of rubber (%).

Mechanical properties

Mechanical properties in terms of tensile strength (MPa), elongation at break (%) and modulus at 300% elongation (MPa) were determined. Standard test procedures as prescribed by ASTM D412-06ae2 (Die C) were used for the determination of compound and vulcanization properties, using Instron Model-5565, USA, and hardness (Shore A) was tested according to ASTM D2240-05(2010) using a Toyo-Seiki Model A-1/7301, Japan. For each testing parameter, an average value was calculated from at least three tests. Most standard deviations of all testing parameters were less than 10%.

RESULTS AND DISCUSSIONS

Curing characterization

It is shown in Table-2 that a vulcanized property of FCBC with mixed fillers is higher than the one of non-mixed fillers which reveals that adding a proportion of mixed fillers enables to increase the viscosity in a form of filler-filler interaction due to an influence of a surface area or particle size as well as a polarity decreasing situation of the mixed fillers that causes such interaction and further forms a mass linking with effective spreading, resulting in a higher modulus value (Frohlich *et al.*, 2005, Leblanc., 2002). Moreover, adding mixed fillers in FCBC can

increase an acidic state that speeds up an accelerator and accordingly increases cure time (T_{C90}), when being compared with non mixed fillers FCBC. In addition, FCBC with or without mixed fillers shows a reducing value of scorch time (T_{S2}), cure time (T_{C90}) and cure rate index (CRI) when an amount of vulcanized substances are higher. Nevertheless, increasing a vulcanized substances proportion makes torque difference ($M_H - M_L$) higher which may mean that a linking level becomes high when a volume of the vulcanized substance increases.

Crosslink density

It is found as shown in Figure-1 that once a fraction volume of sulfur increases, a crosslinking percentage of non- microwave power FCBC also increases, especially the FCBC with mixed fillers. This is because high quantity sulfur causes high crosslink and an added proportion of sulfur enables to increase the density of the crosslink with mixed fillers (Makal *et al.*, 2010). Moreover, it is also found that FCBC with mixed fillers while being through microwave power shows a density value of crosslinking higher than the one without mixed fillers at every level of microwave power. This means that FCBC without mixed fillers is able to conduct less energy alteration at the microwave power absorption. Hence, when fillers are added, the FCBC enables to absorb more microwave power as SiO₂, reinforcing filler, and MgCO₃, semi-reinforcing filler, are polar. Once polar fillers are mixed with FCBC, the mixed fillers enhance its polarity. This corresponds with a thermal occurrence by an effect of carbon black in natural rubber (Metaxas *et al.*, 1983, Peter *et al.*, 1999). It is further found when FCBC is heated by microwave power at 340, 850 and 1700 watts that a sample with a sulfur quantity of 1.0 phr provides the highest crosslinking percentage and such percentage becomes slightly decreasing at 1.5 phr and 2.0 phr respectively. This is because when a sulfur proportion in the FCBC being heated with microwave power of the same watt and same duration, an FCBC temperature becomes higher leading to its additional energy absorbent capability and thermal condition that the FCBC subsequently absorbs microwave power and enables to change into better condition of thermal energy while heating ventilation within the FCBC remains the same. This causes a reduction in the crosslink density of the vulcanized rubber thermal degradation during a vulcanization process and further leads to some changes in a rubber intermolecular reaction as well as chain scission. Nevertheless, this degradation is in a physical property of the vulcanized rubber (Hoover, 1999).

Therefore, FCBC with or without mixed fillers and 1.0 phr sulfur, 340 watts microwave power at a wave frequency of 2.45 GHz for one minute of previous to the hydraulic molding press at 150 °C and the cure time 50%. They are quantity is optimized for study on mechanical properties.



Table-2. Curing Characterization of FCBC with and without fillers before pre-heating.

Formulas	M _L (lb.in)	M _H (lb.in)	M _H -M _L (lb.in)	T _{S2} (min)	T _{C90} (min)	CRI (min ⁻¹)
FCBC-S1.0	0.32	4.60	4.28	3.53	5.73	45.45
FCBC-S1.5	0.35	5.61	5.26	3.02	5.42	41.67
FCBC-S2.0	0.41	6.60	6.19	2.67	5.20	39.53
FCBCF-S1.0	5.99	19.79	13.80	3.86	10.20	15.77
FCBCF-S1.5	5.81	22.39	16.58	3.20	10.15	14.39
FCBCF-S2.0	5.24	26.93	21.69	2.56	10.12	13.23

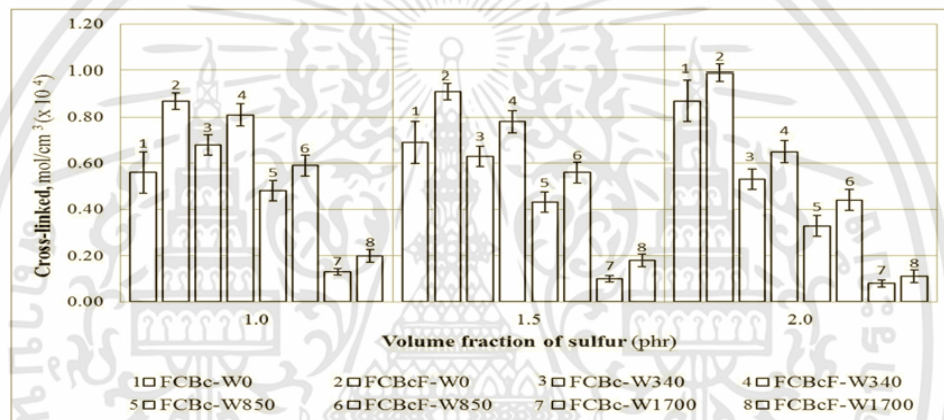


Figure-1. The relation between the cross-linking percentage and the sulfur content in FCBC, with and without mixed fillers, with and without microwave power.

Mechanical properties

It is described in Figures 2 (a) and (b), that FCBC with mixed fillers the with microwave power and non-microwave power possesses are hardness and modulus at 300% elongation at both property better than the one without mixed fillers of the same condition. The difference is clearly exposed since fillers of silica and magnesium carbonate are dielectric material that can reduce microwave reflections around a surface and help the wave to penetrate through the material better². The dielectric material is able to absorb more waves and effectively transform into heating energy. Moreover, the mixed fillers can also obstruct a molecules chain movement making lesser flexibility in a compound that subsequently increases a hardness characteristic (Barlow, 1993). However, Figure-3(a), that FCBC with mixed fillers at increasing microwave power from 340 to 850 watts can invariable the hardness property which is due to the microwave power absorption within the material in a form of volumetric heat at a molecules level that once there is internal heat, it spreads to the external (Makal *et al.*, 2010). The heat that follows is in a form of constant spreading while a double crosslink breaks and becomes a single crosslink with higher polarity. The bond with sulfur molecules is thoroughly occurred within an entire material making better crosslinking. It is also found that figure 3(b), that FCBC with mixed fillers at increasing microwave

power from 340 to 850 watts can slightly decrease the property of modulus at 300% elongation which is because higher microwave power produces stronger electric field that further increases wave absorption (Doo-ngam *et al.*, 2007) and subsequently, the heat within a molecules level becomes higher and causes a reduction of the molecules crosslink in the FCBC (Makal *et al.*, 2010). On the contrary, Figure-2(a) and (b), that FCBC with mixed fillers once microwave power is increased to 1700 watts, the hardness and modulus at 300% elongation are property significantly reduced which are due to an oxidation reaction in natural rubber, especially at a high temperature, or it can be of sulfur bond releasing from linking among molecules (Varghese *et al.*, 1994). In another word, this is a case of extensive microwave power that causes degradation because of heat bonding from sulfur crosslink, the effect of FCBC crosslink that reduces at a vulcanized level (Hoover, 1999).

