

การวิเคราะห์กระบวนการให้ความร้อนในวัสดุไดอิเล็กตริก โดยใช้เตาไมโครเวฟชนิด สายพานลำเลียงแบบต่อเนื่อง

Analysis of Heating Process in Dielectric Materials Using A Continuous Microwave Belt Furnace

ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช ณัฐวุฒิ สุวรรณภูมิ สมศักดิ์ วงษ์ประดับไชย สุขนัม ปิยโชติ
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต คลองหลวง ปทุมธานี 10210

โทรศัพท์ 02 5643001-9 9 ต่อ 3153 Email: ratphadu@engr.tu.ac.th Webpage: <http://www.engr.tu.ac.th/~ratphadu>

ดวงเดือน อางองค์

นักวิจัยประจำศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC)

ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) อุทยานวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทย

114 ถ.พหลโยธิน กม.42 ต.คลองหนึ่ง อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120 โทรศัพท์ 0-2564-6500

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับจลนศาสตร์ของกระบวนการอบแห้งวัสดุไดอิเล็กตริกหรือชิ้นงานทดสอบชนิดต่างๆ โดยใช้เตาไมโครเวฟชนิดสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่อง โดยมีพารามิเตอร์ที่ศึกษาก็คือผลของความเร็วของสายพานลำเลียง เวลาที่ใช้ในการรับคลื่นไมโครเวฟ ขนาดของวัสดุทดสอบ กำลังของแมกนีตรอน(800W/1 แมกนีตรอน) และทิศทางของการฉายคลื่นไมโครเวฟจากแมกนีตรอนที่มีต่อจลนศาสตร์ของกระบวนการอบแห้งและคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานทดสอบ ซึ่งวัสดุไดอิเล็กตริกหรือชิ้นงานทดสอบที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้จะประกอบไปด้วย คีโอยางพารา เซรามิกส์ และผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรจากการศึกษาพบว่าการใช้คลื่นไมโครเวฟเป็นแหล่งพลังงานนั้นจะสามารถช่วยประหยัดพลังงาน ลดระยะเวลาในการอบชิ้นงาน ชิ้นงานได้รับความร้อนทั่วถึงพร้อมกันทั้งปริมาตร และการกระจายของความชื้นในโครงสร้างเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ ผลที่ตามมาคือทำให้คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุดีขึ้นเมื่อเทียบกับวิธีให้ความร้อนแบบธรรมดา งานวิจัยนี้สามารถทำให้เราเข้าใจถึงปรากฏการณ์พื้นฐานบางอย่างที่สำคัญในกระบวนการทำความร้อนที่อาศัยพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟ ผลประโยชน์ที่จะได้รับตามมาก็คือฐานข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยครั้งนี้สามารถนำไปใช้ออกแบบระบบทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟที่มีสมรรถนะสูงที่สามารถผลิตได้เองภายในประเทศ

Abstract

In this researched project, the drying of dielectric materials by a continuous microwave belt furnace has been investigated experimentally. Most importantly, it focuses on the investigation of drying phenomena under microwave environment. In this analysis, the effect of the speed of continuous belt, irradiation time, sample sizes, number of magnetron (800W/1 magnetron), and direction of transmitted wave on overall drying kinetics and mechanical properties are studied. The samples are classified into three types including natural rubber, ceramics, and agricultural products. The results showed that microwave heating system have several advantages over the conventional method such as shorter processing times, volumetric dissipation of energy throughout a product, i.e., uniform temperature and uniform moisture content, high energy efficiency compared with other process and it offers improvements in product quality. The results presented here provide a basis for fundamental understanding of microwave-heating of various kinds of dielectric materials. With further quantitative validation of experimental data for the drying of dielectric materials by a continuous microwave belt furnace, it is expected that the data can be used to design the high performance of microwave-heating processes in Thailand.

1. บทนำ

เนื่องจากผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรและอุตสาหกรรมในประเทศนั้นมีหลายรายการที่ต้องผ่านกระบวนการผลิตที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งไม่ว่าจะเป็นทางตรงหรือทางอ้อม จะด้วยวิธีธรรมชาติหรือใช้วิธีใช้พลังงานจากแหล่งพลังงานอื่นมาใช้ มีผลิตภัณฑ์จำนวนมากไม่น้อยที่ใช้กรรมวิธีดังกล่าวแล้วยังผลิตได้ไม่ทันต่อความต้องการหรือหากต้องทำให้ทันตามความต้องการก็ต้องใช้ค่าใช้จ่ายสูงและได้ประสิทธิภาพยังไม่คุ้มค่าเท่าที่ควรอันส่งผลให้เกิดแนวคิดในการที่จะหากรรมวิธีที่จะช่วยในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ โดยให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพที่ดีสะอาดและใช้พลังงานคุ้มค่า รวมไปถึงถึงระยะเวลาในการอบให้สั้นที่สุดเพื่อที่จะได้ผลิตภัณฑ์จำนวนมากในเวลาที่สุดเร็ว กรรมวิธีการอบแห้งนั้นโดยวัตถุประสงค์ในการทำนั้นก็เพื่อรักษาผลิตภัณฑ์ให้มีอายุยืนยาวขึ้นสำหรับผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร เพื่อไล่ความชื้นซึ่งเป็นองค์ประกอบที่ไม่ต้องการ เช่นในการอบดินก่อนที่จะนำดินไปเผาเป็นผลิตภัณฑ์ต่อไป หรือในยางเช่นไล่ความชื้นเพื่อที่จะทำให้ตัวยางแห้งเพื่อที่จะได้นำไปแปรรูปต่อไป การใช้กรรมวิธีการอบแห้งโดยกรรมวิธีการทางธรรมชาติเช่นการตากแดดนั้นก่อให้เกิดปัญหาต่อผลิตภัณฑ์มาก อันเนื่องมาจากผลิตภัณฑ์ถูกแมลงหรือสัตว์ต่าง ๆ มาทำลายเกิดเชื้อรา รวมไปถึงความไม่สม่ำเสมอของพลังงานทางธรรมชาติทำให้การอบแห้งผลิตภัณฑ์มีคุณภาพที่ไม่แน่นอน ส่วนการอบแห้งโดยใช้พลังงานที่เป็นลมร้อนซึ่งใช้กันอย่างกว้างขวางนั้นมักจะทำให้คุณสมบัติทางกายภาพและคุณภาพผลิตภัณฑ์เปลี่ยนแปลงไป ทั้งนี้เพราะใช้อุณหภูมิที่สูงมากรวมทั้งระยะเวลาที่ใช้ยาวนานเกินไปรวมถึงการใช้พลังงานที่ไม่คุ้มค่าไม่เต็มประสิทธิภาพเนื่องจากการสูญเสียในเรื่องพลังงานความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อมมาก การอบแห้งส่วนใหญ่จะใช้หลักการถ่ายเทความร้อนโดยอาศัยความแตกต่างของอุณหภูมิที่บริเวณผิวหน้าของผลิตภัณฑ์กับผิวชั้นในของผลิตภัณฑ์ ด้วยการให้ความร้อนจากผิวนอก ถ่ายเทเข้าสู่ผิวชั้นใน ซึ่งจากหลักการนี้มักจะทำให้สีของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนแปลงได้ง่าย ผลิตภัณฑ์อาจเกิดรอยร้าวเนื่องมาจากอิทธิพลของความดันแก๊สภายในวัสดุหรือการขยายตัวที่ไม่เท่ากันของโครงสร้างอันเนื่องมาจากการกระจายตัวของอุณหภูมิไม่สม่ำเสมอและผลิตภัณฑ์อาจเกิดรอยไหม้เนื่องจากการกระจายตัวของอุณหภูมิไม่สม่ำเสมอตลอดทั้งผลิตภัณฑ์ส่งผลให้อุณหภูมิผลิตภัณฑ์บางส่วนสูงมากจนกระทั่งเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายใน

