

บทที่ 4

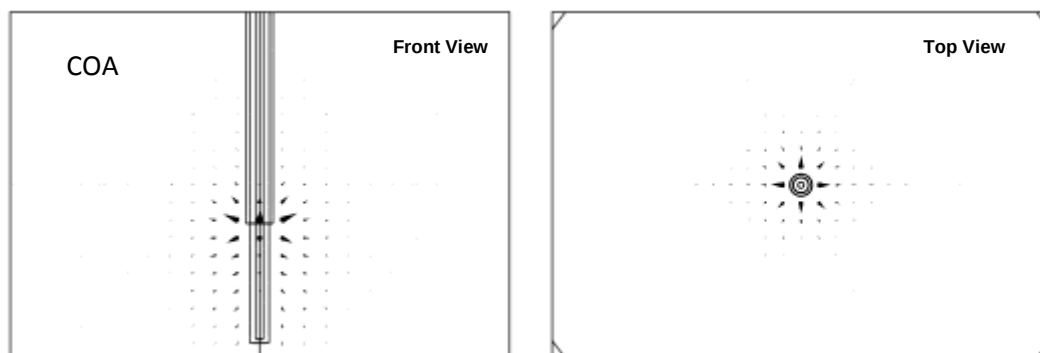
ผลการจำลองการทำงานและผลการทดลอง

4.1 บทนำ

จากบทที่ 3 ได้กล่าวถึงสายอากาศแบบต่างๆ ที่ได้มีการวิจัยและพัฒนาสายอากาศที่นำมาประยุกต์ใช้ในระบบ MWA (Microwave Ablation) และในส่วนตอนท้ายของบทที่ 3 ทางผู้วิจัยได้นำเสนอสายอากาศ 3 รูปแบบ คือ สายอากาศแบบปลายเปิด (COA) สายอากาศแบบสล็อต (CSA) และสายอากาศแบบสล็อตที่มีฉนวนหุ้ม (CSAI) ในบทนี้ได้นำเอาสายอากาศทั้ง 3 รูปแบบมาใช้ในการระบบ MWA โดยแสดงผลการจำลองการทำงานในรูปของการกระจายของฟลักซ์ความร้อน ($\dot{q}$) สนามไฟฟ้า (E) SAR และการกระจายของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในเนื้อเยื่อตับของสายอากาศแต่ละต้น และได้มีการนำเสนอวิธีการเพิ่มขนาดของการทำลายเซลล์มะเร็งในเนื้อเยื่อตับ โดยใช้สายอากาศ 3 ต้น ที่เป็นแบบเดียวกัน และเป็นแบบผสมกันมาจัดวางในแบบอาร์เรย์ วางแบบทำมุมสามเหลี่ยม และวางแบบรูป “T” และแสดงขนาดของการทำลายเซลล์มะเร็งด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ยืนยันความถูกต้องของวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยผลการทดลอง โดยเปรียบเทียบผลการทดลองสายอากาศแบบปลายเปิด (COA) จัดเรียงแบบอาร์เรย์ แบบทำมุมสามเหลี่ยม และวางแบบรูปตัว “T” โดยการจำลองการทำงาน และการทดลองจริง ใช้ขนาดของกำลังงานของคลื่นไมโครเวฟ (2.45 GHz) ที่ป้อนให้กับสายอากาศเท่ากับ 50 วัตต์ ระยะเวลาเท่ากับ 1 นาที เพื่อต้องการขนาดการทำลายมะเร็งที่มีขนาดใหญ่ โดยใช้กำลังงานและระยะเวลาน้อยกว่างานวิจัยที่ผ่านมา

และจากขนาดของการทำลายของเนื้อเยื่อที่เป็นมะเร็งกับเนื้อเยื่อปกติมีความแตกต่างกันน้อยมาก ในบทที่ 2 ได้กล่าวไว้แล้ว ชนิดของเนื้อเยื่อที่ใช้ในการทดลองและการจำลองการทำงานด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นเนื้อเยื่อตับแบบปกติ

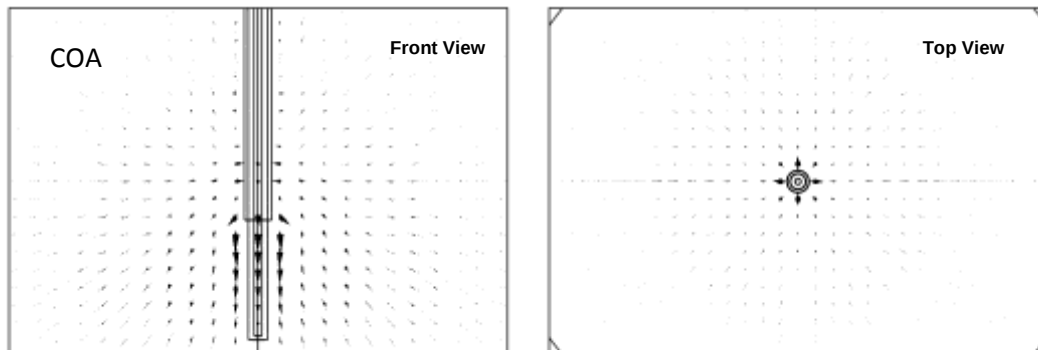
4.2 ผลการจำลองการกระจายของฟลักซ์ความร้อน ($\dot{q}$) และสนามไฟฟ้าของสายอากาศแบบปลายเปิด สายอากาศแบบสลั๊ต และสายอากาศแบบสลั๊ตที่มีฉนวนหุ้ม



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.1 แสดงการกระจายของฟลักซ์ความร้อน ($\dot{q}$) ที่ออกจากสายอากาศแบบปลายเปิด โดยป้อนกำลังงานขนาด 50 วัตต์ ระยะเวลาในการป้อนกำลังงานเท่ากับ 1 นาที (ก) ที่ระนาบ yz ที่ตำแหน่ง x เท่ากับ 0 (ข) ที่ระนาบ xy ที่ตำแหน่ง z เท่ากับ 0



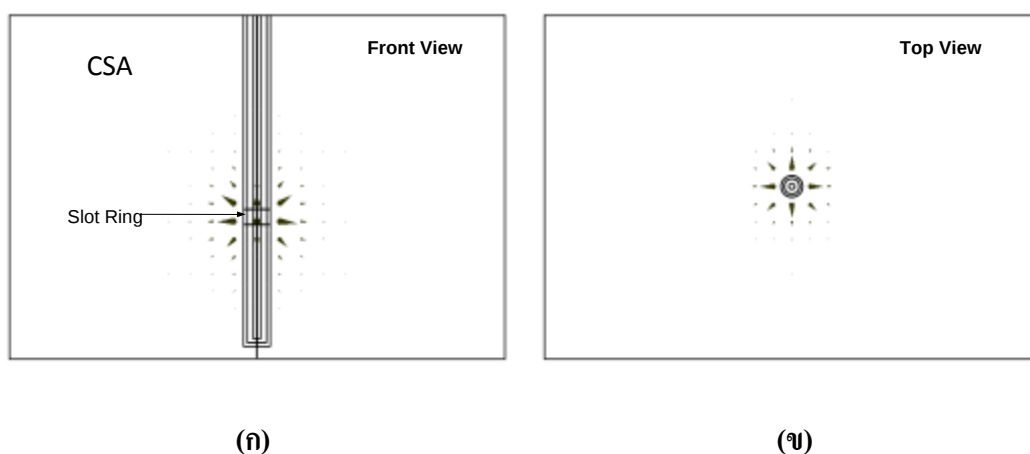
(ก)

(ข)

รูปที่ 4.2 แสดงการกระจายของสนามไฟฟ้า ($\vec{E}$) ที่ออกจากสายอากาศแบบปลายเปิด โดยป้อนกำลังงานขนาด 50 วัตต์ ระยะเวลาในการป้อนกำลังงานเท่ากับ 1 นาที (ก) ระนาบ yz ที่ตำแหน่ง x เท่ากับ 0 (ข) ระนาบ xy ที่ตำแหน่ง z เท่ากับ 0

จากรูปที่ 4.1 เป็นผลที่ได้จากการจำลองการทำงานโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในรูปที่ 4.1 (ก) แสดงฟลักซ์ความร้อน ($\dot{q}$) ที่เกิดขึ้นกับสายอากาศแบบปลายเปิด จะเห็นได้ว่าจะมีการกระจายฟลักซ์ความร้อน ($\dot{q}$) บริเวณรอยต่อของจุดทึบกับตัวนำนอก ในรูปที่ 4.1 (ข) การกระจายของฟลักซ์ความร้อน ($\dot{q}$) จะมีการกระจายสมมาตรจากจุดกึ่งกลางของสายอากาศออกไปรอบๆ สายอากาศ

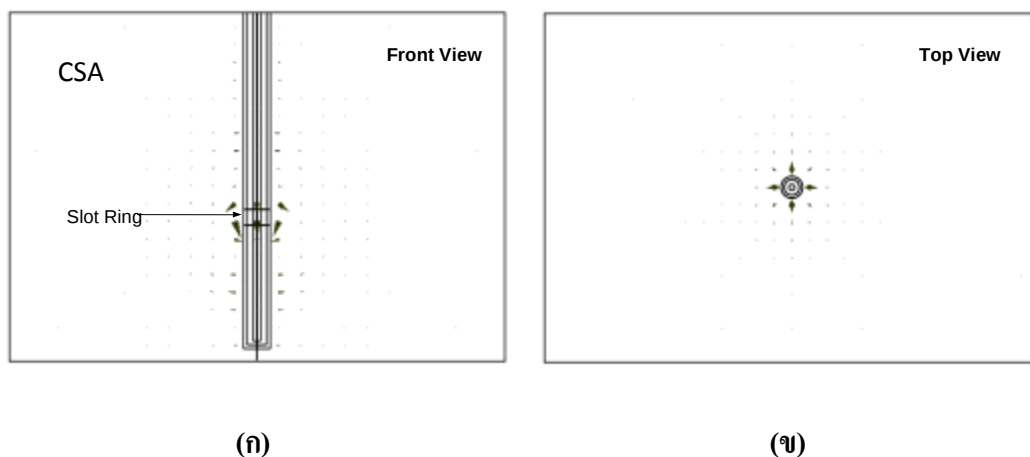
ในรูปที่ 4.2 (ก) แสดงการกระจายของสนามไฟฟ้า ($\vec{E}$) ที่ออกจากสายอากาศแบบปลายเปิด โดยสนามไฟฟ้ามีการกระจายออกรอบๆ รอยต่อจุดทึบกับตัวนำนอก และรอบๆ บริเวณปลายทึบที่เปิดของสายอากาศ ในรูปที่ 4.2 (ข) แสดงให้เห็นว่าสนามไฟฟ้ามีการกระจายสมมาตรรอบๆ สายอากาศ



รูปที่ 4.3 แสดงการกระจายของฟลักซ์ความร้อน ($\dot{q}$) ที่ออกจากสายอากาศแบบสล็อต โดยป้อน

กำลังงานขนาด 50 วัตต์ ระยะเวลาในการป้อนกำลังงานเท่ากับ 1 นาที (ก) ระนาบ yz

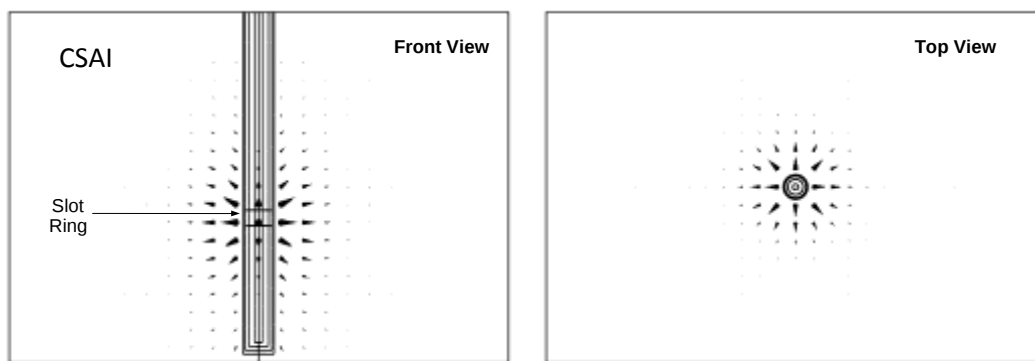
ที่ตำแหน่ง x เท่ากับ 0 (ข) ระนาบ xy ที่ตำแหน่ง z เท่ากับ 0



รูปที่ 4.4 แสดงการกระจายของสนามไฟฟ้า ($\vec{E}$) ที่ออกจากสายอากาศแบบสล็อต โดยป้อนกำลังงานขนาด 50 วัตต์ ระยะเวลาในการป้อนกำลังงานเท่ากับ 1 นาที (ก) ระนาบ yz ที่ตำแหน่ง x เท่ากับ 0 (ข) ระนาบ xy ที่ตำแหน่ง z เท่ากับ 0

จากรูปที่ 4.3 แสดงผลที่ได้จากการจำลองการทำงานโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในรูปที่ 4.3 (ก) แสดงฟลักซ์ความร้อน ($\vec{q}$) ที่เกิดขึ้นของสายอากาศแบบสล็อต จะเห็นได้ว่าการกระจายความร้อนออกรอบๆ บริเวณสล็อต และการกระจายของฟลักซ์ความร้อน ($\vec{q}$) จะมีการกระจายสมมาตรรอบๆ สายอากาศ ดังในรูปที่ 4.3 (ข)

ในลักษณะเดียวกันรูปที่ 4.4 (ก) แสดงการกระจายของสนามไฟฟ้า ($\vec{E}$) ที่ออกจากสายอากาศแบบสล็อต โดยสนามไฟฟ้ามีการกระจายออกรอบๆ บริเวณสล็อต พิจารณาจากรูปที่ 4.4 (ข) มุมมองที่ระนาบจะเห็นได้ว่า สนามไฟฟ้ามีการกระจายออกรอบๆ สายอากาศทุกๆ ทิศทางแบบสมมาตร