As shown in Figure-2 (c) and (d), FCBC without mixed fillers a good property of tensile strength and elongation at break in all microwave levels. Since there is no mixed filler and it is a low dielectric material that when microwave penetrates into the material, the absorption and the transformation toward thermal energy are accordingly low (Doo-ngam *et al.*, 2007). Similarly, FCBC with mixed fillers at becomes a high dielectric material or high polarity that when microwave goes through, the absorbed



wave power transforms into thermal energy. An occurrence of the heating circulation is quick making both actions of absorption and transformations happen so fast that subsequently increase a heat level in the molecules. This causes some reductions of molecules bonding in the vulcanized rubber (Metaxas *et al.*, 1983). Furthermore, adding the fillers can also reduce the continuation of rubber phases that may cause an unpleasant or unstable distribution. A volume of mixed fillers can obstruct the rubber molecules movement that the rubber becomes more stiffness and brittleness. The result is a reduction of a property of tensile strength and elongation at break (Da costa *et al.*, 2002, Ismail *et al.*, 1999, Ismail *et al.*, 2002). Increasing microwave power from 340 to 1,700 watts to FCBC with fillers can also reduce the property of tensile strength and elongation at break. This is because when there is a rapid circulation of moisture while watt power and heat are high, the crosslink density reduces and the degradation occurs. Therefore, because of heat, the crosslink bond releasing in FCBC with fillers can decrease the FCBC elongation (Nadkar *et al.*, 2001).

Therefore, FCBC with mixed fillers at 340 watts microwave power at a wave frequency of 2.45 GHz for one minute of quantity is optimized.

CONCLUSIONS

Prior to the hydraulic molding press at 150 °C and the cure time 50%, preheating FCBC with mixed fillers, 1.0 phr. sulfur, and 340 watts microwave power at a wave frequency of 2.45 GHz for one minute making the internal heating within the compound at increase is the most suitable action. The outcome is foodstuff conveyor belts compound that contains better the density of molecule crosslinking and mechanical properties. Not only the cost of raw material becomes low but the curing time duration is also reduced to 40.20% per production round when being compared with a non-preheating situation. Hopefully, this knowledge can be beneficial for an industrial vulcanization process in the future.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank the National Research Council of Thailand and Prince of Songkla University for the research financial support, the Rubber Industry, Rubber Research Institution, and Agricultural Academic Department, Ministry of Agriculture and Co-operation for their support on providing rubber, chemical agents, and testing site.

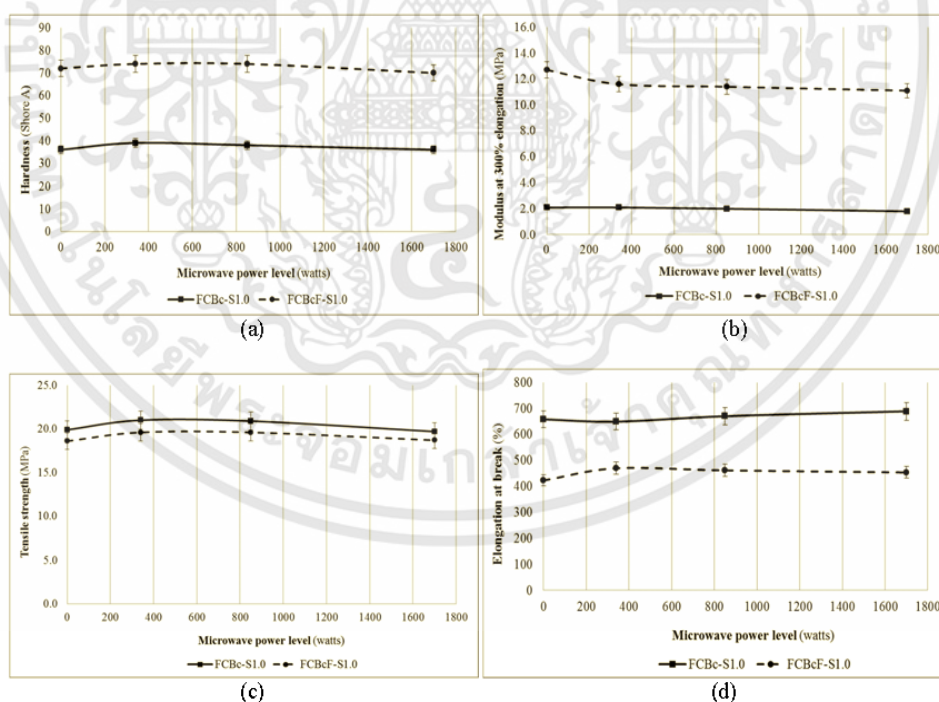


Figure 2. Mechanical properties of FCBC with and without mixed filler (a) hardness, (b) modulus at 300% elongation, (c) tensile strength and (d) elongation at break

REFERENCES

Ratanadecho P., Duangduen A. and Vougradubchai S. 2006. Drying of a slip casting for table ware product using

microwave- continuous belt furnace. Dry Technol Inter J. 26: 589-594.

Metaxas A.C. and Meredith R.J. 1983. Industrial microwave heating. Peter Peregrinus, Ltd. London.



