

การศึกษาการจําวางของเสาอากาศไมโครเวฟที่ขั้วคลื่นจุดบนดะป้ลายเป็คเทือใช้
ในการทำลายเซลล์มะเร็งตับ

A STUDY OF ANGULAR PLACEMENTS OF COMBINATIONS OF SLOT
AND OPEN-TIP MICROWAVE ANTENNA FOR DESTRUCTION
OF LIVER CANCER



๒๕๕๓
สถานพฒนแผนยวณเวฟงการศกษาตามหลักศรณวิญญวศวกรรมสาศตรณพามบคเทือ

๒๕๕๓
สาขาวิชาศกพอนภศรณการแพทย

๒๕๕๓
ศรณวิศวกรรมสาศตร

๒๕๕๓
ตอานันทคโนโถยพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. ๒๕๕๓

KNITL-2010-EN-N-045-013

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

**การศึกษาการจัดวางของสายอากาศไมโครเวฟคู่ชนิดสล็อตและปลายเปิดเพื่อใช้
ในการทำลายเซลล์มะเร็งตับ**

**A STUDY OF ANGULAR PLACEMENTS OF COMBINATIONS OF SLOT
AND OPEN-TIP MICROWAVE ANTENNA FOR DESTRUCTION
OF LIVER CANCER**



พ.ศ.
๒๕๕๓
๒๕๕๓

ตงพญ.....
เลขทะเบียน 116789
วัน,เดือน,ปี... 15 ธ.ค. 2554

b..... 12287167
i.....

**วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ชีวการแพทย์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**

พ.ศ. 2553

KMITL-2010-EN-M-045-043

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**A STUDY OF ANGULAR PLACEMENTS OF COMBINATIONS OF SLOT
AND OPEN-TIP MICROWAVE ANTENNA FOR DESTRUCTION
OF LIVER CANCER**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN BIOMEDICAL ELECTRONICS
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2010

KMITL-2010-EN-M-045-043

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2010

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาการจัดวางของสายอากาศไมโครเวฟคู่ ชนิดสล็อตและชนิดปลายเปิดเพื่อใช้ในการทำลายเซลล์มะเร็งระดับ

Thesis Title A Study of Angular Placements of Combinations of Slot and Open -Tip Microwave Antenna for Destruction of Liver Cancer

นักศึกษา นายกุลชาติ เย็นล้ำ

รหัสประจำตัว 50061410

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา อิเล็กทรอนิกส์ชีวการแพทย์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.สุพันธุ์ ตั้งจิตกุศลมั่น

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2010-EN-M-045-043

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.กิติพล ชิตสกุล	
ผศ.ดร.ยุทธนา คัดใจเดียว	
รศ.ดร.สุริภณ สมควรวาณิชย์	
ผศ.ดร.ชัยชนา ตั้งวงศ์สานต์	
ผศ.ดร.สุพันธุ์ ตั้งจิตกุศลมั่น	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพุธที่ 7 เมษายน พ.ศ. 2553 เวลา 13.00-15.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 3 ห้องประชุม 2

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRBANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.กอบชัย เดชหาญ)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 7 เมษายน พ.ศ. 2553

สำนักทะเบียนและประมวลผล สจล.

วันที่ส่งเล่มวิทยานิพนธ์กับใบสมัคร

วันที่ 14 เดือน N.อ. พ.ศ. 53

เอกสารนี้ ลงชื่อ...
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาการจัดวางของสายอากาศไมโครเวฟคู่ชนิดสล็อตและปลายเปิดเพื่อใช้ในการทำลายเซลล์มะเร็งระดับ
นักศึกษา	นายกุลชาติ เย็นจำ
รหัสนักศึกษา	50061410
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	อิเล็กทรอนิกส์ชีวการแพทย์
พ.ศ.	2553
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร. สุพันธุ์ ตั้งจิตกุศลมั่น

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอเทคนิคในการทำลายเซลล์มะเร็งระดับให้สามารถสร้างรูปแบบการทำลายเซลล์มะเร็งที่หลากหลายขึ้นและมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยใช้สายอากาศสองแท่งในการทำลายที่ความถี่ไมโครเวฟ 2.45 GHz ซึ่งใช้สายอากาศ 2 ชนิด แบบ Slot และแบบ Open-Tip มาใช้งานร่วมกันแบบมีการจัดเรียงมุมองศาของสายอากาศที่ 0° , 30° , 45° , 60° และ 90° เพื่อให้เกิดรูปแบบของการทำลายที่หลากหลายขึ้น ในการทดลองนั้นเราจะใช้วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในการจำลองการทำงานเพื่อศึกษาขนาดและรูปร่างลักษณะของการทำลายเซลล์มะเร็งที่เกิดขึ้น รวมถึงนำมาใช้ในเทคนิคการควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 100°C แบบการปรับเปลี่ยนกำลังงานขาเข้า เทียบกับการจ่ายกำลังงานที่ขาเข้าแบบคงที่ (20W) จากนั้นเราได้ทำการทดลองจริงกับเนื้อเยื่อตับแบบ *in vitro* เพื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ จากการทดลองเราจะพบว่า การทดลองระหว่างเนื้อเยื่อตับจริงกับผลการทดลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นให้ผลการทดลองที่ใกล้เคียงกัน เราจึงสรุปผลจากการทดลองได้ว่า การใช้สายอากาศร่วมกันโดยมีการวางมุมองศาสามารถทำให้เกิดรูปแบบและลักษณะของการทำลายที่หลากหลายมากขึ้น โดยการใช้คู่สายอากาศแบบ Slot กับ Open-Tip ที่มุมการจัดวาง 30° นั้นให้ปริมาตรของการทำลายมากที่สุดที่ 17.53 cm^3 และการปรับเปลี่ยนกำลังงานขาเข้าเพื่อรักษาระดับอุณหภูมินั้นทำให้ขนาดปริมาตรของการทำลายเพิ่มมากขึ้นจากเดิมที่ใช้วิธีแบบการให้กำลังงานขาเข้าแบบคงที่ กับสายอากาศ

Thesis Title	A Study of Angular Placements of Combinations of Slot and Open-Tip Microwave Antenna for Destruction of Liver Cancer
Student	Mr. Kulachat Yenchan
Student ID.	50061410
Degree	Master of Engineering
Program	Biomedical Electronics
Year	2010
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Supan Tungjitkusolmun

ABSTRACT

This thesis presents technique for destruction of large liver cancer tumor using double microwave antennas at 2.45 GHz. We utilized two types of antennas open tip and slot antennas and place them in different angular arrangements (0° , 30° , 45° , 60° , and 90°) in order to create different lesion characteristics. We performed three-dimensional finite element analysis as well as *in vitro* experiments and compared the resulted destruction zones. We investigated the characteristics of lesion formations and also experimented with constant power (20W) and constant temperature modes (100°C) for energy delivery. Results from finite element analysis and *in vitro* experiments were comparable. Using different angular placements showed that lesion characteristics varied greatly with each configuration. By placing a combination of slot and open-tip antennas in 30° configuration, we obtained the maximum lesion formation of 17.53 cm^3 . Using temperature controlled mode by varying power to control the tip temperature resulted in higher lesion volumes than using constant power mode.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้อย่างดี ด้วยคำแนะนำ และคำปรึกษาจาก ผศ.ดร.สุพันธุ์ ตั้งจิตกุลสมัน ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์, ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ที่คอย แนะนำให้คำ ปรึกษามาอย่างดีโดยตลอด ทำให้วิทยานิพนธ์เล่มเสร็จสมบูรณ์ได้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุก ๆ ท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า มาจนถึงทุกวันนี้

ขอขอบคุณพระคุณ คุณพ่อวิชัย เย็นฉ่ำ คุณแม่วันเพ็ญ เย็นฉ่ำ ที่คอยสนับสนุนและคอยให้กำลังใจเสมอมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ ทักษวรรณ พุทธสกุลและเพื่อนๆทุกคนที่คอยอยู่เคียงข้าง และให้กำลังใจกันเสมอมา

กุลชาติ เย็นฉ่ำ



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญกราฟ.....	VIII
สารบัญรูป.....	XI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน.....	3
1.6 ขอบเขตการวิจัย.....	4
1.7 โครงสร้างวิทยานิพนธ์.....	4
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 บทนำ.....	5
2.2 สนามแม่เหล็กไฟฟ้าและปฏิกิริยาของคลื่น ไมโครเวฟกับเนื้อเยื่อ.....	5
2.2.1 ปฏิกิริยาไมโครเวฟ และวัสดุทางชีวภาพ (Interaction of microwave and biological material).....	5
2.3 พื้นฐานการกระจายความร้อนภายในเนื้อเยื่อ.....	6
2.4 สมการความร้อนทางชีววิทยา (Bioheat Equation).....	7
2.5 ลักษณะทางกายวิภาคเบื้องต้นของตับ.....	8
2.5.1 หน้าที่การทำงานของตับ.....	9
2.6 โรคมะเร็ง.....	9
2.6.1 การแพร่กระจายของมะเร็ง.....	10
2.6.2 ขั้นตอนการเกิดมะเร็ง.....	11

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.7 หลักการทำลายเซลล์มะเร็ง.....	13
บทที่ 3 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และกระบวนการทดลอง.....	17
3.1 บทนำ.....	17
3.2 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method).....	17
3.3 กระบวนการแก้ปัญหาด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์.....	19
3.4 การประยุกต์ใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์.....	20
3.5 ซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการประมวลผล.....	21
3.6 กระบวนการวิเคราะห์วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วย COMSOL Multiphysics.....	22
3.7 การออกแบบโครงสร้างสายอากาศที่ใช้ทดลอง.....	23
3.8 การกำหนดค่าคงที่ต่างๆที่ใช้ในการทดลอง.....	24
3.9 การ MESH แบบจำลอง.....	25
3.10 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตบนแบบจำลอง.....	29
3.11 ขั้นตอนการทดลองการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยโปรแกรม COMSOL.....	29
3.12 ขั้นตอนการเตรียมการทดลอง.....	32
บทที่ 4 ผลการทดลองของแบบจำลองและการทดลองในเนื้อเยื่อตับหนู.....	36
4.1 ผลการทดลองแสดงการกระจายของอุณหภูมิในเนื้อเยื่อแบบสายอากาศเดี่ยว.....	37
4.1.1 กรณีที่1 แบบจำลองแบบสายอากาศเดี่ยวชนิด CSA.....	37
4.1.2 กรณีที่2 แบบจำลองแบบสายอากาศเดี่ยวชนิด COA.....	38
4.2 แสดงผลของการทดลองโดยใช้สายอากาศชนิดคู่แบบชนิดเดียวกันและ แบบผสมกัน.....	40
4.2.1 แสดงแบบจำลองลักษณะการทำลายในสายอากาศ แบบคู่ชนิด (CSA-CSA).....	41
4.2.2 แสดงแบบจำลองลักษณะการทำลายในสายอากาศ แบบคู่ชนิด (COA-COA).....	42

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.2.3 แสดง แบบจำลองลักษณะการทำลายในสายอากาศ แบบคู่ชนิด (CSA-COA).....	43
4.3 เปรียบเทียบผลการทดลองสายอากาศคู่ชนิด (CSA-CSA), (COA-COA), (CSA-COA) ที่ให้ผลปริมาณการทำลายมากที่สุดในแต่ละการจัดเรียง.....	45
4.3.1 ผลการใช้ CSA-CSA (45°) (T = 100°C, t = 300 s).....	45
4.3.2 ผลการใช้ COA-COA (0°) (T = 100°C, t = 300 s).....	49
4.3.3 ผลการใช้ CSA-COA (30°) (T = 100°C, t = 300 s).....	53
4.4 ผลการทดลองสายอากาศแบบคู่ที่การจัดเรียงองศาต่างๆที่ 0, 30, 45, 60, 90 องศา ที่ให้ปริมาณการทำลายมากที่สุดในแต่ละการจัดเรียง.....	58
4.4.1 แบบจำลองสายอากาศคู่ COA-COA (0°) (T = 100°C, t = 300 s).....	58
4.4.2 แบบจำลองสายอากาศคู่ CSA-COA (30°) (T = 100°C, t = 300 s).....	62
4.4.3 แบบจำลองสายอากาศคู่ CSA-COA (45°) (T = 100°C, t = 300 s).....	66
4.4.4 แบบจำลองสายอากาศคู่ CSA-COA (60°) (T = 100°C, t = 300 s).....	70
4.4.5 แบบจำลองสายอากาศคู่ CSA-COA (90°) (T = 100°C, t = 300 s).....	74
4.5 เปรียบเทียบผลการจำลองการทำงานด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ กับการทดลองกับ เนื้อเยื่อแบบ <i>In Vitro</i>	78
4.6 เปรียบเทียบผลการทดลองกับผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	84
บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	88
5.1 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	88
5.2 ข้อเสนอแนะในการพัฒนาต่อ.....	89
บรรณานุกรม.....	91
ภาคผนวก.....	94
ภาคผนวก ก. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	95
ภาคผนวก ข. สมการทางไฟฟ้าที่เกี่ยวข้อง.....	100
ประวัติผู้เขียน.....	106

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศและเนื้อเยื่อที่ใช้ในการทดลอง.....	24
3.2 แสดงจำนวนเอลิเมนต์ของแบบจำลองของการใช้สายอากาศชนิด CSA-CSA.....	26
3.3 แสดงจำนวนเอลิเมนต์ของแบบจำลองของการใช้สายอากาศชนิด COA-COA.....	27
3.4 แสดงจำนวนเอลิเมนต์ของแบบจำลองของการใช้สายอากาศชนิด CSA-COA.....	27
4.1 แสดงปริมาณการทำลายเซลล์มะเร็งของการรักษาด้วยสายอากาศแบบแท่งเดี่ยวทั้งแบบชนิด CSA และ COA ที่มีการควบคุมอุณหภูมิและไม่มีการควบคุม โดยใช้เวลา 300 วินาที 10 วัตต์.....	39
4.2 แสดงปริมาณการทำลายเซลล์มะเร็งของการรักษาด้วยสายอากาศแบบแท่งทั้ง 5 แบบการจัดเรียงที่พลังงาน 10 W โดยใช้เวลา 300 วินาทีโดยวางปลายห่างกัน 10 mm โดยไม่พิจารณาในเรื่องของอุณหภูมิที่เกิน 100°C.....	44
4.3 แสดงค่าปริมาณการทำลายที่อุณหภูมิในช่วง 50°C – 100°C ของการเลือกใช้สายอากาศแต่ละชนิดที่ให้ปริมาณการทำลายมากสุดในการทดลองที่ 4.2 แล้วมาทดลองใหม่โดยมีการควบคุมอุณหภูมิทั้งสองแบบที่เวลา 300 วินาที.....	56
4.4 แสดงปริมาณของการทำลายจากการจัดเรียงสายอากาศในองศาต่างๆที่ได้จากการทดลองที่ 4.4 โดยแสดงค่าการทำลายที่อุณหภูมิ 50°C – 100°C ซึ่งแสดงทั้งในส่วนของการให้ค่ากำลังงานคงที่ และมีการปรับเปลี่ยนค่ากำลังงาน.....	77
4.5 แสดงขนาดพื้นที่ผิวของการทำลายเนื้อเยื่อที่ อุณหภูมิ 50°C ของการทดลองแบบไฟไนต์เอลิเมนต์เทียบกับผลการทดลองจริงในเนื้อเยื่อตับหมู.....	84
4.6 แสดงผลที่ได้จากการทดลองโดยใช้สายอากาศแบบ Triaxial Antenna (COA-COA-COA). ..	86
4.7 แสดงผลที่ได้จากการทดลองโดยใช้สายอากาศแบบ Triaxial Antenna (COA-CSA-CSAI). ..	86

สารบัญกราฟ

กราฟที่	หน้า
4.1 แสดงการคอนโทรลอุณหภูมิที่บริเวณติดกับ Slot ของสายอากาศแบบ CSA-CSA (45°) โดยให้มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง $95^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ซึ่งทำการคอนโทรลโดยปรับเปลี่ยนกำลังงานที่ป้อนให้กับสายอากาศในช่วง 4–20W ในระยะเวลา 300 วินาที.....	47
4.2 แสดงการปรับค่ากำลังงานที่ใช้ในการคอนโทรลเพื่อรักษาระดับอุณหภูมิของสายอากาศแบบ CSA-CSA (45°) ให้คงที่อยู่ในช่วง $95^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ โดยมีการปรับค่ากำลังงานในช่วง 4 - 20 W ในระยะเวลา 300 วินาที.....	47
4.3 แสดงอุณหภูมิที่บริเวณติดกับสายอากาศช่วงบริเวณ Slot ของสายอากาศโดยให้ค่ากำลังงานคงที่กับสายอากาศที่ 10W ในระยะเวลา 300 วินาที และให้ระดับอุณหภูมิในช่วง $95^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$	48
4.4 แสดงการคอนโทรลอุณหภูมิที่บริเวณติดกับ Open-Tip ของสายอากาศแบบ COA-COA (0°) โดยให้มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง $95^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ซึ่งทำการคอนโทรลโดยปรับเปลี่ยนกำลังงานที่ป้อนให้กับสายอากาศในช่วง 4–20 W ในระยะเวลา 300 วินาที.....	51
4.5 แสดงการปรับค่ากำลังงานที่ใช้ในการคอนโทรลเพื่อรักษาระดับอุณหภูมิให้คงที่ของสายอากาศแบบ COA-COA (0°) อยู่ในช่วง $95^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ โดยมีการปรับค่ากำลังงานในช่วง 4–20 W ในระยะเวลา 300 วินาที.....	51
4.6 แสดงอุณหภูมิที่บริเวณติดกับสายอากาศช่วงที่ทำการ Open-Tip โดยให้ค่ากำลังงานคงที่กับสายอากาศแบบ COA-COA (0°) ที่ 15W ในระยะเวลา 300 วินาที และให้ระดับอุณหภูมิอยู่ในช่วง $95^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$	52
4.7 แสดงการคอนโทรลอุณหภูมิที่บริเวณติดกับ Slot และ Tip ของสายอากาศแบบ CSA-COA (30°) โดยให้มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง $95^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ซึ่งทำการคอนโทรลโดยปรับเปลี่ยนกำลังงานที่ป้อนให้กับสายอากาศในช่วง 4–20 W ในระยะเวลา 300 วินาที.....	55
4.8 แสดงการปรับค่ากำลังงานที่ใช้ในการคอนโทรลเพื่อรักษาระดับอุณหภูมิของสายอากาศแบบ CSA-COA (30°) ให้คงที่อยู่ในช่วง $95^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ โดยมีการปรับค่ากำลังงานในช่วง 4–20 W ในระยะเวลา 300 วินาที.....	55
4.9 แสดงอุณหภูมิที่บริเวณติดกับสายอากาศช่วงบริเวณ Slot และ Tip ของสายอากาศแบบ CSA-COA (30°) โดยให้ค่ากำลังงานคงที่กับสายอากาศที่ 10W และ 15W ตามลำดับในระยะเวลา 300 วินาที และให้ระดับอุณหภูมิอยู่ในช่วง $95^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$	56

สารบัญกราฟ(ต่อ)

กราฟที่	หน้า
4.10 แสดงการคอนโทรลอุณหภูมิที่บริเวณติดกับส่วน Open-Tip ของสายอากาศแบบ COA-COA (0°) โดยให้มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง $95^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ซึ่งทำการคอนโทรลโดยปรับเปลี่ยนกำลังงานที่ป้อนให้กับสายอากาศในช่วง 4–20 W ในระยะเวลา 300 วินาที.....	60
4.11 แสดงอุณหภูมิที่บริเวณติดกับสายอากาศช่วงที่ทำกร Open-Tip แบบ COA-COA (0°) โดยให้ค่ากำลังงานคงที่กับสายอากาศที่ 15W ในระยะเวลา 300 วินาที และให้ระดับอุณหภูมิสูงสุดไม่เกิน $95^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$	60
4.12 แสดงการปรับค่ากำลังงานที่ใช้ในการคอนโทรลเพื่อรักษาระดับอุณหภูมิของสายอากาศแบบ COA-COA (0°) ให้คงที่ในช่วง $95^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ โดยมีการปรับค่ากำลังงานในช่วง 4-20 ในระยะเวลา 300 วินาที.....	61
4.13 แสดงการคอนโทรลอุณหภูมิที่บริเวณติดกับ Slot และ Tip ของสายอากาศแบบ CSA-COA (30°) โดยให้มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง $95^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ซึ่งทำการคอนโทรลโดยปรับเปลี่ยนพลังงานที่ป้อนให้กับสายอากาศในช่วง 4–20 W ในระยะเวลา 300 วินาที.....	64
4.14 แสดงอุณหภูมิที่บริเวณติดกับสายอากาศช่วงบริเวณ Slot และ Tip ของสายอากาศแบบ CSA-COA (30°) โดยให้ค่าพลังงานคงที่กับสายอากาศที่ 10W และ 15W ตามลำดับในระยะเวลา 300 วินาที และให้ระดับอุณหภูมิอยู่ในช่วง $95^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$	64
4.15 แสดงการปรับค่ากำลังงานที่ใช้ในการคอนโทรลเพื่อรักษาระดับอุณหภูมิให้คงที่ของสายอากาศแบบ CSA-COA (30°) อยู่ในช่วง $95^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ โดยมีการปรับค่ากำลังงานในช่วง 4–20 W ในระยะเวลา 300 วินาที.....	65
4.16 แสดงการคอนโทรลอุณหภูมิที่บริเวณติดกับ Slot และ Tip ของสายอากาศแบบ CSA-COA (45°) โดยให้มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง $95^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ซึ่งทำการคอนโทรลโดยปรับเปลี่ยนพลังงานที่ป้อนให้กับสายอากาศในช่วง 4–20 W ในระยะเวลา 300 วินาที.....	68
4.17 แสดงอุณหภูมิที่บริเวณติดกับสายอากาศช่วงบริเวณ Slot และ Tip ของสายอากาศแบบ CSA-COA (45°) โดยให้ค่าพลังงานคงที่กับสายอากาศที่ 10W และ 15W ตามลำดับในระยะเวลา 300 วินาที และให้ระดับอุณหภูมิอยู่ในช่วง $95^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$	68
4.18 แสดงการปรับค่ากำลังงานที่ใช้ในการคอนโทรลเพื่อรักษาระดับอุณหภูมิของสายอากาศแบบ CSA-COA (45°) ให้คงที่ในช่วง $95^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ โดยมีการปรับค่ากำลังงานในช่วง 4–20 W ในระยะเวลา 300 วินาที.....	69

สารบัญกราฟ(ต่อ)

กราฟที่	หน้า
4.19 แสดงการคอนโทรลอุณหภูมิที่บริเวณติดกับ Slot และ Tip ของสายอากาศแบบ CSA-COA (60°) โดยให้มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง $95^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ซึ่งทำการคอนโทรลโดยปรับเปลี่ยนพลังงานที่ป้อนให้กับสายอากาศในช่วง 4–20 W ในระยะเวลา 300 วินาที.....	72
4.20 แสดงอุณหภูมิที่บริเวณติดกับสายอากาศช่วงบริเวณ Slot และ Tip ของสายอากาศแบบ CSA-COA (60°) โดยให้ค่าพลังงานคงที่กับสายอากาศที่ 10W และ 15W ตามลำดับในระยะเวลา 300 วินาที และให้ระดับอุณหภูมิอยู่ในช่วง $95^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$	72
4.21 แสดงการปรับค่ากำลังงานที่ใช้ในการคอนโทรลเพื่อรักษาระดับอุณหภูมิของสายอากาศแบบ CSA-COA (60°) ให้คงที่อยู่ในช่วง $95^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ โดยมีการปรับค่ากำลังงานในช่วง 4–20 W ในระยะเวลา 300 วินาที.....	73
4.22 แสดงการคอนโทรลอุณหภูมิที่บริเวณติดกับ Slot และ Tip ของสายอากาศแบบ CSA-COA (90°) โดยให้มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง $95^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ซึ่งทำการคอนโทรลโดยปรับเปลี่ยนพลังงานที่ป้อนให้กับสายอากาศในช่วง 4–20 W ในระยะเวลา 300 วินาที.....	76
4.23 แสดงอุณหภูมิที่บริเวณติดกับสายอากาศช่วงบริเวณ Slot และ Tip ของสายอากาศแบบ CSA-COA (90°) โดยให้ค่าพลังงานคงที่กับสายอากาศที่ 10W และ 15W ตามลำดับในระยะเวลา 300 วินาที และให้ระดับอุณหภูมิอยู่ในช่วง $95^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$	76
4.24 แสดงการปรับค่ากำลังงานที่ใช้ในการคอนโทรลเพื่อรักษาระดับอุณหภูมิของสายอากาศแบบ CSA-COA (90°) ให้คงที่อยู่ในช่วง $95^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ โดยมีการปรับค่ากำลังงานในช่วง 4–20 W ในระยะเวลา 300 วินาที.....	77

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 กราฟแสดงผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์มะเร็ง.....	6
2.2 แสดงลักษณะกายวิภาคของตับ.....	8
2.3 แผนภาพแสดงขั้นตอนของการเกิดมะเร็ง.....	12
2.4 แผนภาพแสดงลักษณะของก้อนมะเร็ง.....	13
2.5 แสดงรูปแบบการทำลายเซลล์มะเร็งด้วยคลื่นไมโครเวฟ.....	15
2.6 แสดงลักษณะของเครื่องกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ ในการรักษามะเร็ง.....	15
2.7 แสดงการใช้อัลตราซาวด์เป็นเครื่องมือนำทางหาตำแหน่งการรักษามะเร็งตับ.....	16
3.1 แสดงแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ถูกแบ่งออกเป็นเอลิเมนต์และโหนด.....	18
3.2 รูปแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของกระดูก.....	21
3.3 กระบวนการวิเคราะห์วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics.....	22
3.4 แสดงขนาดและ โครงสร้างของโพรบที่ใช้ในการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	24
3.5 แสดงการ MESH แบบจำลองเนื้อเยื่อตับ.....	26
3.6 แสดงตัวอย่างผลการทดลองในรูปแบบ Mesh Model และ ในรูปแบบ Solid Model.....	28
3.7 Flowchart แสดงลำดับขั้นตอนในการทดลองผลด้วยโปรแกรม COMSOL.....	30
3.8 แสดงไดอะแกรมการเตรียมการทดลอง.....	32
3.9 แสดงสายอากาศที่ใช้ในการทดลองกับเนื้อเยื่อตับหมู.....	32
3.10 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ร่วมในการทดลองจริง.....	33
3.11 แสดงการวัดค่าคุณสมบัติของสายอากาศที่ใช้ในการทดลองแบบสล็อต.....	34
3.12 แสดงการวัดค่าคุณสมบัติของสายอากาศที่ใช้ในการทดลองแบบปลายเปิด.....	35
4.1 แสดงลักษณะการกระจายความร้อนของสายอากาศชนิด CSA ที่กำลังงาน 10 วัตต์ 300 วินาที.....	37
4.2 แสดงขนาดความกว้างความยาวความลึกของการทำลายเซลล์มะเร็งที่ อุณหภูมิที่มากกว่า 50°C ของสายอากาศแบบ CSA.....	37
4.3 แสดงลักษณะการกระจายความร้อนของสายอากาศชนิด COA ที่กำลังงาน 10 วัตต์ 300 วินาที.....	38
4.4 แสดงขนาดความกว้างความยาวความลึกของการทำลายเซลล์มะเร็งที่อุณหภูมิที่มากกว่า 50°C ของสายอากาศแบบ COA.....	38

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 แสดงกราฟ SAR ของสายอากาศแบบ CSA และแบบ COA.....	39
4.6 แสดงลักษณะการทำลายเซลล์มะเร็งที่บริเวณอุณหภูมิเท่ากับมากกว่า 50°C ขึ้นไปของสายอากาศแบบ CSA-CSA (0°), CSA-CSA (30°), CSA-CSA (45°), CSA-CSA (60°), CSA-CSA (90°).....	41
4.7 แสดงลักษณะการทำลายเซลล์มะเร็งที่บริเวณอุณหภูมิเท่ากับมากกว่า 50°C ขึ้นไปของสายอากาศแบบ COA-COA (0°), COA-COA (30°), COA-COA (45°), COA-COA (60°), COA-COA (90°).....	42
4.8 แสดงลักษณะการทำลายเซลล์มะเร็งที่บริเวณอุณหภูมิเท่ากับมากกว่า 50°C ขึ้นไปของสายอากาศแบบ CSA-COA (0°), CSA-COA (30°), CSA-COA (45°), CSA-COA (60°), CSA-COA (90°).....	43
4.9 แสดงลักษณะการกระจายความร้อนในสายอากาศชนิด (CSA-CSA (45°)) โดยมีการควบคุมอุณหภูมิที่เกิดขึ้นไม่ให้เกิน 95°C ± 5°C.....	45
4.10 แสดงขนาดและรูปร่างของการทำลายที่มีการควบคุมอุณหภูมิทั้งสองแบบสายอากาศแบบ (CSA-CSA (45°)).....	46
4.11 แสดงลักษณะการกระจายความร้อนในสายอากาศชนิด (COA-COA (0°)) โดยมีการควบคุมอุณหภูมิที่เกิดขึ้นไม่ให้เกิน 95°C ± 5°C.....	49
4.12 แสดงขนาดและรูปร่างของการทำลายที่มีการควบคุมอุณหภูมิทั้งสองแบบสายอากาศแบบ (COA-COA (0°)).....	50
4.13 แสดงลักษณะการกระจายความร้อนในสายอากาศชนิด (CSA-COA (30°)) โดยมีการควบคุมอุณหภูมิที่เกิดขึ้นไม่ให้เกิน 95°C ± 5°C.....	53
4.14 แสดงขนาดและรูปร่างของการทำลายที่มีการควบคุมอุณหภูมิทั้งสองแบบสายอากาศแบบ (CSA-COA (30°)).....	54
4.15 แสดงลักษณะการแพร่กระจายความร้อนของการเลือกใช้สายอากาศชนิด COA-COA (0°).	58
4.16 แสดงขนาดปริมาตรและลักษณะการทำลายที่อุณหภูมิ 50°C–100°C ของสายอากาศแบบ COA-COA ที่การจัดเรียง 0 องศา.....	59
4.17 แสดงลักษณะการแพร่กระจายความร้อนของการเลือกใช้สายอากาศชนิด CSA-COA (30°)	62