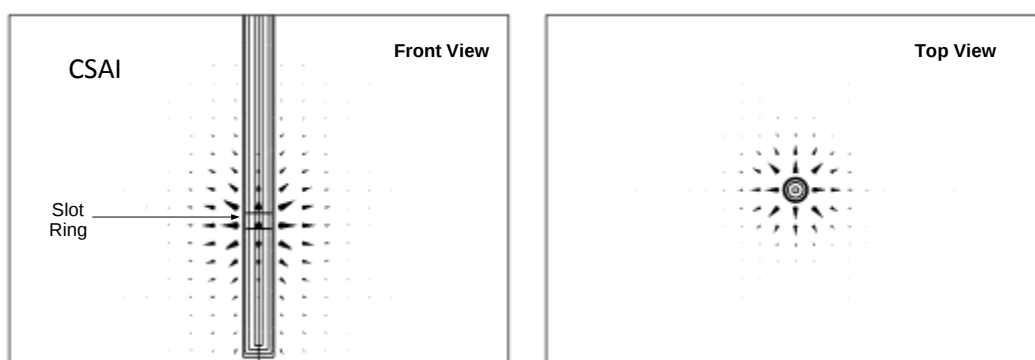
(ก)

(ข)

รูปที่ 4.5 แสดงการกระจายของฟลักซ์ความร้อน ($\vec{q}$) ที่ออกจากสายอากาศแบบสล๊อตที่มีฉนวนหุ้ม

โดยป้อนกำลังงานขนาด 50 วัตต์ ระยะเวลาในการป้อนกำลังงานเท่ากับ 1 นาที

(ก) ระนาบ yz ที่ตำแหน่ง x เท่ากับ 0 (ข) ระนาบ xy ที่ตำแหน่ง z เท่ากับ 0



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.6 แสดงการกระจายของสนามไฟฟ้า ($\vec{E}$) ที่ออกจากสายอากาศแบบสล๊อตที่มีฉนวนหุ้ม

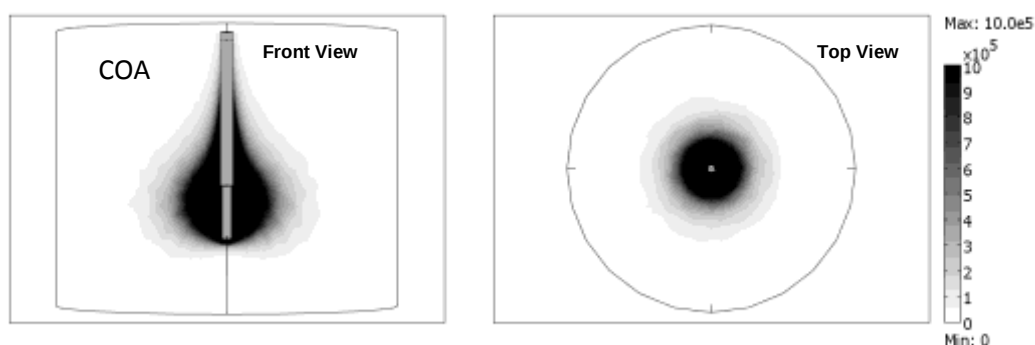
โดยป้อนกำลังงานขนาด 50 วัตต์ ระยะเวลาในการป้อนกำลังงานเท่ากับ 1 นาที

(ก) ระนาบ yz ที่ตำแหน่ง x เท่ากับ 0 (ข) ระนาบ xy ที่ตำแหน่ง z เท่ากับ 0

จากรูปที่ 4.5 แสดงผลที่ได้จากการจำลองการทำงานโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์รูปที่ 4.5 (ก) แสดงฟลักซ์ความร้อน ($\vec{q}$) ที่เกิดขึ้นของสายอากาศแบบสล๊อตที่มีฉนวนหุ้ม จะเห็นได้ว่าจะมีการกระจายฟลักซ์ความร้อน ($\vec{q}$) ออกบริเวณรอบตำแหน่งสล๊อต และการกระจายของฟลักซ์ความร้อน ($\vec{q}$) จะมีการกระจายสมมาตรจากจุดกึ่งกลางของสายอากาศออกไปรอบๆ สายอากาศ ดังรูปที่ 4.5 (ข)

ในรูปที่ 4.6 แสดงการกระจายของสนามไฟฟ้า ($\vec{E}$) ของสายอากาศแบบสล็อตที่มีฉนวนหุ้ม โดยในรูปที่ 4.6 (ก) สนามไฟฟ้ามีการกระจายออกรอบๆ บริเวณสล็อต และรูปที่ 4.6 (ข) แสดงให้เห็นว่า สนามไฟฟ้ามีการกระจายออกรอบๆ สายอากาศทุกๆ ทิศทางแบบสมมาตร

4.3 ผลของการกระจาย SAR และอุณหภูมิในเนื้อเยื่อตับของสายอากาศแบบปลายเปิด สายอากาศแบบสล็อต และสายอากาศแบบสล็อตที่มีฉนวนหุ้ม

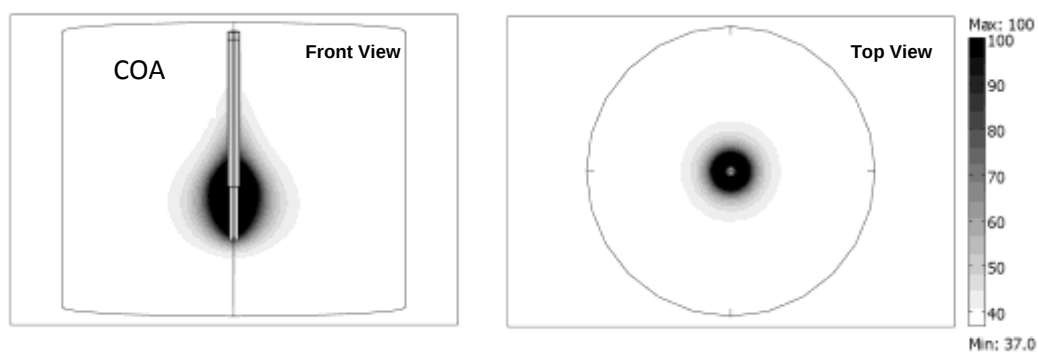


(ก)

(ข)

รูปที่ 4.7 แสดงการกระจายของ SAR ที่ออกจากสายอากาศแบบปลายเปิด โดยป้อนกำลังงาน

ขนาด 50 วัตต์ ระยะเวลาในการป้อนกำลังงานเท่ากับ 1 นาที (ก) ระนาบ yz ที่ตำแหน่ง x เท่ากับ 0 (ข) ระนาบ xy ที่ตำแหน่ง z เท่ากับ 0

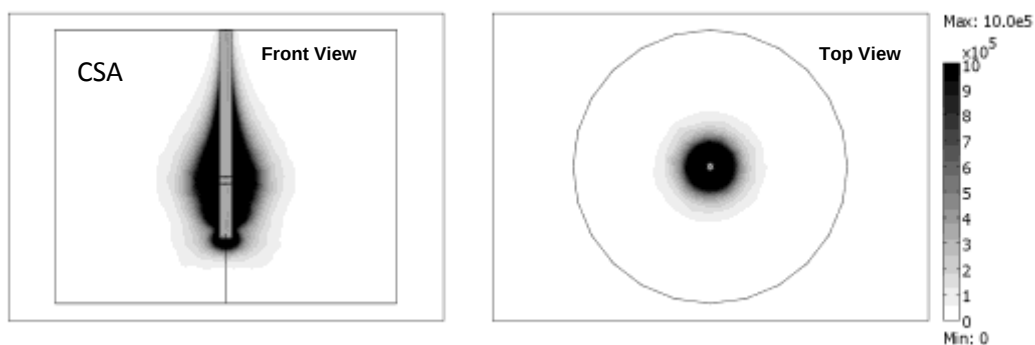


(ก)

(ข)

รูปที่ 4.8 แสดงการกระจายของอุณหภูมิ ที่ออกจากสายอากาศแบบปลายเปิด โดยป้อนกำลังงาน ขนาด 50 วัตต์ ระยะเวลาในการป้อนกำลังงานเท่ากับ 1 นาที (ก) ระบาย yz ที่ตำแหน่ง x เท่ากับ 0 (ข) ระบาย xy ที่ตำแหน่ง z เท่ากับ 0

รูปที่ 4.7 แสดงการกระจายของปริมาณ SAR ที่เกิดขึ้นในเนื้อเยื่อตับ ปริมาณของ SAR ที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากสนามไฟฟ้าจากสมการที่ (2.1) ในบทที่ 2 ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้ยืนยันได้ว่าการกระจายของ SAR รอบๆ บริเวณปลายสายอากาศรอบๆ ปลายสายอากาศ และการกระจายของ SAR มีลักษณะแบบสมมาตร เมื่อพิจารณาการกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นกับเนื้อเยื่อในรูปที่ 4.8 จะเห็นได้ว่าในระบบ MWA สายอากาศที่ทำการออกแบบจะมีความร้อนออกมาบริเวณรอบๆ ปลายสายอากาศ ของสายอากาศแบบปลายเปิด ส่วนในบริเวณอื่นๆ ไม่เกิดความร้อนขึ้น ด้วยเหตุนี้ทำให้สามารถแทงสายอากาศเข้าไปในเนื้อเยื่อตับได้โดยไม่ทำลายเนื้อเยื่อที่ไม่ต้องการ และมีการกระจายของความร้อนรอบๆ สายอากาศแบบสมมาตร



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.9 แสดงการกระจายของ SAR ที่ออกจากสายอากาศแบบสลีตโดยป้อนกำลังงาน ขนาด 50 วัตต์ ระยะเวลาในการป้อนกำลังงานเท่ากับ 1 นาที (ก) ระนาบ yz ที่ตำแหน่ง x เท่ากับ 0 (ข) ระนาบ xy ที่ตำแหน่ง z เท่ากับ 0



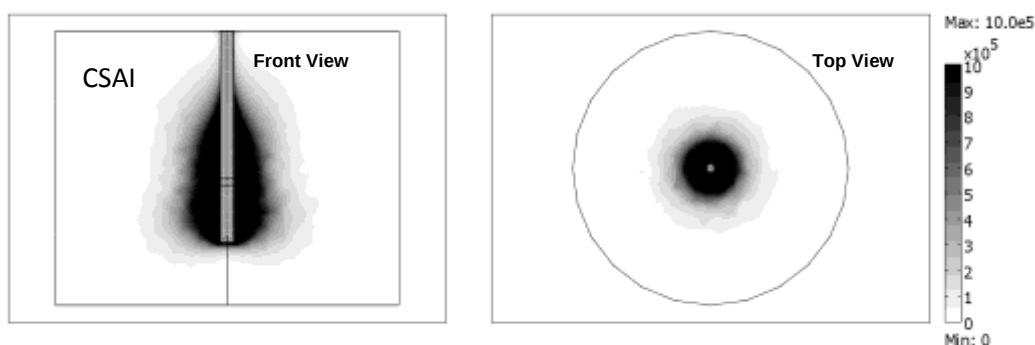
(ก)

(ข)

รูปที่ 4.10 แสดงการกระจายของอุณหภูมิ ที่ออกจากสายอากาศแบบสลีต โดยป้อนกำลังงาน ขนาด 50 วัตต์ ระยะเวลาในการป้อนกำลังงานเท่ากับ 1 นาที (ก) ระนาบ yz ที่ตำแหน่ง x เท่ากับ 0 (ข) ระนาบ xy ที่ตำแหน่ง z เท่ากับ 0

จากรูปที่ 4.9 แสดงการกระจายของปริมาณ SAR ที่เกิดขึ้นในเนื้อเยื่อตับของสายอากาศแบบสลีต ในรูปที่ 4.9 (ก) การกระจายของ SAR ที่รอบๆ บริเวณสลีตจะมีการกระจายของ SAR สูงกว่าบริเวณอื่นๆ และในรูปที่ 4.9 (ข) แสดงให้เห็นลักษณะของ SAR ที่มีการกระจายออกรอบๆ สายอากาศแบบสมมาตร

รูปที่ 4.10 (ก) พิจารณาการกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นกับเนื้อเยื่อตับของสายอากาศแบบสล็อต จะเห็นได้ว่าการกระจายความร้อนจะออกมารอบๆ บริเวณสล็อต ส่วนในบริเวณอื่นๆ ไม่เกิดความร้อนขึ้น และเป็นการกระจายความร้อนแบบสมมาตรดังรูปที่ 4.10 (ข) ด้วยเหตุผลเดียวกับกรณีของสายอากาศแบบปลายเปิด ดังนั้นเมื่อแท่งสายอากาศเข้าไปในเนื้อเยื่อตับจะไม่มีการทำลายเนื้อเยื่อที่ไม่ต้องการ



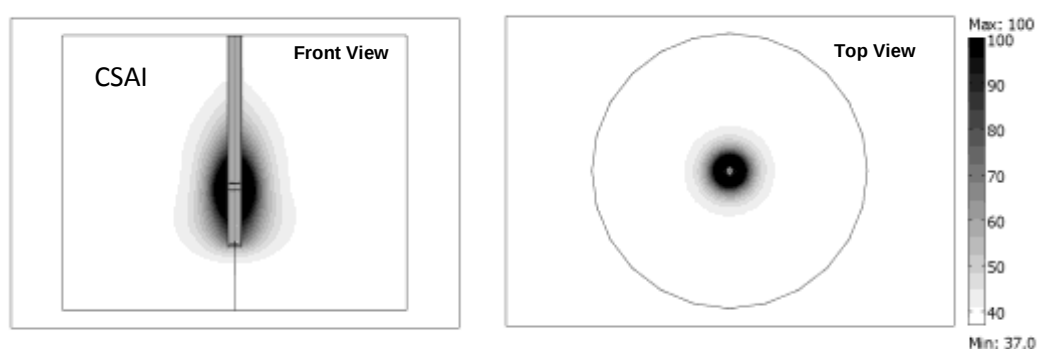
(ก)

(ข)

