

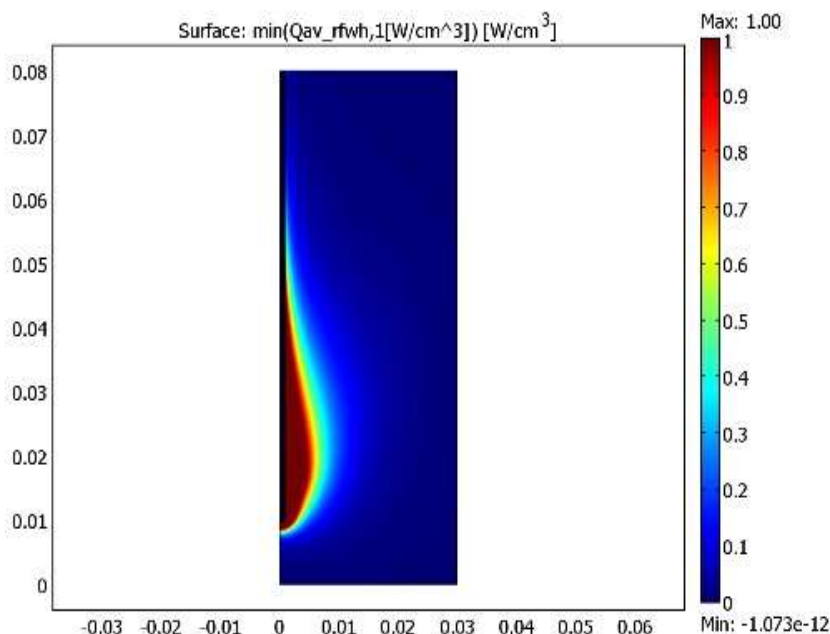
## บทที่ 4

### ผลการจำลองการทำงานและผลการทดลอง

บทนี้จะกล่าวถึงผลการจำลองด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งเป็นการจำลองการกระจายความร้อนของคลื่นไมโครเวฟความถี่ 2.45 GHz กำหนดค่าพลังงานเท่ากับ 50 วัตต์ ระยะเวลา 5 นาที เพื่อหาจุดที่เหมาะสมสำหรับการวัดอุณหภูมิของระบบ การทดลองหาค่ากำลังงานของเครื่องกำเนิดคลื่นไมโครเวฟเพื่อที่จะควบคุมกำลังงานของระบบให้ไม่เกิดความเสียหายของเนื้อเยื่อ ผลการทดลองด้วยไขขาวเพื่อคุณลักษณะการทำลายแบบ 3 มิติ และการทดลองในเนื้อเยื่อตับหมูทั้งระบบที่มีการป้องกันความเสียหายและไม่มีการป้องกันความเสียหาย ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 4.1 การจำลองด้วยคอมพิวเตอร์

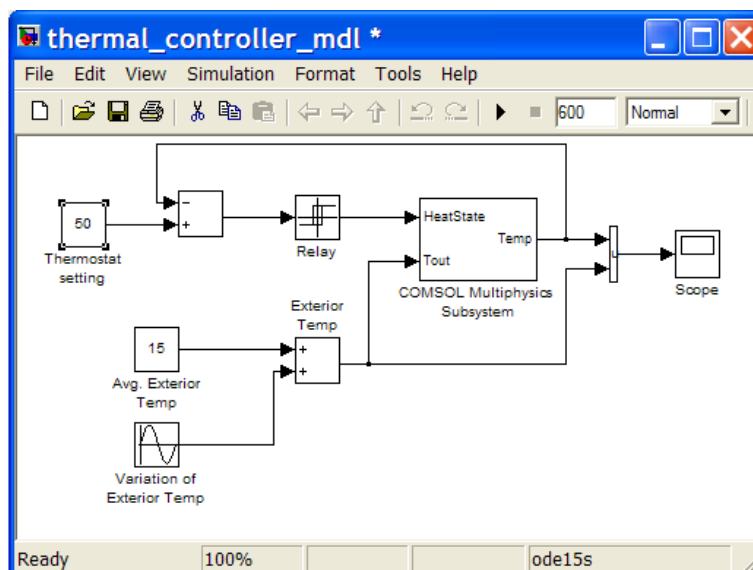
จากการกำหนดจุดตรวจรับอุณหภูมิความร้อน โดยทางผู้วิจัยกำหนดจุดตรวจรับอุณหภูมิความร้อนห่างจากเสาอากาศ 1 เซนติเมตร เมื่อจุดตรวจอุณหภูมิได้รับความร้อนก็จะส่งค่าไปยังชุดควบคุมอุณหภูมิและเวลา ในการทดลองนี้ใช้โปรแกรม Matlab เป็นตัวรับประมวลผล โดยติดต่อกับโปรแกรม Comsol ผ่าน Simulink ในการจำลองการทำงาน เราจะวิเคราะห์แบบหลายฟิสิกส์ ซึ่งประกอบด้วยวิเคราะห์ฟิสิกส์ 2 ส่วน คือ Electromagnetic Waves และ Heat transfer ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ โดยใช้สมการ Bio-Heat equation ในสถานะที่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิขึ้นกับเวลา และในสถานะคงตัว steady state ซึ่งสมการที่มีความจำเป็นก็คือสมการ Bio-Heat equation และสมการของ Electromagnetic wave



