

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

รายงานการวิจัย
ระบบทำลายเนื้อเยื่อโดยคลื่นไมโครเวฟโดยใช้สายอากาศสามเส้น
Triple-Antenna Microwave Ablation System

นาย สุพันธ์ ตั้งจิตกุศลมัน



ลงทะเบียน.....
เลขทะเบียน..... 114548
วัน,เดือน,ปี..... 21 ส.ค. 2554

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2553

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีก
19290429

บทคัดย่อ

มะเร็งในตับนั้นเป็นหนึ่งในสาเหตุหลักของการเสียชีวิตของประชากรโลก โดยเฉพาะในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ โดยทั่วไปนั้น การรักษาโรคมะเร็งตับมักเลือกใช้วิธีการผ่าตัดเพื่อเอาก้อนมะเร็งออกมา แต่วิธีการนี้ก็ไม่ได้เหมาะกับผู้ป่วยจำนวนมาก เนื่องจากว่ามันเป็นการผ่าตัดที่เสี่ยงต่อการติดเชื้อและมีผลกระทบต่อร่างกาย ดังนั้น มีความต้องการในทางการแพทย์ที่จะหาวิธีการรักษาที่ไม่เป็นการผ่าตัดใหญ่และมีความเสี่ยงที่น้อยลง วิธีการทำลายเซลล์มะเร็งโดยใช้คลื่นไมโครเวฟได้เป็นหนึ่งในวิธีการรักษาใหม่ที่ได้รับ ความสนใจ เนื่องจากสามารถทำลายเซลล์มะเร็งโดยการสอดโทรบหรือสายอากาศ ผ่านผิวหนังวางในก้อนมะเร็ง จากนั้นพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าก็จะถูกส่งไปยังปลายสายอากาศ ซึ่งจะก่อให้เกิดการกระจายความร้อนในเนื้อเยื่อบริเวณใกล้เคียง งานวิจัยชิ้นนี้ได้นำเสนอวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ในการวิเคราะห์ การทำลายมะเร็งที่เนื้อเยื่อตับ โดยใช้คลื่นความถี่ไมโครเวฟ โดยได้นำเสนอผลทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ในรูปแบบการกระจายของปริมาณ SAR (Specific Absorption Rate) และอุณหภูมิในเนื้อเยื่อตับ ของสายอากาศ 3 รูปแบบ ได้แก่ สายอากาศแบบปลายเปิด (COA) สายอากาศแบบสล็อต (CSA) และสายอากาศแบบสล็อตที่มีลอนหุ้ม (CSAI) และเพิ่มขนาดของการทำลายมะเร็งที่จับด้วยเทคนิคการจัดวางสายอากาศ 3 ด้าน วางในรูปแบบอาร์เรย์ วางแบบทำมุมสามเหลี่ยม และวางแบบรูป “T-Shape” เพื่อเพิ่มขนาดและรูปแบบการทำลายเซลล์มะเร็ง ในการใช้สายอากาศหลายด้าน ทางผู้วิจัยได้ทำการทดลองกับเนื้อเยื่อตับแบบ *in vitro* เพื่อยืนยันความถูกต้องของการจำลองการทำงานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าขนาดของการทำลายเปรียบเทียบกับผลการทดลองกับผลที่ได้จากการจำลองการทำงาน ขนาดของการทดลองจะมีขนาดเล็กกว่าผลที่ได้จากการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ มีความแตกต่างอยู่ในช่วง 2%-11%

ABSTRACT

Hepatic cancer is one of the leading causes of death, especially in Southeast Asia. Traditionally, surgical resection of hepatic tumor is required but the treatment is associated with high risk and side effects. This study presents analyses of triple-antenna configurations and designs for microwave hepatic ablation using three-dimensional finite element analyses verified by *in vitro* experiments. Treatment of hepatic cancer often requires removal or destruction of large volume lesions. Using multiple antennas offers a potential solution for creating ablation zones with larger dimensions as well as varied geometrical shapes. We performed both three-dimensional finite element analyses and *in vitro* experiments using three identical open-tip microwave antennas simultaneously, placing them in three types of configurations—“linear array”, “triangular”, and “T-shaped” arrangements. We compared coagulation volumes created as well as temperature distribution characteristics from the three antenna arrangements after power delivery of 50 W for 60 s. We also performed additional tests using non-identical antennas (open-tip, slot, and slot with insulating jacket) for the three configurations. The results illustrate that arranging antennas in the “T-shaped” pattern destroyed more unwanted tissues than those found when using “linear array” and “triangular” arrangements, with maximum coagulation width and depth of 46 mm, and 81 mm, respectively, and coagulation volume of 30.7 cm³. In addition, using non-identical triple-antennas caused variations in coagulation zone characteristics, thus the technique could be applied to treatment situations where non-symmetric coagulation zones are required.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญเรื่อง

	หน้า
บทคัดย่อ	2
ABSTRACT	2
1. บทนำ	8
2. วัตถุประสงค์ของโครงการ	9
3. ขอบเขตของโครงการวิจัย	9
4. ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	10
5. สมการความร้อนในทางชีววิทยา (The Bio-heat Equation)	11
6. หลักการของเงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการจำลอง	12
7. โครงสร้างของสายอากาศที่ทำการวิเคราะห์	14
8. การออกแบบระบบส่งคลื่นไมโครเวฟเพื่อทำลายเนื้อเยื่อ	16
9. การทดลองและผลการทดลอง	17
10. ผลลัพธ์ที่ได้จากการทำวิจัย	31
11. เปอร์เซ็นต์ความคืบหน้าของโครงการ	31
12. เอกสารอ้างอิงการวิจัย	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 รายละเอียดของขนาดของสายอากาศ	15
ตารางที่ 2 รายละเอียดของค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเนื้อเยื่อตัว	15
ตารางที่ 3 สรุปปริมาตรของการทำลายเซลล์มะเร็งในเนื้อเยื่อตัวของสายอากาศแบบปลายเปิด สายอากาศแบบสลีต และสายอากาศแบบสลีตที่มีฉนวนหุ้ม	24



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1 ตัวอย่างการวางสายอากาศทั้งสามในรูปแบบต่างๆกัน (a) การวางแบบขนาน (b) การวางแบบสามเหลี่ยม และ (c) การวางแบบรูปตัว T	9
รูปที่ 2. แสดงลักษณะของสายอากาศแบบโคแอกเชียลในเนื้อเยื่อทดสอบ	13
รูปที่ 3 แสดง โครงสร้างของสายอากาศแบบสลีต โคแอกเชียล	13
รูปที่ 4 โครงสร้างของสายอากาศ (ก) ปลายเปิด (COA) (ข) แบบสลีต(CSA) (ค) แบบสลีตที่มีฉนวนหุ้ม	14
รูปที่ 5 โคอะแกรมการทดลองสายอากาศแบบหลายต้น ที่มีการจัดวางแบบอาร์เรย์ วางแบบสามเหลี่ยม วางรูป “T-Shape”	16
รูปที่ 6 แสดงการกระจายของฟลักซ์ความร้อนที่ออกจากสายอากาศแบบปลายเปิด โดยป้อนกำลังงานขนาด 50 วัตต์ ระยะเวลาในการป้อนกำลังงานเท่ากับ 1 นาที	17
รูปที่ 7 แสดงการกระจายของสนามไฟฟ้าที่ออกจากสายอากาศแบบปลายเปิด โดยป้อนกำลังงานขนาด 50 วัตต์ ระยะเวลาในการป้อนกำลังงานเท่ากับ 1 นาที	17
รูปที่ 8 แสดงการกระจายของฟลักซ์ความร้อนที่ออกจากสายอากาศแบบสลีต โดยป้อนกำลังงานขนาด 50 วัตต์ ระยะเวลาในการป้อนกำลังงานเท่ากับ 1 นาที	18
รูปที่ 9 แสดงการกระจายของสนามไฟฟ้าที่ออกจากสายอากาศแบบสลีต โดยป้อนกำลังงานขนาด 50 วัตต์ ระยะเวลาในการป้อนกำลังงานเท่ากับ 1 นาที	18
รูปที่ 10 แสดงการกระจายของฟลักซ์ความร้อนที่ออกจากสายอากาศแบบสลีตที่มีฉนวนหุ้ม โดยป้อนกำลังงานขนาด 50 วัตต์ ระยะเวลาในการป้อนกำลังงานเท่ากับ 1 นาที	19
รูปที่ 11 แสดงการกระจายของสนามไฟฟ้าที่ออกจากสายอากาศแบบสลีตที่มีฉนวนหุ้ม โดยป้อนกำลังงานขนาด 50 วัตต์ ระยะเวลาในการป้อนกำลังงานเท่ากับ 1 นาที	19
รูปที่ 12 แสดงการกระจายของ SAR ที่ออกจากสายอากาศแบบปลายเปิด โดยป้อนกำลังงานขนาด 50 วัตต์ ระยะเวลาในการป้อนกำลังงานเท่ากับ 1 นาที	20
รูปที่ 13 แสดงการกระจายของอุณหภูมิ ที่ออกจากสายอากาศแบบปลายเปิด โดยป้อนกำลังงานขนาด 50 วัตต์ ระยะเวลาในการป้อนกำลังงานเท่ากับ 1 นาที	20
รูปที่ 14 แสดงการกระจายของ SAR ที่ออกจากสายอากาศแบบสลีต โดยป้อนกำลังงานขนาด 50 วัตต์ ระยะเวลาในการป้อนกำลังงานเท่ากับ 1 นาที	21
รูปที่ 15 แสดงการกระจายของอุณหภูมิ ที่ออกจากสายอากาศแบบสลีต โดยป้อนกำลังงานขนาด 50 วัตต์ ระยะเวลาในการป้อนกำลังงานเท่ากับ 1 นาที	21
รูปที่ 16 แสดงการกระจายของ SAR ที่ออกจากสายอากาศแบบสลีตที่มีฉนวนหุ้ม โดยป้อนกำลังงานขนาด 50 วัตต์ ระยะเวลาในการป้อนกำลังงานเท่ากับ 1 นาที	22
รูปที่ 17 แสดงการกระจายของอุณหภูมิ ที่ออกจากสายอากาศแบบสลีตที่มีฉนวนหุ้ม โดยป้อนกำลังงานขนาด 50 วัตต์ ระยะเวลาในการป้อนกำลังงานเท่ากับ 1 นาที	23
รูปที่ 18 แสดงขนาดการกระจายอุณหภูมิของการทำลายเซลล์มะเร็งของสายอากาศ ทั้งสามแบบ ที่ระนาบ yz ที่ตำแหน่ง $x = 0$	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 19 แสดงปริมาณการทำลายเซลล์มะเร็งของสายอากาศทั้งสามแบบในรูปทรง 3 มิติ	24
รูปที่ 20 ผลการจำลองการกระจาย SAR ในเนื้อเยื่อระดับของสายอากาศแบบปลายเปิด 3 ดัน ซึ่งจัดวางแบบอาร์เรย์ ที่ความถี่ 2.45 GHz ป้อนกำลังงาน 50 วัตต์ ระยะเวลา 1 นาที (ก) ที่ระนาบ xy ที่ตำแหน่ง z เท่ากับ 0 (ข) ที่ระนาบ yz ที่ตำแหน่ง x เท่ากับ 0	25
รูปที่ 21 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิในเนื้อเยื่อระดับของสายอากาศแบบปลายเปิด 3 ดัน ซึ่งจัดวางแบบอาร์เรย์ ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับกรทดลองกับคัมพู ที่ความถี่ 2.45 GHz ป้อนกำลังงาน 50 วัตต์ ระยะเวลา 1 นาที (ก) ระนาบ xy ที่ตำแหน่ง z เท่ากับ 0 (ข) ระนาบ yz ที่ตำแหน่ง x เท่ากับ 0 (ค) ระนาบ xy ที่ตำแหน่ง z เท่ากับ -20 (ง) รูปการกระจายของอุณหภูมิ จากการทดลอง	26
รูปที่ 22 ผลการจำลองการกระจาย SAR ในเนื้อเยื่อระดับของสายอากาศแบบปลายเปิด 3 ดัน ซึ่งจัดวางแบบสามเหลี่ยม ที่ความถี่ 2.45 GHz ป้อนกำลังงาน 50 วัตต์ ระยะเวลา 1 นาที (ก) ระนาบ xy ที่ตำแหน่ง z เท่ากับ 0 (ข) ที่ระนาบ yz ที่ตำแหน่ง x เท่ากับ 0	27
รูปที่ 23 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิในเนื้อเยื่อระดับของสายอากาศแบบปลายเปิด 3 ดัน ซึ่งจัดวางแบบสามเหลี่ยม ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับกรทดลองกับคัมพู ที่ความถี่ 2.45 GHz ป้อนกำลังงาน 50 วัตต์ ระยะเวลา 1 นาที (ก) ระนาบ xy ที่ตำแหน่ง z เท่ากับ 0 (ข) ระนาบ yz ที่ตำแหน่ง x เท่ากับ 0 (ค) ระนาบ xy ที่ตำแหน่ง z เท่ากับ -20 (ง) รูปการกระจายของอุณหภูมิ จากการทดลอง	28
รูปที่ 24 ผลการจำลองการกระจาย SAR ในเนื้อเยื่อระดับของสายอากาศแบบปลายเปิด 3 ดัน ซึ่งจัดวางแบบรูปตัวที ที่ความถี่ 2.45 GHz ป้อนกำลังงาน 50 วัตต์ ระยะเวลา 1 นาที (ก) ระนาบ xy ที่ตำแหน่ง z เท่ากับ 0 (ข) ระนาบ yz ที่ตำแหน่ง x เท่ากับ 0	29
รูปที่ 25 ผลการกระจายอุณหภูมิในเนื้อเยื่อระดับของสายอากาศแบบปลายเปิด 3 ดัน ซึ่งจัดวางแบบรูปตัวที ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับกรทดลองกับคัมพู ที่ความถี่ 2.45 GHz ป้อนกำลังงาน 50 วัตต์ระยะเวลา 1 นาที (ก) ระนาบ xy ที่ตำแหน่ง z เท่ากับ 0 (ข) ระนาบ yz ที่ตำแหน่ง x เท่ากับ 0 (ค) ระนาบ xy ที่ตำแหน่ง z เท่ากับ -20 (ง) รูปการกระจายของอุณหภูมิ จากการทดลอง	30