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.18 แสดงขนาดปริมาตรและลักษณะการทำลายที่อุณหภูมิ 50°C–100°C ของสายอากาศแบบ CSA-COA ที่การจัดเรียง 30 องศา.....	63
4.19 แสดงลักษณะการแพร่กระจายความร้อนของการเลือกใช้สายอากาศชนิดCSA-COA (45°)	66
4.20 แสดงขนาดปริมาตรและลักษณะการทำลายที่อุณหภูมิ 50°C–100°C ของสายอากาศแบบ CSA-COA ที่การจัดเรียง 45 องศา.....	67
4.21 แสดงลักษณะการแพร่กระจายความร้อนของการเลือกใช้สายอากาศชนิดCSA-COA (60°)	70
4.22 แสดงขนาดปริมาตรและลักษณะการทำลายที่อุณหภูมิ 50°C–100°C ของสายอากาศแบบ CSA-COA ที่การจัดเรียง 60 องศา.....	71
4.23 แสดงลักษณะการแพร่กระจายความร้อนของการเลือกใช้สายอากาศชนิดCSA-COA (90°)	74
4.24 แสดงขนาดปริมาตรและลักษณะการทำลายที่อุณหภูมิ 50°C–100°C ของสายอากาศแบบ CSA-COA ที่การจัดเรียง 90 องศา.....	75
4.25 แสดงการเปรียบเทียบผลจากการทดลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ กับผลที่ได้จากการทดลอง กับเนื้อเยื่อ <i>in vitro</i> (ตับหมู) ของการจัดเรียงสายอากาศแบบ COA-COA (0°).....	79
4.26 แสดงการเปรียบเทียบผลจากการทดลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ กับผลที่ได้จากการทดลอง กับเนื้อเยื่อ <i>in vitro</i> (ตับหมู) ของการจัดเรียงสายอากาศแบบ CSA-COA (30°).....	80
4.27 แสดงการเปรียบเทียบผลจากการทดลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ กับผลที่ได้จากการทดลอง กับเนื้อเยื่อ <i>in vitro</i> (ตับหมู) ของการจัดเรียงสายอากาศแบบ CSA-COA (45°).....	81
4.28 แสดงการเปรียบเทียบผลจากการทดลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ กับผลที่ได้จากการทดลอง กับเนื้อเยื่อ <i>in vitro</i> (ตับหมู) ของการจัดเรียงสายอากาศแบบ CSA-COA (60°).....	82
4.29 แสดงการเปรียบเทียบผลจากการทดลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ กับผลที่ได้จากการทดลอง กับเนื้อเยื่อ <i>in vitro</i> (ตับหมู) ของการจัดเรียงสายอากาศแบบ CSA-COA (90°).....	83
4.30 แสดงผลที่ได้จากการทดลองโดยใช้สายอากาศแบบ Triaxial Antenna.....	85

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันอัตราของผู้ป่วยมะเร็งที่เกิดขึ้นภายในตับชนิดปฐมภูมิ (Hepatocellular carcinoma) มีจำนวนนับล้านคนต่อปีทั่วโลก โดยเฉพาะในแถบเอเชียและแอฟริกา วิธีการรักษามะเร็งสามารถกระทำได้หลายแบบ เช่น การฉายรังสี การใช้เคมีบำบัด การรักษาด้วยความเย็น การผ่าตัด เป็นต้น อย่างไรก็ตามก็ยังมีผู้ป่วยจำนวนมากที่ไม่สามารถรับการผ่าตัดได้เนื่องจากค่าใช้จ่ายในการรักษานั้นมีราคาสูงมาก วิธีการรักษาดังที่กล่าวมานี้อย่างเช่น การผ่าตัดเอาก้อนมะเร็งออกอาจให้ผลการรักษาที่ดี แต่ในบางกรณีก็อาจไม่สามารถผ่าตัดออกได้เนื่องจากผู้ป่วยมีสภาพร่างกายที่ไม่สมบูรณ์หรือมีภาวะโรคแทรกซ้อนอื่น ๆ รวมอยู่ด้วย และเสี่ยงต่อการเสียชีวิตมาก การรักษาโดยใช้เคมีบำบัดอาจทำให้เกิดผลข้างเคียงด้านลบ การรักษาด้วยความร้อนจึงเป็นอีกวิธีการรักษาหนึ่งที่สามารถนำมาใช้กับผู้ป่วยที่มีลักษณะดังที่ได้กล่าวในข้างต้น ซึ่งวิธีการดังกล่าวนี้จะทำให้อ่อนเซลล์มะเร็งที่ได้รับความร้อนตายหรือมีการเสื่อมสภาพลง และสามารถยับยั้งมิให้โรคดำเนินไปเร็วนัก อาการก็จะทุเลาลง แต่อาจไม่หายขาดซึ่งวิธีการรักษาด้วยวิธีนี้ได้มีการใช้กันอย่างแพร่หลายโดยลักษณะบาดแผลที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเล็ก ผู้ป่วยใช้เวลาพักฟื้นสั้นและมีอัตราการรอดสูงอีกทั้งค่าใช้จ่ายในการรักษาค่า การรักษาในรูปแบบใช้คลื่นความถี่วิทยุ (Radiofrequency Ablation) ในปัจจุบันนี้ยังไม่มีระบบคลื่นความถี่วิทยุที่สามารถให้กำลังงานกับสาย โพรบหลายๆแท่ง โดยแยกจากกันแบบอิสระได้ ทำให้ต้องมีการทำซ้ำของบริเวณที่ได้รับการรักษาด้วยคลื่นความถี่วิทยุเพื่อให้ขนาดของการทำลายมีการเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 2% ไปจนถึง 40% โดยขึ้นอยู่กับวิธีการ การรักษาด้วยความถี่ไมโครเวฟจึงถูกนำเสนอขึ้นมา ซึ่งเป็นผลดีของการใช้ความถี่วิทยุ ซึ่งตามหลักวิชาการแล้วคลื่นไมโครเวฟก็ยังมิข้อได้เปรียบมาก เนื่องจากสามารถให้ความร้อนไวกว่าและมีขนาดการทำลายใหญ่กว่าการใช้คลื่นความถี่วิทยุที่ใช้ในปัจจุบันซึ่งเป็นวิธีการรักษาโดยการสร้างความร้อนจากไฟฟ้าในย่านความถี่ช่วง 350-500 kHz แต่ในส่วนของคลื่นไมโครเวฟนั้นจะใช้ที่ความถี่ 2.45 GHz เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างคลื่นความถี่วิทยุกับคลื่นความถี่ไมโครเวฟนั้น คลื่นความถี่ไมโครเวฟจะสามารถแพร่กระจายกำลังงานเป็นบริเวณที่กว้างมากกว่า(ตั้งแต่ 2cm ขึ้นไปวัดจากสายอากาศตัวนำ) ทำให้บริเวณที่เกิดความร้อนมีขนาดที่ใหญ่กว่าและยังมีรูปแบบการจัดเนื้อร้ายที่ตรงเป้าหมายและใกล้เคียงกับหลอดเลือดได้ ข้อจำกัดอีกอย่างของการใช้คลื่นความถี่วิทยุคือเมื่อบริเวณเนื้อเยื่อที่ถูกทำลายใหม่ติดกับสายอากาศก็จะทำให้สายอากาศมีความต้านทานสูงขึ้น แต่กับพลังงานของคลื่นความถี่ไมโครเวฟจะไม่เหมือนกันกับความถี่วิทยุที่มีวงจำกัด ทำให้บาดแผลที่เกิดจากความร้อนนั้นมีขนาดที่ใหญ่มากขึ้น การรักษาด้วยคลื่นความถี่วิทยุกับคลื่นไมโครเวฟมีกระบวนการที่คล้ายกัน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คือ การใช้กล้องช่วยในการผ่าตัดรักษา(laparoscopic) การรักษาด้วยความถี่ไมโครเวฟถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในภูมิภาคเอเชียทุกวันนี้โดยลักษณะของรูปแบบที่ใช้การรักษาแบบนี้จะมี 2 แบบคือการเกิดของก้อนมะเร็งที่เกิดขึ้นที่ตับ โดยตรง และการที่ก้อนมะเร็งนั้นลุกลามมาจากอวัยวะอื่น โดยที่การรักษาด้วยคลื่นไมโครเวฟนี้ยังไม่สามารถที่จะรักษากับก้อนมะเร็งที่มีขนาดใหญ่มากได้ภายในการรักษาแค่ครั้งเดียว ดังนั้นจึงได้มีการคิดหาวิธีที่จะสามารถเพิ่มขนาดปริมาณของการทำลายให้มีขนาดที่ใหญ่มากขึ้นเพื่อให้สามารถทำการรักษากับเซลล์มะเร็งที่มีขนาดใหญ่ ได้ในครั้งเดียว

ดังนั้นในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้จึงเป็นการศึกษาเกี่ยวกับเทคนิคด้านการใช้งานสายอากาศทั้งการจัดเรียงสายอากาศ การเลือกใช้งานสายอากาศให้เหมาะสมในแต่รูปแบบของการรักษา รวมไปถึงการนำสายอากาศแต่ละชนิดมาใช้งานร่วมกันเพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการทำลายเซลล์มะเร็งเพื่อช่วยลดระยะเวลาในการรักษาในรูปแบบที่มีขนาดของก้อนมะเร็งที่ใหญ่เกินกว่าที่จะสามารถรักษาได้โดยการใช้สายอากาศเดี่ยวทำให้ไม่ต้องทำการรักษาซ้ำจึงช่วยลดภาวะบอบซ้ำของผู้ป่วยและทำให้การรักษาไวขึ้น รวมไปถึงสามารถนำมาใช้ในกรณีที่ก้อนมะเร็งมีลักษณะการเกิดแบบกระจาย หลายจุด ทำให้สามารถรักษาพร้อมกันได้ครั้งเดียวหลายจุด โดยในการทดลองนั้นเราจะเลือกใช้สายอากาศสองชนิดในการทดลองคือ แบบ Slot กับแบบ Open-Tip

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์มาทำการวิเคราะห์ปัญหาการกระจายของอุณหภูมิของเนื้อเยื่อในการทำลายเซลล์มะเร็งตับด้วยคลื่นความถี่ไมโครเวฟ
2. เพื่อศึกษาการกระจายของอุณหภูมิในการทำลายเซลล์มะเร็งตับ โดยพิจารณาถึงผลของชนิดของแต่ละสายอากาศและลักษณะของการจัดเรียง
3. เพื่อศึกษาถึงผลของการเลือกใช้พลังงานที่ป้อนให้กับสายอากาศแบบมีการคอนโทรลพลังงานที่ป้อนให้กับสายอากาศเทียบกับการเลือกใช้ค่าพลังงานที่คงที่ป้อนให้กับสายอากาศ
4. เพื่อศึกษาลักษณะและขนาดของรอยแผลที่เกิดขึ้นจากการทำลายเซลล์มะเร็งตับในแต่ละชนิดของสายอากาศและลักษณะของการจัดเรียง
5. เพื่อศึกษาเปรียบเทียบแบบจำลองระหว่างแบบจำลองเนื้อเยื่อตับกับแบบจำลองของการทดลองในตับหมูจริงด้วยระบบการทำลายเซลล์มะเร็งตับด้วยคลื่นความถี่ไมโครเวฟ

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

การศึกษากการทำลายเซลล์มะเร็งตับด้วยคลื่นความถี่ไมโครเวฟที่ผ่านมาพบว่ามีให้เลือกใช้สายอากาศอยู่สองชนิดเป็นส่วนใหญ่ในการการทำลายเซลล์มะเร็งตับคือสายอากาศชนิด Slot และแบบ Open-Tip แต่ยังไม่มีการศึกษาที่นำสายอากาศสองชนิดนี้มาเปรียบเทียบผลการทำลายด้วยกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือนำมาใช้ร่วมกันว่าจะให้ผลที่ดีกว่าเดิมหรือไม่ ดังนั้นเราจึงจะทำการศึกษาระบายอุณหภูมิ ในการทำลายเซลล์มะเร็งระดับ โดยการนำสายอากาศทั้งสองชนิดมาใช้ร่วมกันและออกแบบการจัดเรียงสายอากาศเพื่อทดสอบหาผลและรูปแบบของการทำลาย เพื่อที่เราจะสามารถเลือกใช้สายอากาศและการจัดเรียงให้เหมาะสมกับในแต่ละเคสของการรักษาซึ่งจะทำให้ช่วยประหยัดเวลาในการรักษาและให้ผลการรักษาที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยเราจะนำวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้แก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์ ซึ่งวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์จะเป็นการแก้ไขปัญหาโดยการสร้างแบบจำลองขึ้น และแบบจำลองจะมีคุณลักษณะที่เหมือนเนื้อเยื่อตับปกติ โดยการอาศัยการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ลงในแบบจำลอง พารามิเตอร์จะถูกนำมาใช้ในสมการคณิตศาสตร์ เพื่อใช้ในการคำนวณ

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

การใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ในการสร้างแบบจำลองขึ้นเพื่อการวิเคราะห์การกระจายของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในเนื้อเยื่อตับ ลักษณะและขนาดของรอยแผลของเนื้อเยื่อที่เกิดขึ้นจากการทำลายเซลล์มะเร็ง ด้วยคลื่นความถี่ไมโครเวฟในแต่ละชนิดของสายอากาศและในแต่ละการจัดเรียง จะเป็นไปตามสมการความร้อนทางชีววิทยา (Bioheat equation)

1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน

ในอดีตนั้นการรักษาโรคโรคมะเร็งระดับมีการรักษาอยู่หลายรูปแบบเช่น การรักษาด้วยวิธีการฉายรังสี ซึ่งจะมีข้อเสียในเรื่องของการตกค้างของรังสีในการรักษาซึ่งจะมีการสะสมทำให้เกิดอันตรายต่อผู้ป่วยได้

การรักษาด้วยการให้เคมีบำบัด เป็นการรักษาโดยให้สารเคมีกับผู้ป่วย ซึ่งมีผลข้างเคียงสูง เช่น หลังจากการได้รับเคมีบำบัดแล้ว ผมร่วง ระบบต่างๆภายในร่างกายทำงานผิดปกติ

การผ่าตัดเป็นวิธีการที่มีข้อเสียคือ ไม่สามารถนำไปใช้กับผู้ป่วยที่เสียเลือดมากไม่ได้ เช่นผู้ป่วยที่เป็นโรคเบาหวาน หรือมีปัญหาในการห้ามเลือด

การรักษาด้วยคลื่นไมโครเวฟนั้นเป็นแนวทางที่เริ่มนำมารักษาโรคมะเร็งระดับ เมื่อประมาณ สิบปีมานี้ โดยวิธีการรักษาแบบนี้มีความเหมาะสม กับขนาดของแผลที่เล็ก ซึ่งมีข้อดีคือ ระยะเวลาที่ใช้ในการทำการรักษานั้นใช้เวลาที่สั้น ประมาณ 1 ชั่วโมง ขนาดของแผลผ่าตัดหลังการรักษามีขนาดเล็ก และมีการสูญเสียเลือดน้อย

1.6 ขอบเขตการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดขอบเขตการศึกษาถึงผลของการใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับแบบจำลองที่สร้างขึ้นระหว่างแบบจำลองที่เป็นเนื้อเยื่อตับและผลของเนื้อเยื่อตับที่ทำการทดลองจริง โดยจะทำการศึกษาถึงลักษณะของการกระจายของอุณหภูมิ ลักษณะและขนาดของรอยแผลที่เกิดขึ้นและผลกระทบที่เกิดขึ้นของการจัดเรียงของแต่ละสายอากาศ ว่ามีผลต่อการทำลายเซลล์มะเร็งระดับด้วยคลื่นความถี่ไมโครเวฟอย่างไร รวมไปถึงเปรียบเทียบผลเมื่อมีการคอนโทรลค่าพลังงานที่ป้อนเพื่อควบคุมอุณหภูมิกับแบบที่ให้ค่าพลังงานคงที่นั้นให้ผลที่ต่างกันอย่างไร

1.7 โครงสร้างวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะแบ่งเนื้อหาเป็น 6 บท ในแต่ละบทจะมีเนื้อหาดังต่อไปนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความจำเป็นและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมติฐาน แนวคิดของงานวิจัย และขอบเขตของงานวิจัย

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องซึ่งจะประกอบไปด้วย ลักษณะกายวิภาคเบื้องต้นของตับ การถ่ายเทความร้อน พื้นฐานการกระจายความร้อนในเนื้อเยื่อ สมการความร้อนทางชีววิทยา โรคมะเร็ง การแพร่กระจายมะเร็ง ขั้นตอนการเกิดมะเร็ง

บทที่ 3 กล่าวถึงระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การทดลองวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics โดยอธิบายถึง การประมวลผลการทดลองวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการสร้างแบบจำลองการกำหนดเงื่อนไขในการคำนวณ การประมวลผลแบบจำลอง การแสดงลักษณะของผลการจำลอง ขั้นตอนการทดลองจริง

บทที่ 4 แสดงถึงผลการทดลอง ในการวิเคราะห์แบบจำลองด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยมีลักษณะแบบจำลอง 5 รูปแบบคือ แบบจำลองที่วางเรียงกันตามแต่ละมุมมองจากการจัดเรียงที่ 0 30 45 60 และ 90 องศา แสดงผลการจำลองเทียบกับผลการทดลองจริง

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะแนวทางในการดำเนินงานวิจัยต่อไป

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการและทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้วิเคราะห์ปัญหาในงานวิจัยซึ่งประกอบไปด้วย ปฏิกริยาของคลื่นไมโครเวฟกับเนื้อเยื่อ พื้นฐานการกระจายความร้อนในเนื้อเยื่อ สมการความร้อนทางชีววิทยา ลักษณะทางกายวิภาคเบื้องต้นของตับ โรคมะเร็ง

2.2 สนามแม่เหล็กไฟฟ้าและปฏิกริยาของคลื่นไมโครเวฟกับเนื้อเยื่อ [2]

พื้นฐานรายละเอียดของการแมกเนตริคส์สามารถดูได้จาก ภาคผนวก ข. ซึ่งรายละเอียดที่จะกล่าวต่อไปนี้จะอธิบายถึงความร้อนที่เกิดขึ้นในเนื้อเยื่อจากพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (EM)

2.2.1 ปฏิกริยาไมโครเวฟ และวัสดุทางชีวภาพ (Interaction of microwave and biological material)

โดยทั่วไปนั้นวัสดุทางชีวภาพเป็นตัวกลางแบบสูญเสียสำหรับคลื่น EM ที่มีความนำไฟฟ้าจำกัด วัสดุทางชีวภาพเหล่านี้ไม่เป็นทั้ง ไดอิเล็กทริกที่ดีหรือตัวนำที่ดี เมื่อคลื่น EM เดินทางผ่านวัสดุเหล่านี้พลังงานของคลื่น EM จะถูกดูดซับโดยวัสดุนั้น การวัดปริมาณการดูดซับในตัวกลางชีวภาพมักจะวัด เป็นค่า SAR (specific absorption rate) หรือค่าอัตราการดูดซับจำเพาะ [3] ซึ่งเป็นค่าอัตราของกำลังงานที่กระจายต่อความหนาแน่นของวัสดุ โดยปริมาณการดูดซับสามารถเขียนได้ดังนี้

$$SAR = \frac{\sigma}{\rho} |E|^2 \quad (2.1)$$

SAR คือ ปริมาณการดูดซับพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในเนื้อเยื่อต่างๆ

E คือ สนามไฟฟ้ามีหน่วยเป็น V/m

σ คือ ความสามารถในการนำไฟฟ้าของเนื้อเยื่อตัว

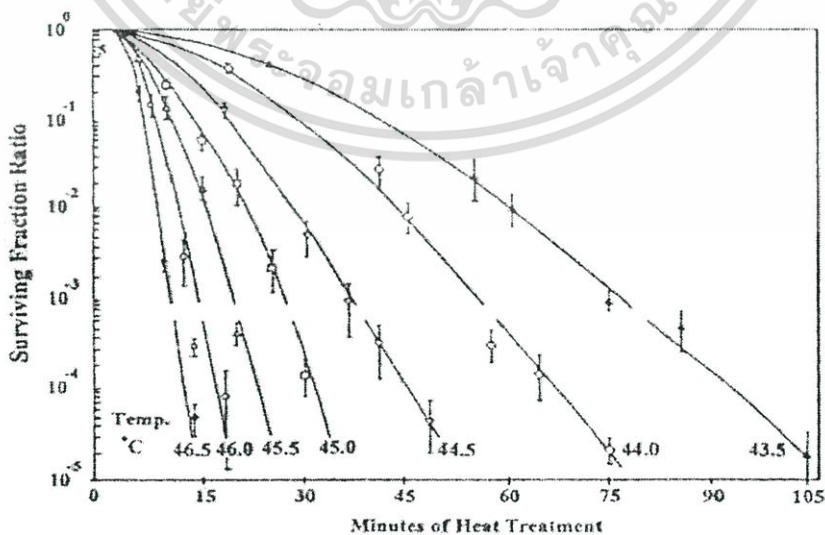
ρ คือ ความหนาแน่นจำเพาะของเนื้อเยื่อตัว

พลังงานของคลื่น EM ที่ถูกดูดซับไปในวัสดุชีวภาพจะทำให้เกิดความร้อน ส่งผลให้อุณหภูมิของวัสดุสูงขึ้น ความร้อนและอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงทางกล และการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของวัสดุชีวภาพซึ่งปรากฏการณ์นี้ได้ถูกบันทึกไว้ครั้งแรกในปี 1946 โดยเพอร์ซี่ สเปนเซอร์ (Percy Spencer) ในรายงานของเพนเซอร์ได้กล่าวว่า เมื่อเขายืนใกล้แหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ เขาได้สังเกตถึงความร้อนที่เกิดขึ้นในเนื้อเยื่อตัว ซึ่งเนื้อเยื่อตัวนั้นเป็นวัสดุทางชีวภาพ

ชนิดหนึ่ง ผลของความร้อนในเนื้อเยื่อต้นนี้เองได้เป็นพื้นฐาน ในการวิจัยการรักษามะเร็งตับด้วยคลื่นไมโครเวฟในวิทยานิพนธ์นี้

2.3 พื้นฐานการกระจายความร้อนภายในเนื้อเยื่อ

การใช้ความร้อนรักษาโรคมะเร็งเป็นการรักษาที่ทำให้อุณหภูมิ ณ บริเวณนั้น สูงขึ้นอยู่ในช่วง 41-45 องศาเซลเซียส [2], [22] เซลล์ที่อยู่บริเวณนั้นๆ จะถูกผลกระทบและมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับอุณหภูมิการใช้ความร้อนในการรักษามะเร็ง ได้มีการพัฒนาเทคนิคที่เรียกว่า Hyperthermia cancer therapy ซึ่งมีการใช้มาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1960 การรักษาโรคมะเร็งโดยใช้ความร้อนเป็นการรักษามะเร็งรูปแบบใหม่ ซึ่งมีพื้นฐาน และหลักการทางชีววิทยาที่สามารถพิสูจน์ ทดลอง และอธิบายได้ ซึ่งปัจจุบันการรักษาโรคมะเร็ง โดยใช้ความร้อนนี้สามารถรักษาโรคมะเร็งชนิดต่างๆ ได้ทั่วร่างกาย และได้ผลการรักษาที่น่าสนใจ การรักษามะเร็งด้วยความร้อนอาศัยหลักการให้ความร้อนกับเซลล์มะเร็งอยู่ในช่วง 41-50 องศาเซลเซียสและการรักษาระดับของอุณหภูมิไว้ให้คงที่ พื้นฐานของปรากฏการณ์ทางชีววิทยาสำหรับการรักษาโรคมะเร็งด้วยความร้อน จะมีอยู่สองปริมาณที่มีความสำคัญในการรักษา คือ อุณหภูมิ และเวลาในการให้ความร้อน ซึ่งตามรูปที่ 2.1 เมื่อให้อุณหภูมิสูงแก่เซลล์มะเร็ง ในช่วงเวลาเริ่มต้นเซลล์มะเร็งจะสูญเสียเป็นจำนวนมาก แต่เมื่อมีการลดอุณหภูมิที่ให้แก่เซลล์มะเร็ง ผลกระทบที่เกิดขึ้นคือ ต้องใช้เวลามากขึ้นเพื่อทำให้เซลล์มะเร็งมะเร็งตาย ในการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงๆ แก่เซลล์ จำนวนเซลล์จะเกิดการสูญเสียมาก และทำให้เซลล์ปกติที่อยู่รอบๆ เซลล์มะเร็งได้รับความเสียหายได้เช่นกัน ดังนั้นในการเพิ่มอุณหภูมิให้เหมาะสมนั้น สามารถทำลายเซลล์มะเร็งได้จำนวนมากและไม่เป็นอันตรายแก่เซลล์ปกติ



รูปที่ 2.1 กราฟแสดงผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์มะเร็ง [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 สมการความร้อนทางชีววิทยา (Bioheat Equation)

ในรูปแบบสมการการกระจายตัวของความร้อน [8], [9] ใช้ในการวิเคราะห์การกระจายความร้อน ภายในเนื้อเยื่อช่วงคลื่นความถี่วิทยุ ภายในสมการได้พิจารณาถึงกระแสที่ไหลผ่านภายในเนื้อเยื่อ พลังงานที่ถูกเก็บสะสมในรูปแบบของความร้อน การกระจายตัวของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านจากตัวอิเล็กโทรดลงสู่เนื้อเยื่อ การกระจายตัวของกระแสไฟฟ้าและการเก็บสะสมพลังงานในช่วงความถี่วิทยุ การแปรพลังงานที่สะสมเป็นรูปแบบของความร้อนที่กระจายตัวออกไปรอบๆเนื้อเยื่อ ซึ่งรูปแบบของสมการที่ครอบคลุมตัวแปรต่างๆเกิดขึ้นในเนื้อเยื่อ ดังนี้

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = \rho_{bl} C_{bl} \omega_{bl} (T_{bl} - T) + Q_m + Q_{ext} \quad (2.2)$$

$$h_{bl} = \rho_{bl} C_{bl} \omega_{bl} \quad (2.3)$$

โดยที่

ρ = ความหนาแน่นจำเพาะ (kg/m^3)

C = ค่าความจุความร้อนจำเพาะ ($\text{J/kg}\cdot\text{K}$)

k = ค่าการนำความร้อนจำเพาะ ($\text{W/m}\cdot\text{K}$)

T_{bl} = อุณหภูมิของเลือด (โดยกำหนดให้มีอุณหภูมิที่ 37C)

ρ_{bl} = ความหนาแน่นจำเพาะของเลือด (kg/m^3)

C_{bl} = ค่าความจุความร้อนจำเพาะของเลือด ($\text{J/kg}\cdot\text{K}$)

ω_{bl} = อัตราการไหลของเลือด ($1/\text{s}$)

h_{bl} = สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของเลือดที่ไหลเวียน

Q_m = พลังงานที่เกิดจากการกระบวนการเมตาบอลิซึม (W/m^3)

Q_{ext} = ค่าพลังงานจากภายนอก (W/m^3)

โดยในการส่งผ่านความร้อนในเนื้อเยื่อนั้นจะพิจารณาเฉพาะการพาความร้อน การนำความร้อน และแหล่งกำเนิดความร้อนต่างๆ ที่เกิดขึ้นในเนื้อเยื่อ ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นนั้นประกอบด้วย Q_m คือความร้อนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเผาผลาญในร่างกายและ Q_{ext} เป็นความร้อนที่เกิดจากแหล่งกำเนิดต่างๆ โดยในงานวิจัยฉบับนี้จะพิจารณาการเกิดความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ เพราะฉะนั้นค่าในส่วนของ Q_{ext} จะเป็นความร้อนที่เกิดจากคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งเกิดจากค่าความต้านทานความร้อนที่เกิดขึ้นในเนื้อเยื่อแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$Q_{ext} = \rho \cdot SAR = \sigma \cdot E^2 \quad (2.4)$$

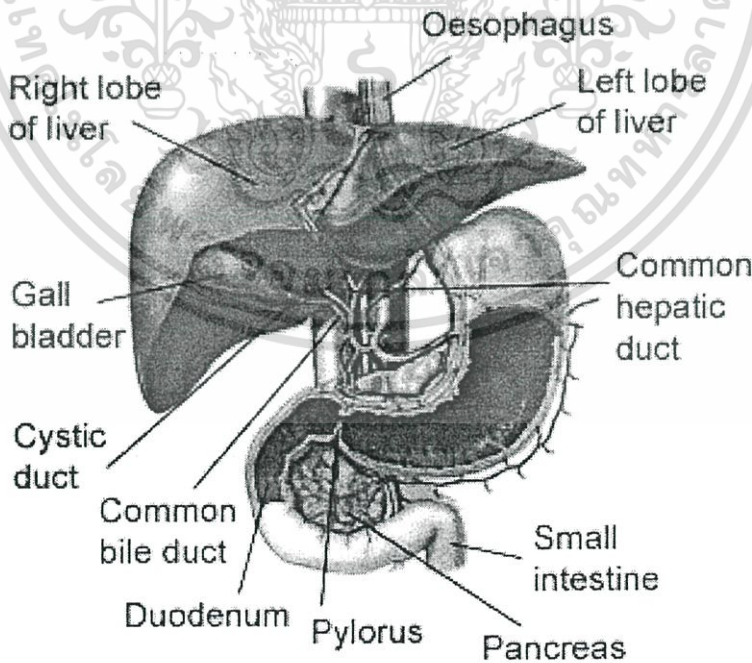
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยค่า SAR คืออัตราการดูดซับจำเพาะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในเนื้อเยื่อ และจะเห็นได้ว่าค่า Q_{ext} จะเกิดขึ้นจากสนามไฟฟ้าเท่านั้น

