

ศึกษาการกระจายสนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ 2.45GHz ด้วยเทคนิคการปรับจุดของโพรง สัญญาณในตัวกลางของเสีียงารถยนต์สำหรับประยุกต์ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิส Study Distributed of Electromagnetic Frequency 2.45GHz with Adjust the Signal Technics in the Cavity for Microwave Pyrolysis Waste Tire Application

เฉลิมชนม์ ตั้งจิรัชพันธุ์¹ และ สิโรธร เชื้อรุ่ง¹

¹สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
shalerm123@yahoo.co.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการกระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและค่ากำลังการสูญเสียในตัวกลางด้วยโปรแกรมช่วยจำลอง CST : (Computer Simulation Technology) เพื่อประยุกต์ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสด้วยไมโครเวฟโดยใช้ท่อโลหะทรงกระบอกที่มีท่อแก้วทนความร้อนบรรจุภายในจ่ายคลื่นไมโครเวฟความถี่ 2.45GHz จำนวน 3 ชุดแบบอิสระต่อกันโดยมีตัวกลางของเสีียงารถยนต์อยู่ภายใน วิเคราะห์ค่ากำลังการสูญเสียในตัวกลาง วิเคราะห์สนามแม่เหล็ก สนามไฟฟ้า ผลการจำลองพบว่าค่ากำลังการสูญเสียในตัวกลางจากชุดจ่ายที่ 1,2,3 มีค่าสูงสุดคือ $2.75 \times 10^5 \text{ W/m}^3$, $5.41 \times 10^6 \text{ W/m}^3$, $3.74 \times 10^4 \text{ W/m}^3$ ตามลำดับ และเกิดการแพร่กระจายคลื่นไปยังตัวกลางอย่างทั่วถึงเมื่อวิเคราะห์จากผลรวมของทุกชุดจ่ายคลื่นไมโครเวฟความถี่

คำสำคัญ: สนามแม่เหล็กไฟฟ้า, ค่ากำลังการสูญเสียในตัวกลาง, ไมโครเวฟไพโรไลซิส

Abstract

This paper presents the distribution of the electromagnetic fields and power loss density with-in CST : (Computer Simulation Technology) for Microwave Pyrolysis Application by using metal pipe inner packing borosilicate glass cylindrical and sent the 3 frequency at 2.45GHz independently by waste tires with media inside. Analysis of power loss density electric field and magnetic field in medium. Simulation results indicated that power loss density in media from 1,2,3 supplies are the highest $2.75 \times 10^5 \text{ W/m}^3$, $5.4 \times 10^6 \text{ W/m}^3$, $3.74 \times 10^4 \text{ W/m}^3$ respectively and the wave propagation to the medium. Analysis of thoroughly when the sum of all the unit microwave frequency

Keywords: electromagnetic, power loss density, microwave pyrolysis

1. บทนำ

การนำยางรถยนต์ไปผ่านขบวนการไพโรไลซิสนั้นเป็นวิธีการหนึ่งที่จะเปลี่ยนสภาพยางรถยนต์เก่าหรือยางที่เสียแล้วเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่อันประกอบด้วย กากน้ำมันที่สามารถนำไปเป็นเชื้อเพลิง ผงคาร์บอนที่ใช้ผลในการดูดซับสามารถนำไปในอุตสาหกรรมฟอกย้อม และอีกส่วนหนึ่งคือใยเหล็กที่สามารถนำไปหลอมรวมกลับมาใช้ได้ใหม่ [2] ขบวนการไพโรไลซิสยังพัฒนารูปแบบการให้ความร้อนจากแหล่งกำเนิดแบบต่างๆ เช่น จากเตาเชื้อเพลิง จากเตาไฟฟ้าขาดลดความร้อน และเริ่มมีการพัฒนาแหล่งกำเนิดในรูปแบบคลื่นไมโครเวฟ [4] ซึ่งมีจุดเด่นในเรื่องความรวดเร็วและการควบคุมอุณหภูมิ รูปแบบคลื่นไมโครเวฟที่ประยุกต์ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสโดยทั่วไปเป็นการใช้แหล่งจ่ายคลื่นเพียงแหล่งเดียว [6] ผู้วิจัยจึงได้

ทำการศึกษาและพัฒนาจากพฤติกรรมของคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านไมโครเวฟความถี่ 2.45 GHz โดยวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในการให้ความร้อนแบบชนิดกลไกการปรับจุดความร้อน [9] ที่ส่งผลต่อตัวกลางที่มีการสูญเสียในลักษณะกระบวนการไพโรไลซิสขยะยางรถยนต์เช่น การเกิดอุณหภูมิความร้อนที่รวดเร็วขึ้น การกระจายความร้อนที่ทั่วถึงทุกพื้นที่ ทำให้กำหนดปริมาณและคุณภาพที่ผลิตได้ เนื่องจากแหล่งกำเนิดที่ถูกพัฒนานี้จะมีอยู่มากกว่า 1 แหล่งกำเนิด ปัจจัยของแหล่งกำเนิดจะขึ้นกับขนาดของตัวประยุกต์ลักษณะตัวกลางของเสียอย่าง โดยการจัดสร้างในรูปแบบการพัฒนาแบบไมโครเวฟไพโรไลซิสด้วยกลไกการปรับจุดความร้อนของโพรงสัญญาณ [8] ที่ทำให้เกิดการกระจายค่าความสูญเสียมากขึ้นตลอดผิวยาง จนนำไปสู่การออกแบบและสร้างตัวเครื่องไมโครเวฟไพโรไลซิสชนิดหลายแหล่งจ่าย [5] ซึ่งเป็นการพัฒนาเครื่องไมโครเวฟไพโรไลซิสขยะยางรถยนต์ที่เน้นให้ชุมชนตระหนักถึงคุณค่าทางพลังงานเช่นเดียวกับเครื่องผลิตไบโอดีเซลที่ได้เป็นที่ยอมรับโดยทั่วไปแล้ว

2. ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

พื้นฐานเกี่ยวกับการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟไพโรไลซิสเป็นการศึกษาพฤติกรรมการทำความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ [1] เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟเป็นรูปแบบหนึ่งของคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามีช่วงความถี่ 0.3-300 GHz หรือมีความยาวคลื่น 0.3มม. – 30มม. นำมาประยุกต์ในการให้ความร้อนแก่วัตถุโดยพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟจะถูกวัตถุดูดกลืนจนเกิดเป็นการสั่นของระดับโมเลกุลจนเกิดเป็นความร้อนในวัตถุหรือวัสดุที่ดูดกลืนพลังงานไมโครเวฟได้ดีจะเป็นวัสดุที่มีค่าไดอิเล็กตริกมาก การให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟมีจุดเด่นกว่าการให้ความร้อนแบบอากาศร้อนหรือน้ำคือ ความสม่ำเสมอในการกระจายอุณหภูมิรวมถึงการกระจายความชื้นในวัสดุ

การพิจารณารูปแบบท่อนำคลื่น Wave guide จะพิจารณาจากโหมดพื้นฐานในรูปทรงพิกัดฉากจะพิจารณาจากพื้นที่ผนังด้าน a และ b

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left[\frac{m\pi}{a}\right]^2 + \left[\frac{n\pi}{b}\right]^2} \quad (1)$$

f_r = ความถี่ต่ำสุดที่สามารถผ่านท่อนำคลื่น Hz, m = ตัวเลขแสดงโหมดลำดับ 1, n = ตัวเลขแสดงโหมดลำดับ 2

a = ด้านกว้างของท่อนำคลื่น, b = ด้านสูงของท่อนำคลื่น

ในการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าจำเป็นต้องพิจารณาระนาบ X-Z และตั้งเป็นสมมุติฐาน [3] เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ โดยใช้พื้นฐานของสมการแมกซ์เวลล์อธิบายได้ดังนี้

1. พิจารณาไมโครเวฟในโหมด TE₁₀ จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงของสนามในทิศทางแกน Y ดังนั้น แบบจำลองสองมิติในระนาบ X-Z จึงสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมได้

2. ไม่คำนึงถึงการดูดซับพลังงานไมโครเวฟของอากาศในท่อนำคลื่น

3. ผนังของท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมเป็นตัวนำยิ่งยวด

4. ไม่คำนึงผลของสถานะบรรจุวัสดุทดสอบที่มีต่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

การกำเนิดคลื่นสนามไฟฟ้าและแม่เหล็กโดยแมกนีตรอนสามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการดังนี้

$$E_y = E_{yi} \sin\left[\frac{\pi x}{L_x}\right] \sin(2\pi ft) \quad (2)$$

$$H_y = \frac{E_{yi}}{Z_H} \sin\left[\frac{\pi x}{L_x}\right] \sin(2\pi ft) \quad (3)$$

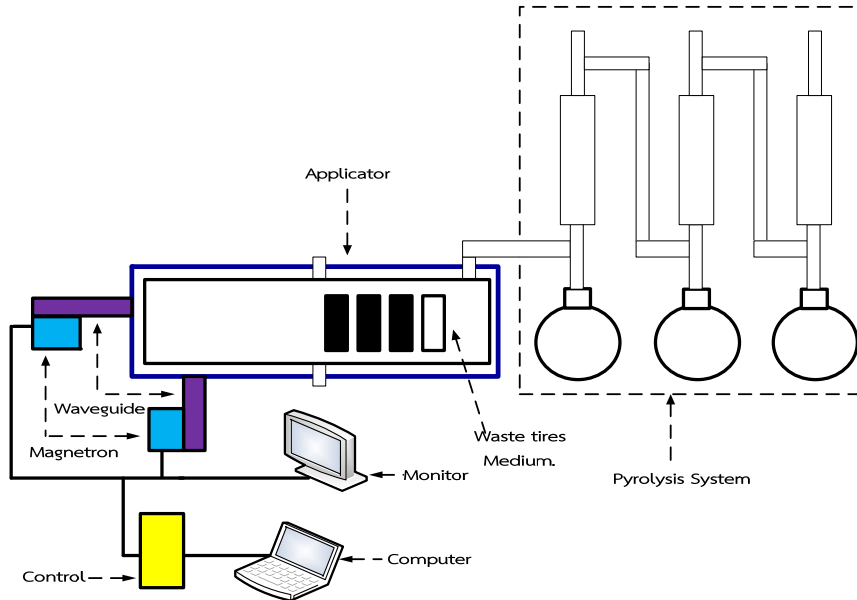
E_{yi} คือ ความเข้มสนามไฟฟ้าที่ป้อน,

L_x คือ ความยาวของท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมตามแนวแกน X

