

# การวิเคราะห์การใช้พลังงานในกระบวนการอบแห้งวัสดุพรุนหลายชั้นโดยใช้ไมโครเวฟ ร่วมกับการพาความร้อนภายในท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม

## Analysis of Energy Consumption in Microwave and Convective Drying Process of Multi-Layer Porous Material Inside a Rectangular Wave Guide

วิโรจน์ จินดารัตน์, เกียรติขจร สุเวทเวทิน และ ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช \*

หน่วยวิจัยเพื่อการใช้ประโยชน์จากไมโครเวฟในงานวิศวกรรม (R.C.M.E.)

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ คลองหลวง ปทุมธานี 12120

โทร 0-2564-3001-9 โทรสาร 0-2564-3010 \*อีเมลล์ ratphadu@engr.tu.ac.th

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอการวิเคราะห์พลังงานโดยทำการทดลองในกระบวนการอบแห้งวัสดุพรุนหลายชั้นโดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับการพาความร้อนภายในท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม (โหมด TE<sub>10</sub>) และไมโครเวฟใช้งานในย่านความถี่ 2.45 GHz สำหรับวัสดุพรุนที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้กำหนดให้วัสดุพรุนเป็นองค์ประกอบของเม็ดแก้ว น้ำ และโพรงอากาศ ซึ่งตัวอย่างวัสดุทดสอบที่ใช้มี 2 ลักษณะ คือแพคเบดชั้นเดียวที่ใช้เม็ดแก้วขนาดเดียวกันหมด (มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 mm แพคเบดมีความลึก 50 mm (F bed) และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.4 mm แพคเบดมีความลึก 50 mm (C bed)) แพคเบดสองชั้นที่ใช้เม็ดแก้ว 2 ขนาดไว้ด้วยกันแต่อยู่คนละชั้น โดยแพคเบด F-C bed อนุภาคขนาดเล็กอยู่ด้านบนของอนุภาคขนาดใหญ่ (เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 mm อยู่ด้านบน (d = 0.15 mm,  $\delta$  = 10, 20, 25, 30, 40 mm) และเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.4 mm อยู่ด้านล่าง (d = 0.40 mm,  $\delta$  = 40, 30, 25, 20, 10 mm) และแพคเบด C - F อนุภาคขนาดใหญ่อยู่ด้านบนของอนุภาคขนาดเล็ก (เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.4 mm อยู่ด้านบน (d = 0.40 mm,  $\delta$  = 10, 20, 25, 30, 40 mm) และเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 mm อยู่ด้านล่าง (d = 0.150 mm,  $\delta$  = 40, 30, 25, 20, 10 mm) เช่นเดียวกัน จากการทดลองพบว่า ขนาดของอนุภาคของวัสดุพรุนที่ต่างกันมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงระดับการทะลุทะลวงผ่านและการดูดซับของพลังงานไมโครเวฟในวัสดุพรุน และพบว่าอนุภาคขนาดเล็กจะมีแรงดันคาพิลลารีสูงทำให้กระบวนการอบแห้งเป็นไปอย่างรวดเร็วกว่าเมื่อเทียบกับอนุภาคขนาดใหญ่

### Abstract

The presented paper investigated the energy analysis of heating of porous medium materials using microwave and convective air with a rectangular wave guide at frequency 2.45 GHz (mode:TE<sub>10</sub>). The multi-layer packed bed composed of glass beads, water and air. The samples are prepared in the two configurations in the : a single-layered packed bed

(uniform packed bed) with bed depth  $\delta$  = 50 mm (d = 0.15 mm (F bed) and d = 0.4 mm (C bed)) and a two-layered packed bed, respectively. The two-layered packed bed are arranged in different configurations in the: F-C bed (fine particles (d = 0.15 mm,  $\delta$  = 10-40 mm) overlay the coarse particles (d = 0.4 mm,  $\delta$  = 40-10 mm), and C-F bed (coarse particles (d = 0.40 mm,  $\delta$  = 10-40 mm) overlay the fine particles (d = 0.15 mm,  $\delta$  = 40-10 mm), respectively. The results show that variation of particle sizes changes the degree of penetration and rate of microwave power absorbed within the sample. Further, the small particle size leads to much higher capillary pressure resulting in a faster drying time.

### 1. บทนำ

ในปัจจุบันพลังงานที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งและการให้ความร้อนเป็นปัจจัยสำคัญในกระบวนการผลิตทั้งในภาคอุตสาหกรรมและภาคครัวเรือน นับวันราคาพลังงานยังมีมูลค่าสูงขึ้นดังนั้นการนำพลังงานมาใช้จึงมีการคิดค้นกระบวนการต่างๆ ที่จะทำให้ประสิทธิภาพการใช้พลังงานสูงสุดและสูญเสียน้อยที่สุด นั้นหมายถึงทำให้เงินลงทุนในกระบวนการผลิตลดต่ำลงมีผลกำไรมากขึ้นและเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันของผลิตภัณฑ์ในธุรกิจนั้นๆ ซึ่งจะเห็นได้ว่ากระบวนการอบแห้งในปัจจุบันนี้เป็นกระบวนการที่ยุ่ยากสลับซับซ้อนและประสิทธิภาพในการใช้พลังงานต่ำตลอดจนสิ้นเปลืองเงินทุนไปกับการบำรุงรักษาและไม่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

วัสดุพรุนที่นำมาทดสอบเป็นองค์ประกอบของเม็ดแก้ว น้ำ และโพรงอากาศ ถือว่าเป็นวัสดุแบบ Non-Hygroscopic Porous Media กล่าวคือความชื้นไม่ยึดอยู่กับโครงสร้างของอนุภาคของแข็งภายใต้พันธะทางเคมีและฟิสิกส์ ในการอบแห้งเพื่อลดความชื้นและศึกษาพฤติกรรมในการดูดซับพลังงานไมโครเวฟของวัสดุเพื่อเป็นพื้นฐานสำหรับการให้ความร้อนในช่วงเวลาต่างๆ ซึ่งมีตัวแปรที่สำคัญสามประการคือ ความชื้น ขนาดอนุภาค และอุณหภูมิ

ในงานวิจัยที่มีการวิเคราะห์พลังงานกระบวนการอบแห้งหรือให้ความร้อนด้วยพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟในระดับนานาชาติและระดับประเทศนั้นยังมีการทำการศึกษากันในส่วนเล็กๆ เช่นในตู้อบไมโครเวฟที่มีใช้ในครัวเรือนซึ่งจะสะดวกในการทดลองและนำมาทำการติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติมเช่น อุปกรณ์ให้ความร้อน (Heater) พัดลม (Fan) และอุปกรณ์เครื่องมือวัดต่างๆ สำหรับงานวิจัยในระดับนานาชาติที่ผ่านมาที่เกี่ยวกับกระบวนการทำความร้อนและอบแห้งวัสดุในประเภทต่างๆ ที่ใช้พลังงานไมโครเวฟ ได้แก่ G.P. Sharma และ Suresh Prasad [1] ได้ศึกษาการอบแห้งของกระเทียมที่กะเทาะเปลือกออกแล้วโดยใช้ลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ ซึ่งอุปกรณ์การอบแห้งที่ใช้เป็นตู้อบไมโครเวฟที่มีใช้ทั่วไป เพื่อเปรียบเทียบการสิ้นเปลืองพลังงาน (Specific Energy Consumption) J. Varith et al. [2] ได้ทำการอบแห้งลำไยด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนเพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของความชื้นและการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption) ที่ระดับอุณหภูมิ 40, 50 และ 60 °C กำลังไมโครเวฟ 100, 180, 300 และ 450 W S.Lakshmi et al. [3] ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบการใช้พลังงานในการหุงข้าวระหว่างการใช้ตู้อบไมโครเวฟ (Microwave Oven) หม้อหุงข้าวไฟฟ้า (Electric Rice Cooker) และการหุงข้าวด้วยความดัน (Pressure Cooker) ซึ่งใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิง

กระบวนการทำความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟในวัสดุพูน Rattanadecho [4] ได้ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของช่วงเวลากการให้ความร้อน ขนาดอนุภาคและความชื้นเริ่มต้นในกระบวนการอบแห้งวัสดุพูนที่ไม่อ้อมตัวโดยไมโครเวฟในก่อนาคคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม H. Feng et al. [5] ได้มีการอบแห้งแอปเปิ้ลโดยใช้ระบบไมโครเวฟสะเป้าเต็ดเบดเพื่อวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนและมวลสารโดยเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ B.Abbasi Souraki et al. [6] ได้ทำการอบแห้งกระเทียมด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนด้วยตู้อบไมโครเวฟขนาดเล็กเพื่อศึกษาถึงการดูดซับพลังงานไมโครเวฟที่ทำให้เกิดความร้อนขึ้นในกระบวนการอบแห้งตลอดถึงอิทธิพลของการกระจายความชื้นและอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในเนื้อของกระเทียม

ในกระบวนการอบแห้งทั่วไปโดยใช้ลมร้อนซึ่งมีการศึกษาวิจัยและพัฒนาอย่างยาวนาน Hironao Ogura et al. [7] ทำการศึกษาการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนที่เกิดขึ้นจากฮีทปั๊มทางเคมี (Chemical Heat Pump) ในการอบแห้งเซรามิกเพื่อหาประสิทธิภาพและต้นทุนของระบบ Z.B.Maroulis et al. [8] ศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ ในการอบแห้งโดยนำไปใช้ในการออกแบบระบบการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนชนิดสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง N.V.Men Shutina et al. [9] ได้หาประสิทธิภาพการใช้พลังงานในระบบการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนชนิดสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง Ebru Karak Akpınar [10] ได้วิเคราะห์ถึงพลังงาน (Energy) และเอ็กเซอร์จี (Exergy) ในการอบแห้งพริกแดงและมันฝรั่งแผ่น แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยเหล่านี้เป็นเพียงการศึกษาในวัสดุชั้นเดียว (Single Layered Materials) เท่านั้น สำหรับงานวิจัยที่ศึกษาถึงวัสดุพูนหลายชั้น (Multi Layered Materials) ยังมีการศึกษากันน้อย ซึ่งวัสดุพูนหลายชั้นนั้น

ยกตัวอย่างเช่น ถนน ซีเมนต์ วัสดุชีวมวลต่างๆ เป็นต้น โดย Rattanadecho และคณะ [4] ได้ทำการทดลองและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในระบบสองมิติ เพื่อศึกษาอิทธิพลขนาดอนุภาค ความชื้นเริ่มต้นและเวลาการให้ความร้อน ในกระบวนการอบแห้งวัสดุพูนหลายชั้น (ขนาดอนุภาคแต่ละชั้นไม่เท่ากัน) โดยใช้ไมโครเวฟก่อนาคคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม

ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปเป็นข้อมูลพื้นฐานต่อการทำความเข้าใจกระบวนการอบแห้งโดยใช้พลังงานไมโครเวฟได้ รวมทั้งใช้ในการออกแบบระบบจริงในทางปฏิบัติได้

## 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 สมการความรู้พื้นฐานของการทำความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ

พลังงานที่เกิดจากการหมุนของทั้งสองขั้วของวัสดุไดอิเล็กทริกอาจจะเรียกเป็นอย่างอื่นได้หลายชื่อเช่น ค่าความร้อนที่ผลิตขึ้นภายใน (Internal Heat Generation) หรือค่ากำลังการดูดซับ (Microwave Power Absorbed) เป็นต้น ซึ่งอาจจะเขียนเป็นรูปสมการที่นิยมใช้กันอยู่โดยทั่วไปดังนี้ [4]

$$Q = \omega \epsilon_0 \epsilon_r'' E^2 = 2\pi \cdot f \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r' (\tan \delta) E^2 \quad (1)$$

จากสมการที่ 1 เมื่อ  $E$  คือ ค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าในหน่วยโวลต์ต่อเมตร (V/m)  $\omega$  คือ ความเร็วเชิงมุมมีค่าเท่ากับ  $2\pi f$  ในหน่วยเรเดียนต่อวินาที (Rad/s)  $\epsilon_r'$  คือ relative dielectric constant ซึ่งบอกถึงคุณสมบัติของวัตถุใดๆ ที่อธิบายถึงความสามารถในการดูดซับ ส่งผ่านและสะท้อนพลังงานจากส่วนที่เป็นสนามไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟ โดย  $\epsilon_0$  คือ Dielectric Constant ของอากาศ และ  $\tan \delta$  คือ Dielectric Loss Tangent Coefficient ค่าพลังงานไมโครเวฟที่ถูกดูดซับจะแปรผันตรงกับค่าความถี่ของสนามไฟฟ้า  $\tan \delta$  และค่ากำลังสองของสนามไฟฟ้า แต่ถ้าค่า  $\tan \delta$  ของวัสดุมีค่ามาก จะส่งผลให้การดูดซับพลังงานไมโครเวฟและปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นมีมากตามไปด้วย แต่ถ้าค่า  $\tan \delta$  มีค่าน้อย คลื่นไมโครเวฟจะทะลุผ่านชั้นวัสดุโดยไม่เกิดความร้อนขึ้น อย่างไรก็ตาม ค่าความลึกในการทะลุทะลวง (Penetration Depth) ปกติตัวแปรนี้มีการเรียกกันในหลายชื่อ เช่น ความลึกในการทะลุทะลวง (Penetration Depth) หรือความลึกเชิงกำลัง (Power Penetration Depth) เป็นต้น ส่วนค่าความลึกในการทะลุทะลวงหรือระยะทางที่สนามไฟฟ้าทะลุเข้าไปได้ สามารถหาได้จาก [4]

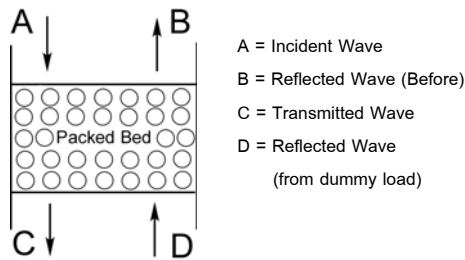
$$D_p = \frac{1}{\frac{2\pi f}{v} \sqrt{\frac{\epsilon_r' \left( \sqrt{1 + \left( \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} \right)^2} - 1 \right)}{2}}} = \frac{1}{\frac{2\pi f}{v} \sqrt{\frac{\epsilon_r' \left( \sqrt{1 + (\tan \delta)^2} - 1 \right)}{2}}} \quad (2)$$

เมื่อ  $v$  = ความเร็วแสง ( $3 \times 10^8$  m/s)  $f$  คือค่าความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ,  $\epsilon_r'$  คือ Relative Dielectric Constant  $\tan \delta$  คือ Dielectric Loss Tangent Coefficient

จะเห็นว่าเมื่อค่า Dielectric Constant และ Loss Tangent coefficient เปลี่ยนความลึกในการทะลุทะลวงและสนามไฟฟ้าภายในวัสดุไดอิเล็กทริกก็จะเปลี่ยนแปลงด้วย

## 2.2 การสะท้อน การส่งผ่าน และการดูดซับ(Reflection, Transmission and Absorption) ของคลื่นไมโครเวฟ

คลื่นไมโครเวฟมีการส่งมาจากแหล่งกำเนิดคล้ายคลึงกับแสง คลื่นไมโครเวฟสามารถเป็นรังสีตกกระทบสามารถในการทะลุผ่าน การสะท้อนกลับและการดูดซับโดยวัสดุไดอิเล็กทริกได้ (ดูรูปที่ 1) ความสามารถทั้งสามอย่างนั้นสัมพันธ์กับสมบัติไดอิเล็กทริกของชั้นทดสอบด้วย