หลังจากที่ทราบถึงค่าทางฟิสิกส์ที่ต้องการนำมาแก้ปัญหาแล้ว เราจะนำเอาวิธีการคำนวณทาง ไฟไนต์เอลิเมนต์มาทำการแก้ไขปัญหา โดยรายละเอียดจะกล่าวถึงนิยามและวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในบทต่อไป

2.5 ลักษณะทางกายวิภาคเบื้องต้นของตับ[21]

ตับโดยปกติในผู้ใหญ่จะมีน้ำหนักราว 1.3 ถึง 3.0 กิโลกรัม ในขณะที่มีชีวิต ตับมีสีน้ำตาลแกมแดง มีลักษณะนุ่มและฉีกขาดง่าย ตับเป็นอวัยวะที่มีขนาดใหญ่ที่สุดเป็นอันดับสอง รองจากผิวหนัง และเป็นต่อมที่มีขนาดใหญ่ที่สุดในร่างกาย ตับจะมีรูปร่างคล้ายลิมขนาดใหญ่ แต่ด้านบนด้านหน้า และด้านหลังกลมมน ตับจะวางตัวอยู่ทางด้านขวาบนของช่องท้องและอยู่ใต้กระบังลม นอกจากนี้บางส่วนของตับยังตั้งอยู่บนกระเพาะอาหาร ปลายทางด้านซ้ายสุดของตับจะชี้ไปทางม้าม และบนพื้นผิวด้านหน้าของตับยังมีถุงน้ำดีวางตัวอยู่อีกด้วย พื้นผิวของตับเกือบทั้งหมดจะถูกคลุมด้วยเยื่อช่องท้อง ซึ่งเป็นเยื่อสองชั้นที่คลุมอยู่บนอวัยวะต่างๆทางด้านหน้าของช่องท้องเพื่อลดการเสียดสีระหว่างอวัยวะ ส่วนใหญ่ของตับอยู่ทางขวา วัดจากหน้าไปหลังยาว 12.5 เซนติเมตร และจะลดเหลือครึ่งเดียวในแนวกลางตัว



รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะกายวิภาคของตับ

2.5.1 หน้าที่การทำงานของตับ

ตับเป็นอวัยวะที่สำคัญมากอันหนึ่งของร่างกายทำหน้าที่มากกว่าอวัยวะอื่นๆหลายอวัยวะ นอกจากนี้หน้าที่เกี่ยวข้องกับการย่อยอาหารแล้วตับยังมีหน้าที่อื่นๆ อีกดังนี้

1. สร้างน้ำดีซึ่งหน้าที่เป็นน้ำย่อยอาหารและเป็นตัวขับถ่ายสารจำพวกคลอเลสเตอรอล
2. สะสมคาร์โบไฮเดรต ไว้ในรูปของไกลโคเจน (glycogen) และเมื่อร่างกายต้องการจะปล่อยเข้ากระแสเลือดในรูปของกลูโคส
3. สร้างโปรตีนที่พบในพลาสมาเป็นต้นว่า Albumin, Heparin และ Fibrinogen ซึ่งจำเป็นสำหรับทำให้เลือดแข็งตัว
4. สังเคราะห์ Prothrombin โดยอาศัยวิตามินเคช่วย
5. สังเคราะห์กรดอะมิโนจากสารประกอบต่างๆ
6. เคลื่อนย้ายหมู่อะมิโนออกจากกรดอะมิโน
7. เป็นแหล่งสร้างเม็ดเลือดแดงในทารกขณะอยู่ในครรภ์ เมื่อทารกคลอดหน้าที่นี้จะหยุดไป
8. สลายฮีโมโกลบินของเม็ดเลือดแดงออกเป็น Globin และ Heme จากนั้น Kupffer's cell ในตับจะสลาย Heme ออกเป็น Biliverdin และธาตุเหล็ก
9. เป็นที่เก็บสะสมวิตามินบี12 ซึ่งจำเป็นอย่างยิ่งในการสร้างเม็ดเลือดแดงเพื่อป้องกันโรคโลหิตจาง
10. เป็นที่เก็บสะสมวิตามินเอและวิตามินดี
11. เก็บสะสมธาตุเหล็กและทองแดง
12. ทำลายสิ่งที่เป็นพิษ (Detoxification) ต่อร่างกาย กำจัดแอมโมเนียในเลือดโดยเปลี่ยนให้เป็นยูเรียซึ่งมีพิษน้อย
13. เป็นศูนย์กลางเมตาบอลิซึมของคาร์โบไฮเดรตและไขมัน

2.6 โรคมะเร็ง

มะเร็งเป็นโรคร้ายชนิดหนึ่ง ซึ่งเป็นได้ทั้งในสัตว์และมนุษย์ทุกชนชาติทุกภาษา ทุกเพศ ทุกวัย และทุกฐานะ มนุษย์ไม่ว่าจะอยู่ในป่าหรือในเมืองของทุกประเทศ ทุกทวีปในส่วนต่างๆของโลกมีโอกาสมะเร็งได้เหมือนกัน ผิดกันแต่ตำแหน่งของอวัยวะที่เป็นเท่านั้น ซึ่งเป็นมากน้อยต่างกัน โรคมะเร็งกำลังเป็นปัญหาทางสาธารณสุขที่สำคัญของทุกประเทศทั่วโลก ไม่ว่าจะเป็นประเทศที่พัฒนาแล้ว หรือประเทศที่กำลังพัฒนา ในมโนภาพของบุคคลทั่วไป โรคมะเร็งเป็นโรคที่น่ากลัวรักษาให้หายขาดได้ยาก และเมื่อเป็นแล้วส่วนใหญ่จะต้องเสียชีวิตทุกรายด้วยความทุกข์ทรมาน ความจริงแล้วโรคมะเร็งส่วนใหญ่จะสามารถรักษาให้หายขาดได้ ถ้าได้รับการรักษาด้วยวิธีการที่ถูกต้องตั้งแต่ในระยะที่เพิ่งเริ่มเป็น

มะเร็งคือ ก้อน ตุ่มไต ที่ผิดปกติที่ปรากฏภายในหรือบริเวณผิวหนังของร่างกาย เรียกรวมๆกัน ว่า เนื้องอก(Neoplasm, Neoplasia, New growth, Tumor) เนื้องอกนี้เกิดขึ้นมาใหม่จากเนื้อเยื่อของร่างกาย อยู่นอกเหนือการควบคุมของร่างกาย และไม่มีประโยชน์หรือมีโทษต่อร่างกาย เนื้องอกแบ่งออกเป็น 2 ชนิด

1. เนื้องอกชนิดธรรมดา (Benign tumor) โดยปกติจะมีผลต่อร่างกายน้อยมาก นอกจากเกิดในอวัยวะที่มีเนื้อที่จำกัด เช่น ภายในสมอง ทำให้เกิดการกดดันต่อเนื้อสมองปกติโดยรอบอย่างมาก ทำให้เสียชีวิตได้ หรืออาจเกิดภาวะแทรกซ้อน เช่น ก้อนเนื้องอกที่มีก้านอาจบิดตัว ทำให้เกิดความเจ็บปวด เกิดการเน่าตายของก้อนเนื้องอก มีเลือดออก หรือมีการติดเชื้อได้ และต่อมาเนื้องอกที่มีการสร้างฮอร์โมน เช่น เนื้องอกของต่อมใต้สมอง ต่อมหมวกไต ตับอ่อน เป็นต้น ทำให้ร่างกายมีการผิดปกติในระบบฮอร์โมนเป็นอย่างมาก

2. เนื้องอกชนิดร้าย (Malignant tumor) หรือที่เรียกกันทั่วไปว่ามะเร็ง(Cancer) นั้นเอง มะเร็งอาจจะเกิดในลักษณะที่เป็นก้อนมะเร็ง หรืออาจจะเกิดในลักษณะที่เซลล์มะเร็งกระจายไปทั่วระบบอวัยวะนั้นๆ อาทิ เช่นมะเร็งเม็ดเลือดขาว เซลล์มะเร็งจะกระจายไปทั่วระบบการไหลเวียนเลือด เป็นต้น ฉะนั้น มะเร็งคือ เนื้องอกชนิดร้ายที่เกิดขึ้นมาใหม่จากเนื้อเยื่อปกติของร่างกาย มีการเจริญเติบโตอยู่นอกเหนือการควบคุมร่างกาย และมีโทษต่อร่างกาย เซลล์มะเร็งจะมีการแบ่งตัวอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดเป็นก้อนหรือเป็นแผลมะเร็งขนาดใหญ่ ลักษณะการโตของก้อนมะเร็งจะเป็นแบบแทรกซึม หรือมีส่วนยื่นเข้าไปในเนื้อเยื่อปกติโดยรอบ การแทรกซึมเช่นนี้ จึงมีการทำลายหลอดเลือดทำให้มีเลือดออก หรือจากการที่ก้อนมะเร็งโตเร็วมาก จนขาดเลือดไปหล่อเลี้ยง จึงเกิดการเน่าตายของเซลล์มะเร็ง และมีลักษณะที่สำคัญของมะเร็งคือ เซลล์มะเร็งจากมะเร็งปฐมภูมิสามารถแพร่กระจายไปได้ทั่วร่างกาย ไปเกิดขึ้นใหม่เป็นมะเร็งทุติยภูมิตรงส่วนอื่นของร่างกายที่อยู่ห่างไกลออกไป มะเร็งแต่ละชนิดจะมีความรุนแรงแตกต่างกันและยังขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์เฉพาะระหว่างมะเร็งนั้นกับตัวผู้ป่วยโดยตรง ความรุนแรงจึงแตกต่างกันในแต่ละบุคคล แต่ละก้อนมะเร็งในคนเดียวกันหรือแม้แต่มะเร็งก้อนเดียวกันยังมีอัตราการเจริญเติบโตไม่เท่ากัน มะเร็งบางชนิดมีการแพร่กระจายได้รวดเร็วมาก แม้ว่าจะเพิ่งเริ่มเป็น มะเร็งแต่ละชนิดชอบแพร่กระจายไปเฉพาะอวัยวะบางอวัยวะเท่านั้น เช่น มะเร็งเต้านม ชอบแพร่กระจายไปที่กระดูกหรือตับมากกว่าอวัยวะอื่น เป็นต้น

2.6.1 การแพร่กระจายของมะเร็ง

นอกจากก้อนมะเร็งจะมีการเติบโตแทรกซึมเข้าไปในเนื้อเยื่อปกติโดยรอบแล้ว ยังมีการแพร่กระจายไปได้ไกลๆ เพราะเซลล์มะเร็งมักจะหลุดออกจากกันได้ง่าย เนื่องจากที่ผนังของเซลล์มะเร็งจะมีแคลเซียมไอออนน้อยกว่า และมีประจุไฟฟ้ามากกว่าที่ผนังของเซลล์ปกติ นอกจากนี้ ยังพบว่าในก้อนมะเร็งยังมีน้ำย่อยที่จะละลายเนื้อเยื่อต่างๆ เช่น น้ำย่อยโปรตีน

(Protease) นำย่อยสารไฮอะลิวรีน (Hyaluronidase) และนำย่อยอะมิโนเปปไทด์ (Amino peptidase) เซลล์มะเร็งมักจะมีรูปทรงกลมต่างจากเซลล์ปกติ ซึ่งมักจะเป็นรูปแบน ดังนั้นเซลล์มะเร็งจึงมีส่วนสัมผัสและการยึดเหนี่ยวระหว่างเซลล์น้อย

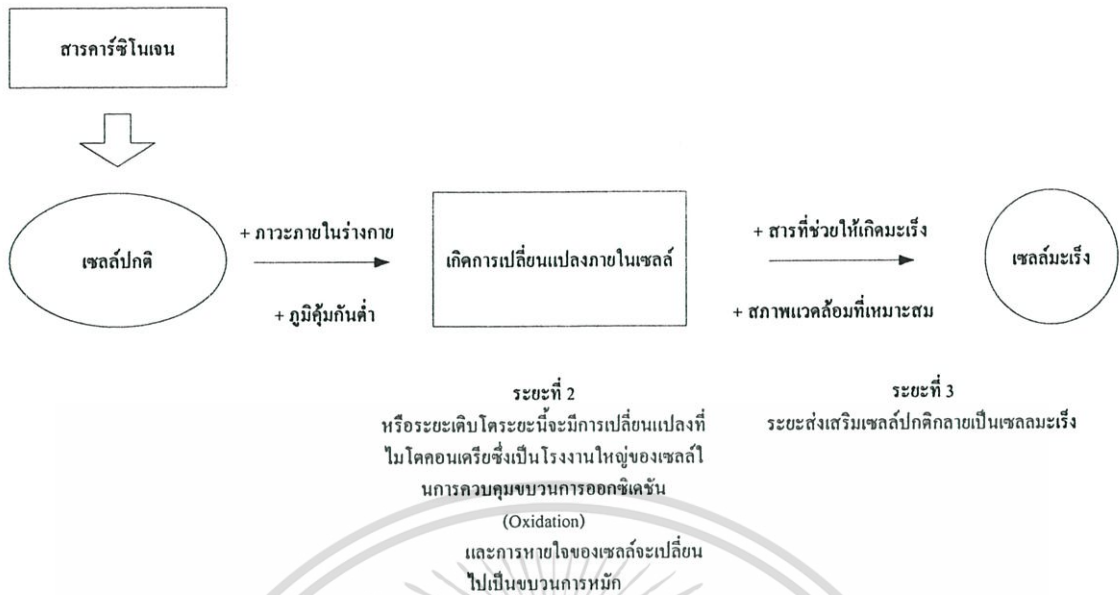
ทฤษฎีของการแพร่กระจายมะเร็ง ในปัจจุบันนี้มีทฤษฎีที่เชื่อกันมาก 3 ทฤษฎีคือ

1. ทฤษฎีทางกลศาสตร์ (Mechanical theory) โดยเซลล์จะหลุดออกจากกันได้ง่าย แล้วแทรกตัวเข้าผนังของหลอดเลือดหรือหลอดน้ำเหลือง (Diapedesis) เหมือนเม็ดเลือดขาว หรือจากการแตกของหลอดเลือด ทำให้เซลล์มะเร็งเข้าไปในกระแสเลือดหรือกระแสน้ำเหลืองได้
2. ทฤษฎีของการเลือกเฉพาะ (Selective affinity theory) ลักษณะของอวัยวะที่แพร่กระจายจะมีความสำคัญและควบคุมลักษณะของการแพร่กระจาย อวัยวะบางอย่างเหมาะที่จะเป็นตำแหน่งที่แพร่กระจายของมะเร็งบางชนิด
3. ทฤษฎีการเปลี่ยนรูป (Transformation theory) คือ ดีเอ็นเอจีโนม (DNA genome) จะเข้าไปในเซลล์ปกติ และร่วมกับมีความบกพร่องในระบบภูมิคุ้มกันของร่างกาย ทำให้เซลล์ปกติเปลี่ยนเป็นเซลล์มะเร็ง

2.6.2 ขั้นตอนการเกิดมะเร็ง

โดยสรุปแล้ว การเกิดมะเร็งมีปัจจัยหลายอย่างรวมๆกัน ขั้นตอนการเกิดมะเร็งแบ่งออกเป็น 3 ระยะ ซึ่งถ้านับระยะเวลาตั้งแต่เซลล์ปกติได้รับสารก่อมะเร็งจนกระทั่งเห็นเป็นก้อนมะเร็งจะใช้เวลาเป็นปีหรือหลายปี เมื่อเกิดเป็นเซลล์มะเร็งขึ้นแล้ว เนื่องจากเซลล์มะเร็งมีความพิการหรือมีการผิดปกติที่ขึ้น หรือโครโมโซม ฉะนั้น เซลล์มะเร็งจะแบ่งตัวอย่างรวดเร็วและให้เซลล์ลูกที่เป็นเซลล์มะเร็งเสมอ จะไม่แบ่งตัวให้เซลล์ลูกที่เป็นเซลล์ปกติ ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า เซลล์มะเร็ง มีคุณสมบัติของการถ่ายทอดตรง (Breed-true property) เซลล์มะเร็งมีการเจริญเติบโตโดยมีวงชีพของเซลล์เหมือนเซลล์ปกติ คือเมื่อเซลล์แบ่งตัวให้เป็นเซลล์ลูก 2 เซลล์แล้ว บางเซลล์อาจอยู่นอกวงชีพของเซลล์เรียกว่า ระยะจี₀ (G₀) ซึ่งเป็นเซลล์ที่ไม่มีการเจริญเติบโต แต่ไม่ตายและอาจกลับเข้าสู่วงชีพของเซลล์ได้ถ้ามีสิ่งกระตุ้น เซลล์ส่วนใหญ่จะเข้าสู่ระยะจี₁ (G₁, Presynthetic หรือ postmitotic) เป็นระยะที่เซลล์เริ่มแสดงลักษณะเฉพาะของมัน และในตอนท้ายๆของระยะนี้จะมีการเตรียมการสร้างดีเอ็นเอโดยการสร้างน้ำย่อยต่างๆ ถัดไปเป็นระยะเอส (S, Synthetic phase) คือมีการสร้างดีเอ็นเอ จากนั้นจะเข้าสู่ระยะจี₂ (G₂, Postsynthetic หรือ perimitotic phase) ซึ่งไม่มีการสร้างดีเอ็นเออีก แต่มีการสร้างโปรตีนเพิ่มเพื่อนำไปสร้างอาร์เอ็นเอ และสุดท้ายเซลล์จะเข้าสู่ระยะเอ็ม (M) คือระยะการแบ่งตัว (Mitotic phase) เซลล์มะเร็งจะสร้างดีเอ็นเอช้ากว่าหรือใกล้เคียงกับเซลล์ปกติแต่เซลล์มะเร็งตายยากกว่า เพราะเซลล์ค้างอยู่ในระยะใดระยะหนึ่งของวงชีพของเซลล์ ส่วนใหญ่ที่พบคือในระยะจี₁ และจี₀ การที่เซลล์มะเร็งมักมีอัตราการแบ่งตัวเร็วกว่าเซลล์ปกติ จึงเป็นผลให้เซลล์มะเร็งรวมตัวกันโตเป็นก้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 แผนภาพแสดงขั้นตอนของการเกิดมะเร็ง

การศึกษาอัตราการเจริญเติบโตของเซลล์มะเร็งโดยเฉพาะเป็นก้อน อาจทำได้โดยการวัดระยะเวลาที่เซลล์มะเร็งแบ่งตัวจนปริมาณของก้อนมะเร็งเป็น 2 เท่า ความแตกต่างในการเจริญเติบโตของแต่ละก้อนมะเร็งในผู้ป่วยรายเดียวกัน หรือต่างคนกัน หรือแม้แต่ในก้อนมะเร็งก้อนเดียวกันยังมีการเจริญเติบโตเร็วช้าต่างกัน มีมะเร็งบางชนิดในคนที่ก้อนโตช้ามาก ๆ ทั้งที่เซลล์มีอัตราการแบ่งตัวเร็ว ทั้งนี้เนื่องจากปัจจัยหลายอย่าง เช่น เซลล์กลับไปอยู่นอกวงชีพ ทำให้ไม่มีการแบ่งตัว หรือมีการหลุดลอกออกไป หรือมีการตายของเซลล์ เช่น แก่ตาย ถูกบีบตาย ขาดอาหาร หรือขาดออกซิเจน หรือถูกทำลายโดยระบบภูมิคุ้มกันของร่างกายโดยเม็ดเลือดบางชนิด ก้อนมะเร็งแต่ละก้อนจะมีหลอดเลือดมาเลี้ยง โดยเฉพาะ จึงมีผู้เชื่อว่าการโตของก้อนมะเร็งจะถูกควบคุมโดยสารชนิดหนึ่งที่เรียกว่า สารกระตุ้นการเจริญของเซลล์บุผนังด้านในของหลอดเลือดฝอย (Tumour angiogenesis factor-TAF) การมีหลอดเลือดฝอยใหม่ๆ เกิดได้เร็ว ก็จะทำให้ก้อนมะเร็งโตขึ้นเร็วด้วย ก้อนมะเร็งอาจแบ่งได้เป็น 3 ส่วน คือ

1. ส่วนเจริญ เป็นส่วนรอบนอกของก้อนเซลล์ได้รับอาหารและออกซิเจนจากหลอดเลือดอย่างสมบูรณ์แบ่งตัวได้เร็ว
2. ส่วนที่ไม่เจริญอยู่ลึกถัดเข้ามา เป็นเซลล์ที่ยังมีชีวิตแต่ไม่แบ่งตัว ส่วนใหญ่อยู่ในระยะจี้,
3. ส่วนที่แกนหรือส่วนตาย อยู่ตรงกลางของก้อนมะเร็ง ประกอบด้วยเซลล์ที่ตายแล้ว เพราะขาดออกซิเจน หรือถูกบีบตาย แต่เซลล์ชั้นนอกๆ ของส่วนนี้อาจจะไม่ตายแต่ไม่แบ่งตัว และส่วนใหญ่อยู่ในระยะจี้, เพราะเซลล์สามารถได้พลังงานจากการสลายตัวของไกลโคเจนในเซลล์เมื่ออยู่ในภาวะที่ขาดออกซิเจนเหมือนแบคทีเรียบางชนิด

เนื่องจากออกซิเจนจากหลอดเลือดฝอยจะมีการซึมซาบได้ในระยะจำกัด และถ้าเซลล์อยู่ห่างจากหลอดเลือดฝอยเกินกว่าระยะทาง 150 ไมโครเมตร จะถือว่าเซลล์นั้นอยู่ในภาวะขาดออกซิเจน ฉะนั้น เมื่อก้อนมะเร็งมีขนาดโตขึ้น ส่วนแกนหรือส่วนตายจะมีขนาดโตขึ้นด้วย ในขณะที่ส่วนเจริญและส่วนไม่เจริญมักจะมีขนาดคงที่



รูปที่ 2.4 แผนภาพแสดงลักษณะของก้อนมะเร็ง

2.7 หลักการทำลายเซลล์มะเร็ง

ในปัจจุบันผู้ที่ป่วยเป็นมะเร็ง ที่เกิดขึ้นในตับ มีอัตราการตายมากกว่า 1 ล้านคนต่อปีทั่วโลก วิธีการในรักษาในปัจจุบันก็มีอยู่หลายวิธี ซึ่งวิธีการรักษามะเร็งตับที่ใช้กันอยู่ในอดีตถึงปัจจุบันก็จะมีดังนี้คือ

1. การผ่าตัด เป็นวิธีการรักษาที่สามารถทำให้ผู้ป่วยหายขาดได้แน่นอนกว่าวิธีอื่น และถือว่าการผ่าตัดเอาก้อนมะเร็งออกเป็นวิธีที่ดีที่สุด แต่ก็มีผู้ป่วยจำนวนหนึ่งประมาณ 20-70% ที่ไม่สามารถเข้ารับการผ่าตัดได้ เนื่องจากมีข้อจำกัดจากปัจจัยหลายอย่าง เช่น ตำแหน่งของก้อนมะเร็ง, ขนาดและจำนวนก้อนมะเร็ง, ความแข็งแรงและสภาพความพร้อมของผู้ป่วยที่จะรับการผ่าตัด หรือมีโรคตับแข็งหรือโรคอื่น เช่น โรคหัวใจ ร่วมด้วย นอกจากวิธีการผ่าตัดแล้ว มีการศึกษาวิจัยว่าการให้ยาเคมีบำบัดทางหลอดเลือดดำและการฉายรังสีนั้น ให้ผลการรักษาที่ไม่ดีนักในผู้ป่วยกลุ่มนี้
2. การฉีดยาเคมีบำบัดและสารอุดกั้นหลอดเลือดผ่านทางสายสวนหลอดเลือดแดง (Transarterial-oily chemoembolization; TOCE) เป็นวิธีการรักษาโดยการฉีดยาเคมีบำบัดเข้าทางเส้นเลือดแดง ที่ไหลผ่านตรงไปเลี้ยงก้อนมะเร็ง ทำให้ก้อนมะเร็งยุบหรือฝ่อได้ แต่โอกาสที่จะหายขาดนั้นมีน้อย

3. การฉีดทำลายมะเร็งด้วยแอลกอฮอล์ Alcohol ablation (Percutaneous ethanol injection; PEI) เป็นวิธีการรักษาโดยจะใช้เข็มสอดผ่านทางผิวหนังเข้าไปฉีดสารแอลกอฮอล์ 95% ethanol ที่ก้อนมะเร็งที่มีขนาดเล็กกว่า 3 เซนติเมตร เป็นวิธีการรักษาที่แพทย์เลือกทำมากที่สุด ซึ่งจะนำวิธีการนี้มาทำการรักษาผู้ป่วยที่ผ่าตัดไม่ได้

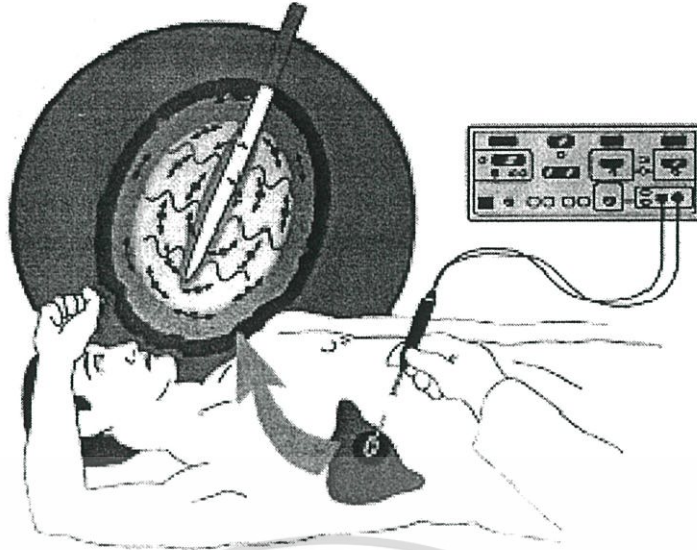
4. การทำลายเซลล์มะเร็งด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Microwave ablation) เป็นการรักษาโดยใช้คลื่นไมโครเวฟผ่านทางเข็มทำให้เซลล์มะเร็งเกิดความร้อนและตายไปในที่สุด ใช้ได้กับก้อนมะเร็งขนาด 3-5 เซนติเมตร

5. การทำลายเซลล์มะเร็งด้วยความเย็น (Cryosurgery) เป็นวิธีการรักษาโดยใช้ความเย็นจัดที่อุณหภูมิ ต่ำกว่า -35 องศาเซลเซียส จึงทำลายก้อนมะเร็ง การรักษาด้วยวิธีนี้ต้องมีการผ่าตัดร่วมด้วยดังนั้นจึงอาจทำให้เกิดโรคแทรกซ้อนได้ และนอกจากนี้แล้วการรักษาด้วยวิธีนี้ก็มิใช่ง่ายในการรักษาที่สูงด้วย

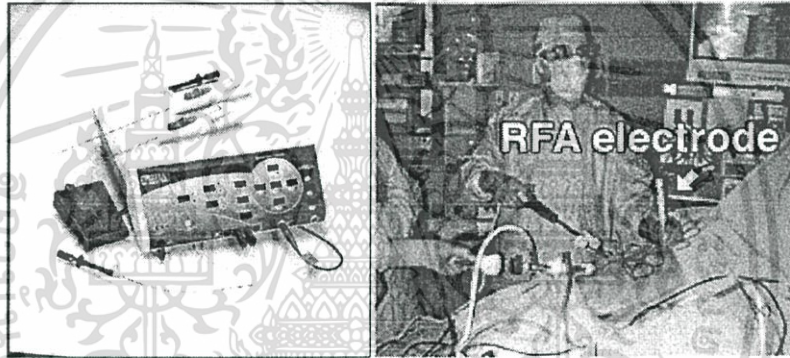
6.การทำลายเซลล์มะเร็งด้วยเลเซอร์ (Laser ablation) Laser-induced thermotherapy; LiTT โดยการรักษาด้วยวิธีนี้จะใช้แสงเลเซอร์ยังทำลายก้อนมะเร็ง การรักษาโดยใช้เลเซอร์พบว่าค่าใช้จ่ายในการรักษาค่อนข้างสูง

7. การทำลายเซลล์มะเร็งด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (Radiofrequency Ablation; RFA) เป็นวิธีการรักษาล่าสุด คือการนำคลื่นวิทยุความถี่สูง (radiofrequency) มาเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนต่อเนื้อเยื่อผ่านทางเข็มที่สอดผ่านทางผิวหนังเข้าไปที่ก้อนมะเร็ง ทำให้เซลล์มะเร็งแห้งฝ่อตายในที่สุด ใช้ได้กับมะเร็งขนาดไม่เกิน 5-7 เซนติเมตร เป็นวิธีที่แพทย์เลือกใช้แทนการฉีดทำลายเซลล์มะเร็งด้วยแอลกอฮอล์ [24],

การรักษาในรูปแบบการใช้คลื่นไมโครเวฟ (Microwave ablation) เป็นวิธีการรักษามะเร็งที่ถูกนำมาใช้รักษาในกรณีที่ผู้ป่วยไม่สามารถทำการผ่าตัดได้ โดยวิธีการรักษารูปแบบนี้ให้ผลการรักษาที่ดี สะดวก รวดเร็วและมีภาวะแทรกซ้อนต่ำ ซึ่งการรักษาด้วยการใช้คลื่นไมโครเวฟจะกระทำโดยการสอดเข็มเข้าไปในก้อนมะเร็งและปล่อยคลื่นไมโครเวฟเข้าไปจนทำให้เกิดความร้อนและความร้อนนี้เองก็จะทำให้เกิดการทำลายก้อนมะเร็ง ซึ่งบางส่วนของก้อนมะเร็งจะกลายเป็นก๊าซ ขณะที่บางส่วนเกิดการหดตัวและถูกพังผืด (Fibrous tissue) แทรกเข้ามาทดแทน