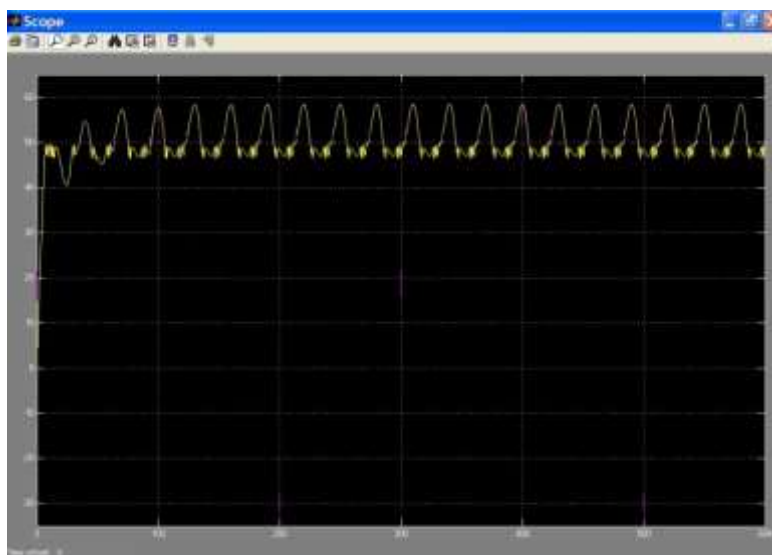
รูปที่ 4.1 แสดงการกระจายของ SAR ในผิวเนื้อเยื่อ

จากรูปที่ 4.1 จะเห็นการกระจายความร้อนของสายอากาศภายในเนื้อเยื่อ สังเกตได้ว่าการกระจาย SAR นั้นจะมีการกระจายออกทางด้านปลายของสายอากาศ ซึ่งมีการกระจายรอบๆ สล๊อตของสายอากาศ จะมีการกระจายของ SAR สูงสุดขึ้นบริเวณใกล้ตำแหน่งของสล๊อตของสายอากาศ

จากนั้นนำค่าวิเคราะห์ทางฟิสิกส์จากโปรแกรม Comsol ส่งไปวิเคราะห์ที่โปรแกรม Matlab ผ่านทาง Simulink เพื่อจำลองการควบคุมอุณหภูมิ



รูปที่ 4.2 แสดงการทำงานร่วมกันระหว่างโปรแกรม Comsol กับ Matlab ผ่านทาง Simulink



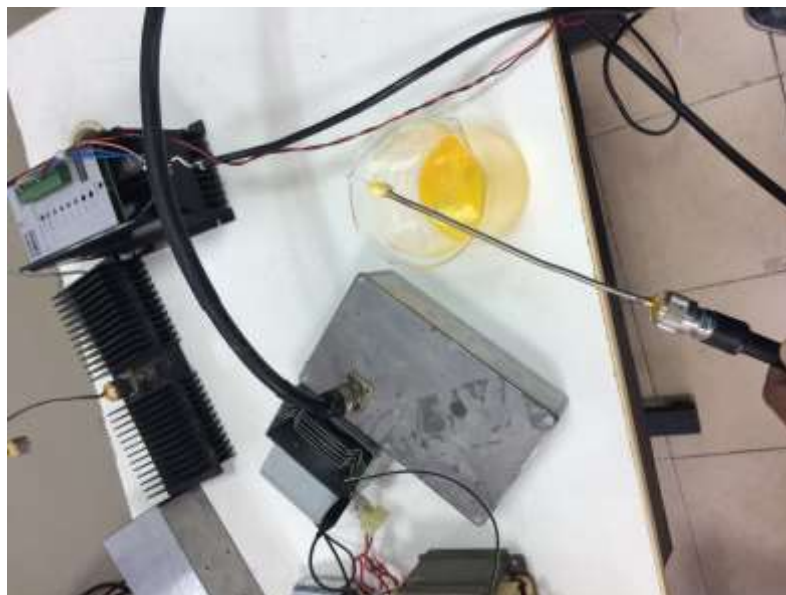
รูปที่ 4.3 แสดงรูปกราฟของระบบควบคุม โดยควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ไม่เกิน 50 องศาเซลเซียส

## 4.2 ผลการทดลอง

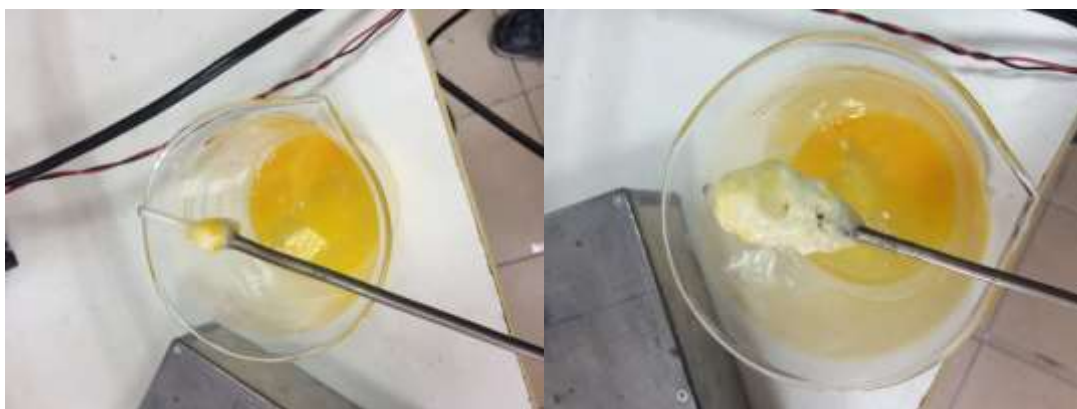
ในส่วนการทดลอง เป็นการทดลองแบบ in-vitro โดยใช้เนื้อหมูและเนื้อเยื่อตับหมู ออกแบบการทดลองเป็น 4 การทดลอง ได้แก่ การทดลองที่ 1 การกระจายความร้อนในไขขาว การทดลองที่ 2 ศึกษาการการกระจายความร้อนของระบบที่ไม่มีการป้องกันความเสียหายและระบบที่มีการป้องกันความเสียหายโดยทดลองกับเนื้อหมูและเนื้อเยื่อตับ

