

# การอุ่นยางธรรมชาติด้วยพลังงานไมโครเวฟโดยใช้ระบบท่อนำ คลื่นทรงสี่เหลี่ยม:

## (II) สมบัติและโครงสร้างของยางธรรมชาติ

### Pre-heating of Natural Rubber with Microwave Energy Using a Rectangular Wave Guide (MODE: TE10):

#### (II) Structure and Properties of Natural Rubber

วรุณี กลิ่นไกล<sup>1</sup> และ ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ต.คลองหก อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110 โทร.02-549-3484-5 อีเมลล์\*: warunee.a@rmutt.ac.th

<sup>2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

ต.คลองหนึ่ง อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120 โทร. 02-564-3001-9

**บทคัดย่อ**—ไมโครเวฟเทคโนโลยีได้เข้ามามีบทบาทในการให้ความร้อนในอุตสาหกรรมและเทคโนโลยีมากขึ้นเนื่องจากใช้พลังงานน้อยในการให้ความร้อนและเป็นวิธีการที่รวดเร็ว ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะนำพลังงานไมโครเวฟมาใช้ในการอุ่นยางธรรมชาติแทนวิธีแบบดั้งเดิม โดยศึกษาถึงโครงสร้างและสมบัติต่างๆ เช่น สมบัติทางกายภาพ ทางไฟฟ้า การเชื่อมโยงพันธะและปริมาณแก้ว ที่มีผลต่อการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ rectangular wave guide (MODE: TE10) ที่ความถี่ 2.45 GHz และใช้กำลังวัตต์ 1000 W แก่ชิ้นงานหนา 3 cm เท่ากัน ผลจากการฟูเรียรทรานส์ฟอร์มสเปกตรัมพบว่าโครงสร้างของยางไม่ถูกทำลายไปและพบพีคใหม่ที่ 1596  $\text{cm}^{-1}$  ในยางธรรมชาติหลังเติมกำมะถันและเขม่าดำ คาดว่าน่าจะเป็นพีคการเชื่อมโยงพันธะระหว่างคาร์บอนและซัลเฟอร์ ซึ่งจะสัมพันธ์กับค่า % Crosslinking ที่เพิ่มขึ้นจาก 0  $\text{mol}/\text{cm}^3$  เป็น 0.8, 1.6, 1.8 และ 1.3  $\text{mol}/\text{cm}^3$  เมื่อมีปริมาณกำมะถันเป็น 1.5, 2.0, 2.5 และ 3.0 phr ตามลำดับ ค่า Dielectric loss tangent coefficient (Tan  $\delta$ ) ของยางธรรมชาติเพิ่มขึ้นจาก  $10^{-6}$  เป็น  $10^{-3}$  หลังจากเติมเขม่าดำลงไป 10 phr แสดงให้เห็นว่ายางธรรมชาติจากเดิมที่ไม่มีขั้วกลายมาเป็นวัสดุขั้วมากขึ้นซึ่งจะผลต่อการดูดซับพลังงานจากไมโครเวฟและเปลี่ยนมาเป็นพลังงานความร้อนได้ดีกว่า และจากการทดลองพบว่าพลังงานไมโครเวฟเหมาะสมในการอุ่นยางได้โดยไม่ทำให้ความหนาแน่นและปริมาณ non-rubber เปลี่ยนแปลง

**Abstract**—Microwave technology has received considerable attention as an attractive alternative to rubber industrial and technologies for low energy consumption and quick method. In the present work, structure and properties of NR and NR filled CB after pre-heating with microwave energy was investigated using a rectangular wave guide (MODE: TE10) at frequency of 2.45 GHz and power input 1000 Watts. From FTIR Spectra, there are no side reaction occurs. However, we found a new peak appears at 1596  $\text{cm}^{-1}$ , suggesting that crosslinking occurs after per-heating. It is consistent with the result of % crosslinking which was increased from 0  $\text{mol}/\text{cm}^3$  to 0.8, 1.6, 1.8 และ 1.3  $\text{mol}/\text{cm}^3$  when we added sulfur content from 0 to 1.5, 2.0, 2.5 และ 3.0 phr., respectively. Dielectric loss tangent coefficient (Tan  $\delta$ ) for NR was

increased from  $10^{-6}$  to  $10^{-3}$ , after filling with carbon black for 10 phr, reflecting that NR becomes polar materials useful for absorbing energy. To observe physical properties, the resulting compounding within and without carbon black was subjected to density measurement. It was observed that there is no change in the density for all samples. Microwave energy is suitable to use for pre-heating NR and NR filled CB without destroying structure and properties. There is no change in non-rubber content after pre-heating the rubber with microwave.

#### 1. คำนำ (Introduction)

ปัจจุบันการมีกรนำคลื่นไมโครเวฟมาใช้กันอย่างแพร่หลาย เช่น ในการอุ่นอาหาร ในการอบแห้งในการนำมาใช้เป็นเครื่องมือทดสอบ และได้มีการเริ่มนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมกันมากขึ้นใน โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุตสาหกรรมการผลิตอาหาร แต่ในอุตสาหกรรมหลักของประเทศไทยได้แก่อุตสาหกรรมยาง มีงานวิจัยที่ทำการศึกษานำคลื่นไมโครเวฟมาใช้กันยังมีน้อยมากและยังไม่พบการรายงานถึงสมบัติของยางหลังอบให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ ที่มาของปัญหาที่พบในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมยางคือ ขั้นตอนในกระบวนการวัลคาไนเซชันผลิตภัณฑ์ยางเกือบทุกชนิด โดยคือวิธีดั้งเดิมใช้ลมร้อนในการเคียว ดังนั้นคณะนักวิจัยมีแนวคิดในการประยุกต์ใช้พลังงานไมโครเวฟในการทดลองให้ความร้อนแก่ยางธรรมชาติแทนการให้ความร้อนด้วยตู้อบซึ่งใช้ลมร้อน โดยคาดว่ายังคงสมบัติที่ดีของยางธรรมชาติครบถ้วน เนื่องจากพลังงานไมโครเวฟจะให้ความร้อนที่สม่ำเสมอทั่วถึง และกระบวนการในการผลิตสะอาดและรวดเร็ว ประหยัดพลังงาน และ ประหยัดเนื้อที่ สามารถนำองค์ความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตผลิตภัณฑ์ยางและออกแบบเครื่องไมโครเวฟต่อไป [1-4]