ทั้งหมดที่กล่าวมานี้เป็นผลเสียที่เกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์เนื่องจากการอบแห้งโดยทั่ว ๆ ไป ดังนั้นจึงมีการพัฒนาการอบแห้งขึ้นมาใหม่โดยที่ผลิตภัณฑ์สามารถรักษาคุณภาพได้ดีเหมือนเดิมและในขณะเดียวกันก็สามารถไล่ความชื้นในผลิตภัณฑ์ออกมาได้มากและเร็วกว่าเดิมวิธีการนั้นก็คือ วิธีการอบแห้งไมโครเวฟ

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการนำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่คลื่นของไมโครเวฟ 0.3-300 GHz หรือ ในช่วงความยาวคลื่น 30 cm -0.3 mm มาใช้เป็นแหล่งพลังงานให้ความร้อนเพื่อใช้แปรรูปวัตถุต่าง ๆ ในทางอุตสาหกรรม การให้ความร้อนแก่วัตถุด้วยไมโครเวฟเป็นอีกวิธีหนึ่งที่น่าสนใจและไม่เหมือนวิธีการให้ความร้อนแบบเก่าที่ให้ความร้อนจากภายนอกผ่านผิววัตถุ รังสีไมโครเวฟมีความยาวคลื่นความถี่ในการทะลุทะลวงเท่ากับ 2 cm ในระหว่างที่รังสีไมโครเวฟผ่านเข้าไปในน้ำพลังงานของไมโครเวฟจะลดลงโดยจะเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนภายในน้ำ ซึ่งในการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟนั้นดีกว่าการ

ให้ความร้อนแบบเก่า คือการใช้อากาศร้อนหรือไอน้ำ ซึ่งจะมีปัญหาเกี่ยวกับคุณภาพของผลผลิตกันเนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของการกระจายอุณหภูมิและความชื้นภายในผลิตภัณฑ์นั้น

การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟจะอาศัยคุณสมบัติของการดูดกลืนพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟภายในผลิตภัณฑ์ ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่นำมาผ่านกระบวนการนี้ศัพท์ทางวิศวกรรมที่เกี่ยวกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเราเรียกว่าวัสดุไดอิเล็กตริก วัสดุไดอิเล็กตริกหมายถึงวัสดุทั้งชนิดที่มีโครงสร้างพื้นฐานทางจุลภาคมีลักษณะเป็นขั้วทางไฟฟ้า (dipoles) ซึ่งอันตรกิริยา (interaction) ระหว่าง dipoles และคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าส่งผลทำให้เกิดความร้อนภายในขึ้น (internal heat generation) ดังนั้นผลิตภัณฑ์จะกระจายความร้อนจากภายในออกสู่ผิวนอก ซึ่งหลักการนี้จะทำให้ผิวของผลิตภัณฑ์ไม่เสียหายหรือต่างไปจากเดิมมากนัก เนื่องจากการอบแห้งระบบนี้จะทำให้เกิดการระเหยของความชื้นภายในผลิตภัณฑ์เป็นไปอย่างรวดเร็วและมีการกระจายตัวของอุณหภูมิสม่ำเสมอ สามารถลดการเกิดรอยร้าวและรอยไหม้ในผลิตภัณฑ์ ซึ่งวิธีการอบแห้งระบบนี้จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการอบแห้งสำหรับงานอุตสาหกรรมต่อไป

พบว่างานวิจัยในกระบวนการอบแห้งด้วยพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟในระดับนานาชาติและระดับประเทศ ก็ยังมีการทำกันน้อยมาก อันเนื่องมาจากความซับซ้อนในปรากฏการณ์ สำหรับงานวิจัยที่ผ่านมาที่เกี่ยวกับกระบวนการทำความร้อนและอบแห้งในวัสดุประเภทต่าง ๆ โดยอาศัยพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟดังได้แสดงในเอกสารอ้างอิง [1] รวมถึงถึงผลงานวิจัยของผู้วิจัยเอง ดังได้แสดงในเอกสารอ้างอิง [2]-[6]

