

บทที่ 4

การออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศ

โดยทั่วไปเครื่องไมโครเวฟที่ผลิตมีอยู่สองชนิด คือ แบบเตาอบ (มีลักษณะเป็นคลื่นผสม) และแบบท่อนำคลื่น (มีลักษณะเป็นคลื่นเดี่ยว) ที่ผ่านมาเครื่องไมโครเวฟส่วนใหญ่ผลิตแบบเตาอบ ซึ่งการวิเคราะห์พฤติกรรมในการทำความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเตาอบนั้นทำได้ยากมาก มีกระบวนการซับซ้อนไม่เหมาะสำหรับการวิเคราะห์เชิงทฤษฎี

สำหรับเครื่องไมโครเวฟแบบท่อนำคลื่น จะเกิดคลื่นเดี่ยวมีลักษณะเป็นระนาบและตกกระทบลงบนผิวหน้าวัสดุ ดังนั้นพฤติกรรมจึงไม่ซับซ้อนเหมือนเครื่องไมโครเวฟชนิดเตาอบ ดังนั้นการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีจึงอ้างอิงจากเครื่องไมโครเวฟลักษณะเดียวเป็นหลัก

งานวิจัยในบทนี้เป็นการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศ ที่สามารถอบแห้งวัสดุสมุนไพรในปริมาณ 15 ถึง 20 กิโลกรัมต่อรอบการอบแห้ง (กรณีไม่บรรจุถึงหมุน) โดยตัวเครื่องมีความกว้าง 700 mm ยาว 1500 mm และสูง 1800 mm ควาวิตี้ที่ใช้มีลักษณะเป็นทรงกระบอกและมีลักษณะการเกิดคลื่นแบบหลายโหมด (Multi-mode) กำลังแมกนีตรอน 1600 W (ป้อนคลื่นสองตำแหน่ง) ความถี่ 2.45 GHz และใช้ท่อนำคลื่นในโหมด TE_{10} (Transverse Electric Wave) ในส่วนของควาวิตี้จะมีลักษณะการเกิดคลื่นแบบหลายโหมด (Multi-mode) ซึ่งยากต่อการวิเคราะห์ถึงการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและอุณหภูมิภายในควาวิตี้ จึงได้นำโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาใช้ในการวิเคราะห์ โดยจุดประสงค์หลักของงานวิจัยในบทนี้คือ

1. ศึกษาและออกแบบเครื่องต้นแบบระบบกำจัดความชื้นของสมุนไพรในอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดย่อมด้วยคลื่นไดอิเล็กทริกร่วมกับระบบสุญญากาศ
2. วิเคราะห์การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและอุณหภูมิภายในควาวิตี้แบบ 3 มิติ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วย
3. สร้างเครื่องต้นแบบระบบกำจัดความชื้นของสมุนไพรในอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดย่อมด้วยคลื่นไดอิเล็กทริกร่วมกับระบบสุญญากาศ

เมื่อทำการออกแบบและวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยแล้วนั้น จะนำผลที่ได้ใช้ในการสร้างอุปกรณ์ต่าง ๆ และประกอบเป็นเครื่องต้นแบบระบบกำจัดความชื้นของ

สมุนไพรวินิจฉัยในอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดย่อมด้วยคลื่นไมโครเวฟได้มีบทบาทเป็นอย่างมาก ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้ใบชาเป็นวัสดุทดสอบ โดยข้อมูลที่ได้จากเครื่องต้นแบบเครื่องนี้นั้นจะนำไปพัฒนาให้เป็นเครื่องอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศขนาดอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ต่อไปในอนาคต

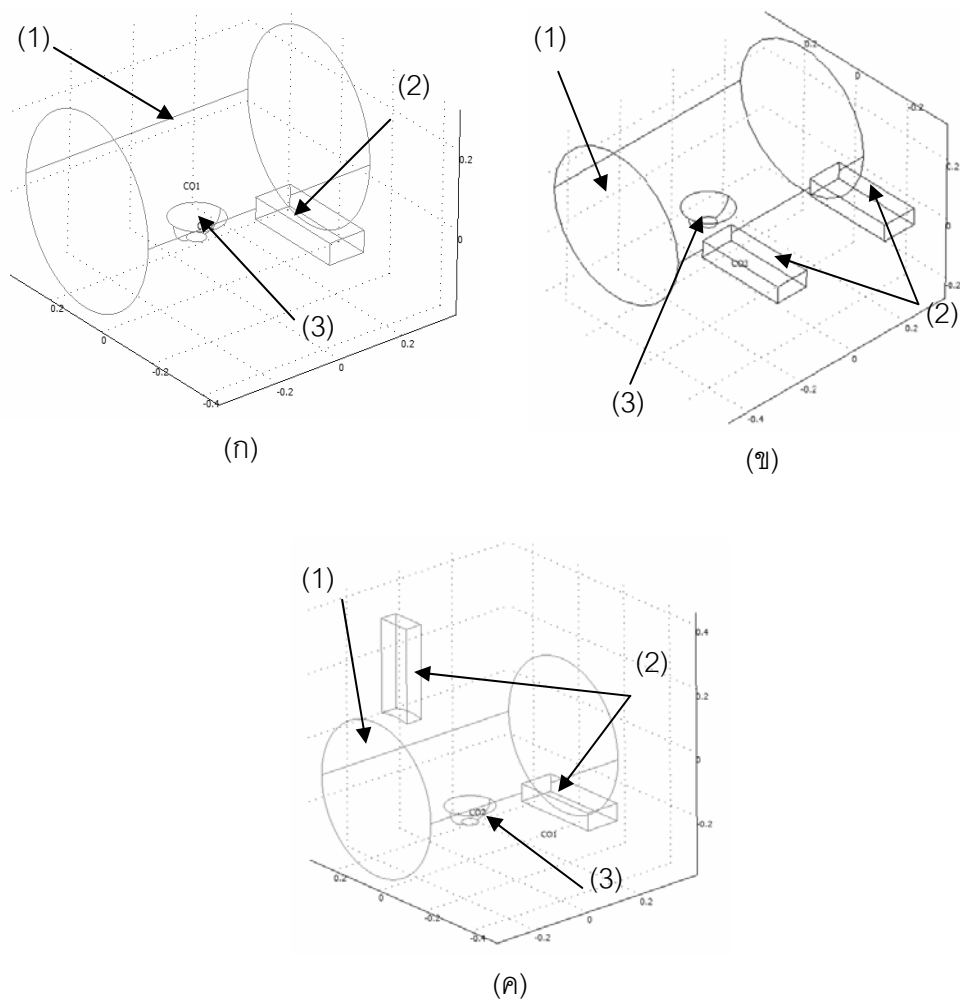
4.1 การวิเคราะห์การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและอุณหภูมิภายในภาชนะแบบ 3 มิติ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วย

ปัจจุบันกระบวนการทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟได้มีบทบาทเป็นอย่างมาก เนื่องจากใช้เวลาน้อย มีประสิทธิภาพสูงและเป็นกระบวนการสะอาด จึงทำให้เป็นที่นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอุตสาหกรรมการอบแห้งอาหารเพราะสามารถที่จะถนอมและเก็บได้เป็นเวลานาน ประเด็นหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจในการศึกษานี้ คือ ลักษณะการเกิดความร้อนที่ไม่สม่ำเสมอภายในโหลด (Heating Non-uniformity in Loaded) ซึ่งเกิดจากการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอภายในภาชนะ ทำให้เกิดจุดร้อนและจุดเย็น (Hot and Cold Spots) (Tse et al. [4-1]) ตัวอย่างปรากฏการณ์จุดร้อนและจุดเย็นได้แก่ การเกิดปรากฏการณ์เทอร์มอลรันอะเวย์ (Thermal Runaway) ในบางส่วนของวัสดุเซรามิกส่งผลให้วัสดุเกิดความเสียหายหรือมีคุณภาพต่ำ (จุดร้อน) หรือในบางกรณีเช่นอาหารที่ต้องการฆ่าเชื้อแบคทีเรียด้วยความร้อน แต่ความร้อนบางจุดนั้นมีค่าไม่มากพอส่งผลให้แบคทีเรียยังสามารถเจริญเติบโตขึ้นได้ และทำให้อาหารเป็นพิษ (จุดเย็น) (George et al. [4-2]) สาเหตุดังกล่าวทำให้นักวิจัยมีความต้องการที่จะออกแบบระบบทำความร้อนด้วยไมโครเวฟให้สามารถเกิดความร้อนกระจายสม่ำเสมอทั่วทั้งวัสดุหรือโหลดเพื่อให้เกิดความคุ้มค่ามากที่สุด (ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช [4-3])

ดังนั้นในส่วนของการออกแบบภาชนะจึงได้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและอุณหภูมิภายในภาชนะแบบ 3 มิติ เพื่อการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและอุณหภูมิที่ดีภายในภาชนะ

4.1.1 แบบจำลองทางกายภาพ

ในการวิเคราะห์การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและอุณหภูมิภายในภาชนะแบบ 3 มิติ สำหรับการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟนั้น จะใช้แบบจำลองทางกายภาพดังภาพที่ 4.1 โดยจะแบ่งเป็น 3 กรณี คือ กรณีป้อนคลื่นตำแหน่งเดียว กรณีป้อนคลื่นสองตำแหน่งแบบสมมาตรและกรณีป้อนคลื่นสองตำแหน่งแบบไม่สมมาตร



ภาพที่ 4.1

แบบจำลองทางกายภาพสำหรับการวิเคราะห์การทำความร้อน

วัสดุไดอิเล็กตริกด้วยคลื่นไมโครเวฟ

(ก) กรณีป้อนคลื่นตำแหน่งเดียว (ข) กรณีป้อนคลื่นสองตำแหน่งแบบสมมาตร

และ (ค) กรณีป้อนคลื่นสองตำแหน่งแบบไม่สมมาตร

จากภาพที่ 4.1 แสดงส่วนประกอบของการจำลองระบบไมโครเวฟโดยมีตำแหน่งป้อนคลื่นรูปแบบต่าง ๆ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. คาวิตีแบบมัลติโหมด (Multimode Cavity) เป็นที่บรรจุโหลด โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 480 mm ยาว 720 mm ผนังของคาวิตีกำหนดให้เป็นตัวนำสมบูรณ์ (Perfect Conducting Wall) ส่งผลให้ผนังไม่มีการดูดซับพลังงานไมโครเวฟ
2. ท่อนำคลื่น (Waveguide) เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟในโหมด TE_{10}
3. โหลดเป็นวัสดุที่สามารถดูดซับพลังงานไมโครเวฟแล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน ในที่นี้จะใช้น้ำ (Relative Permittivity = 78-12j) ลักษณะเป็นถ้วยครึ่งทรงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 mm

ในส่วนของการวิเคราะห์ปัญหาการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและอุณหภูมิภายในโหลดและคาวิตี ได้ตั้งสมมติฐานที่ใช้วิเคราะห์ดังนี้

1. ค่าสมบัติไดอิเล็กตริก (Dielectric Properties) ของโหลดมีค่าคงที่
2. ค่าสมบัติทางความร้อน (Thermal Properties) ของโหลดมีค่าคงที่
3. ค่าสมบัติไดอิเล็กตริก (Dielectric Properties) ของอากาศภายในคาวิตีเป็นค่าคงที่
4. โหลดไม่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะ
5. ไม่มีการถ่ายเทมวลสารออกจากโหลด
6. ไม่มีการถ่ายเทพลังงานออกจากโหลด
7. ไม่มีอิทธิพลของการพาความร้อนระหว่างโหลดและสิ่งแวดล้อม
8. ผนังทุกด้านของคาวิตีเป็นตัวนำสมบูรณ์ (Perfect Conducting Wall)