ในประเทศไทยมีงานวิจัยได้นำร่องศึกษานำคลื่นไมโครเวฟแบบหลายเฟส (Multi-phase) ซึ่งเป็น ไมโครเวฟที่ใช้กันตามบ้านเรือนมาประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมยาง โดยที่ผ่านมากลุ่มนักวิจัยที่ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ไมโครเวฟในการให้ความร้อนกับยางธรรมชาติ ได้แก่ ผดุงศักดิ์ และคณะ [5] ได้ทำการศึกษานำพลังงานไมโครเวฟมาประยุกต์ใช้กับยางพาราและอุตสาหกรรมทางด้านเซรามิกส์ โดยที่การวิจัยดังกล่าวใช้อุปกรณ์คือ



เตาไมโครเวฟชนิดสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง จากการทดลองในส่วนของ  
ข้างพาราที่พบว่าสามารถช่วยลดขั้นตอนในการรีดแผ่นยาง โดยสามารถนำยางพารา  
ทั้งก้อนไปทำการอบได้เลยซึ่ง รัชดา [6] ได้ทำการศึกษาขั้นเริ่มต้นถึงการนำ  
พลังงานไมโครเวฟมาใช้ในการให้ความร้อนยางเปรียบเทียบกับให้ความร้อนแบบ  
ธรรมดา พบว่าการใช้คลื่นไมโครเวฟแบบคลื่นผสมในการให้ความร้อน  
ซึ่งเป็นการให้ความร้อนเชิงปริมาตรจะทำให้ยางมีความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและอุณหภูมิภายในเนื้อยางกระจายตัว อย่างทั่วถึงภายในเวลาอันรวดเร็วเนื่องจาก  
ความสามารถในการทะลุทะลวงของคลื่นไมโครเวฟ

ณัฐพงศ์ นิธิอุทัยและคณะ [7] ศึกษาการอุ่นยางด้วยคลื่นไมโครเวฟ  
สำหรับงานอัดเบ้า ยางหนาพบว่า การใช้คลื่นไมโครเวฟแบบคลื่นผสมในการ  
อุ่นยางก่อน การอัดเบ้ายางหนานั้นสามารถลดเวลาในการอบสุกยางลง 31.2%  
และพลังงานที่ใช้จะลดลง 41.11% มีอัตราการทะลุทะลวงที่คล้ายขนาด 3.5 กิโลกรัม  
ลักษณะทรงกระบอกสูง 7 นิ้วและมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 นิ้ว ในการทดสอบดังกล่าว

แม้ว่าได้มีการศึกษาการนำพลังงานไมโครเวฟมาประยุกต์กับอุตสาหกรรมยาง แต่  
ยังไม่ปรากฏการรายงานผลที่ชัดเจนในการอธิบายด้านโครงสร้างและหลักการอันครก  
ระหว่างคลื่นไมโครเวฟและยางธรรมชาติ เนื่องจากความซับซ้อนของกระบวนการ  
และปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น ดังนั้นคณะผู้วิจัยมีความมุ่งมั่นที่จะศึกษาการให้ความร้อนหรือ  
อุ่นยาง (Pre-heating)

โดยใช้พลังงานไมโครเวฟระบบท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมเป็นแบบเฟสเดียว (single  
phase) ซึ่งสามารถควบคุมอุณหภูมิ จำนวนกำลังวัตต์ที่ใช้ โดยจะศึกษาถึงการเปลี่ยน  
แปลงทางโครงสร้าง สมบัติทางไฟฟ้า สมบัติทางกายภาพ รวมถึงผลของ non-rubber con  
tent ที่มีในเนื้อยางหลังจากอุ่นด้วยพลังงานไมโครเวฟ โดยความรู้ที่ได้จะเป็นองค์ความ  
รู้พื้นฐานในการนำไปประยุกต์ใช้งานในการออกแบบระบบไมโครเวฟที่ใช้ในอุตสาหกรรมยาง ได้แก่ การผลิตยางล้อรถยนต์ หรือผลิตภัณฑ์ยางอื่นๆ ที่มีความหนาแน่นๆ ได้

## วิธีการทดลอง (Experimentals)

### 1. การเตรียมตัวอย่างยางคอมปาว์

ยางคอมปาว์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย ยางธรรมชาติ สารวัลคาไนซ์  
สารกระตุ้น สารตัวเติม และสารตัวเร่ง ดังแสดงอัตราส่วนการ  
ผสมของยางคอมปาว์ในตารางที่ 1 การเตรียมยางคอมปาว์  
โดยเริ่มนำยางธรรมชาติมาทำการบดผสมด้วยเครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง  
ดังแสดงในรูปที่ 1 ทำให้เป็นเนื้อเดียวกันโดยตั้งอุณหภูมิของเครื่องบดผสมสอง  
ลูกกลิ้งไว้ที่ 50°C ใช้เวลาประมาณ 5 นาที จนยางเริ่มพันลูกกลิ้งมองเห็นเป็นเนื้อเดียวกัน  
จากนั้นใส่ ZnO ลงไปบดผสมใช้มีดกรีดและบดผสมไปเรื่อยๆ ใช้เวลาประมาณ 3 นาที  
ผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน ใส่ Stearic acid ลงไปบดผสมใช้มีดกรีดและบดผสม  
ไปเรื่อยๆ ใช้เวลาประมาณ 3 นาที ผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน ใส่ MBTS  
ลงไปบดผสมใช้มีดกรีดและบดผสมไปเรื่อยๆ ใช้เวลาประมาณ 3 นาที  
ผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน ต่อมาใส่ DPG ลงไปบดผสมใช้มีดกรีดและบดผสมไปเรื่อยๆ  
ใช้เวลาประมาณ 3 นาที ผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน และ ใส่ Sulphur  
ลงไปบดผสมใช้มีดกรีดและบดผสมไปเรื่อยๆ ใช้เวลาประมาณ 3 นาที  
และเติมด้วยเขม่าดำลงไปผสมจนเป็นเนื้อเดียวกันใช้เวลาประมาณ 3 นาที

