

การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนในถุงมือยางเนื่องจากการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ Heat Transfer Analysis in the Rubber Glove due to Microwave Heating

พรทิพย์ แก่งอินทร์^{1*}, อุกฤษฏ์ นฤมิตรบรรกุล¹ และ ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช²

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

25/25 ถนนพุทธมณฑลสาย 4 ตำบลศาลายา อำเภอพุทธมณฑล จังหวัดนครปฐม 73170

² ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

99 หมู่ 18 ถนนพหลโยธิน ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

*ติดต่อ: pornthip.kea@mahidol.ac.th, เบอร์โทรศัพท์ 0-2889-2138 ต่อ 6401-3, เบอร์โทรสาร 0-2889-2138 ต่อ 6429

บทคัดย่อ

หลายปีที่ผ่านมาในอุตสาหกรรมการผลิตถุงมือยางมักใช้การทำความร้อนจากลมร้อน (Hot air) เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งต้องใช้เวลานานในการทำความร้อนและอาจทำให้ความร้อนกระจายตัวไม่ทั่วถึงจึงส่งผลให้ถุงมือยางแห้งไม่สม่ำเสมอ การนำพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟ (Microwave energy) มาใช้ในการให้ความร้อนแก่ถุงมือยางเป็นแหล่งความร้อนอีกหนึ่งทางเลือกที่น่าสนใจในปัจจุบัน เนื่องจากช่วยลดเวลาในการทำความร้อน ไม่ก่อให้เกิดมลพิษ และสามารถกระจายความร้อนได้อย่างทั่วถึง ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนในถุงมือยางเนื่องจากการทำความร้อนด้วยพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟภายในเตาไมโครเวฟ ที่ความถี่คลื่นไมโครเวฟ 2.45 GHz สมการแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equation) ที่ขึ้นกับเวลาควบคู่สมการถ่ายเทความร้อน (Heat transfer equation) ที่ขึ้นกับเวลาถูกนำมาใช้คำนวณผ่านระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method (FEM)) ผลที่ได้จากการจำลองเชิงตัวเลขด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์จะถูกเปรียบเทียบความถูกต้องกับผลจากการทดลอง อิทธิพลของขนาดของถุงมือยาง ค่ากำลังไมโครเวฟที่ป้อน และระยะเวลาในการทำความร้อนรวมทั้งตำแหน่งภายในถุงมือยางที่ส่งผลต่อรูปแบบการกระจายตัวของอุณหภูมิ (Temperature profile) จะถูกศึกษา แบบจำลองสามมิติของถุงมือยางและเตาไมโครเวฟจะถูกพิจารณา ผลการศึกษาที่ได้สามารถใช้เป็นพื้นฐานในการทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนในระหว่างกระบวนการผลิตถุงมือยางด้วยพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟในเชิงอุตสาหกรรมได้

คำหลัก: การถ่ายเทความร้อน, ถุงมือยาง, ไฟไนต์เอลิเมนต์, ไมโครเวฟ

Abstract

Several years ago, in the manufacture of rubber glove often used heating from hot air is mostly. It takes a long time in heating and can cause heat distribution uneven, resulting in rubber glove dry not smooth. Microwave energy used for heating of rubber glove is one heat source that is an attractive alternative nowadays. Because it reduces the heating time, pollution-free environment and can distribute heat evenly. This research studies the heat transfer in rubber glove due to heating with microwave energy within the microwave oven at a microwave frequency of 2.45 GHz. The transient Maxwell's equation coupled with the transient heat transfer equation is solved by using the finite element method (FEM). The numerical simulation results with computer programs are validated with experimental results. The effect of rubber glove sizes, microwave power inputs and heating times include the positions in rubber glove on the temperature profile are studied. Three-dimensional models of rubber glove and microwave oven are considered. The results can be provides guidance for the study of heat transfer during the production of rubber gloves with the microwave energy in the industry.

Keywords: Heat transfer, Rubber glove, Finite element, Microwave

1. บทนำ

ยางธรรมชาติ (Natural Rubber : NR) ส่วนมากเป็นยางที่ได้มาจากต้นยาง โดยยางธรรมชาติจะมีสมบัติเด่นหลายประการ อาทิ มีสมบัติเชิงกลดี มีความยืดหยุ่นสูง มีความเหนียว สามารถยึดติดกับวัสดุอื่น และมีความต้านทานต่อการขัดถูสูง จึงถูกนำไปใช้งานทางด้านวิศวกรรมและอุตสาหกรรมหลากหลายด้าน [1] ปัจจุบันอุตสาหกรรมที่ใช้ผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติสามารถแบ่งได้เป็น 4 กลุ่มใหญ่ ได้แก่ 1. กลุ่มยางล้อยานยนต์ เช่น ยางล้อรถประเภทต่างๆ 2. กลุ่มผลิตภัณฑ์ยางใช้ในงานวิศวกรรมหรือใช้ในอุตสาหกรรม ประกอบด้วยชิ้นส่วนยานยนต์ ชิ้นส่วนยางอุตสาหกรรม ผลิตภัณฑ์ยางในงานก่อสร้าง สายพาน ท่อยาง และลูกกลิ้งยาง 3. กลุ่มผลิตภัณฑ์ยางจากน้ำยางข้น ประกอบด้วยถุงมือยาง ยางอนามัย ยางยืดและอุปกรณ์ที่ใช้ในทางการแพทย์ และ 4. กลุ่มผลิตภัณฑ์ยางอื่นๆ ประกอบด้วยรองเท้ายาง พื้นรองเท้า ยางรัดของ ผลิตภัณฑ์กีฬาและของเล่น เป็นต้น โดยเฉพาะในกลุ่มที่ 3. นั้นพบว่าเป็นกลุ่มผลิตภัณฑ์ที่ใช้ยางเป็นวัตถุดิบในการผลิตที่กำลังได้รับความสนใจมากในปัจจุบัน

ถุงมือยางธรรมชาติ (Natural rubber glove : NRG) เป็นผลิตภัณฑ์จากน้ำยางข้น ถุงมือยางสามารถแบ่งได้หลายชนิดตามวัตถุประสงค์ของการใช้งาน เช่น ถุงมือยางที่ใช้ในด้านการแพทย์ (Medical glove) ถุงมือที่ใช้ในด้านอุตสาหกรรม (Industrial glove) และถุงมือยางที่ใช้ในครัวเรือน หรือถุงมือแม่บ้าน (Household glove) [2] โดยกระบวนการผลิตถุงมือยางของประเทศไทยจะแสดงในรูปที่ 1 [2] จากรูปที่ 1 จะพบว่ามีกระบวนการให้ความร้อนแก่ถุงมือยางถึง 5 ขั้นตอนในการผลิต และขั้นตอนนี้จะถือเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่จะส่งผลกระทบต่อคุณภาพของถุงมือยาง ซึ่งในปัจจุบันการให้ความร้อนแก่ถุงมือยางจะใช้วิธีการทำความร้อนแบบธรรมดา (Conventional heating method) โดยการใช้ลมร้อน (Hot air) ในการทำความร้อน ซึ่งเป็นวิธีการให้ความร้อนไปยังพื้นผิวของถุงมือยาง จึงอาจจะทำให้ถุงมือยางไม่ได้รับความร้อนอย่างสม่ำเสมอและใช้เวลาในการทำความร้อนที่นาน [3]

การทำความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ (Microwave heating) เป็นวิธีการทำความร้อนวิธีหนึ่งที่น่าสนใจที่มีข้อได้เปรียบมากกว่าวิธีการให้ความร้อนแบบเดิม เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟมีคุณสมบัติในการทะลุทะลวงสูง ทำให้เกิด