Z_H คือ อิมพีแดนซ์ของคลื่น

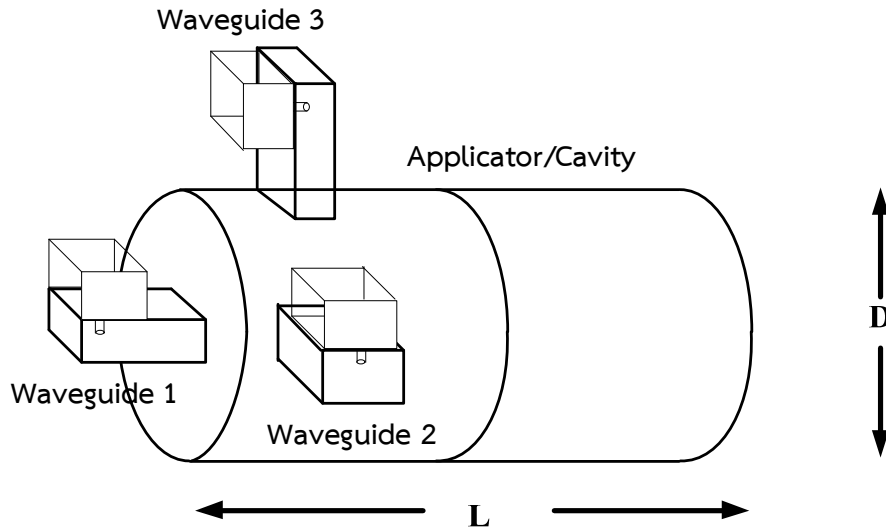
3. การออกแบบและการจำลองผล

การให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ จะทำงานโดยใช้แหล่งกำเนิดพลังงานความถี่สูง โดยผ่านท่อนำคลื่นนำคลื่นความถี่ไมโครเวฟที่ถูกสร้างขึ้นไปยังชิ้นงานหรือของเสียขงรถยนต์ที่อยู่ภายในเตาอบหรือ Applicator



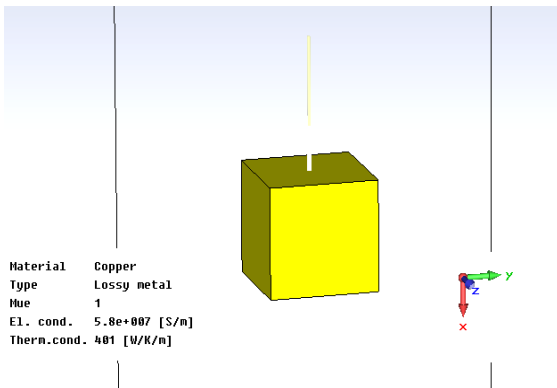
รูปภาพที่ 1 ส่วนประกอบไมโครเวฟไพโรไลซิส

รูปภาพที่ 1 ส่วนประกอบไมโครเวฟไพโรไลซิสที่มีแหล่งกำเนิดคลื่นคือหลอดแมกนีตรอนส่งคลื่นความถี่ไมโครเวฟ 2.45 GHz ทำการปล่อยคลื่นไมโครเวฟนี้เข้าสู่ Applicator หรือ Cavity ที่มีชิ้นงานหรือตัวกลางของเสียขงรถยนต์ (Waste tires Medium) บรรจุอยู่ภายในทำให้เกิดค่ากำลังการสูญเสียในตัวกลางของเสียขงรถยนต์ จนตัวกลางของเสียขงรถยนต์มีอุณหภูมิสูงขึ้นจนถึงจุดเดือดเพื่อประยุกต์ให้เป็นไอหรือก๊าซ โดยก๊าซเหล่านี้จะถูกส่งเข้าสู่ระบบไพโรไลซิส (Pyrolysis system) เพื่อทำการควบแน่นก๊าซเหล่านี้ให้เป็นของเหลวหรือน้ำมันต่อไปการกระจายค่ากำลังการสูญเสียที่สม่ำเสมอภายในโหลตเป็นการกระจายสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในควิตี้หรือแอฟพลีเคเตอร์ทำให้เกิดจุดที่เรียกว่าจุดร้อนและจุดเย็น [7] สำหรับจุดร้อนจะมีผลทำให้ชิ้นงานมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในขณะที่จุดเย็นจะมีผลให้อุณหภูมิของชิ้นงานไม่ถึงจุดเดือดเมื่อวิเคราะห์ตลอดช่วงก็จะส่งผลต่อคุณภาพการไพโรไลซิสจึงมีความจำเป็นที่ต้องออกแบบระบบไมโครเวฟให้มีการกระจายค่ากำลังการสูญเสียในโหลตให้ตัวอย่างสม่ำเสมอตำแหน่งการป้อนคลื่นจึงมีผลสำคัญตำแหน่งการป้อนคลื่นอาจมีหลายตำแหน่งโดยใช้แมกนีตรอนหลายๆตัว การวิเคราะห์การป้อนคลื่นจากตำแหน่งต่างๆเพื่อที่จะให้ผลของโหลตว่าได้รับพลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเท่าใดจากหัวจ่ายใดและเมื่อชิ้นงานเปลี่ยนตำแหน่งจะได้รับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นอย่างไร การป้อนคลื่นหลายตำแหน่งมีข้อดีคือช่วยกระตุ้นการเกิดโหมตใหม่ๆภายในควิตี้ทำให้ประสิทธิภาพการให้ความร้อนดีขึ้นการป้อนคลื่นหลายตำแหน่งต้องใช้แมกนีตรอนหลายตัวโดยติดตั้งรอบผนังควิตี้และสามารถประยุกต์ใช้ชุดควบคุมการปล่อยคลื่นในรูปแบบแยกกันหรือร่วมหมุนสำหรับควบคุมกำลังงานในการปล่อยคลื่นนี้สูงขึ้นงานทำให้ประสิทธิภาพและความสามารถของไพโรไลซิสจึงขึ้นอยู่กับกระบวนการปล่อยคลื่นนี้เป็นสำคัญ