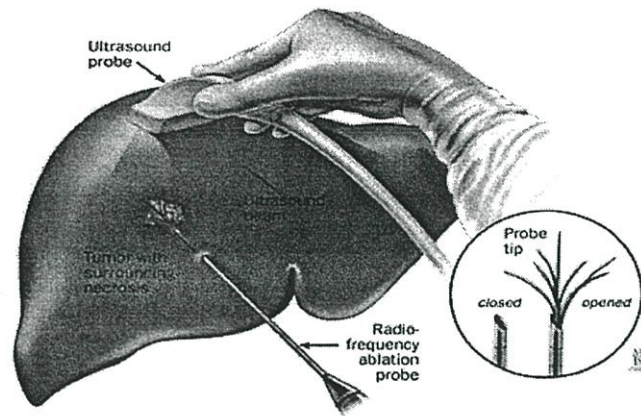


รูปที่ 2.5 แสดงรูปแบบการทำลายเซลล์มะเร็งด้วยคลื่นไมโครเวฟ



รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะของเครื่องกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ ในการรักษามะเร็ง

การทำลายเซลล์มะเร็งด้วยคลื่นไมโครเวฟ เป็นวิธีการใช้เครื่องจี้ให้ก้อนมะเร็งฝ่อลง หลักการทำงานคือเครื่องกำเนิด (Generator) จะปล่อยคลื่นไมโครเวฟผ่านไปยังโพรบ ซึ่งอยู่ใกล้กับบริเวณก้อนมะเร็ง โดยใช้คลื่นความถี่ในช่วง 2.45 GHz และจะใช้โพรบที่มีลักษณะเป็นสายอากาศแบบ Coaxial ยาวประมาณ 20 เซนติเมตร สอดเข้าไปในก้อนมะเร็งทำให้ก้อนมะเร็งเกิดความร้อนขึ้น การทำให้เกิดความร้อน 40 องศาเซลเซียสขึ้นไป โดยหลักการนี้คือทำให้เกิดความร้อนที่มากพอจะทำให้เซลล์ตายและให้เวลานานพอที่จะแผ่ขยายออกไปรอบๆ โดยไม่ทำให้ก้อนมะเร็งถูกเผาไหม้เกรียมได้ขนาดหนึ่ง [15]



รูปที่ 2.7 แสดงการใช้อัลตราซาวด์เป็นเครื่องมือนำทางหาตำแหน่งการรักษามะเร็งตับ

ในการรักษามะเร็งด้วยคลื่นไมโครเวฟ การรักษายจะทำโดยแพทย์ด้วยการเจาะผ่านผิวหนังเข้าไปยังก้อนมะเร็งตับ โดยใช้อัลตราซาวด์ (ultrasound), เอกซเรย์คอมพิวเตอร์ (computed tomography) หรือ เอ็มอาร์ไอ (MRI; magnetic resonance imaging) เป็นเครื่องมือนำทางให้เข็มเข้าสู่ก้อนมะเร็งเป้าหมาย โดยผู้ป่วยได้รับการฉีดยาชาเฉพาะที่ ยกเว้นในรายที่จำเป็นต้องผ่าตัดเปิดช่องท้อง เพื่อนำเข็มเข้าสู่เป้าหมายได้ตามต้องการ จากนั้นเนื้อเยื่อรอบปลายเข็มจะถูกกระตุ้นให้สั่นสะเทือนจากคลื่นไมโครเวฟ จึงเกิดความร้อน 90-100 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สามารถทำให้เซลล์มะเร็งตายได้ (เซลล์มะเร็งตายที่อุณหภูมิ 47-53 องศาเซลเซียส) โดยรอบปลายเข็ม หากทำตามข้อกำหนด ที่วางไว้ก็จะไม่ก่อให้เกิดผลข้างเคียงต่อเนื้อเยื่อที่อยู่รอบๆ การรักษาวิธีนี้เป็นการรักษาที่จัดอยู่ในกลุ่ม Minimal invasive method spectrum of image-guided thermotherapy ด้วยหลักการนี้เอง ผลการรักษาจะขึ้นอยู่กับขนาดของก้อนมะเร็งและดุลยพินิจของแพทย์ การรักษามะเร็งด้วยคลื่นความถี่วิทยุที่มีการใช้ในโรงพยาบาล และสถาบันการวิจัยต่างๆ มักใช้อัลตราซาวด์ เป็นตัวนำเข็มเข้าสู่เป้าหมาย เพราะสามารถมองเห็นขณะที่เข็มเคลื่อนเข้าสู่ก้อนมะเร็ง ได้ดีกว่าการใช้เครื่องมืออื่น นอกจากนี้อัลตราซาวด์สามารถจะเห็นขอบเขตสีขาวของความร้อนและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในก้อนมะเร็ง ขณะที่ทำการรักษาด้วย แต่ขอบเขตที่เห็นจากอัลตราซาวด์เป็นเพียงขอบเขตที่หวังผล Coagulated volume โดยประมาณเท่านั้น

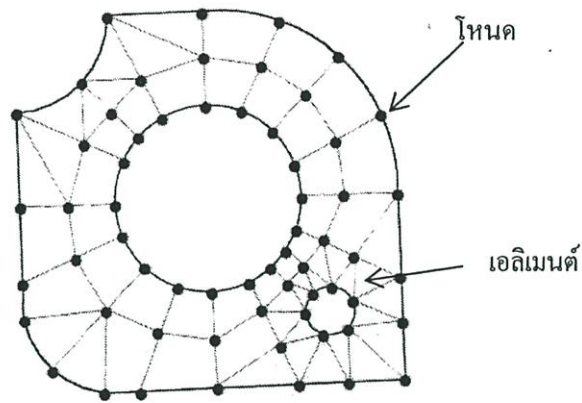
ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และกระบวนการทดลอง

3.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งจะประกอบด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ กระบวนการแก้ปัญหาวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ และการประยุกต์ใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ การประมวลผลการทดลองวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics ซึ่งประกอบไปด้วย ซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการประมวลผล กระบวนการวิเคราะห์วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วย COMSOL Multiphysics ลักษณะการควบคุมอุณหภูมิของแบบจำลอง การออกแบบแบบจำลอง การกำหนดค่าคงที่ต่างๆของแบบจำลอง การ MESH แบบจำลอง การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลอง การประมวลผลข้อมูลของแบบจำลองและขั้นตอนการทดลองจริงในเนื้อเยื่อตับ อุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.2 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method)

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) หรือ FEM เป็นวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขชนิดหนึ่งสำหรับแก้สมการเชิงอนุพันธ์ ในการแก้ปัญหาหนึ่งๆด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์จะทำการแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นเนื้อที่หลายๆชิ้นที่เรียกว่าเอลิเมนต์ (Element) ซึ่งสามารถจำลองรูปแบบที่เที่ยงตรง ดังรูปที่ 3.1 ในการแก้ปัญหาใดปัญหาหนึ่ง ปัญหานั้นจะต้องประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมา การหาค่าผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact solution) จะประกอบด้วยค่าต่างๆ เป็นจำนวนอนันต์ ซึ่งเราไม่สามารถหาค่าผลเฉลยได้ จึงต้องเปลี่ยนค่าทั้งหมดที่เป็นอนันต์ให้เป็นจำนวนที่นับได้ (Finite) ทำการแทนรูปร่างลักษณะของปัญหาด้วยเอลิเมนต์ที่มีขนาดต่างๆกัน หลักการทางไฟไนต์เอลิเมนต์จะเริ่มจากการพิจารณาเอลิเมนต์ทีละเอลิเมนต์ ทำการสร้างสมการให้แก่แต่ละเอลิเมนต์ที่สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหานั้นๆ จากนั้นจึงนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นมาประกอบเข้าด้วยกัน รวมเป็นระบบสมการชุดใหญ่ จากนั้นทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต ที่ให้มาลงในสมการชุดใหญ่ แล้วจึงทำการแก้สมการและจะเกิดผลเฉลยโดยประมาณที่ตำแหน่งต่างๆของปัญหานั้น



รูปที่ 3.1 แสดงแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ถูกแบ่งออกเป็นเอลิเมนต์และโหนด

กระบวนการวิเคราะห์ปัญหาใดๆ โดยทั่วไปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จะประกอบไปด้วย 5 ขั้นตอนหลักๆ ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การแบ่งโดเมนของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ กระบวนการขั้นตอนแรกนี้ โดยปกติจะใช้เวลามากในทางปฏิบัติ เพราะจำเป็นต้องสร้างรูปร่างของปัญหา (Geometry) อย่างถูกต้องขึ้นมาก่อน รูปร่างของปัญหาอาจประกอบด้วยส่วนเว้าส่วนโค้งที่มีความซับซ้อนในขั้นตอนนี้จึงจำเป็นต้องอาศัยความรู้อันประกอบไปด้วยประสบการณ์เป็นอย่างมาก

ขั้นตอนที่ 2 การเลือกใช้ชนิดของเอลิเมนต์ เอลิเมนต์ย่อยที่แบ่งบนโดเมนของปัญหานั้นอาจเป็นเอลิเมนต์ในรูปแบบของสามเหลี่ยมหรือสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่าก็ได้ หากแบ่งออกเป็นเอลิเมนต์สามเหลี่ยม ตัวไม่รู้ค่า (Unknowns) จะอยู่ที่มุมทั้งสามของสามเหลี่ยมนั้น ซึ่งเรียกกันว่าจุดต่อ (Node) การเลือกใช้ชนิดของเอลิเมนต์จะสอดคล้องกับลักษณะการกระจายของตัวไม่รู้ค่าที่สมมติขึ้นบนเอลิเมนต์นั้นๆ เช่นหากเลือกใช้เอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบสามจุดต่อที่มุมทั้งสามแล้ว ลักษณะการกระจายของตัวไม่รู้ค่าบนเอลิเมนต์นั้นจะถูกสมมติให้อยู่ในรูปแบบของแผ่นเรียบ เป็นต้น แต่หากเลือกใช้เอลิเมนต์แบบสี่เหลี่ยมแบบสี่จุดต่อที่มุมทั้งสี่ ลักษณะการกระจายของตัวไม่รู้ค่าบนเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมนี้อาจไม่เรียบแต่โค้งไปโค้งมาได้ ดังนั้นการเลือกใช้เอลิเมนต์ชนิดต่างๆ กันจึงมีผลโดยตรงกับผลลัพธ์ที่จะคำนวณได้

ขั้นตอนที่ 3 การประดิษฐ์สมการไฟไนต์เอลิเมนต์ สมการเชิงอนุพันธ์ที่สอดคล้องกับปัญหาที่วิเคราะห์อยู่ นั้นจะถูกเปลี่ยนไปเป็นสมการทางพีชคณิตที่เรียกกันว่า สมการไฟไนต์เอลิเมนต์สมการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่จะถูกสร้างขึ้นสำหรับแต่ละเอลิเมนต์เนื่องจากเอลิเมนต์ต่างมีขนาดไม่เท่ากัน กระบวนการประดิษฐ์สมการไฟไนต์เอลิเมนต์จากสมการเชิงอนุพันธ์นี้นับเป็นหัวใจหลักของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพราะหากมีความเข้าใจในขั้นตอนนี้แล้วก็สามารถประยุกต์ใช้วิธีการทำนองเดียวกันนี้ในการแก้ปัญหาคณิตศาสตร์อื่นๆ ได้

ขั้นตอนที่ 4 การรวมสมการไฟไนต์เอลิเมนต์เข้าด้วยกันแล้วแก้ระบบสมการใหญ่ สมการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่อยู่ในรูปแบบของสมการทางพีชคณิตซึ่งได้ประดิษฐ์ขึ้นสำหรับแต่ละเอลิเมนต์ใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่แล้วจำเป็นต้องนำมารวมกันอย่างถูกต้องและมีหลักการ การประกอบสมการไฟไนต์เอลิเมนต์แต่ละสมการเข้าด้วยกัน จะก่อให้เกิดระบบสมการขนาดใหญ่ จากนั้นจึงประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตของปัญหานั้นๆ ก่อนแก้ระบบสมการขนาดใหญ่หาค่าที่จุดต่อ ซึ่งผลลัพธ์ที่จุดต่อเหล่านี้ อาจแทนค่าอุณหภูมิหากเป็นการวิเคราะห์ปัญหาด้านการถ่ายเทความร้อน เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 5 การคำนวณหาค่าอื่นๆที่เหลือ จากนั้นจึงเป็นการหาค่าอื่นๆที่ต้องการทราบเพื่อที่จะทำให้ปัญหานั้นได้รับการวิเคราะห์โดยสมบูรณ์ เช่น ในการแก้ปัญหาด้านความร้อนเมื่อทราบอุณหภูมิตามตำแหน่งต่างๆแล้วก็จะสามารถคำนวณหาปริมาณพลั๊กซ์ความร้อนที่ไหลผ่านได้

3.3 กระบวนการแก้ปัญหาด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์

กระบวนการแก้ปัญหาด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ๆ 3 ขั้นตอน ดังนี้

1. กระบวนการขั้นต้น (pre-processor) คือ การสร้างรูปแบบไฟไนต์เอลิเมนต์จากรูปร่างลักษณะที่แท้จริงของปัญหา จากนั้นจึงประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตก่อนวิเคราะห์ปัญหานั้น การสร้างรูปแบบไฟไนต์เอลิเมนต์อันประกอบด้วยเอลิเมนต์จำนวนมากบนรูปร่างลักษณะของปัญหาที่กำหนดมาให้นั้น ตามปกติจะใช้เวลานาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากรูปร่างของปัญหามีความซับซ้อน ผู้สร้างรูปร่างบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ควรมีประสบการณ์ในการใช้ซอฟต์แวร์นั้นๆ มาสักระยะหนึ่ง จึงสามารถสร้างรูปแบบที่กำหนดได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพได้ ตั้งแต่การสร้างจุด เส้นตรง เส้นโค้งต่างๆ รวมทั้งพื้นผิว โดยข้อมูลของจุดเส้นตรง เส้นโค้ง และพื้นผิวเหล่านี้จะถูกเก็บในรูปแบบของสมการทางเรขาคณิตในหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์ เพื่อผู้ใช้สามารถสร้างเอลิเมนต์ทั้งขนาดและจำนวนต่างๆกันได้ โดยรูปแบบของไฟไนต์เอลิเมนต์ที่เกิดขึ้นยังเสมือนรูปร่างต้นแบบของจริงมากที่สุดรูปแบบของไฟไนต์นี้ยังประกอบไปด้วยหมายเลขของจุดต่อ หมายเลขของเอลิเมนต์และข้อมูลอื่นๆซึ่งจำเป็นต้องใช้ในกระบวนการวิเคราะห์ขั้นต่อไป รายละเอียดต่างๆ จำนวนมากเหล่านี้ปกติจะไม่แสดงบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ ยกเว้นผู้ใช้ต้องการให้แสดงเพื่อการตรวจสอบ หลังจากสร้างรูปแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ได้เสร็จสิ้นลงแล้ว ผู้ใช้จำเป็นต้องกำหนดเงื่อนไขขอบเขตอันอาจประกอบไปด้วย การกำหนดค่าให้กับบางจุดต่อของรูปแบบไฟไนต์เอลิเมนต์นั้น เงื่อนไขของเขตเหล่านี้ จำเป็นต้องเหมือนหรือใกล้เคียงกับของจริงให้มากที่สุดจึงจะนำไปสู่ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับความเป็นจริง

2. กระบวนการวิเคราะห์ ข้อมูลต่างๆของรูปแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นและเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดไว้ในขั้นตอนแรก จะถูกส่งเข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์ โปรแกรมคอมพิวเตอร์จะสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สอดคล้องกับปัญหานั้นสำหรับทุกๆเอลิเมนต์ ก่อนที่จะนำมาประกอบกันเข้าเป็นระบบสมการรวมขนาดใหญ่แล้วจึงประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดให้

จากนั้นจึงแก้ระบบสมการรวมขนาดใหญ่ขึ้น โดยเวลาที่ใช้ในการคำนวณจะขึ้นอยู่กับเอลิเมนต์ทั้งหมดที่ผู้ใช้ได้สร้างขึ้น และขนาดของระบบสมการรวมขนาดใหญ่ที่เกิดขึ้น หากสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหานั้นอยู่ในรูปแบบเชิงเส้น ระบบสมการรวมนี้จะถูกแก้เพียงครั้งเดียว ทำให้เวลาที่ใช้ในการคำนวณนั้นไม่มากนัก แต่หากสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหานั้นอยู่ในรูปแบบไม่เชิงเส้น ระบบสมการรวมนี้จะถูกแก้ด้วยการวนซ้ำ หลายรอบทำให้เวลาที่ใช้ในการคำนวณนั้นนานมากขึ้น โดยเฉพาะหากเป็นรูปแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ประกอบด้วยเอลิเมนต์เป็นจำนวนมาก ดังนั้นหากผู้ใช้ซอฟต์แวร์ไฟไนต์เอลิเมนต์สำเร็จรูปมีความเข้าใจถึงองค์ความรู้พื้นฐานภายในระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์บ้าง ก็จะช่วยในการตัดสินใจสิ่งต่างๆก่อนทำการวิเคราะห์ได้เป็นอย่างดี

3. กระบวนการขึ้นท่าย ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์ในขั้นตอนที่แล้วจะประกอบด้วยตัวเลขเป็นจำนวนมาก ซึ่งจำเป็นต้องใช้คอมพิวเตอร์กราฟิกส์ โดยเฉพาะกราฟฟิกส์เพื่อแสดงตัวเลขจำนวนมากเหล่านี้ออกมาบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ ทำให้ผู้ใช้สามารถเข้าใจปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว กระบวนการขึ้นท่ายนี้จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง ซึ่งรูปแบบของการแสดงผลลัพธ์นั้นมีหลายชนิด นับตั้งแต่การแสดงด้วยแถบชั้นสี การแสดงด้วยเส้นชั้นสี (Contour lines) การแสดงด้วยเวกเตอร์ (vector plot) เป็นต้น ดังนั้นความเข้าใจในผลลัพธ์อันเป็นผลจากรูปทรงที่ได้ออกแบบไปบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ได้โดยตรงอย่างรวดเร็วจะทำให้ผู้ออกแบบเข้าใจในปัญหานั้นได้อย่างลึกซึ้งมากยิ่งขึ้น และอาจก่อให้เกิดแนวคิดในการปรับเปลี่ยนรูปทรงนั้น เพื่อก่อให้เกิดผลลัพธ์ที่ดียิ่งขึ้นไปอีก

3.4 การประยุกต์ใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์

ในงานต่างๆ ทางด้านวิศวกรรมโดยปกติแล้วพบว่ามี ความซับซ้อนมาก วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์จึงมีบทบาทเป็นอย่างมากในการช่วยแก้ปัญหาต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นปัญหาด้านการยึดหยุ่นของแข็ง ปัญหาด้านการถ่ายเทความร้อน หรือจะเป็นปัญหาด้านการไหลของของไหล เป็นต้น และเมื่อศึกษาถึงภาพรวมและประสิทธิภาพของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์จะพบว่าวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถนำไปใช้ประยุกต์กับงานชนิดต่างๆ ได้หากปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นกับงานชนิดนั้นๆ สามารถอธิบายได้ด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ จากประสิทธิภาพของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ควบคู่กันกับวิวัฒนาการทางด้านคอมพิวเตอร์จะทำให้เราสามารถคำนวณหาปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นได้โดยสะดวกและยังทำให้ลดค่าใช้จ่ายที่จำเป็นต้องใช้สำหรับการทดลองอีกด้วย

การแก้ปัญหาด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ในสมัยแรกๆเริ่มปรากฏให้เห็นในงานทางด้านกลศาสตร์ของแข็งและโครงสร้างเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถใช้แก้สมการเชิงอนุพันธ์สำหรับปัญหาที่มีรูปร่างซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้การประยุกต์ใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์นี้ขยายวงกว้างออกไปในงานที่นอกเหนือไปจากงานทางด้านวิศวกรรม

เช่น ในงานทางด้านกรแพทย์ เป็นต้น จากรูปที่ 3.2 แสดงรูปแบบจำลองของไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อใช้หาการกระจายของความเค้นในกระดูก นอกเหนือจากนั้นวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ยังถูกนำไปประยุกต์ใช้ใช้กับงานทางด้านกรแพทย์ในรูปแบบอื่นๆ อาทิเช่น การคำนวณหาลักษณะการไหลของเลือดในเส้นเลือดและหัวใจ รวมทั้งความกดดันที่เกิดขึ้นตามตำแหน่งต่างๆในเส้นเลือด เป็นต้น

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์มีส่วนช่วยเป็นอย่างมากในการศึกษาและออกแบบงานด้านต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นงานทางด้านวิศวกรรมต่างๆ หรือแม้แต่งานทางด้านกรแพทย์ดังที่กล่าวในข้างต้น ซึ่งวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์จะช่วยให้เราสามารถออกแบบงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นและยังรวมถึงช่วยลดค่าใช้จ่ายที่จะต้องใช้ในการทดลองอีกด้วย

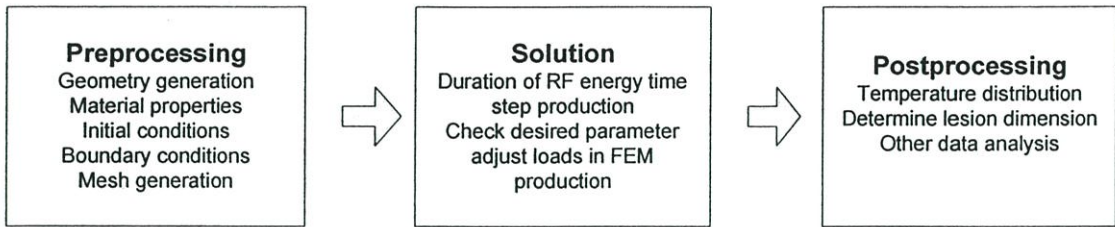


รูปที่ 3.2 รูปแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของกระดูก [23]

3.5 ซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการประมวลผล

สำหรับการทดลองวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม COMSOL Multiphysics เวอร์ชัน 3.4a มาทำการสร้างแบบจำลอง การกำหนดค่าคุณสมบัติจำเพาะต่างๆของวัสดุภายในการทดลอง การกำหนดเงื่อนไขต่างๆในระบบและการประมวลผลวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ การทดลองในงานวิจัยนี้ได้ทำการประมวลผลแบบจำลองบนเครื่องคอมพิวเตอร์พีซีระบบปฏิบัติการ Windows XP 64 bits โดยมี ซีพียู Quad core แรม 4 กิกะไบต์ ฮาร์ดดิสก์ 320 กิกะไบต์

3.6 กระบวนการวิเคราะห์วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วย COMSOL Multiphysics



รูปที่ 3.3 กระบวนการวิเคราะห์วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics

จากรูปที่ 3.3 แสดงถึงกระบวนการวิเคราะห์วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics โดยประกอบไปด้วยขั้นตอนหลักๆ 3 ขั้นตอนดังนี้คือ

1. Preprocessing ในกระบวนการขั้นแรกของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics เริ่มจากการสร้างแบบจำลอง ในลำดับต่อมาที่จะเป็นการกำหนดค่าต่างๆของวัสดุที่ใช้ในการทดลองรวมถึงการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในแบบจำลองด้วย ในต่อมาเป็นการกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลอง และสุดท้ายก็จะเป็นการเมชแบบจำลอง

2. Solution ในขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนของการกำหนดเวลาที่ใช้ประมวลผลของการจำลองซึ่งในงานวิจัยนี้เป็นการกำหนดเวลาที่ใช้ในการจำลองการทำลายเซลล์มะเร็งระดับด้วยคลื่นความถี่ไมโครเวฟและในงานวิจัยนี้เป็นการจำลองการทำลายเซลล์มะเร็งด้วยคลื่นไมโครเวฟแบบควบคุมอุณหภูมิ ดังนั้นในส่วนของกระบวนการขั้นนี้จึงต้องตรวจสอบให้อุณหภูมิในระบบมีค่าอยู่ในช่วงที่กำหนดไว้ในแบบจำลองด้วย

3. Postprocessing ในขั้นตอนนี้เป็นส่วนของการวิเคราะห์ผล ซึ่งในงานวิจัยนี้เป็นการจำลองการทำลายเซลล์มะเร็งระดับด้วยคลื่นความถี่วิทยุก็จะทำการวิเคราะห์ถึงผลการกระจายของอุณหภูมิลักษณะและขนาดของรอยแผลที่เกิดขึ้น เป็นต้น

3.6 ลักษณะการควบคุมอุณหภูมิของแบบจำลอง

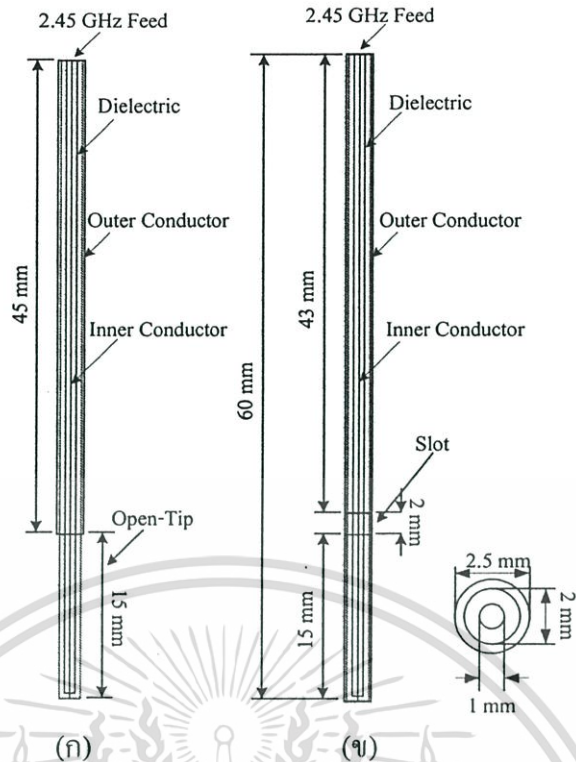
ในการทำลายเซลล์มะเร็งด้วยคลื่นความถี่ไมโครเวฟที่มีการใช้รักษาอยู่ในปัจจุบันจะมีรูปแบบอยู่ 2 รูปแบบ คือ แบบควบคุมกำลัง (Power controlled) และแบบควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controlled) โดยในแบบควบคุมกำลังจะมีรูปแบบการควบคุมคือจะทำการจ่ายค่ากำลังให้คงที่ตามที่ เราได้ทำการกำหนดค่ากำลังไว้ ส่วนในแบบควบคุมอุณหภูมิจะมีเทอร์มิสเตอร์หรือเทอร์โมคัปเปิล อยู่ที่สายอากาศ เพื่ออ่านค่าอุณหภูมิซึ่งจะคอยปรับค่ากำลังที่จ่ายออกมาให้มีค่าตามอุณหภูมิที่ตั้งไว้ โดยส่วนมากในการใช้งานในทางคลินิกจะใช้วิธีการทำลายเซลล์มะเร็งด้วยคลื่นความถี่วิทยุในแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุมอุณหภูมิ [11] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการทดลองที่มีการจำลองการทำลายเซลล์มะเร็งด้วยคลื่นไมโครเวฟทั้งในแบบควบคุมอุณหภูมิและแบบควบคุมกำลังงานเพื่อหาผลเปรียบเทียบกับ โดยการทำลายเซลล์มะเร็งด้วยคลื่นไมโครเวฟแบบควบคุมอุณหภูมิภายในระบบจะควบคุมที่อุณหภูมิที่ $95^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$ ระยะเวลาในการทำลาย 300 วินาที เหตุที่เราเลือกใช้อุณหภูมิในช่วงนี้เนื่องจากว่าเป็นช่วงของอุณหภูมิที่ถูกใช้ในการรักษาด้วยความร้อนและทำให้สามารถนำเอาข้อมูลของเราไปเปรียบเทียบกับข้อมูลที่มีการวิจัยอยู่ก่อนหน้าได้ เนื่องจากงานวิจัยส่วนใหญ่จะใช้อุณหภูมิในช่วงนี้แทนการใช้อุณหภูมิในช่วง 55–60 องศาเซลเซียส เพราะว่าอุณหภูมิที่อยู่ในช่วง 55–60 องศาเซลเซียสนั้นเป็นช่วงอุณหภูมิที่ต่ำเมื่อใช้ในการรักษาจริงโอกาสที่เซลล์มะเร็งจะยังคงอยู่รอดนั้นมีมากกว่าการที่เลือกใช้อุณหภูมิที่สูง ซึ่งรูปแบบของการควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ในการจำลองจะเป็นดังนี้ คือ เริ่มจากการกำหนดค่ากำลังงานอินพุตค่าๆหนึ่ง ป้อนให้สายอากาศ จากนั้นทำการประมวลผลขั้นตอนที่ 1 เริ่มจากเวลาประมาณช่วงสั้นๆ 1–15 วินาที โดยประมาณพิจารณาอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบริเวณใกล้กับสายอากาศ อุณหภูมิที่เกิดขึ้นอยู่นอกช่วง $90^{\circ}\text{C} - 100^{\circ}\text{C}$ หรือไม่ ถ้าไม่จะต้องเริ่มทำการจำลองใหม่โดยเลือกค่ากำลังงานอินพุตที่เหมาะสม แต่ถ้าอุณหภูมิอยู่ในช่วงก็สามารถทำการจำลองต่อไปในขั้นที่ 2 โดยในขั้นที่ 2 จะพิจารณาเหมือนกับการจำลองในขั้นตอนที่ 1 โดยทำการเพิ่มเวลาต่อไปจากการทดลองที่ 1 ต่อไปในช่วง 16–30 วินาที โดยทำการทดลองไปเรื่อยๆจนถึงค่าเวลาที่เรากำหนดไว้ที่ 300 วินาที โดยแต่ละขั้นตอนอุณหภูมิที่ได้ต้องอยู่ในช่วงที่กำหนดเสมอที่ $95^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$ ในส่วนของการควบคุมอุณหภูมิแบบให้กำลังงานคงที่นั้นเราจะทดลองโดย การเลือกค่ากำลังงานคงที่มาค่าหนึ่ง แล้วป้อนให้กับสายอากาศเป็นเวลาต่อเนื่องกันที่ 300 วินาทีโดยที่ช่วงค่าเวลาสุดท้ายนั้น อุณหภูมิมีค่าอยู่ในช่วงที่กำหนดเหมือนกันที่ $95^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$ ถ้าอุณหภูมิไม่ได้อยู่ในช่วงที่กำหนดเราก็จะต้องทำการทดลองซ้ำใหม่โดยเลือกค่ากำลังงานค่าอื่นแทนจนกว่าอุณหภูมิจะอยู่ในช่วงที่กำหนด