### 4.2.1 การทดลองที่ 1

การทดลองปล่อยคลื่นไมโครเวฟในไขขาว เพื่อศึกษาลักษณะการทำลายแบบ 3 มิติ เมื่อไขขาวได้รับความร้อนจะเกิดการแข็งตัว ทำให้เห็นเป็นลักษณะรูปร่างได้อย่างชัดเจน หลังจากนั้นจะนำไขขาวที่แข็งตัวมาวัดขนาด ทำให้ทราบถึงขนาดการทำลายหรือการกระจายตัวของอุณหภูมิได้

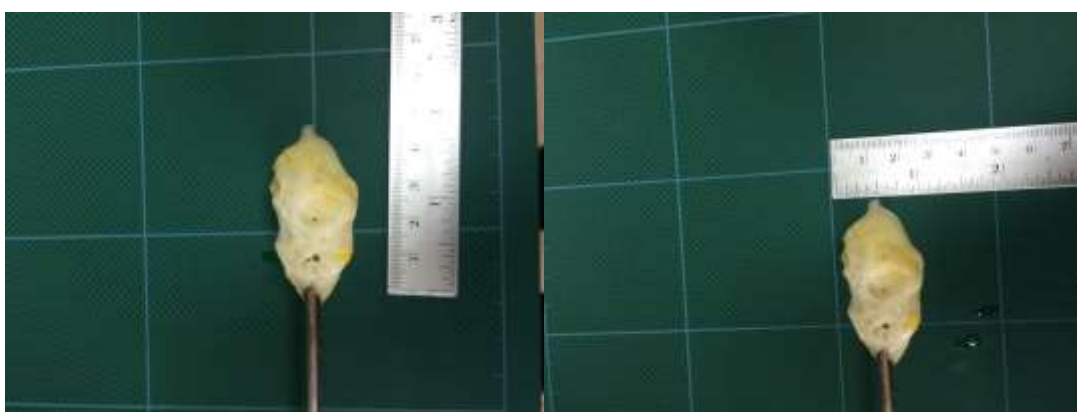


รูปที่ 4.4 การเตรียมการทดลองที่ 1 (ในไขขาว)



รูปที่ 4.5 การกระจายความร้อนในไข่ขาวของคลื่นไมโครเวฟ

จากรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นลักษณะการกระจายความร้อนของคลื่นไมโครเวฟที่เกิดในไข่ขาว หลังจากป้อนคลื่นไมโครเวฟผ่านสายอากาศ การทดลองในไข่ขาวจะทำให้เห็นถึงลักษณะการทำลายแบบ 3 มิติได้ด้วย



รูปที่ 4.6 แสดงขนาดการกระจายความร้อนในไข่ขาวในเวลา 5 นาที

หลังจากทำการทดลองป้อนคลื่นไมโครเวฟผ่านสายอากาศลงในไข่ขาวแล้วนั้น ในระยะเวลา 5 นาที ไข่ขาวจะโตขยายขึ้นเส้นผ่านศูนย์กลางจากสายอากาศ 1 นิ้ว และความยาวที่ 1.7 นิ้ว ที่ค่ากำลังงาน 50 วัตต์

## 4.2.2 การทดลองที่ 2

การทดสอบการใช้งานเครื่องควบคุมไมโครเวฟกับเนื้อเยื่อ แบบ in-vitro โดยการทดลองนำคลื่นไมโครเวฟมาทดลองกับเนื้อหมูและเนื้อเยื่อตับ

### 4.2.2.1 ทดสอบเครื่องควบคุมไมโครเวฟกับเนื้อหมู



รูปที่ 4.7 การทดสอบเครื่องไมโครเวฟกับเนื้อหมู



รูปที่ 4.8 (ก) เนื้อหมูที่ทดสอบกับเครื่องไมโครเวฟที่มีระบบควบคุม

(ข) เนื้อหมูที่ทดสอบกับเครื่องไมโครเวฟที่ไม่มีระบบควบคุม

ตารางที่ 4.1 ค่าการทดสอบเครื่องไมโครเวฟกับเนื้อหมู

| Voltage (V) | Microwave Power (W) |            |            |          |
|-------------|---------------------|------------|------------|----------|
|             | ครั้งที่ 1          | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | เฉลี่ย   |
| 1.90        | 6 m                 | 4 m        | 8 m        | 6 m      |
| 1.91        | 80 m                | 12 m       | 9 m        | 80 m     |
| 1.92        | 140 m               | 110 m      | 14 m       | 140 m    |
| 1.93        | 450 m               | 340 m      | 151 m      | 450 m    |
| 1.94        | 1.2                 | 520 m      | 243 m      | 654.33 m |
| 1.95        | 7.8                 | 2.54       | 1.45       | 3.93     |
| 1.96        | 20.5                | 18.7       | 14.7       | 17.97    |
| 1.97        | 21.6                | 22.22      | 21.98      | 21.93    |
| 1.98        | 23.45               | 23.47      | 23.01      | 23.31    |
| 1.99        | 27.47               | 27.19      | 26.72      | 27.13    |
| 2.00        | 34.89               | 34.24      | 32.88      | 34.00    |
| 2.01        | 39.37               | 36.47      | 35.65      | 37.16    |
| 2.02        | 42.7                | 38.69      | 37.67      | 39.69    |
| 2.03        | 44.64               | 41.78      | 40.54      | 42.32    |
| 2.04        | 48.8                | 38.6       | 36.92      | 41.44    |
| 2.05        | 68.17               | 48.72      | 49.2       | 55.36    |