รูปที่ 4.11 แสดงการกระจายของ SAR ที่ออกจากสายอากาศแบบสล็อตที่มีฉนวนหุ้มโดยป้อน

กำลังงานขนาด 50 วัตต์ ระยะเวลาในการป้อนกำลังงานเท่ากับ 1 นาที (ก) ระนาบ yz

ที่ตำแหน่ง x เท่ากับ 0 (ข) ระนาบ xy ที่ตำแหน่ง z เท่ากับ 0



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.12 แสดงการกระจายของอุณหภูมิ ที่ออกจากสายอากาศแบบสล็อตที่มีฉนวนหุ้ม โดยป้อน

กำลังงานขนาด 50 วัตต์ ระยะเวลาในการป้อนกำลังงานเท่ากับ 1 นาที (ก) ระนาบ yz

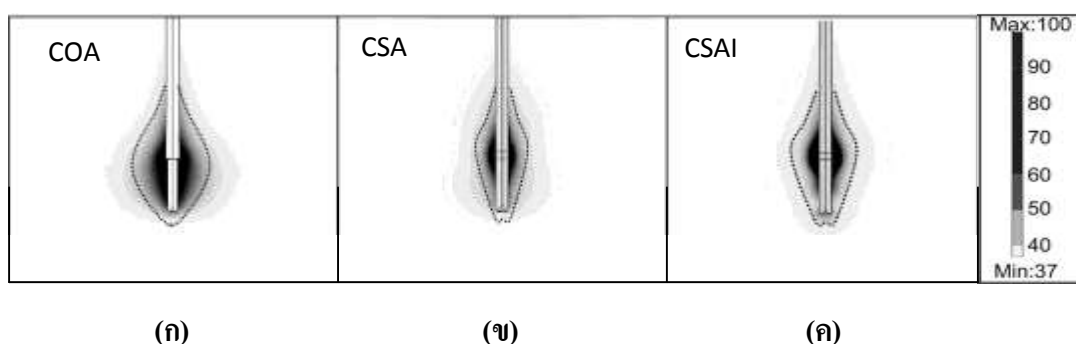
ที่ตำแหน่ง x เท่ากับ 0 (ข) ระนาบ xy ที่ตำแหน่ง z เท่ากับ 0

ในรูปที่ 4.11 เป็นการกระจายของปริมาณ SAR ของสายอากาศแบบสล็อตที่มีฉนวนหุ้ม จะมีการกระจายของ SAR รอบๆ บริเวณตำแหน่งสล็อตเช่นเดียวกับสายอากาศแบบสล็อต แต่ขนาดของการกระจาย SAR จะมีขนาดใหญ่กว่าพิจารณาจากรูปที่ 4.11 (ก) เทียบกับรูปที่ 4.9 (ก) และในรูปที่ 4.11 (ข) เป็นการกระจายของ SAR แบบสมมาตรรอบๆ สายอากาศแบบสล็อตที่มีฉนวนหุ้ม

การกระจายของอุณหภูมิในเนื้อเยื่อตับของสายอากาศแบบสล็อตที่มีฉนวนหุ้มแสดงใน รูปที่ 4.12 ลักษณะการกระจายของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นเป็นแบบวงรี โดยที่รอบๆ บริเวณตำแหน่งสล็อตจะมีค่าการกระจายสูงสุดเมื่อเทียบกับบริเวณอื่นๆ ดังรูปที่ 4.12 (ก) และในรูปที่ 4.12 (ข) เป็นลักษณะของการกระจายของอุณหภูมิรอบๆ สายอากาศแบบสล็อตที่มีฉนวนหุ้มซึ่งเป็นแบบสมมาตร

4.4 ผลการเปรียบเทียบการทำลายเซลล์มะเร็งในเนื้อเยื่อตับของสายอากาศแบบ

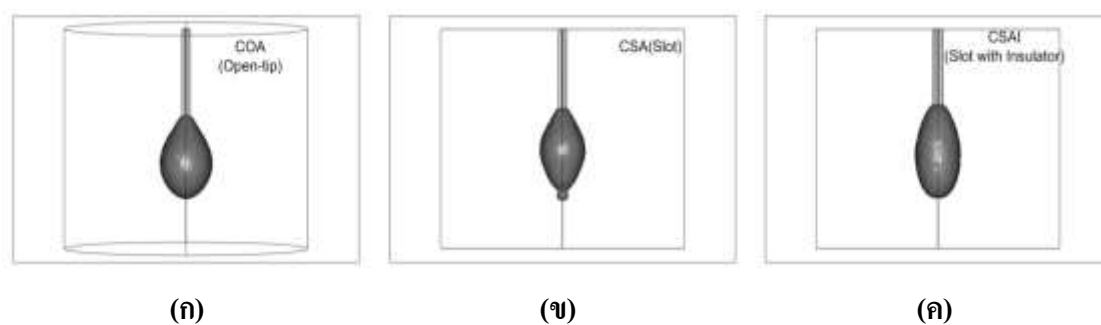
ปลายเปิด สายอากาศแบบสล็อต และสายอากาศแบบสล็อตที่มีฉนวนหุ้ม



รูปที่ 4.13 แสดงขนาดการกระจายอุณหภูมิของการทำลายเซลล์มะเร็งของสายอากาศ

ทั้งสามแบบ ที่ระนาบ yz ที่ตำแหน่ง $x = 0$ (ก) สายอากาศแบบปลายเปิด

(ข) สายอากาศแบบสล็อต (ค) สายอากาศแบบสล็อตที่มีฉนวนหุ้ม



รูปที่ 4.14 แสดงปริมาตรการทำลายเซลล์มะเร็งของสายอากาศทั้งสามแบบในรูปทรง 3 มิติ

(ก) สายอากาศแบบปลายเปิด (ข) สายอากาศแบบสล็อต (ค) สายอากาศแบบสล็อตที่มีฉนวนหุ้ม

ตารางที่ 4.1 สรุปปริมาตรการทำลายเซลล์มะเร็งในเนื้อเยื่อตับของสายอากาศแบบปลายเปิด สายอากาศแบบสล็อต และสายอากาศแบบสล็อตที่มีฉนวนหุ้ม

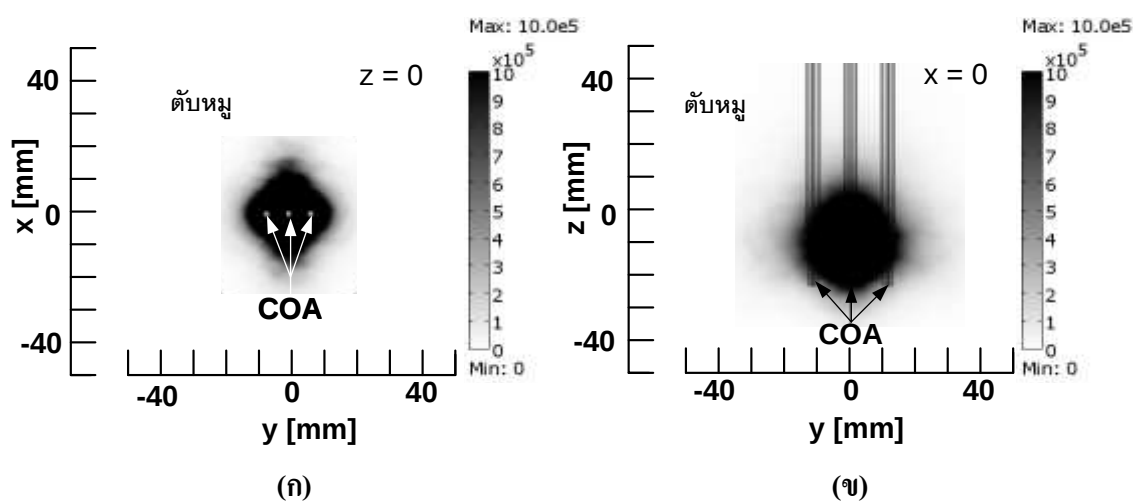
ชนิดของสายอากาศต้นเดี่ยว	ปริมาตรการทำลายเซลล์มะเร็ง (cm ³)
สายอากาศแบบปลายเปิด (COA)	9.7
สายอากาศแบบสล็อต (CSA)	6.8
สายอากาศแบบสล็อตที่มีฉนวนหุ้ม (CSAI)	9.2

ในรูปที่ 4.13 แสดงขนาดการกระจายอุณหภูมิของการทำลายเซลล์มะเร็งของสายอากาศแบบปลายเปิด สายอากาศแบบสล็อต และสายอากาศแบบสล็อตที่มีฉนวนหุ้ม โดยเส้นปะแทนบริเวณอุณหภูมิ ขนาด 50 องศาเซลเซียส ในรูปที่ 4.14 แสดงรูปทรงของเซลล์มะเร็งที่ถูกทำลายในรูปทรง 3 มิติ โดยเขียนคำสั่งให้โปรแกรมทำการคำนวณปริมาตรการทำลายเซลล์มะเร็งที่เนื้อเยื่อตับที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 50 องศาเซลเซียส ปริมาตรการทำลายเซลล์มะเร็งแสดงได้ดังตารางที่ 4.1

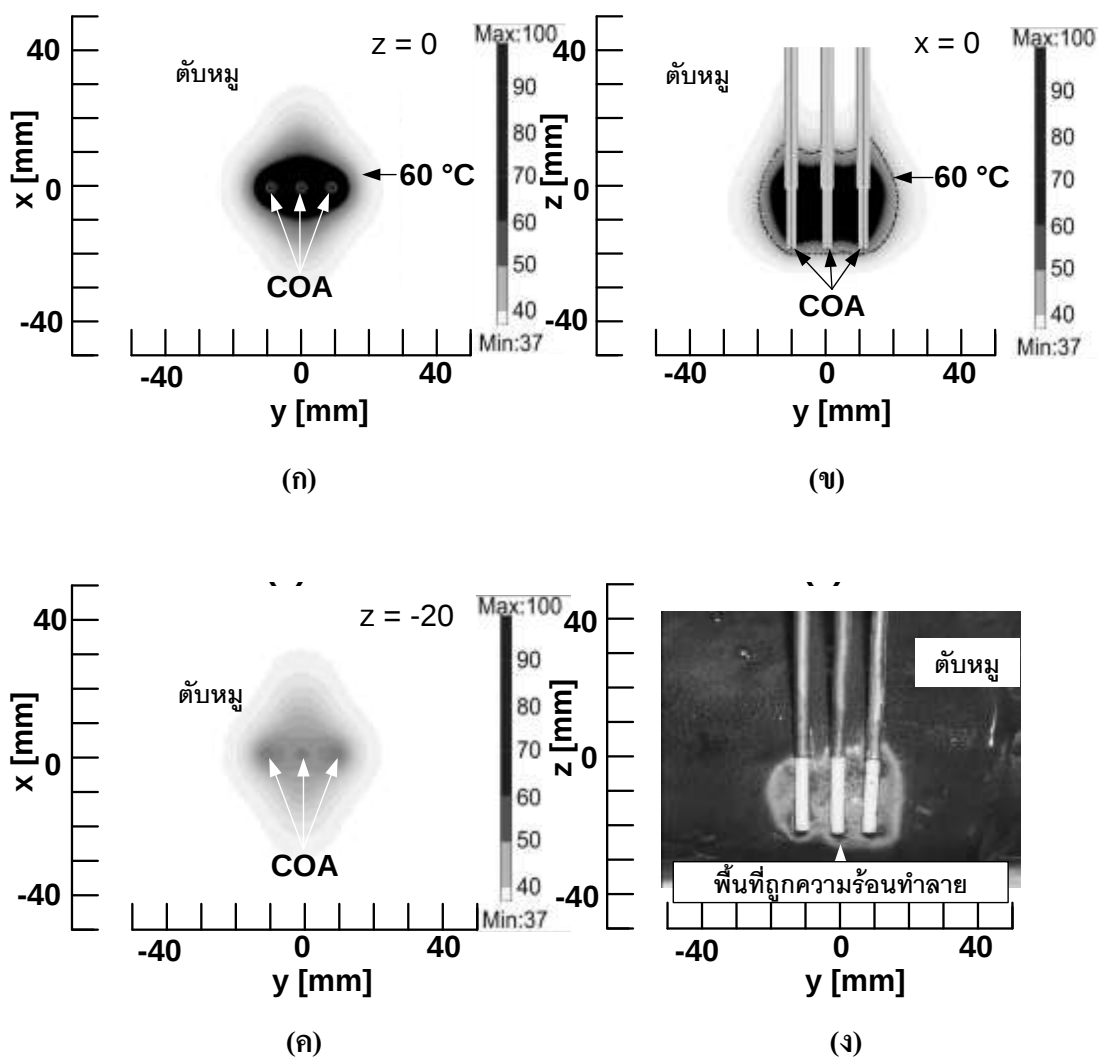
จากรูปทรง 3 มิติของการทำลายเซลล์มะเร็งในเนื้อเยื่อตับ จะเห็นว่าขนาดของการทำลายของสายอากาศแบบปลายเปิดมีรูปทรงเป็นทรงกลมรอบๆ ปลายเปิด และสายอากาศแบบปลายเปิดมีปริมาตรการทำลายสูงสุด สายอากาศแบบสล็อตที่มีฉนวนหุ้มมีปริมาตรการทำลายน้อยกว่าสายอากาศแบบปลายเปิดเล็กน้อย ในขณะที่สายอากาศแบบสล็อตจะมีปริมาตรการทำลายน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศทั้งสามแบบ จากผลการจำลองการทำงานของสายอากาศทั้งสามแบบสามารถทำลายเซลล์มะเร็งในเนื้อเยื่อตับได้ โดยการกระจายความร้อนที่ออกจาก

สายอากาศซึ่งจะเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณส่วนปลายของสายอากาศแบบปลายเปิด และที่ตำแหน่งสลั๊ตของสายอากาศแบบสลั๊ต และสายอากาศแบบสลั๊ตที่มีฉนวนหุ้ม