1. บทนำ

อุบัติการณ์ของโรคมะเร็งตับจากสถิติของกระทรวงสาธารณสุข และสถาบันมะเร็งแห่งชาติ พบว่า มะเร็งตับเป็นมะเร็งที่พบได้บ่อยที่สุดในประเทศไทย โดยพบเป็นอันดับหนึ่งในเพศชายในอัตราเฉลี่ย 40.5 คนต่อประชากร 100,000 คน ในเพศหญิงพบได้บ่อยเป็นอันดับสามรองจากมะเร็งเต้านมและปากมดลูก

การรักษาโรคมะเร็งที่เกิดจากตับนั้น โดยทั่วไปมันจะใช้วิธีการผ่าตัด ซึ่งจะทำได้ก็ต่อเมื่อมะเร็งนั้นเกิดขึ้นเฉพาะที่ตับ (primary hepatic cancer) และมีขนาดไม่ใหญ่มาก ส่วนมะเร็งที่เกิดขึ้นจากการลามมาจากอวัยวะข้างเคียง (metastasis) นั้น โดยทั่วไปจะสามารถรักษาได้ยาก อย่างไรก็ตาม ผู้ป่วยที่จะได้รับการผ่าตัดนั้น จะต้องมีความแข็งแรงที่สามารถยังทนต่อการเสียเลือดเป็นจำนวนมาก และพิษของบาดแผลขนาดใหญ่ที่เกิดขึ้นได้ ส่วนวิธีอื่นๆที่ใช้ เช่น การใช้เคมีบำบัด การฉายรังสี และการทำลายเซลล์ด้วยความเย็น (cryosurgery) นั้น ไม่ค่อยได้ผลที่ตื้นัก

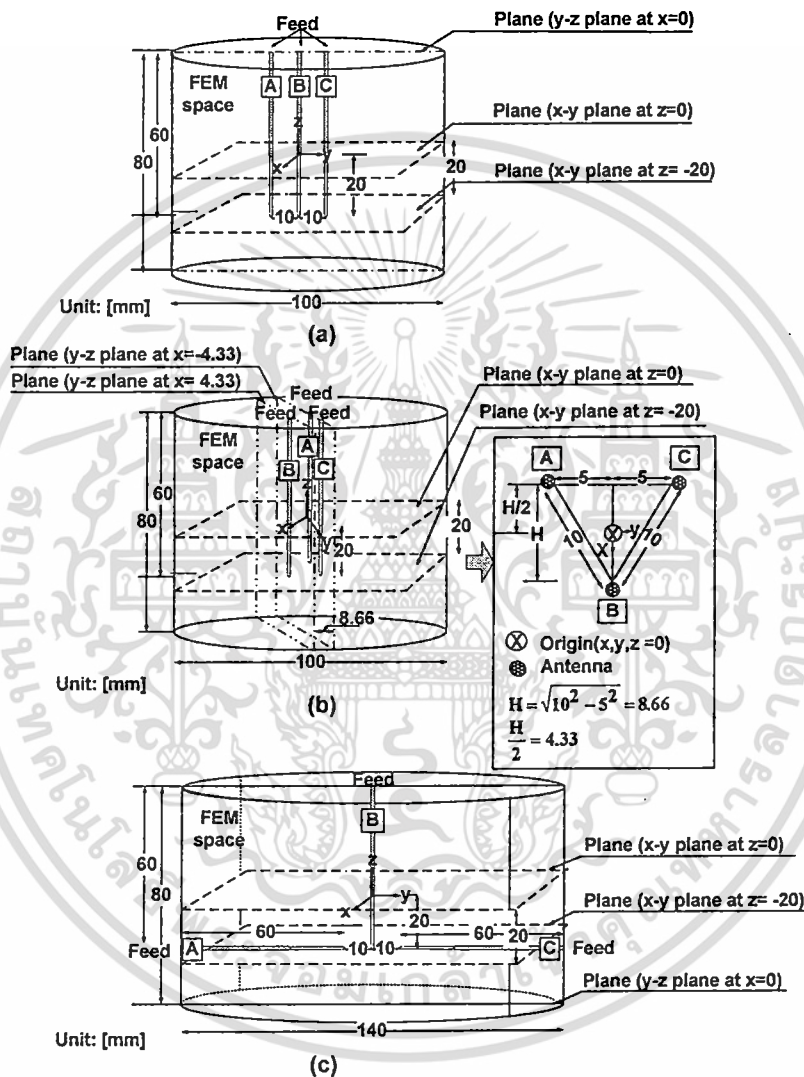
ในช่วงเวลาสิบปีที่ผ่านมา คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยเฉพาะในย่านความถี่วิทยุ (radiofrequency) ได้ถูกนำมาใช้ในการทำลายเซลล์ที่ไม่ต้องการในร่างกายเช่นเซลล์ผิดปกติในหัวใจ และเซลล์มะเร็งตับที่เกิดขึ้นเฉพาะในตับ คลื่นไฟฟ้าความถี่วิทยุในช่วงความถี่ 375-500 kHz จะถูกปล่อยออกจากอิเล็กโทรดที่ปลายอุปกรณ์ขนาดเล็กที่ได้ถูกสอดเข้าถึงบริเวณเซลล์ที่ต้องการทำลายในร่างกาย จากนั้นบริเวณเนื้อเยื่อรอบอิเล็กโทรดจะเกิดความร้อนขึ้นจากพลังงานไฟฟ้า (Joule Heating) ความร้อนจะกระจายออกไปโดยการนำความร้อน (Heat conduction) เซลล์จะถูกทำลายเมื่อได้รับความร้อนจนอุณหภูมิสูงกว่า 50 °C นอกจากนี้ ความร้อนที่เกิดขึ้นส่งผลให้เลือดเกิดการแข็งตัว ทำให้ผู้ป่วยไม่เสียเลือดมาก แพทย์ผู้รักษาจะใช้อุปกรณ์อัลตราซาวด์ช่วยแสดงตำแหน่งของอุปกรณ์และเนื้อเยื่อที่ถูกทำลาย ผลที่เกิดขึ้นบริเวณผิวหนังจะมีลักษณะเป็นชองขนาดเล็ก เพื่อให้สอดใส่อุปกรณ์เข้าไปยังตับ ต่างจากกรณีของการผ่าตัดทั่วไปซึ่งเกิดบาดแผลขนาดใหญ่ และใช้ระยะเวลาในการพักฟื้นที่นานกว่ามาก

การใช้คลื่นความถี่วิทยุถึงแม้ดูเหมือนจะประสบความสำเร็จในการรักษาโรคมะเร็งในเนื้อเยื่อตับ แต่ก็ยังมีข้อจำกัดในด้านของขนาดเซลล์มะเร็งที่ถูกทำลาย นั่นคือ ก้อนมะเร็งที่มีขนาดใหญ่ จะไม่สามารถรักษาด้วยวิธีนี้ได้เนื่องจากบริเวณเนื้อเยื่อที่คลื่นไฟฟ้าเข้าถึงนั้นค่อนข้างจำกัด ดังนั้นจึงมีความต้องการในการที่จะค้นคว้าวิจัยเพื่อพัฒนาโพรบสำหรับทำลายเซลล์มะเร็งที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น รวมทั้งการศึกษาถึงศักยภาพในการใช้คลื่นไมโครเวฟในการทำลายเซลล์ด้วยสายอากาศลักษณะต่างๆ การใช้คลื่นความถี่ไมโครเวฟนั้นเป็นการทำลายเซลล์มะเร็งโดยการส่งกระแสไฟฟ้า ความถี่สูง (2.45 GHz) ผ่านสายอากาศที่เสียบอยู่ในกลุ่มเนื้อเยื่อมะเร็ง หลักการของการทำลายเซลล์โดยคลื่นไมโครเวฟจะคล้ายกับการใช้คลื่นความถี่วิทยุ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะกระจายออกจากสายอากาศไปยังเนื้อเยื่อที่เป็นมะเร็ง โดยเราสามารถออกแบบสายอากาศให้

สามารถส่งคลื่นครอบคลุมบริเวณที่มีขอบเขตต่างๆกันได้ตามความต้องการ ต่างจากการใช้คลื่นความถี่วิทยุที่มีลักษณะบริเวณสนามคลื่นค่อนข้างตายตัว

2. วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์ทำลายเซลล์มะเร็งโดยใช้คลื่นความถี่ไมโครเวฟ
2. เพื่อออกแบบและพัฒนาสายอากาศที่ใช้สำหรับจีเซลล์มะเร็งโดยใช้การวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์



รูปที่ 1 ตัวอย่างการวางสายอากาศทั้งสามในรูปแบบต่างๆกัน (a) การวางแบบขนาน (b) การวางแบบสามเหลี่ยม และ (c) การวางแบบรูปตัว T

3. ขอบเขตของโครงการวิจัย

ดำเนินการออกแบบอุปกรณ์สำหรับทำลายเนื้อเยื่อโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ โดยสามารถป้อนพลังงานให้แก่สายอากาศสามเส้นพร้อมๆกัน (simultaneous triple-antenna microwave ablation

system) โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบไฟไนต์เอลิเมนต์ ก่อนที่จะทำการสร้างสายอากาศจริงขึ้นเพื่อเป็นการลดต้นทุนในการพัฒนาโดยจะเลือกสร้างสายอากาศที่มีแนวโน้มในการทำลายเซลล์ตามต้องการเท่านั้น วิธีการนี้ยังสามารถจำลองสถานการณ์ของการใช้งานเช่น ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ส่งไปกลับคลื่นไมโครเวฟ และเวลาที่ใช้งานได้ด้วย แบบจำลองที่สร้างขึ้นเป็นแบบสามมิติ และมีความละเอียด ซึ่งได้ใช้คอมพิวเตอร์ประสิทธิภาพสูงของสำนักวิจัยและบริการคอมพิวเตอร์ในการประมวลผล มีการทดลองโดยเปลี่ยนรูปแบบของการวางของสายอากาศดังต่อไปนี้ (รูปที่ 1)

- (a) การวางแบบขนาน หรือ แบบ linear array (รูปที่ 1 (a))
- (b) การวางแบบสามเหลี่ยม หรือ แบบ triangular (รูปที่ 1 (b))
- (c) การวางแบบรูปตัว T หรือ (T-shaped) (รูปที่ 1 (c))

โดยสายอากาศที่ใช้นั้น จะใช้สายอากาศแบบ (1) Open-tip (2) Slot (3) Slot with insulating jacket ดังที่ได้เคยวิเคราะห์ใน โครงการวิจัยในปีก่อนนี้

4. การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง (Literature review)

ในปี 1994 Labonte' ได้นำเสนอการคำนวณโดยใช้การจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ ของระบบ การทำลายเนื้อเยื่อโดยใช้คลื่นความถี่วิทยุ กับอวัยวะหัวใจ ได้ทำการศึกษาโดยแปรเปลี่ยนขนาดของอิเล็กโทรด และขนาดของแรงดันที่ป้อนให้กับอิเล็กโทรดพบว่าขนาดของอิเล็กโทรดที่มีขนาดยาวจะให้พื้นที่ในการทำลายที่พื้นผิวที่ใหญ่กว่าสายอากาศที่มีขนาดสั้น ในการเปลี่ยนแปลงขนาดของแรงดันที่ป้อนให้กับอิเล็กโทรดจะให้ขนาดของการทำลายที่สูงขึ้น

L. Hamada al. ได้ทดลองสายอากาศแบบไดโพลที่ความถี่ 915 MHz โดยมีความลึกของการสอดแทรกสายอากาศเข้าไปในเนื้อเยื่อจำลองที่แตกต่างกัน สายอากาศที่นำมาทดลองเป็นสายอากาศแบบไดโพลอย่างง่าย และสายอากาศแบบไดโพลประยุกต์

ในปี 1996 Jame C. Lin and Yu-Jin Wang ได้นำเสนอสายอากาศแบบ Cap-choke Catheter Antenna ได้ข้อสรุปว่า ประสิทธิภาพของสายอากาศไม่ได้ขึ้นอยู่กับ ระยะของความลึกในการแทงสายอากาศเข้าไปในเนื้อเยื่อ

ในปี 1996 Labonte' ได้นำเสนอสายอากาศที่ใช้งานในย่านความถี่ไมโครเวฟ โดยได้นำเสนอสายอากาศ 3 รูปแบบ ได้แก่ Open-tip monopole (OTM), Dielectric-tip Monopole(DTM) , Metal-tip monopole(MTM) ใช้งานความถี่ 2450 MHz โดยใช้วิธีการทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยเปรียบเทียบสายอากาศ 3 รูปแบบ พบว่าสายอากาศแบบ Metal-tip monopole (MTM) ให้ผลของการกระจายของอุณหภูมิที่มีความสม่ำเสมอที่สุด

ในปี 2000 Jame C. Lin ได้นำเสนอสายอากาศแบบ Sleeve-Slot ที่ใช้งานในย่านความถี่ไมโครเวฟ โดยใช้สายอากาศจำนวน 6 ชุดจัดเรียงแบบ Array ใช้ในการรักษาที่เนื้องอกที่สมอง ซึ่ง

ที่ระยะห่างของสายอากาศที่ระยะ 15 mm. จะได้รับการกระจายของ SAR ที่มีลักษณะเป็น Uniform มากที่สุด โดยทำการเปรียบเทียบระยะห่างที่น้อยกว่า และมากกว่า 15 mm.