3.7 การออกแบบโครงสร้างสายอากาศที่ใช้ทดลอง

สำหรับการทดลองในงานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างแบบจำลองการทำลายเซลล์มะเร็งระดับด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยใช้โพรบ (Probe) ที่ใช้ในการทำลายเซลล์มะเร็งระดับคือ Coaxial Slot Antenna (CSA) และ Coaxial Open-Tip Antenna (COA) โดยมีโครงสร้างและขนาดของโพรบดังแสดงในรูปที่ 3.4 แบบจำลองของโพรบจะถูกครอบคลุมด้วยแบบจำลองเนื้อเยื่อตับที่มีรูปทรงเป็นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 - 70 มิลลิเมตร และมีความยาว 80 มิลลิเมตร เนื่องจากการวิจัยนี้ได้มีการนำเอาสายอากาศมาใช้รวมกัน และมีการจัดเรียงรูปแบบสายอากาศที่แตกต่างกันออกไปจึงจำเป็นต้องมีการปรับเปลี่ยนขนาดของโมเดลดับที่ต่างกันออกไปตามความเหมาะสมของการจัดเรียงสายอากาศ



รูปที่ 3.4 แสดงขนาดและ โครงสร้างของ โพรบที่ใช้ในการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

รูป (a) แสดง Coaxial Open-Tip Antenna (COA)

รูป (b) แสดง Coaxial Slot Antenna (CSA)

3.8 การกำหนดค่าคงที่ต่างๆที่ใช้ในการทดลอง

โดยค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการทดลองจะถูกแบ่งเป็นสองอย่างคือค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศ กับค่าพารามิเตอร์ที่เนื้อเยื่อตับ โดยค่าพารามิเตอร์ที่ใช้จะถูกใช้ที่ค่าของความถี่ 2.45 GHz โดยค่าพารามิเตอร์ต่างๆจะแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศและเนื้อเยื่อที่ใช้ในการทดลอง [24]

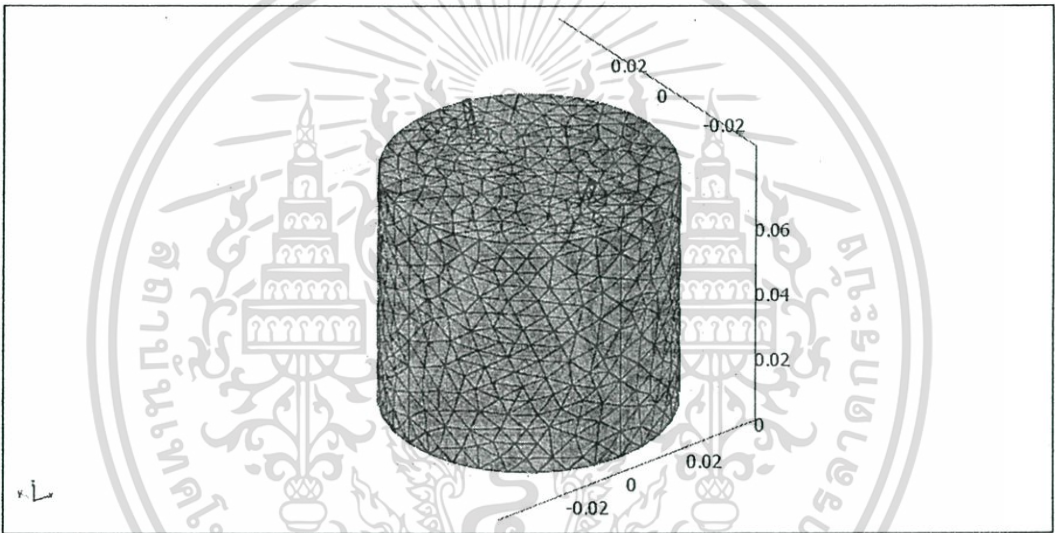
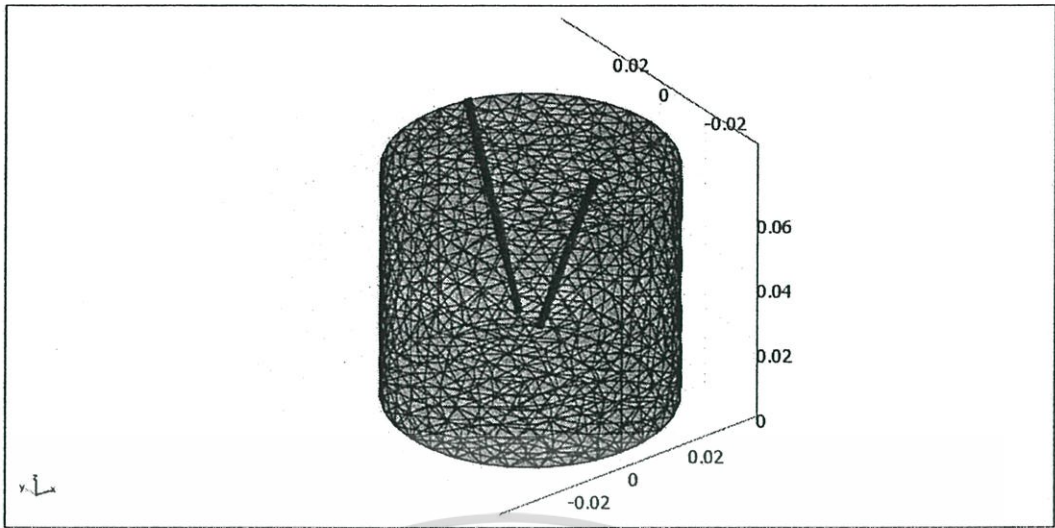
Properties	Value	
ρ_{liver} = Density of liver	1,020 (kg / m^3)	
C_{liver} = Specific heat of liver	(20 ~ 70°C)	(80 ~ 100°C)
	3,628 ($J / kg \cdot K$)	3,858 ($J / kg \cdot K$)
k = Thermal conductivity of liver	(20 ~ 70°C)	(80 ~ 100°C)
	0.465 ($W / m \cdot K$)	0.867 ($W / m \cdot K$)
σ_{liver} = electrical conductivity of liver	1.69 (S / m)	
ϵ_{liver} = relative permittivity of liver	43.03	
ϵ_{diel} = relative permittivity of dielectric	2.03	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบจำลองของงานวิจัยนี้ในส่วนของการไหลเวียนของเลือด (Blood perfusion rate) ในเนื้อเยื่อตับได้กำหนดให้มีค่ากับ $\omega_{bl} = 0$ [24] เนื่องจากว่ามีค่าที่เล็กเมื่อเทียบกับความร้อนที่เกิดขึ้นในระบบและ เราได้คำนึงถึงเวลาที่เราทดลองกับเนื้อเยื่อตับจริงซึ่งจะไม่มีค่าการไหลเวียนของเลือด เราจึงได้ตัดค่าพารามิเตอร์ในส่วนนี้ออกไป เพื่อให้ได้ผลการทดลองจากโปรแกรมกับการทดลองจริงมีเงื่อนไขที่เหมือนกัน

3.9 การ MESH แบบจำลอง

ในรูปที่ 3.5 จะการแสดงผลการเมชแบบจำลองด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics ของแบบจำลองเนื้อเยื่อตับ โดยใช้เอลิเมนต์เป็นแบบ tetrahedral elements การเมชแบบจำลองหรือการแบ่งแบบจำลองออกเป็นเอลิเมนต์เล็กๆจะเมชในลักษณะที่ไม่มีรูปแบบหรือขนาดตายตัวแต่ละเมชส่วนของสายอากาศแบบละเอียด แต่บริเวณเนื้อเยื่อตับปกติจะเมชในลักษณะที่ค่อนข้างหยาบ ทั้งนี้เพราะเมื่อทำการเมชแบบจำลองแบบละเอียดเท่ากันทั้งหมดจะทำให้มีจำนวน โหนดและเอลิเมนต์ที่มากทำให้ใช้หน่วยความจำของคอมพิวเตอร์และเวลาในการคำนวณค่อนข้างมากจนอาจส่งผลให้โปรแกรมมีข้อผิดพลาดไม่สามารถทำการเมชแบบจำลองได้ แต่หากทำการเมชในลักษณะที่หยาบเหมือนกันทั้งหมดก็จะทำให้ผลที่ได้จากการคำนวณมีความผิดพลาดมากตามไปด้วย ถึงแม้จะใช้เวลาในการคำนวณน้อยก็ตาม ดังนั้นการเมชแบบจำลองของงานวิจัยนี้จะพิจารณาตามความสำคัญโดยส่วนที่ต้องการความถูกต้องสูงก็จะทำการเมชแบบจำลองแบบละเอียด ส่วนที่พิจารณาแล้วไม่มีผลต่อการคำนวณหรือว่ามีผลน้อยก็จะทำการเมชส่วนนั้นแบบหยาบ



รูปที่ 3.5 แสดงการ MESH แบบจำลองเนื้อเยื่อตับ

ตารางที่ 3.2 แสดงจำนวนเอลิเมนต์ของแบบจำลองของการใช้สายอากาศชนิด CSA-CSA

มุมมองการจัดเรียง	Elements	Number of degree of freedom
0°	24938	171223
30°	32408	222291
45°	28701	202359
60°	31051	210587
90°	31876	221596

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 แสดงจำนวนเอลิเมนต์ของแบบจำลองของการใช้สายอากาศชนิด COA-COA

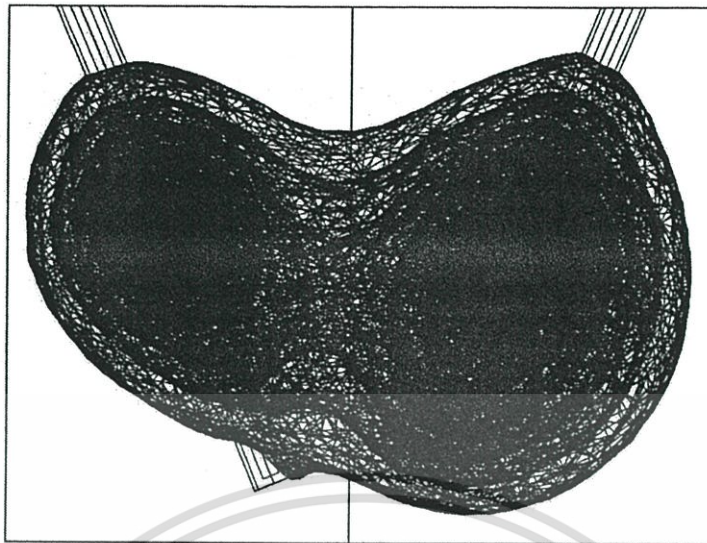
มุมมองการ จัดเรียง	Elements	Number of degree of freedom
0°	31548	214370
30°	25881	181943
45°	32587	236225
60°	31469	227521
90°	22551	157828

ตารางที่ 3.4 แสดงจำนวนเอลิเมนต์ของแบบจำลองของการใช้สายอากาศชนิด CSA-COA

มุมมองการ จัดเรียง	Elements	Number of degree of freedom
0°	36598	248193
30°	27771	194321
45°	29506	210376
60°	29324	210577
90°	23936	166655

จากตารางที่ 3.2, 3.3 และ 3.4 แสดงถึงจำนวนเอลิเมนต์ของแบบจำลองที่ใช้ในการจำลองการทดลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์

รูปที่ 3.5 นั้นเป็นการแสดงลักษณะตัวอย่างการ mesh ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง โดยจะ mesh ในลักษณะ free mesh โดยจะทำการ mesh ที่สายอากาศและบริเวณใกล้เคียงกับสายอากาศให้มีขนาดที่ละเอียด เนื่องจากเป็นจุดที่ทำการสังเกตเพื่อจะได้ค่าความแม่นยำมากขึ้น ส่วนบริเวณเนื้อเยื่อที่ห่างออกไปนั้นจะ mesh แบบหยาบเนื่องจากอยู่ห่างจากจุดสังเกตจึงมีความจำเป็นที่น้อยลง



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.6 แสดงตัวอย่างผลการทดลองในรูปแบบ Mesh model (ก) และ ในรูปแบบ Solid model (ข)

จากรูปที่ 3.6 นั้นจะเป็นการแสดงผลการทดลองในรูปแบบ mesh model กับ solid model ซึ่งพบว่าในการแสดงผลการทดลองของทั้งสองรูปแบบนั้นให้ผลที่เหมือนกัน แต่ในแบบ mesh model นั้นหากเราต้องการให้เห็นถึงเอลิเมนต์ที่แสดงนั้นจำเป็นต้องขยายภาพการทดลองให้มีขนาดใหญ่ เพื่อให้เห็นขนาดของเอลิเมนต์ที่เล็กได้ชัดเจน ซึ่งเป็นผลให้เมื่อมีการเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างการควบคุมอุณหภูมิแบบมีการปรับเปลี่ยนกำลังงานขาเข้า กับการให้กำลังงานคงที่นั้น เกิดความคลาดเคลื่อนในเรื่องของขนาดเวลานำภาพมาเทียบกันเนื่องจาก เราต้องขยายภาพให้ใหญ่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อให้เห็นเอลิเมนต์ เราจึงเลือกที่จะแสดงผลของการทดลองในรูปแบบของ solid model เพราะไม่จำเป็นต้องขยายภาพเพื่อดูเอลิเมนต์ ทำให้สามารถกำหนดการแสดงผลของภาพทั้งสองแบบการควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ใน ขนาดที่เท่ากันได้ง่าย ทำให้สามารถดูผลความแตกต่างของขนาดการทำลายได้ง่ายกว่า ดังนั้นเพื่อความชัดเจนของรูปภาพในการวิจัยนี้จึงขอนำเสนอผลการลองในรูปแบบของ solid model

3.10 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตบนแบบจำลอง

1. อุณหภูมิเริ่มต้นของเนื้อเยื่อเริ่มที่ 37°C
2. กำลังงานที่จ่ายให้กับสายอากาศสองชนิดจะไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับชนิดของสายอากาศ
3. อุณหภูมิสูงสุดที่ยอมให้เกิดขึ้น ได้ที่เนื้อเยื่อของการจำลองอยู่ที่ 100°C ต่ำสุดที่ 90°C
4. สายอากาศที่ใช้มีระยะในการจัดเรียงจากปลายสายอากาศห่างกัน 10 mm.
5. ขนาดของเนื้อเยื่อมีขนาดขึ้นอยู่กับลักษณะของการจัดเรียงสายอากาศตามความเหมาะสม

3.11 ขั้นตอนการทดลองการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม COMSOL

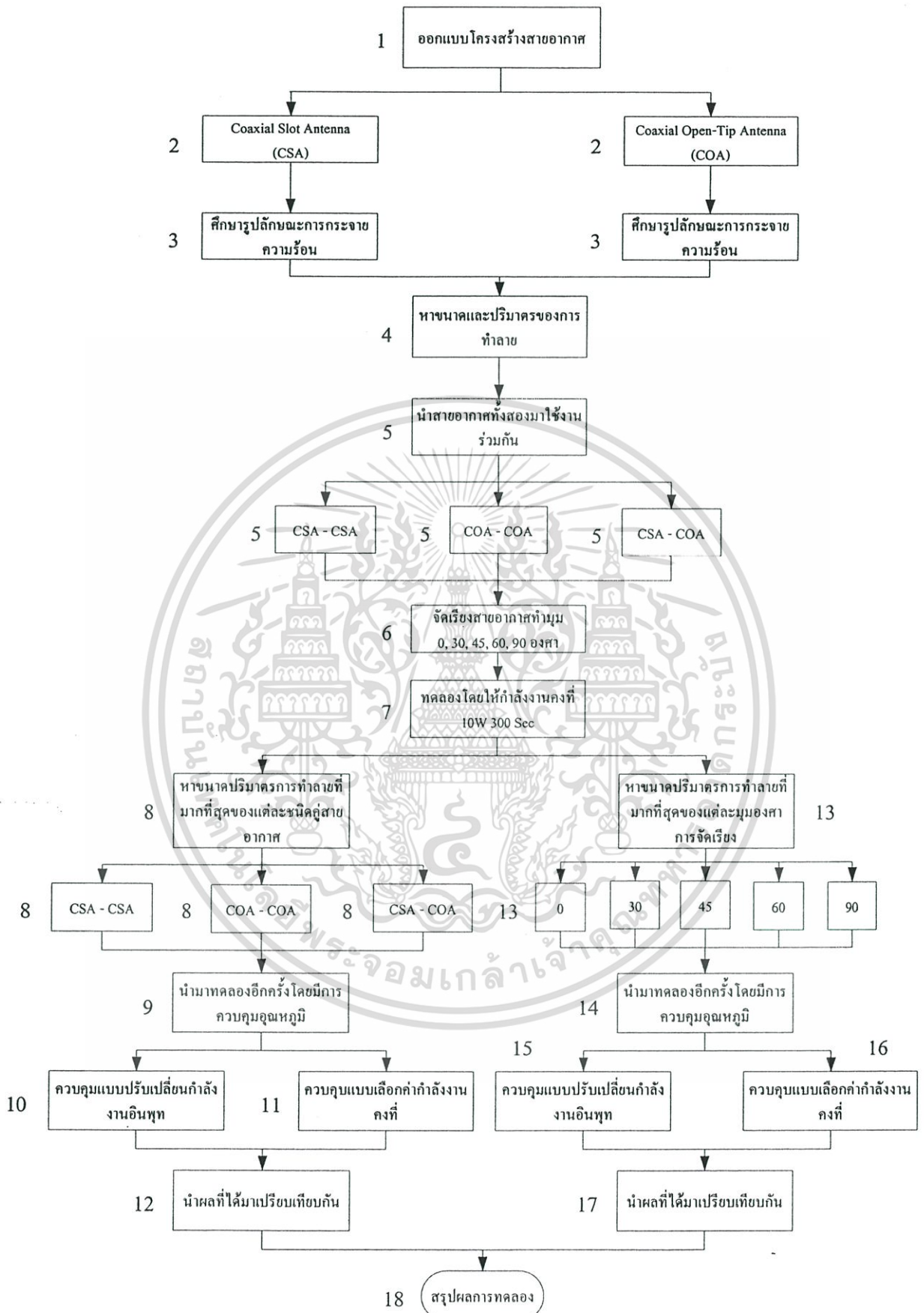
ในการทดลองนั้นเราได้แบ่งรูปแบบของการทดลองออกเป็น 4 ส่วนใหญ่ คือ

ส่วนที่ 1 ทำการทดลองที่สายอากาศแบบแท่งเดี่ยวที่ละชนิดเพื่อศึกษาลักษณะรูปแบบการทำลายและการกระจายความร้อนของแต่ละชนิดสายอากาศ

ส่วนที่ 2 นำสายอากาศมาใช้งานร่วมกันสองแท่งทั้งชนิดเดียวกันและต่างชนิดกัน โดยมีรูปแบบการจัดเรียงทำมุมกัน 0, 30, 45, 60, 90 องศาโดยให้ค่าพลังงานคงที่เพื่อคุณลักษณะรอยแผลรูปแบบการกระจายความร้อน และปริมาตรการทำลายที่เกิดขึ้น

ส่วนที่ 3 จะเป็นการทดลองซ้ำในส่วนที่ 2 แต่มีการเพิ่มเงื่อนไข โดยมีการควบคุมกำลังงานที่ป้อนให้สายอากาศเพื่อไม่ให้อุณหภูมิที่เกิดขึ้นสูงเกิน 100°C เพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของเนื้อเยื่อ

ส่วนที่ 4 จะเป็นการทดลองจริงกับเนื้อเยื่อตับหนูเพื่อนำมาเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองทางโปรแกรม



รูปที่ 3.7 Flowchart แสดงลำดับขั้นตอนในการทดลองผลด้วยโปรแกรม COMSOL

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

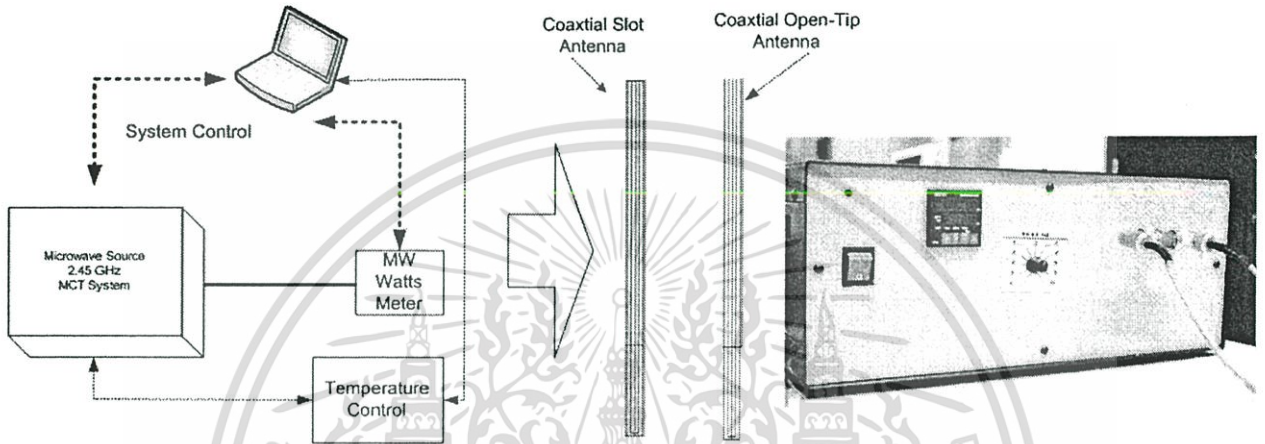
จากรูปที่ 3.7 เป็นการแสดงลำดับขั้นตอนในการทดลองงานวิจัยที่ได้ทำการซึ่งจะมีลำดับขั้นตอนเรียงกันดังต่อไปนี้

1. ออกแบบ โครงสร้างของสายอากาศ 2 ชนิดเพื่อใช้ในการทดลอง โดยโปรแกรม COMSOL
2. สายอากาศที่ได้จากการออกแบบมีสองชนิดคือ Coaxial Slot Antenna (CSA) กับ Coaxial Open-Tip Antenna (COA)
3. ทำการทดลอง โดยใช้สายอากาศแบบแท่งเดี่ยวก่อนเพื่อศึกษาหารูปแบบการกระจายความร้อนของสายอากาศทั้งสองแบบ
4. หาขนาดและปริมาตรการทำลายของสายอากาศทั้งสองชนิดนำผลมาเปรียบเทียบกันเพื่อคุณสมบัตินี้ของแต่ละชนิดสายอากาศ
5. นำสายอากาศทั้งสองชนิดมาใช้ร่วมกันเป็นแบบสายอากาศคู่ 3 รูปแบบดังนี้ (CSA-CSA), (COA-COA), (CSA-COA)
6. จากนั้นนำสายอากาศคู่ทั้งสามรูปแบบมาทำการจัดเรียงเพื่อสร้างรูปแบบการทำลายที่หลากหลาย โดยการนำมาเรียงทำมุมกันในแต่ละคู่ที่มุมดังดังนี้ 0, 30, 45, 60, 90 องศา
7. ทำการทดลองโดยจ่ายค่ากำลังงานอินพุตคงที่ที่ 10W 300 วินาทีในทุกรูปแบบของการจัดเรียงบันทึกผลรูปแบบของการทำลายและปริมาตรการทำลายที่ได้จากการทดลอง
8. หาขนาดปริมาตรการทำลายที่มากที่สุดของแต่ละชนิดของคู่สายอากาศ (CSA-CSA), (COA-COA), (CSA-COA) ว่าการจัดเรียงในมุมใดให้การทำลายมากที่สุดในแต่ละคู่สายอากาศ
9. นำผลของที่มากที่สุด ในขั้นตอนที่ 8 มาทดลองอีกครั้ง โดยให้มีการควบคุมอุณหภูมิที่เกิดขึ้นที่เนื้อเยื่อ
10. ทำการควบคุมอุณหภูมิโดยกำหนดให้มีการปรับเปลี่ยนค่ากำลังงานอินพุตที่สายอากาศเพื่อให้ อุณหภูมิคงที่อยู่ในช่วงที่กำหนดที่ $95^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ในระยะเวลา 300 วินาที
11. ทำการควบคุมอุณหภูมิโดยกำหนดค่ากำลังงานที่มีค่าคงที่ให้กับอินพุตของสายอากาศโดยไม่ทำให้อุณหภูมิสุดท้ายมีค่าสูงเกินกว่าที่กำหนดที่ $95^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ในระยะเวลา 300 วินาที
12. นำผลการทดลองที่ได้จากขั้นตอนที่ 10 และ 11 มาเปรียบเทียบกันทั้งรูปร่างและขนาดปริมาตรการทำลาย
13. หาขนาดปริมาตรการทำลายที่มากที่สุดในแต่ละมุมมองจากการจัดเรียงที่ 0, 30, 45, 60, 90 องศาว่า การใช้สายอากาศคู่ไหนให้ปริมาตรการทำลายมากที่สุด
14. นำผลของที่มากที่สุด ในขั้นตอนที่ 13 มาทดลองอีกครั้ง โดยให้มีการควบคุมอุณหภูมิที่เกิดขึ้นที่เนื้อเยื่อ
15. ทำการควบคุมอุณหภูมิโดยกำหนดให้มีการปรับเปลี่ยนค่ากำลังงานอินพุตที่สายอากาศเพื่อให้ อุณหภูมิคงที่อยู่ในช่วงที่กำหนดที่ $95^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ในระยะเวลา 300 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

16. ทำการควบคุมอุณหภูมิโดยกำหนดค่ากำลังงานที่มีค่าคงที่ให้กับอินพุทของสายอากาศโดยไม่ทำให้อุณหภูมิสุดท้ายมีค่าสูงเกินกว่าที่กำหนดที่ $95^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ในระยะเวลา 300 วินาที
17. นำผลการทดลองที่ได้จากขั้นตอนที่ 15 และ 16 มาเปรียบเทียบกันทั้งรูปร่างและขนาดปริมาตรในการทำลาย
18. สรุปผลที่ได้จากการทดลอง

3.12 ขั้นตอนการเตรียมการทดลอง



รูปที่ 3.8 แสดงไดอะแกรมการเตรียมการทดลองและเครื่องกำเนิดไมโครเวฟที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 3.9 แสดงสายอากาศที่ใช้ในการทดลองกับเนื้อเยื่อตับหมู

จากรูปที่ 3.8 แสดงขั้นตอนรูปแบบการเตรียมเครื่องมือในการทดลองจริงกับเนื้อเยื่อตับโดยใช้เครื่องกำเนิดคลื่นไมโครเวฟความถี่ 2.45GHz ที่สามารถจ่ายกำลังงานได้ที่ 20–100W และใช้ร่วมกับเครื่องมือที่แสดงในรูปที่ 3.10 เพื่อใช้ในการวัดค่ากำลังงานที่ส่งออกให้ได้ตามที่เรต้องการโดยสายอากาศที่ใช้ในการทดลองแสดงในรูปที่ 3.9 เป็นสายอากาศที่ใช้งานในย่านความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไมโครเวฟซึ่งมีลักษณะคล้ายกับสายอากาศแบบโคแอกเซียล ที่มีตัวนำนอกแบบแข็งซึ่งใช้งานในย่านความถี่สูงมีคอนเนคเตอร์เชื่อมต่อเป็นแบบ N-type ซึ่งจะนำไปต่อกับแหล่งกำเนิดไมโครเวฟความถี่ 2.45 GHz

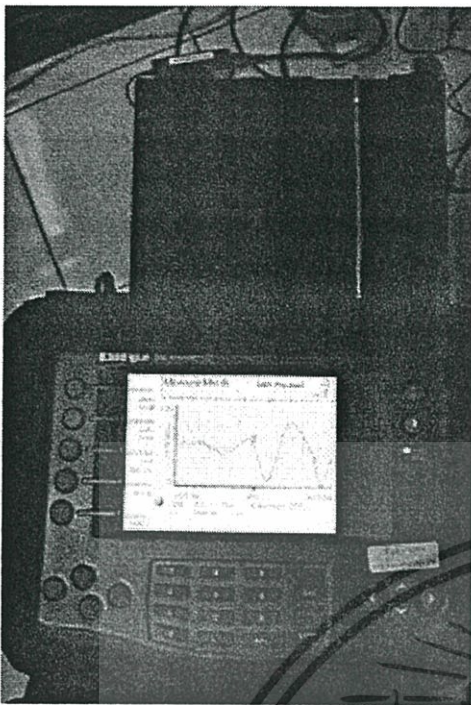


รูปที่ 3.10 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ร่วมในการทดลองจริง

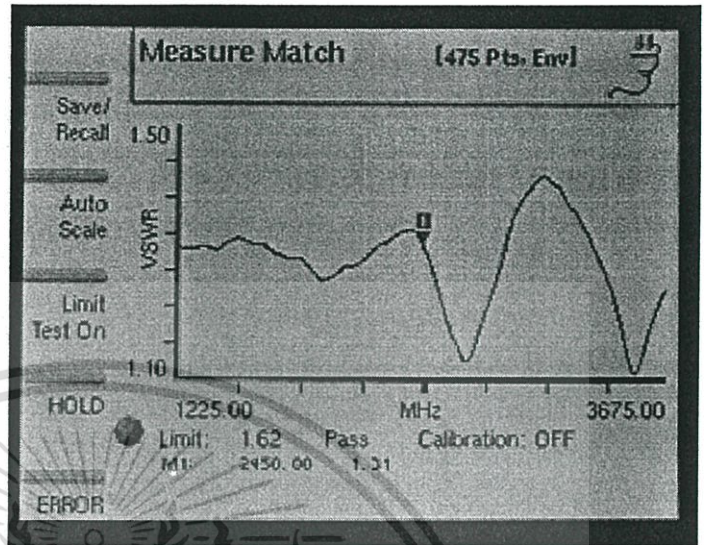
(ก)แสดงเครื่องวัดกำลังงานที่จ่ายให้สายอากาศ Wideband Power Sensor Bird 5012