4.1.2 การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในคาวิตี

ในการวิเคราะห์หาการกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในคาวิตีนั้น สามารถหาได้จากสมการแม่เหล็กไฟฟ้าของแมกเวลล์ (ดังสมการที่ (3.12) และ (3.13)) ตามรายละเอียดดังต่อไปนี้

$$\nabla \times (\mu_r^{-1} \nabla \times E) - k_0^2 \left[\epsilon_r - \frac{j\sigma}{\omega\epsilon_0} \right] E = 0 \quad (4-1)$$

$$\epsilon_r = n^2 \quad (4-2)$$

เงื่อนไขขอบเขตของการกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟภายในท่อนำคลื่นและ
ควาวิตี้โดยกำหนดให้เป็นตัวนำยิ่งยวด สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$n \times E = 0 \quad (4-3)$$

เงื่อนไขขอบเขตความต่อเนื่องของคลื่นไมโครเวฟที่ผิวรอยต่อระหว่างโหลด
และอากาศภายในควาวิตี้ สามารถเขียนได้เป็นดังนี้

$$n \times (H_1 - H_2) = 0 \quad (4-4)$$

$$n \times (E_1 - E_2) = 0 \quad (4-5)$$

สำหรับเงื่อนไขสภาวะเริ่มต้นของสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากำหนดให้

$$E_x(t_0), E_y(t_0), E_z(t_0) = 0 \quad (4-6)$$

4.1.3 การวิเคราะห์ความร้อนภายในโหลด

ในการวิเคราะห์ปัญหาการถ่ายเทความร้อนจะทำการวิเคราะห์เฉพาะความ
ร้อนที่เกิดขึ้นภายในโหลดภายใต้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในควาวิตี้กรณี 3 มิติ (อากาศไม่มีผลต่อ
การดูดซับพลังงานไมโครเวฟเป็นความร้อน) โดยสมมติให้ภายในโหลดมีการถ่ายเทความร้อนด้วย
การนำความร้อนเพียงอย่างเดียว และโหลดเองสามารถที่จะกำเนิดความร้อนภายในด้วยการ
เปลี่ยนพลังงานไมโครเวฟเป็นพลังงานความร้อน สมมติฐานดังกล่าวสามารถเขียนเป็นสมการ
ถ่ายเทความร้อนในโหมดการถ่ายเทความร้อน (ดังสมการ (3-15)) เป็นดังนี้

$$\delta_{is} \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q \quad (4-7)$$

ในการวิเคราะห์ความร้อนที่เกิดขึ้นนี้จะพิจารณาที่โหลดเพียงอย่างเดียว
ดังนั้นเงื่อนไขขอบเขตทางความร้อนจะมีเฉพาะที่ผิวโหลดเท่านั้นและไม่มีการถ่ายเทความร้อนออก
จากโหลด (ผนังโหลดเป็นฉนวน) สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$n \cdot (k\nabla T) = 0 \quad (4-8)$$

ส่วนเงื่อนไขเริ่มต้นของการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนกำหนดให้

$$T(t_0) = 0 \quad (4-9)$$

4.1.4 วิธีการหาผลเฉลย

การวิเคราะห์ผลจากแบบจำลองจะแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีแรกจะวิเคราะห์การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในควาตีเพียงอย่างเดียว ส่วนกรณีที่สองจะวิเคราะห์ทั้งการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในโหนดและควาตีรวมถึงการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในโหนด

ในกรณีวิเคราะห์การกระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในควาตีเพียงอย่างเดียว กำหนดให้เวลาไม่มีผลต่อพฤติกรรมของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ถือว่าปัญหาดังกล่าวอยู่ในสภาวะคงตัว (Steady State) จึงทำการวิเคราะห์ปัญหาด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม COMSOLTM Multiphysics 3.4 [4-4]

สำหรับกรณีวิเคราะห์สมการทางความร้อนซึ่งเวลาจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในโหนด ปัญหาดังกล่าวจึงเป็นปัญหาที่อยู่ในสภาวะไม่คงตัว (Transient) จึงทำการวิเคราะห์ปัญหาด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม COMSOLTM Multiphysics 3.4 [4-4]