รูปที่ 1 ตำแหน่งการวัดกำลังไมโครเวฟ

จากรูปที่ 1 จะเห็นได้ว่าปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในวัสดุไดอิเล็กทริกหลังจากมีคลื่นไมโครเวฟตกกระทบเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$\text{Incident Wave(A)} = \text{Reflected Wave(B)} + \text{Transmitted Wave(C)} + \text{Absorbed Wave(D)} \quad (3)$$

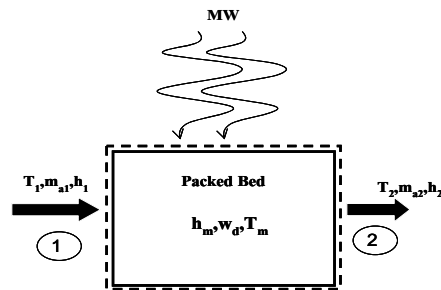
ดังนั้นตัวแปรที่มีความสำคัญในวัสดุไดอิเล็กทริกคือการดูดซับจากความสัมพันธ์ในสมการที่ 1 และ 2 ประสิทธิภาพในการดูดซับของวัสดุไดอิเล็กทริกสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\eta_{\text{absorb}} = \frac{\text{Absorbed wave (D)}}{\text{Incident wave (A)}} \times 100 \quad (4)$$

วัตถุประสงค์ในการอบแห้ง คือ การขับเคลื่อนความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์และได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูงมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ตลอดถึงเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นองค์ประกอบสำคัญในวัสดุไดอิเล็กทริกประการหนึ่งคือความชื้นซึ่งเป็นตัวดูดซับพลังงานไมโครเวฟก่อนที่จะเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อนซึ่งจะทำให้วัสดุร้อนขึ้นจึงทำให้น้ำภายในวัสดุเกิดการเปลี่ยนสถานะ ในขณะเดียวกันความดันก็เพิ่มขึ้นด้วยและทำให้น้ำหรือความชื้นที่มีอยู่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์

## 2.3 การสมดุล มวล พลังงานในกระบวนการอบแห้ง

การวิเคราะห์พลังงานเพื่อศึกษาสภาพการทำงานของกระบวนการอบแห้งแพคเกจวัสดุพูนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ แสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 กระบวนการอบแห้งแพคเกจวัสดุพูน โดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับการพาความร้อน

สมมุติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์

- 1.สภาวะต่างๆ ของปริมาตรควบคุมมีค่าคงที่
- 2.พลังงานไมโครเวฟที่ป้อนให้กับระบบควบคุมมีค่าคงที่
- 3.ไม่คิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์และพลังงานศักย์
- 4.พลังงานที่ป้อนเข้าในแพคเกจวัสดุพูนพิจารณาเฉพาะพลังงานของการพาความร้อนกับพลังงานไมโครเวฟ

จากกฎการอนุรักษ์มวลของปริมาตรควบคุมจากรูปที่ 2 ทำการสมดุลมวลเมื่อ  $\dot{m}_{g1}$  ที่จุด 1 และ  $\dot{m}_{g2}$  ที่จุด 2 เป็นอัตราการไหลเข้าและออก  $W_d$  เป็นมวลของวัสดุในแพคเกจวัสดุพูน  $\omega_1$  และ  $\omega_2$  เป็นอัตราส่วนความชื้นของอากาศเข้าและออกจะได้สมการสมดุลมวลของกระบวนการอบแห้งดังนี้ [11]

$$\frac{dm_{cv}}{dt} = \dot{m}_{g1} - \dot{m}_{g2} \quad (5)$$

$$W_d \frac{dM_p}{dt} = \dot{m}_a (\omega_1 - \omega_2) \quad (6)$$

$$\dot{m}_w = \dot{m}_a (\omega_2 - \omega_1) \quad (7)$$

เมื่อ  $W_d$  เป็นมวลของวัสดุพูน (kg)  $\dot{m}_a$  เป็นอัตราการไหลของอากาศแห้ง(kg/s)  $\omega_{1,2}$  อัตราส่วนความชื้นในอากาศ (kg water/kg dry air)  $\dot{m}_w$  อัตราการไหลของน้ำออกจากวัสดุพูน (kg water/s)

สำหรับการวิเคราะห์การสมดุลพลังงานตามกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์ หรือกฎการอนุรักษ์พลังงานของระบบควบคุม เกิดการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการพาความร้อนและความร้อนที่เกิดขึ้นในโมเลกุลของน้ำภายในแพคเกจวัสดุพูนทำให้เกิดการระเหยของน้ำหรือความชื้นภายในวัสดุพูนและความร้อนส่วนหนึ่งสูญเสียให้กับสิ่งแวดล้อม สมการสมดุลพลังงานเขียนได้ดังนี้

$$\sum \dot{E}_{in} - \sum \dot{E}_{out} + E_{st} = \Delta E_{system} \quad (8)$$

ในแพคเกจวัสดุพูนเมื่อมีการพาความร้อนและพลังงานไมโครเวฟจะเกิดความร้อนสะสมขึ้นในแพคเกจวัสดุพูน อัตราการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการระเหยของน้ำและอัตราการถ่ายเทความร้อนไปสู่สิ่งแวดล้อมโดยความสัมพันธ์สามารถเขียนในรูปสมการดังนี้

$$\frac{W_d(h_{m2} - h_{m1})}{\Delta t} = \dot{Q}_{\text{evap}} + \dot{m}_a (h_1 - h_2) + \dot{Q}_{\text{MW}} - \dot{Q}_{\text{loss}} \quad (9)$$

เมื่อ  $w_d$  เป็นมวลของวัสดุพูน (kg)  $h_m$  เป็นเอนทาลปีของวัสดุพูน (kJ/kg)  $t$  เป็นเวลา (s)  $\dot{Q}_{evap}$  เป็นอัตราการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการระเหยของน้ำ (kJ/s)  $\dot{m}_a$  เป็นอัตราการไหลของอากาศแห้ง(kg/s)  $h$  เป็นเอนทาลปีของอากาศแห้ง (kJ/kg)  $\dot{Q}_{MW}$  เป็นพลังงานไมโครเวฟ (kW)  $\dot{Q}_{loss}$  เป็นอัตราการถ่ายเทความร้อนไปสู่สิ่งแวดล้อม (kJ/s)

## 2.4 การสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในกระบวนการอบแห้ง (Specific Energy Consumption in Drying Process) และการหาประสิทธิภาพพลังงาน (Energy Efficiency)

การวิเคราะห์การสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเป็นการประเมินจากการอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟพร้อมกับการพาความร้อน พิจารณาจากการป้อนพลังงาน ในกรอบแห้งที่อุณหภูมิสัมบูรณ์ 27.2°C ความเร็วลม 3.71m/s กำลังไมโครเวฟ 50W การสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) หาได้จากสมการ

$$SEC = \frac{\text{Total energy supplied in drying process}}{\text{Amount of water removed during drying}} \frac{kJ}{kg} \quad (10)$$

$$SEC = \frac{Q_{MW} + Q_{convec}}{\text{Amount of water removed during drying}} \frac{kJ}{kg} \quad (11)$$

เมื่อ  $Q_{convec}$  เป็นการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการพาความร้อน (kJ)  $Q_{MW}$  เป็นพลังงานไมโครเวฟ (kW.s)

การหาประสิทธิภาพพลังงาน  $\eta_e$  ของกระบวนการอบแห้งสามารถหาได้สมการ

$$\eta_e = \frac{W_d [h_{fg} (M_{p1} - M_{p2}) + c_m (T_{m2} - T_{m1})]}{\dot{m}_{da} (h_1 - h_o) \Delta t + \Delta t \dot{Q}_{MW}} \quad (12)$$

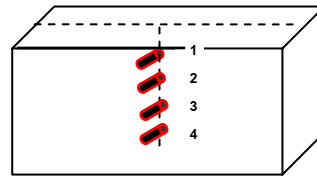
เมื่อ  $C_m$  เป็นค่าความร้อนจำเพาะของวัสดุพูน(kJ/kg K)  $M_p$  เป็นปริมาณความชื้นของวัสดุพูน (kg water/kg solid)

