

การศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนจากสมบัติไดอิเล็กตริกของยางธรรมชาติคอมพาวด์ใน
กระบวนการวัลคาไนเซชันด้วยไมโครเวฟ

Study of Heat Transport Phenomena from Dielectric Properties of Natural
Rubber Compound in Microwave Vulcanization Process

ณัฐวุฒิ สุวรรณภูมิ¹* ปัญญา รอดอยู่¹, สุริยา เนียมแก้ว¹ และ อังค์กฤษณ์ วิยะชัยภัทร¹

¹ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี (ศาลายา)
96 หมู่ 3 ถนนพหลโยธินสาย 5 ตำบลศาลายา อำเภอพุทธมณฑล จังหวัดนครปฐม 73170

*ติดต่อ: E-mail : nattawut.suw@rmutr.ac.th, fitvan@gmail.com, เบอร์โทรศัพท์ : 02-889-4585-7 ต่อ 2675

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนจากสมบัติไดอิเล็กตริกของยางธรรมชาติคอมพาวด์ในการกระบวนการวัลคาไนเซชันด้วยพลังงานไมโครเวฟความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ (GHz) โดยทำการวิเคราะห์สมบัติไดอิเล็กตริกของยางธรรมชาติในแต่ละช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 25 จนถึง 150 องศาเซลเซียส เพื่อพฤติกรรมความสามารถในการดูดซับพลังงานและแปรเปลี่ยนเป็นความร้อนในยางธรรมชาติคอมพาวด์ เปรียบเทียบกับกระบวนการทดลองทางความร้อนที่เกิดขึ้นในเครื่องไมโครเวฟแบบทีอี 10 โหมด ที่กำลังไมโครเวฟ 10, 50 และ 800 วัตต์ ความหนาชิ้นงาน 3, 5 และ 8 เซนติเมตร และสังเกตพฤติกรรมทางความร้อนที่เกิดขึ้น จากผลการศึกษาพบว่าช่วงอุณหภูมิของยางธรรมชาติคอมพาวด์มีผลต่อสมบัติไดอิเล็กตริกอย่างมีนัยสำคัญ และส่งผลกระทบโดยตรงต่อการดูดซับพลังงานไมโครเวฟและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน ซึ่งผลการศึกษาดังกล่าวจำเป็นต่อการศึกษาและออกแบบระบบทางความร้อนด้วยไมโครเวฟในกระบวนการวัลคาไนเซชันยางธรรมชาติคอมพาวด์

คำหลัก: ไมโครเวฟ, การถ่ายเทความร้อน, สมบัติไดอิเล็กตริก, การวัลคาไนเซชัน, ยางธรรมชาติคอมพาวด์

Abstract

The presented paper investigated heat transport phenomena in microwave vulcanization process of natural rubber compound at an operating frequency of 2.45 GHz. Dielectric properties of natural rubber compound was studied in range of 25-150 Celsius degree to investigate microwave power absorb inside material in each temperature. The result was compared with experimental result in TE₁₀ mode microwave cavity at power range of 10, 50 and 800 Watts and 3, 5, and 8 sample size thicknesses. The results showed that the effect of temperature function of dielectric properties was important roles on thermal distribution in microwave vulcanization of natural rubber compound.

Keywords: Microwave, Heat Transport, Dielectric Properties, Vulcanization, Natural Rubber Compound.

1. บทนำ

ในอดีตที่ผ่านมา มีงานวิจัยและการประยุกต์ใช้พลังงานทางเลือกอย่างไมโครเวฟเป็นแหล่งกำเนิดพลังงานความร้อนหลากหลายประเภท เนื่องจากความได้เปรียบของการกระจายตัวทางความร้อนจากพลังงานไมโครเวฟที่สามารถทำให้เกิดความร้อนจากภายในวัสดุได้ โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อพฤติกรรมดังกล่าวได้แก่ โครงสร้างและรูปทรงของวัสดุกำลังและการกระจายตัวของสนามไมโครเวฟ (power level and microwave field distribution) รวมทั้งสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุ (dielectric properties) ซึ่งรายละเอียดที่กล่าวมาข้างต้นปรากฏอยู่ในเอกสารอ้างอิงของ Mujumdar [1] Metaxas [2] และ Schubert and Rogier [3] ซึ่งเป็นต้นแบบของงานวิจัยเทคนิคกระบวนการสร้างความร้อนจากพลังงานไมโครเวฟ

ในประเทศไทยยางธรรมชาติมีบทบาทสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศ เพราะประเทศไทยเป็นประเทศที่มีการผลิตและส่งออกยางธรรมชาติมากที่สุดในโลก โดยในแต่ละปีประเทศไทยส่งออกยางดิบและผลิตภัณฑ์ยางรวมมีมูลค่าเกิน 100,000 ล้านบาท แต่โดยส่วนมากยังคงส่งออกในรูปแบบวัตถุดิบ เพราะการขาดแคลนบุคลากรที่มีความรู้พื้นฐานทางด้านเทคโนโลยียาง ทำให้ไม่มีการปรับปรุงกระบวนการผลิต รวมทั้งขาดการทำวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ๆ เพื่อตอบสนองความต้องการของตลาดในกลุ่มเป้าหมาย [4] สำหรับเทคโนโลยีทางความร้อนที่สามารถนำมาใช้งานเกี่ยวข้องกับยางธรรมชาตินั้นมีหลายได้หลายส่วนตั้งแต่กระบวนการต้นน้ำ เช่น กระบวนการอบไล่ความชื้นในการทำยางแผ่นดิบรมควัน จนกระทั่งกระบวนการปลายน้ำในการคงรูปยาง (vulcanization) เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ยางมีสมบัติเชิงกลที่เหมาะสมกับการใช้งาน สำหรับตัวอย่างผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติที่พบได้ในชีวิตประจำวัน เช่น ยางรถยนต์ ยางพื้นรองเท้า ยางรัดของ ถุงมือยาง ท่อยาง เป็นต้น