- Yoksan R. 2008. Epoxidized natural rubber for adhesive applications. *Kasetsart J. (Nat Sci)*. 42: 325-332.
- Barlow F.W. 1993. Rubber compounding: principles, materials and techniques. 2nd Edition, Marcel Dekker, Inc., New York.
- Sombatsompop N., Thongsang S., Markpin T. and Wimolmala E. 2004. Fly ash particles and precipitated silica as fillers in rubber. I. Untreated fillers in natural rubber and styrene butadiene rubber compounds. *J Appl Polym Sci*. 93: 2119-2130.
- Laurence L., Christopher M.L., Norman S.A., Michele E., Thompson F. and Robert S.W. 2000. Use of microwave dielectric loss spectroscopy for characterization of natural rubber/carbon black composites. *Polym Bull*. 44: 187-194.
- Wicks G.G., Schulz R.L., Clark D.E. and Folz D.C. 2000. Microwave treatment of vulcanization rubber. *United States Patent No. 6420457*.
- Anderson E.E. 1978. Method and apparatus for microwave heating of flowable material. *United States Patent No. 4129768*.
- Bovtun V., Stark W., Kelm J., Porokhonsky V. and Yakimenko Y. 2001. Microwave dielectric properties of rubber compounds undergoing vulcanization. *Kautsch Gummi Kunstst*. 54(12): 673-678.
- Bogdal D., Penczek P., Pielichowski J. and Prociak A. 2003. Microwave assisted synthesis, crosslinking and process of polymeric materials. *Adv Polym Sci*. 163: 193-263.
- Khor C.Y., Ariff Z.M., Che Ani F., Mujeeb M.A., Abdullah M.K., Abdullah M.Z. and Joseph M.A. 2010. Three-dimensional numerical and experimental investigations on polymer rheology in meso-scale injection molding. *Int. Commun Heat and Mass Transfer*. 37(2): 131-139.
- Sejimo A. and Shigeo O. 1987. Method for continuously vulcanizing hoses. *United States Patent No. 4702867*.
- Sutton W.H., Brook M.H. and Chabinsky I.J. 1988. Microwave processing of materials. *Materials Research Society symposium proceeding*. April 5-8.
- Aprem A.S., Jose S., Thomas S., Barkoula N.M. and Kocsis J.K. 2003. Influence of hygrothermally degraded polyester-urethane on physical mechanical properties of chloroprene rubber. *Eur Polym J*. 39(1): 69-76.
- Ratanadecho P., Aoki K., Akahori M. 2002. A numerical and experimental investigation of the modeling of microwave heating for liquid layers using a rectangular wave guide (effect of natural convention and dielectric properties). *Appl Math Model*. 26(3): 449-472.
- Allen T.C., Bryan B. and James L. 2003. Characterization of polymer-filler interface in irradiated silica-reinforced polysiloxane composites. *Mater Res Soc*. 629: FF5.14.1-FF5.14.5.
- Frohlich J., Niedermeier W. and Luginsland H.D. 2005. The effect of filler-filler and filler-elastomer interaction on rubber reinforcement. *Compos Part A: Appl Sci Manufact*. 36: 449-460.
- Leblanc J.L. 2002. Rubber-filler interactions and rheological properties in filled compound. *Prog. Polym Sci*. 27: 627-687.
- Makal N. and Rattanadecho P. 2010. Microwave pre-curing of natural rubber-compounding using a rectangular wave guide. *Int Commun Heat and Mass Transfer*. 37(7): 914-923.
- Peter A.C. and Norman N. 1999. *The rubber formulary*. Noyes publications, Norwich New York, USA.
- Hoover F.I. 1999. Review of Vulcanization Chemistry, *Rubber World* 220: 24.
- Doo-ngam N., Ratanadecho P. and Klinklai W. 2007. Microwave preheating of natural rubber using a rectangular wave guide (MODE: TE₁₀). *Songklanakarin J Sci Technol*. 29(6): 1599-1608.
- Varghese S., Kuriakose B. and Thomas S. 1994. Short sisal fiber reinforced natural rubber composites: high energy radiation, thermal and ozone degradation. *Polym Degrad Stab*. 44: 55-61.
- Da costa H.M., Visconte L.L.Y., Nunes R.C.R. and Furtado C.R.G. 2002. Mechanical and dynamic mechanical properties of rice husk ash filled natural rubber composites. *J Appl. Polym Sci*. 83(11): 2331-2346.
- Ismail H. and Jaffri R.M. 1999. Physico-mechanical properties of oil palm wood flour filled natural rubber composites. *Polym Test*. 18(5): 381-388.
- Ismail H., Shuhelmy S. and Edyham M.R. 2002. The effects of a silane coupling agent on curing characteristics and mechanical properties of bamboo fiber filled natural rubber composites. *Eur Polym J*. 38(1): 39-47.
- Nadkar N., Debnath S.C. and Basu D.K. 2001. Novel method for the preparation of carboxylated nitrile rubber-natural rubber blends using Bis (diisopropyl) thiophosphoryl polysulfides. *J. Appl. Polym Sci*. 80: 1725-1736.

OPTIMIZING THE PROPERTIES OF VULCANIZED COMPOUNDS FOR FOODSTUFF CONVEYOR BELTS IN INDUSTRIAL MICROWAVE PER-HEATING

Suphatchakorn Limhengha and Wipoo Sriseubsai*

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520 Thailand

*Corresponding Author, Received: 00 May, 2018, Revised: 00 Jun, 2018, Accepted: 00 Jul, 2018

ABSTRACT: This research finds a natural rubber-based material with good dielectric properties and low cost for a foodstuff conveyor belt (FCB) that can be heated with microwaves. For this purpose, epoxidized natural rubber-50 (ENR50) and standard Thai rubber 5L (STR5L) were mixed with a filler mixture of silica and magnesium carbonate. The FCB compound with filler (FCBcF) yielding the best vulcanization time, and the best mechanical, dielectric and dynamic properties, was selected for further study. The optimal FCBcF, ENR50:SiO₂:MgCO₃ (100:40:40) with microwave pre-heating at 2.45 GHz and 340 W for one minute before vulcanization, was well cross-linked and strongly converted the microwaves to heat. FCBcF also showed satisfactory mechanical properties with reduced cost of raw materials and reduced the curing time by 50% per round. The results demonstrate that pre-heating of FCBcF prior to vulcanization reduces the time and cost of fabricating FCBs, providing long-term economic and environmental benefits.

Keywords: Foodstuff conveyor belt, Dielectric material; Vulcanized compounds; Industrial microwave

1. INTRODUCTION

A foodstuff conveyor belt (FCB) is an engineered rubber product (typically white) with high flexibility but low distortion. Natural rubber is the main raw material because of its non-toxicity, a requirement of foodstuff conveyance. The main concern is that other raw materials and the chemical rubber must comply with the laws and regulations of the Food and Drug Administration (United States). The compound formulation needs to be appropriate while satisfying the cleanliness and safety requisites. The conveyor belt must also be brightly colored, easy to clean, and fabricated by an efficient material preparation process. A typical FCB compound (FCBc) is natural rubber mixed with fillers. Natural rubber is a non-polar double-cross-linked polymer with high flexibility and other beneficial mechanical properties but is non-resistant to oil and non-polar solvents [1]. Currently, in Thailand, natural rubber is commercially modified to epoxidized natural rubber (ENR), in which the oxygen in the cross-linked regions forms epoxide rings by epoxidation reactions. The epoxide contents of ENR range from 10 to 50%. The ENR is more polar than unmodified natural rubber and has better heat and oil resistance. The polarity of 50% - epoxidized ENR is similar to that of acrylonitrile butadiene rubber (NBR) with medium acrylonitrile contents [2].

The filler in the rubber compound significantly lowers the fabrication costs and changes the physical properties of the material, especially the mechanical

properties. The filler increases the electric conductivity and improves the longevity of the rubber. Two white fillers, silica and magnesium carbonate, are popular for natural rubber products because they provide good quality and aesthetically pleasing color. In refined powder form, magnesium carbonate is an efficient semi-reinforcing agent that improves the tensile strength, tear resistance, and degradation resistance [3]. Although the hardness and tensile strength provided by comparatively small silica particles (nano silica) are similar to those of black carbon filler, the organic agents on silica interfere with the silica-rubber bonding [3], whereas nano silica reduces the creep and drying shrinkage [4]. Consequently, black carbon confers stronger resistance to degradation and modulus than silica. Grafting silane on silica improves the silica-rubber bonding and improves the mechanical properties (especially its tear resistance) of the compound. The silane can be mixed with the fillers before compounding with rubber or added while mixing the rubber and fillers [5].

When vulcanizing mixed reclaimed rubber and natural rubber with carbon black as the reinforcing agent, microwave heating was found to affect the type of cross-linking in the compound. Specifically, more mono and di-sulfidic cross-links were formed in microwave-heated vulcanization than in conventional vulcanization. This result was attributed to the quick heating from the center of the sample, which gains the highest temperature. In contrast, conventional heating delivers heat to the compound from an outside source [6].

Microwaving can also be combined with conventional heating in a two-step rubber hose vulcanization: (1) pre-vulcanization with microwave energy, and (2) conventional vulcanization with heat conduction. This approach consumes less energy than conventional vulcanization [7].

Previous research has demonstrated that microwave preheating of compounds conserves energy in processing. In most of these studies, the microwave energy preheated a black compound containing carbon black reinforcing filler, and synthetic rubber was the main raw material. Microwaves are suitable for the manufacture of very thick products such as solid tires for forklifts. The present study investigates the physical properties of a FCBC after pre- and post-heating by industrial 2.45 GHz microwaves at various powers (0–1,700 W). The raw materials are natural rubber, standard Thai rubber (STR5L) or epoxidized natural rubber-50 (ENR50), with fillers of silica, magnesium carbonate, or their mixture. Microwaving is an alternative technique that quickly heats the compound from the inside out, and which reduces the time and energy of vulcanization (by reducing the costs and increasing the rate of production), thereby improving the competitiveness of the manufacturing process.