2001 S.Pisa (Dipole) ได้นำเสนอสายอากาศแบบ Cap-Choke Antenna ที่ใช้งานในย่านความถี่ ไมโครเวฟ (915 MHz) ซึ่งผลที่ได้พบว่าประสิทธิภาพของสายอากาศไม่ขึ้นกับระยะของการสอดใส่สายอากาศ โดยใช้การจำลองการทำงานด้วยวิธีการ Finite Different Time Domain(FDTD) และทำการทดลอง

2001 K.Saito (Slot ant.) Saito et al. ได้ทดลองใช้สายอากาศแบบ coaxial-fed slot สองอันมาทำการจำลองการทำลายเซลล์มะเร็งโดยใช้คลื่นไมโครเวฟที่ความถี่ 2.45 GHz ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองด้วยวิธี tip-split ทำให้ขนาดเซลล์ที่ถูกทำลายมีขนาดใหญ่ขึ้นเพราะขนาดของเซลล์ที่ถูกทำลายเกิดจากกระแสที่ไหลจากสายอากาศทั้งสองอัน

2006 Deshan Yang (Floating Sleeve ant) ใช้วิธีการจำลองการทำงานด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ นำเสนอสายอากาศแบบ Floating Sleeve Antenna โดยใช้การวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ 2 มิติ แบบ Axi-symmetric Computer Electromagnetics Model โดยใช้ผลการทดลองด้วย Ex vivo ยืนยันความถูกต้องของการจำลองการทำงาน

5. สมการความร้อนในทางชีววิทยา (The Bio-heat Equation)

ในการวิเคราะห์ด้วยความถี่ไมโครเวฟได้พิจารณาถึงสนามไฟฟ้า สนามแม่เหล็ก และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในเนื้อเยื่อตับ การดูดซับความร้อนที่เกิดขึ้นในเนื้อเยื่อตับ ซึ่งรูปแบบของสมการ หรือตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลต่อการกระจายความร้อนในตับแสดงดังสมการที่

$$(1) \quad \rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \cdot \nabla T) - h_b c_b \omega_b (T_b - T) + Q_m + Q_{ext} \quad (1)$$

เมื่อ $h_{b1} = \rho_{b1} c_{b1} \omega_{b1}$

ρ	=	ความหนาแน่นจำเพาะของเนื้อเยื่อ (kg/m ³)
c	=	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของเนื้อเยื่อ (J/kg.K)
k	=	ค่าความนำความร้อนของเนื้อเยื่อ (W/m.K)
h_b	=	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากเลือดที่ไหลซึมอยู่ในเนื้อเยื่อ
ρ	=	ความหนาแน่นเลือด (kg/m ³)
c_b	=	ค่าความร้อนจำเพาะของเลือด (J/kg.K)
ω_b	=	อัตราไหลเลือด (1/s)
T_b	=	ค่าอุณหภูมิเลือด (37 °C)
Q_m	=	ค่าความร้อนจากกระบวนการเมตาโบลิซึมของเม็ดเลือด (W/m ³)

$$Q_{\text{ext}} = \text{ค่าความร้อนจากภายนอก (W/m}^3\text{)}$$

จากสมการ Bioheat (1) ที่นำมาใช้ในงานวิจัยฉบับนี้ ได้ละทิ้งค่าตัวแปรจำนวน 2 ตัว คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากเลือดที่ไหลซึมอยู่ในเนื้อเยื่อ (h_p) และพลังงานที่สร้างขึ้นโดยกระบวนการเมตาโบลิซึมของเม็ดเลือด (Q_m) ซึ่งค่าตัวแปรทั้ง 2 นี้ จะถือว่ามีความน้อยมาก เมื่อเทียบกับปริมาณ Q_{ext}

สมการการดูดซับความร้อน

พิจารณาจาก สนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก ที่มีการแพร่กระจายลงเนื้อเยื่อดับ จะเกิดการสูญเสียพลังงานในเนื้อเยื่อดับ [18] ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของสมการ ดังสมการที่ (2)

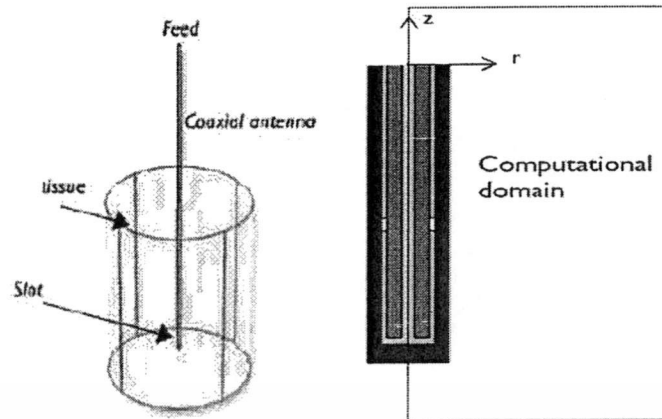
$$SAR = \frac{1}{\rho} Q_{\text{ext}} = \frac{\sigma}{\rho} |E|^2 \quad (2)$$

เมื่อ

SAR	=	Specific absorption rate (W/kg)
Q_{ext}	=	ค่าความร้อนที่เกิดขึ้นจากภายนอกเนื้อเยื่อ (W/m ³)
σ	=	สภาพความนำไฟฟ้าของเนื้อเยื่อ (S/m)
ρ	=	ความหนาแน่นจำเพาะ (kg/m ³)

6. หลักการของเงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการจำลอง

จากรูปที่ 2 เป็นการแสดงให้เห็นถึงแบบจำลองของการรักษาด้วยคลื่นไมโครเวฟโดยใช้สายอากาศแบบโคแอกเซียลแบบสล็อต โดยทรงกระบอกกลมแทนเนื้อเยื่อทดสอบโดยสายอากาศโคแอกเซียลถูกแทงเข้าไปในเนื้อเยื่อทดสอบ และสายอากาศจะถูกจ่ายกำลังงานคลื่นไมโครเวฟที่จุดบนตรงส่วนของชั้นฉนวน (Feed) และคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะถูกปล่อยออกมาบริเวณสล็อต จากนั้นเนื้อเยื่อจะถูกทำให้เกิดความร้อนซึ่งเป็นไปตามสมการของซาร์ โดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเดินทางในสายโคแอกเซียลอยู่ในโหมดของ TEM โดยสมมุติว่าคลื่นเป็นคลื่นฮาโมนิกส์แบบเชิงซ้อน



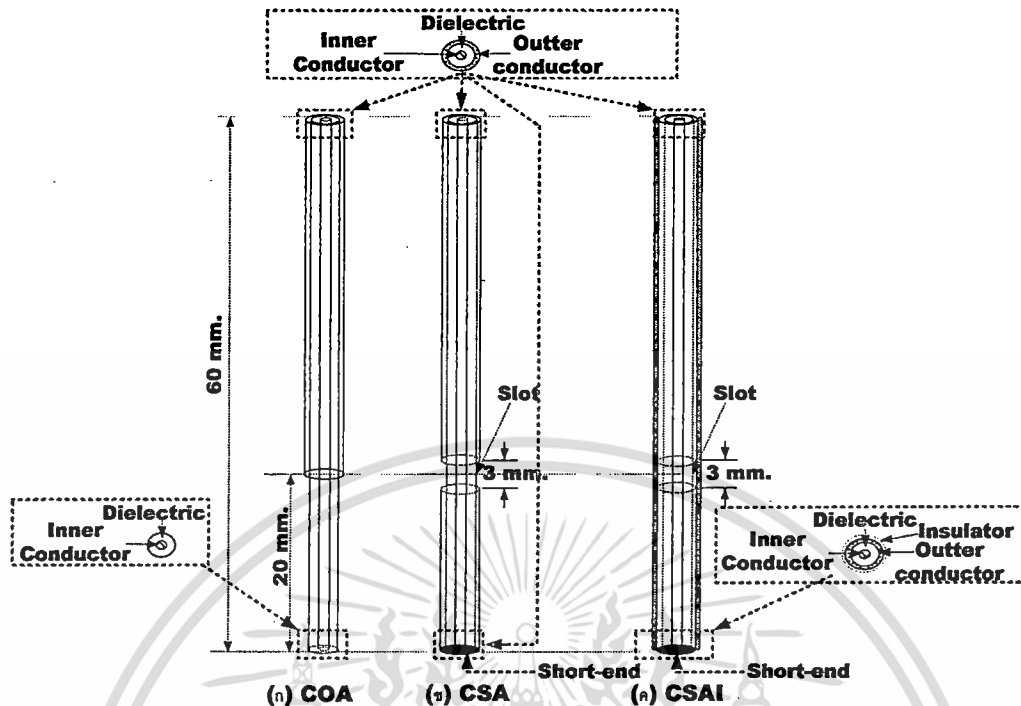
รูปที่ 2. แสดงลักษณะของสายอากาศแบบโคแอกเซียลในเนื้อเยื่อทดสอบ



รูปที่ 3 แสดงโครงสร้างของสายอากาศแบบสล็อตโคแอกเซียล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. โครงสร้างของสายอากาศที่ทำการวิเคราะห์



รูปที่. 4 โครงสร้างของสายอากาศ (ก) ปลายเปิด (COA) (ข) แบบสลิต (CSA) (ค) แบบสลิตที่มีฉนวนหุ้ม (CSAI)

ในรูปที่ 4 แสดง โครงสร้างสายอากาศ 3 แบบ ที่จะนำมาใช้ในการจำลองการทำงานด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ และในการทดลอง

ขนาดของสายอากาศทั้ง 3 แสดงได้ในตารางที่ 1 โครงสร้างของสายอากาศทั้ง 3 มีโครงสร้างที่แข็ง เป็นสายอากาศแบบ โคแอคเซียลที่มีตัวนำด้านนอกที่แข็ง เรียกสายอากาศแบบนี้ว่า Semi-Rigid ความยาวสายอากาศเท่ากับ 6 เซนติเมตร

ในรูป 4 (ก) เป็น โครงสร้างของสายอากาศแบบปลายเปิด (COA) โดยนำสายอากาศโคแอคเซียลแบบ Semi-Rigid มาปิดตัวนำนอกออก ความยาว 2 เซนติเมตร ส่วนปลายของสายอากาศที่ปิดตัวนำนอกออก เรียกว่า เป็นส่วนปลายเปิด

ในรูป 4 (ข) แสดงโครงสร้างของสายอากาศแบบสลิต (CSA) การสร้างสายอากาศนำเอาสายโคแอคเซียลแบบ Semi-Rigid มาตัดตัวนำนอกออกเป็นวงแหวน ความกว้างขนาด 3 มิลลิเมตร โดยระยะระหว่างปลายสายอากาศถึงกึ่งกลางสลิตเท่ากับ 2 เซนติเมตร และส่วนปลายของสายอากาศทำการ short-circuit ตัวนำในกับตัวนำนอกเข้าด้วยกัน

ในรูป 4 (ค) แสดงโครงสร้างของสายอากาศแบบสลิตที่มีฉนวนหุ้ม โครงสร้างเหมือนกับสายอากาศแบบสลิตในรูป 4 (ข) โดยจะเพิ่มเติมโดยนำวัสดุ PTFE ที่เป็นท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าตัวนำนอกเล็กน้อย หุ้มสายอากาศแบบสลิต และใช้ความร้อนเพื่อให้ท่อ PTFE

เข้ารูปกับสายอากาศเพื่อเพิ่มการตอบสนองความถี่ของสายอากาศ (VSWR) ที่ความถี่ไมโครเวฟ (2.45 GHz) ให้ดีขึ้น

ตารางที่ 1 รายละเอียดของขนาดของสายอากาศ

พารามิเตอร์	มิติของสายอากาศ (มม.)		
	สายอากาศแบบ สล็อต	สายอากาศสล็อต แบบมีฉนวนหุ้ม	สายอากาศ แบบเปิดปลาย
เส้นผ่านศูนย์กลางตัวนำใน	0.912	0.912	0.912
เส้นผ่านศูนย์กลางตัวนำนอก	3.581	3.581	3.581
เส้นผ่านศูนย์กลางไดอิเล็กทริก	2.985	2.985	2.985
ความยาวสล็อต	3	3	-
ความยาวจากปลายสายอากาศถึง กึ่งกลางของสล็อต	20	20	-
ความยาวของปลายเปิด	-	-	20
ความหนาของฉนวนหุ้มภายนอก	-	1	-
ความยาวของสายอากาศ	60	60	60

ตารางที่ 2 รายละเอียดของค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเนื้อเยื่อตับ

ρ_{liver} = Density of liver	1,050 [kg/m ³]*
c_{liver} = Specific heat of liver	3,700 [J/ kg.K]*
ρ_{bl} = Density of blood	1,000 [kg/ m ³]*
c_{bl} = Specific heat of blood	3,639 [J/ kg.K]*
w_{bl} = Blood perfusion rate	3.6×10^{-3} [m ³ /kg.s]*
k = Thermal conductivity of liver	0.56 [S/ m]*
σ_{liver} = electrical conductivity of liver	1.69 [S/ m]**
ϵ_{liver} = relative permittivity of liver	43.03**
ϵ_{diel} = relative permittivity of dielectric	2.03*
ϵ_{insul} = relative permittivity of insulator	2.6*