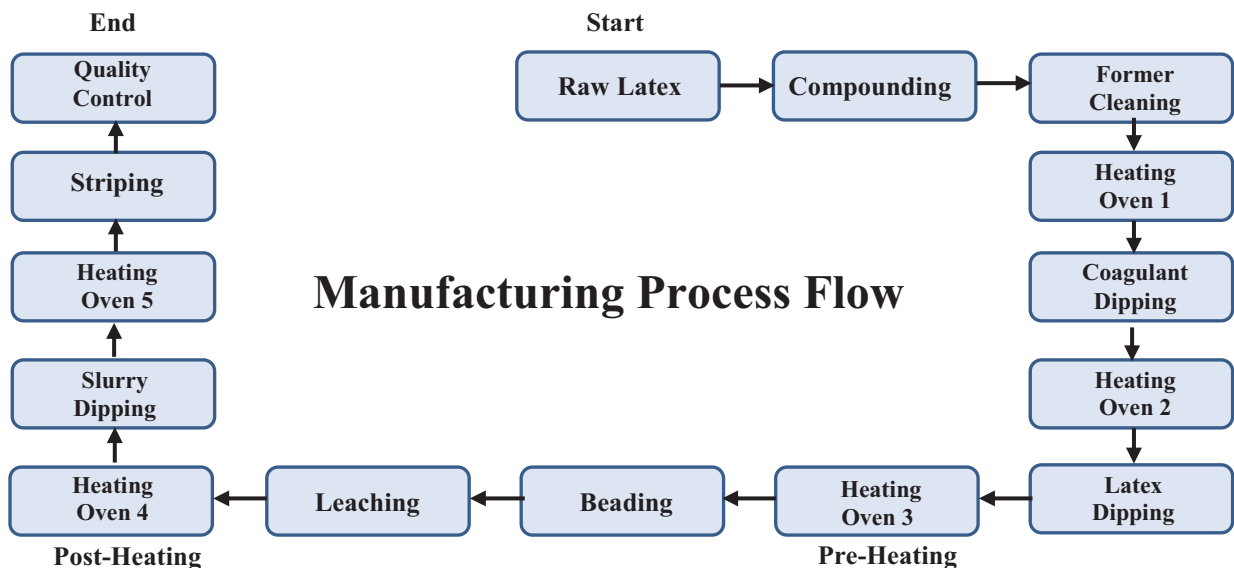
ความร้อนภายในชิ้นงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และใช้เวลาในการทำความร้อนที่สั้น นอกจากนั้นพลังงานความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟยังถือเป็นพลังงานสะอาดที่ไม่ก่อให้เกิดมลภาวะอีกด้วย [4] ดังนั้นการทำความร้อนจากไมโครเวฟจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจสำหรับกระบวนการทำความร้อนแก่ถุงมือยางธรรมชาติ

ตัวอย่างงานวิจัยที่มีการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการคงรูปในอุตสาหกรรมยางธรรมชาติ (Vulcanization) ด้วยพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟสามารถพบได้ในงานที่วิจัยที่ [5-6] มีงานวิจัยบางส่วนทำการศึกษากระบวนการทำความร้อนแก่ยางธรรมชาติจากคลื่นไมโครเวฟโดยใช้ท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม (Rectangular wave guide) [7-8] งานวิจัยบางส่วนทำการศึกษาการลดปริมาณโปรตีนแอลเลอเจนในน้ำยางธรรมชาติซึ่งมีผลทำให้คนที่ใช้ผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติเกิดอาการแพ้โดยการใช้โปรตีนเอสส์ร่วมกับพลังงานไมโครเวฟ ผลจากการศึกษาพบว่าพลังงานไมโครเวฟสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของปาล์มในการลดปริมาณโปรตีนในน้ำยางธรรมชาติได้ [9] การศึกษาจากการทดลองและการจำลองเชิงโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของอิทธิพลของระยะเวลาการทำความร้อนและมุมการวางถุงมือยางธรรมชาติภายในเตาไมโครเวฟที่ส่งผลต่อการกระจายตัวอุณหภูมิและการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าภายในถุงมือยางธรรมชาติระหว่างการทำความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟถูกศึกษาโดย Narumitbowonkul และคณะ [10] แม้ที่ผ่านมาจะมีงานวิจัยที่ทำการศึกษาเกี่ยวกับการทำความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟแก่ถุงมือยางธรรมชาติ แต่งานวิจัยที่ทำการศึกษาครอบคลุมทั้งการทดลองและการจำลองเชิงคอมพิวเตอร์โดยศึกษาทั้งอิทธิพลของขนาดของถุงมือยาง ค่ากำลังไมโครเวฟที่ป้อน และระยะเวลาในการทำความร้อนรวมทั้งตำแหน่งภายในถุงมือยางที่ส่งผลต่อรูปแบบการกระจายตัวของอุณหภูมิยังคงมีการศึกษาอยู่จำนวนมาก เนื่องจากความซับซ้อนของปัญหาและแบบจำลองตลอดจนความซับซ้อนของค่าคุณสมบัติทางความร้อนและค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการวิเคราะห์การทดลองและการจำลองเชิงคอมพิวเตอร์ของการถ่ายเทความร้อนภายในถุงมือยางเนื่องจากการทำความร้อนจากพลังงานไมโครเวฟด้วยเตาไมโครเวฟ (Microwave oven) โดยทำการศึกษาอิทธิพลของขนาดของถุงมือยาง ค่ากำลังไมโครเวฟที่ป้อน และระยะเวลาในการทำความร้อน

รวมทั้งตำแหน่งภายในถุงมือยางที่ส่งผลต่อรูปแบบการกระจายตัวของอนุกรมภายในถุงมือยาง ในการจำลองเชิงคอมพิวเตอร์จะใช้แบบจำลองสามมิติของถุงมือยางและเตาไมโครเวฟ สมการแพร่กระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าควบคุมกับสมการถ่ายเทความร้อนที่ขึ้นกับเวลาจะถูกแก้ปัญหโดยวิธีเชิงตัวเลขแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method : FEM) และทำการเปรียบเทียบความถูกต้องของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นด้วยวิธีการทดลอง ผลการศึกษาที่ได้สามารถใช้เป็นพื้นฐานในการศึกษาและปรับปรุงกระบวนการทำความร้อนแก่ถุงมือยางจากการใช้พลังงานจากคลื่นไมโครเวฟในเชิงอุตสาหกรรมได้

ที่ 3 โดยก่อนการทดลองจะมีการทำความสะอาดแบบพิมพ์ถุงมือยางซึ่งทำจากแบบพิมพ์เซรามิก (Ceramic former) และทำการจุ่มแบบพิมพ์เซรามิกลงในน้ำยางธรรมชาติให้ความหนาประมาณ 0.5 mm [10] และนำไปวางไว้บริเวณกึ่งกลางของเตาไมโครเวฟ โดยวางในแนวตั้งขนานกับท่อนำคลื่น ใช้เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ชนิด K ในการวัดอุณหภูมิของถุงมือยางภายในเตาไมโครเวฟ [11-12] ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาดังแสดงในรูปที่ 4 และใช้ Data logger เป็นอุปกรณ์ในการบันทึกค่าอุณหภูมิ ในขณะที่ตำแหน่งในการวัดอุณหภูมิของถุงมือยางโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลจะแสดงดังรูปที่ 5 ตามลำดับ



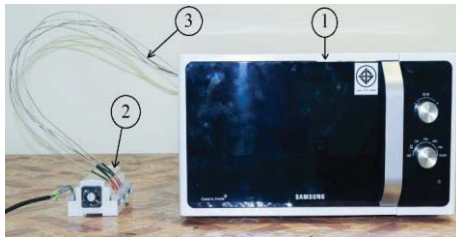
รูปที่ 1 ขั้นตอนการผลิตถุงมือยาง [2]