2. MATERIALS AND METHODE

2.1 Materials and Methods

The chemical constituents of the FCBCs are shown in Table 1. STR5L was manufactured by Chalong Latex Industry Co., Ltd. (Songkhla, Thailand), and ENR50 was manufactured by Muang Mai Guthrie Public Co., Ltd. (Phuket, Thailand). The reinforcing filler was silica (Ultrasil 233:SiO₂) and the semi-reinforcing filler was magnesium carbonate (MgCO₃) obtained from GSP Products Co., Ltd. (Bangkok Thailand). Zinc oxide (ZnO) and stearic acid (CH₃(CH₂)₁₆COOH) were purchased from Sunny World Chemical Co.,Ltd. (Bangkok Thailand). Mercaptobenzothiazole disulfide (MBTS) and N-tert-butyl-2-benzothiazole sulfenamide (TBBS) used as accelerators were manufactured by Flexsys (Turmoil, Italy). The filler activator (polyethylene glycol, PEG 4000) and Couplink 89 silane coupling agent were kindly supplied by Chemical Innovation Co., Ltd. (Bangkok, Thailand). The curing agent (sulfur) was manufactured by Ajax Chemical Co., Ltd. (Samutprakarn, Thailand).

2.2 Preparation of rubber compounds

The compounding formulations used for the composites, as shown in Taber 1 were prepared by semi-efficient vulcanization. Compounds were mixed on a conventional laboratory two-roll mill

according to ASTM designation D3184-80. ENR50 was first masticated for 4 min in the SiO₂/ENR, MgCO₃/ENR, and SiO₂/MgCO₃/ENR formulas; STR 5L was masticated similarly for 2 min in the SiO₂/STR, MgCO₃/STR and SiO₂/MgCO₃/STR formulas. The masticated ENR50 or STR5L was then mixed with the required amount of filler (SiO₂, MgCO₃ or a mixture of SiO₂/MgCO₃). Next, Zinc oxide, Stearic acid, Couplink 89 and PEG 4000 were added to the ENR50–filler and STR5L–filler mixtures, respectively, on the two roll mill. The accelerators (MBTS and TBBS) were added to the mixtures on the two-roll mill for 1 min, then sulfur similarly with 2 min mixing. Finally, the rubber compound was sheeted out and left at room temperature for 24 hours before testing and vulcanizing.

2.3 Cure characterization

Moving die rheometer (MDR type, Monsanto/Rheometer MDR 2000, Japan) was used to determine to cure characteristics of the rubber composites at 150°C with 0.5° amplitude and 30 min. The cure characteristics of the dielectric material compounds were tested according to ASTM D5289-07a. The cure rate index (CRI), which characterizes the vulcanization.

2.4 Mechanical properties

The stress-strain curves of dielectric material compounds were measured on a universal tensile testing machine (Instron, model-5565, USA). The tensile strength, elongation at break, and modulus were determined at room temperature at an extension speed of 500 mm/min, according to ASTM D412-06 ae2 (Die C). The dumb-bell shaped specimens were cut from the vulcanized rubber sheets using an ASTM die type C (Dumbbell, model SDAP-100N, Japan). The hardness was tested according to ASTM D2240-05 (2010) using a Shore A durometer (Shore Instrument, model-716, USA).

2.5 Rubber Process Analyzer (RPA)

The dynamic storage modulus (G') was investigated in an RPA 2000 (Alpha Technologies, Akron, USA). In the strain sweep test, the strain was ranged from 0.56 to 500% at 80°C and 1 Hz.

2.6 Dynamic Mechanical Analysis (DMA)

The dynamic mechanical properties were determined by a dynamic mechanical analyzer (DMA 8000, PerkinElmer Inc., Waltham, USA). The samples were rectangular with dimensions of (30×10×2) mm³. The dynamic storage modulus

Table 1 Chemical formulations of FCBC

Raw materials	phr ^a					
	SiO ₂ / ENR ^b	SiO ₂ / STR ^c	MgCO ₃ / ENR	MgCO ₃ / STR	SiO ₂ /MgCO ₃ / ENR	SiO ₂ /MgCO ₃ / STR
ENR50	100	-	100	-	100	-
STR5L	-	100	-	100	-	100
SiO ₂	40	40	-	-	40	40
MgCO ₃	-	-	40	40	40	40
Zinc oxide	3	3	3	3	3	3
Stearic acid	1	1	1	1	1	1
^d Couplink89	-	-	-	2	2	2
^e PEG4000	-	-	-	2.2	2.2	2.2
MBTS	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
TBBS	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Sulfur	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5

^aparts per hundred parts by weight of rubber dry basis (phr), ^bENR: Epoxidized natural rubber, 50:ENR50, ^cSTR: Standard Thai rubber, 5L:STR5L, ^dsilane coupling agent and ^efiller activators.

(G') and loss tangent ($\tan \delta$) were measured in tension mode. The temperature was ranged from -100 to 25°C, and the test frequency was fixed at 1 Hz.

2.7 Dielectric property measurements

The analyzer consisted of a coaxial cavity, a microwave reflectometer, a 0.35-cm coaxial cable, a 0.35-cm female calibration, and short and open-matched loads and software. The coaxial cavity was characterized in the 1.5–2.6 GHz range at a precision of 2% for the dielectric constant and 5% for the dielectric loss factor. The measured specimen was assumed as an infinitely sized, non-magnetic material with isotropic and homogeneous properties. During the test, the coaxial cavity must be closely contacted with the specimen [8]. The measurements were made by a portable network analyzer. After averaging five values for each rubber compound, the loss tangent [9] and penetration depth [10] were calculated by Eqs. (1) and (2), respectively.

$$\tan \delta = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} \quad (1)$$

Here $\tan \delta$ is the loss tangent, ϵ_r'' is the relative dielectric loss factor, and ϵ_r' is the relative dielectric constant.

$$D_p = \frac{1}{2\pi f \sqrt{\epsilon_r'(\sqrt{1+(\tan \delta)^2} - 1)}} \quad (2)$$

Here D_p is the penetration depth, f is the microwave frequency (2.45 GHz), and U is the microwave speed (3×10^8 m/s, the speed of light).

Assuming a lossless magnetic field, the volumetric internal heat generation (Q) [11] was estimated by Eq. (3).

$$Q = \omega \epsilon_0 \epsilon_r'' E^2 = 2\pi \cdot f \cdot \epsilon_0 \epsilon_r'' (\tan \delta) E^2 \quad (3)$$

where Q is the density of the absorbed microwave power (W/m^3), E is the electromagnetic field intensity, f is the microwave frequency (Hz), ω is the angular velocity of the microwaves (rad/s), and ϵ_0 is the permittivity of free space (8.8514×10^{-12} F/m).