ตารางที่ 1 แสดงอัตราส่วนยางคอมปาว์ที่ใช้ในการทดลอง

วัตถุดิบ	สูตรที่	สูตรที่	สูตรที่	สูตรที่
	1	2	3	4
STR20	100	100	100	100
ZnO	5.0	5.0	5.0	5.0
Stearic Acid	1.0	1.0	1.0	1.0
Dibenzothiazyl disulphide (MBTS)	0.8	0.8	0.8	0.8
Diphenyl guanidine (DPG)	0.2	0.2	0.2	0.2
Sulphur	1.5	2.0	2.5	3.0
Carbon Black N330	10	10	10	10

### 2. การเตรียมพิมพ์ของตัวอย่างชิ้นยาง

นำยางคอมปาว์ที่ผ่านเครื่องบดผสมแล้วข้างต้นมาวางในแม่พิมพ์โลหะที่มีความ  
ขนาด 3 ซม. แล้วอัดด้วยเครื่อง Compression molding  
ให้เป็นชิ้นงานตามขนาดที่ต้องการ จากนั้นนำไปทดสอบด้วยเครื่องไมโครเวฟ

### 3. การทดสอบการให้ความร้อนกับยางด้วยพลังงานไมโครเวฟ

นำตัวอย่างยางธรรมชาติแบบต่าง ๆ ใส่ในแม่พิมพ์ แล้วนำไปใส่ในช่องในตัวอย่าง  
ในเครื่องไมโครเวฟชนิดท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม (Mode: TE10-  
) ประกอบด้วยแมกนีตรอนซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟที่ระดับความถี่ 2.54 GHz  
และกำลังวัตต์ที่ใช้ในการทดลองคือ 1000 Watts หลังจากนั้นให้ความร้อนด้วยพลังงาน  
ไมโครเวฟ โดยให้ความร้อนไปถึง 100 C เหมือนกันทุกชิ้นงาน

### 4. การหา Dielectric properties

การวัดค่าไดอิเล็กตริก (Dielectric constant) ของตัวอย่างทำได้โดย  
ใช้เครื่องมือ Network Analyzer ดังแสดงในรูปที่ 1 เครื่องมือชุดวัดสมบัติ  
ไดอิเล็กตริกเน็ตเวิร์กแอนนาไลเซอร์สามารถให้วัดวัสดุได้หลายประเภท หลายสถานะ  
เช่น วัสดุแข็ง วัสดุกึ่งแข็ง วัสดุที่เป็นผง รวมไปถึงวัสดุเหลว ตัวเครื่องมือ  
ประกอบที่จำเป็นต่อการวัดอย่างสมบูรณ์แบบ เช่น การกษาตัวยูนิทไมโครเวฟ  
การคำนวณสัญญาณ การเก็บข้อมูลจากการคำนวณ และการนำผลดังกล่าว  
มาแสดงเป็นกราฟ การควบคุมระบบการทำงานทั้งหมดจะถูกควบคุมด้วย  
ซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์เพื่อวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นภายในหัววัด (cavity)  
รวมไปถึงตัวแปรคุณภาพ (Quality factor) และนำข้อมูลที่ได้แปรกลับเป็น  
ค่าสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุที่ถูกทดสอบ และผลการวัดจะถูกแสดงในรูปแบบ  
กราฟหลายลักษณะและสามารถบันทึกข้อมูลเก็บไว้ได้ หัววัดที่ใช้วัดค่าถูกออกแบบ  
มาอย่างเหมาะสม สามารถวัดวิเคราะห์วัสดุไดอิเล็กตริกได้หลายชนิด  
การวัดทำได้ง่ายเพียงนำหัววัดไปทาบทับวัสดุที่ต้องการทราบค่า ซึ่งหัววัดดังกล่าวมี  
ข้อได้เปรียบที่ความยืดหยุ่นของการใช้งาน ความรวดเร็วในการวัด  
และความแม่นยำของข้อมูล

ขั้นตอนการวัดค่าสมบัติไดอิเล็กตริกเริ่มจากนำตัวอย่างชิ้นงาน  
มาเตรียมให้มีความหนาประมาณ 1 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 6.5 เซนติเมตร  
หลังจากนั้นทำการวัด 5 จุดต่อหนึ่งชิ้นงาน บันทึกค่าที่ได้แล้วนำมาหาค่า  $\tan \delta$

### 5. การศึกษาโครงสร้างด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy

การศึกษาโครงสร้างของยางธรรมชาติก่อนและหลังให้ความร้อนด้วยพลังงานไม  
โครเวฟสามารถทำได้โดยใช้เทคนิคอินฟราเรด (FTIR-470, Nicolet, USA) ดังแสดง  
ในรูป 2 นำสารตัวอย่างยางละลายด้วยคลอโรฟอร์ม และหยดเป็นฟิล์มบางๆ บนแผ่น  
KBr จากนั้นรอให้สารเคมีระเหย ก็นำไปการทดสอบโดยให้คลื่นอินฟราเรด  
ผ่านและประมวลผล