งานวิจัยหัวข้อนี้นับว่าเป็นงานวิจัยชิ้นแรกในระดับประเทศที่ศึกษากระบวนการอบแห้งโดยใช้เตาไมโครเวฟชนิดสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่อง การศึกษาจะเน้นวิธีการทดลองในห้องปฏิบัติการ เพื่อสังเกตพฤติกรรมของการของการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในกระบวนการอบแห้ง รวมถึงถึงคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุตัวอย่าง โดยใช้ระบบเตาไมโครเวฟชนิดสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่อง (Continuous microwave belt furnace) ความถี่ที่ใช้คือ 2.46 GHz กำลังสูงสุดของเครื่องที่ทำคือ 14x800 วัตต์ ซึ่งถือว่าเป็นระบบใหม่มีประสิทธิภาพสูงมากกว่าระบบไมโครเวฟปกติทั่ว ๆ ไป โดยพารามิเตอร์ที่ใช้ศึกษา คือผลของความเร็วยของสายพาน จำนวนของแมกนีตรอน และทิศทางการจ่ายคลื่น ซึ่งการศึกษาในครั้งนี้จะนำไปสู่การขยายผลในการศึกษาเชิงทฤษฎีโดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model) และระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical method) ในโอกาสต่อไป สำหรับเป้าหมายหลักของงานวิจัยครั้งนี้เพื่อที่จะสรุปเป็นภาพรวมได้ดังนี้

- เพื่อทำการศึกษากการอบแห้งด้วยระบบไมโครเวฟแบบสายพานลำเลียงต่อเนื่อง ซึ่งใช้ไมโครเวฟที่มีความถี่ 2450 MHz เป็นแหล่งพลังงาน
- เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในเชิงอุตสาหกรรมทางการเกษตรและอุตสาหกรรมอื่น ๆ ที่ใช้คลื่นไมโครเวฟเป็นแหล่งพลังงาน
- เพื่อทำการออกแบบสร้างระบบทางความร้อนที่อาศัยคลื่นไมโครเวฟเป็นแหล่งพลังงานโดยใช้วัสดุภายในประเทศได้ด้วยตนเองในอนาคต

2. ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับการทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

2.1 คุณสมบัติไดอิเล็กตริก (Dielectric property)

ความรู้เกี่ยวกับ dielectric property ของ วัสดุไดอิเล็กตริกหรือผลิตภัณฑ์ในกระบวนการไมโครเวฟมีความจำเป็นสำหรับการใช้ในการออกแบบอุปกรณ์ใช้งานด้านไมโครเวฟได้อย่างเหมาะสม การแผ่รังสีเนื่องจากไมโครเวฟนั้นเป็นรูปแบบหนึ่งของพลังงานที่สามารถเคลื่อนที่ผ่านช่องว่าง อากาศ และวัสดุต่างๆ เหมือนกับคลื่นแสง คลื่นไมโครเวฟจะประกอบไปด้วยสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า (การแผ่รังสีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า) แต่จะแตกต่างจากแสงตรงที่มีค่าความถี่ที่ต่างกัน

ในการที่จะควบคุมความร้อนของวัสดุไดอิเล็กตริก อันเนื่องมาจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าหรือไมโครเวฟ เราจำเป็นต้องทราบคุณสมบัติการดูดซับพลังงานของคลื่นไมโครเวฟ โดยเราจะเริ่มจากการกำหนด dielectric permittivity ของ วัสดุไดอิเล็กตริกเป็น

$$\varepsilon = \varepsilon' + j\varepsilon'' = \varepsilon_0(\varepsilon_r' + j\varepsilon_r'') = \varepsilon_0\left(\varepsilon_r' + j\frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0}\right) \quad [1]$$

เมื่อ $j = \sqrt{-1}$, ε คือ complex dielectric permittivity (โดยทั่วไปเรียก dielectric constant) และเป็นคุณสมบัติของวัสดุใด ๆ ที่อธิบายถึงความสามารถในการดูดซับ ส่งผ่าน และ สะท้อนพลังงานจากบางส่วนของคลื่นไมโครเวฟ โดย $\varepsilon_0 = 8.86(10^{-12} \text{ F/m})$ คือ permittivity ของที่ว่าง (free space), ε_r' คือส่วนที่เป็นจำนวนจริงของ relative permittivity หรือ relative dielectric constant ซึ่งเป็นตัวบ่งบอกถึงปริมาณการสะท้อนกลับของคลื่นไมโครเวฟจากผิวของวัสดุไดอิเล็กตริก และปริมาณคลื่นไมโครเวฟที่ส่งผ่านวัสดุไดอิเล็กตริก ว่ามีมากเท่าไร ε_r'' คือส่วนจินตภาพ โดยทั่วไปเรียก dielectric loss factor ซึ่งจะบ่งบอกถึงความสูญเสียพลังงานภายในชั้นทดสอบ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือวัสดุสามารถดูดซับพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟจากภายนอกที่ผ่านเข้ามาแล้วสามารถเปลี่ยนแปลงเป็นพลังงานความร้อนได้เท่าไร และ σ คือค่าการนำไฟฟ้า (electric conductivity) ความสัมพันธ์ระหว่าง dielectric loss factor กับค่า conductivity สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\varepsilon'' = \frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0} \quad [2]$$

เมื่อ ω คือ ความเร็วเชิงมุมของคลื่นไมโครเวฟ (angular frequency) σ คือค่าการนำไฟฟ้า และ ε_r'' แสดงถึงความสูญเสียเชิงกล โดยสามารถยุบรวมกันเป็นตัวแปรใหม่เพื่อความสะดวกเรียกว่า loss tangent coefficient, $\tan \delta$:

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'} = \frac{\sigma}{\omega\varepsilon_r'\varepsilon_0} \quad [3]$$

dielectric loss tangent coefficient ($\tan\delta$) เป็นอีกตัวแปรที่สำคัญตัวหนึ่งที่ใช้อธิบายความสามารถในการผลิตความร้อนภายในวัสดุไดอิเล็กตริก ในขณะที่ดูดกลืนพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟ Von Hippel [7] ได้ทำตารางค่า dielectric property สำหรับ วัสดุไดอิเล็กตริกชนิดต่างๆ (เช่น คริสตัล เซรามิกส์ แก้ว น้ำ พลาสติก ยางมะตอย ซีเมนต์ และ ไม้ เป็นต้น) ในช่วงของความถี่ และอุณหภูมิ $100 < f < 10^{10}$ และ $12 < T < 200^\circ\text{C}$ ตามลำดับ

2.2 ความยาวคลื่นและความลึกในการทะลุทะลวง (Wavelength and penetration depth)

ค่า dielectric constant และ loss tangent coefficient สามารถใช้ประมาณความยาวคลื่นภายในวัสดุไดอิเล็กตริกและความลึกในการทะลุทะลวงได้ ความยาวคลื่นในวัสดุไดอิเล็กตริก สามารถคำนวณได้จาก

$$\lambda_{\text{mg}} = \frac{2\pi}{\frac{2\pi f}{v} \sqrt{\varepsilon_r' \sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'}\right)^2} + 1}} = \frac{2\pi}{\frac{2\pi f}{v} \sqrt{\frac{\varepsilon_r' \sqrt{1 + (\tan \delta)^2} + 1}{2}}} \quad [4]$$

จากสมการข้างบนนี้จะเห็นว่าความยาวคลื่นภายในวัสดุไดอิเล็กตริกจะลดลงหากวัสดุมีค่า dielectric loss factor และค่าที่มีค่าเพิ่มมากขึ้น ความลึกในการทะลุทะลวง หรือ ระยะทางที่สนามไฟฟ้าทะลุเข้าไปได้ (penetration depth) สามารถคำนวณได้จาก (Rattanadecho [5])

$$D_p = \frac{1}{\frac{2\pi f}{v} \sqrt{\varepsilon_r' \sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'}\right)^2} - 1}} = \frac{1}{\frac{2\pi f}{v} \sqrt{\frac{\varepsilon_r' \sqrt{1 + (\tan \delta)^2} - 1}{2}}} \quad [5]$$

พบว่าเมื่อค่า dielectric constant และ loss tangent coefficient เปลี่ยน ความลึกในการทะลุทะลวงและสนามไฟฟ้าภายในวัสดุไดอิเล็กตริกจะเปลี่ยนด้วย คลื่นไมโครเวฟสามารถทะลุผ่านวัสดุไดอิเล็กตริก จะถูกดูดซับและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนซึ่งเราเรียกว่า การกำเนิดปริมาณความร้อนภายในต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (volumetric internal heat generation) Q โดย ปริมาณความร้อนภายในต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรนั้นสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กภายในวัสดุไดอิเล็กตริก ดังแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้ (Ratanadecho et al [4])

$$Q = \omega\varepsilon_0\varepsilon_r''E^2 = 2\pi \cdot f \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r'(\tan \delta)E^2 \quad [6]$$

เมื่อ E คือค่าความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

จากสมการด้านบน ค่าพลังงานไมโครเวฟที่ถูกดูดซับจะแปรผันตรงกับค่าของสนามไฟฟ้า ค่า dielectric loss factor และค่ากำลังสองของสนามไฟฟ้า พบว่าหากค่า dielectric constant และค่า dielectric loss tangent coefficient ของวัสดุไดอิเล็กตริก มีค่ามากจะส่งผลให้การดูดซับพลังงานจากไมโครเวฟ และปริมาณความร้อนเกิดขึ้นมากขึ้นตาม แต่ถ้าค่า dielectric constant และค่า dielectric loss tangent coefficient มีค่าน้อย, คลื่นไมโครเวฟจะทะลุผ่านวัสดุไดอิเล็กตริกหรือชั้นงานทดสอบโดยไม่เกิดความร้อนขึ้น สมการ [6] มีความสำคัญในการศึกษาความสามารถในการดูดซับพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟของวัสดุไดอิเล็กตริกเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้าที่ความถี่สูง อย่างไรก็ตามอันตักิริยาระหว่างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและวัสดุไดอิเล็กตริกก็ขึ้นอยู่กับ dielectric property ของวัตถุนั้นด้วย หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ dielectric property ขึ้นอยู่กับการนำไมโครเวฟไปประยุกต์ใช้งานในกระบวนการต่างๆ เช่น การทำความร้อน การอบแห้ง หรือการหลอมเหลว เป็นต้น (Ratanadecho et al. [2]-[5])

3. อุปกรณ์ทดลอง

รูปที่ 1ก) แสดงเตาอบไมโครเวฟชนิดสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่องซึ่งมีความถี่ใช้งานเท่ากับ 2.46 GHz มีจำนวนแมกนีตรอนทั้งสิ้น 14 ตัว กำลังสูงสุดของเครื่องที่ทำได้อคือ 14x800 วัตต์ (800W/1 แมกนีตรอน)