หากกล่าวถึงกระบวนการคงรูปยางธรรมชาติ (vulcanization) ในการทำผลิตภัณฑ์ยางนั้น จะเป็นวิธีการนำยางธรรมชาติมาผสมกับสารเคมีต่างๆ เรียกว่า ยางคอมพาวด์ และนำยางคอมพาวด์ที่ผสมได้ไปผ่านกระบวนการคงรูป (vulcanization) ด้วยความร้อน (heating) เพื่อปรับสมบัติให้ได้ตามความเหมาะสมกับสภาพการใช้งานของผลิตภัณฑ์นั้นๆ โดยยางคอมพาวด์จะเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุลเกิดเป็น

โครงสร้างตาข่าย 3 มิติ (3-D network) ทำให้ยางที่ผ่านกระบวนการดังกล่าวมีสมบัติเชิงกลที่เสถียรและทนต่อการเสื่อมสภาพสำหรับกระบวนการทางความร้อน โดยทั่วไปในการคงรูปยางคอมพาวด์จะเป็นการให้ความร้อนโดยวิธีธรรมดา (conventional heating method) ซึ่งมีการป้อนความร้อนที่ผิวหน้าชิ้นงาน บางครั้งอาจเกิดปัญหากับชิ้นงานที่มีความหนาแน่นมาก เนื่องจากต้องใช้เวลานานในการทำให้ชิ้นงานได้รับความร้อนทั่วถึงนานซึ่งสิ้นเปลืองพลังงานสูงมาก

จากที่กล่าวมาข้างต้นจึงมีการพยายามพัฒนาการใช้พลังงานไมโครเวฟเป็นแหล่งพลังงานความร้อนในกระบวนการปรับปรุงคุณภาพยางธรรมชาติ เพราะไมโครเวฟมีข้อได้เปรียบตรงที่เป็นการให้ความร้อนเชิงปริมาตรภายในวัสดุส่งผลให้วัตถุเกิดความร้อนที่ภายในอย่างรวดเร็วทำให้มีประสิทธิภาพทางความร้อนสูงและใช้ระยะเวลาในการทำความร้อนสั้นที่ผ่านมามีการศึกษาเกี่ยวกับการนำพลังงานไมโครเวฟมาแตกพันธะเคมีของเศษยางวัลคาไนซ์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ [5] ใช้เตาอบไมโครเวฟกับยางรีไซเคิลเพื่อเป็นวัตถุดิบนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป [6] หรือการนำคลื่นไมโครเวฟมาใช้ในการศึกษาสมบัติไดอิเล็กตริกของยางธรรมชาติก่อนและหลังวัลคาไนซ์ [7] การเปรียบเทียบสมบัติไดอิเล็กตริกยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่มีเขม่าดำและไม่มีเขม่าดำ [8] รวมถึงการอุ่นยางธรรมชาติคอมพาวด์ด้วยไมโครเวฟ ([8] และ [9])

จากงานวิจัยที่ศึกษามาข้างต้นพบโดยภาพรวมว่าไมโครเวฟสามารถนำมาอุ่นยางธรรมชาติคอมพาวด์ได้ และเกิดความร้อนได้ดีหากยางคอมพาวด์มีการผสมเขม่าดำเป็นส่วนประกอบ แต่การใช้ไมโครเวฟทำความร้อนยังไม่เหมาะสมสำหรับกระบวนการคงรูปยาง เพราะแม้ว่าวัสดุมีอุณหภูมิภายในที่ผ่านกระบวนการมีค่าสูงถึงอุณหภูมิคงรูปแล้ว แต่อุณหภูมิภายนอกกลับมีค่าต่ำที่แตกต่างกันมาก และหากต้องการให้มีอุณหภูมิภายนอกสูงขึ้น อุณหภูมิในวัสดุจะมีค่าสูงส่งผลเสียต่อสมบัติยางคอมพาวด์ รวมถึงพบว่าสมบัติไดอิเล็กตริกของยางธรรมชาติก่อนและหลังผ่านกระบวนการคงรูปจะมีค่าแตกต่างกัน ซึ่งค่าดังกล่าวนี้ส่งผลโดยตรงต่อการทะลุทะลวงของคลื่นและเกิดความร้อนในวัสดุ

อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่ผ่านมา ยังไม่ได้อธิบายการเปลี่ยนแปลงของสมบัติไดอิเล็กตริกและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในยางธรรมชาติคอมพาวด์เมื่อรับพลังงาน

ไมโครเวฟอย่างเป็นระบบ ส่งผลให้ไม่สามารถทำนายพฤติกรรมแท้จริงได้

สำหรับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยชิ้นนี้คือศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนจากสมบัติไดอิเล็กตริกของยางธรรมชาติคอมพาวด์ในการกระบวนการวัลคาไนเซชันด้วยพลังงานไมโครเวฟความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ต (GHz) โดยทำการวิเคราะห์สมบัติไดอิเล็กตริกของยางธรรมชาติในแต่ละช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 25 จนถึง 150 องศาเซลเซียส ต่อพฤติกรรมความสามารถในการดูดซับพลังงานและแปรเปลี่ยนเป็นความร้อนในยางธรรมชาติคอมพาวด์เปรียบเทียบกับกระบวนการทดลองทางความร้อนที่เกิดขึ้นในเครื่องไมโครเวฟแบบที่ 10 โหมด ที่กำลังไมโครเวฟ 10 – 50 วัตต์ ความหนาชิ้นงาน 3, 5 และ 8 เซนติเมตร และสังเกตพฤติกรรมทางความร้อนที่เกิดขึ้นจากผลการศึกษาพบว่าช่วงอุณหภูมิของยางธรรมชาติคอมพาวด์มีผลต่อสมบัติไดอิเล็กตริกอย่างมีนัยสำคัญและส่งผลกระทบต่อตรงต่อการดูดซับพลังงานไมโครเวฟและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน

2. ทฤษฎีพื้นฐาน

2.1 ยางคอมพาวด์

ยางคอมพาวด์เกิดจากการผสมกันของยางธรรมชาติซึ่งเป็นสารประกอบในกลุ่มพอลิเมอร์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ ประกอบด้วยหน่วยย่อยชนิดเดียว มีสมบัติที่สำคัญคือความยืดหยุ่น โครงสร้างทางเคมีของหน่วยย่อยของยางธรรมชาติประกอบด้วยคาร์บอน 5 อะตอม และไฮโดรเจน 8 อะตอม (C_5H_8) มีชื่อทางเคมีว่า ไอโซพรีน (isoprene) ร่วมกับสารเคมีชนิดต่างๆ เพื่อใช้ปรับปรุงให้มีสมบัติทางกลตามที่ต้องการ โดยสัดส่วนยางและสารเคมีขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ชนิดและประสิทธิภาพของสารเคมี กระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เป็นต้นสำหรับตัวอย่างสูตรผลิตภัณฑ์ยางพื้นฐานแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ส่วนประกอบและปริมาณของยางและสารเคมีต่างๆ ในสูตรผลิตภัณฑ์ยางพื้นฐาน [10]

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (phr)
ยาง (ชนิดเดียว หรือ 2 ชนิดขึ้นไป) (rubber)	100
กำมะถัน (sulphur)	2.5-3.5
สารกระตุ้น (activator)	1-5
สารเร่งให้ยางคงรูป (accelerator)	0.5-2.0
สารตัวเติม (filler)	(ตามที่ต้องการ)
สารทำให้ยางนิ่ม (plasticizer, peptizer)	5-10
สารป้องกันยางเสื่อมสภาพ (antidegradant)	1-2

2.2 พฤติกรรมระหว่างไมโครเวฟและวัสดุไดอิเล็กตริก

กรรมวิธีไมโครเวฟเป็นการให้ความร้อนเชิงปริมาตร (volumetric heating) โดยพฤติกรรมทางความร้อนในวัสดุจะขึ้นกับสมบัติไดอิเล็กตริก เพราะสมบัตินี้ส่งผลต่อการดูดซับและการกระจายตัวของพลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนความสามารถในการดูดซับพลังงานไมโครเวฟของวัสดุไดอิเล็กตริก โดยทั่วไปสมบัติไดอิเล็กตริกมีค่าเปลี่ยนแปลงตามอิทธิพลดังต่อไปนี้ ได้แก่ ชนิดวัสดุ ความถี่ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า อุณหภูมิของวัสดุ และความชื้นในวัสดุ สำหรับในกรณียางธรรมชาติคอมพาวด์ที่ศึกษาเกี่ยวกับคลื่นไมโครเวฟที่ความถี่ 2.45 GHz สามารถเขียนความสัมพันธ์ของสมบัติไดอิเล็กตริกที่ขึ้นกับอุณหภูมิ (T) ได้ดังนี้ [11]

$$\varepsilon(T) = \varepsilon'(T) + j\varepsilon''(T) \quad (1)$$

เมื่อ $j = \sqrt{-1}$, ε คือ สมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุ (complex dielectric permittivity) ที่อธิบายถึงความสามารถในการดูดซับ ส่งผ่าน และสะท้อนพลังงานที่เป็นสนามไฟฟ้าของวัสดุ ε' ใช้อธิบายความสามารถในการส่งผ่าน และสะท้อนกลับของคลื่นไมโครเวฟในวัสดุ ε'' ใช้อธิบายการสูญเสียพลังงานของคลื่นไมโครเวฟเมื่อผ่านวัสดุ

และในการวิเคราะห์ทางความร้อนในวัสดุไดอิเล็กตริก โดยปกติหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการนำไฟฟ้า (สัมพันธ์กับความถี่สนามแม่เหล็กไฟฟ้าและสมบัติไดอิเล็กตริก) และกำลังสองของความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเกิดเป็นพลังงานความร้อนเชิงปริมาตร (Q (W/m³)) คือ [12]

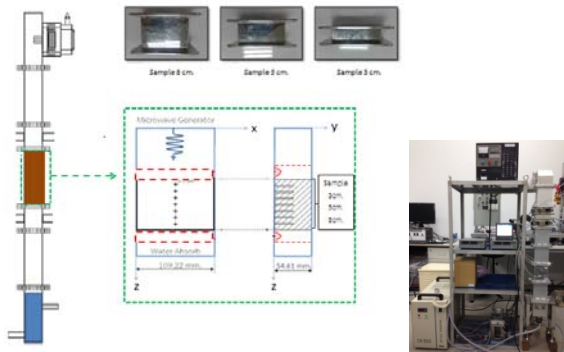
$$Q = \sigma |E|^2 = 2\pi \cdot f \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon'' \left(\frac{\varepsilon'}{\varepsilon''} \right) E^2 \quad (2)$$

เมื่อ σ คือ สัมประสิทธิ์การนำไฟฟ้า
 f คือ ความถี่ (เฮิร์ต (Hz))
 ε_0 คือ สมบัติการซึมผ่านในที่ว่าง (8.86×10⁻¹² F/m)
 E คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า

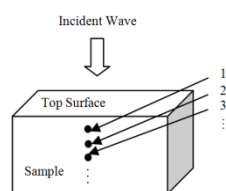
3. เปรียบวิธีทดลอง

ระบบไมโครเวฟที่ใช้สำหรับงานวิจัยชิ้นนี้เป็นระบบไมโครเวฟระบบไมโครเวฟควาิตี้ที่ทนทานคลื่นแบบสี่เหลี่ยมโหมด ทีอี 10 วัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการจะถูก

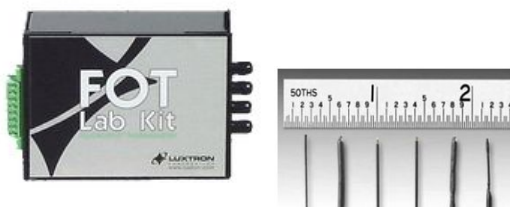
ใส่ไว้ในบริเวณตำแหน่งวางชิ้นงานภายในควิตี้แบบสี่เหลี่ยม (rectangular cavity) ที่มีขนาดหน้าตัดตลอดท่อเท่ากับ 55×110 มิลลิเมตร² ซึ่งด้านบนของท่อนำคลื่นจะติดตั้งแมกนีตรอน (magnetron) ความถี่ 2.45 กิโลเฮิร์ต (GHz) กำลังปรับค่าได้ตั้งแต่ 0-1500 วัตต์ (Micro Denshi Co., model UM-1500CS-A) ไว้จำนวน 1 ตัว เพื่อกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ สำหรับการวัดอุณหภูมิวัสดุทดสอบอย่างธรรมชาติคอมพิวเตอร์ขณะอยู่ภายใต้คลื่นไมโครเวฟนั้นวัดด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิแบบไฟเบอร์ออปติก (LUXTRON FOT lab kit) โดยรับสัญญาณผ่านสายไฟเบอร์ออปติกและแปลงค่าเป็นอุณหภูมิ (รูปที่ 2) โดยมีตำแหน่งการวัดอุณหภูมิในจุดกึ่งกลางภายในวัสดุตำแหน่งต่างๆ (รูปที่ 3)



รูปที่ 1 ระบบไมโครเวฟควิตี้ท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม
โหมด ทีอี 10

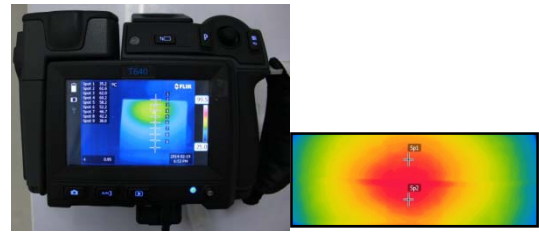


รูปที่ 2 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิบนผิวบนลงผิวล่าง
(T1, T2, T3,...)



รูปที่ 3 อุปกรณ์สำหรับบันทึกอุณหภูมิ

นอกจากนั้นได้ทำการวัดลักษณะการกระจายตัวอุณหภูมิเพื่อแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมอุณหภูมิในวัสดุอย่างคอมพิวเตอร์อีกครั้งด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนของ FLIR โมเดล T640 (รูปที่ 4)



(ก)

(ข)

รูปที่ 4 กล้องถ่ายภาพความร้อน ของ FLIR โมเดล T640

(ก) ตัวกล้องถ่ายภาพความร้อน

(ข) ภาพถ่ายและรายละเอียดที่ได้จากกล้อง

สำหรับกำลังไมโครเวฟที่ใช้ในการศึกษานั้นเลือก 3 ค่าทดสอบคือ 10, 50 และ 800 วัตต์ และเงื่อนไขการหยุดทดสอบเมื่ออุณหภูมิของยางที่วัดได้จากไฟเบอร์ออปติกมี ณ จุดใดจุดหนึ่งมีค่า 150 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิค่าดังกล่าวเป็นอุณหภูมิที่อาจเกิดการวัลคาไนซ์หรือคงรูป

สำหรับยางธรรมชาติคอมพิวเตอร์ที่นำมาทดสอบเป็นยางคอมพิวเตอร์วัดอุณหภูมิสำหรับขึ้นรูปดอกยางรถบรรทุกซึ่งมีส่วนผสมของยางธรรมชาติ เขม่าดำ และสารเคมีอื่นๆ โดยได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทห้างหุ้นส่วนร่วมไทรรัดดอกยางจำกัด ในการทดสอบ (บริษัทฯ ไม่เผยแพร่ส่วนผสมให้) นำมาตัดเข้ารูปเป็นชิ้นงานทดสอบหนา 3, 5 และ 8 เซนติเมตร ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ขนาดยางคอมพิวเตอร์

ในการวัดสมบัติไดอิเล็กตริกของยางคอมพิวเตอร์ที่ความถี่ 2.45 GHz สามารถวัดได้โดยเครื่องเน็ตเวิร์คอนาไลเซอร์ Agilent Technologies รุ่น E5071C (รูปที่ 6) โดยทำการวัดเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิด้วยการนำยางคอมพิวเตอร์ความหนา 1.5 เซนติเมตร ไปให้ความร้อนในเตาอบและนำออกมาวัดที่อุณหภูมิช่วง 25 ถึง 150 องศาเซลเซียส