#### 4.2.2.2 ทดสอบเครื่องควบคุมไมโครเวฟกับเนื้อเยื่อตับ



รูปที่ 4.9 สายอากาศที่สอดเข้าไปในเนื้อเยื่อตับที่ต้องการทดสอบ



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.10 (ก) เนื้อเยื่อตับที่ทดสอบกับเครื่องไมโครเวฟที่มีระบบควบคุม

(ข) เนื้อเยื่อตับที่ทดสอบกับเครื่องไมโครเวฟที่ไม่มีระบบควบคุม

ตารางที่ 4.2 ค่าการทดสอบเครื่องไมโครเวฟกับเนื้อเยื่อตับ

| Voltage (V) | Microwave Power (W)/Temp.(°C) |       |            |       |            |       |        |
|-------------|-------------------------------|-------|------------|-------|------------|-------|--------|
|             | ครั้งที่ 1                    | (°C)  | ครั้งที่ 2 | (°C)  | ครั้งที่ 3 | (°C)  | เฉลี่ย |
| 2.15        | 0.89                          | 24.60 | 0.21       | 23.80 | 0.35       | 24.20 | 0.48   |
| 2.16        | 0.21                          | 25.60 | 0.89       | 24.10 | 0.34       | 24.60 | 0.48   |
| 2.17        | 0.24                          | 26.00 | 1.94       | 24.60 | 1.86       | 25.20 | 1.35   |
| 2.18        | 0.48                          | 26.50 | 3.42       | 24.90 | 2.56       | 25.70 | 2.15   |
| 2.19        | 2.12                          | 27.00 | 32.75      | 25.70 | 35.74      | 27.50 | 23.54  |
| 2.20        | 3.40                          | 27.50 | 31.45      | 26.40 | 34.20      | 28.40 | 23.02  |
| 2.21        | 30.77                         | 28.30 | 32.12      | 27.30 | 36.07      | 29.50 | 32.99  |
| 2.22        | 32.88                         | 29.20 | 34.55      | 27.90 | 37.73      | 29.80 | 35.05  |
| 2.23        | 32.04                         | 30.10 | 34.73      | 28.40 | 39.15      | 30.70 | 35.31  |
| 2.24        | 33.43                         | 30.6  | 34.60      | 28.7  | 48.90      | 31.5  | 38.98  |
| 2.25        | 34.58                         | 31.3  | 45.73      | 29.1  | 55.73      | 32.3  | 45.35  |
| 2.26        | 37.29                         | 31.9  | 48.74      | 29.7  | 59.43      | 32.9  | 48.49  |
| 2.27        | 39.42                         | 32.4  | 50.59      | 30.1  | 61.67      | 33.7  | 50.56  |
| 2.28        | 45.59                         | 32.9  | 53.79      | 30.5  | 63.25      | 33.9  | 54.21  |
| 2.29        | 50.66                         | 33.5  | 55.49      | 30.9  | 64.65      | 34.6  | 56.93  |
| 2.30        | 53.44                         | 33.9  | 57.53      | 31.3  | 64.91      | 35.3  | 58.63  |
| 2.31        | 56.58                         | 34.1  | 58.12      | 31.8  | 62.61      | 36.2  | 59.10  |
| 2.32        | 58.46                         | 34.3  | 57.42      | 32.2  | 58.89      | 36.6  | 58.26  |
| 2.33        | 59.42                         | 34.6  | 54.04      | 32.8  | 59.34      | 37.1  | 57.60  |
| 2.34        | 56.51                         | 35.1  | 53.64      | 33.3  | 54.90      | 37.6  | 55.02  |
| 2.35        | 50.05                         | 35.5  | 49.67      | 33.8  | 55.44      | 38.2  | 51.72  |
| 2.36        | 49.23                         | 36.1  | 47.43      | 34.3  | 55.70      | 38.7  | 50.79  |
| 2.37        | 50.64                         | 36.5  | 62.23      | 35.1  | 57.20      | 40.2  | 56.69  |





รูปที่ 4.11 การทดลอง โดยทำการทดสอบกับเครื่องทำลายเซลล์มะเร็งขนาด 1 แหล่งจ่าย



รูปที่ 4.11 การทดลอง โดยทำการทดสอบกับเครื่องทำลายเซลล์มะเร็งขนาด 1 แหล่งจ่าย ปรับกำลังงาน ไฟตรงเพื่อป้อนให้กับชุด จ่ายคลื่นไมโครเวฟขนาด 1.9 โวลท์



รูปที่ 4.12 การทดลอง โดยทำการทดสอบกับเครื่องทำลายเซลล์มะเร็งขนาด 1 แห่งจ่าย ปรับกำลังงาน ไฟตรงเพื่อป้อนให้กับชุด จ่ายคลื่นไมโครเวฟขนาด 1.9 โวลท์



รูปที่ 4.13 การทดลอง โดยทำการทดสอบกับเครื่องทำลายเซลล์มะเร็งขนาด 1 แพล่งจ่าย ปรับกำลังงาน ไฟตรงเพื่อป้อนให้กับชุด จ่ายคลื่นไมโครเวฟขนาด 1.8 โวลท์





1.75 V.





รูปที่ 4.14 การทดลอง โดยทำการทดสอบกับเครื่องทำลายเซลล์มะเร็งขนาด 1 แพล่งจ่าย ปรับกำลังงาน ไฟตรงเพื่อป้อนให้กับชุด จ่ายคลื่นไมโครเวฟขนาด 1.75 โวลท์