การที่เครื่องอบไมโครเวฟตัวนี้เป็นแบบสายพานต่อเนื่อง เนื่องจากตัวเครื่องนั้นเน้นไปในรูปแบบการทำงานที่ต้องการความต่อเนื่องของกระบวนการ ใช้ในการที่จะผลิตชิ้นงานในปริมาณมาก สามารถที่จะนำตัวชิ้นงานมาอบได้อย่างต่อเนื่อง ทำให้มีข้อได้เปรียบในเรื่องของการไม่ต้องเสียเวลาในการที่จะปิด หรือเปิดเครื่องเมื่อทำการอบ และตัวชิ้นงานก็จะได้รับการคลีนไมโครเวฟอย่างทั่วถึงและมีช่วงเวลารับคลื่นมากหรือรับคลื่นน้อยได้ตามต้องการโดยการปรับความเร็วของสายพาน รวมทั้งสามารถควบคุมทิศทางของการจ่ายคลื่นไมโครเวฟลงบนชิ้นงานทดสอบได้โดยการควบคุมตำแหน่งการปิดเปิดแมกนีตรอนทั้ง 14 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 1 ข) สำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณความชื้นที่หายไปทำได้โดยการวัดน้ำหนักชิ้นงานทดสอบโดยใช้ตาชั่งที่มีความเที่ยงตรงสูง ทั้งก่อนและหลังผ่านกระบวนการสำหรับอุณหภูมิของชิ้นงานทดสอบสามารถวัดได้ด้วยกล้องอินฟราเรด (infrared camera) ดังแสดงในรูปที่ 2 ในการวิเคราะห์ถึงโครงสร้างชิ้นงานทดสอบในระดับจุลภาคจะใช้เครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM) ดังแสดงในรูปที่ 3 ส่วนการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงกลจะใช้เครื่องทดสอบความแข็งแรงของชิ้นงาน (3-Point Bending) ดังแสดงในรูปที่ 4



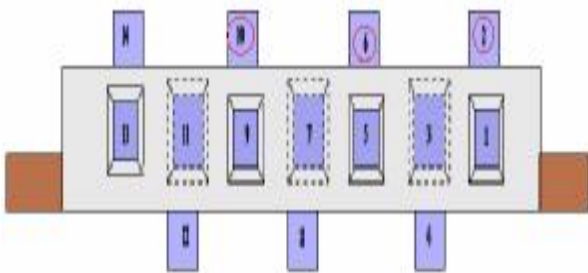
รูปที่ 3 Scanning Electron Microscopy (SEM)



รูปที่ 4 รูปเครื่องทดสอบความแข็งแรงของชิ้นงาน (3-Point Bending)



รูปที่ 1 ก) รูปเตาอบไมโครเวฟชนิดสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่อง
(A Continuous Microwave Belt Furnace)



รูปที่ 1 ข) ภาพร่างที่มองจากด้านข้างของเตาไมโครเวฟ
(ตัวเลขกำกับหมายถึงตำแหน่งที่ติดตั้งแมกนีตรอน)



รูปที่ 2 รูปเครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด

4. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

ชิ้นงานทดสอบที่ใช้ศึกษาในครั้งนี้ คือ ยางพาราที่ขึ้นรูปหนา 3 , 6 และ 9 ซม. และดินเซรามิกสีขาวเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความหนากับการทะลุทะลวงของคลื่นไมโครเวฟรวมถึงศึกษาถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์และโครงสร้างในระดับจุลภาคกับคุณสมบัติเชิงกล

4.1 ยางพารา

ยางพาราที่นำมาทำการศึกษาในครั้งนี้ได้ทำการผลิตเป็นชิ้นงานทดสอบยางแท่งตามข้อมูลการทำยางแผ่นของกรมวิชาการเกษตร ซึ่งในการทดลองนี้ตัวแปรหลักที่เราสนใจศึกษาคือขนาดของความหนาชิ้นงานทดสอบ และจำนวนแมกนีตรอนที่ทำการอบว่าส่งผลอย่างไรต่อตัวผลิตภัณฑ์ยาง โดยผลที่ได้จากการทดลองที่นำมาแสดงในรายงานวิจัยฉบับนี้เป็นข้อมูลบางส่วนที่ผู้วิจัยนำมาแสดงเป็นแนวโน้มให้เห็นพฤติกรรมที่เกิดขึ้น ซึ่งผลการทดลองที่ได้ออกมาจะแสดงในรูปที่ 5-8

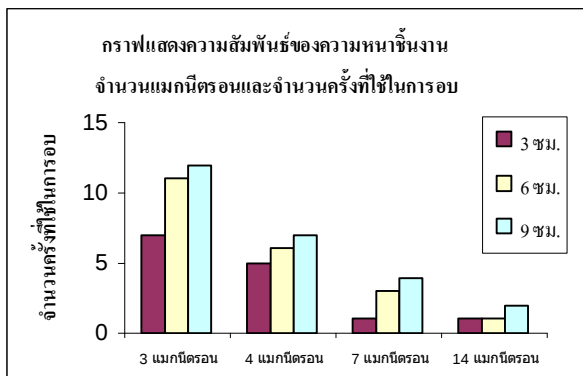
จากรูปที่ 5 เมื่อพิจารณาชิ้นงานทดสอบที่ความหนาเดียวกัน ณ เปอร์เซนต์การสูญเสียน้ำหนักคงที่ (Weight loss constant) เท่ากับ 20 % จะพบว่าเมื่อเปิดจำนวนแมกนีตรอนเพิ่มขึ้น จำนวนครั้งหรือระยะเวลาที่ใช้ในการอบจะลดน้อยลงลงตามไปด้วย ซึ่งจากความสัมพันธ์ดังกล่าวก็สามารถสรุปได้ว่า ความหนาของชิ้นงานทดสอบจะแปรผันตามระยะเวลาที่ใช้ในการอบ ส่วนจำนวนแมกนีตรอนจะแปรผกผันกับระยะเวลาที่ใช้ในการอบ

เนื่องจากการเพิ่มจำนวนแมกนีตรอนเปรียบเสมือนการเพิ่มช่วงระยะเวลาในการให้พลังงานกับชิ้นงานทดสอบ

ดังนั้นเมื่อมีกำลังคลื่นไมโครเวฟต่อเนื่องจะส่งผลให้ความสามารถในการสร้างความร้อนในชิ้นงานทดสอบสูง ทำให้ชิ้นงานทดสอบเกิดความร้อนขึ้นอย่างรวดเร็วส่งผลต่อการกลายเป็นไอ ไอที่สะสมภายในทำให้เกิดความดันไภายในผิวชั้นในวัสดุและดันความชื้นออกมาสู่ผิวและระเหยออกสู่บรรยากาศภายนอกได้อย่างรวดเร็วกว่ากรณีเปิดจำนวนแมกนีตรอนน้อย