## 3. วิธีการทดลอง

อุปกรณ์ไมโครเวฟชนิดท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม (ดังแสดงในรูปที่ 4) เป็นระบบที่ใช้คลื่นไมโครเวฟแบบ Monochromatic ชนิด TE<sub>10</sub> Mode ความถี่ 2.45 GHz คลื่นไมโครเวฟกำเนิดจากแมกนีตรอน (Micro Denshi Co., Model UM-1500) และถูกส่งผ่านตามทิศทางในแนวแกน z ภายในท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมขนาดพื้นที่หน้าตัด 110 mm x 55 mm โดยมีน้ำเป็นตัวดูดซับที่ขอบเขตด้านล่าง (Lower Absorbing Boundary) เพื่อป้องกันการสะท้อนกลับของคลื่นไมโครเวฟไปสู่แพคเบตวัสดุพูนและมี Isolater (Upper Absorbing Boundary) เป็นตัวดักคลื่นไมโครเวฟที่สะท้อนมาจากแพคเบตวัสดุพูนเพื่อป้องกันไม่ให้ไปทำความเสียหายต่อแมกนีตรอน กำลังไมโครเวฟสามารถปรับได้ตั้งแต่ 0 – 1500 W กำลังของคลื่นตกกระทบ คลื่นสะท้อนและคลื่นส่งผ่าน จะถูกวัดด้วยวัตต์มิเตอร์โดยอาศัย Directional Coupler (Micro Denshi Co.,

Model DR-500) โดยมีตำแหน่งที่วัดกำลังไมโครเวฟ ดังรูปที่ 1 ซึ่งประกอบด้วยคลื่นตกกระทบแพคเบตวัสดุพูน (Incident Wave) คลื่นสะท้อนบริเวณผิวแพคเบตวัสดุพูน (Reflected Wave : Before) คลื่นทะลุผ่านแพคเบตวัสดุพูน (Transmitted Wave) และคลื่นสะท้อนบริเวณด้านล่างของ แพคเบตวัสดุพูน (Reflected Wave : After)

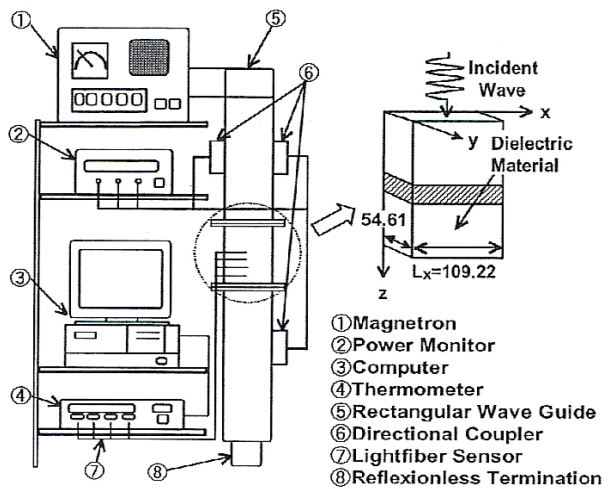
การวัดอุณหภูมิของแพคเบตจะวัดโดยใช้ Luxtron Fluroptic Thermometer Model 790 ณ ตำแหน่งกึ่งกลางแพคเบตวัสดุพูนและลึกจากผิวแพคเบตเป็นระยะ 5, 15, 25 ,35 mm ตามลำดับ (ดังรูปที่ 3)



- ตำแหน่ง 1 ลึกจากผิว 5 mm
- ตำแหน่ง 2 ลึกจากผิว 15 mm
- ตำแหน่ง 3 ลึกจากผิว 25 mm
- ตำแหน่ง 4 ลึกจากผิว 35 mm

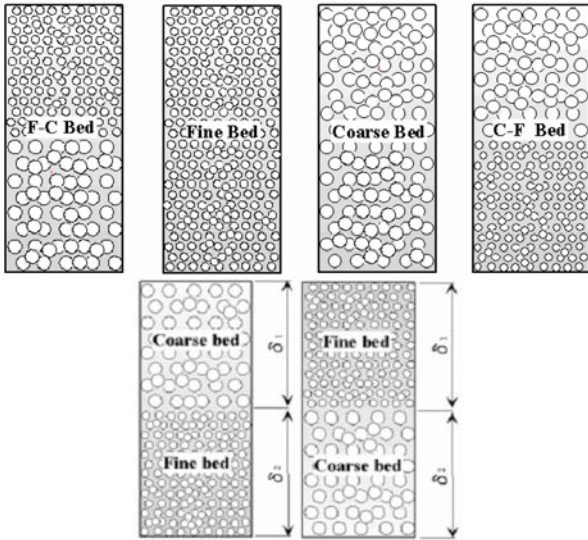
รูปที่ 3 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิของแพคเบตวัสดุพูน

ในระหว่างการทดลองบริเวณผิวหน้าของวัสดุพูนในแพคเบตจะมีลมซึ่งจะช่วยพาความร้อนบริเวณผิวของแพคเบตวัสดุพูนโดยใช้อุณหภูมิสัมบูรณ์ 27.2°C ความเร็วลม 3.71m/s กำลังไมโครเวฟที่ป้อนเข้าสู่ระบบ 50 W ภาวะบรรจวัสดุพูนทำมาจากโพลีโพรพิลีนหนา 3 mm เมื่อทำการบรรจุลงในท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมจะมีขนาดพอดีกับพื้นที่หน้าตัดของท่อนำคลื่นในทุกๆ เจ็อนไซใช้เวลาในการอบ 12 ชั่วโมง



รูปที่ 4 ไมโครเวฟชนิดท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม

ในการทดลองนี้ วัสดุไดอิเล็กตริกที่นำมาทดสอบ เป็นองค์ประกอบของเม็ดแก้ว น้ำ และโพรงอากาศ ขนาด (X x Y x Z) ได้แก่ 108 mm x 53 mm x 50 mm ใช้เม็ดแก้วขนาด 0.15, 0.4 mm ผสมน้ำจนอยู่ในสภาพอิ่มตัวเท่ากับ 0.6 โดยแพคเบตที่จะนำมาทดสอบจำนวน 12 ตัวอย่าง ซึ่งแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ประเภทดังนี้



รูปที่ 5 แพคเบตวัสดุพูนชั้นเดียวและหลายชั้นโดยมีการปรับเปลี่ยนค่า  $d_1$ ;  $d_2$  (ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ)

จากรูปที่ 5 วัสดุพูนที่ศึกษาที่มีความหนาทั้งหมด 50 mm ซึ่งพิจารณาทั้งกรณีแพคเบตชั้นเดียว (Single Layered Packed bed) และกรณีแพคเบตหลายชั้น (Multi Layered Packed bed) ดังนี้

1. กรณีแพคเบตชั้นเดียว (Single Layered Packed bed) ประกอบด้วย 3 เฟส คือ เม็ดแก้ว (Glass Beads) น้ำและอากาศ ซึ่งวัสดุพูนที่พิจารณาที่มีความหนาทั้งหมด 50 mm ( $d_1+d_2= 50$  mm) โดยแบ่งศึกษาออกเป็น 2 กรณีย่อย คือ 1.1 กรณีแพคเบตละเอียด (Fine Bed; F;  $d=0.15$  mm) และ 1.2 กรณีแพคเบตหยาบ (Coarse Bed; C;  $d=0.4$  mm)

2. กรณีแพคเบตหลายชั้น (Multi Layered Packed bed) แต่ละชั้นประกอบด้วย 3 เฟส คือ เม็ดแก้ว (Glass Beads) น้ำและอากาศ ซึ่งวัสดุพูนที่มีความหนาทั้งหมด 50 mm ใช้ใส่เม็ดแก้ว 2 ขนาดไว้ด้วยกันแต่อยู่คนละชั้น โดยแบ่งศึกษาออกเป็น 2 กรณีย่อย คือ