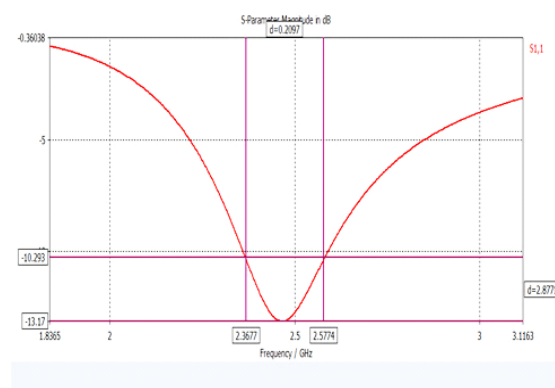


รูปภาพที่ 2 แบบควาวิตี้และท่อนำคลื่น

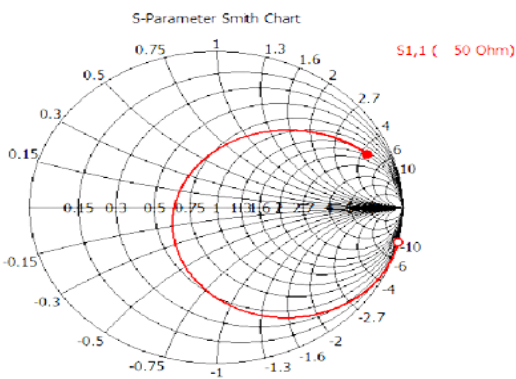
จากรูปภาพที่ 2 เป็นควาวิตี้และท่อนำคลื่นโดยมีค่า L 30 ซม. และ D 12 ซม. โดยมีตัวป้อนคลื่น 2.45GHz จำนวน 3 ตำแหน่งผ่านท่อนำคลื่นรูปสี่เหลี่ยม สามารถแก้ปัญหาสมการสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของงานวิจัยนี้จะใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์โทมโดเมนซึ่งใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์มาช่วยวิเคราะห์ [10] [11] คือโปรแกรม Computer Simulation Technology: CST โดยการจำลองรูปแบบการแผ่สนามแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยความถี่ 2.45GHz ในควาวิตี้ทรงกระบอกและท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม มีตัวป้อนคลื่นหลายตำแหน่งทำการวิเคราะห์ค่าสนามแม่เหล็กและค่ากำลังการกระจายการสูญเสียต่อวัสดุของจุดป้อนคลื่นกำลังงานของแต่ละจุดมีชิ้นงานกระจายอยู่ภายใน



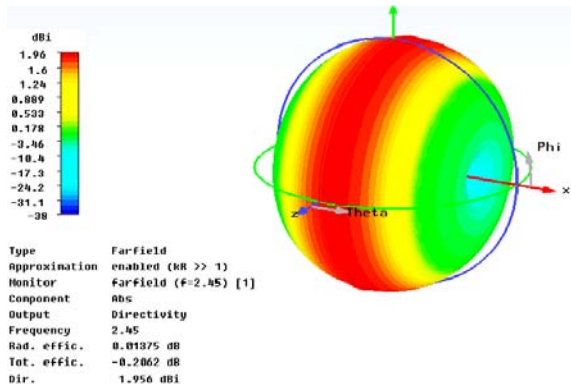
รูปภาพที่ 3 แบบจำลองตัวปล่อยคลื่นจากสายอากาศ 2.45GHz