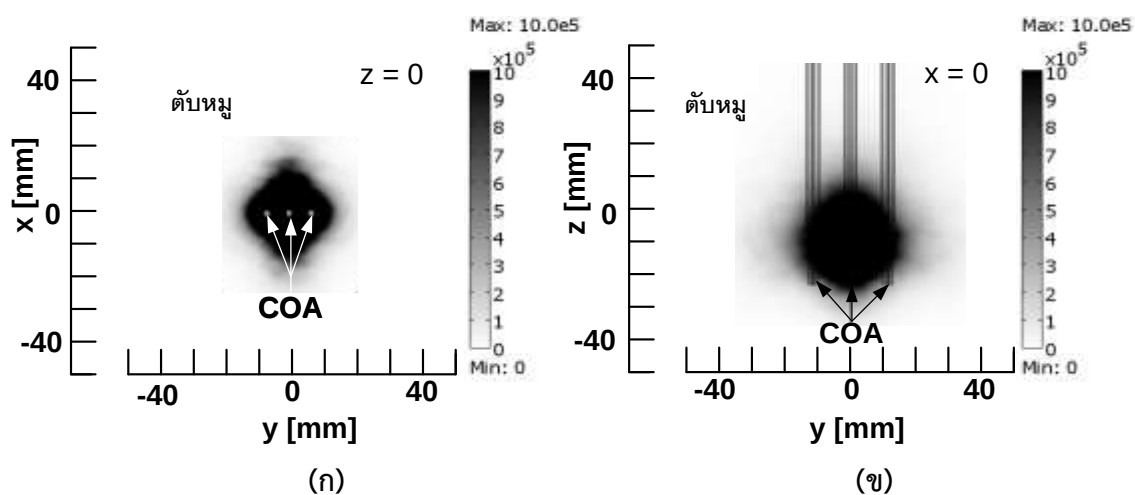




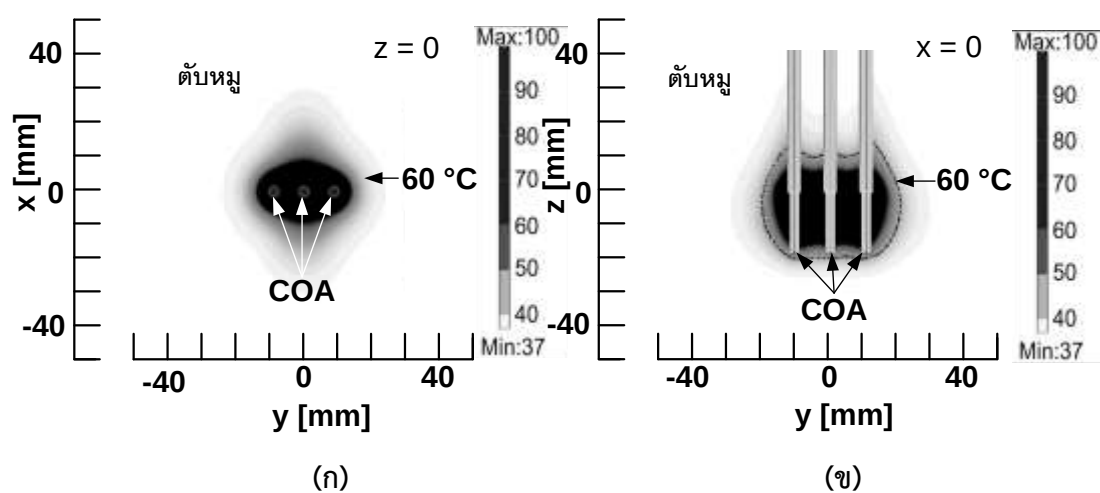
รูปที่ 4.11 การทดลอง โดยทำการทดสอบกับเครื่องทำลายเซลล์มะเร็งขนาด 1 แห่งจ่าย ปรับกำลังงาน ไฟตรงเพื่อป้อนให้กับชุด จ่ายคลื่นไมโครเวฟขนาด 1.7 โวลท์

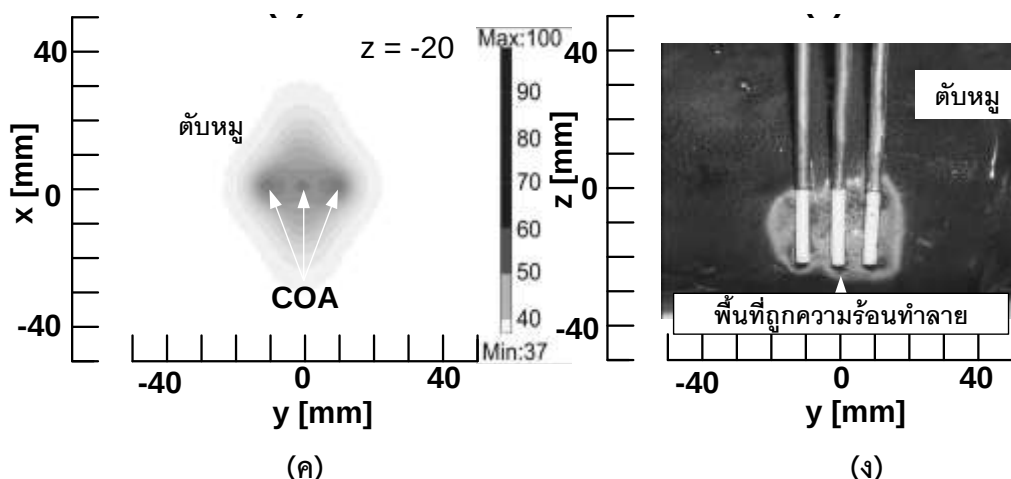
4.3 เปรียบเทียบผลการจำลองการทำงานด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ กับการทดลองกับ  
 เ นื้ อ เ ยี อ  
 แบบ *In Vitro* ด้วยเทคนิคการทำลายเซลล์มะเร็งแบบใช้สายอากาศหลายต้น