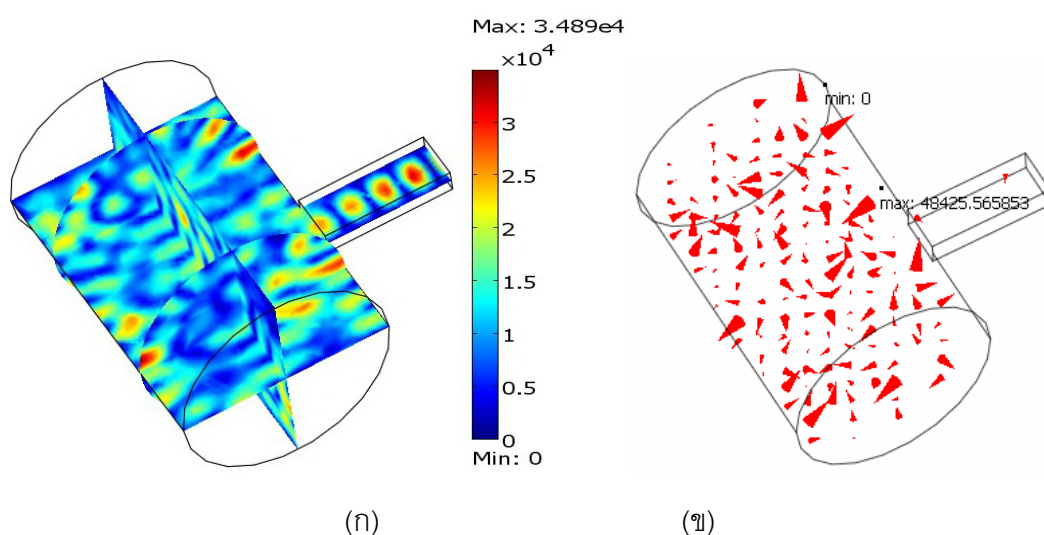
4.1.5 ผลลัพธ์และการวิเคราะห์

1. ผลการศึกษาแบบจำลองสนามแม่เหล็กในสภาวะที่ไม่มีโหนด

จากภาพที่ 4.2 - 4.4 พบว่าค่าการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสูงสุดภายในควาตีที่มีการป้อนคลื่นตำแหน่งเดียว ป้อนคลื่นสองตำแหน่งแบบสมมาตรและป้อนคลื่นสองตำแหน่งแบบไม่สมมาตรจะมีค่าเท่ากับ 3.48×10^4 V/m, 3.51×10^4 V/m และ 7.70×10^4 V/m ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ากรณีป้อนคลื่นสองตำแหน่งแบบสมมาตรมีค่าใกล้เคียงกับกรณีป้อนคลื่นตำแหน่งเดียว แต่จะมีค่าต่างจากกรณีป้อนคลื่นสองตำแหน่งแบบไม่สมมาตรมาก และเมื่อมาพิจารณาถึงการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า พบว่าการป้อนคลื่นสองตำแหน่งแบบไม่สมมาตรจะมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอว่าการป้อนคลื่นเพียงตำแหน่งเดียวและการป้อนคลื่นสองตำแหน่งแบบสมมาตร เนื่องจากการป้อนคลื่นแบบสมมาตรมีโอกาสเกิดการทับซ้อนของ

คลื่นที่อยู่ระนาบเดียวกันได้มากเพราะคลื่นที่ออกจากท่อนำคลื่นอยู่ระนาบเดียวกัน ในขณะที่การป้อนคลื่นแบบไม่สมมาตรโอกาสเกิดการทับซ้อนคลื่นมีน้อยเนื่องจากการเคลื่อนตัวของคลื่นไม่ได้อยู่ระนาบเดียวกัน ดังนั้นการป้อนคลื่นแบบสมมาตรจะส่งผลให้พลังงานที่ป้อนเข้าไปเกิดการสูญเสีย หรือกล่าวได้ว่าพลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามาไม่ได้ถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน แต่เกิดการสูญเสียพลังงานจากการครอสคัปปลิงกันเองของคลื่น

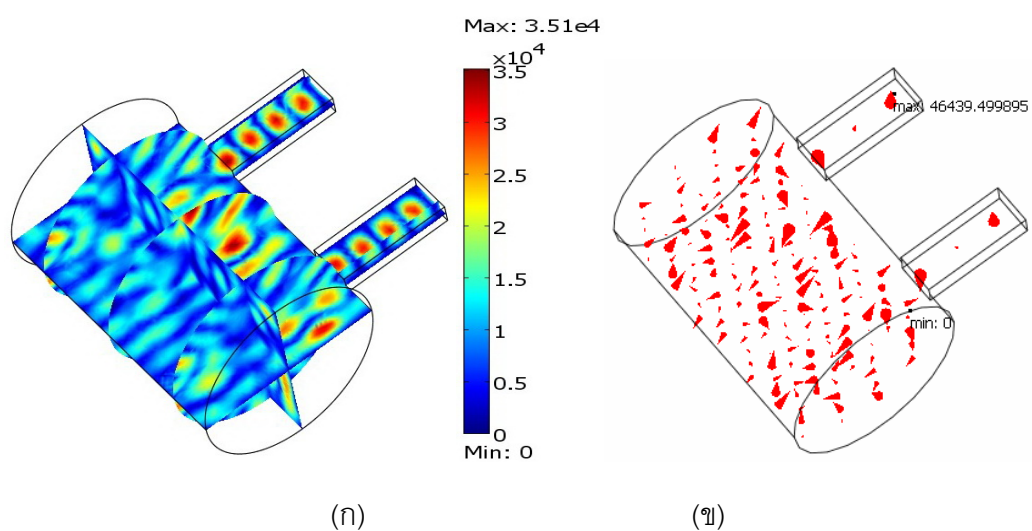
จากภาพที่ 4.2(ข) และ 4.3(ข) พบว่า เวกเตอร์การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามีความสม่ำเสมอของขนาดเวกเตอร์น้อยกว่าภาพที่ 4.4(ข) แสดงให้เห็นว่าการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในควาิตี้ที่มีการป้อนคลื่นเพียงตำแหน่งเดียวและการป้อนคลื่นสองตำแหน่งแบบสมมาตรจะมีความสม่ำเสมอมากกว่าที่มีการป้อนคลื่นสองตำแหน่งแบบไม่สมมาตร นอกจากนั้นยังพบอีกว่าภาพที่ 4.2(ข) และ 4.3(ข) ยังพบอีกว่าเวกเตอร์ในท่อนำคลื่นเกิดคลื่นนิ่งขึ้น ส่วนภาพที่ 4.4(ข) ไม่พบเวกเตอร์ในท่อนำคลื่น หมายความว่าไม่มีคลื่นนิ่งเกิดขึ้น จากความแตกต่างของเวกเตอร์ภายในท่อนำคลื่นของภาพที่ 4.2(ข), 4.3(ข) และ 4.4(ข) นี้แสดงว่า หากสภาวะที่ไม่มีโหมดควาิตี้ที่มีการป้อนคลื่นเพียงตำแหน่งเดียวและสองตำแหน่งแบบสมมาตรมีโอกาสที่จะเกิดความเสียหายต่อแมกนีตรอนจากคลื่นไมโครเวฟย้อนกลับมากกว่ากรณีที่มีการป้อนคลื่นสองตำแหน่งแบบไม่สมมาตร



ภาพที่ 4.2

การกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีการป้อนคลื่นตำแหน่งเดียว