รูปภาพที่ 4 ค่าความสูญเสียย้อนกลับของตัวปล่อยคลื่น

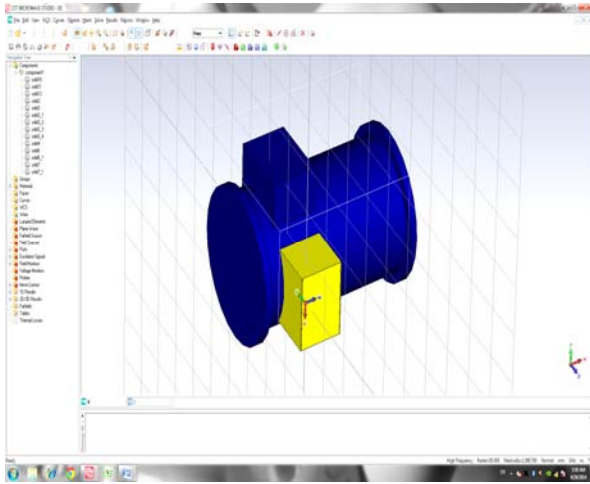


รูปภาพที่ 5 กราฟ Smith Chart ของตัวปล่อยคลื่น

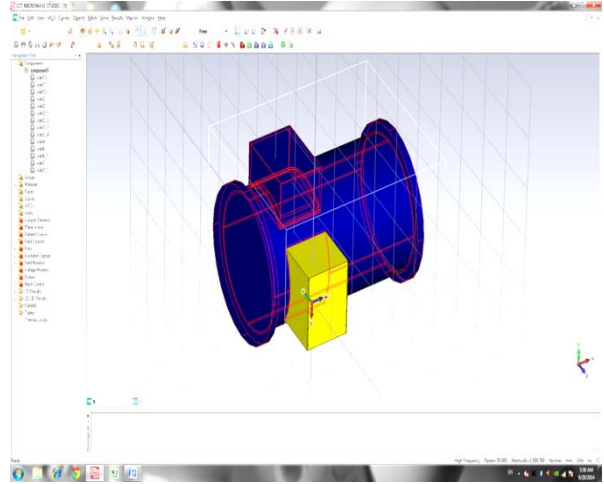


รูปภาพที่ 6 รูปแบบการแผ่พลังงานที่ความถี่ 2.45 GHz

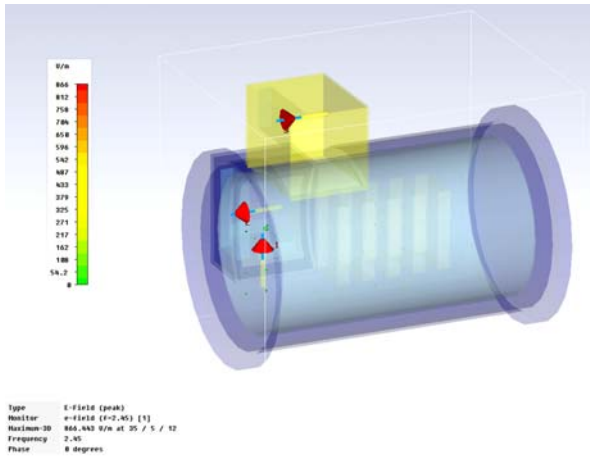
จากรูปภาพที่ 3 แสดงสายอากาศไดโพลป้อนคลื่น 2.45GHz โดยมีค่าความสูญเสียย้อนกลับดังรูปภาพที่ 4 ซึ่งจากรูปภาพจะเห็นได้ว่าค่าการสูญเสียย้อนกลับมีค่าต่ำสุดที่ -13.17 dB ที่ความถี่ 2.45GHz โดยมีแถบความถี่ 2.36GHz - 2.57GHz
รูปภาพที่ 5 แสดงกราฟ Smith Chart ของตัวป้อนคลื่น และรูปภาพที่ 6 แสดงแบบการแผ่พลังงานที่ความถี่ 2.45 GHz โดยจะมีค่ากำลังงาน 1.96 dB ค่าความสูญเสียย้อนกลับและแบบการแผ่พลังงานนี้ให้เห็นถึงแบบจำลองตัวป้อนคลื่นอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน



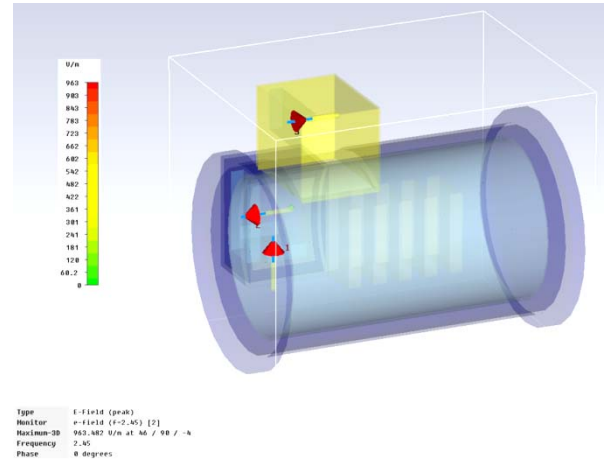
รูปภาพที่ 7 แบบจำลอง Cavity ที่มีจุดป้อนคลื่นโดยรอบ



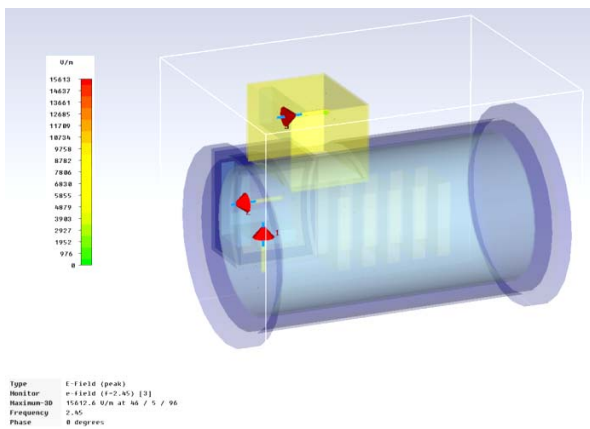
รูปภาพที่ 8 การป้อนที่มีจุดป้อนคลื่นสามตำแหน่ง