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





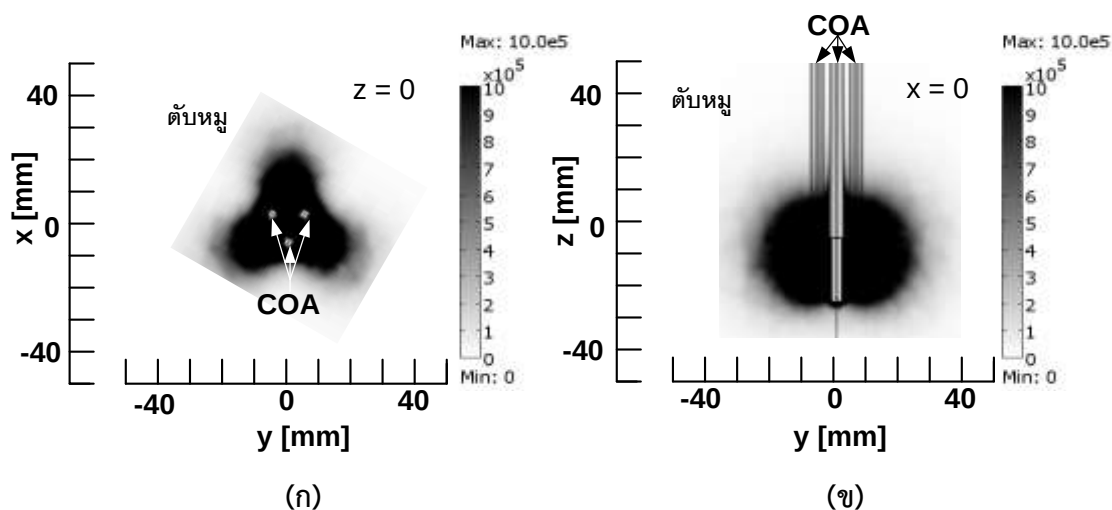
**รูปที่ 4.16** ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิในเนื้อเยื่อตับของสายอากาศแบบปลายเปิด 3 ต้น ซึ่งจัดวางแบบอาร์เรย์ ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับผลการทดลองกับดัมพมู ที่ความถี่ 2.45 GHz ป้อนกำลังงาน 50 วัตต์ ระยะเวลา 1 นาที (ก) ระนาบ xy ที่ตำแหน่ง  $z$  เท่ากับ 0 (ข) ระนาบ yz ที่ตำแหน่ง  $x$  เท่ากับ 0 (ค) ระนาบ xy ที่ตำแหน่ง  $z$  เท่ากับ -20 (ง) รูปการกระจายของอุณหภูมิ จากการทดลอง

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

ในรูปที่ 4.16 แสดงการกระจายของอุณหภูมิในเนื้อเยื่อตับ โดยใช้สายอากาศแบบปลายเปิด 3 ต้น ซึ่งจัดวางแบบอาร์เรย์ การกระจายของอุณหภูมิมีการกระจายออกรอบๆ บริเวณทาบของสายอากาศ 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 โดยขนาดการทำลาย

เซลล์มะเร็งของการทดลองจริงจะมีพื้นที่การทำลายมะเร็งเล็กกว่าประมาณ 2% เมื่อเทียบกับขนาดที่ได้จากการจำลองการทำงาน

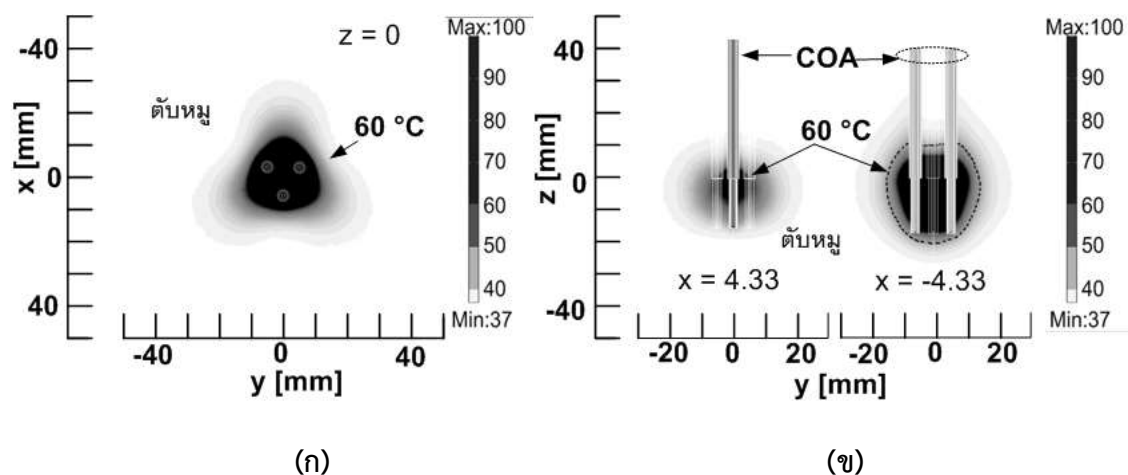
จากการจำลองการทำงานด้วยระเบียบวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถจำลองรูปแบบการทำลายเซลล์มะเร็งในเนื้อเยื่อตับโดยใช้สายอากาศแบบปลายเปิด 3 ต้น ที่จัดวางแบบอาร์เรย์ ได้อย่างสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลองจริงเป็นอย่างมาก