4.5 เปรียบเทียบผลการจำลองการทำงานด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ กับการทดลองกับเนื้อเยื่อแบบ *In Vitro* ด้วยเทคนิคการทำลายเซลล์มะเร็งแบบใช้สายอากาศหลายต้น



รูปที่ 4.15 ผลการจำลองการกระจาย SAR ในเนื้อเยื่อตับของสายอากาศแบบปลายเปิด 3 ต้น
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 4.16 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิในเนื้อเยื่อตับของสายอากาศแบบปลายเปิด 3 ดัน

ซึ่งจัดวางแบบอาร์เรย์ ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับผลการทดลองกับตับหมู

ที่ความถี่ 2.45 GHz ป้อนกำลังงาน 50 วัตต์ ระยะเวลา 1 นาที (ก) ระนาบ xy ที่ตำแหน่ง z

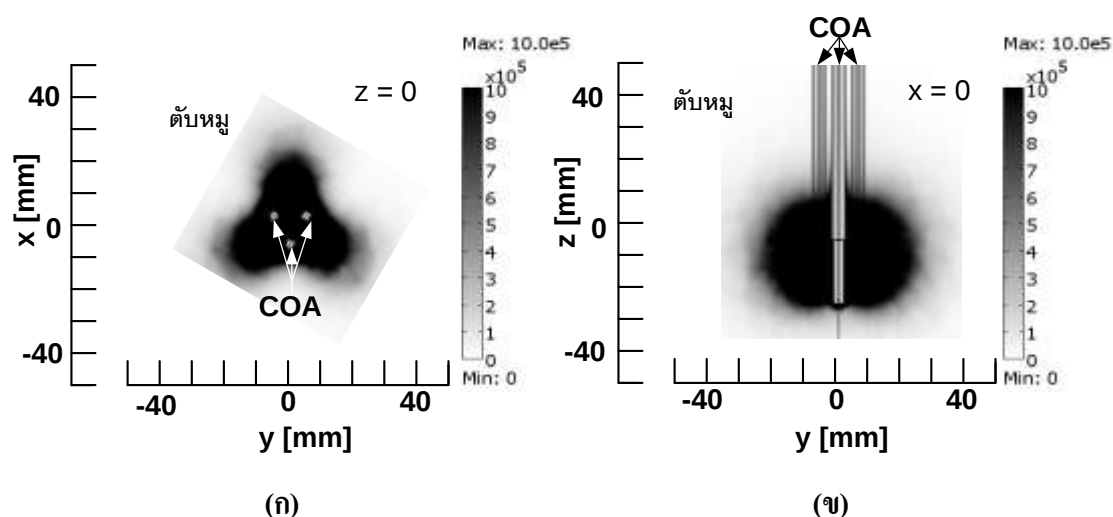
เท่ากับ 0 (ข) ระนาบ yz ที่ตำแหน่ง x เท่ากับ 0 (ค) ระนาบ xy ที่ตำแหน่ง z เท่ากับ -20

(ง) รูปการกระจายของอุณหภูมิ จากการทดลอง

จากรูปที่ 4.15 แสดงการกระจายของ SAR ในเนื้อเยื่อตับของการทำลายเซลล์มะเร็ง โดยใช้สายอากาศแบบปลายเปิด 3 ดัน มาจัดวางแบบอาร์เรย์ จะเห็นได้ว่ามีลักษณะการกระจายของ SAR เหมือนกับการกระจายของสายอากาศแบบปลายเปิดดัดหมู วางซ้อนกัน 3 ดัน ดังแสดงในรูปที่ 4.15 (ก) และการกระจาย SAR ของสายอากาศแบบปลายเปิด 3 ดัน ที่จัดวางแบบอาร์เรย์นี้ยังมีลักษณะการกระจายแบบสมมาตร แสดงในรูปที่ 4.15 (ข)

ในรูปที่ 4.16 แสดงการกระจายของอุณหภูมิในเนื้อเยื่อตับ โดยใช้สายอากาศแบบปลายเปิด 3 ต้น ซึ่งจัดวางแบบอาร์เรย์ การกระจายของอุณหภูมิมีการกระจายออกรอบๆ บริเวณทึบ ของสายอากาศ เช่นเดียวกับสายอากาศแบบปลายเปิดต้นเดียว ผลที่ได้เสมือนกับการเอาสายอากาศแบบปลายเปิดต้นเดียว 3 ต้น มาวางซ้อนกัน ดังรูปที่ 4.16 (ข) รูปแบบของการกระจายของอุณหภูมิมีลักษณะการกระจายแบบสมมาตร เมื่อพิจารณาที่บริเวณรอยต่อของปลายสายอากาศที่มีการปกตัวนูนออก (เป็นตำแหน่งที่มีการกระจายของ SAR และอุณหภูมิสูงสุด) ดังแสดงในรูปที่ 4.16 (ก) และในรูปที่ 4.16 (ค) เป็นการพิจารณาที่ระนาบเดียวกันกับรูปที่ 4.16 (ก) แต่สนใจที่ตำแหน่งปลายของสายอากาศแบบเปิดทั้ง 3 ต้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าระดับของอุณหภูมิลดต่ำลงมาก ในรูปที่ 4.16 (ง) เป็นผลที่ได้จากการทดลองการทำงาน เมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองการทำงานในรูปที่ 4.16 (ข) จะเห็นได้ว่าขนาดของการทำลายเซลล์มะเร็งในเนื้อเยื่อตับมีขนาดใกล้เคียงกัน โดยขนาดการทำลายเซลล์มะเร็งของการทดลองจริงจะมีพื้นที่การทำลายมะเร็งเล็กกว่าประมาณ 2% เมื่อเทียบกับขนาดที่ได้จากการจำลองการทำงาน

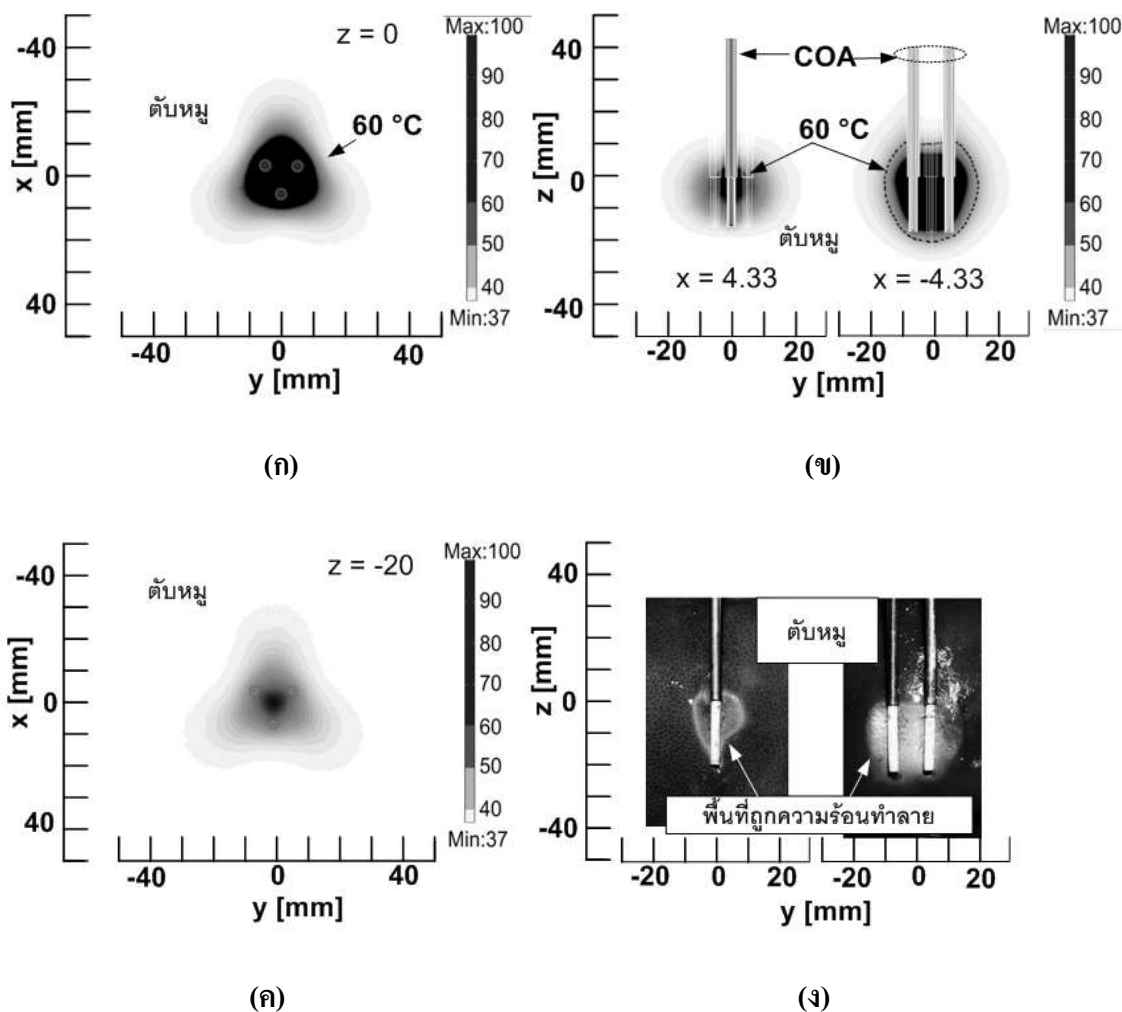
จากการจำลองการทำงานด้วยระเบียบวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถจำลองรูปแบบการทำลายเซลล์มะเร็งในเนื้อเยื่อตับโดยใช้สายอากาศแบบปลายเปิด 3 ต้น ที่จัดวางแบบอาร์เรย์ ได้อย่างสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลองจริงเป็นอย่างมาก



รูปที่ 4.17 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



รูปที่ 4.18 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิในเนื้อเยื่อตับของสายอากาศแบบปลายเปิด 3 ต้น

ซึ่งจัดวางแบบสามเหลี่ยม ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับกรทดลองกับตับหมู
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 4.17 แสดงการกระจายของ SAR ในเนื้อเยื่อตับของการทำลายเซลล์มะเร็งโดยใช้
สายอากาศแบบปลายเปิด 3 ต้น ที่จัดวางแบบสามเหลี่ยม ในรูปที่ 4.17 (ก) พิจารณาการกระจายของ
SAR ในระนาบที่ตำแหน่งบริเวณปลายเปิดของสายอากาศทั้ง 3 ต้น ลักษณะการกระจาย SAR จะ
เกิดขึ้นสูงที่ตำแหน่งกึ่งกลางของสายอากาศ คล้ายกับการจัดวางสายอากาศแบบอาร์เรย์โดยใช้
สายอากาศ 2 ต้น (พิจารณาจากด้านข้างของรูปสามเหลี่ยม) การกระจายของ SAR ในการจัดวาง
สายอากาศแบบคู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของสายอากาศทั้งสองจะมีการกระจายของ SAR ที่สูง

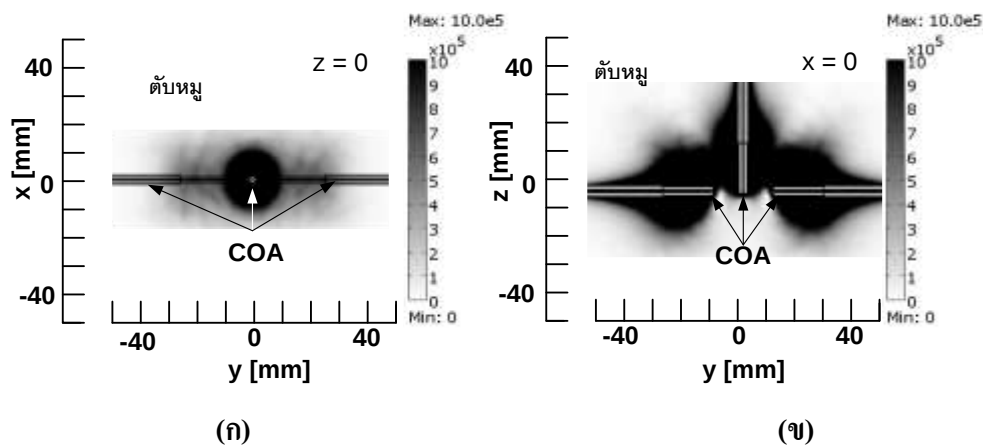
สอดคล้องกับงานวิจัยที่ได้กล่าวไว้แล้วใน [1] และการกระจายของ SAR จะเป็นรูปสามเหลี่ยมโดยมุมของสามเหลี่ยมอยู่กึ่งกลางของสายอากาศแต่ละคู่

ในรูปที่ 4.17 (ข) การกระจายของ SAR ในระนาบที่กึ่งกลางรูปทรงสามเหลี่ยมนั้น รายละเอียดได้อธิบายในรูปการจัดวางสายอากาศในบทที่ 3 โดยการกระจายของ SAR จะออกมารอบๆ ทิปที่เป็นส่วนปลายของสายอากาศแบบปลายเปิด และมีขนาดของการกระจายที่ใหญ่ขึ้นเมื่อเทียบกับการใช้สายอากาศแบบปลายเปิดแบบตันเดียว

ในรูปที่ 4.18 แสดงการกระจายของอุณหภูมิในเนื้อเยื่อตับ โดยใช้สายอากาศแบบปลายเปิด 3 ดัน ซึ่งจัดวางแบบสามเหลี่ยม โดยรูปที่ 4.18 (ก) (ข) และ (ค) เป็นผลการจำลองการทำงานด้วยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ และผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.18 (ง)

ในรูปที่ 4.18 (ก) และรูปที่ 4.18 (ค) แสดงการกระจายของอุณหภูมิในเนื้อเยื่อตับที่ระนาบเดียวกัน โดยเป็นการกระจายอุณหภูมิที่ตำแหน่งจุดต่อกับตัวนำนอก และตำแหน่งของปลายสายอากาศ ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าในรูปที่ 4.18 (ก) การกระจายของอุณหภูมิจะมีการกระจายที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับรูปที่ 4.18 (ค) ซึ่งทั้งสองตำแหน่งจะมีลักษณะการกระจายเป็นรูปทรงสามเหลี่ยม โดยมีมุมของสามเหลี่ยมอยู่กึ่งกลางของสายอากาศแต่ละคู่เช่นเดียวกับผลที่ได้จากการกระจายของ SAR ในรูปที่ 4.17 (ก)