2. การทดลอง

รูปที่ 2 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง โดยในการทดลองจะใช้เตาไมโครเวฟบ้านที่มีควาวิดี (Cavity) ภายในเตาไมโครเวฟขนาด $310 \times 280 \times 190 \text{ mm}^3$ (แกน x y และ z) มีพื้นที่ของท่อนำคลื่น (Wave guide) ภายในเตาไมโครเวฟขนาด $86 \times 43 \text{ mm}^2$ ในการทดลองจะใช้ค่ากำลังไมโครเวฟที่ป้อน 100 W ใช้ค่าความถี่ไมโครเวฟที่ป้อน 2,450 MHz โดยทำบันทึกค่าอุณหภูมิที่ระยะเวลาการให้ความร้อนที่ 30 s 120 s 210 s และ 300 s จำนวน 5 ตำแหน่ง คือตำแหน่ง A1 A2 A3 A4 และ A5 นอกจากนั้นในการทดลองจะใช้ขนาดของถุงมือ 3 ขนาด คือขนาด S ขนาด M และขนาด L โดยขนาดและตำแหน่งในการวัดอุณหภูมิทั้ง 5 ตำแหน่ง จะแสดงในรูป

ซึ่งก่อนการทดลองจะมีการวัดอุณหภูมิเริ่มต้นของถุงมือยางด้วยเทอร์โมมิเตอร์ก่อนเข้าเตาไมโครเวฟโดยพบว่าถุงมือยางมีอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 24°C โดยหลักการทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟคือคลื่นไมโครเวฟจะถูกกำเนิดจากแหล่งผลิตคลื่นไมโครเวฟหรือแมกเนตรอน (Magnetron) และคลื่นไมโครเวฟจะถูกปล่อยออกมาทางท่อนำคลื่นไมโครเวฟ คลื่นไมโครเวฟจะสะท้อนไปมาอยู่ภายในเตาไมโครเวฟและถูกดูดกลืนโดยวัสดุที่ต้องการทำความร้อน คลื่นไมโครเวฟจะผ่านเข้าไปภายในวัสดุทำให้โมเลกุลภายในวัสดุเกิดการสั่น ทำให้เกิดการเสียดสีกันของโมเลกุล จึงเกิดความร้อนและทำให้อุณหภูมิของวัสดุเพิ่มสูงขึ้น

ขนาดของถุงมือยางแต่ละขนาดจะแสดงดังตารางที่ 1 โดยถุงมือยางแต่ละขนาดนี้จะเป็นขนาดตามมาตรฐานที่ผลิตในภาคอุตสาหกรรม ซึ่งกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับตำแหน่งต่างๆ โดยใช้ขนาดของถุงมือ 3 ขนาด ที่ระยะเวลาการให้ความร้อนต่างๆ ที่ได้จากการทดลองจะแสดงในส่วนที่ 4 ถัดไป

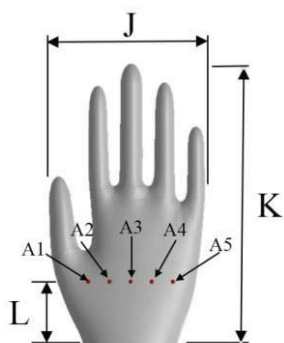


รูปที่ 2 อุปกรณ์ในการทดลอง

- เมื่อ ① Microwave oven
② Data logger (Wisco DL2200)
③ Thermocouple

ตารางที่ 1 ขนาดของถุงมือยางแต่ละขนาด

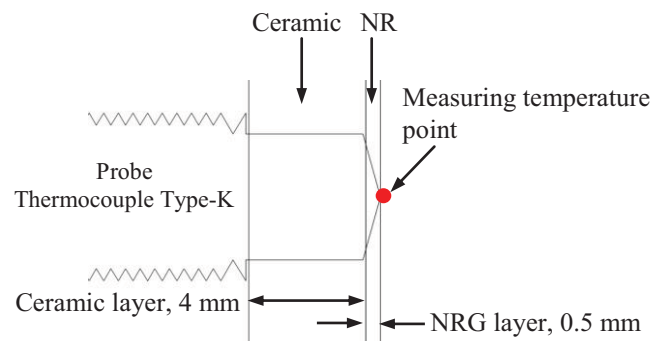
ขนาดของถุงมือยาง	J (mm)	K (mm)	L (mm)
ขนาด S	96 mm	200 mm	45 mm
ขนาด M	110 mm	200 mm	45 mm
ขนาด L	124 mm	200 mm	45 mm



รูปที่ 3 ขนาดและตำแหน่งในการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่ง A1 A2 A3 A4 และ A5



รูปที่ 4 การวัดค่าอุณหภูมิของถุงมือภายในเตาไมโครเวฟ

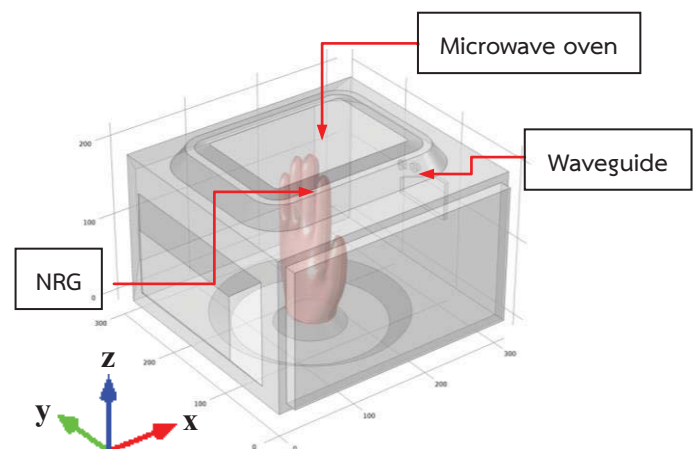


รูปที่ 5 ตำแหน่งในการวัดอุณหภูมิของถุงมือยาง

3. การจำลองเชิงตัวเลขด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

3.1 แบบจำลองของเตาไมโครเวฟและถุงมือยาง

ในรูปที่ 6 จะแสดงแบบจำลองของเตาไมโครเวฟและถุงมือยางที่ใช้ในการศึกษา โดยแบบจำลองของเตาไมโครเวฟและถุงมือยางจะพิจารณาแบบสามมิติตามแนวแกน x y และ z โดยขนาดของเตาไมโครเวฟและถุงมือยางทั้งสามขนาดจะมีขนาดเช่นเดียวกันกับขนาดของเตาไมโครเวฟและถุงมือยางที่ใช้ในการทดลอง และไม่พิจารณาอิทธิพลของภาตหมุนในการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยแบบจำลองถุงมือยางจะมีลักษณะเป็นชั้นสองชั้นคือชั้นของแบบพิมพ์เซรามิกและชั้นของยางที่ถูกเคลือบบนแบบพิมพ์เซรามิกเพื่อให้สอดคล้องกับการทดลอง โดยชั้นของถุงมือยางจะมีความหนาประมาณ 0.5 mm ถุงมือยางจะถูกวางไว้บริเวณกึ่งกลางของเตาไมโครเวฟและได้รับคลื่นไมโครเวฟที่ถูกปล่อยออกมาทางท่อนำคลื่น



รูปที่ 6 แบบจำลองของเตาไมโครเวฟและถุงมือยางที่ใช้ในการศึกษา

3.2 การวิเคราะห์การแพร่กระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ในงานวิจัยฉบับนี้จะทำการวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนถุงมือยางเมื่อได้รับการทำความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ การพิจารณาการแพร่กระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองสามมิติ โดยในการวิเคราะห์จะมีสมมติฐานที่เกี่ยวข้องคือ

- 1) การกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟภายในเตาไมโครเวฟจะพิจารณาในโหมดมัลติโหมด (Multimode)
- 2) ไม่พิจารณาการดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟของอากาศภายในเตาไมโครเวฟ [10]
- 3) ผนังของเตาไมโครเวฟและท่อนำคลื่นจะพิจารณาให้มีเงื่อนไขขอบเขตแบบตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์ (Perfect electric conductor boundary condition) [10]
- 4) ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก (Dielectric properties) ของถุงมือยางและเซรามิกจะพิจารณาให้มีค่าคงที่