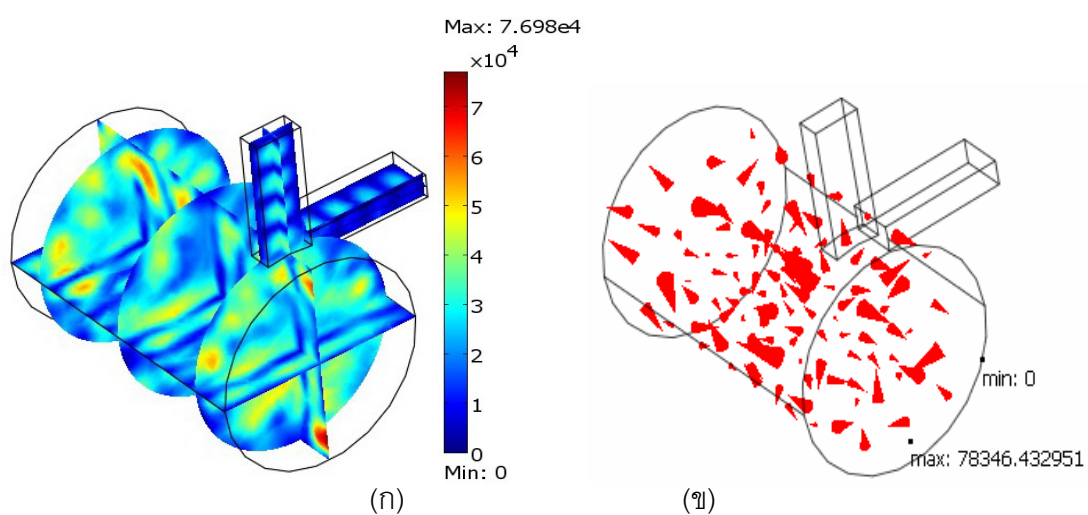
(ก) Slice Plot Type (V/m), (ข) Arrow Plot Type



ภาพที่ 4.3

การกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีการป้อนคลื่นสองตำแหน่งแบบสมมาตร

(ก) Slice Plot Type (V/m), (ข) Arrow Plot Type



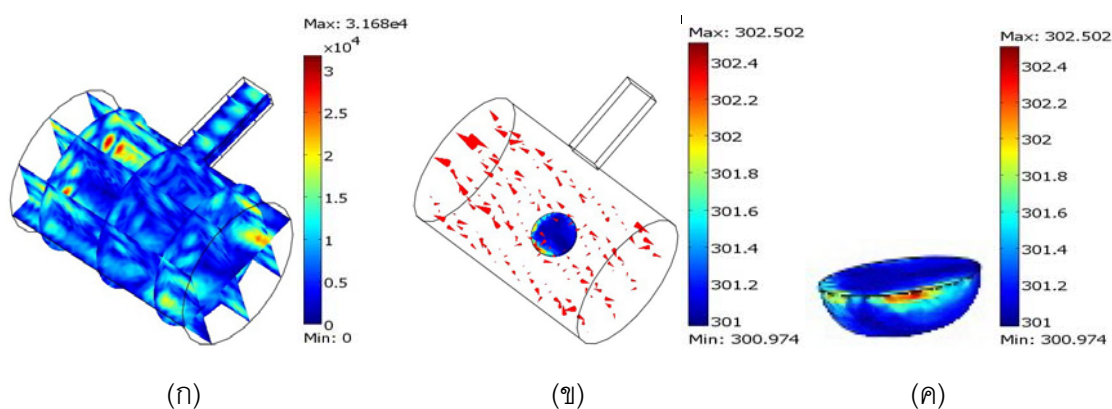
ภาพที่ 4.4

การกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีการป้อนคลื่นสองตำแหน่งแบบไม่สมมาตร

(ก) Slice Plot Type (V/m), (ข) Arrow Plot Type

2. ผลการศึกษาแบบจำลองในสภาวะที่มีไหล

จากภาพที่ 4.2(ก) และ 4.5(ก) ซึ่งเป็นการป้อนคลื่นตำแหน่งเดียว พบว่าค่ามากที่สุดของการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า คือ 3.48×10^4 V/m และ 3.17×10^4 ตามลำดับ จากภาพที่ 4.2(ก) พบว่าการกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความเข้มสูงและต่ำ (จุดร้อนและจุดเย็น) กระจายทั่วทั้งควาวิตี้แต่ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งจะต่างจากภาพที่ 4.5(ก) ซึ่งมีการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าส่วนใหญ่เพียง 0.5×10^4 V/m ถึง 1×10^4 V/m ดังนั้นจะเห็นว่าไหลมีอิทธิพลต่อการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในควาวิตี้ และจากภาพที่ 4.5(ก) และ 4.5(ข) พบว่าการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ลดลงจนมีค่าน้อยมาก (บริเวณที่มีไหล) เกิดจากการดูดซับพลังงานไมโครเวฟของไหลภายในควาวิตี้



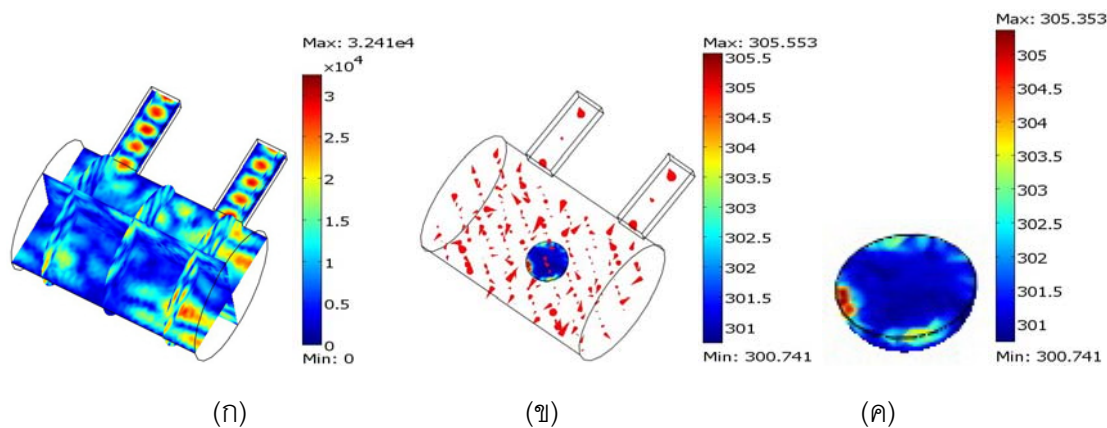
ภาพที่ 4.5

แสดงถึงกรณีที่ควาวิตี้ในสภาวะมีไหลโดยมีการป้อนคลื่นตำแหน่งเดียว

- (ก) การกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (V/m), (ข) การกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (V/M) และการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในไหล (K) และ (ค) การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในไหล (K)

จากภาพที่ 4.3(ก) และ 4.6(ก) พบว่าค่ามากที่สุดของการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า คือ 3.51×10^4 V/m และ 3.24×10^4 V/m ตามลำดับ เช่นเดียวกันกับภาพที่ 4.2(ก) และ 4.5(ก) กล่าวคือ บริเวณที่มีไหลจะมีความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าน้อยลง (ดู