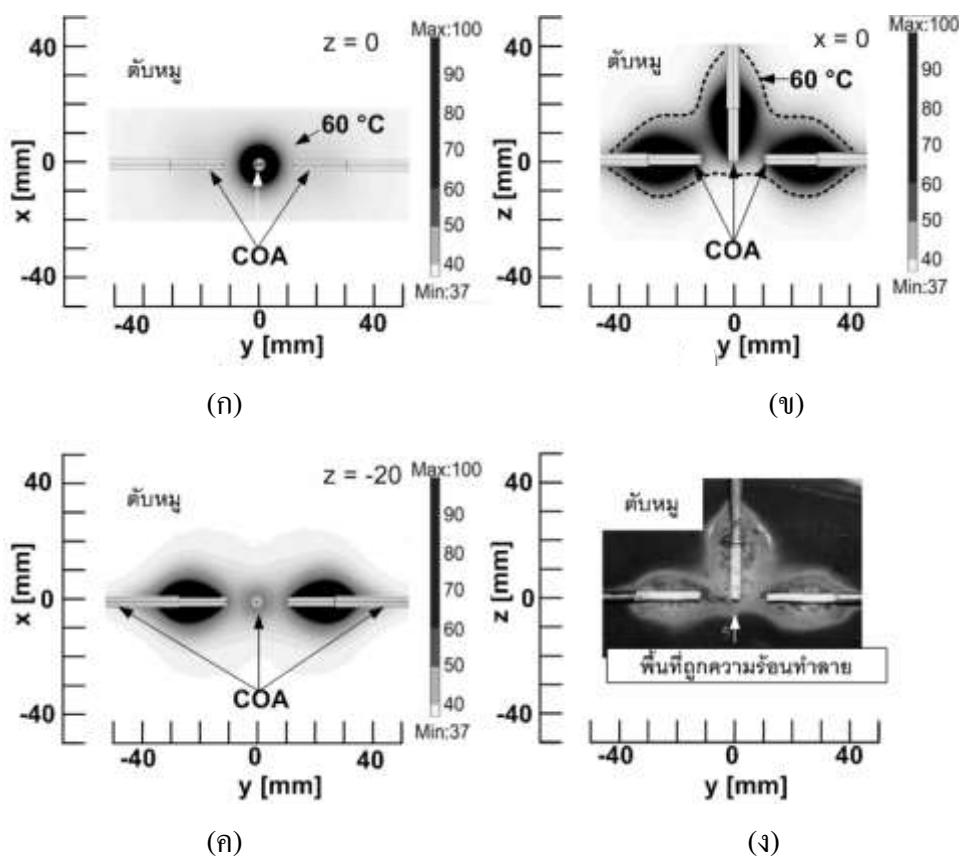
เมื่อเปรียบเทียบผลการจำลองการทำงานในรูปที่ 4.18 (ข) กับผลการทดลองในรูปที่ 4.18 (ง) จะเห็นได้ว่ามีลักษณะใกล้เคียงกัน โดยผลการทดลองจะมีพื้นที่การทำลายมะเร็งในเนื้อเยื่อตับเล็กกว่าผลการจำลองการทำงานอยู่ประมาณ 7% ดังนั้นระเบียบวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถจำลองรูปแบบการทำลายเซลล์มะเร็งในเนื้อเยื่อตับโดยใช้สายอากาศแบบปลายเปิด 3 ดัน ที่จัดวางแบบสามเหลี่ยมได้อย่างสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลองจริง



รูปที่ 4.19 ผลการจำลองการกระจาย SAR ในเนื้อเยื่อระดับของสายอากาศแบบปลายเปิด 3 ชั้น

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



รูปที่ 4.20 ผลการกระจายอุณหภูมิในเนื้อเยื่อระดับของสายอากาศแบบปลายเปิด 3 ชั้น ซึ่งจัดวางแบบรูปตัวที

ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับผลการทดลองกับตัวหมู 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) รูปการกระจายของอุณหภูมิจากการทดลอง

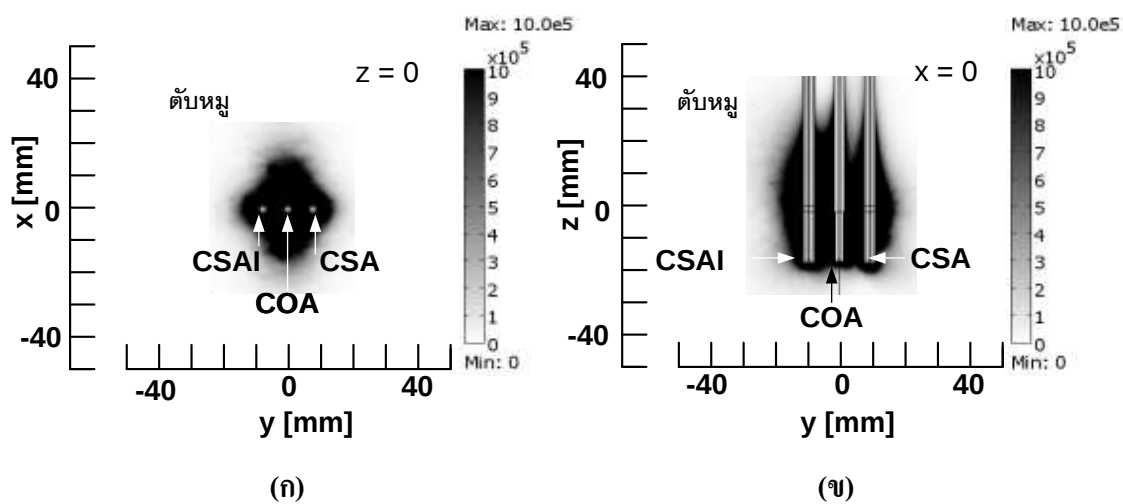
ในรูปที่ 4.19 แสดงการกระจายของ SAR ในเนื้อเยื่อระดับของการทำลายเซลล์มะเร็ง โดยใช้สายอากาศแบบปลายเปิด 3 ดัน ที่จัดวางแบบรูปตัวที รูปที่ 4.19 (ก) พิจารณาจากสายอากาศที่วางทางแนวตั้ง ที่ตำแหน่งรอยต่อจุดทาบ จะเห็นได้ว่าการกระจายของ SAR จะเหมือนกับสายอากาศแบบปลายเปิดตันเดี่ยว และมีความสมมาตรรอบๆ สายอากาศ เมื่อพิจารณารูปที่ 4.19 (ข) การกระจายของ SAR จะเหมือนกับผลที่ได้จากสายอากาศตันเดี่ยว 3 ดัน มาวางซ้อนกัน โดยตำแหน่งที่มีการรวมกันของ SAR จะมีขนาดของการกระจาย SAR ที่เพิ่มสูงขึ้น (โดยมุมที่จัดวางสายอากาศตั้งฉากกัน) ทั้งสายอากาศที่วางตามแนวนอนทั้ง 2 ดัน ดังรูป

จากรูปที่ 4.20 (ก) (ข) และ (ค) เป็นผลการจำลองการกระจายของอุณหภูมิในเนื้อเยื่อ โดยใช้สายอากาศแบบปลายเปิด 3 ดัน ซึ่งจัดวางแบบรูปตัวที ด้วยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ และในรูปที่ 4.20 (ง) เป็นผลที่ได้จากการทดลอง

ในรูปที่ 4.20 (ก) และรูปที่ 4.20 (ค) พิจารณาระนาบที่ตำแหน่งจุดต่อของทาบของสายอากาศที่วางทางแนวตั้ง และด้านล่างทางแนวนอนของการจัดวางสายอากาศในแบบรูปตัวที โดยการกระจายของอุณหภูมิจะเหมือนกับการกระจายอุณหภูมิของสายอากาศแบบปลายเปิดตันเดี่ยว ซึ่งการกระจายอุณหภูมิจะสูงรอบๆ ทาบ จากรูปที่ 4.20 (ข) และรูปที่ 4.20 (ง) จะเห็นได้ว่าผลการจำลองการทำงานกับผลการทดลองมีลักษณะ และขนาดที่ใกล้เคียงกัน โดยผลการทดลองจะมีพื้นที่การทำลายเซลล์มะเร็งในเนื้อเยื่อต่ำกว่าผลการจำลองการทำงานอยู่ประมาณ 2%

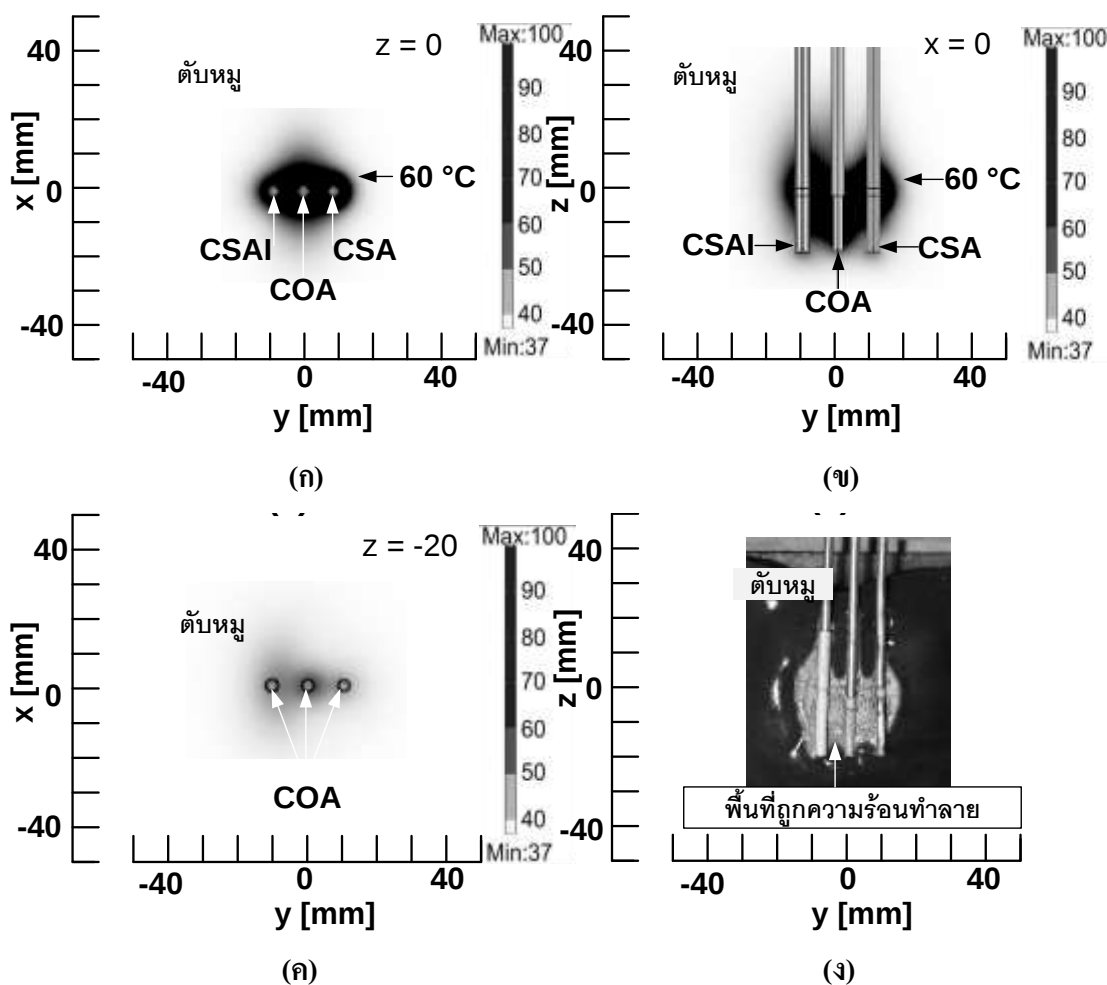
จากผลการจำลองการทำงาน และผลการทดลองของการจัดวางสายอากาศแบบปลายเปิด 3 ดัน ทั้งที่เป็นแบบอาร์เรย์ แบบสามเหลี่ยม และแบบรูป T-Shape ในหัวข้อที่ 4.5 นี้ สามารถนำเอาระเบียบวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์มาจำลองการทำงาน โดยผลการจำลองการทำงานที่ได้มีผลสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลอง ซึ่งเป็นการยืนยันความถูกต้องของผลที่ได้จากวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่นำมาใช้ได้เป็นอย่างดี

4.6 ผลการจำลองการทำงาน และผลการทดลองเทคนิคการเพิ่มขนาดของการทำลายเซลล์มะเร็ง โดยใช้สายอากาศ 3 ต้นแบบผสม (CSAI + COA + CSA)



รูปที่ 4.21 ผลการจำลองการกระจาย SAR ในเนื้อเยื่อตับของสายอากาศ 3 ต้น แบบผสม

(CSAI + COA + CSA) จัดวางแบบอาร์เรย์ ที่ความถี่ 2.45 GHz ป้อนกำลังงาน 50 วัตต์
ระยะเวลา 1 นาที (ก) ระนาบ xy ที่ตำแหน่ง z เท่ากับ 0 (ข) ระนาบ yz ที่ตำแหน่ง
 x เท่ากับ 0



รูปที่ 4.22 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิในเนื้อเยื่อระดับของสายอากาศ 3 ต้น แบบผสม

(CSAI + COA + CSA) ซึ่งจัดวางแบบอาร์เรย์ ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับ

การทดลองกับตับหมู 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

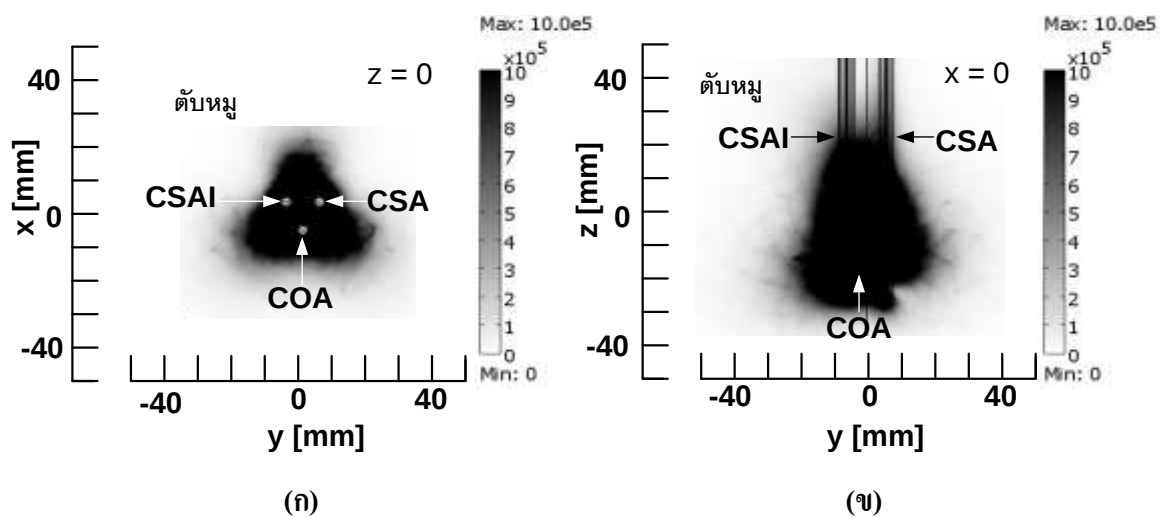
ที่ตำแหน่ง z เท่ากับ -20 (ง) รูปการกระจายของอุณหภูมิจากการทดลอง

รูปที่ 4.21 แสดงการกระจายของปริมาณ SAR ในเนื้อเยื่อระดับของระบบ MWA ที่ใช้เทคนิคในการทำลายเซลล์มะเร็งแบบหลายสายอากาศ และจัดวางสายอากาศแบบอาร์เรย์ โดยวางห่างกันเป็นระยะห่างเท่ากับ 1 เซนติเมตร เมื่อพิจารณาผลการจำลองการทำลายเซลล์มะเร็งที่ใช้สายอากาศแบบผสม (CSAI + COA + CSA) จะเห็นได้ว่าการทำลายจะมีรูปแบบที่ไม่สมมาตร ดังรูปที่ 4.21 (ข) ซึ่งจะแตกต่างกับกรณีที่ใช้สายอากาศแบบเดียวกัน ความหลากหลายของรูปทรงนั้น สอดคล้องกับการทำลายเซลล์มะเร็งที่มีความแตกต่างกันทางรูปร่าง และการใช้งานในบริเวณที่อาจเกิดความเสียหายได้ง่าย เช่น เส้นเลือดใหญ่ หรือบริเวณที่ใกล้กับอวัยวะที่สำคัญ การจัดวางสายอากาศที่มีความ

แตกต่างกันจะแก้ปัญหาในการใช้งานในการทำลายพื้นที่ที่มีขนาดใหญ่ และมีรูปทรงของเซลล์มะเร็งแบบไม่สมมาตร หรือรูปทรงที่แตกต่างกันออกไป

ในการจำลองการทำงานเลือกสายอากาศแบบปลายเปิดไว้กึ่งกลางของการจัดวางสายอากาศแบบอาร์เรย์ โดยในผลการจำลองการทำงานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะเห็นได้ว่าสายอากาศแบบปลายเปิดมีลักษณะการกระจายของความร้อนรอบๆ ปลายเปิดแบบสมมาตร มีลักษณะเป็นทรงกลม ส่วนด้านข้างซ้าย และขวานำเอาสายอากาศแบบสล็อต และสายอากาศแบบสล็อตที่มีฉนวนหุ้มมาวางในระนาบเดียวกัน มีระยะห่างจากสายอากาศแบบปลายเปิดเท่ากับ 1 เซนติเมตร สายอากาศแบบสล็อต และสายอากาศแบบสล็อตที่มีฉนวนหุ้มเป็นสายอากาศที่มีโครงสร้างเหมือนกัน ตำแหน่งของการเกิดความร้อน และการกระจายของ SAR มีลักษณะที่เหมือนกัน แต่สายอากาศทั้งสองจะมีความแตกต่างในส่วนของคุณค่า VSWR โดยสายอากาศแบบสล็อตที่มีฉนวนหุ้มมีค่าของ VSWR ที่ดีกว่าสายอากาศแบบสล็อต ผลจากการจำลองจะเห็นได้ว่าแนวโน้มของการกระจายของ SAR และอุณหภูมิมีการกระจายความร้อนจากสายอากาศตรงกลาง (ปลายเปิด) ไปยังสายอากาศที่มีค่า VSWR ที่ต่ำกว่าทั้งสองข้าง ผลจากค่า VSWR ที่แตกต่างกันนี้เองทำให้รูปแบบของการกระจายของ SAR และอุณหภูมิกระจายเป็นแบบไม่สมมาตร ดังนั้นแพทย์ที่ทำการรักษาเมื่อทราบรูปแบบของเซลล์มะเร็งที่ต้องการทำลายแล้ว ก็จะต้องเลือกวางตำแหน่งของสายอากาศว่าจะให้มีการกระจายของความร้อนไปในทิศทางใด โดยเลือกสายอากาศที่มีค่า VSWR ต่ำ ในพื้นที่ที่ต้องการให้เกิดความร้อนสูง ส่วนบริเวณที่ไม่ต้องการให้เกิดความร้อนสูง ควรเลือกเอาสายอากาศที่มีค่า VSWR ที่สูงกว่า

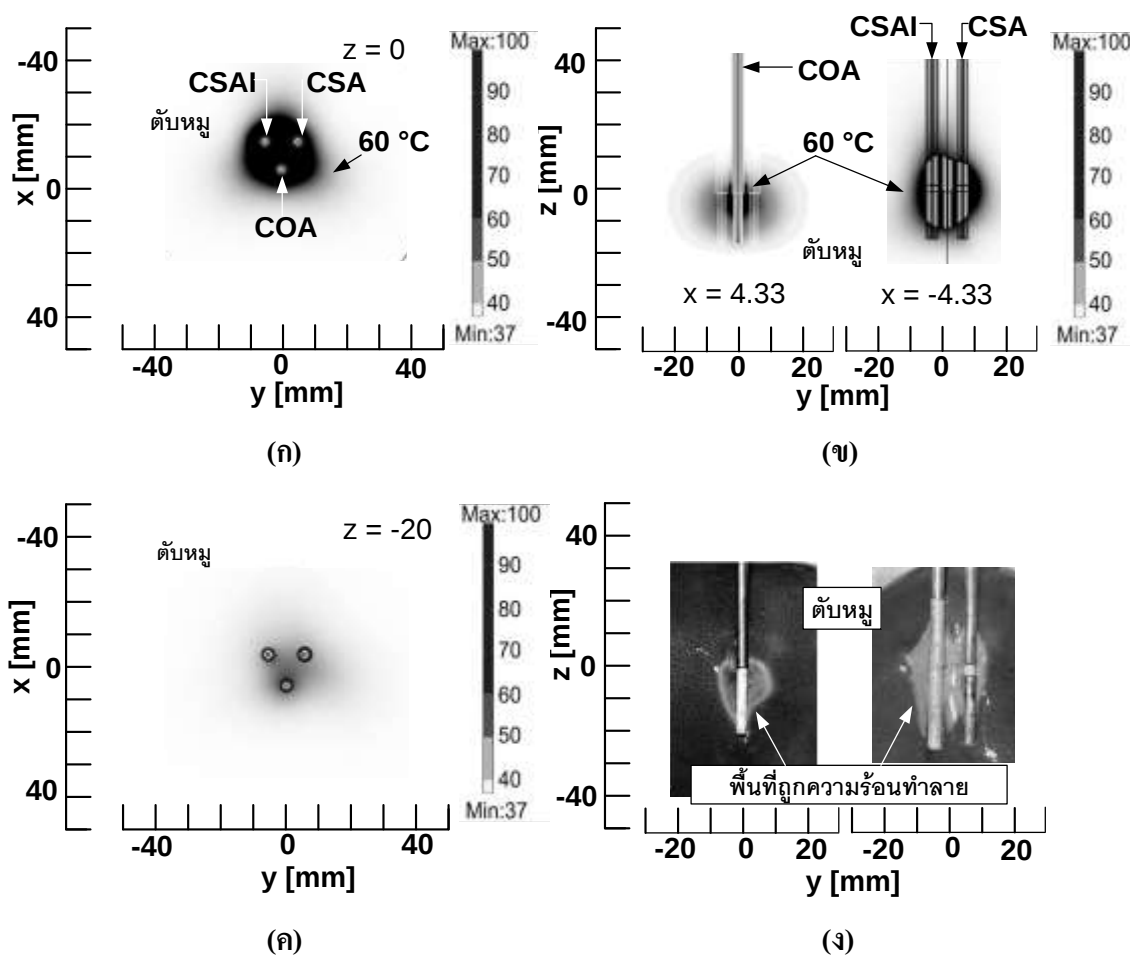
ในรูปที่ 4.22 (ข) และรูปที่ 4.22 (ง) เป็นผลที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ และผลการทดลองการทำงานตามลำดับ จะเห็นได้ว่าขนาดของการทำลายเซลล์มะเร็งในเนื้อเยื่อตับของรูปทั้งสองมีขนาด และรูปทรงใกล้เคียงกัน โดยพื้นที่ของการทำลายเซลล์มะเร็งของการทดลองจริงมีขนาดเล็กกว่าผลที่ได้จากการจำลองการทำงานอยู่ประมาณ 3.5%



รูปที่ 4.23 ผลการจำลองการกระจาย SAR ในเนื้อเยื่อตับของสายอากาศ 3 ดัน แบบผสม

(CSAI + COA + CSA) จัดวางแบบสามเหลี่ยมที่ความถี่ 2.45 GHz ป้อนกำลังงาน

50 วัตต์ ระยะเวลา 1 นาที (ก) ระนาบ xy ที่ตำแหน่ง z เท่ากับ 0 (ข) ระนาบ yz ที่ตำแหน่ง x เท่ากับ 0



รูปที่ 4.24 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิในเนื้อเยื่อตับของสายอากาศ 3 ต้น แบบผสม

(CSAI + COA + CSA) ซึ่งจัดวางแบบสามเหลี่ยม ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับ

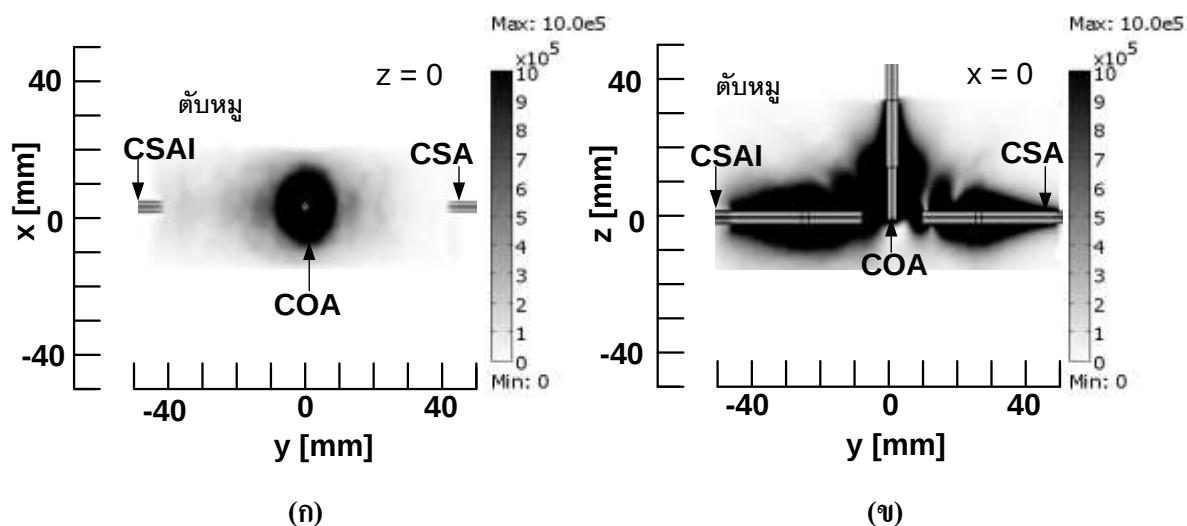
การทดลองกับตับหมูที่ความถี่ 2.45 GHz ป้อนกำลังงาน 50 วัตต์ ระยะเวลา 1 นาที

(ก) ระนาบ xy ที่ตำแหน่ง z เท่ากับ 0 (ข) ระนาบ yz ที่ตำแหน่ง x เท่ากับ 0 (ค) ระนาบ xy

ที่ตำแหน่ง z เท่ากับ -20 (ง) รูปการกระจายของอุณหภูมิ จากการทดลอง

ในรูปที่ 4.23 และ 4.24 แสดงการกระจายของปริมาณ SAR และการกระจายอุณหภูมิในเนื้อเยื่อตับของระบบ MWA ที่ใช้เทคนิคในการทำลายแบบหลายสายอากาศ มีการจัดวางสายอากาศแบบสามเหลี่ยม โดยสายอากาศแต่ละต้นจะวางห่างกัน 1 เซนติเมตร โดยทำการพิจารณาการทำลายเซลล์มะเร็งที่ใช้สายอากาศแบบผสม (CSAI + COA + CSA) ผลที่ได้จะเห็นได้ว่าการทำลายจะมีรูปแบบที่ไม่สมมาตร ซึ่งแตกต่างกับกรณีที่ใช้สายอากาศแบบเดียวกัน 3 ต้น ความหลากหลายของรูปทรงของการทำลายนั้น สอดคล้องกับลักษณะรูปทรงของเซลล์มะเร็งที่มีความแตกต่างกัน และในการใช้งานในบริเวณที่อาจเกิดความเสียหายได้ง่าย เช่น เส้นเลือดใหญ่ หรือบริเวณที่ใกล้กับ