การแพร่กระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในถุงมือยางจะถูกคำนวณโดยใช้สมการการแพร่กระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งอยู่บนพื้นฐานของสมการแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equations) [13] ซึ่งสามารถเขียนในรูปทั่วไปได้คือ

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu_r} \nabla \times \vec{E} \right) - k_0^2 \left(\epsilon_r - \frac{j\sigma}{\omega\epsilon_0} \right) \vec{E} = 0 \quad (1)$$

เมื่อ $\vec{E}$ คือความเข้มของสนามไฟฟ้า (Electric field intensity (V/m)) μ_r คือค่าการซึมผ่านสัมพัทธ์ (Relative Permeability (-)) ϵ_r' คือค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ (Relative Permittivity (-)) $\epsilon_0 = 8.8542 \times 10^{-12}$ F/m คือค่าเปอร์มิตติวิตีในที่ว่างหรือฟรีสเปซ (Permittivity of free space (F/m)) σ คือค่าการนำไฟฟ้า (Electric conductivity (S/m)) $\omega = 2\pi f$ คือความถี่เชิงมุม (Angular frequency (rad/s)) k_0 คือเลขคลื่นในที่ว่างหรือฟรีสเปซ (Wave number of free space (m^{-1})) และ $j = \sqrt{-1}$

โดยเงื่อนไขขอบเขตสำหรับการวิเคราะห์การแพร่กระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีดังนี้

ถุงมือยางจะได้รับอิทธิพลจากคลื่นไมโครเวฟที่สม่ำเสมอจากด้านข้างของตำแหน่งจากท่อนำคลื่น ดังนั้นเงื่อนไขขอบเขตของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าทางด้านช่องออก

คลื่นของท่อนำคลื่นจะเป็นแบบพอร์ต (Port boundary condition) ที่มีการระบุค่ากำลังไมโครเวฟที่ป้อนที่มีค่าคงที่ [14-15]:

$$S = \int (\vec{E} - \vec{E}_1) \cdot \vec{E}_1 / \int \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_1 \quad (2)$$

เมื่อค่าคงตัวของการแผ่ (Propagation constant, β) จะมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3) คือ [16]:

$$\beta = \frac{2\pi}{c} \times \sqrt{f^2 - \frac{c^2}{4a^2}} \quad (3)$$

เมื่อ β คือค่าคงตัวของการแผ่ (Propagation constant (1/m)) $a = 73$ mm คือขนาดความลึกของท่อนำคลื่น (Depth dimension of waveguide (m)) [10] $c = 3 \times 10^8$ m/s คือความเร็วแสง (speed of light (m/s)) และ f คือค่าความถี่ที่ทำงาน (Frequency (Hz))

ด้านนอกท่อนำคลื่นจะพิจารณาให้มีเงื่อนไขขอบเขตแบบตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์ (Perfect electric conductor boundary condition) คือ

$$\hat{n} \times \vec{E} = 0 \quad (4)$$

ผนังของเตาไมโครเวฟจะมีเงื่อนไขแบบ Impedance boundary condition คือ [16]:

$$\sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r - j \frac{\sigma}{\omega}}} \hat{n} \times \vec{H} + \vec{E} - (\hat{n} \cdot \vec{E}) \hat{n} = (\hat{n} \cdot \vec{E}_s) \hat{n} - \vec{E}_s \quad (5)$$

และเงื่อนไขขอบเขตระหว่างรอยต่อระหว่างถุงมือยางและแบบพิมพ์เซรามิกจะพิจารณาเงื่อนไขขอบเขตแบบต่อเนื่อง (Continuity boundary condition)

โดยค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกจะเขียนในรูป ϵ หรือค่าคอมเพล็กซ์เปอร์มิตติวิตี (Complex permittivity) จะเป็นคุณสมบัติของวัสดุใด ๆ ที่อธิบายถึงความสามารถในการดูดซับ ส่งผ่านและสะท้อนพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟจะสามารถเขียนในรูปสมการได้คือ [17]

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' = \epsilon_0 (\epsilon_r' - j\epsilon_r'') \quad (6)$$

โดย ϵ_r' คือส่วนที่เป็นจำนวนจริงของค่าคอมเพล็กซ์เปอร์มิตติวิตีเรียกว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (Relative dielectric constant) หรือค่าเปอร์มิตติวิตี

สัมพัทธ์ (Relative permittivity) และ ϵ_r'' คือส่วนที่เป็นจำนวนจินตภาพของค่าคอมเพล็กซ์เปอร์มิตติวิตี เรียกว่าค่าไดอิเล็กทริกโลสแฟคเตอร์สัมพัทธ์ (Relative dielectric loss factor)

3.3 การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน

เพื่อให้สอดคล้องกับการวิเคราะห์การแพร่กระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนจะถูกวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองสามมิติเช่นเดียวกัน โดยในการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนจะมีสมมติฐานที่เกี่ยวข้องคือ

- 1) ไม่พิจารณาการเปลี่ยนแปลงสถานะของฉนวนอย่าง [10]
- 2) ไม่พิจารณาการเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาทางเคมีของฉนวนอย่าง [10]
- 3) ค่าคุณสมบัติทางความร้อน (Thermal properties) ของฉนวนจะพิจารณาให้มีค่าคงที่

การวิเคราะห์การกระจายตัวอุณหภูมิจะพิจารณาเฉพาะในฉนวนเท่านั้น และพิจารณาให้ฉนวนมีอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 24 °C เช่นเดียวกับการทดลอง สมการที่ใช้ในการอธิบายการถ่ายเทความร้อนภายในฉนวนเมื่อได้รับอิทธิพลจากการให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟคือ [10]:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} - k \nabla^2 T = Q \quad (7)$$

เมื่อ T คือค่าอุณหภูมิ (Temperature (°C)) ρ คือค่าความหนาแน่น (Density (kg/m³)) c คือค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific heat capacity (J/kg · °C)) k คือค่าการนำความร้อนหรือสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal conductivity (W/m·°C)) และ Q คือแหล่งความร้อนจากภายนอก (External heat source term (W)) ซึ่งในที่นี้จะได้จากแหล่งพลังงานความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟในสมการที่ (8) [8] คือ

$$Q = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon_r' (\tan \delta) \bar{E}^2 \quad (8)$$

เมื่อ $\tan \delta$ คือค่าสัมประสิทธิ์ลอสมแทนเจนต์ (Loss tangent coefficient) ซึ่งค่าสนามไฟฟ้า $\bar{E}$ จะได้จากการวิเคราะห์การแพร่กระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

สำหรับเงื่อนไขขอบเขตสำหรับการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนจะมีดังนี้

ด้านนอกของฉนวนจะพิจารณาเงื่อนไขขอบเขตเนื่องจากแหล่งความร้อนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic heat source boundary condition) อันเนื่องมาจากได้รับอิทธิพลจากคลื่นไมโครเวฟ ดังแสดงในสมการที่ (9)