จากเวกเตอร์ภาพที่ 4.6(ข) และยังเห็นอีกว่าการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในกรณีป้อนคลื่นสองตำแหน่งแบบสมมาตรจะดีกว่ากรณีป้อนคลื่นตำแหน่งเดียว



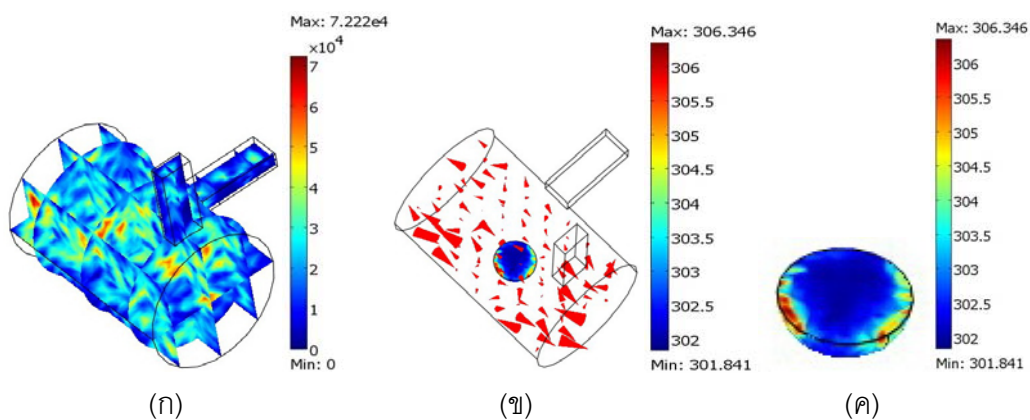
ภาพที่ 4.6

แสดงถึงกรณีที่ควิตู้ในสภาวะมีโหลดโดยมีการป้อนคลื่นสองตำแหน่งแบบสมมาตร

(ก) การกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (V/m), (ข) การกระจายตัวของคลื่น

แม่เหล็กไฟฟ้า (V/M) และการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในโหลด (K)

และ (ค) การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในโหลด (K)



ภาพที่ 4.7

แสดงถึงกรณีที่ควิตู้ในสภาวะมีโหลดโดยมีการป้อนคลื่นสองตำแหน่งแบบไม่สมมาตร

(ก) การกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (V/m), (ข) การกระจายตัวของคลื่น

แม่เหล็กไฟฟ้า (V/M) และการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในโหลด (K)

และ (ค) การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในโหลด (K)

ส่วนภาพที่ 4.4(ก) และ 4.7(ก) ค่ามากที่สุดของการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า คือ 7.7×10^4 V/m และ 7.22×10^4 V/m ตามลำดับ ซึ่งเป็นเช่นเดียวกันกับกรณีที่กล่าวมาก่อนหน้านี้ กล่าวคือ บริเวณที่มีโหนดจะมีความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าน้อยลง (ดูจากเวกเตอร์ภาพที่ 4.6(ก) และยังเห็นอีกว่าการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในกรณีป้อนคลื่นสองตำแหน่งแบบไม่สมมาตรจะดีกว่ากรณีป้อนคลื่นตำแหน่งเดียวและป้อนคลื่นสองตำแหน่งแบบสมมาตร แสดงให้เห็นว่าโหนดมีผลอย่างมากต่อการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งกรณีป้อนคลื่นตำแหน่งเดียวและป้อนคลื่นสองตำแหน่ง ดังนั้นในการวิเคราะห์การกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากรณีที่ไม่มีบรรจุโหนดไม่สามารถอธิบายถึงแนวโน้มการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากรณีที่บรรจุโหนดในควิตี้ได้ ทั้งนี้เนื่องมาจากโหนดมีสมบัติไดอิเล็กตริกต่างจากอากาศและยังส่งผลโดยตรงต่อการกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า นอกจากนี้เมื่อทำการวิเคราะห์ภาพที่ 4.5(ค), 4.6(ค) และ 4.7(ค) พบว่าอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นภายในโหนดเมื่อทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟเป็นเวลา 5 วินาที มีค่า 302.5 K และ 305.5 K และ 306.3 K ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าการทำความร้อนโดยการป้อนคลื่นสองตำแหน่งจะให้ความร้อนที่ดีกว่าการป้อนคลื่นเพียงตำแหน่งเดียว นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในโหนด พบว่าการป้อนคลื่นสองตำแหน่งแบบไม่สมมาตรจะให้การกระจายตัวของอุณหภูมิที่ดีกว่าการป้อนคลื่นเพียงตำแหน่งเดียวและการป้อนคลื่นสองตำแหน่งแบบสมมาตร แสดงให้เห็นว่ากรณีการป้อนคลื่นสองตำแหน่งแบบไม่สมมาตรจะช่วยให้เกิดการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีแล้วยังส่งผลให้เกิดความสม่ำเสมอของอุณหภูมิในโหนดด้วย

จากการศึกษาถึงการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและอุณหภูมิภายในโหนดในควิตี้ 3 มิติ สามารถสรุปได้ดังนี้