จากรูปที่ 6 แสดงถึงระดับอุณหภูมิของชิ้นงานทดสอบเมื่อพิจารณาที่จำนวนแมกนีตรอนเท่ากันและส่งจ่ายคลื่นไมโครเวฟที่

ตำแหน่งเดียวกัน แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานทดสอบบาง จะมีอุณหภูมิที่ผิวสูงกว่าชิ้นทดสอบที่หนา เพราะการส่งผ่านความร้อนจะส่งผ่านจากผิวชั้นในไปสู่ผิวชั้นนอก ซึ่งชิ้นงานทดสอบบางสามารถส่งผ่านความร้อนได้เร็วกว่าเนื่องจากระยะทางสั้นกว่าและมีค่าความต้านทานเชิงความร้อนที่ต่ำกว่า และอีกกรณีหนึ่งคือตัวชิ้นงานทดสอบบางมีความชื้นภายในน้อยกว่าทำให้สูญเสียพลังงานในการทำความร้อนให้กลายเป็นไอน้ำน้อยกว่า ดังนั้นอุณหภูมิที่ผิวของชิ้นงานทดสอบบางจึงสูงกว่าในช่วงเวลาแรก แต่เมื่อผ่านไปช่วงเวลาหนึ่ง อุณหภูมิของชิ้นงานทดสอบที่ความหนาต่างๆจะมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน เพราะปัจจัยการสูญเสียพลังงานในการส่งผ่านความร้อนให้ผิวชั้นนอกและความชื้นในชิ้นงานทดสอบหมดไป และเมื่อวิเคราะห์ถึง dielectric property พบว่าเวลาหรือจำนวนครั้งที่ใช้ในการอบมากขึ้นทำให้ความชื้นมีค่าเข้าใกล้จุดสมดุลทำให้ค่า dielectric property บางตัวเช่นค่า dielectric loss factor ลดลงส่งผลให้ค่าพลังงานไมโครเวฟที่ถูกดูดซับและปริมาณความร้อนภายในต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรลดลง ดังแสดงความสัมพันธ์ในสมการที่ 6

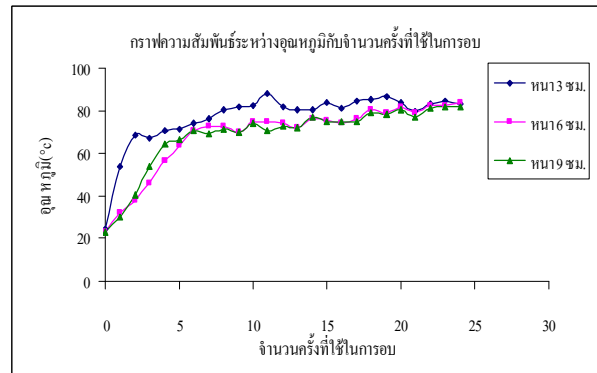


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนากับเวลาที่ใช้ออบ ณ เปอร์เซนต์การสูญเสียน้ำหนักคงที่ (Weight loss constant) เท่ากับ 20 %

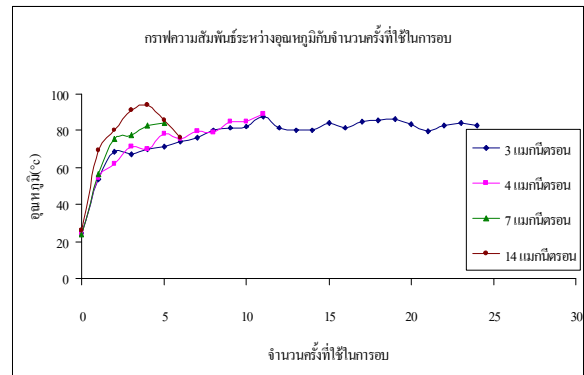
จากรูปที่ 7 แสดงถึงระดับอุณหภูมิของชิ้นงานทดสอบเมื่อพิจารณาที่ความหนาเดียวกัน พบว่าเมื่อจำนวนแมกนีตรอนเพิ่มขึ้น อุณหภูมิก็จะเพิ่มมากขึ้นด้วย เนื่องมาจากจำนวนแมกนีตรอนที่เพิ่มขึ้นจะเพิ่มระยะเวลาในการรับพลังงานของชิ้นงานทดสอบ ส่งผลให้การดูดซับพลังงานและปริมาณความร้อนในชิ้นงานทดสอบมีค่าสูงขึ้น ซึ่งทำให้ทำให้อุณหภูมิมีค่าเข้าใกล้จุดสมดุลอย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามในกรณีที่เปิดแมกนีตรอนหลายตัวพร้อมๆกัน อาจทำให้ผลิตภัณฑ์เสียหายได้ หากไม่มีการควบคุมดูแลอย่างใกล้ชิด ในระบบทางอุตสาหกรรมอาจจะต้องติดตั้งระบบควบคุมแบบอัตโนมัติเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าว จากรูปที่ 6 และ 7 แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ จะสอดคล้องกับลักษณะการดูดกลืนพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟ คุณสมบัติเชิงไดอิเล็กตริก (dielectric property) กล่าวคือมันจะมีลักษณะเป็นคลื่นซึ่งจะมีลักษณะเพิ่มขึ้นหรือลดลงขึ้นอยู่กับความคาบเกี่ยว (interference) ของคลื่นที่ส่งเข้ามา (transmitted wave) และคลื่นที่สะท้อน (reflected wave) เป็นสำคัญ

นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อพิจารณาที่จำนวนแมกนีตรอนเท่ากันที่สภาวะการทดสอบอื่นๆเดียวกัน แต่ตำแหน่งส่งจ่ายคลื่นไมโครเวฟจากแมกนีตรอนที่ต่างกันส่งผลทำให้ระดับอุณหภูมิของชิ้นงานทดสอบแตกต่างกันด้วย อันเนื่องมาจากอิทธิพลของความสามารถในการทะลุ