(ข)แสดงเครื่องวัดคุณสมบัติของสายอากาศ Bird Site Analyzer Model SA-6000EX

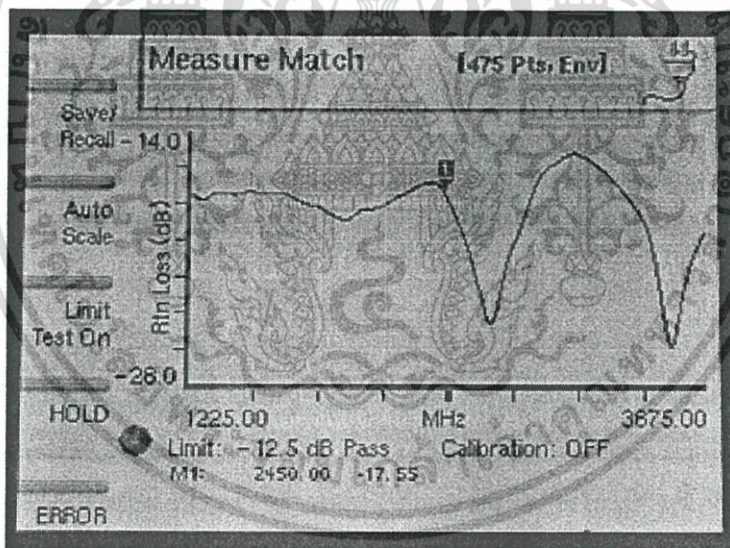
รูปที่ 3.10 ในภาพ (ก) แสดงเครื่องมือที่ใช้ในการวัดกำลังงานอินพุตที่จ่ายให้สายอากาศ ซึ่งมีความสามารถในการวัดกำลังงานสูงสุดที่ 100 W ที่ความถี่ 2.45 GHz รูป (ข) แสดงเครื่องมือที่ใช้วัดคุณสมบัติของสายอากาศ โดยจะใช้วัดค่า VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) และค่า Return Loss ของสายอากาศที่ใช้ในการทดลอง



(ก)



(ข)

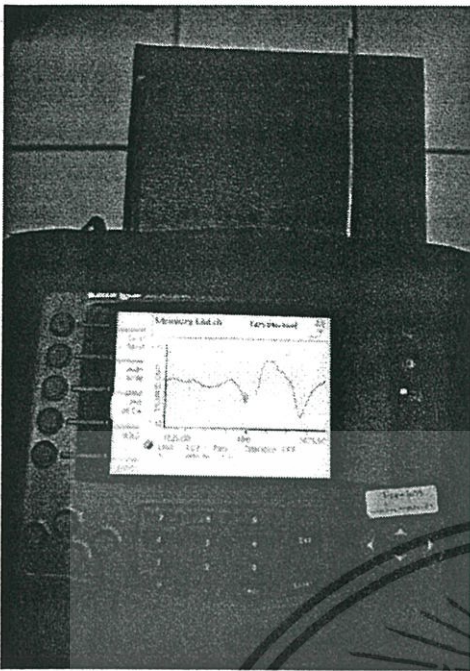


(ค)

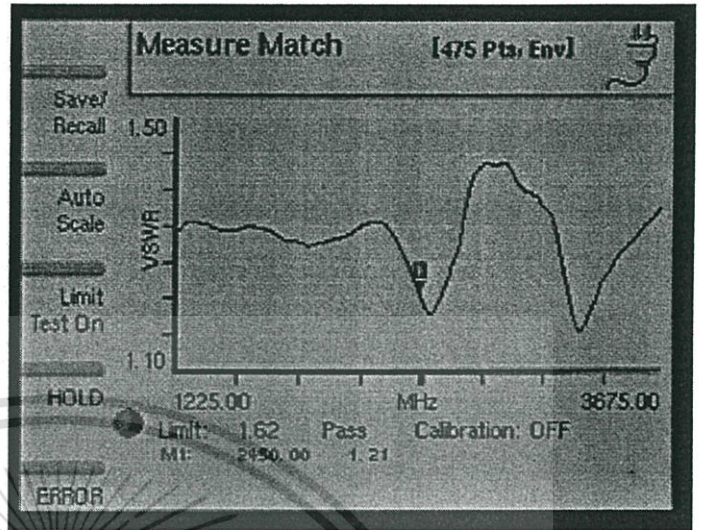
รูปที่ 3.11 แสดงการวัดค่าคุณสมบัติของสายอากาศที่ใช้ในการทดลองแบบสล็อต

รูปที่ 3.11 เป็นการแสดงการวัดค่าคุณสมบัติของสายอากาศที่ใช้ในการทดลองชนิดสล็อต โดยในรูป (ก) แสดงลักษณะการใช้เครื่องมือในการวัดค่าคุณสมบัติของสายอากาศ รูป (ข) แสดงค่าการวัดคุณสมบัติ VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) ของสายอากาศแบบสล็อต ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.31 ที่ความถี่ใช้งาน 2.45 GHz รูป (ค) แสดงการวัดค่า Return Loss ของสายอากาศซึ่งได้เท่ากับ -17.55 dB ที่ความถี่ใช้งาน 2.45 GHz

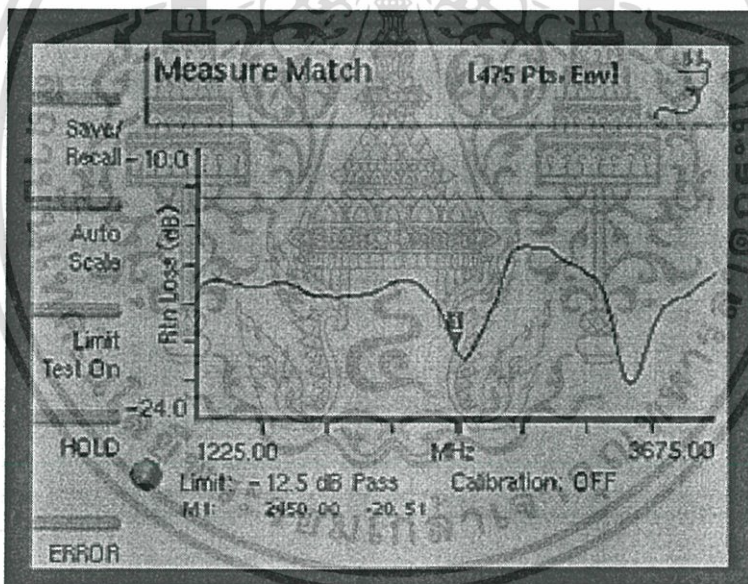
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 3.12 แสดงการวัดค่าคุณสมบัติของสายอากาศที่ใช้ในการทดลองแบบปลายเปิด

รูปที่ 3.12 เป็นการแสดงการวัดค่าคุณสมบัติของสายอากาศที่ใช้ในการทดลองชนิดปลายเปิด โดยในรูป (ก) แสดงลักษณะการใช้เครื่องมือในการวัดค่าคุณสมบัติของสายอากาศ รูป (ข) แสดงค่าการวัดคุณสมบัติ VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) ของสายอากาศแบบปลายเปิด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.21 ที่ความถี่ใช้งาน 2.45 GHz รูป (ค) แสดงการวัดค่า Return Loss ของสายอากาศซึ่งได้เท่ากับ -20.51 dB ที่ความถี่ใช้งาน 2.45 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองของแบบจำลองและการทดลองในเนื้อเยื่อตับหมู

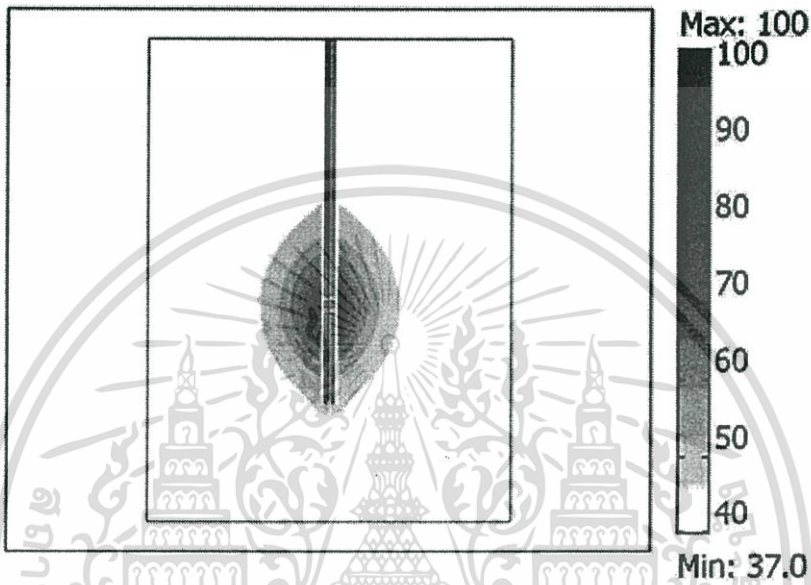
ในการทดลองครั้งนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับเทคนิค ด้านการใช้งานสายอากาศทั้งในด้านการจัดเรียงและ การเลือกใช้งานสายอากาศในแต่ละรูปแบบของการรักษาเพื่อให้เหมาะกับรูปร่างลักษณะของเซลล์มะเร็งที่เกิดขึ้น รวมไปถึงการนำสายอากาศแต่ละชนิดมาใช้งานร่วมกันเพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการทำลายเซลล์มะเร็ง โดยในการวิจัยครั้งนี้จะใช้สายอากาศ 2 ชนิดมาใช้งานร่วมกันคือสายอากาศแบบ Coaxial Slot Antenna (CSA) กับ Coaxial Open-Tip Antenna (COA) โดยนำมาใช้เป็นสายอากาศแบบคู่ 3 รูปแบบคือ แบบ Coaxial Slot Antenna กับ Coaxial Slot Antenna (CAS-CSA) , Coaxial Open-Tip Antenna กับ Coaxial Open-Tip Antenna (COA-COA), Coaxial Slot Antenna กับ Coaxial Open-Tip Antenna (CSA-COA) และทำการจัดเรียงสายอากาศสองแท่ง โดยมีการทำมุมต่อกันทั้งหมด 5 แบบคือ 0, 30, 45, 60, และ 90 องศา โดยในการทดลองนั้นจะมีลำดับขั้นการทดลองตามที่ได้กล่าวมาแล้ว ในหัวข้อที่ 3.11 การทดลองได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วนหลัก โดยในส่วนแรกเป็นการทดลอง โดยไม่มีการควบคุมอุณหภูมิเพื่อหาขนาดการทำลายที่มากที่สุดและคุณลักษณะของการทำลายซึ่งมี 5 รูปแบบการจัดเรียง 0, 30, 45, 60, 90 องศา ในส่วนที่สองเป็นการทดลองโดยทำการควบคุมอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นได้ในระบบที่อุณหภูมิ $95^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ และทำการควบคุมเวลาที่ 300 วินาทีในเนื้อเยื่อตับ การทดลองทั้ง 2 ส่วนนี้จะทำการศึกษาถึงผลของการทำลายที่เกิดขึ้นว่ามีลักษณะที่แตกต่างกันไปอย่างไรและมีขนาดการทำลายที่มากน้อยเพียงใด ผลการทดลองจะแสดงถึงการกระจายของอุณหภูมิ ลักษณะและขนาดของรอยแผลที่เกิดขึ้น

ในขั้นตอนแรกเราจะศึกษาผลของการทดลองในแบบเดิมที่มีการวิจัยมาก่อนโดยทดลองจากการใช้สายอากาศแบบแท่งเดี่ยวก่อนเพื่อดูรูปแบบของการกระจายอุณหภูมิของสายอากาศแบบ CSA และแบบ COA และขนาดปริมาตรของการทำลายในรูปแบบสายอากาศเดี่ยวเพื่อนำมาพิจารณาเปรียบเทียบด้วย

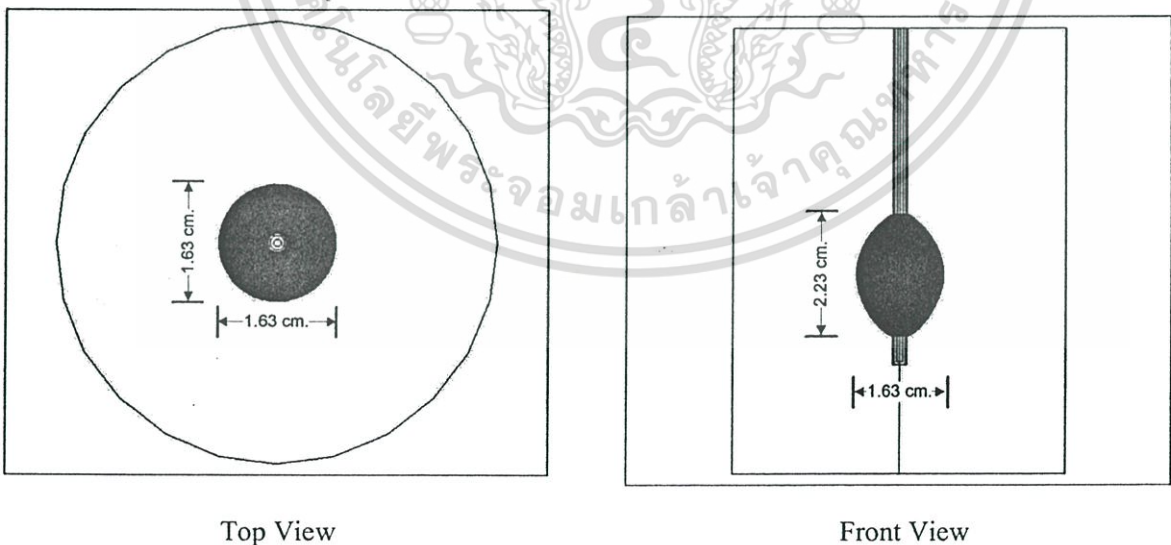
4.1 ผลการทดลองแสดงการกระจายของอุณหภูมิในเนื้อเยื่อแบบสายอากาศเดี่ยว

ในการทดลองที่ 4.1 นั้นจะเป็นการนำเอาสายอากาศทั้งสองชนิดคือ CSA กับ COA มาทำการทดลองแบบแยกกันก่อนเพื่อที่จะศึกษารูปแบบลักษณะการกระจายความร้อนและปริมาตรในการทำลายของแต่ละชนิดของสายอากาศก่อนที่จะนำมาใช้ร่วมกันแบบสายอากาศคู่

4.1.1 กรณีที่ 1 แบบจำลองแบบสายอากาศเดี่ยวชนิด CSA



รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะการกระจายความร้อนของสายอากาศชนิด CSA ที่กำลังงาน 10 วัตต์ 300 วินาที

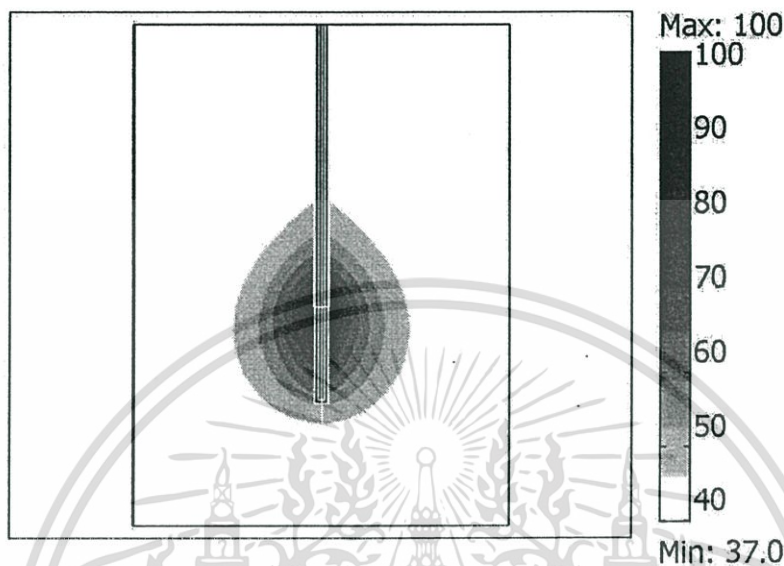


รูปที่ 4.2 แสดงขนาดความกว้างความยาวความลึกของการทำลายเซลล์มะเร็งที่ อุณหภูมิที่มากกว่า 50°C ของสายอากาศแบบ CSA

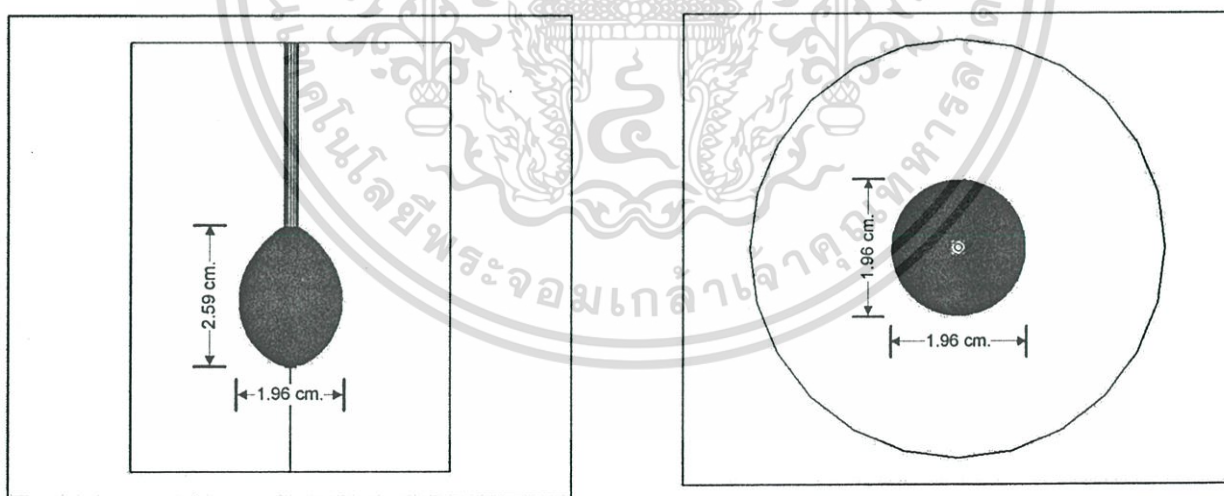
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.1 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายความร้อนที่เกิดขึ้นในเนื้อเชื้อของสายอากาศแบบ สล๊อต และในรูปที่ 4.2 แสดงขนาดปริมาตรการทำลายเซลล์มะเร็งที่อุณหภูมิมากกว่า 50°C ของ สายอากาศแบบสล๊อต

4.1.2 กรณีที่ 2 แบบจำลองแบบสายอากาศเดี่ยวชนิด COA



รูปที่ 4.3 แสดงลักษณะการกระจายความร้อนของสายอากาศชนิด COA ที่กำลังงาน 10 วัตต์ 300 วินาที



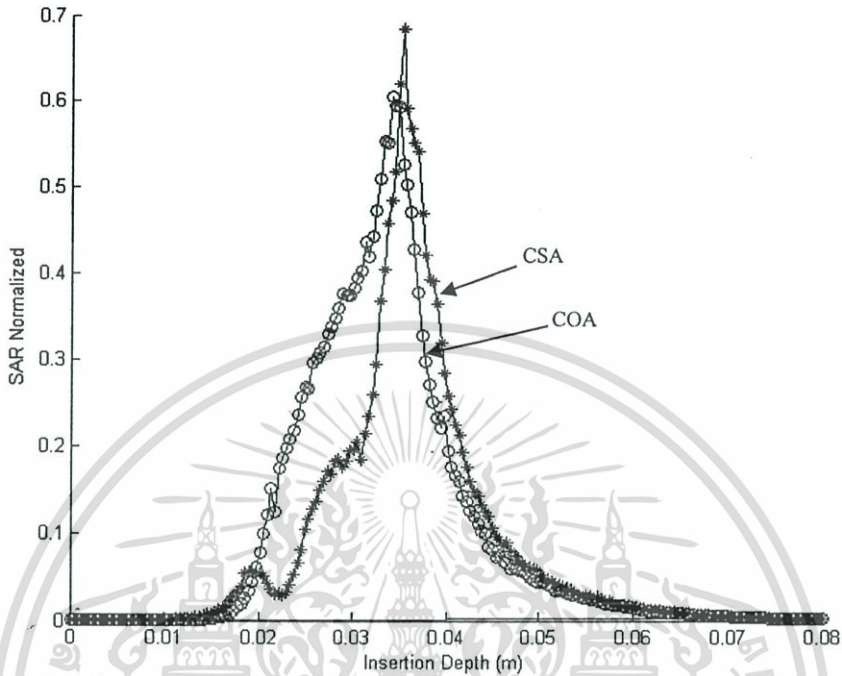
Front View

Top View

รูปที่ 4.4 แสดงขนาดความกว้างความยาวความลึกของการทำลายเซลล์มะเร็งที่อุณหภูมิที่มากกว่า 50°C ของสายอากาศแบบ COA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.3 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายความร้อนที่เกิดขึ้นในเนื้อเยื่อของสายอากาศแบบปลายเปิด และในรูปที่ 4.4 แสดงขนาดปริมาตรการทำลายเซลล์มะเร็งที่อุณหภูมิมากกว่า 50°C ของสายอากาศแบบปลายเปิด



รูปที่ 4.5 แสดงกราฟ SAR ของสายอากาศแบบ CSA และแบบ COA

ตารางที่ 4.1 แสดงปริมาตรการทำลายเซลล์มะเร็งของการรักษาด้วยสายอากาศแบบแท่งเดี่ยวทั้งแบบชนิด CSA และ COA ที่มีการควบคุมอุณหภูมิและไม่มีการควบคุมโดยใช้เวลา 300 วินาที 10 วัตต์

ชนิดของสายอากาศ	ปริมาตรการทำลายเซลล์มะเร็ง (cm^3) ที่ 300 วินาที	
	ไม่คำนึงถึงอุณหภูมิที่เกิน 100°C	ควบคุมอุณหภูมิไม่ให้เกิน 100°C
Slot	5.04	2.94
Open-Tip	5.39	3.56

จากการทดลองในเบื้องต้นเกี่ยวกับคุณลักษณะของสายอากาศชนิด CSA กับชนิด COA ทำให้เราทราบได้ว่า สายอากาศทั้งสองชนิดนี้นั้นมีการแพร่กระจายคลื่นที่ทำให้เกิดความร้อนที่แตกต่างกันออกไป และให้ผลของการทำลายที่ต่างกันออกไปด้วยภายใต้เงื่อนไขระยะเวลาที่เท่ากัน และอุณหภูมิสุดท้ายที่เท่ากัน โดยให้อุณหภูมิอยู่ในช่วงที่ไม่เกิน 100°C จากการทดลองเราจะพบว่ากรณีที่เรากำหนดให้อุณหภูมิที่บริเวณ Slot และ บริเวณ Open-Tip ของสายอากาศมีอุณหภูมิที่เท่ากันหรือ

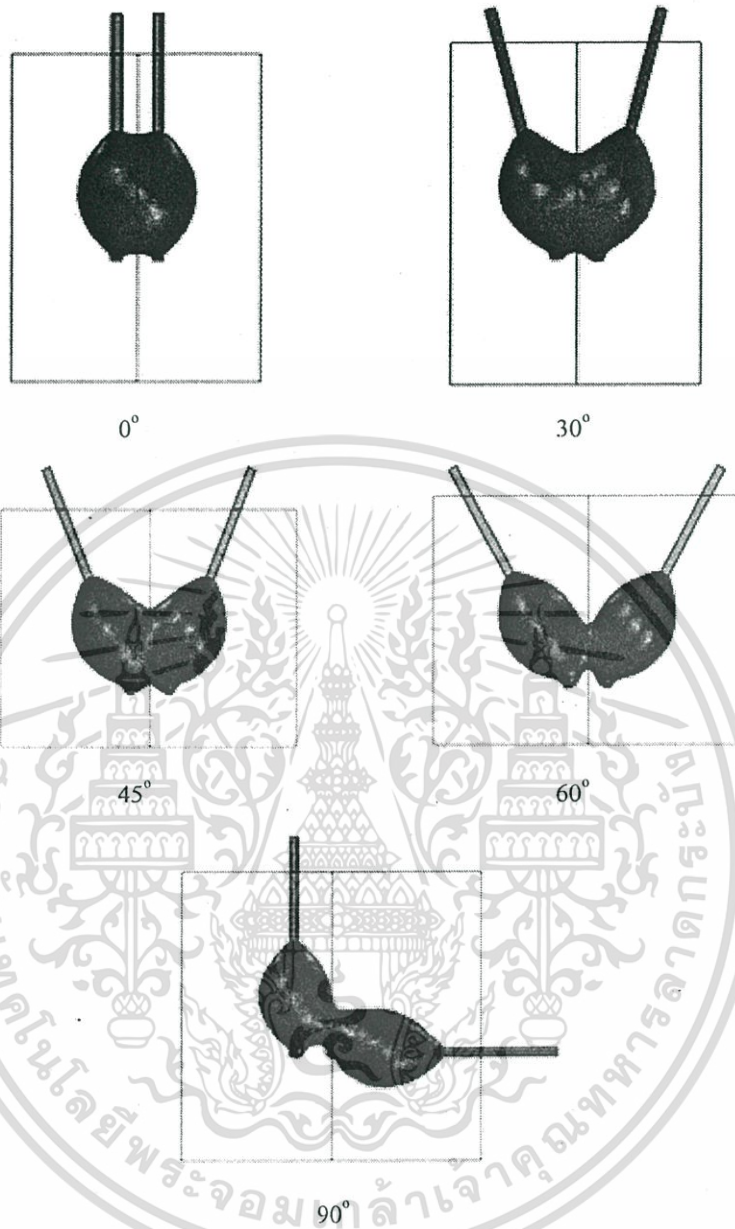
ใกล้เคียงกันที่ 100°C นั้น เราจำเป็นต้องป้อนกำลังงานให้กับสายอากาศชนิด COA ให้มากกว่าสายอากาศแบบ CSA จึงจะทำให้บริเวณที่ Open-Tip ของสายอากาศมีอุณหภูมิใกล้เคียงหรือเท่ากับบริเวณ Slot ของสายอากาศแบบ CSA จึงสรุปได้ว่าสายอากาศแบบ CSA นั้นจะให้ค่ากำลังงานความร้อนที่สูงกว่าสายอากาศแบบ COA ที่กำลังงานอินพุตที่เท่ากัน จึงเป็นเหตุผลให้ในการทดลองครั้งนี้เราจึงป้อนกำลังงานที่อินพุตของสายอากาศทั้งสองชนิดไม่เท่ากัน เนื่องจากการทดลองนั้นเราต้องการศึกษาภายใต้เงื่อนไขของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นที่เนื้อเยื่อที่เท่ากัน หรือใกล้เคียงกันมากที่สุดที่เวลาการทดลองที่เท่ากัน จึงจำเป็นต้องมีการให้ค่ากำลังงานอินพุตที่ไม่เท่ากันของสายอากาศทั้งสองชนิด

รูปที่ 4.5 แสดงผลจากการทดลองเมื่อเรานำค่าของ SAR ของสายอากาศทั้งสองชนิดมาสร้างกราฟ จะทำให้เราเห็นรูปแบบของการกระจายตัวของคลื่นที่ชัดเจนขึ้นและเป็นเหตุให้สรุปผลได้ว่าสาเหตุที่ผลของการทำลายเซลล์มะเร็งของสายอากาศชนิด COA นั้นให้ขนาดของการทำลายที่มากกว่าสายอากาศแบบ CSA จากกราฟเราจะเห็นว่าสายอากาศแบบ COA นั้นจะมีการกระจายตัวที่กว้างกว่าในแบบของ CSA ในขณะที่ความลึกในการกระจายตัวมีปริมาณใกล้เคียงกัน โดยในแบบ CSA นั้นจะให้ความลึกที่มากกว่าเล็กน้อย จึงเป็นเหตุให้ขนาดของการทำลายเซลล์มะเร็งของสายอากาศแบบ COA มีขนาดที่ใหญ่กว่าการทำลายของสายอากาศชนิด CSA

4.2 แสดงผลของการทดลองโดยใช้สายอากาศชนิดคู่แบบชนิดเดียวกันและแบบผสมกัน

โดยการทดลองนี้เราจะนำสายอากาศมาใช้งานร่วมกันแบบสองสายอากาศ โดยใช้คู่สายอากาศแบบ (CSA-CSA), (COA-COA), (CSA-COA), และทำการจัดเรียงที่มุมองศา 0, 30, 45, 60, 90 องศา โดยใช้ค่ากำลังงานที่อินพุตที่เท่ากันที่ 10 วัตต์ 300 วินาที เพื่อศึกษาลักษณะรูปร่างและปริมาตรการทำลายที่เกิดขึ้น