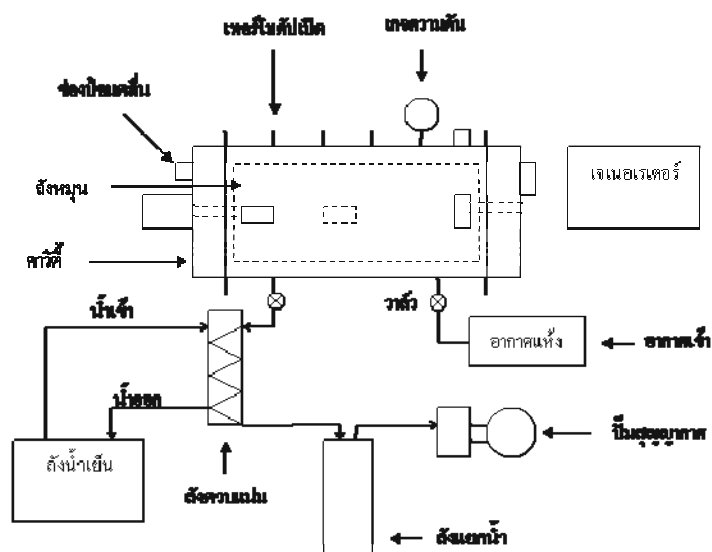
1. ผลที่ได้จากแบบจำลองของตำแหน่งป้อนคลื่นรูปแบบต่าง ๆ ภายในควิตี้เปล่าไม่สามารถนำมาอ้างอิงกับการวิเคราะห์ในกรณีที่มีโหนดได้ เนื่องจากมีอันตรกิริยาระหว่างคลื่นกับโหนด
2. การติดตั้งตำแหน่งป้อนคลื่นที่เหมาะสมจะช่วยลดการเกิดครอสคัปปลิงได้ แต่ไม่ทั้งหมด
3. การป้อนคลื่นสองตำแหน่งแบบสมมาตรอาจเกิดการครอสคัปปลิงมากกว่าการป้อนคลื่นสองตำแหน่งแบบไม่สมมาตร เนื่องจากเกิดการซ้อนทับของคลื่นในระนาบเดียวกัน

4. การกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและความร้อนภายในควิตี้กรณี ป้อนคลื่นสองตำแหน่งแบบไม่สมมาตรจะดีกว่ากรณีป้อนคลื่นสองตำแหน่งแบบสมมาตรและป้อนคลื่นตำแหน่งเดียว เนื่องจากมีคลื่นรูปแบบใหม่ ๆ เพิ่มขึ้น

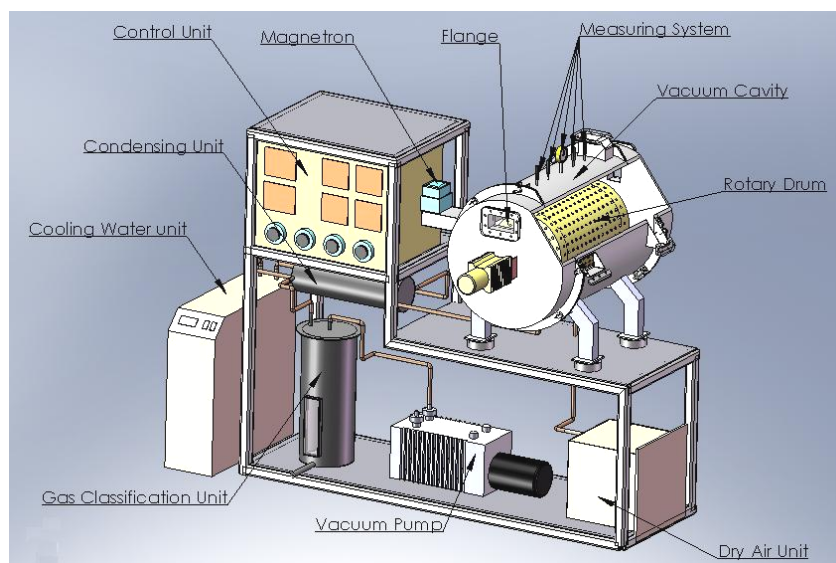
ผลที่ได้จากแบบจำลองนี้สามารถนำไปใช้ในการออกแบบควิตี้ เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการทำความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟที่ดีที่สุด

4.2 การออกแบบ

จากที่ได้ทำการวิเคราะห์การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและอุณหภูมิภายในควิตี้แบบ 3 มิติในหัวข้อที่ผ่านมา จึงได้ทำการออกแบบในส่วนของควิตี้และระบบอบแห้งโดยรวม ภาพที่ 4.8 รายละเอียดของระบบอบแห้งที่ได้ทำการออกแบบ โดยมีควิตี้รูปทรงกระบอกสามารถป้อนคลื่นได้หลายตำแหน่งแบบไม่สมมาตร ซึ่งในส่วนของควิตี้จะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบเพื่อให้คลื่นที่เกิดภายในควิตี้เป็นแบบหลายโหมด มีการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและอุณหภูมิที่สม่ำเสมอภายในควิตี้ โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 480 mm ยาว 720 mm ภายในประกอบด้วยถังหมุนทำจากวัสดุโพลีโพรพีลีนซึ่งปรับความเร็วรอบได้ สามารถบรรจุวัสดุไม่เกิน 10 กิโลกรัมต่อรอบการอบแห้ง ระบบสุญญากาศจะควบคุมโดยใช้ปั๊มขนาด 1.5 Hp 1425 RPM 208-230V -IP 23 ซึ่งจะทำงานแบบอัตโนมัติ ความชื้นถูกดูดออกจากควิตี้โดยใช้ปั๊มสุญญากาศดูดผ่านถังควบแน่นเพื่อให้ไอน้ำให้กลั่นตัวเป็นของเหลวแล้วมาแยกน้ำและอากาศที่ถังควบแน่นก่อนเข้าปั๊ม สุญญากาศของระบบสามารถควบคุมได้ แต่ไม่ควรเกิน 390 torr (Operated) อุณหภูมิในควิตี้จะวัดโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล (Type K)



(ก)



(ข)

ภาพที่ 4.8

การออกแบบเครื่องอบแห้งต้นแบบด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศ

(ก) โครงร่างการออกแบบ และ (ข) ภาพ 3 มิติของเครื่องอบแห้งที่สร้างขึ้น

4.3 อุปกรณ์ที่สร้างขึ้นเพื่อประกอบเป็นเครื่องต้นแบบ

ภาพที่ 4.9 เป็นภาพถ่ายจริงของเครื่องอบแห้งต้นแบบด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศที่สร้างขึ้นและใช้ได้จริง ในที่นี้ทาง บริษัท ศรีพิพัฒน์เอ็นจิเนียริง จำกัด ได้ให้ความช่วยเหลือทางด้านเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างเครื่อง โดยมีรายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการประกอบเครื่องดังนี้



ภาพที่ 4.9

เครื่องอบแห้งต้นแบบด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศที่สร้างขึ้น