2.1 กรณีแพคเบต F-C คือ แพคเบตละเอียด (Fine Bed ; F ;  $d = 0.15$  mm) อยู่ด้านบนแพคเบตหยาบ (Coarse Bed ; C ;  $d = 0.4$  mm) โดยเปลี่ยนความหนา ( $d$ ) ของชั้นวัสดุพูนแบ่งออกเป็น 5 กรณี ดังนี้ F-C;10-40 mm, F-C;20-30 mm, F-C;25-25 mm, F-C;30-20 mm และ F-C;40-10 mm ตามลำดับ ยกตัวอย่างเช่น กรณี F-C; 10-40 mm หมายถึงแพคเบตละเอียด (F;  $d=0.15$  mm) ที่มีชั้นความหนา 10 mm ( $d_1=10$ mm) อยู่ด้านบนแพคเบตหยาบ (C;  $d=0.4$  mm) ที่มีชั้นความหนา 40 mm ( $d_2=40$  mm) เป็นต้น

2.2 กรณีแพคเบต C-F คือ แพคเบตหยาบ (Coarse Bed ; C ;  $d = 0.4$  mm) อยู่ด้านบนแพคเบตละเอียด (Fine Bed ; F ;  $d = 0.15$  mm) โดยเปลี่ยนความหนา ( $d$ ) ของชั้นวัสดุพูนแบ่งออกเป็น 5 กรณี ดังนี้ C-F;10-40 mm, C-F;20-30 mm, C-F;25-25 mm, C-F;30-20 mm และ C-F;40-10 mm ตามลำดับ ยกตัวอย่างเช่น กรณี C-F; 10-40 mm หมายถึงแพคเบตหยาบ (C; $d=0.4$  mm) ที่มีชั้นความหนา 10 mm ( $d_1=10$ mm) อยู่ด้านบนแพคเบตละเอียด (F;  $d=0.15$  mm) ที่มีชั้นความหนา 40 mm ( $d_2=40$  mm) เป็นต้น

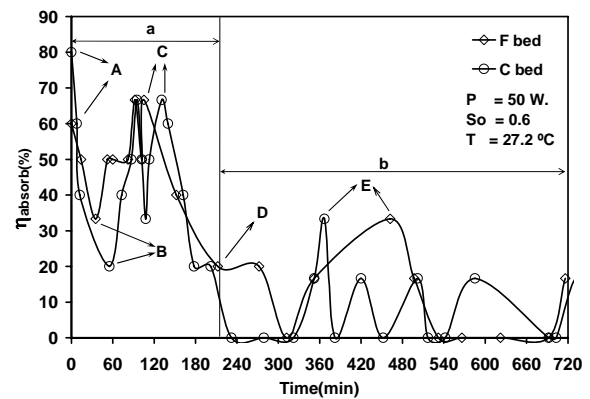
สมการที่ใช้ในการคำนวณหาความอึดตัวของวัสดุพูน [4]

$$S = \frac{X_b \cdot \rho_s \cdot (1 - \phi)}{\rho_w \cdot \phi \cdot 100} \quad (13)$$

เมื่อ S คือ ค่าความอึดตัวของวัสดุพูน  $\rho_s$  คือ ค่าความหนาแน่นของเม็ดแก้ว  $\rho_w$  คือ ค่าความหนาแน่นของน้ำ  $\phi$  คือ ค่าความพรุนของเม็ดแก้ว  $X_b$  คือ เปอร์เซนต์ความชื้น (Dry Basis)

#### 4. ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

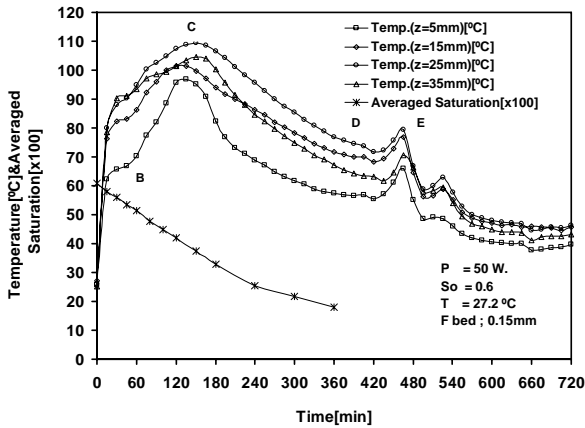
จากผลการทดลองอบแห้งวัสดุพูนที่มีองค์ประกอบของเม็ดแก้ว น้ำ และโพรงอากาศดังในรูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของการดูดซับพลังงานไมโครเวฟกับเวลา โดยมีกำลังไมโครเวฟ 50 W ของวัสดุพูนภายในแพคเบตใช้เม็ดแก้วขนาด 0.15,0.4 mm ผสมน้ำจนอยู่ในสภาพอึดตัวเท่ากับ 0.6 ซึ่งการวัดกำลังการดูดซับพลังงานไมโครเวฟในการทดลองดูได้จากรูปที่ 6



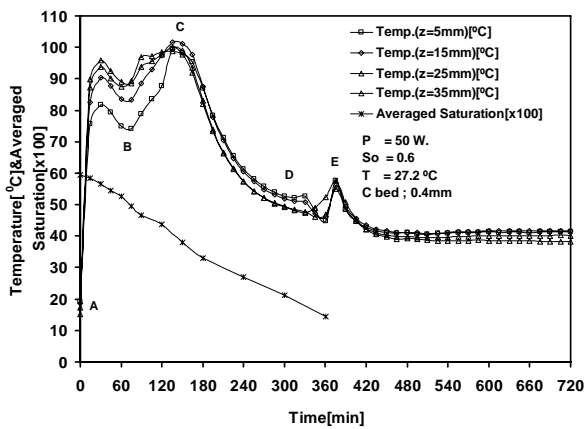
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับกำลังไมโครเวฟกับเวลา ของแพคเบตวัสดุพูน F bed และ C bed(50mm)

จากรูปที่ 6 การอบแห้งวัสดุพูนอึดตัวที่ขนาดเม็ดแก้วเท่ากันทั้งแพคเบตมีขนาด 0.15,0.4 mm แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไมโครเวฟเทียบกับเวลา โดยมีกำลังไมโครเวฟ 50 W อุณหภูมิผล 27.2°C ซึ่งการวัดกำลังไมโครเวฟในการทดลอง พบว่าในช่วงเริ่มต้น (จุด A) มีการดูดซับกำลังไมโครเวฟที่ดีหลังจากนั้นการดูดซับลดลงอันเนื่องมาจากกำลังไมโครเวฟสะท้อนที่ผิวของแพคเบตมีค่าสูง (จุด B เวลา 60 นาที) เนื่องจากค่า Loss Tangent Coefficient ( $\tan \delta$ ) ของแพคเบตวัสดุพูนในช่วงแรกมีค่าสูง กำลังไมโครเวฟที่ดูดซับมีค่าสูงเช่นกัน เนื่องจากในช่วงแรกแพคเบตมีความชื้นมาก (จุด C เวลา 120 นาที) ทำให้กำลังไมโครเวฟทะลุผ่านมีค่าน้อยในช่วงแรก จากนั้นค่า Loss Tangent Coefficient ( $\tan \delta$ ) ของวัสดุพูนมีค่าลดลง ความชื้นเริ่มเคลื่อนตัวออกจากแพคเบต ทำให้กำลังไมโครเวฟสะท้อนที่ผิวและกำลังไมโครเวฟที่แพคเบตดูดซับมีค่าลดลง ตามลำดับ ส่งผลกำลังไมโครเวฟทะลุผ่านมีค่าเพิ่มขึ้น (จุด D เวลา 200 นาที) หลังจากนั้น พบว่ากำลังไมโครเวฟทะลุผ่านมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ส่วนกำลังไมโครเวฟสะท้อนที่ผิวและกำลังไมโครเวฟที่ชั้นงานดูดซับมีค่าลดลงและคงที่จนมาถึงจุด E การดูดซับก็สูงอีกครั้งหนึ่งอันเนื่องมาจากการเกิดเรโซแนนซ์ในวัสดุ หลังจากนั้นก็การดูดซับก็คงที่อีกครั้งหนึ่งจนสิ้นสุดกระบวนการอบแห้ง