ในการจำลองการทำงาน เราใช้การจำลองการทำงานด้วยวิธีการทาง ไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ โดยใช้โปรแกรม Comsol Multiphysic version 3.3a [10] บนระบบปฏิบัติการ 64 บิต Sun Fire 240

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

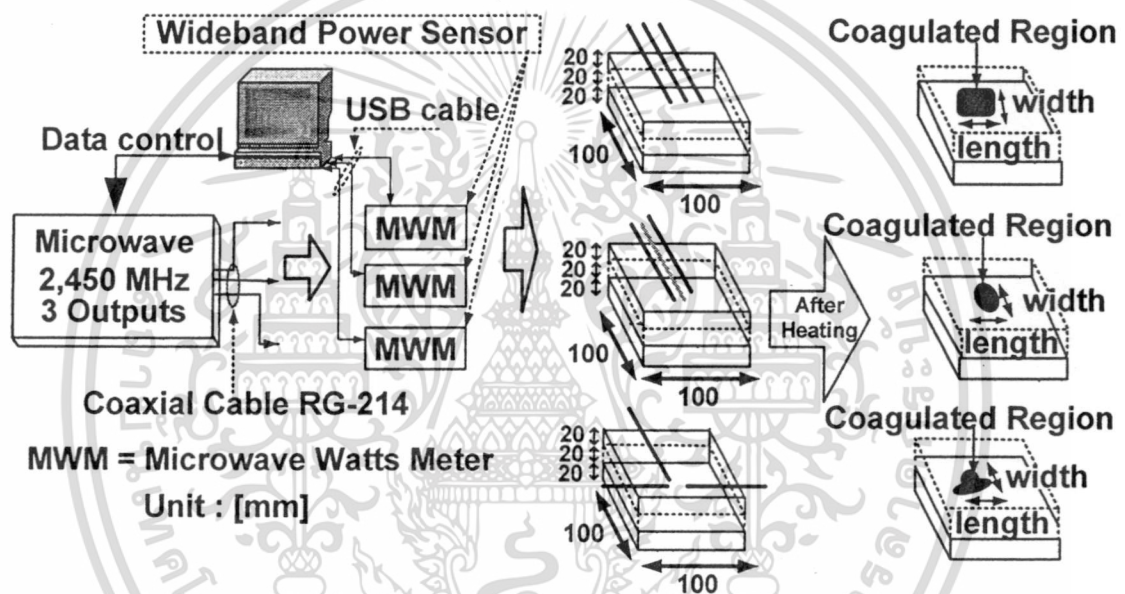
(2 processor with Ram 8 GB) โดยการจำลองการทำงาน ประกอบด้วย โมดูล 2 โมดูล ที่ใช้ในการจำลองการทำงาน คือ

Rf Module

Heat Transfer (Bioheat Equation)

โดยสร้างรูปแบบของสายอากาศและส่วนประกอบต่างด้วย Solid work version.2007 ส่งออกในรูปแบบ IGS ไปยังโปรแกรม Comsol Multiphysic Version 3.3a เพื่อทำการใส่ Boundary และค่าคงที่ต่างๆ ที่ใช้ในการ จำลองการทำงาน โดย กำหนดให้การแก้ปัญหา มีการบันทึกผลที่ได้ทุกๆ 1 วินาที จำนวนเวลาทั้งสิ้น 60 วินาที ค่าคุณสมบัติต่างๆของวัสดุได้แสดงในตารางที่ 2

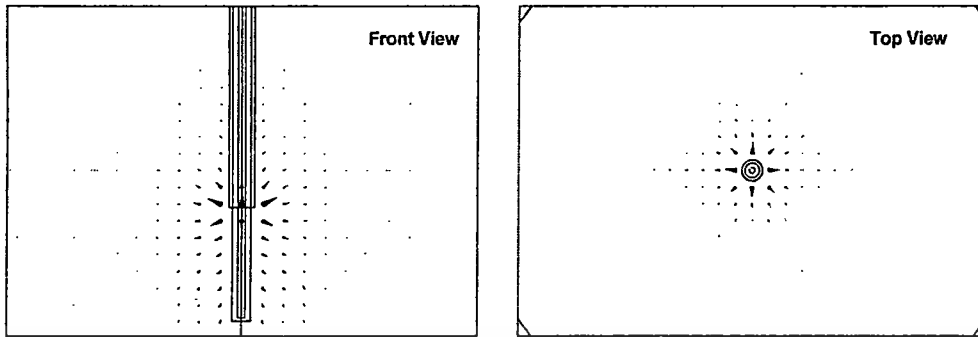
8. การออกแบบระบบส่งคลื่นไมโครเวฟเพื่อทำลายเนื้อเยื่อ



รูปที่ 5 ไดอะแกรมการทดลองสายอากาศแบบหลายต้น ที่มีการจัดวางแบบอาร์เรย์ วางแบบสามเหลี่ยม วางรูป "T-Shape".

รูปที่ 5 แสดงรายละเอียดไดอะแกรมของการทดลอง โดยระบบนี้ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ไมโครเวฟความถี่ (2.45 GHz) ที่มี 3 เอ้าท์พุท โดยควบคุมกำลังงาน และเวลาผ่านทางคอมพิวเตอร์ เอ้าท์พุท ทั้ง 3 ถูกแสดงค่าระดับของกำลังงานด้วยเครื่องวัด (wideband power sensor) ยี่ห้อ Bird (R) รุ่น SAX-400y เชื่อมต่อไปแสดงผลด้วยคอมพิวเตอร์ เอ้าท์พุททั้ง 3 นำไปป้อนให้กับสายอากาศแต่ละต้น

9. การทดลองและผลการทดลอง



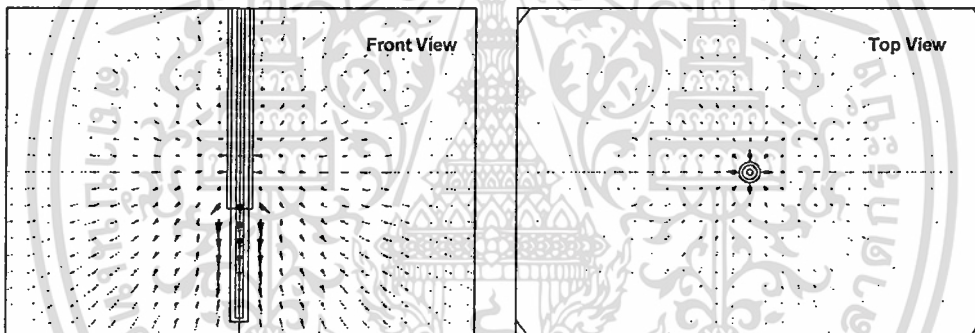
(ก)

(ข)

รูปที่ 6 แสดงการกระจายของฟลักซ์ความร้อนที่ออกจากสายอากาศแบบปลายเปิด โดยป้อนกำลังงานขนาด 50 วัตต์ ระยะเวลาในการป้อนกำลังงานเท่ากับ 1 นาที

(ก) รูปการกระจายของฟลักซ์ความร้อนที่ระนาบ yz ที่ตำแหน่ง x เท่ากับ 0

(ข) รูปการกระจายของฟลักซ์ความร้อนที่ระนาบ xy ที่ตำแหน่ง z เท่ากับ 0



(ก)

(ข)

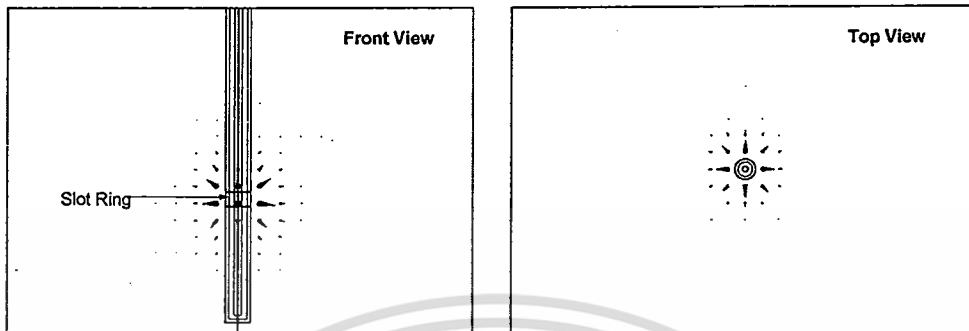
รูปที่ 7 แสดงการกระจายของสนามไฟฟ้าที่ออกจากสายอากาศแบบปลายเปิด โดยป้อนกำลังงานขนาด 50 วัตต์ ระยะเวลาในการป้อนกำลังงานเท่ากับ 1 นาที

(ก) รูปการกระจายของสนามไฟฟ้าที่ระนาบ yz ที่ตำแหน่ง x เท่ากับ 0

(ข) รูปการกระจายของสนามไฟฟ้าที่ระนาบ xy ที่ตำแหน่ง z เท่ากับ 0

จากรูปที่ 6 เป็นผลที่ได้จากการจำลองการทำงานโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในรูปที่ 6 (ก) แสดงฟลักซ์ความร้อนที่เกิดขึ้นกับสายอากาศแบบปลายเปิด จะเห็นได้ว่าจะมีการกระจายฟลักซ์ความร้อนบริเวณรอยต่อของจุดทึบกับตัวนำนอก ในรูปที่ 6 (ข) การกระจายของฟลักซ์ความร้อนจะมีการกระจายสมมาตรจากจุดกึ่งกลางของสายอากาศออกไปรอบๆ สายอากาศ

ในรูปที่ 7 (ก) แสดงการกระจายของสนามไฟฟ้าที่ออกจากสายอากาศแบบปลายเปิด โดยสนามไฟฟ้ามีการกระจายออกรอบๆ รอยต่อจุดที่ปิดกับตัวนำนอก และรอบๆ บริเวณปลายที่ที่เปิดของสายอากาศ ในรูปที่ 7 (ข) แสดงให้เห็นว่าสนามไฟฟ้ามีการกระจายสมมาตรรอบๆ สายอากาศ



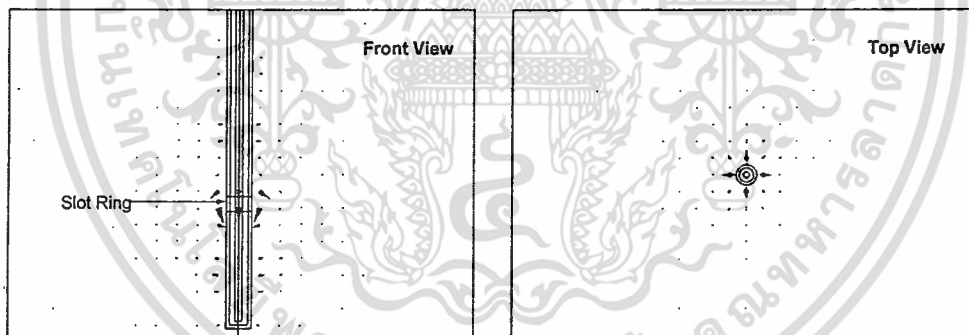
(ก)

(ข)

รูปที่ 8 แสดงการกระจายของฟลักซ์ความร้อนที่ออกจากสายอากาศแบบสลีต โดยป้อนกำลังงานขนาด 50 วัตต์ ระยะเวลาในการป้อนกำลังงานเท่ากับ 1 นาที

(ก) รูปการกระจายของฟลักซ์ความร้อนที่ระนาบ yz ที่ตำแหน่ง x เท่ากับ 0

(ข) รูปการกระจายของฟลักซ์ความร้อนที่ระนาบ xy ที่ตำแหน่ง z เท่ากับ 0



(ก)

(ข)

รูปที่ 9 แสดงการกระจายของสนามไฟฟ้าที่ออกจากสายอากาศแบบสลีต โดยป้อนกำลังงานขนาด 50 วัตต์ ระยะเวลาในการป้อนกำลังงานเท่ากับ 1 นาที

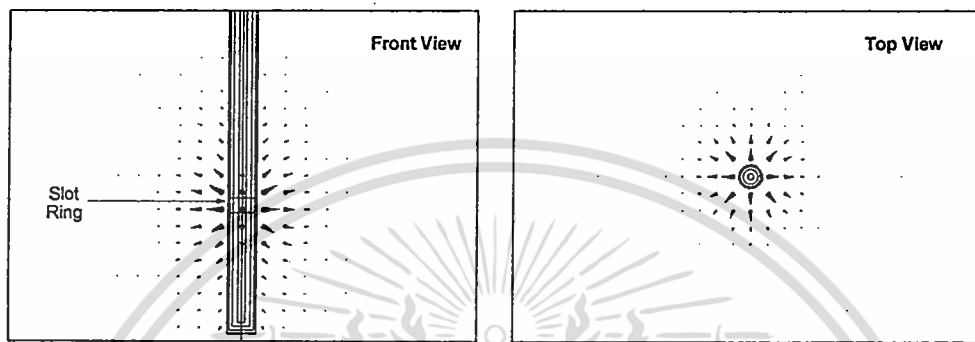
(ก) รูปการกระจายของสนามไฟฟ้าที่ระนาบ yz ที่ตำแหน่ง x เท่ากับ 0

(ข) รูปการกระจายของสนามไฟฟ้าที่ระนาบ xy ที่ตำแหน่ง z เท่ากับ 0

จากรูปที่ 8 แสดงผลที่ได้จากการจำลองการทำงาน โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในรูปที่ 8 (ก) แสดงฟลักซ์ความร้อนที่เกิดขึ้นของสายอากาศแบบสลีต จะเห็นได้ว่าการกระจายความร้อนออก