6.วิธีการหาค่า % Crosslinking

การศึกษาการทนต่อความร้อนของยางธรรมชาติก่อนและหลังให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟสามารถทำได้โดยให้การหาค่า % crosslinking เนื่องจากเมื่อยางเกิดจุดเชื่อมโฆงในโครงสร้างจะทำให้การทนต่อความร้อนเพิ่มขึ้น โดยวิธีการหาค่า เปอร์เซนต์การเชื่อมโฆง (% crosslinking) ได้จากการนำชิ้นงานตัวอย่างที่ได้จากการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟแล้วมาตัดให้เป็นทรงสี่เหลี่ยมนำไปชั่งและบันทึกน้ำหนัก จากนั้นแช่ในโทลูอินปริมาณ 30 มล.ทิ้งไว้ประมาณ 1 สัปดาห์ นำมาชั่งน้ำหนักอีกครั้งและคำนวณหาค่าเปอร์เซนต์การเชื่อมโฆงตามสูตรในสมการที่ 1 [8-10]

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

เมื่อ  $V_r$  คือ volume fraction of rubber in swollen gel

$\chi$  คือ rubber-solvent interaction parameter ( 0.3795)

$V_s$  คือ molar volume of toluene (106.8cm<sup>3</sup>/mol<sup>-1</sup>)

$\eta_{swell}$  คือ % การบวมตัวของยางคอมพาวด์ (mol cm<sup>-3</sup>)

$f$  คือ functionality of the cross-links (4 for sulfur curing system)

7.การหาค่าความหนาแน่น

การหาค่าความหนาแน่นทำได้โดยวิธีการชั่งน้ำ ซึ่งอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 3 ใช้มาตรฐานอ้างอิง ASTM 792 เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง มวลและปริมาตรพอลิเมอร์ที่ทราบความหนาแน่น และทำการชั่งน้ำหนักในอากาศจุ่มในไอโซโพรพานอล (จะเกิดการสูญเสียน้ำหนักของ อลิเมอร์ไปแทนที่น้ำหนักของไอโซโพรพานอล มีความหนาแน่น 0.8 g/cm<sup>3</sup>)

ความหนาแน่นหาได้จากการใช้ของเหลวที่ทราบความหนาแน่นที่แน่นอนซึ่งทำการชั่งน้ำหนักในอากาศและเมื่อจุ่มลงในของเหลวจากน้ำหนักทั้งสองความหนาแน่น )

(สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\rho = \frac{A \cdot \rho_0}{A + B}$$

หรือ

$$\rho = \frac{A \cdot \rho_0}{P}$$

เมื่อ  $\rho$  = ความหนาแน่นของของแข็ง

$\rho_0$  =

ความหนาแน่นของของเหลวที่ทดสอบที่อุณหภูมิ

A = น้ำหนักของของในอากาศ

B = น้ำหนักของของเมื่อจุ่มลงในของเหลว

P =

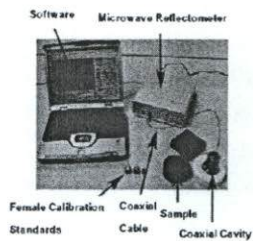
กำลังลอยตัวของของแข็งในของเหลวที่ทดสอบ

8.การทดสอบปริมาณเถ้า (Determination of Ash Content)

เถ้า (Ash) ในยางธรรมชาติประกอบด้วยเกลืออนินทรีย์ (Inorganic salt) พวกคาร์บอเนตออกไซด์ และฟอสเฟตของโพแทสเซียม แมกนีเซียม แคลเซียม โซเดียมและแร่ธาตุอื่นๆ นอกจากนี้เถ้าอาจเป็นพวกซิลิกาหรือซิลิเกตที่มีอยู่ในยางเองหรือปะปนมาจากข้างนอก ปริมาณเถ้าจะเป็นตัวบ่งชี้ปริมาณแร่ธาตุที่มีอยู่ในยางดิบและช่วยบ่งชี้ว่ามีกรดเดมสารตัวเติม (Filler) ลงไปเพื่อเพิ่มน้ำหนักยางหรือไม่ ทำตามมาตรฐาน ASTM D1278-91a Standard Test Method for Rubber from Natural Sources Chemical Analysis

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณเถ้า} &= \frac{\text{น้ำหนักเถ้า}}{\text{น้ำหนักชิ้นทดสอบ}} \times 100 \% \\ &= \frac{B-A}{W} \times 100 \% \end{aligned}$$

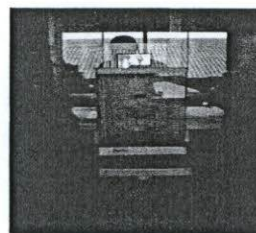
เมื่อ A คือ น้ำหนักถ้วยทนความร้อน หน่วยเป็นกรัม, B คือน้ำหนักถ้วยทนความร้อนพร้อมเถ้า หน่วยเป็นกรัม และ W คือน้ำหนักชิ้นทดสอบ หน่วยเป็นกรัม



รูปที่ 1 แสดงเครื่องบวมผสมสองลูกกลิ้ง



รูปที่ 2 แสดงเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

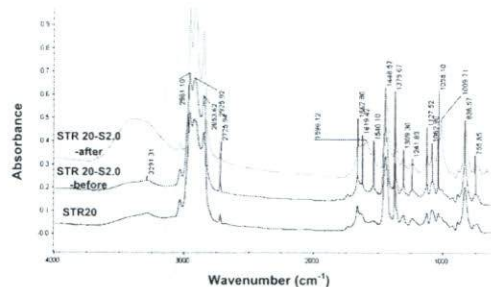


รูปที่ 3 แสดงเครื่องทดสอบหาความหนาแน่น

ผลการทดลอง (Results and Discussion)

1. ลักษณะโครงสร้างของยางธรรมชาติ (Structural Properties)