จะเห็นได้ว่าจะมีการแบ่งเป็น 2 ช่วงของการอบแห้งช่วงแรกคือ "a" เป็นช่วงที่มีการดูดซับพลังงานได้ดีและในช่วงนี้พลังงานไมโครเวฟถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อนภายในวัสดุ (Q) สูงตามไปด้วย (ดังสมการที่ 1) และทำให้มีน้ำระเหยออกจากวัสดุในช่วงเวลานี้ถือว่าพลังงานที่แปลงออกมาซึ่งใช้ในการอบแห้งได้ถูกนำไปใช้ได้มากกว่าคือมีประสิทธิภาพสูงสุด ช่วงต่อไปเป็นช่วง "b" เป็นช่วงสูญเสียและในการอบแห้งในช่วงนี้พลังงานที่จ่ายออกจากแหล่งกำเนิด (Magnetron) นำไปใช้ประโยชน์ในการอบแห้งน้อยมากเพราะความชื้นออกจากวัสดุไปส่วนมากแล้วตั้งนั้นการดูดซับพลังงานก็น้อยลงหรือไม่มีการดูดซับเลย



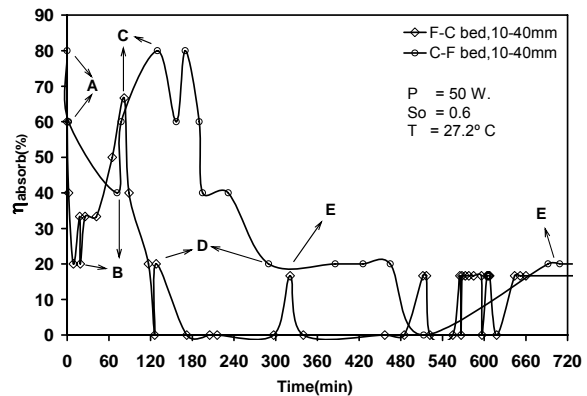
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ความชื้นกับเวลาของแพคเบตวัสดุพรุน F bed (50mm)



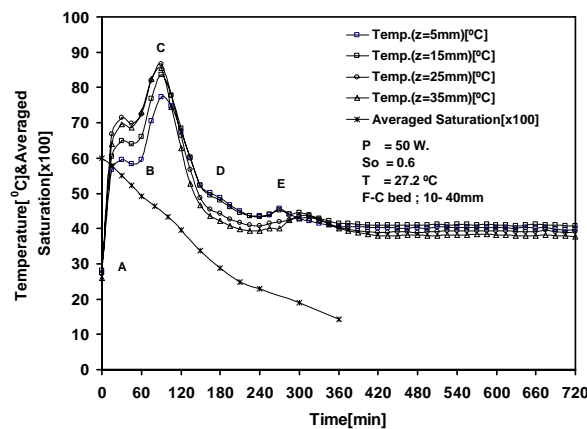
รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ความชื้นกับเวลาของแพคเบตวัสดุพรุน C bed (50mm)

จากรูปที่ 7,8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นกับเวลา โดยมีกำลังไมโครเวฟ 50W อุณหภูมิลม 27.2°C พบว่าช่วงแรก (0-60 นาที) อุณหภูมิสูงขึ้นอย่างรวดเร็วหลังจากนั้นก็ลดลงเล็กน้อย (จุด B เวลา 60 นาที) อันเนื่องมาจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้การดูดซับลดลงต่อจากนั้น อุณหภูมิแพคเบตมีค่าสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องเนื่องจากแพคเบตวัสดุพรุนมีความชื้นและค่า Loss Tangent Coefficient ( $\tan \delta$ ) สูง ทำให้แพคเบตดูดซับพลังงานได้มาก ทำให้ความร้อนภายในแพคเบต (Q) สูงตามไปด้วย (ดังสมการที่ 1) ต่อมาในช่วง 180-360 นาที อุณหภูมิของแพคเบตมีค่าค่อยๆ ลดต่ำลง

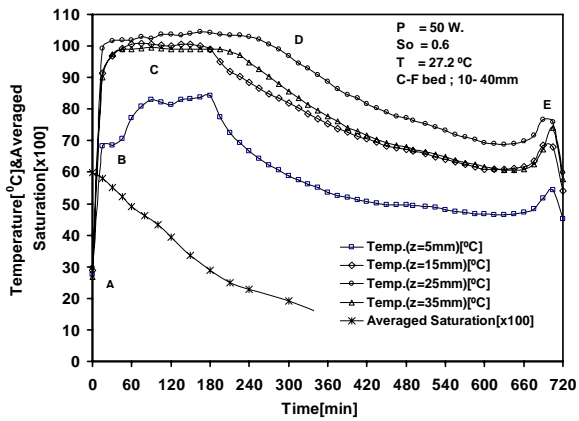
เพราะความชื้นภายในวัสดุได้เคลื่อนตัวออกไป เนื่องจากในช่วงแรกของการอบแห้งภายในแพคเบตจะมีเฟสของของเหลวอยู่อย่างต่อเนื่อง ทำให้อิทธิพลของความดันคาพิลลารี (Capillary Pressure) ที่ขับเคลื่อนของเหลวไปยังผิวหน้าของแพคเบตมีค่าสูง แต่เมื่อเวลาผ่านไปปริมาณความชื้นลดลง ทำให้การเคลื่อนที่ของความชื้น (ซึ่งเป็นไอส่วนใหญ่) ออกสู่ผิวหน้านั้นเป็นอิทธิพลของการแพร่ของไอ (Vapor Diffusion) และความดันก๊าซ (Gas Pressure) เป็นหลัก ประกอบกับอิทธิพลของการพาความร้อนบริเวณผิวหน้าของแพคเบตจึงทำให้การเคลื่อนย้ายความชื้นที่บริเวณผิวหน้าของแพคเบตสูง และเมื่อพิจารณา ณ ตำแหน่งที่วัดอุณหภูมิพบว่าภายในบริเวณกึ่งกลางค่อนข้างไปทางด้านล่างจะมีอุณหภูมิสูงกว่าด้านบนอันเนื่องมาจากอิทธิพลการกระจายของความชื้น



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับกำลังไมโครเวฟกับเวลา ของแพคเบตวัสดุพรุน F-C bed, C-F bed (10-40mm)



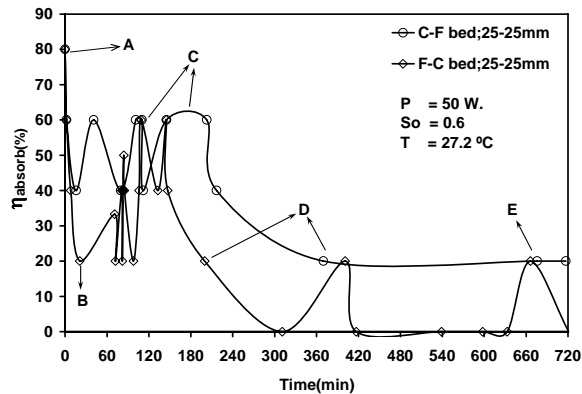
รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ความชื้นกับเวลาของแพคเบตวัสดุพรุน F-C bed (10-40mm)



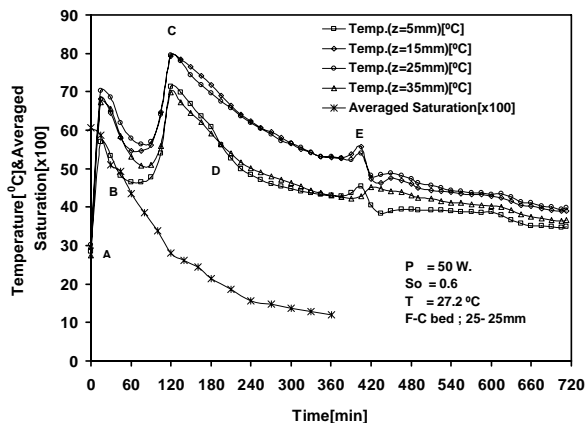
รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ความชื้นกับเวลาของแพคเบตวัสดุพูน C-F bed (10-40mm)