รอบๆ บริเวณสลีต และการกระจายของฟลักซ์ความร้อนจะมีการกระจายสมมาตรรอบๆ สายอากาศ ดังในในรูปที่ 8 (ข)

ในลักษณะเดียวกัน รูปที่ 9 (ก) แสดงการกระจายของสนามไฟฟ้าที่ออกจากสายอากาศแบบสลีต โดยสนามไฟฟ้ามีการกระจายออกรอบๆ บริเวณสลีต พิจารณาจากรูปที่ 9 (ข) มุมมองที่ระนาบจะเห็นได้ว่า สนามไฟฟ้ามีการกระจายออกรอบๆ สายอากาศทุกๆ ทิศทางแบบสมมาตร



(ก)

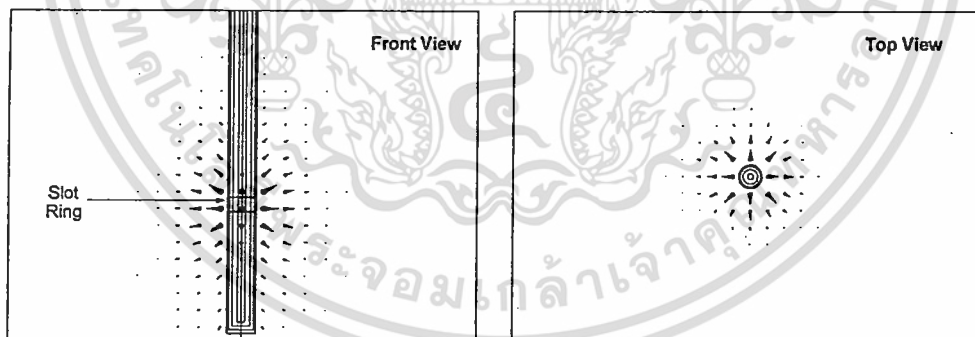
(ข)

รูปที่ 10 แสดงการกระจายของฟลักซ์ความร้อนที่ออกจากสายอากาศแบบสลีตที่มีฉนวนหุ้ม

โดยป้อนกำลังงานขนาด 50 วัตต์ ระยะเวลาในการป้อนกำลังงานเท่ากับ 1 นาที

(ก) รูปการกระจายของฟลักซ์ความร้อนที่ระนาบ yz ที่ตำแหน่ง x เท่ากับ 0

(ข) รูปการกระจายของฟลักซ์ความร้อนที่ระนาบ xy ที่ตำแหน่ง z เท่ากับ 0



(ก)

(ข)

รูปที่ 11 แสดงการกระจายของสนามไฟฟ้าที่ออกจากสายอากาศแบบสลีตที่มีฉนวนหุ้ม

โดยป้อนกำลังงานขนาด 50 วัตต์ ระยะเวลาในการป้อนกำลังงานเท่ากับ 1 นาที

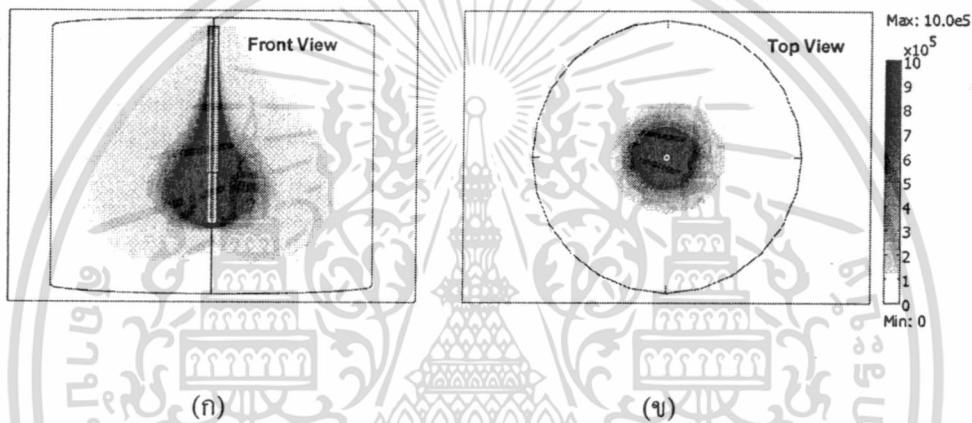
(ก) รูปการกระจายของสนามไฟฟ้าที่ระนาบ yz ที่ตำแหน่ง x เท่ากับ 0

(ข) รูปการกระจายของสนามไฟฟ้าที่ระนาบ xy ที่ตำแหน่ง z เท่ากับ 0

จากรูปที่ 10 แสดงผลที่ได้จากการจำลองการทำงาน โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ รูปที่ 10 (ก) แสดงพิกัดความร้อนที่เกิดขึ้นของสายอากาศแบบสลีตที่มีฉนวนหุ้ม จะเห็นได้ว่าจะมีการกระจายพิกัดความร้อนออกบริเวณรอบตำแหน่งสลีต และการกระจายของพิกัดความร้อนจะมีการกระจายสมมาตรจากจุดกึ่งกลางของสายอากาศออกไปรอบๆ สายอากาศ ดังรูปที่ 10 (ข)

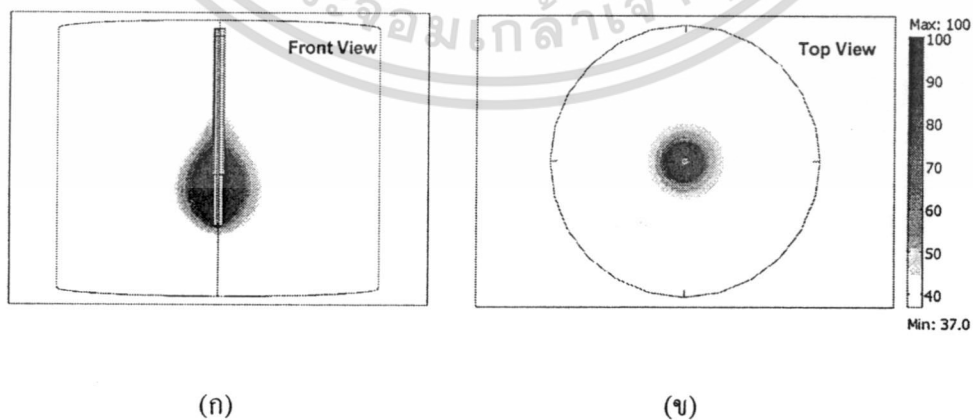
ในรูปที่ 11 แสดงการกระจายของสนามไฟฟ้าของสายอากาศแบบสลีตที่มีฉนวนหุ้ม โดยในรูปที่ 11 (ก) สนามไฟฟ้ามีการกระจายออกรอบๆ บริเวณสลีต และรูปที่ 11 (ข) แสดงให้เห็นว่า สนามไฟฟ้ามีการกระจายออกรอบๆ สายอากาศทุกๆ ทิศทางแบบสมมาตร

ผลของการกระจาย SAR และอุณหภูมิในเนื้อเยื่อตัวของสายอากาศแบบปลายเปิด สายอากาศแบบสลีต และสายอากาศแบบสลีตที่มีฉนวนหุ้ม



รูปที่ 12 แสดงการกระจายของ SAR ที่ออกจากสายอากาศแบบปลายเปิด โดยป้อนกำลังงานขนาด 50 วัตต์ ระยะเวลาในการป้อนกำลังงานเท่ากับ 1 นาที

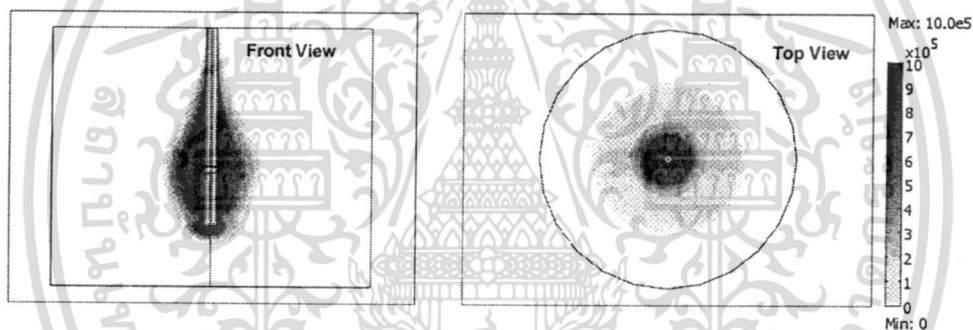
- (ก) รูปการกระจายของ SAR ที่ระนาบ yz ที่ตำแหน่ง x เท่ากับ 0
- (ข) รูปการกระจายของ SAR ที่ระนาบ xy ที่ตำแหน่ง z เท่ากับ 0



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- รูปที่ 13 แสดงการกระจายของอุณหภูมิ ที่ออกจากสายอากาศแบบปลายเปิด โดยป้อนกำลังงาน ขนาด 50 วัตต์ ระยะเวลาในการป้อนกำลังงานเท่ากับ 1 นาที
- (ก) รูปการกระจายของอุณหภูมิ ที่ระนาบ yz ที่ตำแหน่ง x เท่ากับ 0
- (จ) รูปการกระจายของอุณหภูมิ ที่ระนาบ xy ที่ตำแหน่ง z เท่ากับ 0

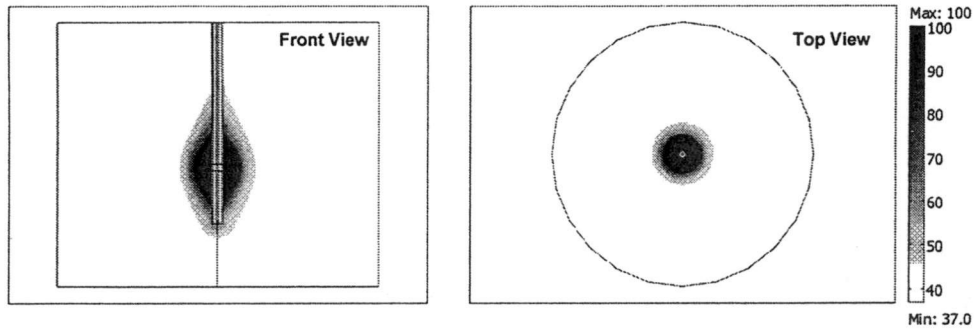
รูปที่ 12 แสดงการกระจายของปริมาณ SAR ที่เกิดขึ้นในเนื้อเยื่อตับ ปริมาณของ SAR ที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากสนามไฟฟ้า ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้ ยืนยัน ได้ว่ามีการกระจายของ SAR รอบๆ บริเวณ ปลายสายอากาศ รอบๆ ทิป และกระจายของ SAR มีลักษณะแบบสมมาตร เมื่อพิจารณาการกระจาย ความร้อนที่เกิดขึ้นกับเนื้อเยื่อในรูปที่ 13 จะเห็นได้ว่าในระบบ MWA สายอากาศที่ทำการออกแบบ จะมีความร้อนออกมาบริเวณรอบๆ ทิป ของสายอากาศแบบปลายเปิด ส่วนในบริเวณอื่นๆ ไม่เกิด ความร้อนขึ้น ด้วยเหตุนี้ทำให้สามารถแทงสายอากาศเข้าไปในเนื้อเยื่อตับได้โดยไม่ทำลายเนื้อเยื่อที่ ไม่ต้องการ และมีการกระจายของความร้อนรอบๆ สายอากาศแบบสมมาตร



(ก)

(ข)

- รูปที่ 14 แสดงการกระจายของ SAR ที่ออกจากสายอากาศแบบสลีต โดยป้อนกำลังงาน ขนาด 50 วัตต์ ระยะเวลาในการป้อนกำลังงานเท่ากับ 1 นาที
- (ก) รูปการกระจายของ SAR ที่ระนาบ yz ที่ตำแหน่ง x เท่ากับ 0
- (ข) รูปการกระจายของ SAR ที่ระนาบ xy ที่ตำแหน่ง z เท่ากับ 0



(ก)

(ข)

รูปที่ 15 แสดงการกระจายของอุณหภูมิ ที่ออกจากสายอากาศแบบสลีต โดยป้อนกำลังงาน

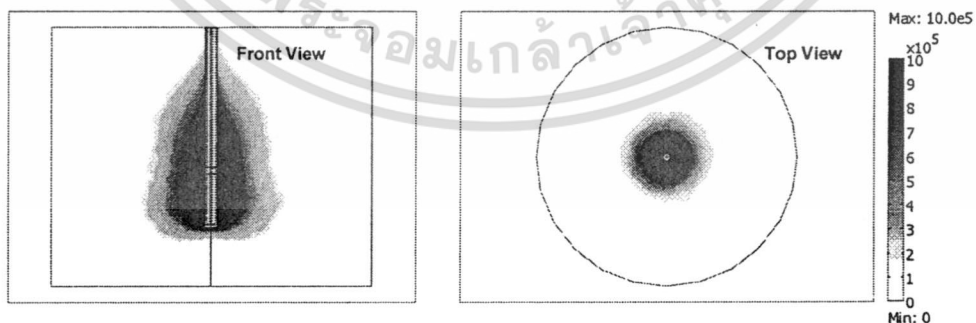
ขนาด 50 วัตต์ ระยะเวลาในการป้อนกำลังงานเท่ากับ 1 นาที