นำยางธรรมชาติคอมเปาต์ ผสมซิลิโคน 2 phr มาทำการศึกษาโครงสร้างภายในก่อนและหลังการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติก่อนคอมเปาต์ โดยควบคุมกำลังวัตต์ของคลื่นไมโครเวฟที่ความเข้มเท่ากับ 1,000 วัตต์ และความหนาชิ้นงาน 3 cm ดังแสดงในรูปที่ 4

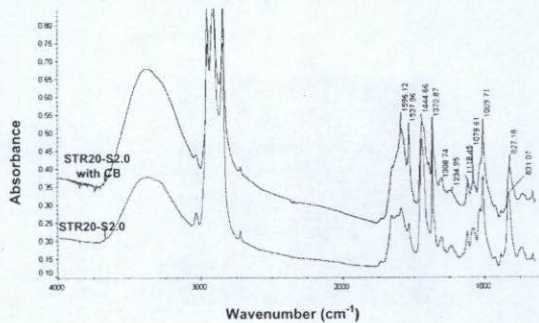


รูปที่ 4 อินฟราเรดสเปกตรัมของยางธรรมชาติ (STR20) เปรียบเทียบกับยางธรรมชาติหลังผ่านพลังงานไมโครเวฟ

จากรูปที่ 4 พบว่ายางธรรมชาติ STR20 มีพิกัดพื้นฐานของโพลีไอโซพรีน ดังนี้ คือ C-H asymmetric stretching ใน CH<sub>2</sub>, -CH<sub>2</sub>- และ -CH<sub>3</sub> แสดงพิกัดที่ 2961, 2926 และ 2854 cm<sup>-1</sup> ตามลำดับ ส่วนพิกัดที่ 1448 และ 1375 cm<sup>-1</sup> คือ -CH<sub>2</sub>- และ -CH<sub>3</sub>- ตามลำดับ นอกจากนี้พันธะของ C=C bending และ stretching จะมีพิกัดปรากฏที่ 836 และ 1663 cm<sup>-1</sup> ตามลำดับ ระหว่างพิกัดที่ 3300-3600 cm<sup>-1</sup> คือ hydroxyl group ซึ่งพบพิกัดสูงสุดอยู่ที่ 3284 cm<sup>-1</sup> [9-10]

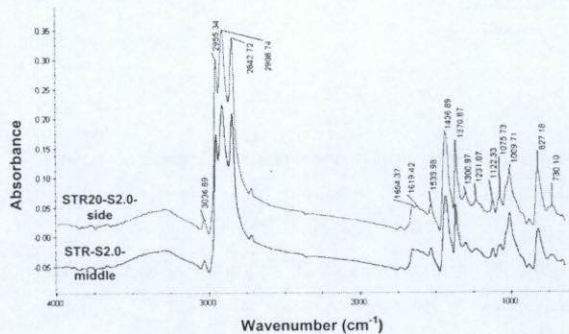


หลังจากนั้นนำยางธรรมชาติดังกล่าวมาผสมกับกำมะถัน เขม่าดำและสารอื่นๆ เพื่อทำคอมเปาต์ที่สูตรต่างๆ กัน แล้วนำมาให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ จากรูปพบว่ายางธรรมชาติคอมเปาต์ STR20 ก่อนผ่านพลังงานไมโครเวฟ มีลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของยางธรรมชาติคล้ายกับยางธรรมชาติ STR20 แต่โครงสร้างของยางคอมเปาต์ STR20 หลังผ่านพลังงานไมโครเวฟ (STR20-S2.0 after) จะพบพีกใหม่เกิดขึ้นที่ 1596 และ 1009  $\text{cm}^{-1}$  แนะนำว่าจะเกิดการเชื่อมโงพันธะหลังให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ และพบพีกที่บริเวณ 3300-3600  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงถึงการดูดกลืนพลังงานของหมู่ไฮดรอกซิล (-OH group) หลังจากนั้นนำยางธรรมชาติ STR20 ที่ผสมด้วยกำมะถัน 2 phr และเขม่าดำมาตรวจโครงสร้างภายในหลังให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟที่ 1000 W สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5 ซึ่งพบว่าพีกของพันธะ C=C ในยางธรรมชาติทั้งสองชนิดมีค่าลดลงหลังจากที่เติมด้วยเขม่าดำ แนะนำว่าจะมีการเชื่อมโงพันธะเกิดขึ้น



รูปที่ 5 อินฟราเรดสเปกตรัมของยางธรรมชาติ STR20 คอมเปาต์เปรียบเทียบกับยางธรรมชาติ STR20 คอมเปาต์ที่ผสมเขม่าดำหลังผ่านพลังงานไมโครเวฟ

จากนั้นเรายังยืนยันผลการตรวจดูโครงสร้างภายในของยางธรรมชาติ STR20 ที่ผสมด้วยกำมะถัน 2 phr หลังผ่านไมโครเวฟ โดยตัดส่วนด้านข้างและด้านในเพื่อนำมาทดสอบ เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟจะทะลุผ่านวัสดุและความร้อนจะเกิดจากภายในมาสู่ภายนอก ดังนั้นเราคาดว่าถ้ามีการเชื่อมโงพันธะเกิดขึ้นที่ด้านในควรมีการเชื่อมโงมากกว่าด้านนอก จากรูปที่ 6 พบว่าพีกของพันธะ C=C ในยางธรรมชาติภายในชั้นงานมีการดูดกลืนที่ 827  $\text{cm}^{-1}$  ต่ำกว่าชั้นงานที่มาจากด้านนอก แนะนำว่าจะมาจากเชื่อมโงซึ่งเกิดขึ้นภายในเนื่องจากความร้อนจากพลังงานไมโครเวฟนั้นมาจากด้านในสู่ด้านนอก โดยสามารถยืนยันด้วยกราฟวัดค่า % Crosslinking ในส่วนที่จะอธิบายต่อไป