ทะลุของคลื่นดังแสดงในสมการที่ 5 และความความคาบเกี่ยวของคลื่นดังได้อธิบายข้างต้นทำให้ระดับพลังงานที่ถูกกลืนภายในชิ้นงานทดสอบแตกต่างกัน ซึ่งรายละเอียดเกี่ยวกับการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีสามารถอ่านได้จากผลงานของผู้วิจัยที่ผ่านมา (Ratanadecho et al [2-5])



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับจำนวนครั้งที่ใช้ในการอบ (3 แมกนีตรอน)



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับจำนวนครั้งที่ใช้ในการอบ (ความหนาชิ้นงานทดสอบ 3 มม)

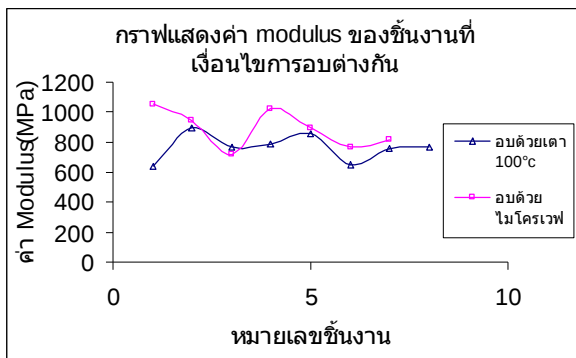
4.2 ดินเซรามิกสีขาว (whiteware)

ในที่นี้จะทำการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ที่ทำจากดินเซรามิกสีขาว เมื่อผ่านการอบด้วยคลื่นไมโครเวฟ จากนั้นทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลดังกล่าวกับวิธีอบแบบธรรมดาโดยใช้ลมร้อนทั่วไป ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวมีดังนี้

เนื่องจากการนำผลิตภัณฑ์มาอบด้วยกระบวนการทางไมโครเวฟนั้นใช้ระยะเวลาเร็วกว่าวิธีการอบด้วยลมร้อนมากจนอาจทำให้โครงสร้างภายในผลิตภัณฑ์เปลี่ยนไป ดังนั้นจึงมีแนวคิดในการที่จะทำการตรวจสอบถึงผลกระทบที่เกิดกับกระบวนการทางไมโครเวฟว่าจะส่งผลดีหรือผลเสียต่อความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์หรือไม่ ซึ่งวิธีการที่เลือกมาทำการทดสอบในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้คือวิธีการ 3 point bending โดยทำการทดสอบดังกล่าวโดยใช้อุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 8 ซึ่งผลการทดลองที่ได้สามารถนำมาเขียนเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 8 ดังนี้

จากข้อมูลจากรูปที่ 8 แสดงค่า Modulus ของผลิตภัณฑ์ ซึ่งสรุปได้ว่ากรอบด้วยไมโครเวฟผลิตภัณฑ์จะมีความแข็งแรงมากกว่าการอบด้วยเตาอบ 100 °C เนื่องจากค่าผลิตภัณฑ์ที่อบด้วยไมโครเวฟเมื่อนำไปทดสอบจะได้ค่าเฉลี่ยของยังโมดูลัสสูงกว่าวิธีการอบด้วยเตาอบ

100 °C (ยังโมดูลัสของผลิตภัณฑ์จากไมโครเวฟได้ค่าเฉลี่ยประมาณ 888 MPa ส่วนยังโมดูลัสของเตาอบ 100 °C มีค่าประมาณ 765 MPa) สาเหตุดังกล่าวอาจวิเคราะห์ได้ว่าความสม่ำเสมอของอุณหภูมิและความชื้นในผลิตภัณฑ์ที่อบด้วยไมโครเวฟมีการจัดเรียงตัวทางโครงสร้างได้ดีกว่าวิธีการอบด้วยเตาอบ 100 °C แต่ก็ยังไม่สามารถที่จะอธิบายได้ชัดเจนนักเนื่องจากโครงสร้างภายในที่ได้จากการส่องกล้อง Scanning Electron Microscopy (SEM) นั้นยังสังเกตไม่เห็นความแตกต่างชัดเจน ดังนั้นอาจจะมีการทำการศึกษาเพิ่มเติมในกรณีดังกล่าวเพื่อหาข้อสรุปในโอกาสต่อไป



รูปที่ 8 แสดงค่า Modulus ของผลิตภัณฑ์

จากรูปที่ A-1 ในภาคผนวก A ในกระบวนการอบด้วยคลื่นไมโครเวฟสามารถบ่งบอกถึงการทะลุทะลวงของคลื่นได้เป็นอย่างดีสังเกตได้จากสีของผลิตภัณฑ์ เมื่อมีการเปิดจำนวนแมกนีตรอนที่ต่างกัน ในทุกรูปสังเกตพบว่าสีของผลิตภัณฑ์บริเวณตรงกลางจะมีสีเข้มกว่าบริเวณขอบด้านนอก เพราะการอบด้วยไมโครเวฟ จะส่งผ่านความร้อนโดยเริ่มจากชั้นในและกระจายความร้อนออกมาอย่างสม่ำเสมอสู่ผิวชั้นนอกอันเนื่องมาจากการดูดกลืนพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟมากกว่าบริเวณตรงกลางของผลิตภัณฑ์ทำให้มีอุณหภูมิสูงกว่าบริเวณอื่น ซึ่งส่งผลให้ของเหลวภายในเกิดการระเหยตัวและเกิดความดันภายในที่สูงขึ้นทำให้เกิดการขับเคลื่อนความชื้นภายในออกมาที่ผิวผลิตภัณฑ์อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ยังพบว่าเกิดการควบแน่นของไอบางส่วนที่บริเวณผิวนอกของผลิตภัณฑ์เนื่องจากผิวมีอุณหภูมิต่ำ ส่งผลให้ยังมีความชื้นปกคลุมที่บริเวณผิวชั้นนอก ทั้งที่ผิวชั้นในแห้งสม่ำเสมอแล้ว และถ้าเปรียบเทียบกับกรอบโดยทั่วไปด้วยวิธีธรรมดา เช่น การรมควันหรือตากแดด สีของผลิตภัณฑ์บริเวณผิวด้านนอกจะมีสีที่เข้มกว่าบริเวณผิวชั้นในผลิตภัณฑ์ เพราะเป็นการส่งผ่านความร้อนจากผิวนอกเข้าสู่ผิวชั้นในของผลิตภัณฑ์ โดยที่หากวัสดุมีความหนา ความแตกต่างของความชื้นในวิธีการธรรมดาจะมีสูงขึ้นจนอาจเกิดข้อเสียตรงที่หากต้องการทำให้ความชื้นภายในผิวชั้นในหมดไปก็อาจจะทำให้ผิวชั้นนอกของผลิตภัณฑ์ไหม้หรือผิวชั้นนอกไม่มีความชื้นแล้วแต่ผิวชั้นในยังคงมีความชื้นอยู่มาก ซึ่งในกรณีการอบด้วยคลื่นไมโครเวฟจะไม่เกิดปัญหาดังกล่าวเพราะการดูดกลืนพลังงานคลื่นไมโครเวฟจะเลือกเกิดเฉพาะบริเวณที่ผลิตภัณฑ์มีความชื้นมากเท่านั้น