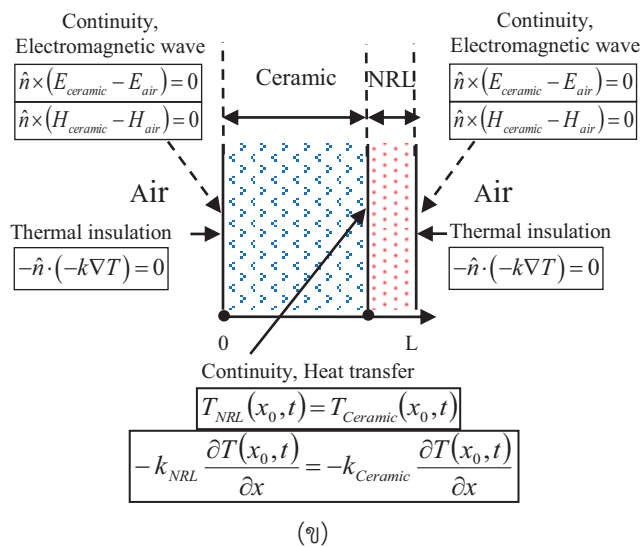
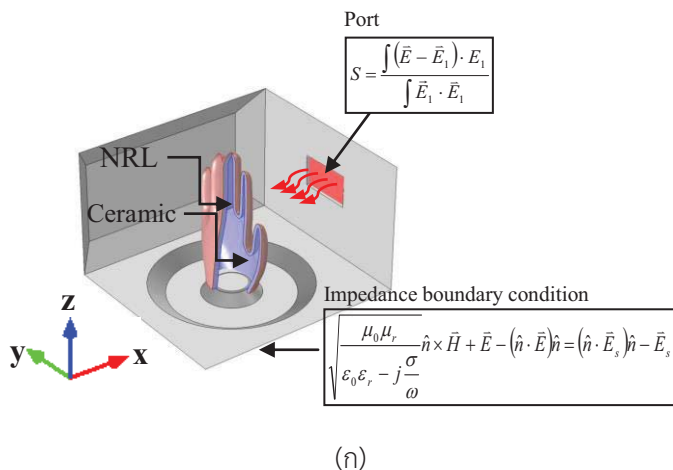
$$-\hat{n} \cdot (-k \nabla T) = Q \quad (9)$$

เงื่อนไขขอบเขตระหว่างรอยต่อระหว่างฉนวนและแบบพิมพ์เซรามิกจะพิจารณาเงื่อนไขขอบเขตแบบต่อเนื่อง (Continuity boundary condition) และบริเวณรอบนอกระหว่างเซรามิกและอากาศจะพิจารณาให้มีคุณสมบัติเป็นฉนวน (Thermal insulation boundary condition) คือ

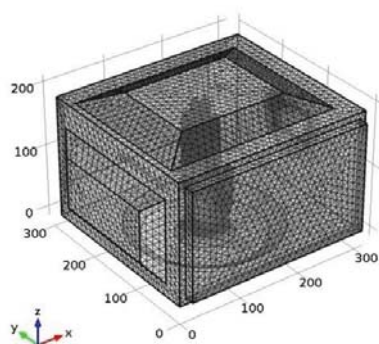
$$-\hat{n} \cdot (-k \nabla T) = 0 \quad (10)$$

โดยเงื่อนไขขอบเขตในการวิเคราะห์การแพร่กระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนจะแสดงในรูปที่ 7

สมการหลักในสมการที่ (1) และ (7) จะถูกแก้ปัญหาด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method (FEM)) ผ่านโปรแกรม COMSOLTM Multiphysics เพื่อศึกษาการกระจายตัวอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในฉนวนขนาดต่างๆ เมื่อได้รับการทำความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยสมการการแพร่กระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและสมการถ่ายเทความร้อนจะควบคู่กันด้วยทอมแหล่งความร้อนจากภายนอก (Q) ในสมการที่ (8) ซึ่งแบบจำลองจะถูกคำนวณโดยใช้เอลิเมนต์ (Element) รูปสามเหลี่ยมและใช้ฟังก์ชันการประมาณค่าในช่วงแบบลากรองจ์อันดับที่สอง (Lagrange quadratic interpolation function) ในการประมาณค่าอุณหภูมิในแต่ละเอลิเมนต์ โดยจำนวนเอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์คือ 720,636 เอลิเมนต์ โดยรูปที่ 8 จะแสดงการตีเอลิเมนต์ภายในแบบจำลองฉนวนและเตาไมโครเวฟ โดยบริเวณนิ้วมือทั้งห้าของฉนวนและพื้นที่ภายในเตาไมโครเวฟที่ใกล้ฉนวนจะมีจำนวนเอลิเมนต์ที่มากและบริเวณพื้นที่ภายในเตาไมโครเวฟที่ห่างจากฉนวนออกไปจะมีจำนวนเอลิเมนต์ที่น้อยตามลำดับ



รูปที่ 7 เงื่อนไขขอบเขต (ก) บริเวณภายนอกถังม็อยางและเตาไมโครเวฟ และ (ข) บริเวณภายในถังม็อยาง



รูปที่ 8 จำนวนเอลิเมนต์ภายในแบบจำลองถังม็อยางและเตาไมโครเวฟ

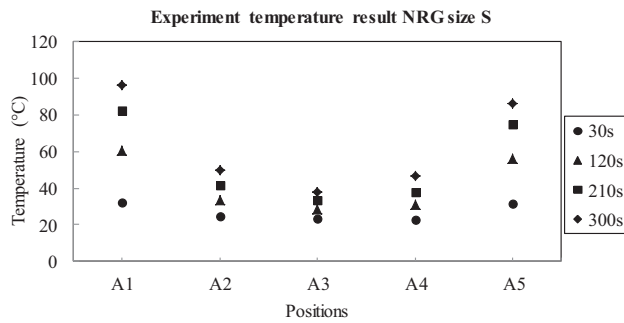
ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกและค่าคุณสมบัติทางความร้อนของถังม็อยางและเซรามิกจะแสดงในตารางที่ 2 [18-22] โดยถังม็อยางจะถูกสมมติให้มีคุณสมบัติเป็นสารเนื้อเดียว (Homogeneous material) และมีคุณสมบัติเหมือนกันในทุกทิศทาง

ตารางที่ 2 ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกและค่าคุณสมบัติความร้อนของถังม็อยางและเซรามิกซึ่งได้จากการอ้างอิงในงานวิจัยที่ [18-22]

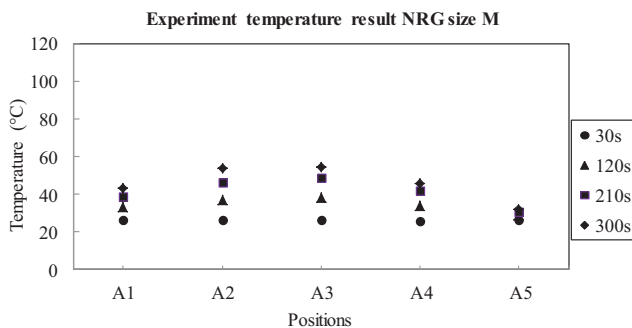
Property	Emblem	Natural Rubber Latex	Ceramic
Electric conductivity (S/m)	σ	0	0
Relative dielectric constant	ϵ'_r	20	3.4
Relative dielectric loss factor	ϵ''_r	0.3	0
Thermal conductivity (W/m.K)	k	0.13	1.1
Density (kg/m ³)	ρ	975	2,200
Heat capacity (J/kg.K)	c	1894	480