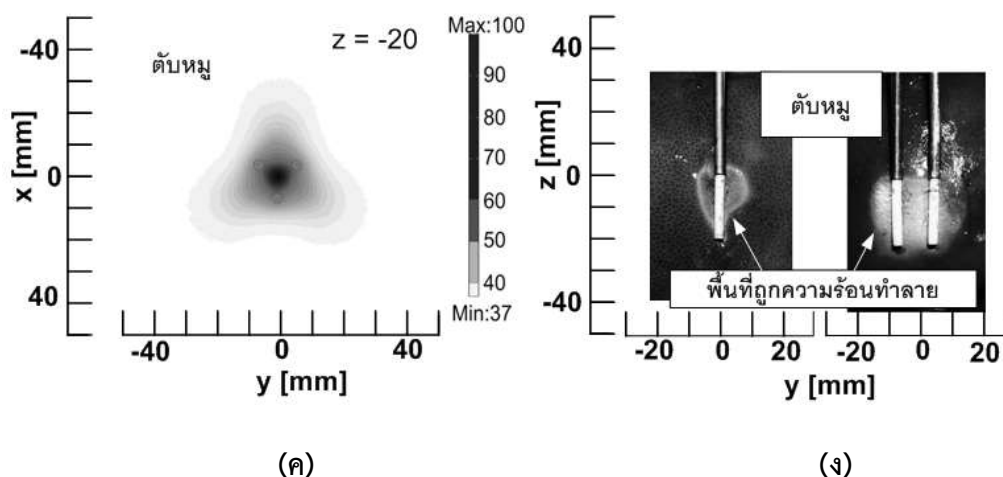


รูปที่ 4.17 ผลการจำลองการกระจาย SAR ในเนื้อเยื่อตับของสายอากาศแบบปลายเปิด 3 ต้น

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 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 4.17 แสดงการกระจายของ SAR ในเนื้อเยื่อตับของการทำลายเซลล์มะเร็งโดยใช้สายอากาศแบบปลายเปิด 3 ต้น ที่จัดวางแบบสามเหลี่ยม ในรูปที่ 4.17 (ก) พิจารณาการกระจายของ SAR ในระนาบที่ตำแหน่งบริเวณปลายเปิดของสายอากาศทั้ง 3 ต้น ลักษณะการกระจาย SAR จะเกิดขึ้นสูงที่ตำแหน่งกึ่งกลางของสายอากาศ คล้ายกับการจัดวางสายอากาศแบบอาร์เรย์โดยใช้สายอากาศ 2 ต้น (พิจารณาจากด้านข้างของรูปสามเหลี่ยม) การกระจายของ SAR ในการจัดวางสายอากาศแบบคู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของสายอากาศทั้งสองจะมีการกระจายของ SAR ที่สูงสอดคล้องกับงานวิจัยที่ได้กล่าวไว้แล้วใน [1] และการกระจายของ SAR จะเป็นรูปสามเหลี่ยมโดยมุมของสามเหลี่ยมอยู่กึ่งกลางของสายอากาศแต่ละคู่

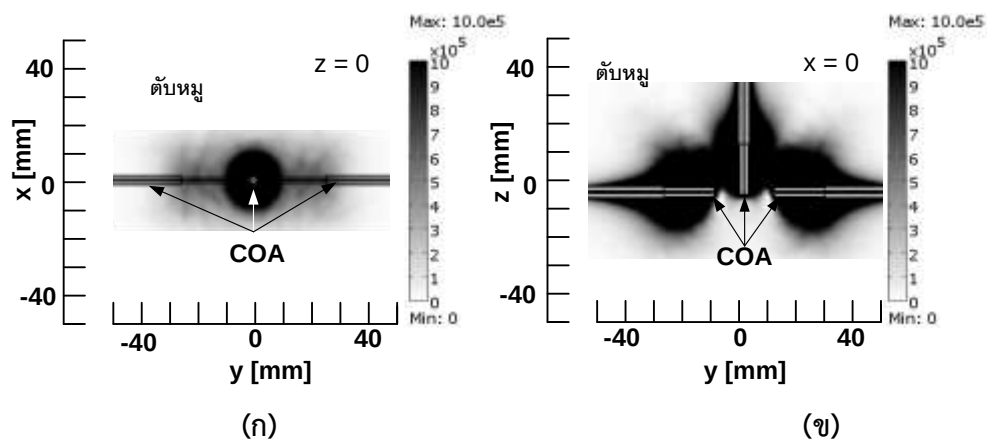
ในรูปที่ 4.17 (ข) การกระจายของ SAR ในระนาบที่กึ่งกลางรูปทรงสามเหลี่ยมนั้น รายละเอียดได้อธิบายในรูปการจัดวางสายอากาศในบทที่ 3 โดยการกระจายของ SAR จะออกมารอบๆ ทิศที่เป็นส่วนปลายของสายอากาศแบบปลายเปิด และมีขนาดของการกระจายที่ใหญ่ขึ้นเมื่อเทียบกับการใช้สายอากาศแบบปลายเปิดแบบต้นเดียว

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

ในรูปที่ 4.18 (ก) และรูปที่ 4.18 (ค) แสดงการกระจายของอุณหภูมิในเนื้อเยื่อตับที่ระนาบเดียวกัน โดยเป็นการกระจายอุณหภูมิที่ตำแหน่งจุดต่อกับตัวนำนอก และตำแหน่งของปลาย

สายอากาศ ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าในรูปที่ 4.18 (ก) การกระจายของอุณหภูมิจะมีการกระจายที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับรูปที่ 4.18 (ค) ซึ่งทั้งสองตำแหน่งจะมีลักษณะการกระจายเป็นรูปทรงสามเหลี่ยม โดยมีมุมของสามเหลี่ยมอยู่กึ่งกลางของสายอากาศแต่ละคู่เช่นเดียวกับผลที่ได้จากการกระจายของ SAR ในรูปที่ 4.17 (ก)