อวัยวะที่สำคัญ เทคนิคการจัดวางสายอากาศแบบสามเหลี่ยมโดยใช้สายอากาศแบบผสมจึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการแก้ปัญหการทำลายเซลล์มะเร็งที่มีพื้นที่ที่ต้องการทำลายที่มีขนาดใหญ่ และมีรูปทรงของเซลล์มะเร็งแบบไม่สมมาตร เช่นเดียวกับการทำลายเซลล์มะเร็งโดยการจัดวางสายอากาศแบบอาร์เรย์

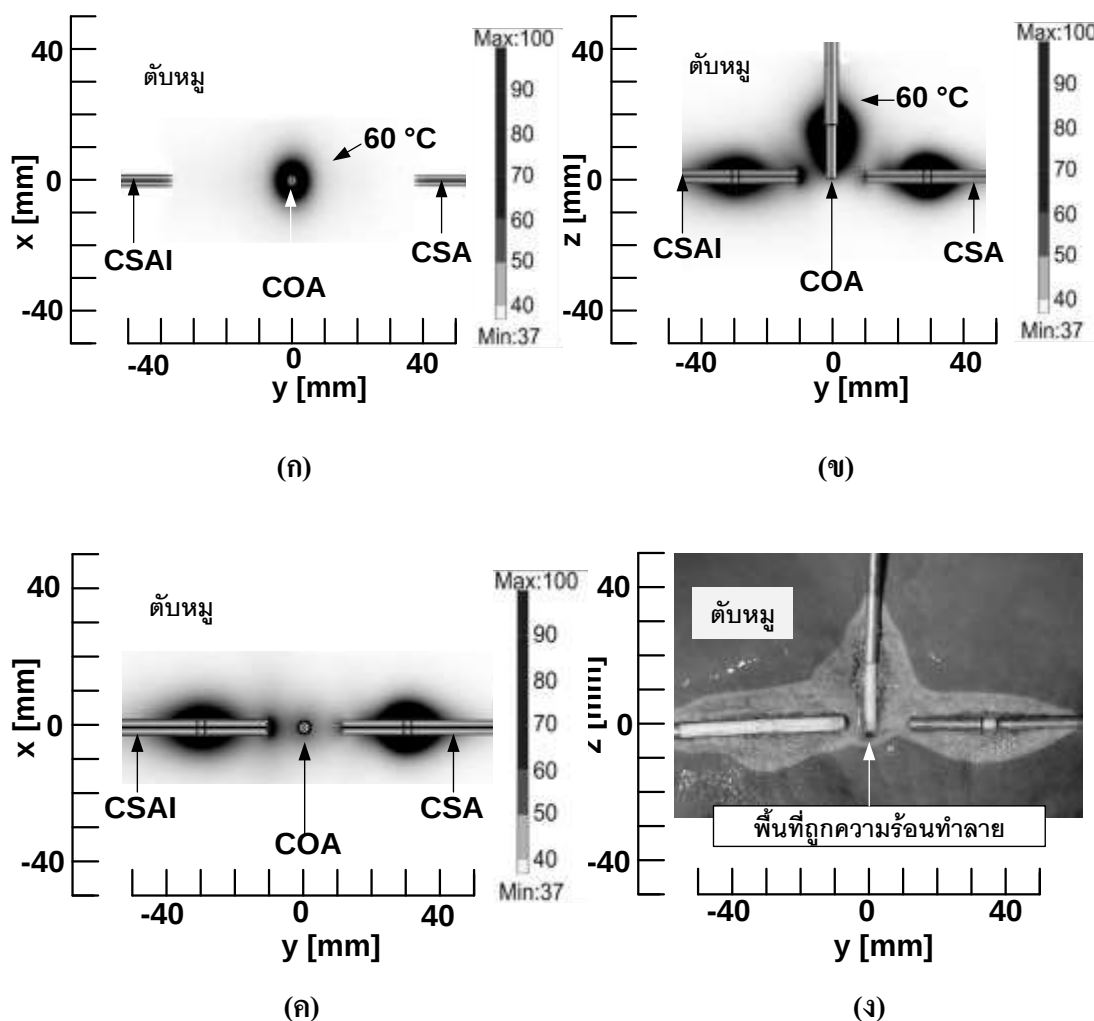


รูปที่ 4.25 ผลการจำลองการกระจาย SAR ในเนื้อเยื่อตับของสายอากาศ 3 ดัน แบบผสม

(CSAI + COA + CSA) จัดวางแบบรูปตัวที ที่ความถี่ 2.45 GHz ป้อนกำลังงาน

50 วัตต์ ระยะเวลา 1 นาที (ก) ระนาบ xy ที่ตำแหน่ง z เท่ากับ 0 (ข) ระนาบ yz ที่ตำแหน่ง

x เท่ากับ 0



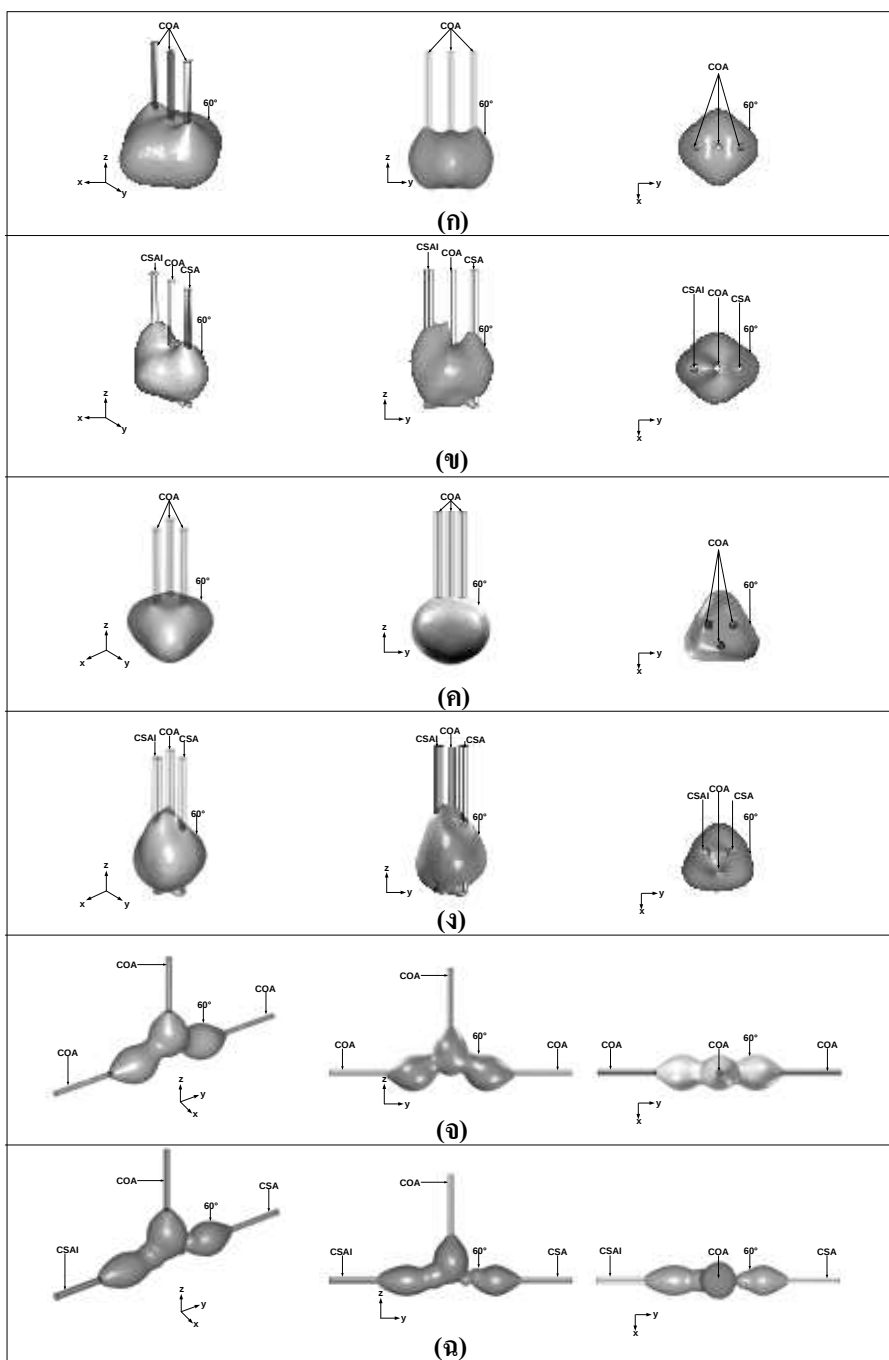
รูปที่ 4.26 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิในเนื้อเยื่อระดับของสายอากาศ 3 ต้น แบบผสม (CSAI + COA + CSA) ซึ่งจัดวางแบบรูปตัวที ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับ การทดลองกับตับหมู ที่ความถี่ 2.45 GHz ป้อนกำลังงาน 50 วัตต์ ระยะเวลา 1 นาที (ก) ระบาย xy ที่ตำแหน่ง z เท่ากับ 0 (ข) ระบาย yz ที่ตำแหน่ง x เท่ากับ 0 (ค) ระบาย xy ที่ตำแหน่ง z เท่ากับ -20 (ง) รูปการกระจายของอุณหภูมิ จากการทดลอง

รูปที่ 4.25 แสดงการกระจายของปริมาณ SAR ในเนื้อเยื่อระดับของระบบ MWA ที่ใช้เทคนิคในการทำลายแบบหลายสายอากาศ และใช้การจัดวางสายอากาศแบบรูปตัวที โดยพิจารณาการทำลายเซลล์มะเร็งที่ใช้สายอากาศแบบผสม (CSAI + COA + CSA) จากรูปได้วางสายอากาศแบบปลายเปิดตั้งขึ้นในแนวตั้ง วางสายอากาศแบบสล็อต และสายอากาศแบบสล็อตที่มีฉนวนหุ้มให้ห่างจากสายอากาศแบบปลายเปิดเท่ากับ 1 เซนติเมตรในแนวนอนทางขวา และซ้ายตามลำดับ จากผลการจำลองจะเห็นได้ว่าการทำลายจะมีรูปแบบที่ไม่สมมาตร เช่นเดียวกับจัดวางสายอากาศแบบ

อาร์เรย์ และการจัดวางแบบสามเหลี่ยมที่ใช้สายอากาศแบบผสม เทคนิคการจัดวางสายอากาศแบบรูปตัวทีโดยใช้สายอากาศแบบผสมก็เป็นทางเลือกหนึ่งในการทำลายเซลล์มะเร็งที่มีขนาดใหญ่ และมีรูปทรงแบบไม่สมมาตร

จากรูปที่ 4.26 (ก) (ข) และ (ค) เป็นผลการจำลองการกระจายของอุณหภูมิในเนื้อเยื่อตับ โดยใช้สายอากาศแบบแบบผสม 3 ดัน ($CSAI + COA + CSA$) ซึ่งจัดวางแบบรูปตัวที ด้วยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ และในรูปที่ 4.26 (ง) เป็นผลที่ได้จากการทดลอง

ในรูปที่ 4.26 (ก) พิจารณาระนาบที่ตำแหน่งจุดต่อของตัวนำนอกกับส่วนปลายเปิดของสายอากาศแบบปลายเปิดที่วางในแนวตั้ง มีการกระจายอุณหภูมิเช่นเดียวกับสายอากาศแบบปลายเปิดต้นเดียว ซึ่งการกระจายอุณหภูมิจะสูงรอบๆ จุดเชื่อมต่อของตัวนำนอกกับส่วนปลายเปิด และรูปที่ 4.26 (ค) พิจารณาด้านล่างในแนวนอนที่เป็นตำแหน่งของสล็อตของสายอากาศแบบสล็อตที่มีฉนวนหุ้ม และสายอากาศแบบสล็อต การกระจายของอุณหภูมิจะเหมือนกับการกระจายอุณหภูมิของสายอากาศแบบสล็อตที่มีฉนวนหุ้ม และสายอากาศแบบสล็อตต้นเดียว เมื่อพิจารณาในรูปที่ 4.26 (ข) ผลจากการจำลองจะเห็นได้ว่าแนวโน้มของอุณหภูมิมีการกระจายความร้อนจากสายอากาศแบบปลายเปิดในแนวตั้ง ไปยังสายอากาศที่มีค่า VSWR ที่ต่ำกว่าในแนวนอนทั้งสองข้าง ผลจากค่า VSWR ที่แตกต่างกันนี้เองทำให้รูปแบบของการกระจายของ SAR และอุณหภูมิกระจายเป็นแบบไม่สมมาตร จากรูปที่ 4.26 (ข) และรูปที่ 4.26 (ง) จะเห็นได้ว่าวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ให้ผลการจำลองการทำลายเซลล์มะเร็งมีขนาดที่ใกล้เคียงกับผลการทดลอง โดยผลการทดลองจะมีพื้นที่การทำลายเซลล์มะเร็งในเนื้อเยื่อตับเล็กกว่าผลการจำลองการทำงานอยู่ประมาณ 2.7%



รูปที่ 4.27 แสดงขนาดของการทำลายมะเร็งแสดงในรูป 3 มิติ ของสายอากาศ

- (ก) สายอากาศทั้งสามเป็นสายอากาศแบบปลายเปิดจัดวางแบบอาร์เรย์
- (ข) สายอากาศแบบผสม (CSAI + COA + CSA) จัดวางแบบอาร์เรย์
- (ค) สายอากาศทั้งสามเป็นสายอากาศแบบปลายเปิดจัดวางสายอากาศแบบสามเหลี่ยม
- (ง) สายอากาศแบบผสม (CSAI + COA + CSA) จัดวางสายอากาศแบบสามเหลี่ยม
- (จ) สายอากาศทั้งสามเป็นสายอากาศแบบปลายเปิดจัดวางสายอากาศแบบรูปตัวที
- (ฉ) สายอากาศแบบผสม (CSAI + COA + CSA) จัดวางสายอากาศแบบรูปตัวที