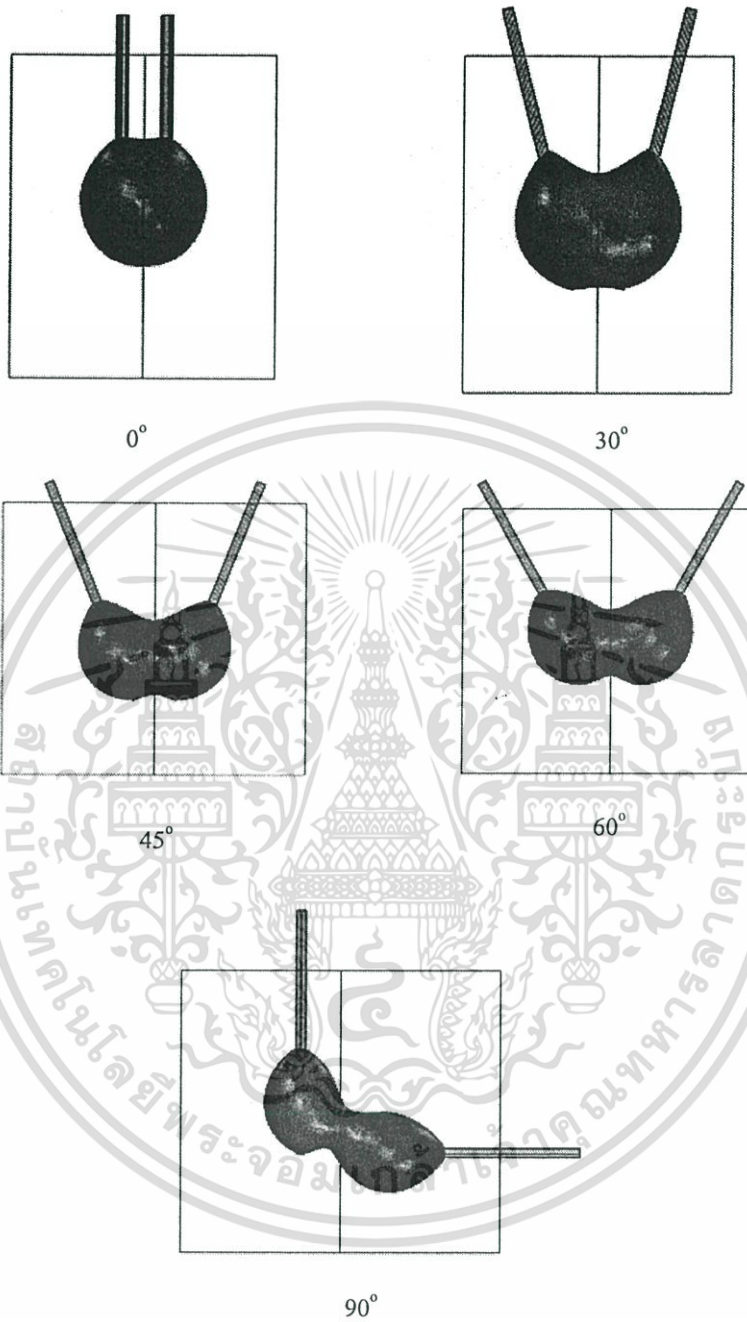
4.2.1 แสดงแบบจำลองลักษณะการทำลายในสายอากาศแบบคู่ชนิด (CSA-CSA)



รูปที่ 4.6 แสดงลักษณะการทำลายเซลล์โลหะที่บริเวณอุณหภูมิเท่ากับมากกว่า 50°C ขึ้นไปของสายอากาศแบบ CSA-CSA (0°), CSA-CSA (30°), CSA-CSA (45°), CSA-CSA (60°), CSA-CSA (90°)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

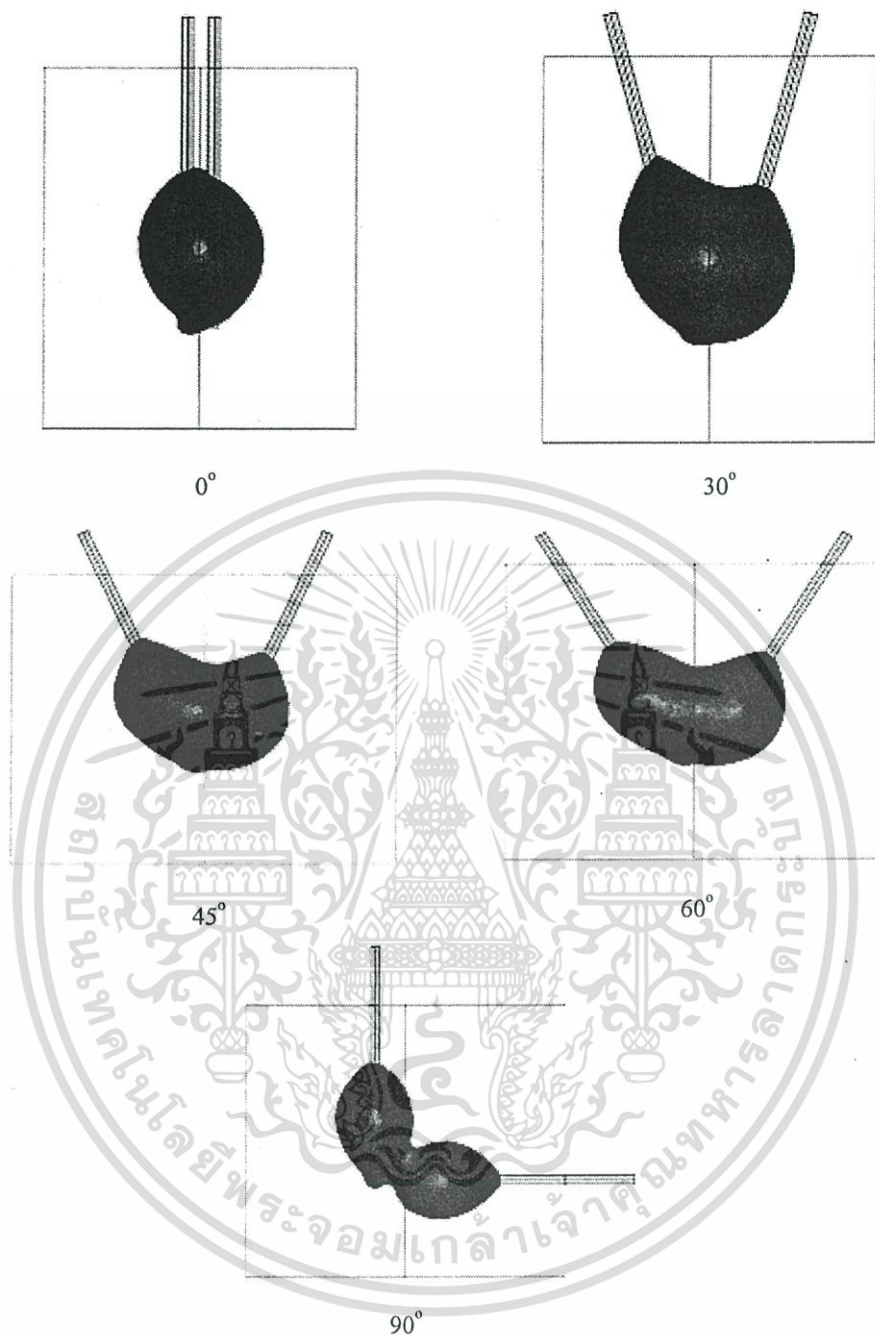
4.2.2 แสดงแบบจำลองลักษณะการทำลายในสายอากาศแบบคู่ขนาน (COA-COA)



รูปที่ 4.7 แสดงลักษณะการทำลายเซลล์มะเร็งที่บริเวณอุณหภูมิเท่ากับมากกว่า 50°C ขึ้นไปของสายอากาศแบบ COA-COA (0°), COA-COA (30°), COA-COA (45°), COA-COA (60°), COA-COA (90°)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 แสดง แบบจำลองลักษณะการทำลายในสายอากาศแบบคู่ชนิด (CSA-COA)



รูปที่ 4.8 แสดงลักษณะการทำลายเซลล์มะเร็งที่บริเวณอุณหภูมิเท่ากับมากกว่า 50°C ขึ้นไปของสายอากาศแบบ CSA-COA (0°), CSA-COA (30°), CSA-COA (45°), CSA-COA (60°), CSA-COA (90°)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แสดงปริมาณการทำลายเซลล์มะเร็งของการรักษาด้วยสายอากาศแบบคู่ทั้ง 5 แบบการจัดเรียง ที่พลังงาน 10 W โดยใช้เวลา 300 วินาทีโดยวางปลายห่างกัน 10 mm โดยไม่พิจารณาในเรื่องของอุณหภูมิที่เกิน 100°C

ชนิดของสายอากาศ	ปริมาณของแต่ละองศาการจัดเรียงสายอากาศ (cm ³) 300 วินาที				
	0°	30°	45°	60°	90°
(CSA-CSA)	12.76	13.14	13.59	13.16	11.20
(COA-COA)	14.03	12.91	12.64	13.29	11.55
(CSA-COA)	11.49	15.78	13.61	13.31	11.67

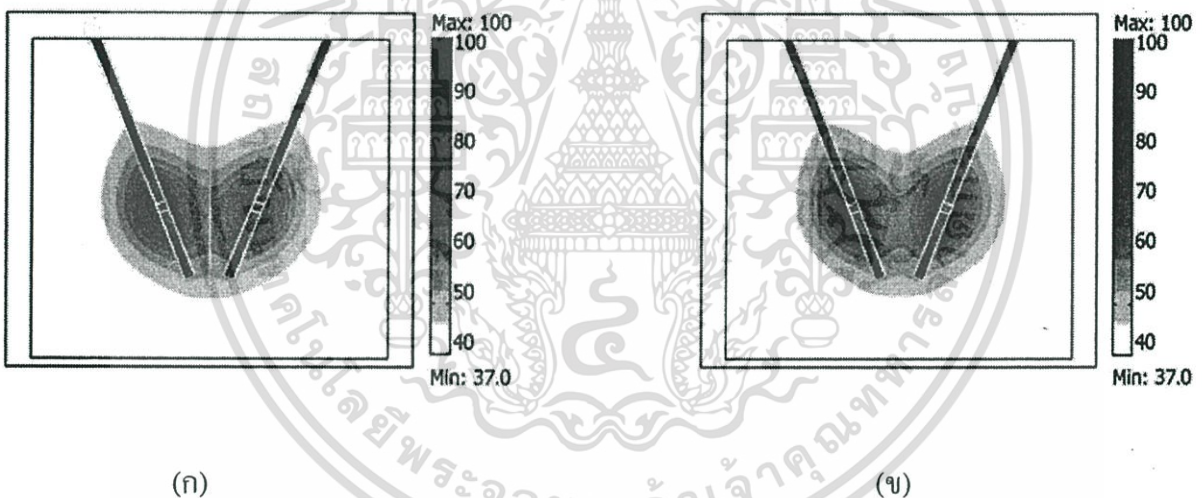
จากตารางที่ 4.2 จะแสดงผลของการทดลองที่ 4.2 ทั้งหมดในค่าของปริมาณในการทำลายเซลล์มะเร็งที่อุณหภูมิตั้งแต่ 50°C ขึ้นไปโดยที่ทุกรูปแบบของการทดลองนี้จะทำการป้อนกำลังงานอินพุตที่สายอากาศเท่ากันทุกรูปแบบก่อนที่ 10 วัตต์ ในเวลา 300 วินาที เพื่อดูผลของรูปร่างลักษณะการทำลายที่เกิดขึ้นจากการที่เราเอาสายอากาศมาใช้ร่วมกัน ทั้งสองสายอากาศทั้งแบบชนิดเดียวกันและต่างชนิดกัน โดยมีการจัดวางที่ทำมุมต่างๆกันออกไปที่ 0, 30, 45, 60, และ 90 องศา เพื่อให้เกิดลักษณะการทำลายที่หลากหลายมากขึ้น และเพื่อให้เราทราบว่า การจัดวางและเลือกสายอากาศ ในแบบใดที่จะทำให้เกิดการทำลายมากที่สุด โดยในการทดลองเราจะพบว่า เมื่อใช้สายอากาศแบบ (CSA-CSA) นั้นการจัดวางที่ให้การทำลายมากที่สุดคือแบบ 45 องศา เมื่อใช้สายอากาศแบบ (COA-COA) การจัดวางที่ให้การทำลายมากที่สุดคือแบบ 0 องศา และเมื่อเราใช้สายอากาศแบบ (CSA-COA) การจัดวางที่ให้การทำลายมากที่สุดนั้นจะเป็นแบบ 30 องศา และเมื่อเราพิจารณาที่การจัดวางเพื่อให้เกิดการทำลายที่มีรูปร่างแตกต่างกันออกไปจะพบว่า เมื่อจัดวางแบบ 0 องศาการใช้สายอากาศแบบ (COA-COA) จะให้การทำลายมากที่สุด และแบบ 30, 45, 60, 90 องศาการใช้สายอากาศแบบ (CSA-COA) จะให้การทำลายที่มากที่สุด

4.3 เปรียบเทียบผลการทดลองสายอากาศคู่ชนิด (CSA-CSA), (COA-COA), (CSA-COA) ที่ให้ผลปริมาณการทำลายมากที่สุดในแต่ละการจัดเรียง

ในการทดลองนี้เราจะนำเอาผลของแต่ละคู่สายอากาศที่มีการจัดเรียงแล้วให้ผลของการทำลายที่มากที่สุดของแต่ละคู่ชนิดสายอากาศมาทำการทดลองอีกครั้งโดยมีการควบคุมอุณหภูมิที่เกิดขึ้นที่เนื้อเยื่อซึ่งทำการควบคุมอุณหภูมิ 2 วิธีคือการควบคุมอุณหภูมิแบบมีการปรับเปลี่ยนค่ากำลังงานอินพุท กับการควบคุมอุณหภูมิแบบการให้กำลังงานอินพุทที่คงที่กับสายอากาศ โดยจะควบคุมให้อุณหภูมิอยู่ในช่วง $95^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ โดยใช้เวลาในการทดลองที่ 300 วินาที

4.3.1 ผลการใช้ CSA-CSA (45°) ($T = 100^{\circ}\text{C}$, $t = 300$ s)

การทดลองที่ 4.3.1 นี้จะใช้คู่สายอากาศแบบ (CSA-CSA) โดยมีมุมที่ให้ปริมาณของการทำลายมากที่สุดอยู่ที่ 45 องศาโดยนำมาทดลองอีกครั้งโดยมีการควบคุมอุณหภูมิทั้งสองวิธี



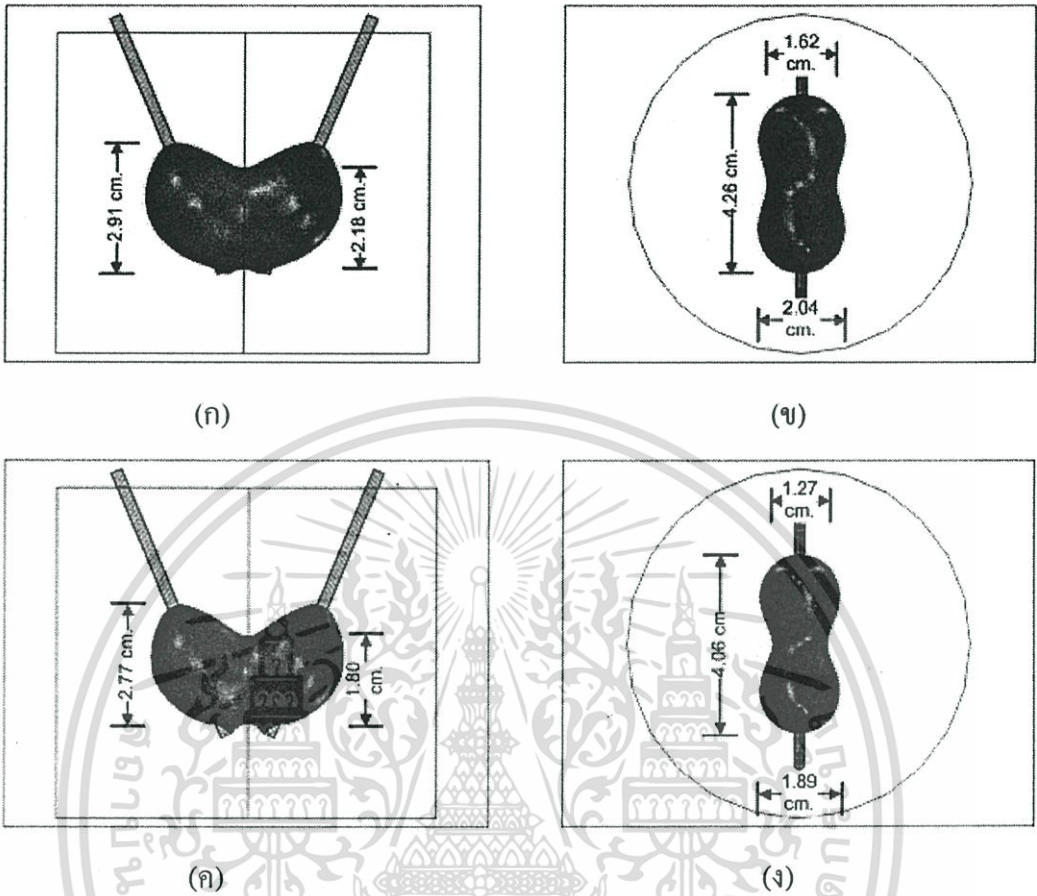
รูปที่ 4.9 แสดงลักษณะการกระจายความร้อนในสายอากาศชนิด (CSA-CSA (45°)) โดยมีการควบคุมอุณหภูมิที่เกิดขึ้นไม่ให้เกิน $95^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$

(ก) มีการควบคุมอุณหภูมิแบบมีการปรับเปลี่ยนกำลังงาน

(ข) มีการควบคุมอุณหภูมิแบบให้กำลังงานคงที่

รูปที่ 4.9 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายความร้อนของสายอากาศแบบ (CSA-CSA (45°)) โดยควบคุมการเกิดอุณหภูมิสูงสุดให้อยู่ในช่วง $95^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ในรูป (ก) แสดงผลที่ได้จากการควบคุมอุณหภูมิแบบมีการปรับเปลี่ยนค่ากำลังงานขาเข้า รูป (ข) แสดงผลที่ได้จากการควบคุมอุณหภูมิแบบให้กำลังงานคงที่ กับสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

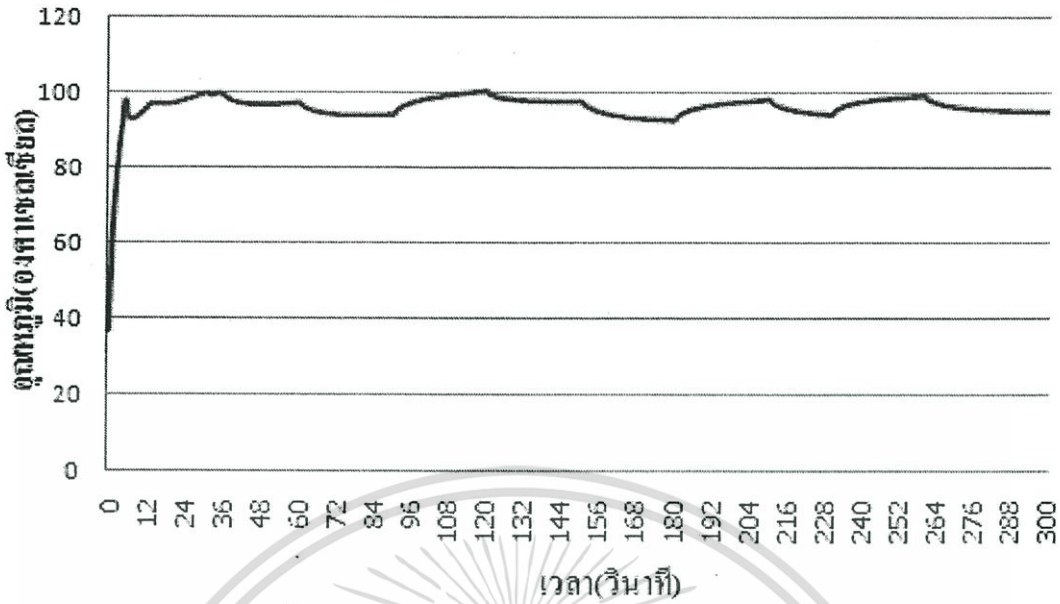


รูปที่ 4.10 แสดงขนาดและรูปร่างของการทำลายที่มีการควบคุมอุณหภูมิทั้งสองแบบสายอากาศ แบบ (CSA-CSA (45°))

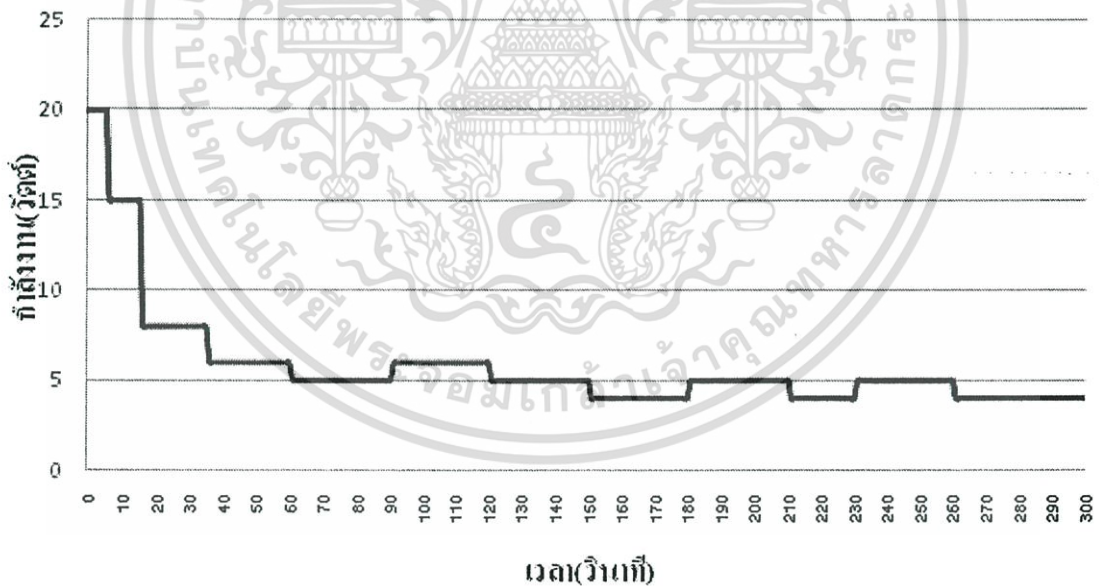
(ก), (ข) การควบคุมแบบปรับเปลี่ยนค่ากำลังงาน

(ค), (ง) ควบคุมแบบให้กำลังงานคงที่

รูปที่ 4.10 แสดงขนาดและรูปร่างของการทำลายเซลล์มะเร็งที่เกิดขึ้น ของการควบคุมอุณหภูมิทั้งสองแบบ ซึ่งใน รูป (ก), (ข) จะเป็นการควบคุมอุณหภูมิแบบปรับเปลี่ยนค่ากำลังงานขาเข้าให้กับสายอากาศ รูป (ค), (ง) จะเป็นการควบคุมอุณหภูมิแบบให้กำลังงานคงที่กับสายอากาศ ซึ่งจะเห็นว่า การควบคุมแบบปรับเปลี่ยนกำลังงานขาเข้านั้น ให้ขนาดของการทำลายที่ใหญ่กว่าแบบการให้กำลังงานคงที่ตลอดเวลา

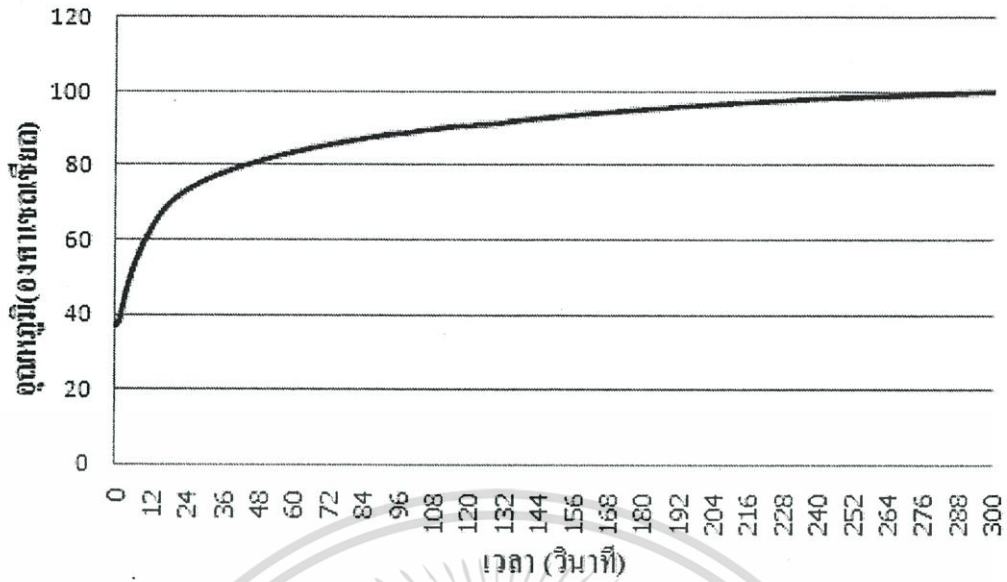


กราฟที่ 4.1 แสดงการคอนโทรลอุณหภูมิที่บริเวณติดกับ Slot ของสายอากาศแบบ CSA-CSA (45°) โดยให้มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง $95^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ซึ่งทำการคอนโทรลโดยปรับเปลี่ยนกำลังงานที่ป้อนให้กับสายอากาศในช่วง 4–20 W ในระยะเวลา 300 วินาที



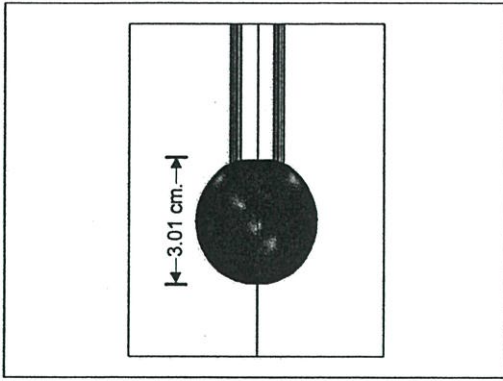
กราฟที่ 4.2 แสดงการปรับค่าพลังงานที่ใช้ในการคอนโทรลเพื่อรักษาระดับอุณหภูมิของสายอากาศแบบ CSA-CSA (45°) ให้คงที่ในช่วง $95^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ โดยมีการปรับค่ากำลังงานในช่วง 4–20 W ในระยะเวลา 300 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

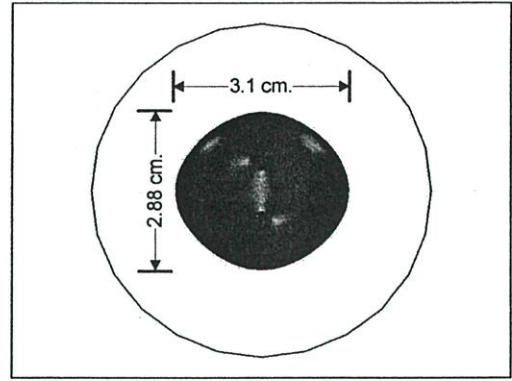


กราฟที่ 4.3 แสดงอุณหภูมิที่บริเวณติดกับสายอากาศช่วงบริเวณ Slot ของสายอากาศโดยให้ค่าพลังงานคงที่กับสายอากาศที่ 10W ในระยะเวลา 300 วินาที และให้ระดับอุณหภูมิในช่วง $95^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$

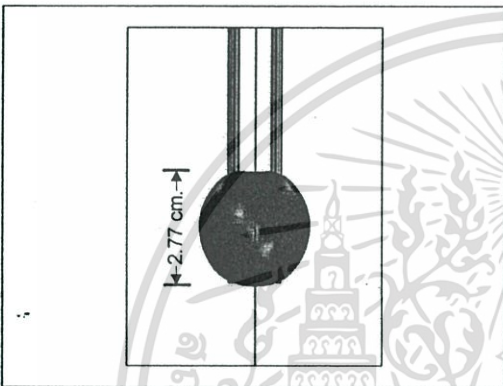
กราฟที่ 4.1 แสดงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในเนื้อเยื่อ โดยมีการควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง $95^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ซึ่งใช้การควบคุมอุณหภูมิแบบ มีการปรับเปลี่ยนค่ากำลังงานขาเข้า กราฟที่ 4.2 จะเป็นการแสดงรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างการเลือกค่ากำลังงานขาเข้ากับเวลาที่ใช้ในการทดลอง และกราฟที่ 4.3 แสดงรูปแบบการเกิดอุณหภูมิในเนื้อเยื่อโดยมีการให้ค่ากำลังงานขาเข้าที่คงที่กับสายอากาศ



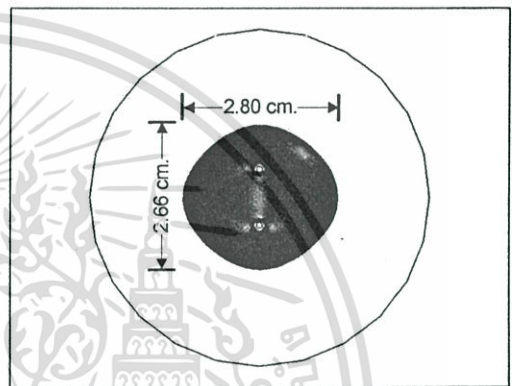
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

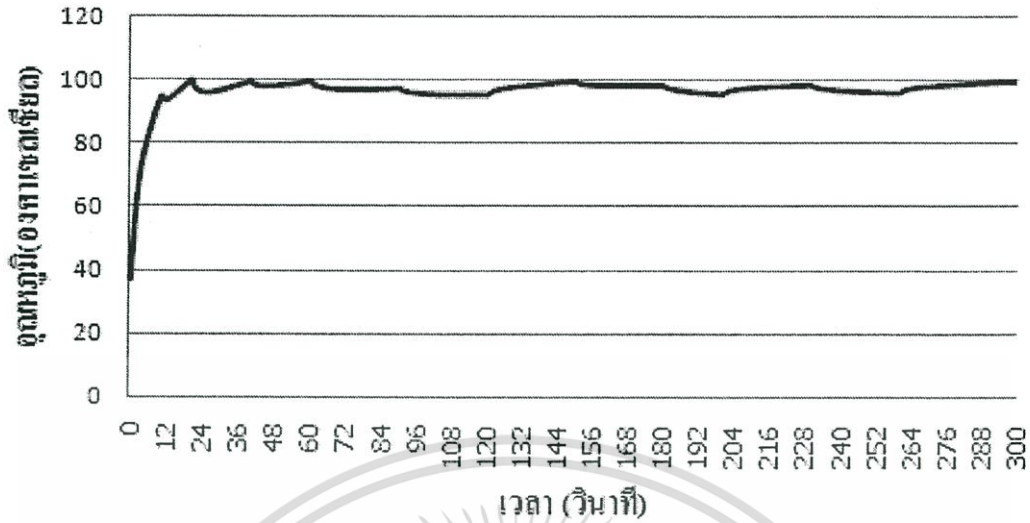
รูปที่ 4.12 แสดงขนาดและรูปร่างของการทำลายเซลล์มะเร็งที่เกิดขึ้น ของการควบคุมอุณหภูมิทั้งสองแบบสายอากาศ