3. Results and Discussion

3.1 Properties of FCBC vulcanized without microwave pre-heating

3.1.1 Cure properties

The curing curves of FCBCF vulcanized without heating are shown in Fig. 1 and their cure characteristics are summarized in Table 2. To mix the rubber, chemicals, and fillers, firstly, the silica, silane, PEG, and oil were mixed into a master batch of rubber. Next, the other substances were added to reduce the silica crystallization and improve the filler dispersion. During this procedure, the siloxane (-Si-O-Si) and silanol (-Si-OH) on the silica surfaces easily react with silane and PEG, reducing the surface polarity (by breaking the cross-linking agents, especially polysulfide), and hence increasing their hydrophobicity [12]. This chemical change improves the compatibility with rubber and reduces the silica absorption that otherwise prolongs vulcanization in the MgCO₃/ENR, MgCO₃/STR, SiO₂/MgCO₃/ENR and

Table 2 Cure characteristics of the experimental formulations before pre-heating

Sample	Min . Torque (M_L , dNm)	Max . torque (M_H , dNm)	Delta torque ($M_L - M_H$, dNm)	Scorch time (ts_2 , min)	Cure time (tc_{90} , min)	Cure rate index (CRI, min ⁻¹)
SiO ₂ /ENR	0.7	9.4	8.6	2.6	7.6	20.2
SiO ₂ /STR	1.8	10.0	8.2	3.2	7.7	22.4
MgCO ₃ /ENR	0.4	6.7	6.3	2.7	3.6	103.1
MgCO ₃ /STR	1.3	7.9	6.6	1.9	2.7	125.0
SiO ₂ /MgCO ₃ /ENR	1.5	11.3	9.9	2.0	6.2	24.0
SiO ₂ /MgCO ₃ /STR	3.2	14.6	11.5	1.6	4.3	37.0

SiO₂/MgCO₃/STR cases. In addition, SiO₂/MgCO₃/STR was comparatively slowly vulcanized and its vulcanization ratio index (CRI) was higher than for SiO₂/MgCO₃/ENR. ENR50 is comparatively polar and can stimulate double cross-linking of the isoprene units, enabling more rapid vulcanization than STR5L [13]. The lower torque differences ($M_H - M_L$) in SiO₂/STR, SiO₂/ENR and SiO₂/MgCO₃/ENR than in SiO₂/MgCO₃/STR also support lower crosslinking levels in the former group.

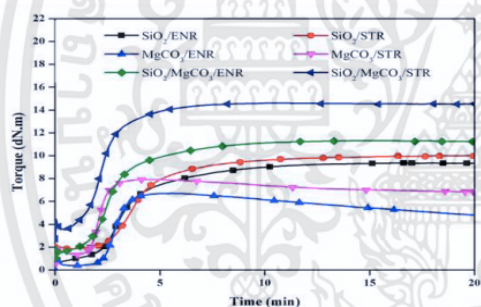


Fig. 1. Cure curves of the experimental formulations.

3.1.2 Mechanical properties

Fig. 2 shows the stress-strain curves of the SiO₂, MgCO₃ and SiO₂+MgCO₃-filled vulcanizates (i.e., SiO₂/ENR, SiO₂/STR, SiO₂/MgCO₃/ENR and MgCO₃/ENR, MgCO₃/STR, SiO₂/MgCO₃/STR). The Young's modulus was higher in SiO₂/ENR, SiO₂/STR, and SiO₂/MgCO₃/ENR than in the MgCO₃/ENR, MgCO₃/STR and SiO₂/MgCO₃/STR vulcanizates. The Young's modulus (or modulus of elasticity) measures the stiffness of an elastic material and describes the elastic properties of objects such as wires, rods or columns during stretching or compression. Silica is a superior reinforcing agent for rubber because of its small primary particles and high specific surface; therefore, silica-filled vulcanized rubber possesses a comparatively high tensile strength. In addition, the properties of natural rubber reinforced by silica are similar to those of rubber reinforced with carbon black [3]. This finding agrees with the increased delta torque of these composites (see Table 2). As seen in Fig. 2 and Table 3, the SiO₂/ENR, SiO₂/STR, and SiO₂/MgCO₃/ENR

samples were mechanically strong because ENR50 is polar [14] and facilitates the dispersion of silica and magnesium carbonate in the rubber matrix. The polarity of rubber enhances the rubber-filler interactions [15]; moreover, ENR50 is more viscous than STR5L [14]. The high viscosity of rubber also induces high shear forces that disperse the filler and prevent its agglomeration. The high specific surface of silica, with its many hydroxyl or silanol (-OH) groups, is conducive to chemical absorption. Especially, the polar surfaces enable rapid chemical reactions that absorb various chemical substances [3]. These properties justify the used mixing sequence, which improves the modulus at 300% elongation (MPa), the tensile strength (MPa), and the elongation at break (%) of the vulcanized rubber

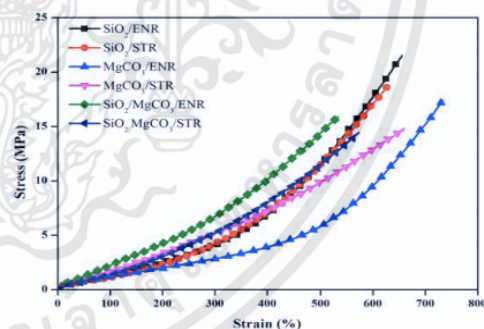


Fig. 2. Stress-strain curves of the experimental formulations.

3.1.3 Dynamic mechanical properties

Fig. 3 plots the storage moduli as functions of strain amplitude for FCBCs filled with SiO₂, MgCO₃ or their mixture (i.e., SiO₂+MgCO₃) in the non-polar STR5L and polar ENR50 natural rubber matrixes. In each case, the storage modulus was comparatively high and nearly constant at strains below 1%. The modulus decreased at higher strains because the filler agglomerates were broken; this effect is known as the *Payne effect* [16]. Thus, by varying the type and quantity of filler, one can vary the modulus behavior and Payne effect of the filled rubber.

Table 3 Mechanical properties of the experimental formulations before pre-heating

Mix symbol	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	100 %modulus (MPa)	300 %modulus (MPa)
SiO ₂ /ENR	21.59 ± 0.43	657.09 ± 7.64	1.24 ± 0.08	4.11 ± 0.37
SiO ₂ /STR	18.57 ± 2.33	625.98 ± 21.00	1.11 ± 0.04	4.20 ± 0.09
MgCO ₃ /ENR	17.16 ± 2.60	729.23 ± 13.53	1.17 ± 0.08	2.81 ± 0.25
MgCO ₃ /STR	14.77 ± 1.26	657.09 ± 6.56	1.64 ± 0.02	5.18 ± 0.10
SiO ₂ /MgCO ₃ /ENR	15.85 ± 3.17	534.36 ± 52.34	1.36 ± 0.11	5.20 ± 0.44
SiO ₂ /MgCO ₃ /STR	14.40 ± 1.23	574.70 ± 4.87	1.64 ± 0.10	5.18 ± 0.31

The strain dependence of the storage modulus depends on the filler–filler interactions, which increase the elastic modulus [17]. SiO₂/MgCO₃/ENR has a higher storage modulus than SiO₂/MgCO₃/STR because a filler mixture agglomerates more readily than a single filler, consistent with the observed morphology. Moreover, adding fillers to non-polar STR5L rubber yields a lower storage modulus than adding fillers to the polar ENR50 matrix, because the filler dispersion is better in STR5L than in STR5L.

Fig. 4 plots the storage moduli and *tan*(δ) values of the samples as functions of temperature. At some critical temperature, the storage modulus decreases rapidly and the sample changes from a glassy to a rubbery state (Fig.4(a)). The observed behaviors fall into two groups: (1) SiO₂/ENR, SiO₂/STR and SiO₂/MgCO₃/ENR, and (2) MgCO₃/ENR, MgCO₃/STR, and SiO₂/MgCO₃/STR. The storage modulus is higher in the first group because SiO₂ is a better reinforcing agent for STR5L and ENR50 than MgCO₃. The *tan*(δ) peaks in Fig.4(b) also indicate a critical temperature. This temperature called the glass transition temperature (*T_g*), was higher in SiO₂/ENR, SiO₂/STR, and SiO₂/MgCO₃/ENR than in MgCO₃/ENR, MgCO₃/STR and SiO₂/MgCO₃/STR. This difference is explained by the smaller size of the SiO₂ particles than of the MgCO₃ particles, enabling stronger rubber–filler interactions in both rubbers.[18] Moreover, comparing the rubber types with the mixed filler SiO₂+MgCO₃, the *T_g* was higher in ENR50 than in STR5L because the polar ENR better interacts with the mixed filler [19].