จากรูปที่ 9,10,11 ในการอบแห้งวัสดุพูนสองชั้นจะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างความชื้น การดูดซับกำลังไมโครเวฟ อุณหภูมิ กับเวลา ในกรณีที่อนุภาคขนาดใหญ่อยู่ด้านบน (C-F, 10-40 mm) การเคลื่อนที่ของมวลความชื้นในแพคเบตไปสู่ผิวหน้าไม่ทันก่อนเนื่องมาจากความดันคาพิลลารีของวัสดุพูนอนุภาคขนาดใหญ่มีค่าน้อยกว่าจึงทำให้ความชื้นถูกกักอยู่ด้านล่างของชั้น อิทธิพลของความดันคาพิลลารีดังกล่าวทำให้ความชื้นมีผลต่อการดูดซับพลังงานไมโครเวฟได้ในปริมาณที่มาก (รูปที่ 9) เป็นเวลานานทำให้เกิดความร้อนขึ้นมากและทำให้อุณหภูมิสูงตามไปด้วย (ดังรูปที่ 11) ถึงแม้ว่าอุณหภูมิจะสูงแต่การขับเคลื่อนของความชื้นออกจากวัสดุพูนใช้ระยะเวลายาวนาน (จุด D ใช้เวลา 300 นาที, รูปที่ 10)

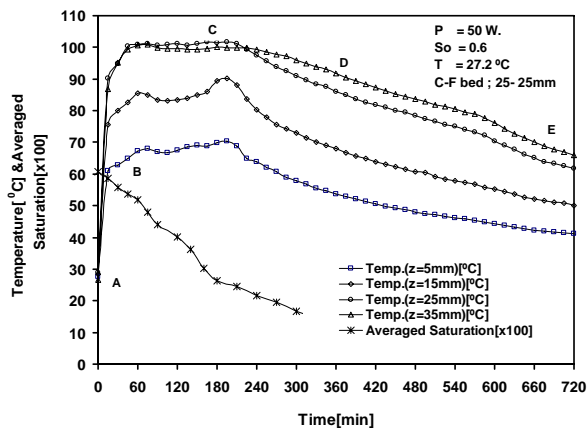
ในการอบแห้งแพคเบตวัสดุพูนสองชั้นในกรณีที่อนุภาคขนาดเล็กอยู่ด้านบน (F-C, 40-10 mm) เป็นชั้นบาง ๆ อันเนื่องมาจากอนุภาคขนาดเล็กมีความดันคาพิลลารีที่สูงกว่าเมื่อแพคเบตวัสดุพูนได้รับความร้อนการขับเคลื่อนของความชื้นไปสู่ผิวหน้าของแพคเบตจึงเป็นไปอย่างรวดเร็ว ประกอบกับเมื่อความชื้นของวัสดุพูนชั้นบนเริ่มหมด การสะท้อนกลับของคลื่นจะลดลงมากทำให้การดูดซับคลื่นได้ในปริมาณที่สูง ดังนั้นจึงเกิดความร้อนที่ต่อเนื่องและขับเคลื่อนความชื้นไปสู่ผิวหน้าและออกไปจากแพคเบตได้เร็วยิ่งขึ้น (จุด D ใช้เวลา 120 นาที) จากรูปที่ 9 จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายใน แพคเบตไม่สูงเท่ากรณีที่มีวัสดุพูนสองชั้นในกรณีที่อนุภาคขนาดใหญ่อยู่ด้านบน



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับกำลังไมโครเวฟกับเวลา ของแพคเบตวัสดุพูน F-C bed ,C-F bed (25-25mm)



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ความชื้นกับเวลาของแพคเบตวัสดุพูน F-C bed (25-25mm)

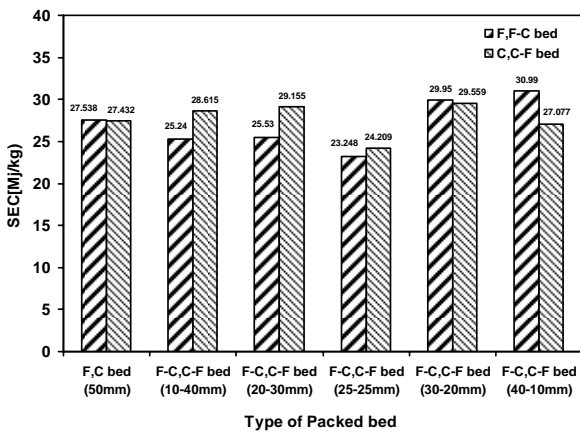


รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ความชื้นกับเวลาของแพคเบต วัสดุพูน F-C bed (25-25mm)

จากรูปที่ 12,13,14 ในการอบแห้งวัสดุพูนสองชั้นที่มีความหนาเท่ากันจะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างความชื้น การดูดซับกำลังไมโครเวฟ อุณหภูมิกับเวลา จะเห็นได้ว่า การดูดซับมีปริมาณที่น้อยกว่ากรณีที่ผ่านมาในกรณีที่อนุภาคขนาดใหญ่อยู่ด้านบน (C-F, 25-25 mm) การเคลื่อนที่ของมวลความชื้นในแพคเบตไปสู่ผิวหน้าไม่ทันก็ประกอบกับความหนาของชั้นมาก ความดันคาพิลลารีของวัสดุพูนอนุภาคขนาดใหญ่มีค่าน้อยกว่าจึงทำให้ความชื้นถูกกักอยู่ด้านล่างของชั้น อิทธิพลของ

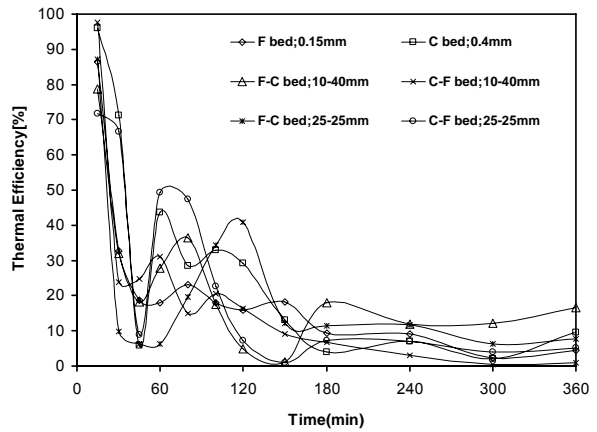
ความดันคาพิลลารีดังกล่าวส่งผลให้ความชื้นถูกกักอยู่ในแพคเกจทำให้การดูดซับพลังงานไมโครเวฟได้ในปริมาณที่มาก (รูปที่ 12) เป็นเวลานานทำให้เกิดความร้อนสะสมขึ้นมากและทำให้อุณหภูมิสูงในแพคเกจชั้นล่าง (ดังรูปที่ 14) ถึงแม้ว่าอุณหภูมิจะสูงแต่การขับเคลื่อนของความชื้นออกจากวัสดุพูนไ้ระยะเวลายาวนาน (จุด D ใช้เวลา 300 นาที)

ในการอบแห้งแพคเกจวัสดุพูนสองชั้นในกรณีที่มีอนุภาคขนาดเล็กอยู่ด้านบน (F-C, 25-25 mm) อันเนื่องมาจากอนุภาคขนาดเล็กมีความดันคาพิลลารีที่สูงกว่าเมื่อแพคเกจวัสดุพูนได้รับความร้อนการขับเคลื่อนของความชื้นไปสู่ผิวหน้าของแพคเกจจึงเป็นไปอย่างรวดเร็ว ประกอบกับเมื่อความชื้นของวัสดุพูนชั้นบนเริ่มหมด การสะท้อนกลับของคลื่นจะลดลงมากทำให้การดูดซับคลื่นได้ในปริมาณที่สูงทำให้เกิดความร้อนที่ต่อเนื่องและขับเคลื่อนความชื้นไปสู่ผิวหน้าและออกไปจากแพคเกจได้เร็วยิ่งขึ้น (จุด D ใช้เวลา 180 นาที, รูปที่ 12) จากรูปที่ 14 จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างชั้นภายในแพคเกจชั้นล่างจะสูงกว่าอันเนื่องมาจากการขับเคลื่อนความชื้นที่ต่ำกว่าจึงใช้ระยะเวลาความชื้นที่เหลืออยู่เป็นตัวดูดซับพลังงานไมโครเวฟทำให้มีอุณหภูมิสูง