รูปที่ 6 อินฟราเรดสเปกตรัมของยางธรรมชาติ STR20 คอมเปาต์ชั้นงานตรงกลางเปรียบเทียบกับด้านข้างหลังผ่านพลังงานไมโครเวฟ

## 2. สมบัติทางไฟฟ้า (Dielectric Properties)

การศึกษาการดูดซับพลังงานไมโครเวฟซึ่งมีการให้ความร้อนแก่ตัวอย่าง สมบัติไดอิเล็กทริกในวัสดุเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งในกระบวนการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ เพราะสมบัติไดอิเล็กทริกเป็นสมบัติที่แสดงถึงความสามารถในการดูดซับพลังงานไมโครเวฟและการผลิตพลังงานความร้อนที่เกิดจากการดูดซับพลังงานไมโครเวฟ ดังนั้นการวัดค่าสมบัติไดอิเล็กทริกในวัสดุที่ต้องการให้ความร้อนด้วยกระบวนการไมโครเวฟจึงจำเป็นต้องมี ตารางที่ 2 แสดงค่า Dielectric constant ( $\epsilon'$ ), Dielectric loss factor ( $\epsilon''$ ) และค่า Loss tangent coefficient ( $\tan \delta$ ) ของตัวอย่างยางธรรมชาติคอมเปาต์ที่ไม่ใส่เขม่าดำและยางธรรมชาติคอมเปาต์ที่ใส่เขม่าดำ 10 phr และในแต่ละสูตรมีการเปลี่ยนปริมาณกำมะถันตั้งแต่ 1.5, 2.0, 2.5 และ 3.0 phr ตามลำดับ จากการทดลองพบว่าค่า  $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$  และค่า  $\tan \delta$  ของยางธรรมชาติผสมกับกำมะถัน 2.0 phr ที่ไม่ได้เติมเขม่าดำ คือ 2.253, 0.00002 และ 0.000008 ตามลำดับ หลังจากเติมเขม่าดำลงไป 10 phr ส่งผลทำให้ค่า  $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$  และค่า  $\tan \delta$  ของยางธรรมชาติเปลี่ยนไปเป็น 3.349, 0.008 และ 0.003 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าปริมาณเขม่าดำที่เติมลงไปส่งผลทำให้เนื้อยางธรรมชาติโดยปกติจะจัดว่าเป็นวัสดุไม่มีขั้ว (non-polar materials) กลายมาเป็นวัสดุที่มีขั้วได้ (polar materials) หลังจากที่มีการเติมเขม่าดำลงไป ทำให้เกิดความร้อนขึ้นได้ ดังรายงานอื่นๆ [11-12] ทั้งนี้เนื่องจากว่าวัสดุของดังกล่าวจะดูดซับพลังงานไมโครเวฟและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนได้มากขึ้น สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อคลื่นไมโครเวฟทะลุผ่านวัสดุไดอิเล็กทริกจะถูกดูดซับและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน เรียกว่า การกำเนิดปริมาณความร้อนภายในต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (Q) ซึ่งจะสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กภายในวัสดุไดอิเล็กทริก [12] โดยค่าของการกำเนิดปริมาณความร้อนภายในต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร เมื่อสมมุติให้ไม่มีการสูญเสียสนามแม่เหล็ก แสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$Q = \omega \epsilon_0 \epsilon'' E^2$$

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

ซึ่ง Q = Density of Microwave Power Absorbed ( $\text{W/m}^3$ )

E = สนามแม่เหล็กไฟฟ้า จะเปลี่ยนแปลงตามตำแหน่ง f

f = ความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ (Hz)

$\omega$  = ความเร็วเชิงมุมของคลื่นไมโครเวฟ (rad/s)

$\epsilon_0$  =

ความสามารถของช่องว่างที่ไม่มีารดูดซับ ส่วน และสะท้อนพลังงานจากส่วนที่เป็นสนามไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟ (Dielectric Constant)

$$\tan \delta = \epsilon''/\epsilon'$$

คือความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานที่วัสดุดูดซับเป็นพลังงานความร้อน (Dielectric Loss Tangent Coefficient)

และจากตารางที่ 2 เรามีการเปลี่ยนปริมาณกำมะถันระหว่าง 1.5, 2.0, 2.5 และ 3.0 phr ในแต่ละสูตร จากการทดลองพบว่าปริมาณกำมะถันที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลทำให้ค่าสมบัติทางไดอิเล็กทริกเปลี่ยนแปลงมากนัก



ตารางที่ 2 แสดงค่า Dielectric Constant ( $\epsilon_r'$ ), Dielectric Loss Factor ( $\epsilon_r''$ )

Specimens	Dielectric Constant ( $\epsilon_r'$ )	Dielectric Loss Factor ( $\epsilon_r''$ )	Loss Tangent Coefficient ( $\tan \delta$ )
NR-S1.5	2.121	0.000010	0.000005
NR-S2.0	2.253	0.000018	0.000008
NR-S2.5	2.262	0.000005	0.000002
NR-S3.0	2.207	0.000005	0.000003
NR-S1.5-CB	3.345	0.011460	0.003435
NR-S2.0-CB	3.349	0.007504	0.003221
NR-S2.5-CB	3.417	0.016525	0.004775
NR-S3.0-CB	3.210	0.010144	0.003096

และค่า Loss Tangent Coefficient ( $\tan \delta$ ) ของยางธรรมชาติคอมเปาเวต์

**หมายเหตุ**

NR-S1.5-C หมายถึง สูตรยางธรรมชาติ (NR) ที่ผสมกำมะถัน (S) 1.5 phr และเขม่าดำ (CB) 10 phr ตามลำดับ