ในรูปที่ 4.27 แสดงการจำลองการทำลายเซลล์มะเร็งในรูปทรง 3 มิติ โดยใช้สายอากาศแบบปลายเปิดทั้ง 3 ด้าน และใช้สายอากาศแบบผสม (CSAI + COA + CSA) มาจัดวางแบบอาร์เรย์ แบบสามเหลี่ยม และแบบรูปตัวที พิจารณาในรูปที่ 4.27 (ก) เป็นการจัดวางสายอากาศแบบอาร์เรย์ของสายอากาศแบบปลายเปิดทั้ง 3 ด้าน จะเห็นได้ว่าขนาดการทำลายเซลล์มะเร็งมีลักษณะสมมาตร ส่วนในรูปที่ 4.27 (ข) ซึ่งเป็นการจัดวางสายอากาศแบบอาร์เรย์เช่นเดียวกับรูปที่ 4.27 (ก) แต่ใช้สายอากาศแบบผสม (CSAI + COA + CSA) ลักษณะของขนาดการทำลายเซลล์มะเร็งในรูปทรง 3 มิติ (พิจารณารูปที่ 4.27 (ข) ตรงกลาง) จะเห็นได้ว่าขนาดการทำลายจะไม่สมมาตร โดยรูปทรงขนาดของการทำลายเซลล์มะเร็งของด้านที่เป็นสายอากาศแบบสล็อตที่มีฉนวนหุ้ม (CSAI) ซึ่งมีค่า VSWR ต่ำ จะมีขนาดการทำลายที่ใหญ่กว่าด้านที่เป็นสายอากาศแบบสล็อต (CSA) ซึ่งมีค่า VSWR สูงกว่า เช่นเดียวกันกับในรูปที่ 4.27 (ค) (ง) และรูปที่ 4.27 (จ) (ฉ) เป็นการจัดวางสายอากาศแบบสามเหลี่ยม และแบบรูปตัวที ของสายอากาศแบบปลายเปิดทั้ง 3 ด้าน และสายอากาศแบบผสมตามลำดับ โดยลักษณะของขนาดการทำลายเซลล์มะเร็งที่ใช้สายอากาศแบบปลายเปิดทั้ง 3 ด้าน จะมีรูปทรงที่สมมาตรทั้งที่เป็นการจัดวางสายอากาศแบบสามเหลี่ยม และแบบรูปตัวที ในขณะที่ใช้สายอากาศแบบผสมลักษณะของการทำลายจะมีรูปทรงที่ไม่สมมาตร

จากตารางที่ 4.2 แสดงความกว้าง ความยาว ความหนา และปริมาตร ในการจำลองการทำลายเซลล์มะเร็งที่ได้จากวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ จะเห็นได้ว่าสายอากาศแบบปลายเปิดที่จัดวางแบบอาร์เรย์จะมีความหนาของการทำลายเซลล์มะเร็งมากกว่าแบบอื่นๆ และการจัดวางสายอากาศแบบรูปตัวทีจะมีความกว้าง และความยาวของการทำลายมากที่สุด ส่วนการจัดวางแบบสามเหลี่ยมจะมีความกว้าง ความยาว และความหนาที่ใกล้เคียงกัน ผลที่ออกมาจึงมีลักษณะเป็นทรงกลมมากกว่าการจัดวางแบบอื่นๆ พิจารณาปริมาตรของการทำลายเซลล์มะเร็งจะเห็นได้ว่าการจัดวางสายอากาศแบบรูปตัวทีมีปริมาตรการทำลายสูงกว่าการจัดวางสายอากาศแบบอาร์เรย์ และแบบสามเหลี่ยม ทั้งที่ใช้สายอากาศแบบปลายเปิดทั้ง 3 ด้าน และใช้สายอากาศแบบผสม ในขณะที่การจัดวางสายอากาศแบบสามเหลี่ยมจะให้ปริมาตรของการทำลายเซลล์มะเร็งน้อยที่สุดทั้งที่ใช้สายอากาศแบบปลายเปิดทั้ง 3 ด้าน และใช้สายอากาศแบบผสม

ตารางที่ 4.2 แสดงขนาดของการทำลายเซลล์มะเร็งในเนื้อเยื่อตับ และปริมาตรการทำลายของการ
จัดวางสายอากาศ 3 แบบ (แบบอาร์เรย์, แบบสามเหลี่ยม และแบบรูปตัวที)
ของสายอากาศแบบปลายเปิดทั้ง 3 ด้าน และสายอากาศแบบผสม (CSAI + COA + CSA)

ลักษณะการจัดวางสายอากาศ	กว้าง (มม.)	ยาว (มม.)	หนา (มม.)	ปริมาตร (ลบ.ซม.)	เวลาในการ คำนวณ (วินาที)
สายอากาศแบบปลายเปิด (COA) จัดวาง แบบ Array	34	41	33	26.8	10,189
สายอากาศแบบปลายเปิด (COA) จัดวาง แบบ Triangular	29	30	32	19.4	12,189
สายอากาศแบบปลายเปิด (COA) จัดวาง แบบ T-Shape	45	80	31	30.2	19,313
สายอากาศแบบผสม (CSAI+COA+CSA) จัดวางแบบ Array	30	43	34	24.4	15,240
สายอากาศแบบผสม (CSAI+COA+CSA) จัดวางแบบ Triangular	28	33	30	17.2	18,152
สายอากาศแบบผสม (CSAI+COA+CSA) จัดวางแบบ T-Shape	41	79	29	29.5	22,352

ตารางที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบขนาดและพื้นที่การทำลายเซลล์มะเร็งจากผลการจำลองด้วยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ เทียบกับผลจากการทดลองโดยใช้สายอากาศแบบปลายเปิด (COA)

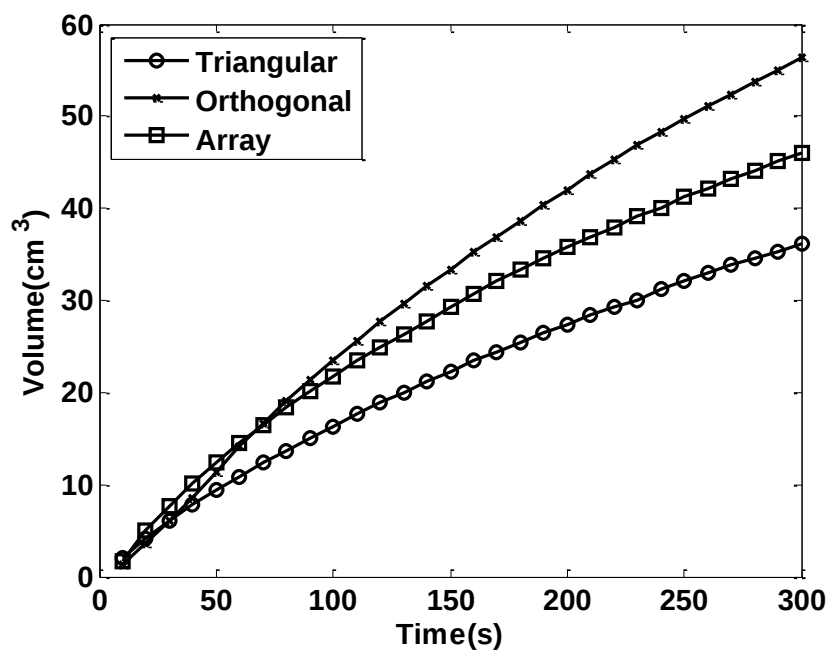
ลักษณะการจัดวาง สายอากาศ		ผลการจำลอง FEM			ผลการทดลองในดับหมู		
		กว้าง (มม.)	ยาว (มม.)	พื้นที่ การ ทำลาย (cm ²)	กว้าง (มม.)	ยาว (มม.)	พื้นที่ การ ทำลาย (cm ²)
Array		34	41	13.94	30.1±0.9	39.0±0.8	11.74
Triangular	Front	21	20	4.2	20.1±0.7	18.2±0.8	3.64
	Back	29	30	8.7	27.4±0.6	29.4±0.9	8.05
T-Shape		45	80	21	43.7±0.8	79.1±0.7	20.54

จากตารางที่ 4.3 เป็นการเปรียบเทียบขนาดการทำลายเซลล์มะเร็งจากผลการจำลองการทำงานด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ และการทดลองจริงในดับหมู จะเห็นได้ว่าพื้นที่ของการทำลายของการทดลองจริงจะมีขนาดเล็กกว่าผลที่ได้จากการจำลองประมาณ 2.7% – 11% โดยสายอากาศแบบปลายเปิดที่จัดวางแบบอาร์เรย์มีค่าความผิดพลาดมากที่สุด และการจัดวางสายอากาศแบบรูปตัวที่มีขนาดของการทำลายเซลล์มะเร็งจากการจำลองและผลการทดลองแตกต่างกันน้อยที่สุด

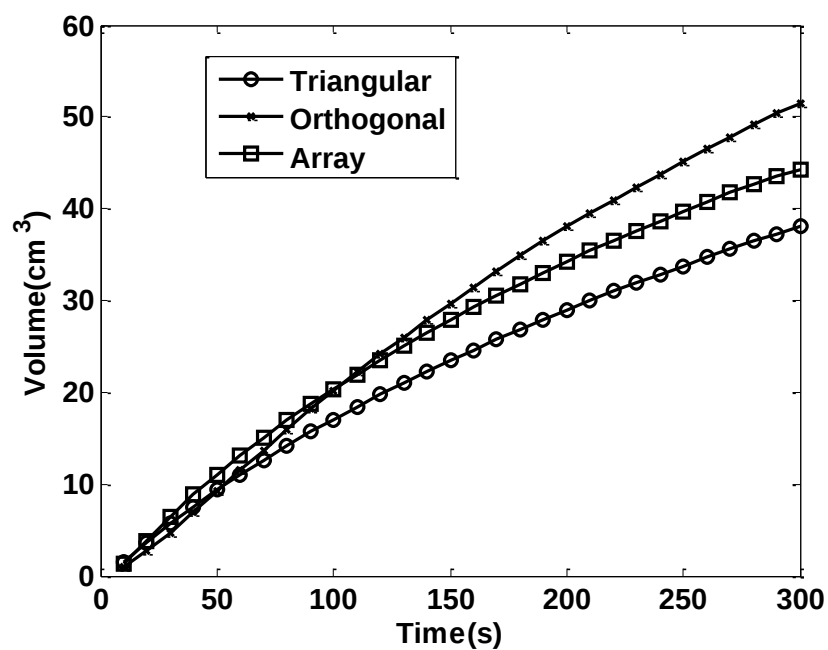
ตารางที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบขนาดและพื้นที่การทำลายเซลล์มะเร็งจากผลการจำลองด้วย
วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ เทียบกับผลจากการทดลองโดยใช้สายอากาศแบบผสม
(COA+CSA+CSAI)

ลักษณะการจัดวางสายอากาศ		ผลการจำลอง FEM			ผลการทดลองในตั๊กหมู		
		กว้าง (มม.)	ยาว (มม.)	พื้นที่ การ ทำลาย (cm^2)	กว้าง (มม.)	ยาว (มม.)	พื้นที่ การ ทำลาย (cm^2)
Array		30	43	12.94	28.4±0.7	39.0±0.7	11.00
Triangular	Front	19	19	3.60	18.1±0.8	18.2±0.6	3.27
	Back	28	33	9.24	26.4±0.8	28.4±0.7	7.50
T-Shape		41	79	32.39	40.2±0.6	78.3±0.6	31.32

จากตารางที่ 4.4 เป็นการเปรียบเทียบขนาดการทำลายเซลล์มะเร็ง จากผลการจำลองการทำงานด้วยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ และการทดลองจริงในตั๊กหมู จะเห็นได้ว่าพื้นที่ของการทำลายมะเร็งของการทดลองจริงจะมีขนาดเล็กกว่าผลที่ได้จากการจำลองประมาณ 2% - 9% โดยสายอากาศแบบผสมที่จัดวางแบบอาร์เรย์มีค่าความผิดพลาดมากที่สุด เช่นเดียวกับสายอากาศแบบปลายเปิด และการจัดวางสายอากาศแบบรูปตัวที่มีขนาดของการทำลายเซลล์มะเร็งจากการจำลองและผลการทดลองแตกต่างกันน้อยที่สุด



รูปที่ 4.28 กราฟปริมาตรการทำลายมะเร็งที่ดับเทียบกับเวลาของสายอากาศแบบ COA



รูปที่ 4.29 กราฟปริมาตรการทำลายมะเร็งที่ดับเทียบกับเวลาของสายอากาศแบบผสม

รูปที่ 4.28 แสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของขนาดของการทำลายมะเร็ง ที่ใช้เทคนิคในการวางแบบขนานกัน Array ทำมุม 60 องศาเป็นรูปสามเหลี่ยม (Triangular) และวางแบบ T-Shape (ก) สายอากาศทั้ง 3 ชุดเป็นสายอากาศแบบ COA และในรูป 4.29 สายอากาศทั้ง 3 ชุด ประกอบด้วยสายอากาศแบบ COA CSA และ CSAI

ในการจัดวางสายอากาศแบบ T-Shape จะให้ปริมาตรในการทำลายเซลล์มะเร็งสูงที่สุด โดยความแตกต่างของปริมาตรของการจัดวางสายอากาศแบบ T-Shape และแบบ Array จะเริ่มแตกต่างกันอย่างชัดเจนตั้งแต่เวลาประมาณ 100 วินาที เป็นต้นไป ในกรณีสายอากาศแบบ Open-tip และสายอากาศแบบผสมจะแตกต่างกันที่เวลาประมาณ 140 วินาที เป็นต้นไป ส่วนการจัดวางแบบ Triangular เริ่มมีขนาดของปริมาตรที่แตกต่าง ในเวลาประมาณ 50 วินาที เป็นต้นไป