รูปที่ 15 แสดงการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้งแพคเกจวัสดุพูน (เวลาในการอบแห้ง 360 นาที)

จากรูปที่ 15 ในการอบแห้งแพคเกจวัสดุพูนเป็นเวลา 360 นาที เพื่อหาการสิ้นเปลืองพลังงานพบว่าชั้นความหนาและขนาดของอนุภาคมีผลต่อการสิ้นเปลืองพลังงานที่แตกต่างกัน เห็นได้ว่าชั้นความหนาที่อนุภาคขนาดเล็กอยู่ด้านบนตั้งแต่ชั้นความหนาครึ่งหนึ่งถึงชั้นบนสุด (10-25mm) การสิ้นเปลืองพลังงานจะต่ำกว่าอันเนื่องมาจากอิทธิพลของความดันคาพิลลารีที่ทำให้การขับเคลื่อนของความชื้นไปสู่ผิวหน้าได้ดี อีกประการหนึ่งเนื่องมาจากเมื่อทำการให้ความร้อนไประยะหนึ่งอนุภาคที่อยู่ด้านบนแห้งลงมีผลให้การดูดซับคลื่นไมโครเวฟได้ดียิ่งขึ้น (การสะท้อนกลับน้อยลง) ความชื้นที่อยู่ภายในจะเคลื่อนที่ออกจากแพคเกจได้เร็วยิ่งขึ้น พลังงานที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งลดลง ประสิทธิภาพของระบบก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 16 แสดงประสิทธิภาพพลังงานของกระบวนการอบแห้งแพคเกจวัสดุพูน (เวลาในการอบแห้ง 360 นาที)

จากรูปที่ 16 ในการอบแห้งแพคเกจวัสดุพูนเป็นเวลา 360 นาที เพื่อหาประสิทธิภาพพลังงานในช่วงแรกมีค่าใกล้เคียงกันเพราะในช่วงแรกปริมาณความชื้นในแพคเกจวัสดุพูนมีอยู่มากการดูดซับคลื่นได้ในปริมาณที่สูง ทำให้ประสิทธิภาพพลังงานสูงตามไปด้วย หลังจากนั้นการขับเคลื่อนไปสู่ผิวหน้าของแพคเกจวัสดุพูนเป็นไปอย่างรวดเร็วทำให้ความชื้นลดลง การดูดซับคลื่นไมโครเวฟได้ในปริมาณที่น้อย ทำให้พลังงานที่นำไปใช้งานจึงลดลงหรืออีกนัยหนึ่งอาจกล่าวได้ว่าประสิทธิภาพในการดูดซับลดลง (ดังสมการที่ 4) มีผลให้ประสิทธิภาพพลังงานลดลงตามไปด้วย ดังนั้นประสิทธิภาพพลังงานจะขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพในการดูดซับคลื่นไมโครเวฟ

### 5. สรุปผลการทดลอง

การอบแห้งแพคเกจวัสดุพูนด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับการพาความร้อนในท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม เพื่อหารูปแบบในการให้ความร้อนและวิเคราะห์ถึงการสิ้นเปลืองพลังงาน พบว่า การให้ความร้อนในช่วงแรกควรใช้ลมร้อนก่อนเพราะวิธีดังกล่าวของกระบวนการอบแห้งด้วยการพาความร้อนจะให้ความร้อนได้ดีที่ผิว หลังจากนั้นเมื่อความชื้นที่บริเวณผิวลดลงจึงให้ความร้อนโดยไมโครเวฟ เนื่องจากผิวที่แห้งสามารถทำให้การดูดซับคลื่นไมโครเวฟได้ดีและการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟจะเกิดความร้อนจากภายในแพคเกจวัสดุพูนจึงสามารถขับเคลื่อนความชื้นมาสู่ผิวหน้าได้รวดเร็ว ในการให้ความร้อนในรูปแบบนี้เหมาะสมในการให้ความร้อนในช่วงต้น (Preheating) เมื่ออัตราการสูญเสียของความชื้นลดลง (ความชื้นออกไปจากวัสดุไปในปริมาณมาก) ผิวของวัสดุจะแห้ง มวลของความชื้นเคลื่อนที่เข้าไปรวมที่จุดกึ่งกลางที่วัสดุจึงทำการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟในช่วงนี้จะทำให้เกิดความร้อนและแรงดันไอขึ้นภายในช่วยไล่ความชื้นให้เคลื่อนที่ไปยังผิวหน้าของวัสดุได้สะดวกขึ้น ช่วงนี้เรียกว่าการเร่งการอบแห้ง (Booster Drying) ดังนั้นการป้อนพลังงานไมโครเวฟให้เหมาะสมกับช่วงเวลาในขั้นตอนของกระบวนการอบแห้งทำให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นอย่างมากและลดระยะเวลาในการอบแห้ง ดังนั้นพลังงานที่ใช้ก็จะลดลงตามไปด้วย



## 6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่สนับสนุนทุนวิจัยในครั้งนี้

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Sharma, G.,P. and Suresh Prasad.,2005, Specific Energy Consumption in Microwave Drying of Garlic Cloves, Journal of Food Engineering., Vol.31,pp. 1921-1926.
- [2] Varith,J.,Dijkanarukkul,P.,Achariyaviriya,A.and Achariyaviriya. S., 2007., Combined Microwave-Hot air Drying of Peeled Longon, Journal of Food Engineering ., Vol.31,pp. 459-468.
- [3] Lakshmi,S.,Chakkaravarthi.A.,Subramanian, R., Vasudeva Singh., 2005, Energy Consumption in Microwave Cooking of Rice and its Comparison with Other Domestic Appliances, Journal of Food Engineering , Vol.78,pp. 715-722.
- [4] Ratanadecho, P., Aoki, K. and Akahori, M., 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, pp.151-161
- [5] Feng, H.,Tang, J.,Cavalieri, R.,P.and Plumb, O.,A., 2001,Heat and Mass Transport in Microwave Drying of Porous Materials in a Spouted Bed, A.I.Ch.E. Journal , Vol.47,pp.1499-1512.
- [6] Abbasi Souraki, B.and Mowla, D.,2007,Experimental and Theoretical Investigation of Drying Behaviour of Garlic in an Inert Medium Fluidized Bed Assisted by Microwave.,Journal of Food Engineering, Vol.88, pp.438-449.
- [7] Hironao Ogura., Nahomi Hamaguchi., Hiroyuki Kage.,Arun S.Mujumdar.,2004, Energy and Cost Estimation for Application of Chemical Heat Pump Dryer to Industrial Ceramics Drying., Drying technology, Vol.22, pp.307-323.
- [8] Maroulis, Z.,B., Saravacos, G.,D. and Arun S.Mujumdar., 2004,Spreadsheet Aided Dryer Design, Handbook of Industrial Drying. Taylor & Francis Group,Singapore.
- [9] MenShutina,N.,V.,Gordienko.,M.,G.,Voinovskii,A.,A.and Kudra, T., 2003, Dynamics Criteria for Evaluating the Energy Consumption of Drying Equipment, Theoretical Foundations of Chemical Engineering,Vol.39, pp.158-162.
- [10]Ebru Karak Akpinar.,2004., Exergy and Energy Analysis of Drying of Red Pepper Slices in a Convective Type Dryer, Int .Comm.Heat Mass Transfer ,Vol31, pp.1165-1176.

- [11] Syahrul, S., Hamdullahpur. F. and Dincer, I., 2002, Exergy Analysis of Fluidized Bed Drying of Moist Particles, Exergy an International Journal,Vol.2, pp.87-98.