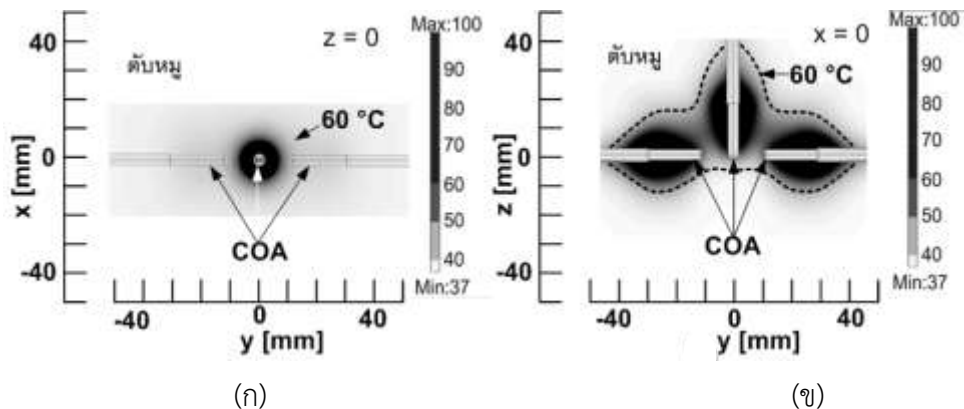
เมื่อเปรียบเทียบผลการจำลองการทำงานในรูปที่ 4.18 (ข) กับผลการทดลองในรูปที่ 4.18 (ง) จะเห็นได้ว่ามีลักษณะใกล้เคียงกัน โดยผลการทดลองจะมีพื้นที่การทำลายมะเร็งในเนื้อเยื่อตื้นเล็กกว่าผลการจำลองการทำงานอยู่ประมาณ 7% ดังนั้นระเบียบวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถจำลองรูปแบบการทำลายเซลล์มะเร็งในเนื้อเยื่อตื้นโดยใช้สายอากาศแบบปลายเปิด 3 ต้น ที่จัดวางแบบสามเหลี่ยมได้อย่างสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลองจริง

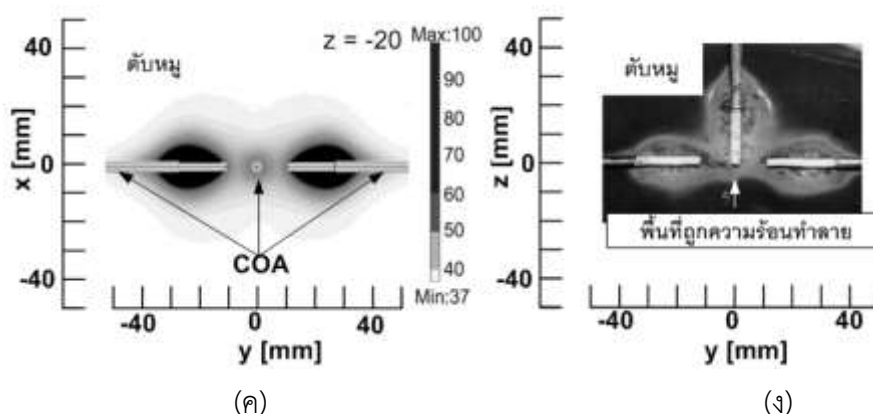


รูปที่ 4.19 ผลการจำลองการกระจาย SAR ในเนื้อเยื่อตื้นของสายอากาศแบบปลายเปิด 3 ต้น

ซึ่งจัดวางแบบรูปตัวที่ 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** ผลการกระจายอุณหภูมิในเนื้อเยื่อตับของสายอากาศแบบปลายเปิด 3 ต้น ซึ่งจัดวางแบบรูปตัวที 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) รูปการกระจายของอุณหภูมิจากการทดลอง

ในรูปที่ 4.19 แสดงการกระจายของ SAR ในเนื้อเยื่อตับของการทำลายเซลล์มะเร็ง โดยใช้สายอากาศแบบปลายเปิด 3 ต้น ที่จัดวางแบบรูปตัวที รูปที่ 4.19 (ก) พิจารณาจากสายอากาศที่วางทางแนวตั้ง ที่ตำแหน่งรอยต่อจุดทาบ จะเห็นได้ว่าการกระจายของ SAR จะเหมือนกับสายอากาศแบบปลายเปิดต้นเดียว และมีความสมมาตรรอบๆ สายอากาศ เมื่อพิจารณารูปที่ 4.19 (ข) การกระจายของ SAR จะเหมือนกับผลที่ได้จากสายอากาศต้นเดียว 3 ต้น มาวางซ้อนกัน โดยตำแหน่งที่มีการรวมกันของ SAR จะมีขนาดของการกระจาย SAR ที่เพิ่มสูงขึ้น (โดยมุมที่จัดวางสายอากาศตั้งฉากกัน) ทั้งสายอากาศที่วางตามแนวนอนทั้ง 2 ต้น ดังรูป

จากรูปที่ 4.20 (ก) (ข) และ (ค) เป็นผลการจำลองการกระจายของอุณหภูมิในเนื้อเยื่อตับ โดยใช้สายอากาศแบบปลายเปิด 3 ต้น ซึ่งจัดวางแบบรูปตัวที ด้วยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ และในรูปที่ 4.20 (ง) เป็นผลที่ได้จากการทดลอง

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

จากผลการจำลองการทำงาน และผลการทดลองของการจัดวางสายอากาศแบบปลายเปิด 3 ต้น ทั้งที่เป็นแบบอาร์เรย์ แบบสามเหลี่ยม และแบบรูป T-Shape ในหัวข้อที่ 4.5 นี้ สามารถนำเอาระเบียบวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์มาจำลองการทำงาน โดยผลการจำลองการทำงานที่ได้มีผล



สอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลอง ซึ่งเป็นการยืนยันความถูกต้องของผลที่ได้จากวิธีการทางไฟไนต์  
เอลิเมนต์ที่นำมาใช้ได้เป็นอย่างดี