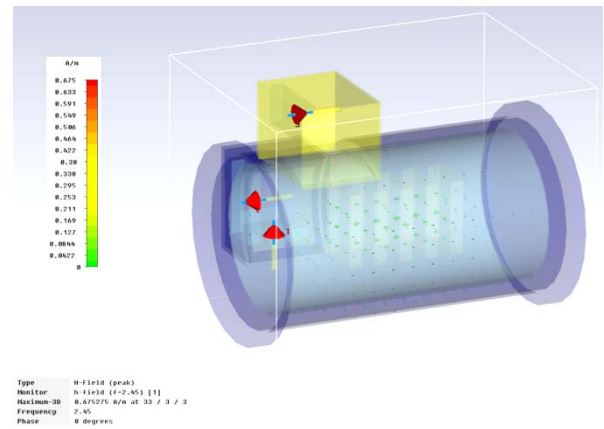
รูปภาพที่ 9 วิเคราะห์สนามไฟฟ้าโดยจุดป้อนคลื่นที่ 1



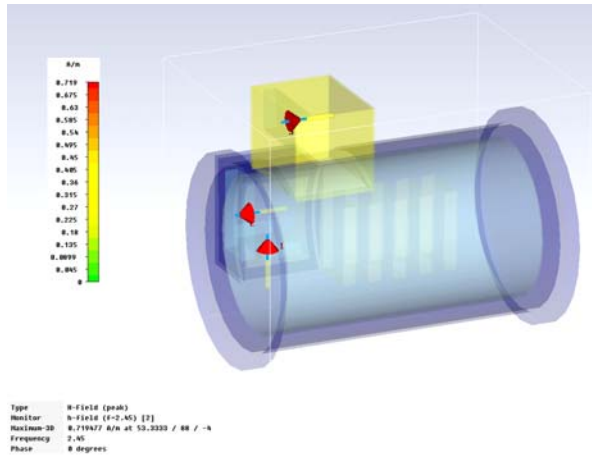
รูปภาพที่ 10 วิเคราะห์สนามไฟฟ้าโดยจุดป้อนคลื่นที่ 2



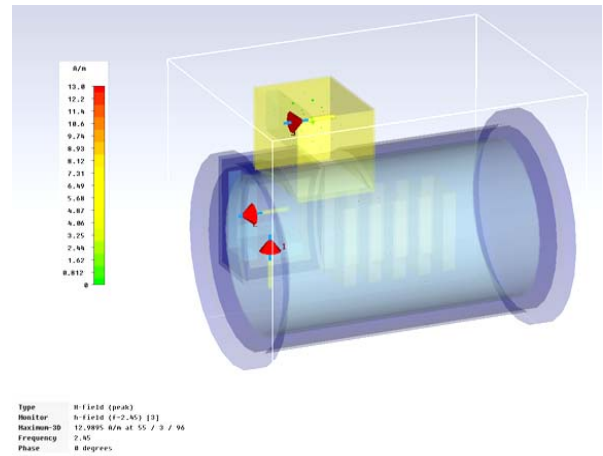
รูปภาพที่ 11 วิเคราะห์สนามไฟฟ้าโดยจุดป้อนคลื่นที่ 3