**3. ค่าความหนาแน่น (Density)**

จากการทดสอบสมบัติทางกายภาพ คือความหนาแน่นของยางธรรมชาติก่อนและหลังอุ่นด้วยพลังงานไมโครเวฟ 1000 วัตต์ พบว่า ความหนาแน่นของยางมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากประมาณ 0.91 g/cm<sup>3</sup> เป็น 0.95 g/cm<sup>3</sup> หลังจากเติมซัลเฟอร์และเพิ่มเป็น 0.97 g / cm<sup>3</sup> หลังจากเติมเขม่าดำ แต่ไม่พบว่าความหนาแน่นของยางเกิดการเปลี่ยนแปลงหลังอุ่นด้วยพลังงานไมโครเวฟ ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงความหนาแน่นของยางธรรมชาติก่อนและหลังอุ่นด้วยพลังงานไมโครเวฟที่ 1000 วัตต์

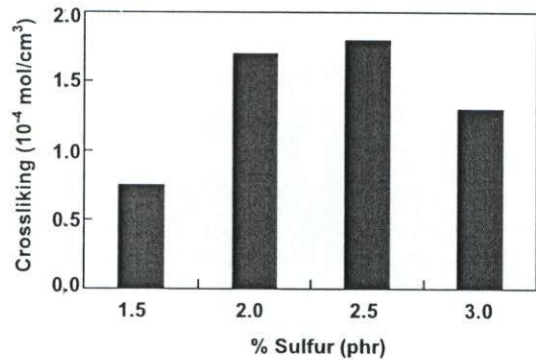
วัสดุ	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	
	ก่อนเข้าไมโครเวฟ	หลังอุ่นด้วยพลังงานไมโครเวฟ
NR	0.9088	0.9104
NR-S2.0	0.9491	0.9414
NR-S1.5-CB	0.9711	0.9732
NR-S2.0-CB	0.9713	0.9702
NR-S2.5-CB	0.9743	0.9776
NR-S3.0-CB	0.9751	0.9801

**4. ค่าเปอร์เซ็นต์การเชื่อมโยงพันธะ (%Crosslinking)**

การหาเปอร์เซ็นต์การเชื่อมโยงพันธะในยาง กระทำได้โดยนำยางคอมเปาเวต์ที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟมาละลายในสารละลายโทลูอีน จากการทดสอบยางธรรมชาติ พบว่าผลการเชื่อมโยงพันธะมีค่าใกล้เคียงกันมากโดยนำเสนอรูปกราฟของยางธรรมชาติคอมเปาเวต์ที่เติมกำมะถันไป 1.5, 2.0, 2.5 และ 3.0 phr ตามลำดับที่ความหนา 3 cm ใช้ผ่านพลังงานไมโครเวฟที่กำลังวัตต์เป็น 1000 วัตต์ ดังแสดงในรูปที่ 7 จากรูปพบว่าเมื่อปริมาณกำมะถันเปลี่ยนแปลง %Crosslinking ที่ได้จะเปลี่ยนไปด้วยดังนี้คือ จาก 0 เป็น 0.8, 1.6, 1.8 และ 1.3 mol/cm<sup>3</sup> ตามลำดับ ในกรณีที่เติมกำมะถันลงไป 3.0 phr แต่ค่า %Crosslinking กลับลดลงเล็กน้อย สาเหตุอาจเกิดมาจากการผิดพลาดในการทดสอบ ดังนั้นควรมีการ

ทดสอบเพิ่มเติม การเกิดการเชื่อมโยงสูงซึ่งส่งผลให้ยางธรรมชาติที่มีความแข็งแรงมากขึ้น

ปกติโครงสร้างของยางธรรมชาติที่ยังไม่เติมสารเคมีจะมีพันธะคู่อยู่ซึ่งมีความอ่อนไหวในการเกิดปฏิกิริยา เมื่อเติมกำมะถันเข้าไปร่วมกับการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟจึงเกิดการแตกพันธะคู่ออกกลายเป็นพันธะเดี่ยวซึ่งมีความอึดหยุ่นมากกว่า เราสามารถตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีได้โดยเทคนิคอินฟราเรด ของยางธรรมชาติก่อนและหลังอุ่นด้วยพลังงานไมโครเวฟที่ผ่านมาข้างต้น จากสเปกตรัมพบว่าพีคที่ความยาวคลื่น 836 cm<sup>-1</sup> ซึ่งแสดงถึงพันธะ C=C ของหมู่ไอโซพรีนลดลง และพบพีคใหม่เกิดขึ้นที่ 1596 cm<sup>-1</sup> ในอินฟราเรดสเปกตราของยางคอมพาวด์ที่ผ่านพลังงานไมโครเวฟดังรายละเอียดที่กล่าวมาแล้วข้างต้น แสดงว่าการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟสามารถทำให้เกิดการเชื่อมโยงทางพันธะได้ เหมือนกับการใช้ความร้อนแบบธรรมดาในการอุ่นยาง



รูปที่ 12 แสดงเปอร์เซ็นต์การเชื่อมโยงพันธะของยางธรรมชาติคอมเปาเวต์ที่เติมเขม่าดำลงไป 10 phr

**5. ผลของ non-rubber ที่มีในเนื้อยางหลังอุ่นด้วยพลังงานไมโครเวฟ**

ผลของ non-rubber ในรูปถั่วที่มีในเนื้อยางหลังอุ่นด้วยพลังงานไมโครเวฟสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4 จากผลการทดลองดังกล่าวพบว่าปริมาณถั่วที่มีในยาง NR, NR-S1.5-CB, NR-S2.0-CB, NR-S2.5-CB and NR-S3.0-CB มีค่าเท่ากับ 0.17% , 0.18%, 0.60%, 0.61%, 0.59% และ 0.62% ตามลำดับ หลังจากอุ่นด้วยไมโครเวฟไม่พบการเปลี่ยนแปลงของปริมาณถั่วในเนื้อยางดังแสดงค่าในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 แสดงปริมาณถั่วที่มีอยู่ในเนื้อยางก่อนและหลังอุ่นด้วยพลังงานไมโครเวฟ 1000 วัตต์