รูปที่ 6 เครื่องเน็ตเวิร์คออนไลน์เซอร์

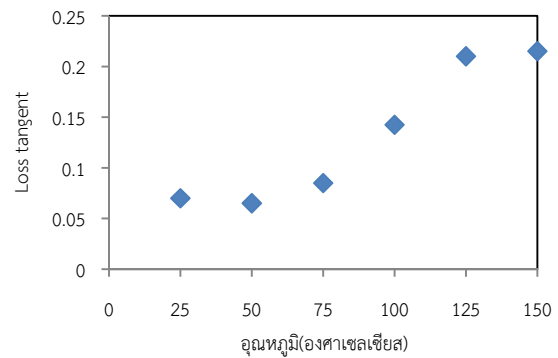
4. ผลการทดลองและการวิจารณ์ผล

จากงานวิจัยของ Doo-ngam และคณะ [8] พบว่า ยางธรรมชาติที่มีสมบัติที่ไม่เป็นสภาพแข็งหรือไดอิเล็กตริก เมื่อนำมาผ่านคลื่นไมโครเวฟจะเกิดความร้อนน้อยมาก แต่หากนำยางธรรมชาติมาผสมสารเติมแต่งเพื่อปรับสมบัติเชิงกลจะสามารถทำให้ยางธรรมชาติมีสภาพแข็งขึ้นได้ หากสารเติมแต่งนั้นมีสภาพแข็ง ซึ่งผลการทดลองวัดสมบัติไดอิเล็กตริกของยางคอมพาวด์สำหรับผลิตดอกยางรถบรรทุกที่อุณหภูมิต่างๆ ตั้งแต่ 25-150 องศาเซลเซียส พบว่าค่าสมบัติไดอิเล็กตริกของยางคอมพาวด์ชนิดนี้มีความสามารถในการดูดซับพลังงานไมโครเวฟแปรเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนได้ดี (ค่าลอสมแทนเจนท์หรือค่าที่เปลี่ยนการดูดซับพลังงานคลื่นและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนได้จากความสัมพันธ์คือ $\tan \delta = \epsilon''/\epsilon'$) เพราะมีส่วนประกอบของเขม่าดำ (Carbon black) เพื่อเสริมความแข็งแรงให้กับยางคอมพาวด์อยู่ด้วย ซึ่งเขม่าดำนั้นเป็นวัสดุที่มีความเป็นสภาพแข็งสูงจึงทำให้เกิดความร้อนขึ้นเมื่อคลื่นไมโครเวฟทะลุผ่าน นอกจากนั้นพบว่าค่าสมบัติไดอิเล็กตริกยังมีการเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิด้วย (ดังตารางที่ 2 และรูปที่ 7) กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าไดอิเล็กตริกของยางคอมพาวด์ก็จะเพิ่มขึ้นด้วย มีผลทำให้ยางคอมพาวด์มีความสามารถในการดูดซับพลังงานไมโครเวฟแปรเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนนั้นเพิ่มขึ้นตามด้วย

และเมื่อพิจารณารูปที่ 7 ให้ละเอียดขึ้นพบว่า ความสามารถในการผลิตความร้อนจากสมบัติไดอิเล็กตริกในยางคอมพาวด์มีค่าความชันเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิของยางเข้าใกล้ 80-100 องศาเซลเซียส ซึ่งอาจทำนายได้ว่าเมื่อยางคอมพาวด์มีอุณหภูมิเข้าใกล้ค่าดังกล่าวจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว

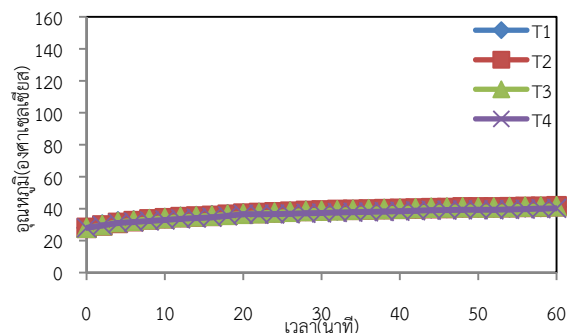
ตารางที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติไดอิเล็กตริกกับอุณหภูมิต่างๆของยางคอมพาวด์

Temperature (°C)	Dielectric constant (ϵ')	Dielectric loss factor (ϵ'')	Loss tangent ($\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'}$)
25	10.51	0.71	0.067
50	8.89	0.59	0.066
75	9.63	0.83	0.086
100	10.62	1.52	0.143
125	12.58	2.65	0.21
150	13.54	2.89	0.213

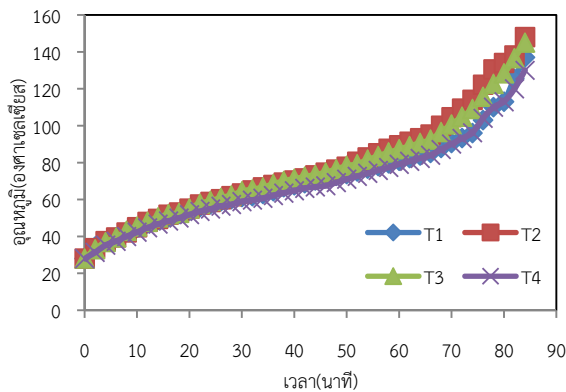


รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอสมแทนเจนท์กับอุณหภูมิแตกต่างกันของยางคอมพาวด์

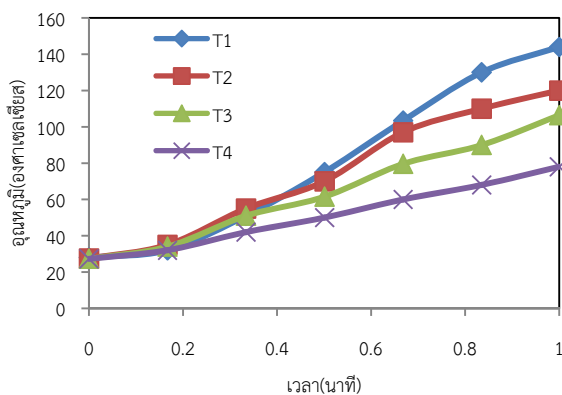
เมื่อนำยางคอมพาวด์ดังกล่าวมาผ่านการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟที่กำลังไมโครเวฟ 10, 50 และ 800 วัตต์ พบว่าหากใช้กำลังไมโครเวฟที่ต่ำเช่นกำลังงาน 10 วัตต์ (ดังแสดงในรูปที่ 8) วัสดุมีการเพิ่มอุณหภูมิด้วยความชันเล็กน้อยในช่วง 30 นาทีแรก และหลังจากนั้นจะเข้าสู่สภาวะคงตัวของอุณหภูมิ ที่ประมาณ 40 องศาเซลเซียส (จึงหยุดการทดลองที่เวลา 60 นาที) เนื่องจากพลังงานในการผลิตความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟน้อยเพราะความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าต่ำ (ตามสมการที่ (2)) รวมถึงสมบัติไดอิเล็กตริกช่วงอุณหภูมิดังกล่าวยังไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ (รูปที่ 7) นอกจากนั้นในกรณีนี้พบว่ายังมีค่าอุณหภูมิที่ความหนาในระดับต่างๆ ที่ไม่แตกต่างกันมากนัก ณ เวลาเท่าๆ กัน โดยมีอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นถึงการอิทธิพลกำลังไมโครเวฟช่วยให้ความร้อนเชิงปริมาตรอย่างสม่ำเสมอในวัสดุ