4. ผลและการวิเคราะห์ผล

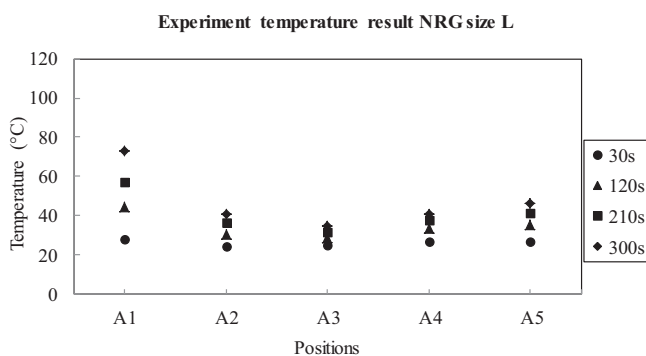
ในรูปที่ 9 ถึงรูปที่ 11 จะแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับตำแหน่งต่างๆ (A1 A2 A3 A4 และ A5) ที่ได้จากการทดลองที่ระยะเวลาการให้ความร้อน 30 s 120 s 210 s และ 300 s โดยใช้ค่ากำลังไมโครเวฟที่ป้อน 100 W และค่าความถี่ไมโครเวฟ 2,450 MHz ของถังม็อยางขนาด S ขนาด M และขนาด L ตามลำดับในการทดลองจะมีการทดลองซ้ำทั้งหมด 5 ครั้ง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อเป็นตัวแทนของผลการทดลอง โดยจากรูปทั้งสามจะพบว่าเมื่อระยะเวลาการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ จะเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย อย่างไรก็ตามจะพบว่าลักษณะการกระจายตัวอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงตามตำแหน่งของถังม็อยางแต่ละขนาดจะมีความแตกต่างกันตามความแตกต่างของขนาดพื้นที่ของถังม็อยางที่ได้รับพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟขนาดต่างกัน โดยลักษณะการกระจายตัวอุณหภูมิของถังม็อยางขนาด S จะมีลักษณะคล้ายเส้นโค้งพาราโบลา (Parabola) หายใจที่มีความสมมาตรกันในฝั่งซ้ายและขวา โดยอุณหภูมิจะสูงที่สุดในตำแหน่ง A1 ลดลงไปยังตำแหน่ง A2 และ A3 และเพิ่มขึ้นในตำแหน่ง A4 และ A5 ในขณะที่ถังม็อยางขนาด M จะมีลักษณะการกระจายตัวอุณหภูมิลักษณะคล้ายเส้นโค้งพาราโบลาว่า โดยอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นจากตำแหน่ง A1 ไปยังตำแหน่ง A2 และ A3 และลดลงในตำแหน่ง A4 และ A5 ส่วนลักษณะการกระจายตัวอุณหภูมิขนาด L จะมีลักษณะคล้ายถังม็อยางขนาด S คือจะมีลักษณะคล้ายเส้นโค้งพาราโบลาหายใจแต่ไม่มีความสมมาตรทางด้านฝั่งซ้ายและขวา



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับตำแหน่งต่างๆ ที่ระยะเวลาการให้ความร้อน 30 s 120 s 210 s และ 300 s ของถุงมือขนาด S



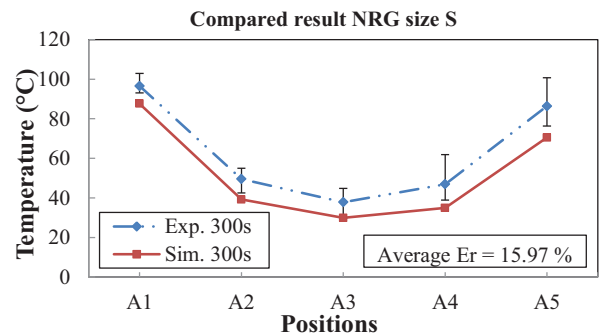
รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับตำแหน่งต่างๆ ที่ระยะเวลาการให้ความร้อน 30 s 120 s 210 s และ 300 s ของถุงมือขนาด M



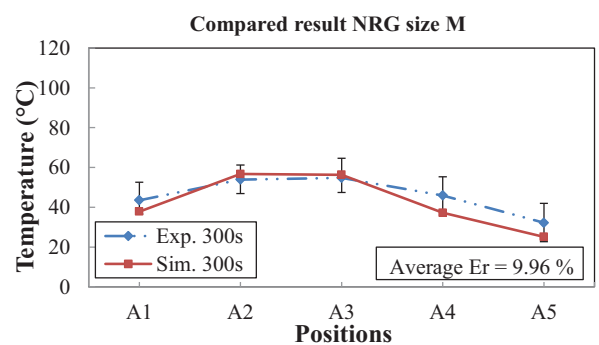
รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับตำแหน่งต่างๆ ที่ระยะเวลาการให้ความร้อน 30 s 120 s 210 s และ 300 s ของถุงมือขนาด L

กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับตำแหน่งต่างๆ (A1 A2 A3 A4 และ A5) จากการทดลองและการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ระยะเวลาการให้ความร้อน 300 s โดยใช้ค่ากำลังไมโครเวฟที่ป้อน 100 W และค่าความถี่ไมโครเวฟ 2,450 MHz ของถุงมือขนาด S ขนาด M และขนาด L จะนำเสนอในรูปที่

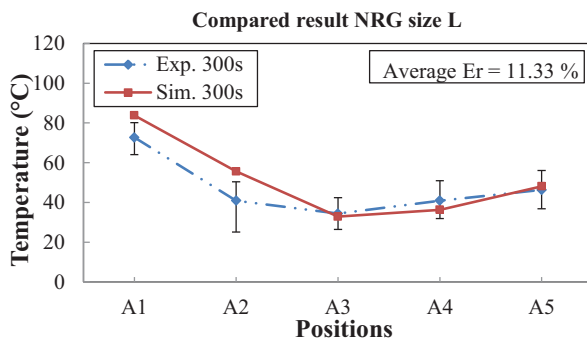
12 ถึง รูปที่ 14 ตามลำดับ โดยค่าจากการทดลองจะนำค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด และค่าเฉลี่ยจากการทดลองมาพล็อตเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิกับผลจากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยจากรูปที่ 12 ถึง รูปที่ 14 จะพบว่าผลที่ได้จากการทดลอง และผลที่ได้จากการใช้การจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์จะมีความสอดคล้องกัน โดยค่าความผิดพลาดเฉลี่ยทั้ง 5 ตำแหน่งที่ได้จากการใช้ขนาดถุงมืออย่างแต่ละขนาดจะพบว่าทดสอบที่ขนาดถุงมือขนาด M จะมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยน้อยที่สุดคือ 9.96 % รองลงมาคือถุงมือขนาด L มีค่าความผิดพลาดเฉลี่ย 11.38 % และรองลงมาคือถุงมือขนาด S มีค่าความผิดพลาดเฉลี่ย 15.97 % ตามลำดับ



รูปที่ 12 กราฟเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองและจากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของถุงมือขนาด S



รูปที่ 13 กราฟเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองและจากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของถุงมือขนาด M

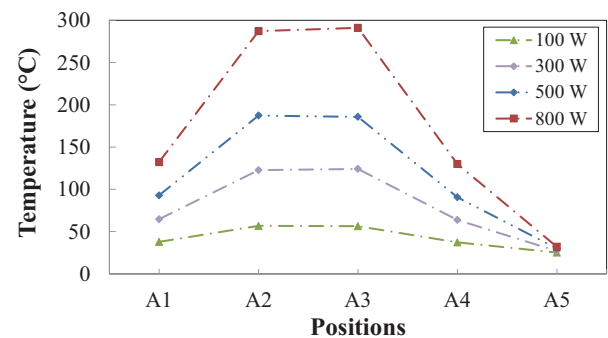


รูปที่ 14 กราฟเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองและจากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของถุ่มีอย่างขนาด L

รูปที่ 15 จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับตำแหน่งต่างๆ ที่ระยะเวลาการให้ความร้อน 300 s ของถุ่มีอย่างขนาด M โดยใช้ค่ากำลังไมโครเวฟที่ป้อน 100 W 300 W 500 W และ 800 W จากกราฟจะพบว่าเมื่อค่ากำลังไมโครเวฟที่ป้อนเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้การกระจายอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น และลักษณะการกระจายตัวอุณหภูมิในรูปที่ 15 จะมีความสอดคล้องกับรูปที่ 10 และ รูปที่ 13