4.3.1 คาวิตี (Cavity)

คาวิตีที่ใช้ในการอบแห้งนี้ขึ้นรูปจากแผ่นสแตนเลส AISI 304 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 480 mm ยาว 720 mm และหนา 6 mm (รวมฝาถึง) โดยมีตำแหน่งป้อนคลื่น 6 ตำแหน่ง



ภาพที่ 4.10
ควาวิดีที่สร้างขึ้น

4.3.2 เจเนอเรเตอร์ (Generator)

เจเนอเรเตอร์เป็นอุปกรณ์กำเนิดคลื่นไมโครเวฟประกอบด้วยแมกนีตรอนกำลัง 800 W ความถี่ 2.45 GHz และท่อนำคลื่นชนิด WR403 ที่มีความกว้าง 55 mm ยาว 110 mm สูง 210 mm ทำจากสแตนเลส AISI 304



ภาพที่ 4.11
เจเนอเรเตอร์ (Generator)

4.3.3 ถังหมุน (Rotary Drum)

ถังหมุนที่ใช้ในการอบแห้งนี้ทำจากแผ่นวัสดุโพลีโพรพิลีนขึ้นรูปเป็นทรงกระบอก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 300 mm ยาว 500 mm สามารถบรรจุวัสดุอบแห้งได้ไม่เกิน 10 กิโลกรัมต่อการอบแห้ง



ภาพที่ 4.12

ถังหมุนทำจากวัสดุโพลีโพรพิลีน

4.3.4 ถังควบแน่น (Condensing Unit)

ถังควบแน่นทำจากเหล็ก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 126 mm สูง 450 mm และหนา 2 mm โดยจะมีน้ำหล่อเย็นจากถังหล่อเย็นเวียนอยู่ในถัง เพื่อที่จะควบคุมการควบแน่นของไอน้ำให้กลายเป็นน้ำ



ภาพที่ 4.13

ถังควบแน่น (Condensing Tank)

4.3.5 ถังแยกน้ำและไอร้อน (Gas Classification Unit)

ถังแยกน้ำและไอร้อนทำจากเหล็กมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 196 mm สูง 500 mm และหนา 2 mm ทำหน้าที่ในการแยกน้ำและไอร้อน เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำผ่านเข้าไปยังปั๊มสุญญากาศ



ภาพที่ 4.14

ถังแยกไอร้อน (Gas Classification Tank)

4.3.6 ชุดมอเตอร์ขับเคลื่อน (Motor)

ในการขับเคลื่อนภายในคาวิตันนั้น จะใช้มอเตอร์ยี่ห้อ Panasonic กำลัง 90 W



ภาพที่ 4.15

มอเตอร์ขับเคลื่อน

4.3.7 ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum Pump)

ปั๊มสุญญากาศที่ใช้ยี่ห้อ ACATEL ขนาด 1.5 Hp 1425 RPM 208-230V -IP 23 ซึ่งจะทำงานแบบอัตโนมัติ หล่อเย็นด้วยน้ำมันหล่อเย็น

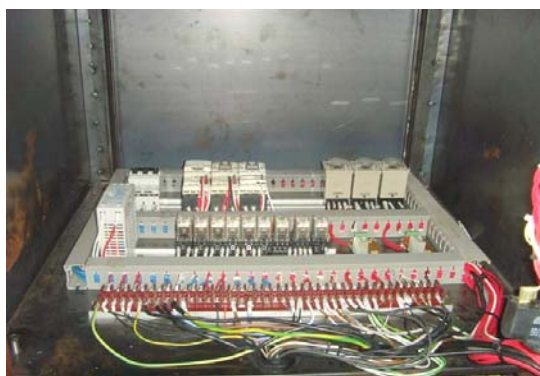


ภาพที่ 4.16

ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum Pump)

4.3.8 วงจรควบคุม (Magnetic Control)

วงจรควบคุมนี้มีหน้าที่ควบคุมระบบไฟฟ้าของเครื่องอบแห้งที่สร้างขึ้น เช่น ควบคุมกำลังแมกนีตรอน เวลาการเปิดและปิดแมกนีตรอน ควบคุมอุณหภูมิภายในคาวีตี้



ภาพที่ 4.17

วงจรควบคุม (Magnetic Control)

จากที่ได้ทำการออกแบบและสร้างเครื่องเป็นผลสำเร็จแล้ว จึงได้ดำเนินการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งที่สร้างขึ้น ซึ่งความสามารถของเครื่องสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ที่ควาวิตีมีจุดต่อท่อน้ำคลีน 6 จุด
2. สามารถเลือกใช้ลักษณะการป้อนคลีนได้
3. กำลังของแมกนีตรอนสามารถปรับได้ (100 – 1600 W)
4. สามารถปรับตั้งเวลาการทำงานได้ (1 sec – 30 h)
5. ความดันของระบบสามารถทำงานตัดต่ออัตโนมัติและปรับตั้งค่าได้ (0 – (- 50) kPa)
6. อุณหภูมิภายในควาวิตีสามารถกำหนดค่าได้ (30 – 500°C)
7. เครื่องสามารถอบลักษณะวัสดุอยู่กับที่ได้และสามารถอบโดยใช้ถังหมุนให้วัสดุเคลื่อนที่ได้
8. ถังหมุนสามารถปรับรอบการหมุนได้ (5 – 30 rpm)
9. เครื่องสามารถสร้างความร้อนแบบผสมได้ (ใช้ลมร้อน + ไมโครเวฟ)

4.4 สรุปผลการศึกษา

จากการวิเคราะห์การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและอุณหภูมิภายในควาวิตี จะเห็นว่ากรณีป้อนคลีนสองตำแหน่งแบบไม่สมมาตรนั้นจะมีการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและอุณหภูมิที่ดีกว่ากรณีป้อนคลีนตำแหน่งเดียวและกรณีป้อนคลีนสองตำแหน่งแบบสมมาตร ซึ่งผลการวิเคราะห์สามารถนำไปใช้ในการออกแบบและสร้างควาวิตีของระบบอบแห้งเพื่อประสิทธิภาพของการอบแห้งที่ดีขึ้น