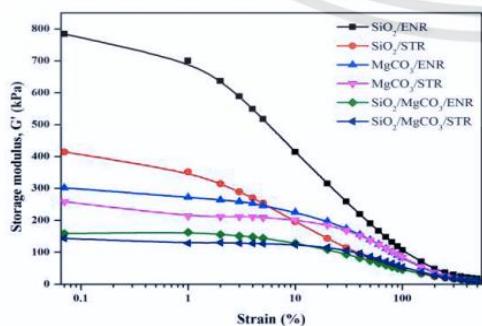


Fig. 3. Storage modulus vs. strain amplitude curves of the experimental formulations, tested at 80°C and 1 Hz.

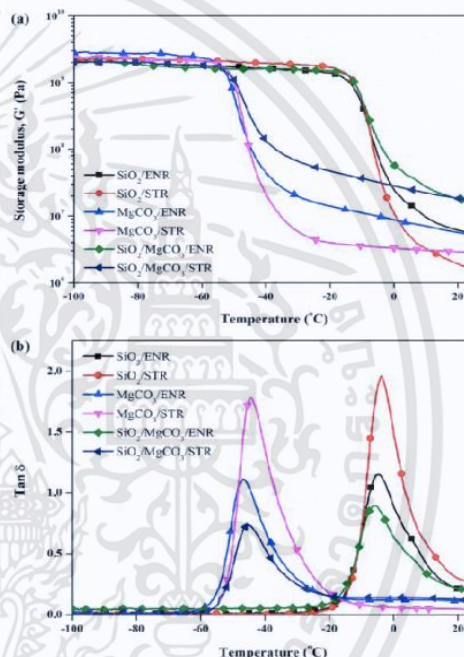


Fig. 4. (a) Storage modulus and (b) *tan*(δ) as functions of temperature for the experimental formulations

3.1.4 Dielectric properties

The dielectric properties of FCBcF before pre-heating are summarized in Table 4. The values of *tan*(δ) were higher in SiO₂/MgCO₃/ENR, SiO₂/ENR, and MgCO₃/ENR than in SiO₂/MgCO₃/STR, SiO₂/STR and MgCO₃/STR, showing that although STR5L natural rubber forms cross-links with non-polar molecules [1], its microwave absorption capability is lower than that of ENR50. This can be explained by the larger molecules with poorer mobility in STR5L than in ENR50 under the alternating electric field. Therefore, the silica, magnesium carbonate and mixed fillers increase the energy absorption of rubber because they are electrically polar and can absorb microwaves. The silanol (Si-OH) groups on the silica surface confer an acidic, chemically reactive property and a high electric polarity at the surface [13]. Therefore, silica filler is more polar than magnesium carbonate.

Table 4 Dielectric properties of the experimental formulations before pre-heating

Mix symbol	Relative dielectric constant (ϵ_r')	Relative loss factor (ϵ_r'')(x 10 ⁻³)	Loss tangent (tan δ)(x 10 ⁻³)	Penetration depth (D_p) (meter)
SiO ₂ /ENR	2.400	0.0149	0.006194	0.406384
SiO ₂ /STR	2.321	0.0119	0.005137	0.498197
MgCO ₃ /ENR	2.490	0.0131	0.005276	0.468330
MgCO ₃ /STR	2.369	0.0097	0.004114	0.615673
SiO ₂ /MgCO ₃ /ENR	2.555	0.0169	0.006617	0.368711
SiO ₂ /MgCO ₃ /STR	2.427	0.0139	0.005717	0.437804

Fig.5 shows the dielectric test results. SiO₂/MgCO₃/ENR exhibited the highest ϵ_r' among the tested cases. When filled with silica and magnesium carbonate, the polar molecules of ENR50 absorb the microwave energy and convert it to heat. The fillers apparently increase the polarity of the already polar ENR50, enabling energy savings when pre-heating the FCBCs with microwaves. The thermal transformation was also affected. The volumetric internal heat generation (Q) in Eq. (3) depends on both the electric and magnetic fields in the dielectric medium [20].

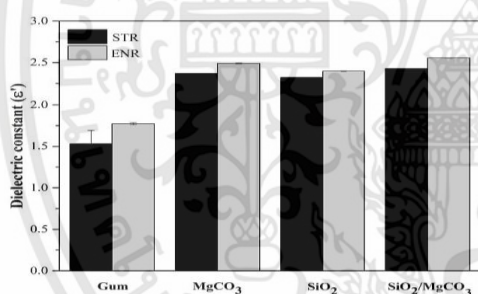


Fig. 5. Relative dielectric constants of the experimental formulations before pre-heating.

3.2 Properties of the selected vulcanized FCBC

According to the above test results, the best FCBC candidate was FCBCF (SiO₂/MgCO₃/ENR50). FCBCF is dielectric, appropriate for microwave pre-heating prior to vulcanization, and conserves the cost of raw materials. Therefore, this compound was evaluated in the further study. The microwave absorption of FCBCF was tested on samples of the area (150×150) cm² and thickness 4 mm. The specimens were subjected to 2.45 GHz industrial microwave radiation. The microwave power was varied as 340, 850 and 1,700 W, and the pre-heating duration was 1 minute prior to hydraulic molding at 150°C with a vulcanization duration of 50% T_{c90} . This test was aimed to assess effects of the microwave conditions on the mechanical properties of FCBCF (hardness, modulus at 300% elongation, tensile strength, and elongation at break), both with and without heat aging. The heat-

accelerated aging was performed in a hot air oven at 100°C for 22 hours.

3.2.1 Mechanical Properties

Panels (a) and (b) of Fig. 6 shows the hardness and modulus at 300% elongation, respectively, in the non-aged and heat-aged FCBCF samples. FCBCF is highly dielectric and well absorbed the microwave energy, thereby providing strong heating [6]. The silica and magnesium carbonate fillers are appropriate dielectric agents that tend to absorb rather than reflect the waves [21]. Thus, microwave-treated FCBCF should demonstrate superior mechanical properties. However, the fillers can obstruct the mobility of the rubber molecules and accordingly reduce the flexibility, thereby increasing the hardness after the heat-accelerated aging [3]. This effect of aging on the mechanical properties of FCBCF was preserved under all conditions of microwave preheating. However, increasing the microwave energy from 340 to 850 Watts tended to reduce the mechanical properties, because the stronger heating [6] increased the quantitative heat (Q) generated at the molecular level. Excessive heating reduces the cross-linking of vulcanized rubber [8]. When the microwave power was increased to 1700 Watts, the vulcanization degree was further degraded [22], with obvious loss of mechanical properties.

Panels (c) and (d) of Fig. 6 shows the tensile strength and elongation at break, respectively, in the non-aged and heat-aged FCBCF samples. Both properties declined with accelerated aging and with increasing microwave power, reflecting the stronger internal heating [6]. Both the non-aged and heat-aged FCBCF samples were highly dielectric and strongly absorbed the microwave energy. The cross-linking in FCBCF was reduced by the excessive heat [21], and the molecular chains can also be degraded by heat and oxidation during the aging process [23]. Increasing the microwave energy from 850 to 1,700 Watts worsened the mechanical properties of the heat-aged FCBCF. This can be explained by rapid moisture transfer under intense heating, called reversion. Reversion, which describes the loss of sulfur crosslinks in rubber under intense heat or

excessive vulcanization duration, degrades the properties of vulcanized rubber [24]. Meanwhile, the heat-aging process reduced the flexibility of the vulcanized rubber [23]. The filler can bond poorly with the rubber phase and be poorly distributed. It can also obstruct the movements of the rubber molecules, increasing the hardness and brittleness. These phenomena also degrade the mechanical properties [25].

belt compound with filler (FCBcF) in the non-aged (black) and age-accelerated (red) cases. (b) Modulus at 300% elongation of non-aged (black) and age-accelerated (red) FCBcF. (c) Tensile strength of non-aged (black) and age-accelerated (red) FCBcF and (d) Elongation at break of non-aged (black) and age-accelerated (red) FCBcF.