ในรูปที่ 16 ถึง รูปที่ 18 จะแสดงรูปแบบการกระจายตัวอุณหภูมิ (Temperature profile) ที่ระยะเวลาการให้ความร้อน 60 s 150 s 240 s และ 300 s ของถุ่มีอย่างขนาด S ขนาด M และขนาด L ตามลำดับ โดยจะพบว่าถุ่มีอย่างทั้ง 3 ขนาดจะมีรูปแบบการกระจายตัวอุณหภูมิที่แตกต่างกันโดยรูปแบบการกระจายตัวอุณหภูมิของถุ่มีอย่างขนาด S จะเกิดจุดที่อุณหภูมิบริเวณ 3 จุดใหญ่ๆ คือบริเวณนี้่กกลาง ปลายด้านขวาของนี้่ก และบริเวณด้านขวาใต้นี้่กย่อย ส่วนรูปแบบการกระจายตัวอุณหภูมิของถุ่มีอย่างขนาด M จะเกิดจุดที่อุณหภูมิบริเวณ 2 จุดใหญ่ๆ คือบริเวณนี้่กกลางเช่นเดียวกับถุ่มีอย่างขนาด S และบริเวณกลางฝ่ามือ และรูปแบบการกระจายตัวอุณหภูมิของถุ่มีอย่างขนาด L จะเกิดจุดที่อุณหภูมิบริเวณ 3 จุดใหญ่ๆ คือบริเวณนี้่กกลาง ปลายด้านขวาของนี้่ก และบริเวณฝ่ามือด้านบนใต้นี้่กกลาง เมื่อเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิต่ออุณหภูมิที่สูงที่สุดในถุ่มีอย่างแต่ละขนาดจะพบว่าที่ระยะเวลาการให้ความร้อนเท่ากันถุ่มีอย่างขนาด S จะมีค่าอุณหภูมิสูงสุด รองลงมาคือขนาด L และถุ่มีอย่างขนาด M ตามลำดับ นอกจากนี้จากการสังเกตรูปแบบการกระจายตัวอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนถุ่มีอย่างในรูปที่ 16 ถึง รูปที่ 18 จะพบว่ามียาง

ตำแหน่งที่อุณหภูมิของถุ่มีอย่างเกิดความไม่สม่ำเสมอเนื่องจากเมื่อคลื่นไมโครเวฟถูกปล่อยออกมาทางท่อนำคลื่นภายในเตาไมโครเวฟจะมีทิศทางการกระจายตัวของคลื่นในโหมดมัลติโหมด (Multimode) ซึ่งทำให้เกิดการกระจายตัวของคลื่นอย่างไม่สม่ำเสมอ ถุ่มีอย่างจึงไม่สามารถดูดกลืนคลื่นได้อย่างสม่ำเสมอได้ นอกจากนั้นการไม่พิจารณาอิทธิพลของภาตหมุ่นก็อาจเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้การกระจายตัวความร้อนที่ไม่สม่ำเสมอบนถุ่มีอย่างได้



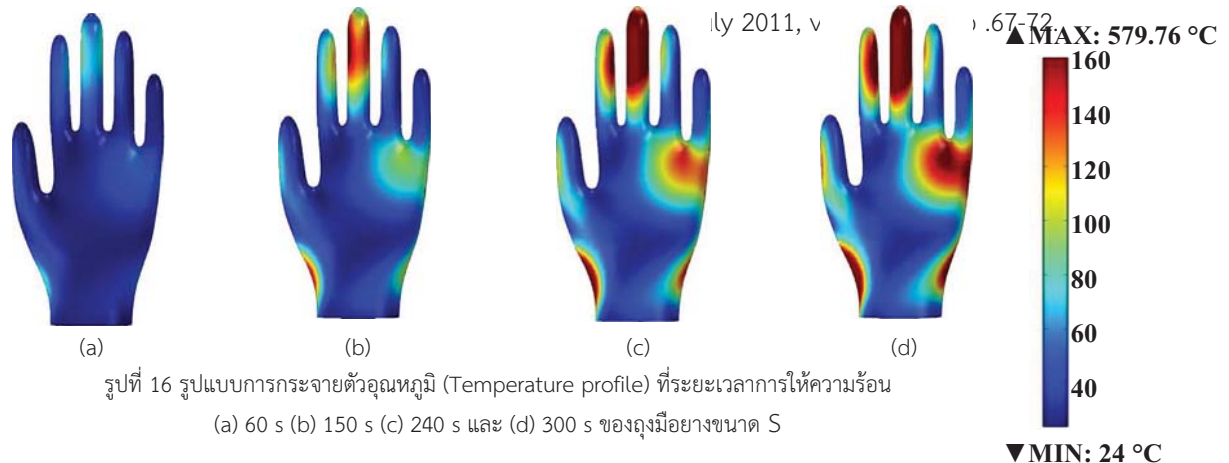
รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับตำแหน่งต่างๆ ที่ระยะเวลาการให้ความร้อน 300 s ของถุ่มีอย่างขนาด M โดยใช้ค่ากำลังไมโครเวฟที่ป้อนค่าต่างๆ

6. สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาอิทธิพลของขนาดของถุ่มีอย่าง ค่ากำลังไมโครเวฟที่ป้อน และระยะเวลาในการทำความร้อนรวมทั้งตำแหน่งภายในถุ่มีอย่างที่ส่งผลต่อรูปแบบการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในถุ่มีอย่างระหว่างการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ โดยทำการศึกษาทั้งจากการทดลองจริงและการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ผลการศึกษาสามารถสรุปเป็นข้อหลักๆ ได้ดังนี้

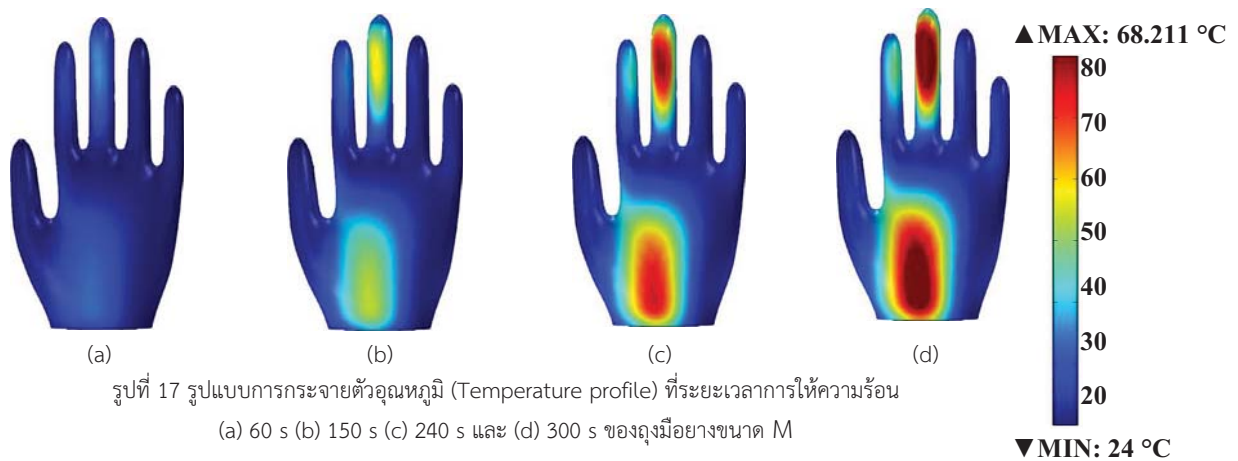
- 1) ผลที่ได้จากการใช้การจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จะมีความสอดคล้องกับการทดลอง โดยค่าความผิดพลาดจากการเปรียบเทียบจากการใช้ถุ่มีอย่างขนาด M จะมีค่าความผิดพลาดน้อยที่สุด รองลงมาคือขนาด L และขนาด S ตามลำดับ
- 2) ถุ่มีอย่างขนาด S จะมีพื้นที่เกิดค่าอุณหภูมิสูงมากที่สุด รองลงมาคือถุ่มีอย่างขนาด M และขนาด L ตามลำดับที่ระยะเวลาการให้ความร้อนที่เท่ากัน
- 3) ค่ากำลังไมโครเวฟที่ป้อน และระยะเวลาในการทำความร้อนที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้การกระจายอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น