(ก) รูปการกระจายของอุณหภูมิ ที่ระนาบ yz ที่ตำแหน่ง x เท่ากับ 0

(ข) รูปการกระจายของอุณหภูมิ ที่ระนาบ xy ที่ตำแหน่ง z เท่ากับ 0

จากรูปที่ 14 แสดงการกระจายของปริมาณ SAR ที่เกิดขึ้นในเนื้อเยื่อตับของสายอากาศแบบสลีต ในรูปที่ 14 (ก) การกระจายของ SAR ที่รอบๆ บริเวณสลีตจะมีการกระจายของ SAR สูงกว่าบริเวณอื่นๆ และในรูปที่ 14 (ข) แสดงให้เห็นลักษณะของ SAR ที่มีกระจายออกรอบๆ สายอากาศแบบสมมาตร

รูปที่ 15 (ก) พิจารณาการกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นกับเนื้อเยื่อตับของสายอากาศแบบสลีต จะเห็นได้ว่าการกระจายความร้อนจะออกมารอบๆ บริเวณสลีต ส่วนในบริเวณอื่นๆ ไม่เกิดความร้อนขึ้น และเป็นการกระจายความร้อนแบบสมมาตรดังรูปที่ 15 (ข) ด้วยเหตุผลเดียวกับกรณีของสายอากาศแบบปลายเปิด ดังนั้นเมื่อแทงสายอากาศเข้าไปในเนื้อเยื่อตับจะไม่มีการทำลายเนื้อเยื่อที่ไม่ต้องการ



(ก)

(ข)

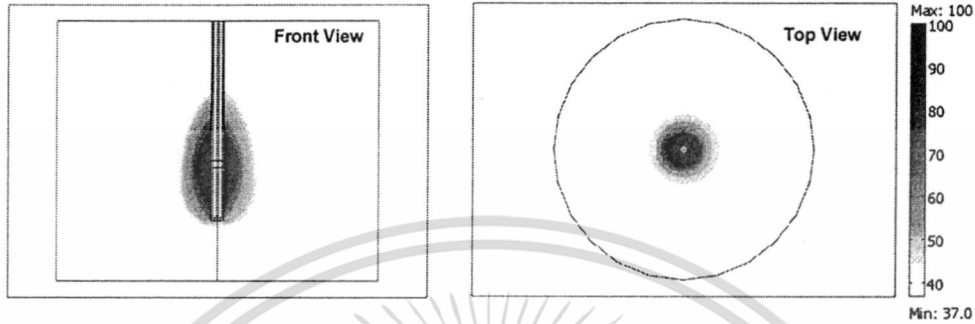
รูปที่ 16 แสดงการกระจายของ SAR ที่ออกจากสายอากาศแบบสลีตที่มีฉนวนหุ้มโดยป้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังงานขนาด 50 วัตต์ ระยะเวลาในการป้อนกำลังงานเท่ากับ 1 นาที

(ก) รูปการกระจายของ SAR ที่ระนาบ yz ที่ตำแหน่ง x เท่ากับ 0

(ข) รูปการกระจายของ SAR ที่ระนาบ xy ที่ตำแหน่ง z เท่ากับ 0



(ก)

(ข)

รูปที่ 17 แสดงการกระจายของอุณหภูมิ ที่ออกจากสายอากาศแบบสลีตที่มีฉนวนหุ้ม โดยป้อนกำลังงานขนาด 50 วัตต์ ระยะเวลาในการป้อนกำลังงานเท่ากับ 1 นาที

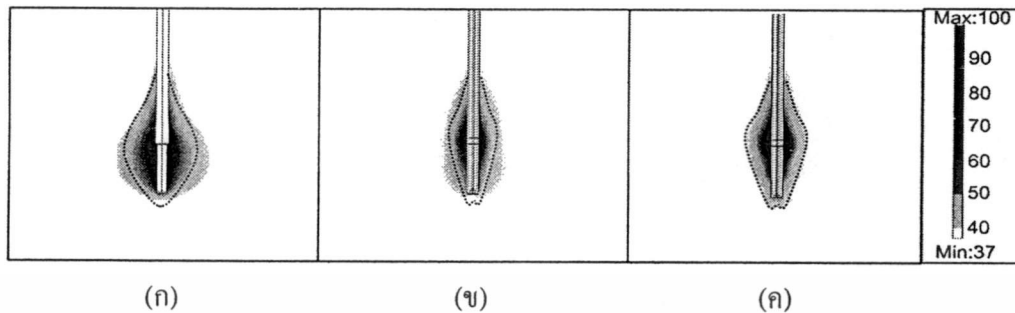
(ก) รูปการกระจายของอุณหภูมิ ที่ระนาบ yz ที่ตำแหน่ง x เท่ากับ 0

(ข) รูปการกระจายของอุณหภูมิ ที่ระนาบ xy ที่ตำแหน่ง z เท่ากับ 0

ในรูปที่ 16 เป็นการกระจายของปริมาณ SAR ของสายอากาศแบบสลีตที่มีฉนวนหุ้ม จะมีการกระจายของ SAR รอบๆ บริเวณตำแหน่งสลีตเช่นเดียวกับสายอากาศแบบสลีต แต่ขนาดของการกระจาย SAR จะมีขนาดใหญ่กว่าพิจารณาจากรูปที่ 16 (ก) เทียบกับรูปที่ 14 (ก) และในรูปที่ 14 (ข) เป็นการกระจายของ SAR แบบสมมาตรรอบๆ สายอากาศแบบสลีตที่มีฉนวนหุ้ม

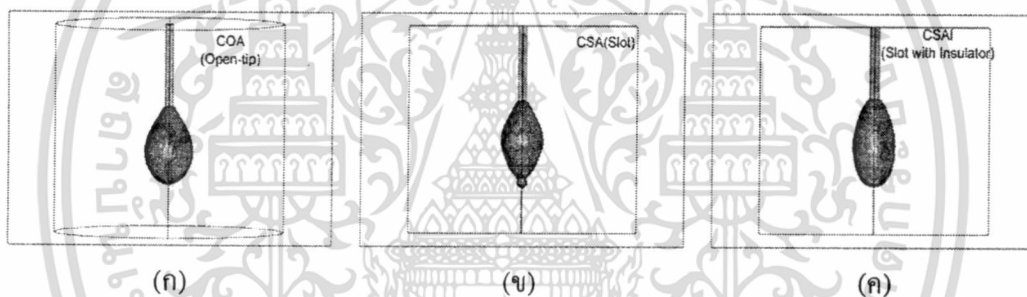
การกระจายของอุณหภูมิในเนื้อเยื่อตับของสายอากาศแบบสลีตที่มีฉนวนหุ้มแสดงในรูปที่ 17 ลักษณะการกระจายของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นเป็นแบบวงรี โดยที่รอบๆ บริเวณตำแหน่งสลีตจะมีค่าการกระจายสูงสุดเมื่อเทียบกับบริเวณอื่นๆ ดังรูปที่ 17 (ก) และในรูปที่ 17 (ข) เป็นลักษณะของการกระจายของอุณหภูมิรอบๆ สายอากาศแบบสลีตที่มีฉนวนหุ้มซึ่งเป็นแบบสมมาตร

ผลการเปรียบเทียบการทำลายเซลล์มะเร็งในเนื้อเยื่อตับของสายอากาศแบบปลายเปิด สายอากาศแบบสล๊อต และสายอากาศแบบสล๊อตที่มีฉนวนหุ้ม



รูปที่ 18 แสดงขนาดการกระจายอุณหภูมิของการทำลายเซลล์มะเร็งของสายอากาศทั้งสามแบบ ที่ระนาบ yz ที่ตำแหน่ง $x = 0$

- (ก) สายอากาศแบบปลายเปิด
- (ข) สายอากาศแบบสล๊อต
- (ค) สายอากาศแบบสล๊อตที่มีฉนวนหุ้ม



รูปที่ 19 แสดงปริมาตรการทำลายเซลล์มะเร็งของสายอากาศทั้งสามแบบในรูปทรง 3 มิติ

- (ก) สายอากาศแบบปลายเปิด
- (ข) สายอากาศแบบสล๊อต
- (ค) สายอากาศแบบสล๊อตที่มีฉนวนหุ้ม

ตารางที่ 3 สรุปปริมาตรของการทำลายเซลล์มะเร็งในเนื้อเยื่อตับของสายอากาศแบบปลายเปิด สายอากาศแบบสล๊อต และสายอากาศแบบสล๊อตที่มีฉนวนหุ้ม

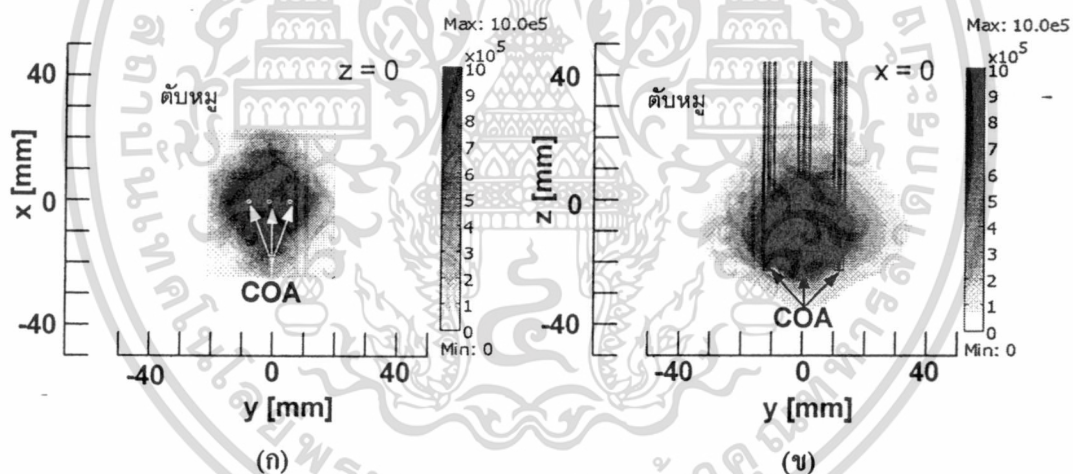
ชนิดของสายอากาศแบบต้นเดี่ยว	ปริมาตรการทำลายเซลล์มะเร็ง (cm ³)
สายอากาศแบบปลายเปิด (COA)	9.7
สายอากาศแบบสล๊อต (CSA)	6.8
สายอากาศแบบสล๊อตที่มีฉนวนหุ้ม (CSAI)	9.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

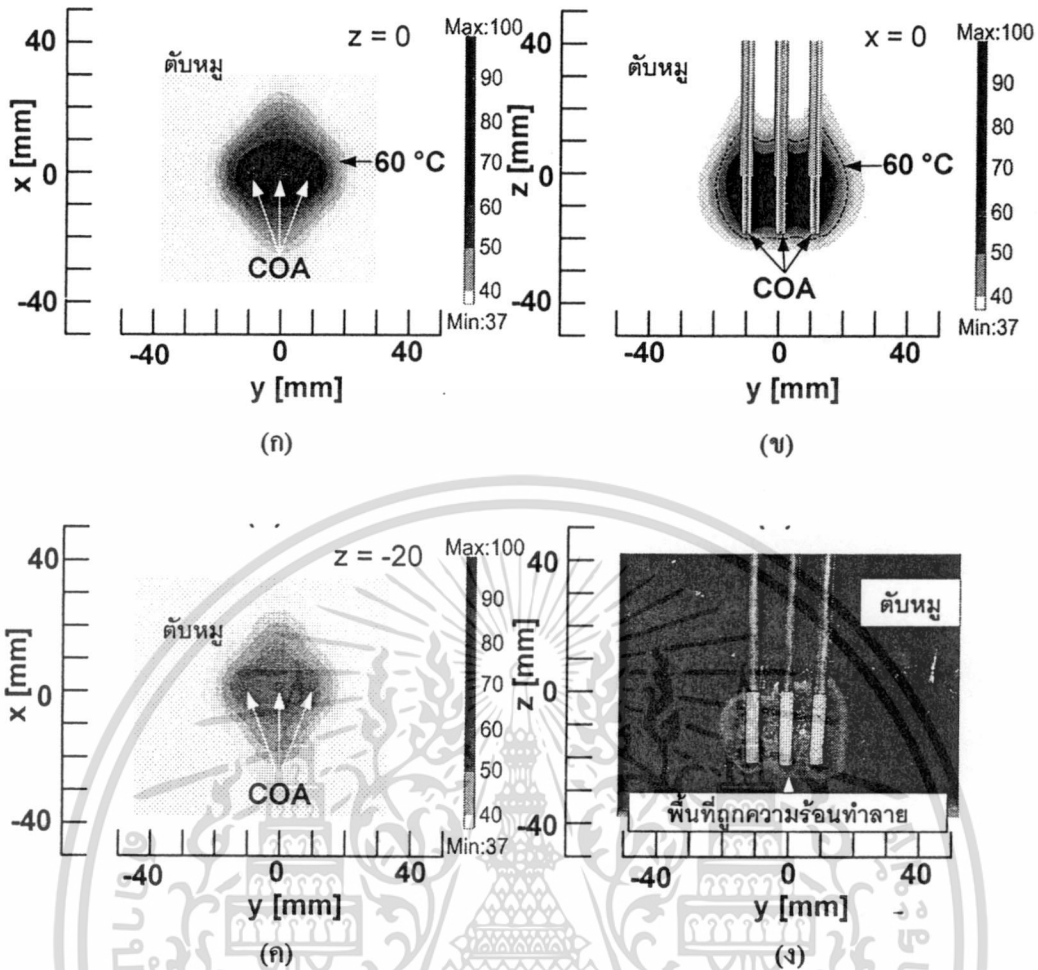
ในรูปที่ 18 แสดงขนาดการกระจายอุณหภูมิของการทำลายเซลล์มะเร็งของสายอากาศแบบปลายเปิด สายอากาศแบบสลีต และสายอากาศแบบสลีตที่มีฉนวนหุ้ม ในรูปที่ 19 แสดงรูปทรงของเซลล์มะเร็งที่ถูกทำลายในรูปทรง 3 มิติ โดยเขียนคำสั่งให้โปรแกรมทำการคำนวณปริมาตรการทำลายเซลล์มะเร็งที่เนื้อเยื่อชั้นที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 60 องศาเซลเซียส ปริมาตรของการทำลายเซลล์มะเร็งแสดงได้ดังตารางที่ 3