ส่วนรูปที่ A-2 จากการส่องดูโครงสร้างภายในด้วยกล้อง Scanning Electron Microscopy (SEM) พบว่าการอบผลิตภัณฑ์ด้วยไมโครเวฟจะทำให้ผลิตภัณฑ์มีโครงสร้างเรียงตัวเป็นระเบียบดีกว่าเมื่อ

เทียบกับการอบแบบธรรมดา เนื่องจากมีการดูดซับพลังงาน การกระจายความร้อน และการกระจายความชื้นสม่ำเสมอทั้งผลิตภัณฑ์และคาดการณ์ได้ว่าการกระจายตัวของโครงสร้างในระดับจุลภาค และแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลในระดับที่มีความละเอียดสูงกว่านี้จะเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ และส่งผลทำให้คุณสมบัติเชิงกลดีกว่าด้วยสำหรับการศึกษาวิเคราะห์ในรายละเอียดมากกว่านี้ จะทำการศึกษาเพิ่มเติมร่วมกับนักวิจัยสายโพลิเมอร์ในโอกาสต่อไป

5. สรุปผลการทดลอง

รายงานวิจัยฉบับนี้ได้นำเสนอแนวคิดการนำพลังงานคลื่นไมโครเวฟมาใช้ในการบวนการแปรรูปผลิตภัณฑ์ ซึ่งเนื่องจากคลื่นไมโครเวฟสามารถส่งผ่านทะลุเข้าไปในวัสดุที่นำมาอบแห้ง ดังนั้น ความร้อนที่เกิดขึ้นในวัสดุที่กระจายสม่ำเสมอทำให้ความแห้งเป็นไปอย่างสม่ำเสมอในทุกตำแหน่งด้วยเหตุนี้ทำให้การควบคุมคุณภาพทำได้ง่าย เวลาที่ใช้ในกระบวนการมีระยะเวลาที่สั้นคือประมาณ หนึ่งในหกของกระบวนการอบแห้งโดยวิธีธรรมดา และถือได้ว่าเป็นเทคโนโลยีสะอาดที่น่าจะนำมาใช้กับภาคเกษตรกรรมภายในประเทศ โดยเฉพาะการแปรรูปผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรที่เน้นคุณภาพเพื่อการส่งออก

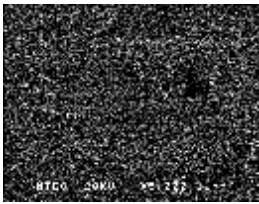
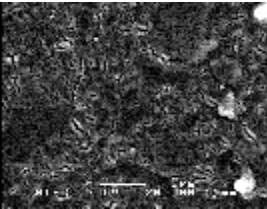
6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Metaxas, A.C. and Meridith, R.J., 1983, "Industrial Microwave Heating," Peter Peregrinus, Ltd., London.
- [2] Ratanadecho, P., 2002, "Influence of Irradiation Time, Particle Sizes and Initial Moisture Content During Microwave Drying of Multi-Layered Capillary Porous Materials." *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 124 (1), 151-161
- [3] Ratanadecho, P., 2002, "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(5), 992-996
- [4] Ratanadecho, P., Aoki, K. and Akahori, M., 2002, "The Characteristics of Microwave Melting of Frozen Packed Bed Using a Rectangular Wave Guide" *IEEE Transaction of Microwave Theory and Techniques*, Vol. 50(6), 1487-1494.
- [5] Ratanadecho, P., 2004, "The Theoretical and Experimental Investigation of Microwave Thawing of Frozen Layer Using Microwave Oven (Effects of Layered Configurations and Layered Thickness)" *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 47, 937-945.
- [6] Atong, D. and Clark, D.E, 2003, "The Effect of Reaction Parameters on Microwave Induced Combustion Synthesis of Al₂O₃TiC Composite Powders", *Microwave and Radio Frequency Applications*, American Ceramic Society, Westerville, Ohio, 207-220.
- [7] Von Hippel, A.R., 1954, "Dielectric Materials and Applications," MIT Press, Boston.

ภาคผนวก A

	จำนวนแมงนีตรอน			
ความหนา	3 ตัว	4 ตัว	7 ตัว	14 ตัว
3 ซม.				
6 ซม.				
9 ซม.				

รูปที่ A-1 แสดงลักษณะการแห้งตัวของชิ้นงานทดสอบที่สภาวะการทดสอบต่างๆ

	ยางอบด้วยไมโครเวฟ	ยางแผ่นรมควัน
กำลังขยาย 500 เท่า		
กำลังขยาย 5000 เท่า		
กำลังขยาย 20000 เท่า		

รูปที่ A-2 แสดงโครงสร้างระดับจุลภาคภายในของยางพาราที่วัดจาก SEM ที่กำลังการขยายต่างกัน