รูปที่ 8 ยางคอมพาวด์ กำลังไมโครเวฟ 10 วัตต์ ความหนา 5 เซนติเมตร



รูปที่ 9 ยางคอมพาวด์ กำลังไมโครเวฟ 50 วัตต์
ความหนา 5 เซนติเมตร



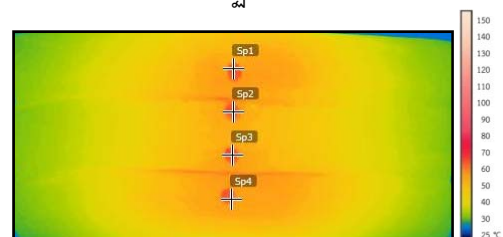
รูปที่ 10 ยางคอมพาวด์ กำลังไมโครเวฟ 800 วัตต์
ความหนา 5 เซนติเมตร

เมื่อใช้กำลังไมโครเวฟเพิ่มมากขึ้นเป็น 50 วัตต์ (ดังแสดงในรูปที่ 9) พบว่ามีลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ความหนาต่างๆ ใกล้เคียงกัน ณ เวลาเดียวกัน ซึ่งสอดคล้องกับกรณี 10 วัตต์ สำหรับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นนั้นพบว่าในช่วงแรกๆ (0-50 นาที) จะคล้ายกับกรณี 10 วัตต์ แต่มีความชันของอุณหภูมิสูงกว่า ซึ่งด้วยกำลังที่สูงขึ้นส่งผลให้สามารถผลิตความร้อนได้มากขึ้น (อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 30 เป็น 80 องศาเซลเซียส) แต่หลังจาก 50 นาทีไปแล้วสามารถสังเกตจากรูปได้ชัดเจนว่าเมื่ออุณหภูมิของวัสดุเข้าใกล้ 80-100 องศาเซลเซียส จะมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (ค่าความชันเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง) ซึ่งเป็นผลมาจากวัสดุยางธรรมชาติคอมพาวด์มีค่าสมบัติไดอิเล็กตริกสูงขึ้นเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้นดังที่ได้อธิบายแล้วในรูปที่ 7 ส่งผลให้ช่วงเวลาการเพิ่มอุณหภูมิจาก 80-150 องศาเซลเซียสใช้เวลาเพียง 30 นาที ซึ่งใช้เวลาแตกต่างกับช่วงแรกอย่างเห็นได้ชัด และจากรูปที่ 9 หากเพิ่มเวลา

ทดลองอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนอาจทำให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างได้ อาทิเช่น เกิดฟองก๊าซ และการไหม้ของชิ้นงาน เป็นต้น

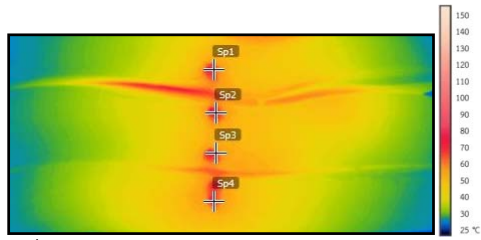
เมื่อลองทดสอบด้วยการใช้กำลังไมโครเวฟสูงๆ ที่ 800 วัตต์ (ดังแสดงในรูปที่ 10) พบว่าวัสดุสามารถเพิ่มอุณหภูมิถึง 150 องศาเซลเซียสได้ภายในเวลา 1 นาที เนื่องจากมีความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสูง (ดังสมการที่ (2)) และมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่มีลักษณะคล้ายกับกรณีไมโครเวฟกำลัง 50 วัตต์ ที่สามารถแบ่งช่วงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีการเพิ่มความชันขึ้นที่อุณหภูมิ 80-100 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามแม้ว่ากำลังสูงจะสามารถทำอุณหภูมิได้สูงอย่างรวดเร็ว แต่กลับมีพฤติกรรมของการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ไม่สม่ำเสมอซึ่งแตกต่างจากสองกรณีแรก ทั้งนี้เพราะแม้จะมีความแตกต่างของอุณหภูมิเพียงเล็กน้อยที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติไดอิเล็กตริก แต่เมื่อรวมกับความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่สูงจากกำลังไมโครเวฟส่งผลให้บริเวณที่มีสมบัติไดอิเล็กตริกสูงยิ่งเกิดความร้อนได้มากจนส่งผลให้บริเวณดังกล่าวร้อนขึ้นเพียงบริเวณเดียวอย่างรวดเร็ว ซึ่งเหตุการณ์ดังกล่าวนี้ย่อมส่งผลเสียในทางปฏิบัติหากนำไปใช้กับการคงรูปยางในผลิตภัณฑ์จริง จากวัสดุยางธรรมชาติคอมพาวด์มีค่าสมบัติไดอิเล็กตริก

นอกจากนั้นเมื่อนำชิ้นงานยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่ถูกทดสอบมาถ่ายภาพความร้อนทั้ง 3 กรณี ดังรูปที่ 11-13 พบว่าที่ กำลังไมโครเวฟ 10 วัตต์ จะมีการกระจายตัวของความร้อนดีที่สุด ในขณะที่ 50 วัตต์ มีการกระจายตัวของความร้อนดี แต่ยังไม่ค่อยเท่ากรณี 10 วัตต์ อย่างไรก็ตามกรณี 50 วัตต์ มีข้อได้เปรียบตรงที่สามารถทำให้วัสดุมีอุณหภูมิถึงอุณหภูมิคงรูปยางที่ 150 องศาเซลเซียสได้สำหรับในกรณี 800 วัตต์ นั้นมีการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ไม่สม่ำเสมอ และหากสังเกตจากภาพพบว่าบริเวณที่อุณหภูมิสูงเกิดการบวมของชิ้นงานซึ่งเป็นสิ่งที่ยอมรับไม่ได้ในกระบวนการทางปฏิบัติ