ส.ส.ท. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น) หรือ ส.ส.ท.,
ily 2011, v .67-72



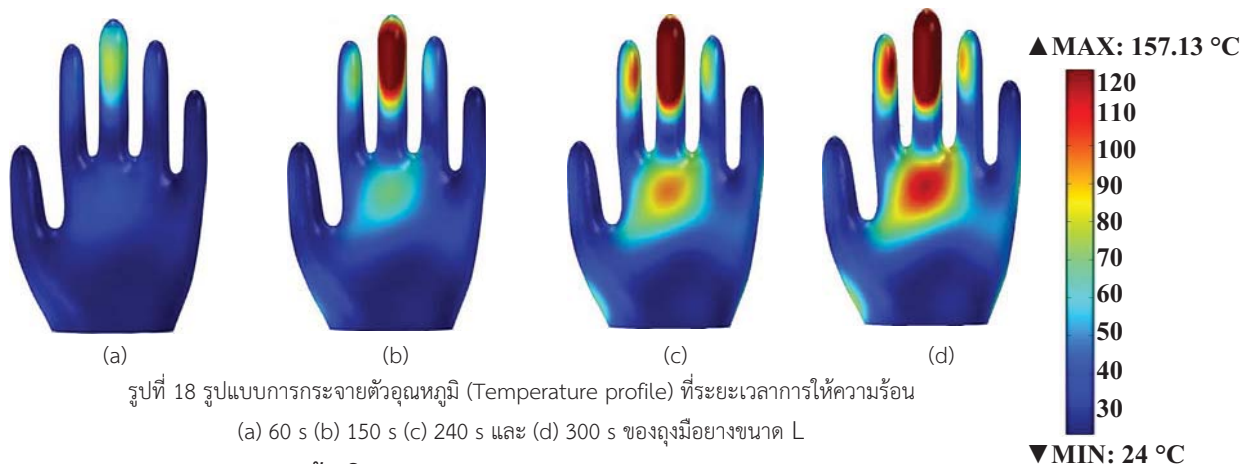
รูปที่ 16 รูปแบบการกระจายตัวอุณหภูมิ (Temperature profile) ที่ระยะเวลาการให้ความร้อน

(a) 60 s (b) 150 s (c) 240 s และ (d) 300 s ของถุงมือขนาด S



รูปที่ 17 รูปแบบการกระจายตัวอุณหภูมิ (Temperature profile) ที่ระยะเวลาการให้ความร้อน

(a) 60 s (b) 150 s (c) 240 s และ (d) 300 s ของถุงมือขนาด M



รูปที่ 18 รูปแบบการกระจายตัวอุณหภูมิ (Temperature profile) ที่ระยะเวลาการให้ความร้อน

(a) 60 s (b) 150 s (c) 240 s และ (d) 300 s ของถุงมือขนาด L

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] วราภรณ์ขจรไชยกูล, (2549). ยางธรรมชาติ: การผลิตและการใช้งาน, สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.), 2549.
- [2] ทนงค์ศักดิ์ วัฒนา และ ศุภัสสรณ์ หลิมเฮงฮะ (2011). เทคโนโลยีการผลิตถุงมือทางการแพทย์ (Medical latex glove), Technology Promotion Association (Thailand-Japan), วารสารส่งเสริมเทคโนโลยี สำนักพิมพ์
- [3] Metaxas, A.C. (1991). Industrial Microwave Heating. Peter Peregrinus Ltd., London. 1991.
- [4] Klinbun W. and Rattanadecho P. (2012). Numerical model of microwave driven convection in multi-layer porous pack bed using a rectangular waveguide (effects of layers configuration, layered thickness and frequency), *ASME Journal of Heat Transfer*, vol. 134, April 2012, pp. 042605-1-10.

- [5] Bovtun, V., Stark, W., Kelm, J., Porokhonsky, V., Yakimenko, Y. (2001). Microwave dielectric properties of rubber compounds undergoing vulcanization, *KGK-Kautschuk and Gummi Kunststoffe*, vol.55, 2001, pp. 673-678.
- [6] Martin, D., Ighigeanu, D., Mateescu, E., Craciun, G., Ighigeanu, A. (2002). Vulcanization of rubber mixtures by simultaneous electron beam and microwave irradiation, *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 65(1), August 2002, pp. 63-65.
- [7] Doo-ngam, N., Rattanadecho, P., and Klinklai, W. (2007). Microwave pre-heating of natural rubber using a rectangular wave guide (MODE: TE₁₀), *Songklanakarin Journal Science and Technology*, vol. 29(6), November 2007, pp. 1599-1608.
- [8] Makul, N. and Rattanadecho, P. (2010). Microwave pre-curing of natural rubber-compounding using a rectangular wave guide, *International Communication in Heat and Mass Transfer*, vol.37(7), April 2010, pp. 914-923.
- [9] พรรณสุนันท์ เจียรรุ่งแสง (2000). การลดปริมาณโปรตีนของยางธรรมชาติโดยโปรตีเอสร่วมกับพลังงานไมโครเวฟ, วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. วิทยาศาสตร์ (เทคโนโลยีชีวภาพ), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [10] Narumitbowonkul, U., P. Keangin, P. and Rattanadecho, P. (2015). Numerical and experimental analysis of temperature distribution and electric field in a natural rubber glove during microwave Heating, *ICMETA 2015 : International Conference on Mechanical Engineering*, Singapore, March, 29-30, 2015.
- [11] Olmstead, W.E. and Brodwin, M.E. (1997). A model for thermocouple sensitivity during microwave heating, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 40(7), May 1997, pp. 1559-1565.
- [12] Potter, D. (1996). Measuring temperature with thermocouples - a tutorial, *National Instruments Corporation*, March 1996, pp. 1-13.
- [13] Wessapan, T., Srisawatdhisukul, S. and Rattanadecho, P. (2011). The effects of dielectric shield on specific absorption rate and heat transfer in the human body exposed to leakage microwave energy, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol.38, December 2010, pp. 255-262.
- [14] Wessapan, T. and Rattanadecho, P. (2013). Specific absorption rate and temperature increase in the human eye due to electromagnetic fields exposure at different frequencies, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 64, September 2013, pp. 426- 435.
- [15] Wessapan, T. and Rattanadecho, P. (2014). Influence of ambient temperature on heat transfer in the human eye during exposure to electromagnetic fields at 900 MHz, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 70, March 2014, pp. 378- 388.
- [16] COMSOL Multiphysics Reference Guide 1998–2012 COMSOL Protected by U.S. Patents 7,519,518; 7,596,474; and 7,623,991.
- [17] ศ.ดร. ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช (2551). หนังสือพื้นฐานการทำ ความ ร้อน ด้วยไมโครเวฟ สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
- [18] Rands, R.D., Ferguson W.J. & Prather, J.L. (1944). Specific heat and increases of entropy and enthalpy of the synthetic rubber GR-S from 0° to 330° K. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, vol. 33, July 1994, pp. 63-70.
- [19] Khalid, K.B. (1992). Microwave dielectric properties of hevea rubber latex. *Microwave Conference, APMC 92.*, vol. 2, pp. 611- 616.
- [20] Hassan, J., Khalid, K., Mohammad, W. & Yusoff, D.W. (1997). Microwave dielectric properties of hevea rubber latex in the temperature range of - 30°C to 50°C, *Pertanika Journal of Science & Technology*, vol. 5 (2), April 1996, pp. 179-190.
- [21] Sridee, J. (2006). Rheological properties of natural rubber latex, *A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Engineering in Polymer Engineering Suranaree University of Technology Academic* 2006, ISBN 974-533-588-6
- [22] Ortiz-Serna, P., Diaz-Calleja, R., Sanchis, M.J., et al. (2010). Dynamics of natural rubber as a function of frequency, temperature, and pressure. A dielectric spectroscopy investigation, *Macromolecules*, vol. 43 (11), May 2010, pp. 5094-5102.