4. CONCLUSION

FCBcF was prepared by mixing ENR50 with silica and magnesium carbonate fillers at a mass ratio of 100:40:40. Among the tested candidates, this formulation exhibited the highest dielectric, and dynamic mechanical properties, while also lowering the production cost. To mix the rubber, chemicals, and fillers, began by mixing the silica, silane, PEG, and oil to a master batch of rubber, then added the magnesium carbonate to reduce the effective adhesion between the rubber and fine chemicals. The main raw material of FCBcF was ENR50, which conferred stronger material properties than STRL. The ENR50, silica, and magnesium carbonate components are polar and tend to absorb microwaves, converting the energy to heat. The fillers can intensify the polarity of the already polar ENR50, but tend to reduce the mobility of the rubber molecules. The vulcanized compound was strongly resistant to oil (a non-polar solvent). The FCBcF was pre-heated for 1 minute with 2.45-GHz microwaves of varying power (340, 850, or 1,700 W), then vulcanized by hydraulic molding at 150°C for a duration of 50% T_{c90} . The mechanical properties were tested without aging and after accelerated aging at 100°C for 22 hours. Microwave pre-heating at 340 W for 1 minute achieved the best hardness and modulus at 300% elongation after aging and the best tensile strength and elongation at break in the non-aged specimen. Heating at higher microwave powers degraded the mechanical properties of the FCBcF.

These proof-of-concept results indicate the feasibility of pre-heating FCBcF by microwaves prior to vulcanization in the industrial manufacture of FCB.

5. Acknowledgments

The authors would like to thank the National Research Council of Thailand and Prince of Songkla University for financial support; and the Rubber Industry, Rubber Research Institution, and Agricultural Academic Department, Ministry of Agriculture and Co-operation, for their support by providing rubber, chemical agents, and testing facilities. We are also grateful to Assoc. Prof. Seppo Karrila of the Prince of Songkla University for assistance with manuscript preparation.

6. REFERENCES

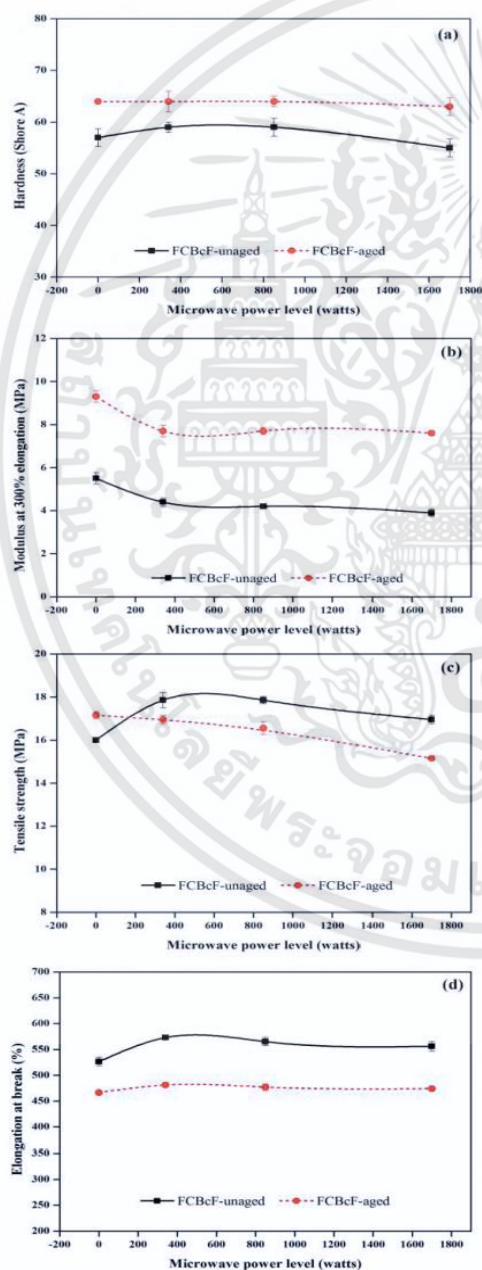


Fig. 6. (a) Hardness of the selected food conveyor

- [1] Rippel M.M.; Lee L.T.; Leite C.A.P. and Galembeck F., Skim and cream natural rubber particles: colloidal properties, coalescence and film formation. *J. Colloid Interface Sci.*, Vol. 268, Issue 2, 2003, pp.330–340.
- [2] Yoksan R., Epoxidized natural rubber for adhesive applications. *J. Kasetsart, Nat.Sci.*, Vol. 42, 2008, pp.325–332.
- [3] Barlow F.W., *Rubber compounding: principles, materials and techniques*. 2nd Edition: Marcel Dekker, Inc., New York. 1993.
- [4] Adamu M.; Mohammed B.S. and Liew M.S., Effect of crumb rubber and nano silica on the creep and drying shrinkage of roller compacted concrete pavement, *International Journal of GEOMATE*, Vol. 15, Issue 47, 2018, pp. 58–65.
- [5] Soo-Jin P. and Ki-Sook C., Fill-elastomer interactions : influence of silica coupling agent on crosslink density and thermal stability of silica of silica/rubber composites. *J. Colloid Interface Sci.*, Vol. 267, 2003, pp. 86-91.
- [6] Doo-ngam N.; Ratanadecho P. and Klinklai W., Microwave preheating of natural rubber using a rectangular wave guide (MODE: TE₁₀). *Songklanakar J. Sci. Technol.*, Vol. 29, Issue 6, 2007, pp. 1599–1608.
- [7] Sejimo A. and Shigeo O., Method for continuously vulcanizing hoses. United States Patent No. 4702867. 1987.
- [8] Makal N. and Ratanadecho P., Microwave pre-curing of natural rubber – compounding using a rectangular wave guide. *Int Commun Heat and Mass Transfer.*, Vol. 37, Issue 7, 2010, pp. 914–923.
- [9] Von Hippel A.R., *Dielectric materials and application*, MIT Press: Boston. 1954.
- [10] Barringer S.A.; Davis E.A.; Gordon J.; Ayappa K.G. and Davis H.T., Effect of sample size on the microwave heating rate: Oil vs. water. *AIChE J.*, Vol. 40, Issue 9, 1994, pp. 1433-1439.
- [11] Ratanadecho P.; Aoki K. and Akahori M., Experimental validation of a combined electromagnetic and thermal model for a microwave heating of multi-layered materials using a rectangular wave guide. *ASME J. Heat Transfer.*, Vol. 124, Issue 5, 2002, pp. 992–996.
- [12] Sombatsompop N.; Thongsang S.; Markpin T. and Wimolmala E., Fly ash particles and precipitated silica as filler in rubber. I. Untreated fillers in natural rubber and styrene butadiene rubber compound. *J. Appl. Polym. Sci.*, Vol. 93, 2004, pp. 2119–2130.
- [13] Sadequl A.M.; Ishiaku U.S. and Poh B.T., Cure Index and Activation Energy of ENR-25 Compared with SMR L in Various Vulcanization systems. *Eur. Polym. J.*, Vol. 35, Issue 4, 1999, pp. 711–719.
- [14] Gelling I.R., Epoxidised natural rubber. *J. Inter Rub.*, Vol. 6, 1991, pp. 184–205.
- [15] Rattanasom N.; Saowapark T. and Deeprasertkul C., Reinforcement of natural rubber with silica/carbon black hybrid filler. *Polym Test.*, Vol. 26, 2007, pp. 369–377.
- [16] Payne A.R., Effect of dispersion on the dynamic properties of filler-loaded rubber. *J. Appl. Sci.*, Vol. 9, Issue 6, 1965, pp. 2273–2284.
- [17] Leblanc J.L., Rubber-filler interactions and rheological properties in filled compounds. *Prog Polym Sci.*, Vol. 27, 2002, pp. 627–687.
- [18] Choi S., Influence of the silica content on rheological behavior and cure characteristics of silica filled styrene-butadiene rubber compound. *Polym. Inter.*, Vol. 50, 2001, pp. 525–530.
- [19] Thongsang S.; Vorakhan W.; Wimomala E. and Sombatsompop N., Dynamic mechanical analysis and tribological properties of NR vulcanizates with fly ash/precipitated silica hybrid filler. *Tribol Inter.*, Vol. 53, 2012, pp. 134–141.
- [20] Ratanadecho P.; Aoki K. and Akahori M., A numerical and experimental investigation of the modeling of microwave heating for liquid layers using a rectangular wave guide (effect of natural convection and dielectric properties). *Appl. Math. Model.*, Vol. 26, Issue 3, 2002, pp. 449–472.
- [21] Metaxas A.C. and Meredith, R.J., *Industrial microwave heating*. Peter Peregrinus, Ltd. :London. 1983.
- [22] Hoover F.I., Review of Vulcanization Chemistry. *Rubber World.*, Vol. 24, 1999, pp. 220.
- [23] Nasdkar N.; Debnath S.C. and Basu D.K., Novel method for preparation of carboxylated nitrile rubber–natural rubber blends using bis (diisopropyl) thiophosphoryl polysulfides. *J. Appl. Polym. Sci.*, Vol. 80, 2001, pp. 1725–1736.
- [24] Datta R.N. and Ivany M.S., A chemical for reversion resistance compounding. *Rubber World.*, Vol. 24, 1995, pp. 212.
- [25] Da Costa H.M.; Visconte L.L.Y.; Nunes R.C.R. and Furtado C.R.G., Mechanical and dynamic mechanical properties of rice husk ash-filled natural rubber composites. *J. App. Polym. Sci.*, Vol. 83, Issue 11, 2002, pp. 2331–2346.