รูปภาพที่ 12 วิเคราะห์สนามแม่เหล็กโดยจุดป้อนคลื่นที่ 1

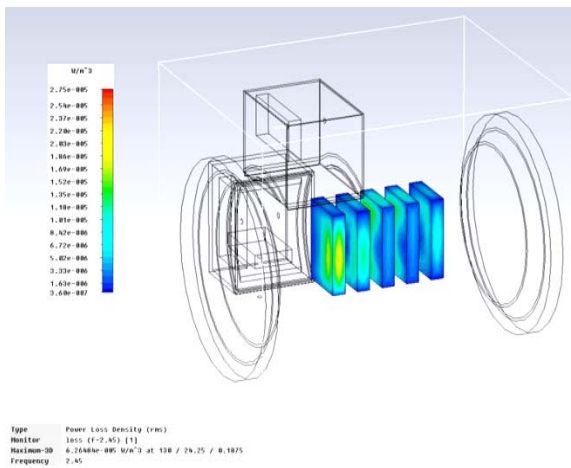


รูปภาพที่ 13 วิเคราะห์สนามแม่เหล็กโดยจุดปล่อยคลื่นที่ 2

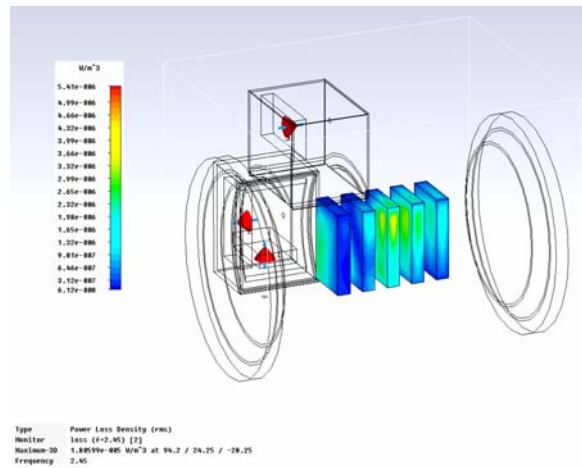


รูปภาพที่ 14 วิเคราะห์สนามแม่เหล็กโดยจุดปล่อยคลื่นที่ 3

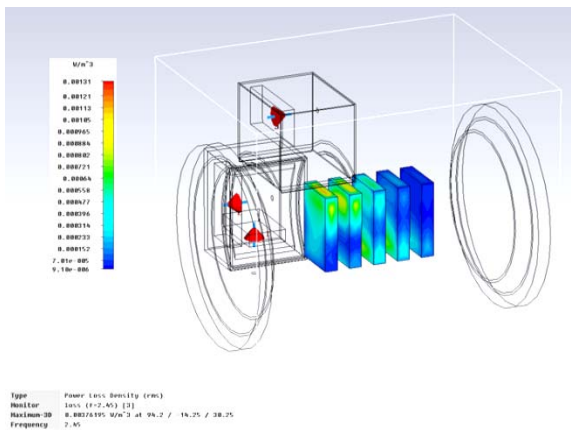
การวิเคราะห์ค่าสนามไฟฟ้าโดยจุดปล่อยคลื่นที่ 1,2,3 สามารถแสดงให้เห็นจากรูปภาพที่ 9,10,11 โดยมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 866V/m, 963V/m, 15,613V/m ตามลำดับ และการวิเคราะห์ค่าสนามแม่เหล็กโดยจุดปล่อยคลื่นที่ 1,2,3 สามารถแสดงให้เห็นจากรูปภาพที่ 12,13,14 โดยมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 0.675A/m,0.719A/m,13A/m ตามลำดับ ซึ่งค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเหล่านี้มีผลในด้านความร้อนต่อตัวกลาง



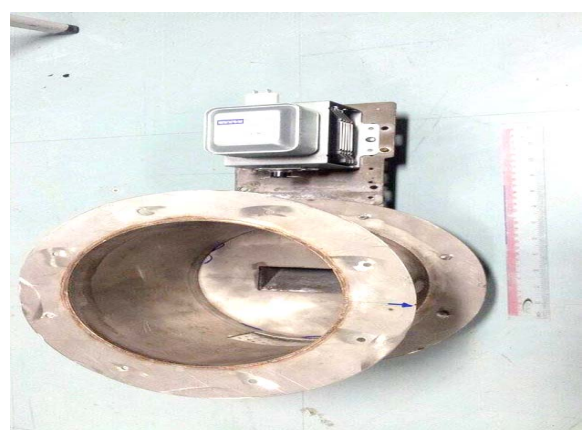
รูปภาพที่ 15 ค่ากำลังการสูญเสียโดยจุดปล่อยคลื่นที่ 1



รูปภาพที่ 16 ค่ากำลังการสูญเสียโดยจุดปล่อยคลื่นที่ 2



รูปภาพที่ 17 ค่ากำลังการสูญเสียโดยจุดปล่อยคลื่นที่ 3



รูปภาพที่ 18 แสดงต้นแบบโครงสัญญาณ

เมื่อวิเคราะห์สนามไฟฟ้าโดยจุดปล่อยคลื่นที่ 1,2,3 จะได้ค่า 866V/m, 963V/m และ 15,613 V/m และวิเคราะห์สนามแม่เหล็กโดยจุดปล่อยคลื่น 0.675A/m, 0.719 A/m และ 12.98A/m ทั้งนี้ภาพยังแสดงให้เห็นการกระจายอย่างแตกต่างระหว่างตัวปล่อยคลื่นทำให้เมื่อทำการป้อนสัญญาณไปทุกจุดปล่อยจะเกิดการแผ่พลังงานอย่างทั่วถึงซึ่งจะสอดคล้องกับการวิเคราะห์ค่ากำลังการสูญเสียที่มีค่าสูงสุด $2.75 \times 10^5 \text{ W/m}^3$, $5.41 \times 10^6 \text{ W/m}^3$, $3.74 \times 10^4 \text{ W/m}^3$ ตามลำดับ และรูปภาพที่ 15, 16, 17 ยังแสดงให้เห็นการสูญเสียที่เกิดขึ้นมีความแตกต่างคือ รูปที่ 15 วิเคราะห์ค่ากำลังการสูญเสียโดยจุดปล่อยคลื่นที่ 1 เกิดค่าความสูญเสียมีค่าสูงในแท่งที่ 1,2 ด้านขวา ส่วนรูปภาพที่ 16 วิเคราะห์ค่ากำลังการสูญเสียมีค่าสูงโดยจุดปล่อยคลื่นที่ 2 จะเกิดค่าความสูญเสียมีค่าสูงในแท่งที่ 3,4 ด้านขวาและส่วนรูปภาพที่ 17 วิเคราะห์ค่ากำลังการสูญเสียมีค่าสูงโดยจุดปล่อยคลื่นที่ 3 เกิดค่าความสูญเสียมีค่าสูงในแท่งที่ 1,2 ด้านบน ซึ่งปรากฏการณ์เหล่านี้จะไม่ก่อให้เกิดการกระจุกตัวของพลังงานที่ป้อนทำให้สามารถนำมาประยุกต์เพิ่มเติมในการให้ความร้อนได้อย่างทั่วถึง ทั้งนี้จะไม่ปล่อยคลื่นพร้อมกันเพราะอาจทำให้เกิดการหักล้างกันของคลื่น