จากรูปทรง 3 มิติของการทำลายเซลล์มะเร็งในเนื้อเยื่อชั้น จะเห็นว่าขนาดของการทำลายของสายอากาศแบบปลายเปิดมีรูปทรงเป็นทรงกลมรอบๆ ปลายเปิด และสายอากาศแบบปลายเปิดมีปริมาตรของการทำลายสูงสุด สายอากาศแบบสลีตที่มีฉนวนหุ้มมีปริมาตรการทำลายน้อยกว่าสายอากาศแบบปลายเปิดเล็กน้อย ในขณะที่สายอากาศแบบสลีตจะมีปริมาตรของการทำลายน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกันของสายอากาศทั้งสามแบบ จากผลการจำลองการทำงานของสายอากาศทั้งสามแบบสามารถทำลายเซลล์มะเร็งในเนื้อเยื่อชั้นได้ โดยการกระจายความร้อนที่ออกจากสายอากาศซึ่งจะเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณส่วนปลายของสายอากาศแบบปลายเปิด และที่ตำแหน่งสลีตของสายอากาศแบบสลีตและสายอากาศแบบสลีตที่มีฉนวนหุ้ม

ผลการทดลองการทำลายเซลล์มะเร็งด้วยสายอากาศหลายคัน



รูปที่ 20 ผลการจำลองการกระจาย SAR ในเนื้อเยื่อชั้นของสายอากาศแบบปลายเปิด 3 คัน ซึ่งจัดวางแบบอาร์เรย์ ที่ความถี่ 2.45 GHz ป้อนกำลังงาน 50 วัตต์ ระยะเวลา 1 นาที (ก) ที่ระนาบ xy ที่ตำแหน่ง z เท่ากับ 0 (ข) ที่ระนาบ yz ที่ตำแหน่ง x เท่ากับ 0



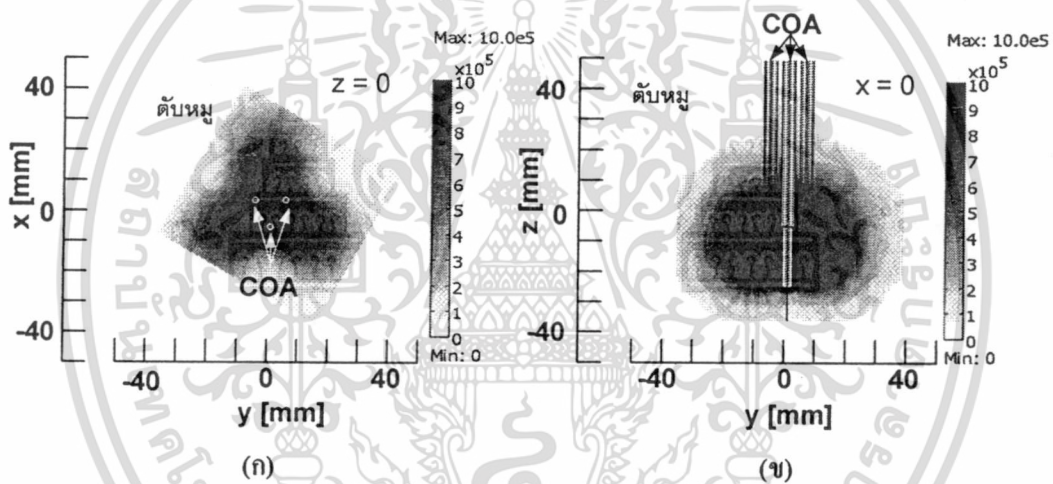
รูปที่ 21 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิในเนื้อเยื่อตับของสายอากาศแบบปลายเปิด 3 ต้น ซึ่งจัดวางแบบอาร์เรย์ ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับกรทดลองกับดัดหมู ที่ความถี่ 2.45 GHz ป้อนกำลังงาน 50 วัตต์ ระยะเวลา 1 นาที (ก) ระนาบ xy ที่ตำแหน่ง z เท่ากับ 0 (ข) ระนาบ yz ที่ตำแหน่ง x เท่ากับ 0 (ค) ระนาบ xy ที่ตำแหน่ง z เท่ากับ -20 (ง)รูปการกระจายของอุณหภูมิ จากการทดลอง

จากรูปที่ 20 แสดงการกระจายของ SAR ในเนื้อเยื่อตับของการทำลายเซลล์มะเร็ง โดยใช้สายอากาศแบบปลายเปิด 3 ต้น มาจัดวางแบบอาร์เรย์ จะเห็นได้ว่ามีลักษณะการกระจายของ SAR เหมือนกับการกระจายของสายอากาศแบบปลายเปิดต้นเดียว วางซ้อนกัน 3 ต้น ดังแสดงในรูปที่ 20 (ก) และการกระจาย SAR ของสายอากาศแบบปลายเปิด 3 ต้น ที่จัดวางแบบอาร์เรย์นี้ยังมีลักษณะการกระจายแบบสมมาตร แสดงในรูปที่ 20 (ข)

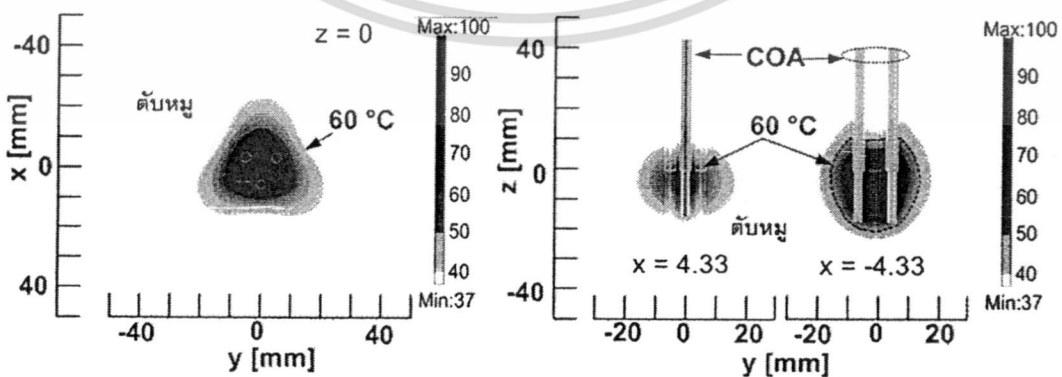
ในรูปที่ 21 แสดงการกระจายของอุณหภูมิในเนื้อเยื่อตับ โดยใช้สายอากาศแบบปลายเปิด 3 ต้น ซึ่งจัดวางแบบอาร์เรย์ การกระจายของอุณหภูมิมิมีการกระจายออกรอบๆ บริเวณทิวป์ ของสายอากาศ เช่นเดียวกับสายอากาศแบบปลายเปิดต้นเดียว ผลที่ได้ได้เสมือนกับการเอาสายอากาศแบบปลายเปิด

ต้นเดี่ยว 3 ต้น มาวางซ้อนกัน ดังรูปที่ 21 (ข) รูปแบบของการกระจายของอุณหภูมิมีลักษณะการกระจายแบบสมมาตร เมื่อพิจารณาที่บริเวณรอยต่อของทิวป์ (เป็นตำแหน่งที่มีการกระจายของ SAR และอุณหภูมิสูงสุด) ดังแสดงในรูปที่ 21 (ก) และในรูปที่ 21 (ค) เป็นการพิจารณาที่ระนาบเดียวกันกับรูปที่ 21 (ก) แต่สนใจที่ตำแหน่งปลายของสายอากาศแบบเปิดทั้ง 3 ต้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าระดับของอุณหภูมิต่ำลงมาก ในรูปที่ 21 (ง) เป็นผลที่ได้จากการทดลองการทำงาน เมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองการทำงานในรูปที่ 21 (ข) จะเห็นได้ว่าขนาดของการทำลายเซลล์มะเร็งในเนื้อเยื่อตับมีขนาดใกล้เคียงกัน โดยขนาดการทำลายเซลล์มะเร็งของการทดลองจริงจะมีขนาดเล็กกว่าประมาณ 2% เมื่อเทียบกับขนาดที่ได้จากการจำลองการทำงาน

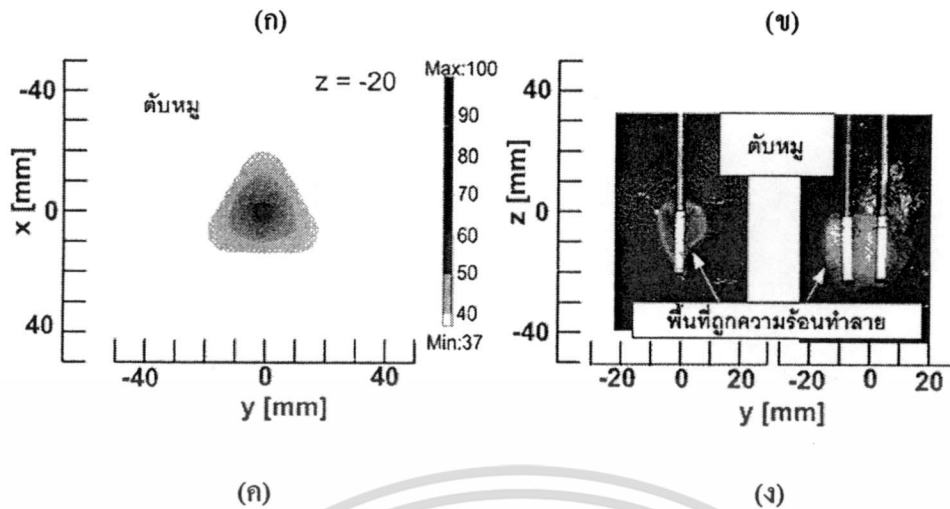
จากการจำลองการทำงานด้วยระเบียบวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถจำลองรูปแบบการทำลายเซลล์มะเร็งในเนื้อเยื่อตับโดยใช้สายอากาศแบบปลายเปิด 3 ต้น ที่จัดวางแบบอาร์เรย์ ได้อย่างสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลองจริงเป็นอย่างมาก



รูปที่ 22 ผลการจำลองการกระจาย SAR ในเนื้อเยื่อตับของสายอากาศแบบปลายเปิด 3 ต้น ซึ่งจัดวางแบบสามเหลี่ยม ที่ความถี่ 2.45 GHz ป้อนกำลังงาน 50 วัตต์ ระยะเวลา 1 นาที (ก) ระนาบ xy ที่ตำแหน่ง z เท่ากับ 0 (ข) ที่ระนาบ yz ที่ตำแหน่ง x เท่ากับ 0



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 23 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิในเนื้อเยื่อตับของสายอากาศแบบปลายเปิด 3 ต้น ซึ่งจัดวางแบบสามเหลี่ยม ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับกรทลอสกับตับหมู ที่ความถี่ 2.45 GHz ป้อนกำลังงาน 50 วัตต์ ระยะเวลา 1 นาที (ก) ระนาบ xy ที่ตำแหน่ง z เท่ากับ 0 (ข) ระนาบ yz ที่ตำแหน่ง x เท่ากับ 0 (ค) ระนาบ xy ที่ตำแหน่ง z เท่ากับ -20 (ง) รูปการกระจายของอุณหภูมิ จากการทลอส

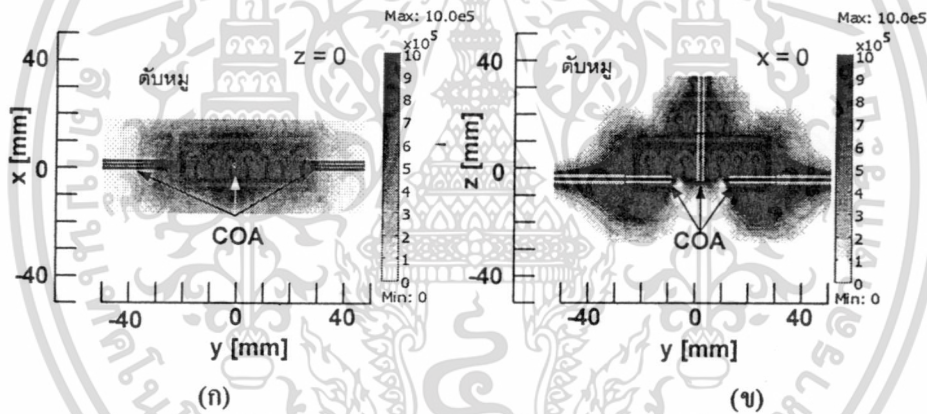
จากรูปที่ 22 แสดงการกระจายของ SAR ในเนื้อเยื่อตับของการทำลายเซลล์มะเร็งโดยใช้สายอากาศแบบปลายเปิด 3 ต้น ที่จัดวางแบบสามเหลี่ยม ในรูปที่ 22 (ก) พิจารณาการกระจายของ SAR ในระนาบที่ตำแหน่งบริเวณปลายเปิดของสายอากาศทั้ง 3 ต้น ลักษณะการกระจาย SAR จะเกิดขึ้นสูงที่ตำแหน่งกึ่งกลางของสายอากาศ คล้ายกับการจัดวางสายอากาศแบบอาร์เรย์โดยใช้สายอากาศ 2 ต้น (พิจารณาจากด้านข้างของรูปสามเหลี่ยม) การกระจายของ SAR ในการจัดวางสายอากาศแบบคู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของสายอากาศทั้งสองจะมีการกระจายของ SAR ที่สูงสอดคล้องกับงานวิจัยที่ได้กล่าวไว้แล้วใน [1] และการกระจายของ SAR จะเป็นรูปสามเหลี่ยมโดยมุมของสามเหลี่ยมอยู่กึ่งกลางของสายอากาศแต่ละคู่