Copyright © Int. J. of GEOMATE. All rights reserved, including the making of copies unless permission is obtained from the copyright proprietors.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายศุภัสชกรณ์ หลิมเฮงฮะ
วัน เดือน ปีเกิด	25 พฤศจิกายน 2513
ที่อยู่	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตสุราษฎร์ธานี เลขที่ 31 หมู่ที่ 6 ตำบลมะขามเตี้ย อำเภอเมือง จังหวัดสุราษฎร์ธานี 84000 โทรศัพท์: 094-6835919
ประวัติการศึกษา	2533-2535 อ.วท. (เทคโนโลยีการยาง) วิทยาลัยครูสงขลา 2536-2539 ศศ.บ. (การจัดการ) สถาบันราชภัฏสงขลา 2548-2550 วศ.ม. (การจัดการอุตสาหกรรม) มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1. อุตสาหกรรมยาง 2. ระบบการผลิต 3. ระบบควบคุมคุณภาพและประกันคุณภาพ 4. การจัดการอุตสาหกรรม 5. ห้องปฏิบัติการทดสอบ
ประสบการณ์การทำงาน	เม.ย.2535-พ.ค.2550 อุตสาหกรรมยาง ผลิตน้ำยางข้น ผลิตยางคอมปาวด์ ผลิตยางแท่ง ผลิตล้อรถยนต์ ผลิตยางแผ่นรมควัน สารเคมีสำหรับอุตสาหกรรมยาง ผลิตถุงมือยางทางการแพทย์ อาจารย์พิเศษด้านอุตสาหกรรมยาง ผลิตรองเท้ากีฬา ที่ปรึกษาด้านอุตสาหกรรมยาง
พ.ค.2550-ต.ค.2554	ผู้จัดการศูนย์บ่มเพาะวิสาหกิจ มหาวิทยาลัยทักษิณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตสุราษฎร์ธานี
ต.ค.2554-ปัจจุบัน	อาจารย์ประจำหลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต (การจัดการอุตสาหกรรมยาง) อาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (การจัดการงานวิศวกรรม) คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตสุราษฎร์ธานี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตีพิมพ์บทความวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วารสารทางวิชาการ

- [1] **Suphatchakorn Limhengha**, Sunpasit Limnararat and Wipoo Sriseubsai. “Effect of ENR50/STR5L Blends on Properties of Foodstuff Conveyor Belts Compound.” **Key Engineering Materials.**, vol.701, 2016. pp.243-249.
- [2] **Suphatchakorn Limhengha**, Sunpasit Limnararat and Wipoo Sriseubsai. “Effect of Mixed Filler on Thermal Properties of Foodstuff Conveyor Belts Compound Using an Industrial Microwave Pre-heating.” **Key Engineering Materials.**, vol.701, 2016. pp.101-106.
- [3] **Limhengha S.**, Limnararat S., Jangchud I. and Sriseubsai W. “Novel Foodstuff Conveyor Belts Compound for Energy Saving: The Effect of Microwave Pre-Heating and Mixed Fillers on Mechanical Properties.” **ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences.**, vol.12, No. 4, February 2017. pp.1105-1110.
- [4] **Suphatchakorn Limhengha** and Wipoo Sriseubsai. “Optimizing the Properties of Vulcanized Compounds for Foodstuff Conveyor Belts in Industrial Microwave Pre-Heating.” **International Journal of GEOMATE.**, vol.15, issues 50. October 2018. pp.189-196.

การประชุมวิชาการ

- [1] **S. Limhengha**, S. Limnararat and W. Sriseubsai. “Effect of ENR50/STR5L Blends on Properties of Foodstuff Conveyor Belts Compound.” **2nd International Conference on the Science and Engineering of Materials (IcoSEM2015).**, November 16-18, 2015 in Kuala Lumpur, Malaysia.
- [2] **S. Limhengha**, S. Limnararat and W. Sriseubsai. “Effect of Mixed Filler on Thermal Properties of Foodstuff Conveyor Belts Compound Using an Industrial Microwave Pre-heating.” **2nd International Conference on the Science and Engineering of Materials (IcoSEM2015).**, November, 16-18 2015 in Kuala Lumpur, Malaysia.
- [3] **S. Limhengha**, S. Limnararat and W. Sriseubsai. “Effect of Mixed Filler on Properties of Foodstuff Conveyor Belts Compound Using an Industrial Microwave Pre-heating.” **International Conference on Engineering and Technology (ICET2015).**, December 17-18, 2015 in King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand.

การสนับสนุนทุนวิจัย และการศึกษา

- [1] มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สนับสนุนทุนพัฒนาอาจารย์ เพื่อศึกษาระดับปริญญาเอก ภายในประเทศ ประจำปี 2556 เรื่อง “การพัฒนากระบวนการผลิตยางคอมปาวด์สายพาน ลำเลียงอาหารชนิดใหม่แบบประหยัด”
- [2] สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สนับสนุนทุนการเสนอผลงานทาง วิชาการระดับนานาชาติ ประเภทบัณฑิตศึกษา ประจำปี 2558 ระดับปริญญาเอก เรื่อง
- Effect of ENR50/STR5L Blends on Properties of Foodstuff Conveyor Belts Compound.
 - Effect of Mixed Filler on Thermal Properties of Foodstuff Conveyor Belts Compound Using an Industrial Microwave Pre-heating.
- [3] สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ สนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัย ประเภทบัณฑิตศึกษา ประจำปี 2560 ระดับปริญญาเอก เรื่อง “การพัฒนากระบวนการผลิตยางคอมปาวด์สายพาน ลำเลียงอาหารชนิดใหม่แบบประหยัดพลังงาน”