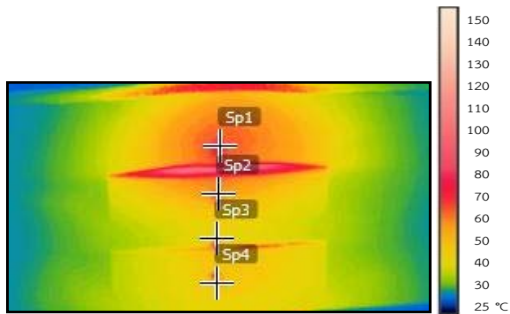


รูปที่ 11 การกระจายความร้อนของยางคอมพาวด์

ความหนา 5 เซนติเมตรที่กำลังไมโครเวฟ 10 วัตต์
ณ เวลา 60 นาที

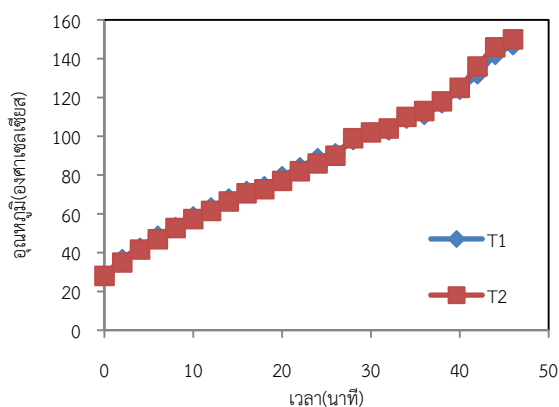


รูปที่ 12 การกระจายความร้อนของยางคอมพาวด์
ความหนา 5 เซนติเมตรที่กำลังไมโครเวฟ 50 วัตต์
ณ เวลา 80 นาที

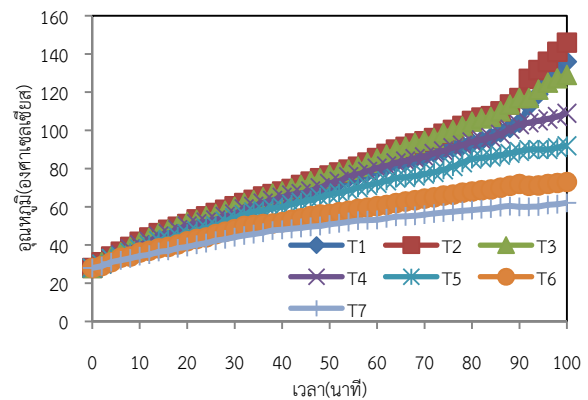


รูปที่ 13 การกระจายความร้อนของยางคอมพาวด์
ความหนา 5 เซนติเมตรที่กำลังไมโครเวฟ 800 วัตต์
ณ เวลา 1 นาที

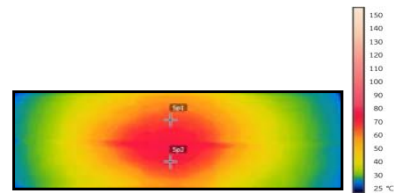
จากผลการศึกษาข้างต้นพบว่า กำลังไมโครเวฟที่เหมาะสมกับยางคอมพาวด์กรณีศึกษานี้ อยู่ที่ 50 วัตต์ ดังนั้นเพื่อศึกษาให้ข้อมูลเพิ่มมากขึ้นจึงได้ทำการกำหนดความหนาของวัสดุเพิ่มอีกสองความหนา (3 และ 8 เซนติเมตร) และศึกษาเปรียบเทียบกับที่กำลังไมโครเวฟ 50 วัตต์ ซึ่งได้ผลการศึกษาดังต่อไปนี้



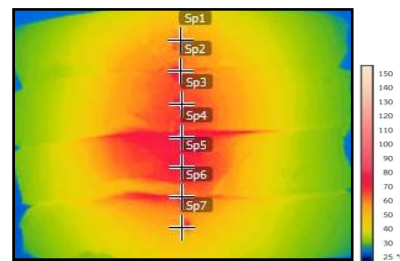
รูปที่ 14 ยางคอมพาวด์ กำลังไมโครเวฟ 50 วัตต์
ความหนา 3 เซนติเมตร



รูปที่ 15 ยางคอมพาวด์ กำลังไมโครเวฟ 50 วัตต์
ความหนา 3 เซนติเมตร



รูปที่ 16 การกระจายความร้อนของยางคอมพาวด์
ความหนา 3 เซนติเมตรที่กำลังไมโครเวฟ 50 วัตต์
ณ เวลา 50 นาที



รูปที่ 17 การกระจายความร้อนของยางคอมพาวด์
ความหนา 3 เซนติเมตรที่กำลังไมโครเวฟ 50 วัตต์
ณ เวลา 100 นาที

ในกรณีที่มีความหนาน้อยลงเหลือ 3 เซนติเมตร (รูปที่ 14) การกระจายตัวของอุณหภูมิในแนวความหนาดีกว่ากรณี 5 เซนติเมตร รวมถึงใช้ระยะเวลาในการทำความร้อนให้ถึงอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เร็วกว่ากรณี 5 เซนติเมตร เนื่องจากวัสดุที่มีความหนาน้อย คลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถที่จะเคลื่อนที่ทะลุทะลวงวัสดุได้ดีขึ้นส่งผลให้เกิดการสั่นพ้องของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สูงขึ้นทำรวมถึง วัสดุทดสอบที่มีความหนาน้อยลงนั้นถือว่ามีความหนาที่น้อยลงส่งผลให้พลังงานที่ได้ต่อหน่วยของวัสดุสูงขึ้น

ส่วนในกรณีที่มีความหนา 8 เซนติเมตร (รูปที่ 15) พบว่า มีการกระจายตัวของอุณหภูมิที่แย่ และใช้เวลาในการให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการนานขึ้น ซึ่งความหนาของชิ้นงานที่มากขึ้นส่งผลโดยตรงต่อความสามารถ

ทะลุทะลวงของคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า แสดงให้เห็นว่า คลื่นไมโครเวฟสามารถทำความร้อนให้กับยางได้ดีใน ความหนาระดับหนึ่ง แต่หากชิ้นงานมีความหนา มากเกินไปก็จะไม่ส่งผลดีต่อการทำความร้อน

นอกจากนั้นเมื่อเปรียบเทียบภาพถ่ายความร้อนที่ผิว ด้านข้างวัสดุพบว่า แม้ว่าในหลายๆ กรณีที่วัดด้วย อุณหภูมิ ณ บริเวณกึ่งกลางของวัสดุ พบว่ามีค่าการ กระจายตัวของอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกัน แต่ในความเป็นจริง แล้วในตัววัสดุมีบริเวณจุดร้อนและจุดเย็นที่มีอุณหภูมิที่ แตกต่างกันในทุกๆ กรณี ซึ่งอาจไม่ส่งผลดีหากนำไป พัฒนาต่อในทางปฏิบัติ

5. สรุปผลการศึกษา

ในการศึกษาครั้งนี้พบว่าสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุ ยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่มีเขม่าดำเป็นองค์ประกอบมีค่า สูงเพียงพอที่ทำให้วัสดุเกิดความร้อนเมื่อได้รับพลังงาน ไมโครเวฟ และสมบัติดังกล่าวพบว่ามีค่าเพิ่มมากขึ้นอย่าง ก้าวกระโดดเมื่อยางคอมพาวด์มีอุณหภูมิสูงขึ้นในช่วง อุณหภูมิประมาณ 80-100 องศาเซลเซียส

สมบัติไดอิเล็กตริกที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิดังกล่าว ส่งผลให้เมื่ออุณหภูมิวัสดุมีค่าสูงใกล้เคียง 100 องศาเซลเซียสจะมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่าง รวดเร็ว ซึ่งหากไม่มีการควบคุมที่ดีอาจส่งผลเสียต่อ กระบวนการมากกว่าผลดี

กำลังไมโครเวฟมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิซึ่ง เป็นไปตามทฤษฎี และจะช่วยให้เห็นอิทธิพลของฟังก์ชัน ไดอิเล็กตริกของวัสดุอย่างชัดเจนขึ้นหากใช้กำลัง ไมโครเวฟที่สูงขึ้น

แม้ว่าไมโครเวฟจะสามารถทำความร้อนวัสดุยางคอม พาวด์ได้จากข้างใน แต่ก็มีความหนาเหมาะสมที่ จำกัด ไม่ควรใช้กับงานที่มีความหนาเกินไปเพราะจะ ส่งผลเสียมากกว่าผลดี

การใช้ไมโครเวฟในการวัลคาไนซ์หรือคงรูปร่างเป็น แหล่งพลังงานเพียงอย่างเดียวอาจไม่เหมาะสมและเสี่ยง ต่อความเสียหายเมื่ออุณหภูมิสูงเข้าใกล้อุณหภูมิวัลคาไนซ์ ดังนั้นควรจะมีระบบการทำความร้อนจากผิวร่วมด้วย ในทางปฏิบัติ และควรลดหรือปิดแหล่งพลังงานจาก ไมโครเวฟเมื่ออุณหภูมิภายในวัสดุสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส หรืออุณหภูมิใกล้เคียงอุณหภูมิวัลคาไนซ์

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ที่สนับสนุน ทุนวิจัยในครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Mujumdar, A.S., (1995), *Handbook of Industrial Drying*, 2nd Edition, Marcel Dekker, New York.
- [2] Metaxas, A.C., and Meredith, R.J., (1983), *Industrial Microwave Heating*, Peter Peregrinus, Ltd., London.
- [3] Schubert, H., and Regier, M., (2005), *The Microwave Processing of Foods*, Woodhead Publishing Limited and CRC Press, Cambridge.
- [4] พงษ์ธร แซ่อูย, (2547). *ยาง ชนิด สมบัติ และการใช้ งาน. พิมพ์ครั้งที่ 1, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุ แห่งชาติ (เอ็มเทค).*
- [5] Wicks, G., G., Schulz, R., L., Clark, D., E., and Folz, D., C., (2002). Microwave treatment of vulcanized rubber. *United States Patent*. 6,420,457.
- [6] Anderson, E., E., (1978), Method and apparatus for microwave heating of flowable material. *United States Patent*. 4,129,768
- [7] Bovtun, V., Stark, W., Kelm, J., Porokhonsky, V. and Yakimenko, Y., (2001), Microwave dielectric properties of rubber compounds undergoing vulcanization. *KGK-Kautschuk und Gummi Kunststoffe* 54 (12), pp. 673-678.
- [8] Doo-ngam, N., Rattanadecho, P., Klinklai, W., (2007), Microwave pre-heating of natural rubber using a rectangular wave guide (MODE: TE₁₀), *Songklanakarin Journal of Science and Technology* 29 (6), pp. 1599-1608.
- [9] Makul, N., Rattanadecho, P., (2010) Microwave pre-curing of natural rubber-compounding using a rectangular wave

guide, International Communications in Heat
and Mass Transfer 37(7), pp.914-923.

- [10] นพวรรณดงาม, ผดุงศักดิ์รัตนเดโช และ วารุณีกลั่นไกล,
(2549), การอุณหวิทยาธรรมชาติด้วยคลื่นไมโครเวฟโดย
ใช้ระบบไมโครเวฟชนิดท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม
(MODE: TE₁₀), การประชุมวิชาการเครือข่าย
วิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 20

- [11]Suwannapum, N., and Rattanadecho,P., (2011), Analysis of heat-mass transport and pressure buildup induced inside unsaturated porous media subjected to microwave energy using a single (TE10) mode cavity,*Drying Technology An International J.* Vol.29(09), pp. 1010 – 1024.
- [12]Ratanadecho, P., Aoki, K., and Akahori, M., (2001), Experimental and Numerical Study of Microwave Drying in Unsaturated Porous Material,*Int. Commun. Heat Mass Trans*, Vol. 28, pp. 605-616.