ในรูปที่ 22 (ข) การกระจายของ SAR ในระนาบที่กึ่งกลางรูปทรงสามเหลี่ยมนั้น รายละเอียดได้อธิบายในรูปการจัดวางสายอากาศในบทที่ 3 โดยการกระจายของ SAR จะออกมารอบๆ ทิปที่เป็นส่วนปลายของสายอากาศแบบปลายเปิด และมีขนาดของการกระจายที่ใหญ่ขึ้นเมื่อเทียบกับการใช้สายอากาศแบบปลายเปิดแบบต้นเดียว

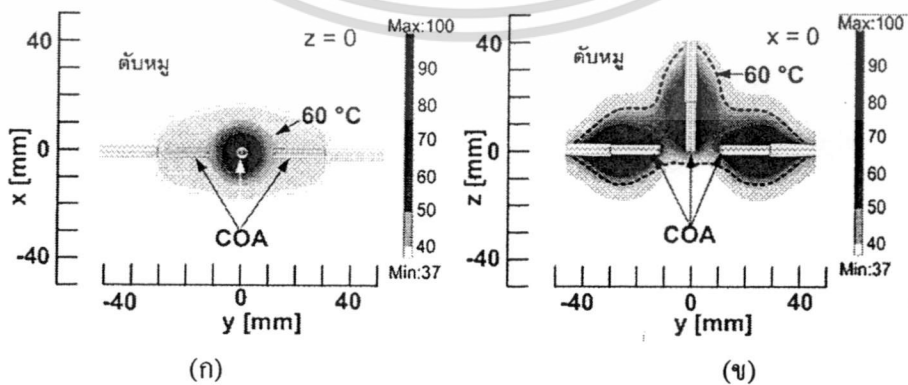
ในรูปที่ 23 แสดงการกระจายของอุณหภูมิในเนื้อเยื่อตับ โดยใช้สายอากาศแบบปลายเปิด 3 ต้น ซึ่งจัดวางแบบสามเหลี่ยม โดยรูปที่ 23 (ก) (ข) และ (ค) เป็นผลการจำลองการทำงานด้วยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ และผลการทลอสแสดงในรูปที่ 23 (ง)

ในรูปที่ 23 (ก) และรูปที่ 23 (ค) แสดงการกระจายของอุณหภูมิในเนื้อเยื่อตับที่ระนาบเดียวกัน โดยเป็นการกระจายอุณหภูมิที่ตำแหน่งจุดต่อของทิวกับตัวนำนอก และตำแหน่งของปลายสายอากาศ ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าในรูปที่ 23 (ก) การกระจายของอุณหภูมิจะมีการกระจายที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับรูปที่ 23 (ค) ซึ่งทั้งสองตำแหน่งจะมีลักษณะการกระจายเป็นรูปทรงสามเหลี่ยม โดยมีมุมของสามเหลี่ยมอยู่ที่กึ่งกลางของสายอากาศแต่ละคู่เช่นเดียวกับผลที่ได้จากการกระจายของ SAR ในรูปที่ 22 (ก)

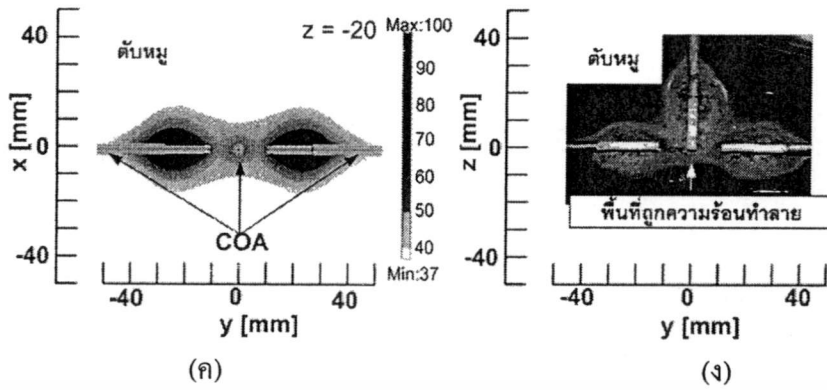
เมื่อเปรียบเทียบผลการจำลองการทำงานในรูปที่ 23 (ข) กับผลการทดลองในรูปที่ 23 (ง) จะเห็นได้ว่ามีลักษณะใกล้เคียงกัน โดยผลการทดลองจะมีขนาดการทำลายเซลล์มะเร็งในเนื้อเยื่อตับเล็กกว่าผลการจำลองการทำงานอยู่ประมาณ 7% ดังนั้นระเบียบวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถจำลองรูปแบบการทำลายเซลล์มะเร็งในเนื้อเยื่อตับโดยใช้สายอากาศแบบปลายเปิด 3 ต้น ที่จัดวางแบบสามเหลี่ยมได้อย่างสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลองจริง



รูปที่ 24 ผลการจำลองการกระจาย SAR ในเนื้อเยื่อตับของสายอากาศแบบปลายเปิด 3 ต้น ซึ่งจัดวางแบบรูปตัวที ที่ความถี่ 2.45 GHz ป้อนกำลังงาน 50 วัตต์ ระยะเวลา 1 นาที (ก) ระนาบ xy ที่ตำแหน่ง z เท่ากับ 0 (ข) ระนาบ yz ที่ตำแหน่ง x เท่ากับ 0



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 25 ผลการกระจายอุณหภูมิในเนื้อเยื่อตับของสายอากาศแบบปลายเปิด 3 คัน ซึ่งจัดวางแบบรูปตัวที ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับกรทดลองกับตับหมู ที่ความถี่ 2.45 GHz ป้อนกำลังงาน 50 วัตต์ระยะเวลา 1 นาที (ก) ระนาบ xy ที่ตำแหน่ง z เท่ากับ 0 (ข) ระนาบ yz ที่ตำแหน่ง x เท่ากับ 0 (ค) ระนาบ xy ที่ตำแหน่ง z เท่ากับ -20 (ง) รูปการกระจายของอุณหภูมิ จากการทดลอง

ในรูปที่ 24 แสดงการกระจายของ SAR ในเนื้อเยื่อตับของการทำลายเซลล์มะเร็ง โดยใช้สายอากาศแบบปลายเปิด 3 คัน ที่จัดวางแบบรูปตัวที รูปที่ 24 (ก) พิจารณาจากสายอากาศที่วางทางแนวตั้ง ที่ตำแหน่งรอยต่อจุดทาบ จะเห็นได้ว่าการกระจายของ SAR จะเหมือนกับสายอากาศแบบปลายเปิดคันเดียว และมีความสมมาตรรอบๆ สายอากาศ เมื่อพิจารณารูปที่ 24 (ข) การกระจายของ SAR จะเหมือนกับผลที่ได้จากสายอากาศคันเดียว 3 คัน มาวางซ้อนกัน โดยตำแหน่งที่มีการรวมกันของ SAR จะมีขนาดของการกระจาย SAR ที่เพิ่มสูงขึ้น (โดยมุมที่จัดวางสายอากาศตั้งฉากกัน) ทั้งสายอากาศที่วางตามแนวอนทั้ง 2 คัน ดังรูป

จากรูปที่ 25 (ก) (ข) และ (ค) เป็นผลการจำลองการกระจายของอุณหภูมิในเนื้อเยื่อตับ โดยใช้สายอากาศแบบปลายเปิด 3 คัน ซึ่งจัดวางแบบรูปตัวที ด้วยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ และในรูปที่ 25 (ง) เป็นผลที่ได้จากการทดลอง

ในรูปที่ 25 (ก) และรูปที่ 25 (ค) พิจารณาระนาบที่ตำแหน่งจุดต่อของทาบของสายอากาศที่วางทางแนวตั้ง และด้านล่างทางแนวอนของการจัดวางสายอากาศในแบบรูปตัวที โดยการกระจายของอุณหภูมิจะเหมือนกับการกระจายอุณหภูมิของสายอากาศแบบปลายเปิดคันเดียว ซึ่งการกระจายอุณหภูมิจะสูงรอบๆ ทาบ จากรูปที่ 25 (ข) และรูปที่ 25 (ง) จะเห็นได้ว่าผลการจำลองการทำงานกับผลการทดลองมีลักษณะ และขนาดที่ใกล้เคียงกัน โดยผลการทดลองจะมีขนาดการทำลายเซลล์มะเร็งในเนื้อเยื่อตับเล็กกว่าผลการจำลองการทำงานอยู่ประมาณ 2%

จากผลการจำลองการทำงาน และผลการทดลองของการจัดวางสายอากาศแบบปลายเปิด 3 คัน ทั้งที่เป็นแบบอาร์เรย์ แบบสามเหลี่ยม และแบบรูปตัวที ในหัวข้อที่ 4.5 นี้ สามารถนำเอาระเบียงวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์มาจำลองการทำงาน โดยผลการจำลองการทำงานที่ได้มีผลสอดคล้อง

กับผลที่ได้จากการทดลอง ซึ่งเป็นการยืนยันความถูกต้องของผลที่ได้จากวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่นำมาใช้ได้เป็นอย่างดี

10. ผลลัพธ์ที่ได้จากการทำวิจัย

- 9.1 P. Phasukkit, S. Tungjitikusolmun, M. Sangworasil, Finite element analysis and in vitro experiments of placement configurations using triple antennas in microwave hepatic ablation, IEEE Trans. Biomed. Eng., vol. 56, November, 2009, pp. 2564-2572
- 9.2 นำเสนอผลงานในงานนิทรรศการครบรอบ 50 ปี สถาบันฯ พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

11. เปอร์เซนต์ความคืบหน้าของโครงการ 100%

12. เอกสารอ้างอิงการวิจัย

- [1] ปราโมทย์ เคชะอำไพ.2547. ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม.กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [2] บัณฑิต โรจนอารยานนท์.2536. วิศวกรรมไมโครเวฟ. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [3] รศ.นิรันดร์ คำประเสริฐ.2542. วิศวกรรมแม่เหล็กไฟฟ้าและวิศวกรรมไมโครเวฟ. กรุงเทพฯ : ศูนย์สื่อเสริมกรุงเทพ
- [4] Ronald L. Fournier, PhD,PE.2007.BASIC TRANSPORT PHENOMENA IN BIOMEDICAL ENGINEERING. Taylor & Francis Group New York London
- [5] Dominik Wodarz.2005.COMPUTATIONAL BIOLOGY OF CANCER LECTURE NOTES AND MATHEMATICAL MODELING. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.
- [6] D.POULIKAKOS.1994.CONDUCTION HEAT TRANSFER. Prentice-Hall International, Inc.
- [7] JOAO PEDRO A. BASTOS ,NELSON SADOWSKI.2003. ELECTROMAGNETIC MODELING BY FINITE ELEMENT METHODS. Marcel dekker, Inc. All Right Reserved.
- [8] Stephane Cotin, Dunustrus Metaxas (Eds.).2004.Medical Simulation. Springer-Verlag.
- [9] R.W.Lewis ,K.Morgan University of wales, Swansea Wales, UK ,H.R. Thomas University of Wales, Cardiff Wales, UK , K.N. Seetharamu Indian Institute of Technology, Madras, India.1966. John wiley & Sons Ltd.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [10] A.S. Wright, F.T. Lee, Jr., and D.M. Mahvi, "Haptic microwave ablation with multiple antennas result in synergistically larger zones of coagulation necrosis," *Ann Surg Oncol*, Vol. 10 pp.275-283,2003
- [11] S. labonte, A. Blais, S.R. Legault, H.O Ali, L Roy "Monopole antennas for microwave catheter ablation," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Tech.*, Vol.44,pp. 1832 – 1840 , 1996.
- [12] K. Saito, T.Taniguchi, H. Yoshimura, and K. Ito, "Estimate of SAR distribution of a tip-split array applicator for microwave coagulation therapy using the finite element method," *IEICE Trans Electron*, Vol.E84-C, pp.948-954, 2001
- [13] K. Saito, Y. Hayashi, H. Yoshimura, K. Ito. "Heating characteristics of coagulation therapy," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Tech.*, vol.48, pp.1800-1806,2000.
- [14] K. Saito, Y. Hayashi, H. Yoshimura, K. Ito, "Dielectric-loaded coaxial-slot antenna for interstitial microwave hyperthermia: longitudinal, control of heating patterns, " *Int.J.Hyperthermia*, vol. 16,pp. 219-229,2000.
- [15] D.Haemmerich, S.T. Staelin,S. Tungjitkusolmun, F.T. Lee, Jr., D.M. Mahvi, and J.G. Webster, "Hepatic bipolar radio- frequency ablation between separated multiprong electrodes, " *IEEE Trans Biomed Eng*, vol. 48 pp. 1145- 1152, 2001.

ข้าพเจ้าขอรับรองข้อความข้างต้นเป็นจริงทุกประการ

(นายสุพันธุ์ ตั้งจิตกุศลมั่น)

หัวหน้าโครงการวิจัย

14 กรกฎาคม 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้