5. บทสรุป

ในการปล่อยคลื่นหลายตำแหน่งนอกจากจะให้ข้อดีในด้านการกระจายตัวคลื่นสู่ชิ้นงานแล้วแต่จำเป็นต้องคำนึงปัจจัยในการเกิดคัปปลิงของคลื่น Coupling หรือการคาบเกี่ยวของคลื่น การเกิดการคาบเกี่ยวของคลื่น ภายในควิตี้สนี้ จะมีทั้งแบบ อินเตอร์คัปปลิง Inter Coupling และ ครอสคัปปลิง Cross Coupling การเกิดคัปปลิงของคลื่นนี้ จากทำให้เกิดผลต่อเนื่องปรากฏการณ์ต่อเนื่องมาอีก คือเกิดการล็อกของคลื่น Locking ปรากฏการณ์นี้จะมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการทำงานของตัวปล่อยคลื่นให้ลดลง ความถี่ที่แตกต่างก็จะลดลง Frequency Diversity มีผลให้การเรโซแนนท์จากคลื่นแบบมัลติโหมดมีประสิทธิภาพลดลงเช่นกัน ผลจากการลดลงนี้จะทำให้ประสิทธิภาพในการให้ความร้อนจะลดลงตามไปด้วย ลักษณะปัจจัยนี้เกิดจากผลกระทบที่ตัวปล่อยคลื่นแต่ละตัวได้รับคลื่นสะท้อนกลับมาทั้งจากตัวปล่อยคลื่นอื่นๆและจากการสะท้อนจากชิ้นงานที่ไม่สามารถดูดซับหรือสะท้อนจากชิ้นงานกลับมาสู่ตัวปล่อยคลื่นนั่นเอง การลดปัญหานี้สามารถทำได้โดยการปล่อยคลื่นที่ละส่วนหรือไม่ปล่อยคลื่นพร้อมกันซึ่งเป็นวิธีที่ผู้วิจัยเลือกใช้หรือเรียกว่าการปล่อยคลื่นทีละจุด

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ทองโสภา สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโฟโตนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความอนุเคราะห์ในด้านผลทางด้านการวิเคราะห์ และ รองศาสตราจารย์ ดร.ปิยะ โควินท์ทวีวัฒน์ ในด้านคำปรึกษารวมถึง ขอขอบคุณ สถาบันวิจัยแห่งชาติ ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัยในหัวข้อเรื่องการพัฒนาระบบไมโครเวฟไพโรไลซิสด้วยกลไกการปรับจุดความร้อนของโพรงสัญญาณในตัวกลางขยะของเสี่ยางรถยนต์ผ่านสถาบันวิจัยมหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

เอกสารอ้างอิง

- [1] JM Osepchuk. Microwave power applications. IEEE Transactions, 2002; 50, 975-985
- [2] ดวงอาทิตย์ ศรีมูล. 2544. การศึกษาการให้ความร้อนแก่วัตถุด้วยคลื่นไมโครเวฟแบบต่อเนื่องโดยใช้วิธีผลต่างสืบเนื่องเชิงเวลา. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [3] ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช. 2551. พื้นฐานการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- [4] Osepchuk, J.M. "A History of Microwave Heating Application", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., 32, pp:1201-1224, 1984

- [5] ขาดิสยาม ธรรมจินดาและเฉลิมชนม์ ตั้งวชิรพันธุ์. 2553. การศึกษาคุณลักษณะและประสิทธิภาพในการใช้เทคนิคไมโครเวฟเพื่อผลิตแผ่นก๊อตนเหนียวผสมสำหรับการสร้างบ้านดิน. สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
- [6] ภัทรานิษฐ์ รัศมีดารา, คุณากร ภูจินดา, นพิตา หิญาธิระนันท์ 2009. การไฟโรไลซิสงยารถยนต์ใช้แล้วเหนียวนำด้วยไมโครเวฟ. สาขาเทคโนโลยีเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [7] สรภถข กมลชัย. 2552. ระบบพัฒนาไมโครเวฟไฟโรไลซิส ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
- [8] Patummakasorn, C. Tangwachirapan, S. and. Thongsopa, C. “Development of inductive regional heating by energy control at frequency 2.45 GHz” IEEE CNF –Electromagnetic Compatibility and 19th International Zurich Symposium on Electromagnetnetic Compatibility 2008 APEMC 2008 Asia-Pacific Symposium ,Singapore, pp:819-822, May 19-23. 2008
- [9] M.Krairiksh, C. Thongsopa, D.Srimoon and A Mearnchu, “Analysis of Steerable Active Slot Applicator” Proc. the 1999 Asia Pacific Microwave Conference Singapore, vol. 2, pp.489-492, Dec.1999
- [10] Tangwachirapan, S. and. Thongsopa, C. “Numerical Simulation of Magnetic Fields Shield for Breast Cancer Hyperthermia” The 7th Proceedings of the PSU-Engineering Conference, Songkha ,Thailand, pp:102-103, May 21-22. 2009
- [11] Tangwachirapan, S. and. Thongsopa, C. “Study Magnetic Fields Shield for Lossy Mediums Inductive Hyperthermia Heating” Proceedings of the 32th Electrical Engineering Conference, Prajeenburi , Thailand, October 28-30. 2009