วัสดุ	ปริมาณถั่ว (%wt)	
	ก่อนเข้าไมโครเวฟ	หลังอุ่นด้วยพลังงานไมโครเวฟ
NR	0.17%	0.16%
NR-S2.0	0.18%	0.18%
NR-S1.5-CB	0.60%	0.61%
NR-S2.0-CB	0.61%	0.63%
NR-S2.5-CB	0.59%	0.61%
NR-S3.0-CB	0.62%	0.62%

**สรุป (Conclusion)**

จากการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. โครงสร้างของยางธรรมชาติที่ศึกษานี้ ไม่พบพีคที่บ่งถึงปฏิกิริยาเคมีหรือโครงสร้างที่ถูกทำลายที่เกิดอันเนื่องจากการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ แต่พบพีคที่ 1596 cm<sup>-1</sup> หลังจากอุ่นด้วยไมโครเวฟซึ่งสันนิษฐานว่าเป็นจุดเชื่อมโยงพันธะที่เกิดขึ้น



2. สมบัติทางไฟฟ้าของยางธรรมชาติเมื่อปริมาณกำมะถันเปลี่ยนจาก 1.5, 2.0, 2.5 และ 3.0 phr ไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก แต่พบการเปลี่ยนแปลงมากเมื่อมีการเติมเคมีค่าลงไปเพียง 10 phr ทำให้ค่า  $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$  และค่า  $\tan \delta$  ของยางธรรมชาติที่ไม่ได้เติมเคมีค่า คือ 2.121, 0.000007 และ 0.000004 เปลี่ยนไปเป็น 3.3, 0.01 และ 0.003 ตามลำดับหลังเติมเคมีค่า

3. ความหนาแน่นของยางธรรมชาติเพิ่มขึ้นจากประมาณ 0.91 g/cm<sup>3</sup> เป็น 0.97 g/cm<sup>3</sup> หลังจากเติมซัลเฟอร์และเคมีค่า แต่ไม่เปลี่ยนแปลงหลังอุ่นด้วยไมโครเวฟ

4. หลังการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟแก่ชิ้นงานยางธรรมชาติที่มีความหนา 3 cm สามารถทำให้ยางเกิดการเชื่อมโยงพันธะได้ โดยเปลี่ยนจาก 0 mol/cm<sup>3</sup> เป็น 0.8, 1.6, 1.8 และ 1.3 mol/cm<sup>3</sup> เมื่อให้พลังงานไมโครเวฟที่ 1000 W ที่มีปริมาณกำมะถันเป็น 1.5, 2.0, 2.5 และ 3.0 phr ตามลำดับ

5. ปริมาณเถ้าหรือสารที่ไม่ใช่เนื้อยางในยางธรรมชาติเพิ่มขึ้นจาก 0.17% เป็น 0.60% เมื่อเติมเคมีค่าลงไป 10 phr และไม่พบการเปลี่ยนแปลงเมื่อเพิ่มปริมาณกำมะถันหลังจากนำยางดังกล่าวไปอุ่นด้วยไมโครเวฟปริมาณเถ้าที่ได้พบว่าปริมาณไม่เปลี่ยนแปลง

#### คำขอบคุณ (Acknowledgements)

ผู้แต่งขอขอบคุณโครงการวิจัยของพาราขนาดเล็ก (SPR) ประจำปี พ.ศ. 2549 สำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย (สกว.) ที่ให้ทุนสนับสนุนตลอดการวิจัย (รหัสโครงการ RDG4950023) และ รศ.ดร.ศุภศักดิ์ รัตนเดโช มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการทดสอบเครื่องไมโครเวฟ

#### เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] Billmeyer, F. W. JR. Textbook of Polymer Science, second edition, John Wiley and Son, Inc. New York, 1971.
- [2] Hofmann, W. Rubber Technology Handbook, Hanser Publishers, Munich Vienna New York, Oxford University Press, New York and Canada, 1989
- [3] Cheremisinoff, N.P. Elastomer Technology Handbook, CRC Press, Inc. USA, 1993.
- [4] Roberts, A.D. Natural Rubber Science and technology. Brickendonbury. Oxford University, 1988.
- [5] ศุภศักดิ์ รัตนเดโช, ดวงเดือน อัจจงศักดิ์, ณัฐภูมิ สุวรรณภูมิ, สมศักดิ์ วงษ์ประดับไชย และสุชนม์ ปิยะโชติ "การวิเคราะห์กระบวนการให้ความร้อนในวัสดุไดอิเล็กตริกโดยใช้เตาไมโครเวฟชนิดสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่อง" การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 18(ME-NETT 18) จังหวัดขอนแก่น 20-18 ตุลาคม 2547
- [6] รัชดา โสภาคะยัง การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 2548, 1ชลบุรี
- [7] ณัฐพงศ์ นธิอุทัย และคณย์ภพ นั้ววิเชียร หนังสืองานวิจัยของพาราเพื่ออนาคตที่ยั่งยืน สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) (ปี 2549)
- [8] Spering, L.H. Introduction to Physical Polymer Science, 4<sup>th</sup> ed., John Wiley and Son Inc. USA, 1932.
- [9] Allen, T.C., Bryan, B., and James, L., Characterization of Polymer-Filler Interface in  $\gamma$  Irradiated Silica-Reinforced Polysiloxane Composites. Materials Research Society, 629, 1996.
- [10] Brandrup, J., and Immergut, E.H., Polymer handbook. 3<sup>rd</sup> ed., A WILEY-INTERSCIENCE publication. USA, 1989.
- [11] Metaxas, A.C., Meredith, R.J. Industrial Microwave Heating. Peter Peregrinus, Ltd. London, 1983.

- [12] Peter, A. C., Hewitt, N. The Rubber Formulary, Noyes Publications, Norwich New York, USA, 1999.