แบบ (COA-COA (0°))

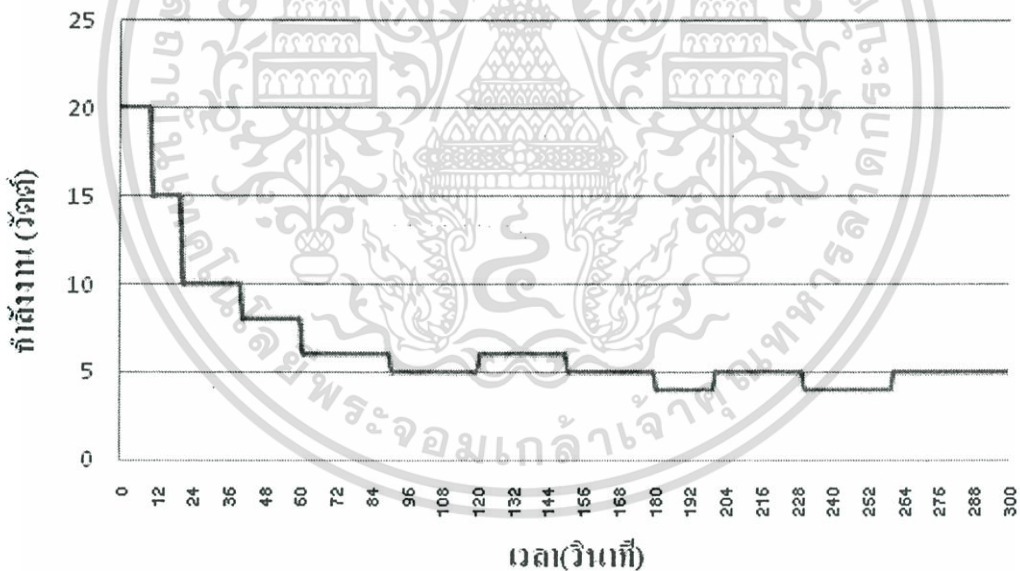
(ก), (ข) จะเป็นการควบคุมแบบปรับเปลี่ยนค่ากำลังงาน

(ค), (ง) จะควบคุมแบบให้กำลังงานคงที่

รูปที่ 4.12 แสดงขนาดและรูปร่างของการทำลายเซลล์มะเร็งที่เกิดขึ้น ของการควบคุมอุณหภูมิทั้งสองแบบ ซึ่งใน รูป (ก), (ข) จะเป็นการควบคุมอุณหภูมิแบบปรับเปลี่ยนค่ากำลังงานขาเข้าให้กับสายอากาศ รูป (ค), (ง) จะเป็นการควบคุมอุณหภูมิแบบให้กำลังงานคงที่กับสายอากาศ ซึ่งจะเห็นว่า การควบคุมแบบปรับเปลี่ยนกำลังงานขาเข้านั้น ให้ขนาดของการทำลายที่ใหญ่กว่าแบบการให้กำลังงานคงที่ตลอดเวลา

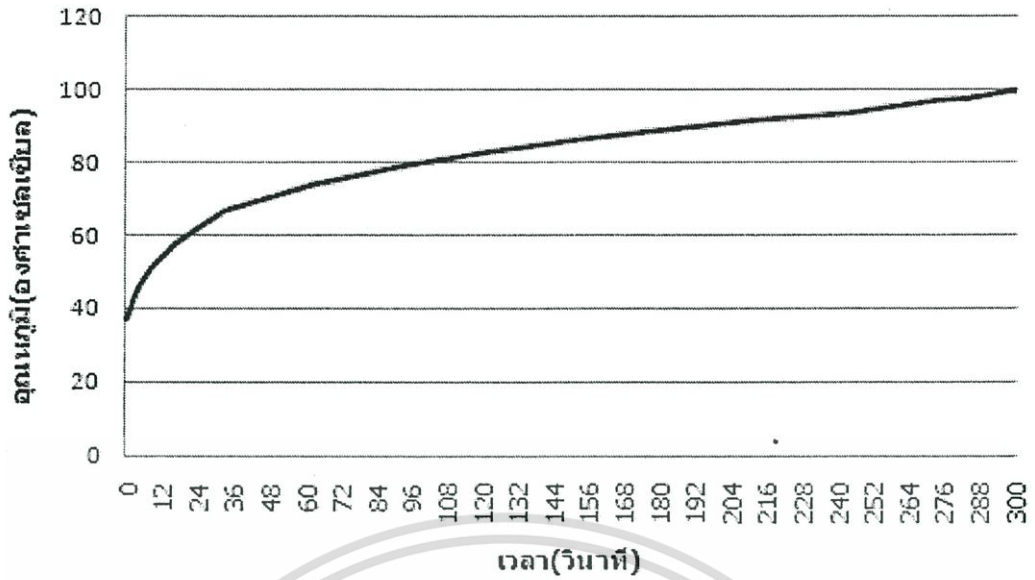


กราฟที่ 4.4 แสดงการคอนโทรลอุณหภูมิที่บริเวณติดกับ Open-Tip ของสายอากาศแบบ COA-COA (0°) โดยให้มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง $95^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ซึ่งทำการคอนโทรลโดยปรับเปลี่ยนกำลังงานที่ป้อนให้กับสายอากาศในช่วง 4–20 W ในระยะเวลา 300 วันาที



กราฟที่ 4.5 แสดงการปรับค่ากำลังงานที่ใช้ในการคอนโทรลเพื่อรักษาระดับอุณหภูมิให้คงที่ของสายอากาศแบบ COA-COA (0°) อยู่ในช่วง $95^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ โดยมีการปรับค่ากำลังงานในช่วง 4–20 W ในระยะเวลา 300 วันาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

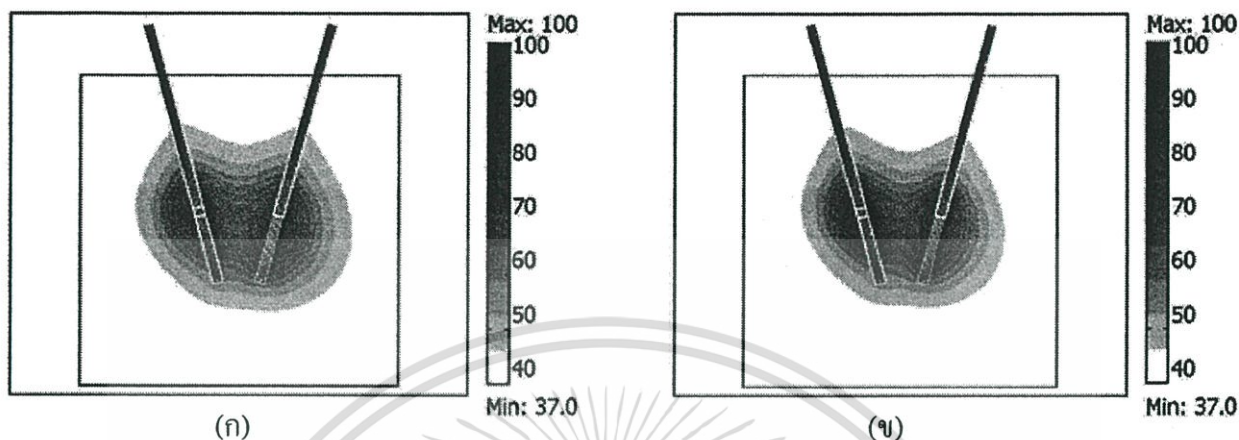


กราฟที่ 4.6 แสดงอุณหภูมิที่บริเวณติดกับสายอากาศช่วงที่ทำการ Open-Tip โดยให้ค่าพลังงานคงที่กับสายอากาศแบบ COA-COA (0°) ที่ 15W ในระยะเวลา 300 วินาที และให้ระดับอุณหภูมิอยู่ในช่วง $95^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$

กราฟที่ 4.4 แสดงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในเนื้อเยื่อโดยมีการควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง $95^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ ซึ่งใช้การควบคุมอุณหภูมิแบบ มีการปรับเปลี่ยนค่ากำลังงานขาเข้า กราฟที่ 4.5 จะเป็นการแสดงรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างการเลือกค่ากำลังงานขาเข้ากับเวลาที่ใช้ในการทดลอง และกราฟที่ 4.6 แสดงรูปแบบการเกิดอุณหภูมิในเนื้อเยื่อโดยมีการให้ค่ากำลังงานขาเข้าที่คงที่กับสายอากาศ

4.3.3 ผลการใช้ CSA-COA (30°) (T = 100°C, t = 300 s)

การทดลองที่ 4.3.3 นี้จะใช้คู่สายอากาศแบบ (CSA-COA) โดยมีมุมที่ให้ปริมาณของการทำลายมากที่สุดอยู่ที่ 30 องศาโดยนำมาทดลองอีกครั้ง โดยมีการควบคุมอุณหภูมิทั้งสองวิธี



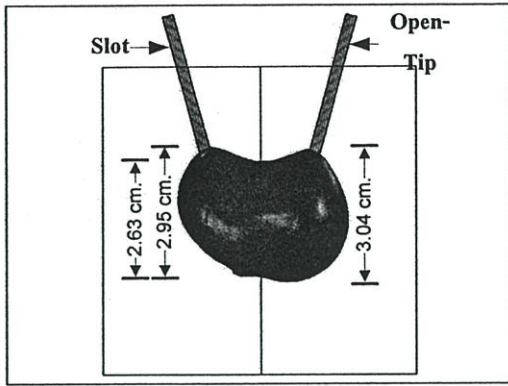
รูปที่ 4.13 แสดงลักษณะการกระจายความร้อนในสายอากาศชนิด (CSA-COA (30°)) โดยมีการ

ควบคุมอุณหภูมิที่เกิดขึ้น ไม่ให้เกิน $95^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$

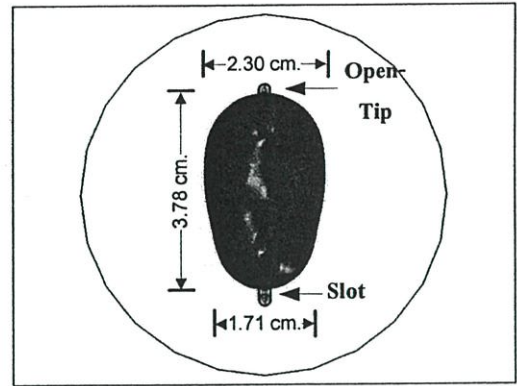
(ก) มีการควบคุมอุณหภูมิแบบมีการปรับเปลี่ยนกำลังงาน

(ข) มีการควบคุมอุณหภูมิแบบให้กำลังงานคงที่

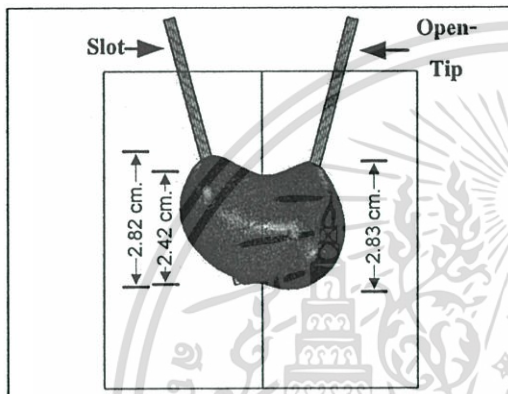
รูปที่ 4.13 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายความร้อนของสายอากาศแบบ (CSA-COA (30°)) โดยควบคุมการเกิดอุณหภูมิสูงสุดให้อยู่ในช่วง $95^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ในรูป (ก) แสดงผลที่ได้จากการควบคุมอุณหภูมิแบบมีการปรับเปลี่ยนค่ากำลังงานขาเข้า รูป (ข) แสดงผลที่ได้จากการควบคุมอุณหภูมิแบบให้กำลังงานคงที่ กับสายอากาศ



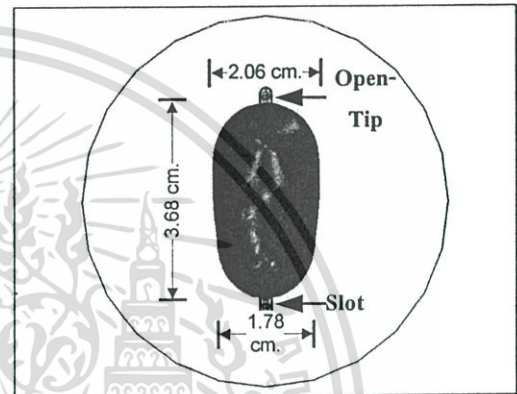
(ก)



(ข)



(ค)



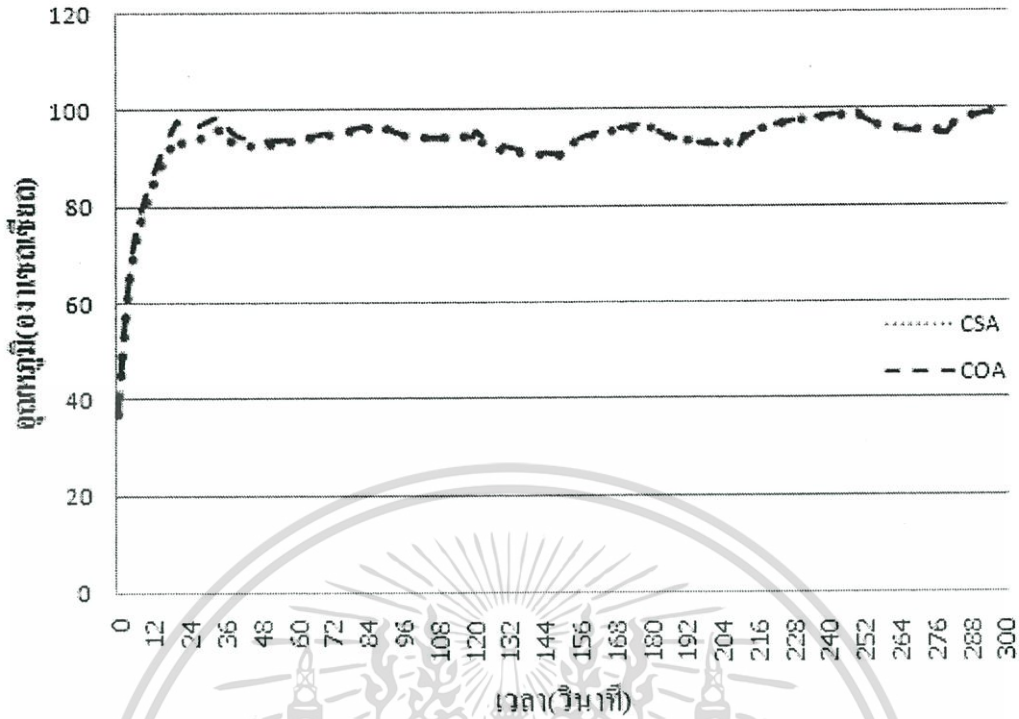
(ง)

รูปที่ 4.14 แสดงขนาดและรูปร่างของการทำลายที่มีการควบคุมอุณหภูมิทั้งสองแบบสายอากาศแบบ (CSA-COA (30°))

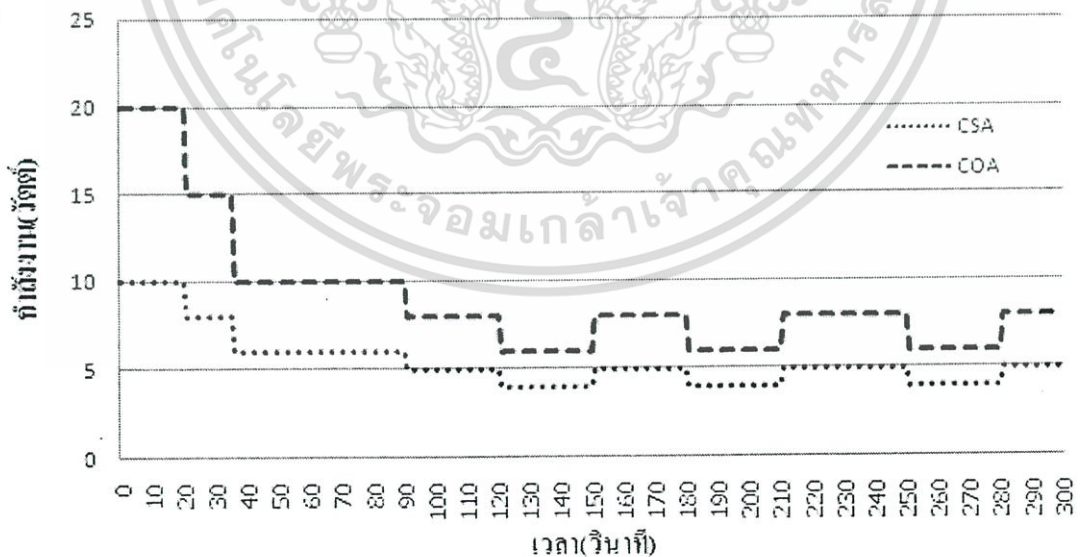
(ก), (ข) จะเป็นการควบคุมแบบปรับเปลี่ยนค่ากำลังงาน

(ค), (ง) จะควบคุมแบบให้กำลังงานคงที่

รูปที่ 4.14 แสดงขนาดและรูปร่างของการทำลายเซลล์มะเร็งที่เกิดขึ้น ของการควบคุมอุณหภูมิทั้งสองแบบ ซึ่งใน รูป (ก), (ข) จะเป็นการควบคุมอุณหภูมิแบบปรับเปลี่ยนค่ากำลังงานขาเข้าให้กับสายอากาศ รูป (ค), (ง) จะเป็นการควบคุมอุณหภูมิแบบให้ค่ากำลังงานคงที่กับสายอากาศ ซึ่งจะเห็นว่า การควบคุมแบบปรับเปลี่ยนกำลังงานขาเข้านั้น ให้ขนาดของการทำลายที่ใหญ่กว่าแบบการให้ค่ากำลังงานคงที่ตลอดเวลา

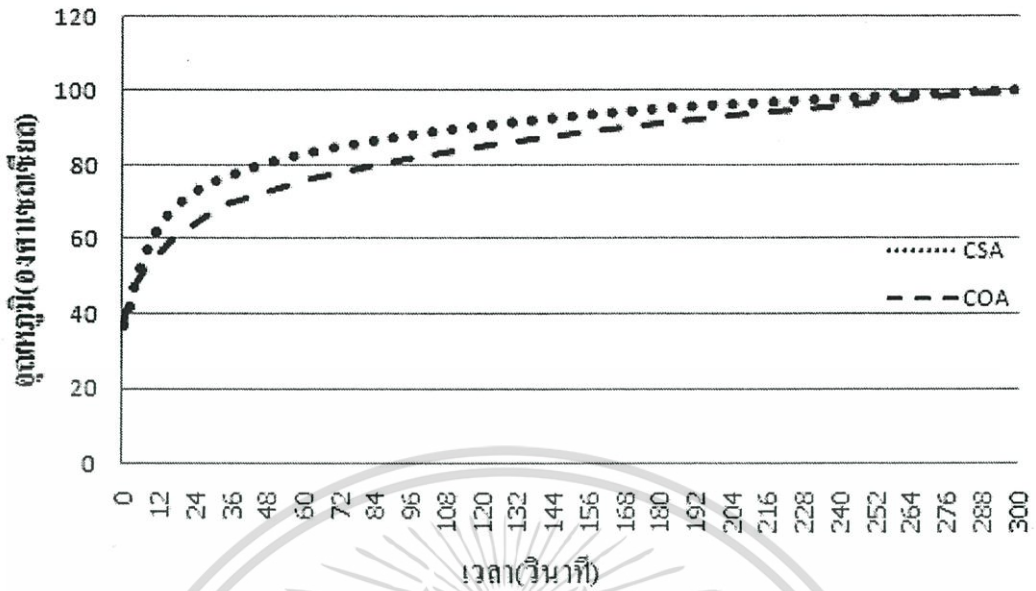


กราฟที่ 4.7 แสดงการคอนโทรลอุณหภูมิที่บริเวณติดกับ Slot และ Tip ของสายอากาศแบบ CSA-COA (30°) โดยให้มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง $95^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ซึ่งทำการคอนโทรลโดยปรับเปลี่ยนพลังงานที่ป้อนให้กับสายอากาศในช่วง 4–20 W ในระยะเวลา 300 วินาที



กราฟที่ 4.8 แสดงการปรับค่ากำลังงานที่ใช้ในการคอนโทรลเพื่อรักษาระดับอุณหภูมิของสายอากาศแบบ CSA-COA (30°) ให้คงที่อยู่ในช่วง $95^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ โดยมีการปรับค่ากำลังงานในช่วง 4–20 W ในระยะเวลา 300 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กราฟที่ 4.9 แสดงอุณหภูมิที่บริเวณติดกับสายอากาศช่วงบริเวณ Slot และ Tip ของสายอากาศแบบ CSA-COA (30°) โดยให้ค่าพลังงานคงที่กับสายอากาศที่ 10W และ 15W ตามลำดับในระยะเวลา 300 วินาที และให้ระดับอุณหภูมิอยู่ในช่วง $95^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$

กราฟที่ 4.7 แสดงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในเนื้อเชื้อโดยมีการควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง $95^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ ซึ่งใช้การควบคุมอุณหภูมิแบบ มีการปรับเปลี่ยนค่ากำลังงานขาเข้า กราฟที่ 4.8 จะเป็นการแสดงรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างการเลือกค่ากำลังงานขาเข้ากับเวลาที่ใช้ในการทดลอง และกราฟที่ 4.9 แสดงรูปแบบการเกิดอุณหภูมิในเนื้อเชื้อโดยมีการให้ค่ากำลังงานขาเข้าที่คงที่กับสายอากาศ

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าปริมาตรการทำลายที่อุณหภูมิในช่วง $50^\circ\text{C} - 100^\circ\text{C}$ ของการเลือกใช้สายอากาศแต่ละชนิดที่ให้ปริมาตรการทำลายมากสุดในการทดลองที่ 4.2 แล้วมาทดลองใหม่โดยมีการควบคุมอุณหภูมิทั้งสองแบบที่เวลา 300 วินาที

ชนิดของสายอากาศ	ปริมาตรการทำลายเซลล์มะเร็ง (cm^3) ที่ 300 วินาที	
	คอนโทรลอุณหภูมิโดยการปรับเปลี่ยนค่ากำลังงาน	คอนโทรลอุณหภูมิโดยการเลือกค่ากำลังงานที่คงที่
CSA-CSA (45°)	14.39	13.59
COA-COA (0°)	16.77	15.84
CSA-COA (30°)	17.53	16.29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.3 จะแสดงผลปริมาณการทำลายเซลล์มะเร็งด้วยวิธีการควบคุมอุณหภูมิทั้งสองแบบเพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้ว่ามีความแตกต่างกันอย่างไรซึ่งจากผลที่ได้เราจะพบว่าการใช้วิธีการควบคุมแบบปรับค่ากำลังงานอินพุตที่สายอากาศ จะให้ผลปริมาณการทำลายที่มากกว่าการเลือกใช้การควบคุมแบบให้ค่ากำลังงานคงที่เพียงค่าเดียว

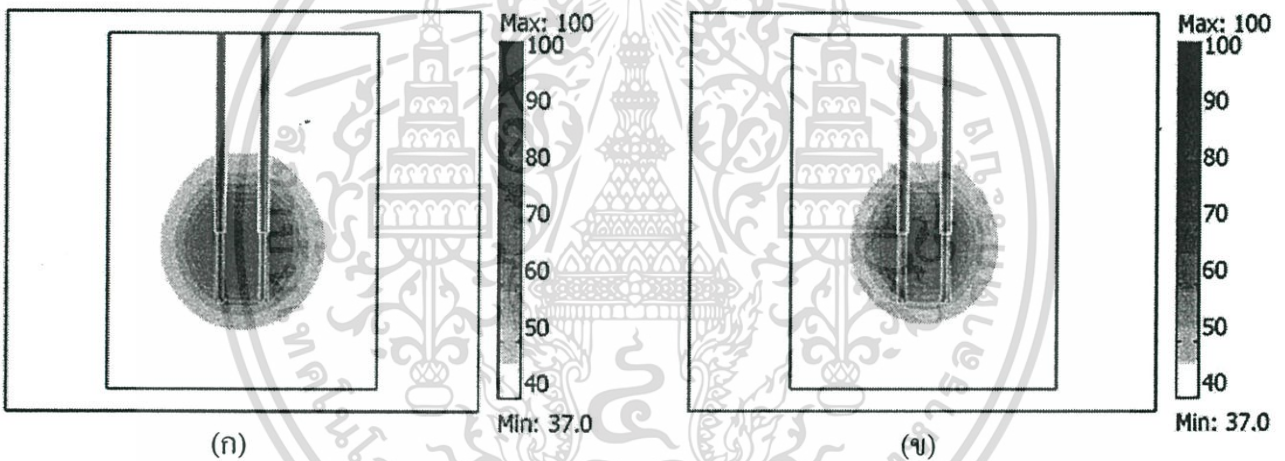
จากการทดลองที่ 4.3 จะเป็นการนำการทดลองที่ 4.2 มาทดลองใหม่อีกครั้ง โดยในการทดลองนี้เราจะเลือกเอาเฉพาะ ผลของการทดลองที่ให้ค่าปริมาณการทำลายที่มากที่สุดของแต่ละชนิดของการเลือกใช้คู่สายอากาศ (CSA-CSA, COA-COA, CSA-COA) มาทำการทดลองโดยมีการคำนึงถึงการควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ ในช่วง 90°C ถึง 100°C โดยใช้การควบคุมแบบคอนโทรลโดยการปรับค่ากำลังงานที่ป้อนให้แก่สายอากาศแต่ละแท่งและ การควบคุมอุณหภูมิโดยเลือกป้อนค่ากำลังงานคงที่ ที่ไม่ทำให้อุณหภูมิสุดท้ายเกิน 100°C โดยในการควบคุมแบบปรับเปลี่ยนค่ากำลังงานอินพุตในช่วงเวลาเริ่มต้นจะให้กำลังงานอินพุตที่สูงสุดก่อนเพื่อให้อุณหภูมิที่บริเวณจุดที่เราทำการสังเกตมีค่าถึงที่เราต้องการที่ 100°C โดยใช้เวลาที่สั้นที่สุด จากนั้นจึงทำการลดอุณหภูมิและเพิ่มโดยการปรับค่ากำลังงานอินพุตให้มีค่าต่ำลงและเพิ่มขึ้น โดยให้อยู่ในช่วงที่กำหนดคือที่ $95^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ กำลังงานอินพุตที่เราใช้ในการทดลองครั้งนี้จะอยู่ในช่วง 4 วัตต์ ถึง 20 วัตต์ และในส่วนของ การทดลองที่ใช้การควบคุมแบบเลือกค่าพลังงานแบบคงที่ ที่ไม่ทำให้อุณหภูมิสุดท้ายเกิน 100°C นั้นเราใช้ค่ากำลังงาน 10 วัตต์ สำหรับป้อนให้สายอากาศแบบ CSA และ 15 วัตต์ สำหรับสายอากาศแบบ COA จากนั้นทำการวัดหาค่าปริมาณการทำลายที่เกิดขึ้น และขนาดความกว้างความยาวความลึก ที่เกิดขึ้นจากการทดลองควบคุมอุณหภูมิ ทั้งสองแบบซึ่งจากการทดลอง ทำให้เราทราบว่า การที่เราเลือกใช้วิธีการควบคุมแบบปรับเปลี่ยนค่ากำลังงานอินพุตนั้น จะทำให้ได้ประสิทธิภาพในการทำลาย มากกว่าการที่เราเลือกใช้การ ควบคุมอุณหภูมิแบบการใช้ค่ากำลังงานอินพุตค่าเดียว ทั้งในด้านปริมาณของการทำลายและ ขนาดความกว้างความยาวและความลึก ของการทำลาย

4.4 ผลการทดลองสายอากาศแบบคู่ที่การจัดเรียงองศาต่างๆที่ 0, 30, 45, 60, 90 องศา ที่ให้ปริมาตรการทำลายมากที่สุดในแต่ละการจัดเรียง

การทดลองนี้จะเป็นการนำเอาค่าปริมาตรการทำลายที่มากที่สุดของแต่ละมุมมองการจัดเรียงมาทำการทดลองอีกครั้ง โดยกำหนดให้มีการควบคุมอุณหภูมิที่เกิดขึ้นที่เนื้อเยื่อ ให้อยู่ในช่วง $95^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ที่ระยะเวลาในการทดลอง 300 วินาที

4.4.1 แบบจำลองสายอากาศคู่ COA-COA (0°) ($T = 100^{\circ}\text{C}$, $t = 300$ s)

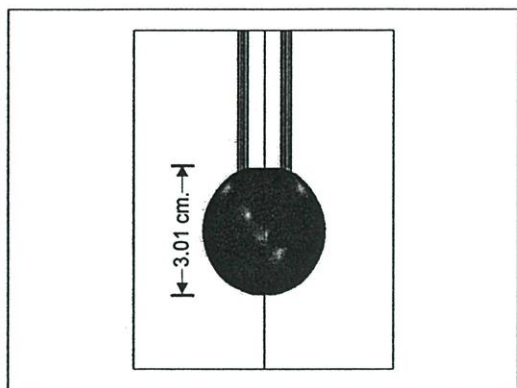
การทดลองนี้จะเป็นการนำเอารูปแบบคู่ของสายอากาศที่ให้การทำลายมากที่สุดที่การจัดเรียง 0 องศา ซึ่งจากการทดลองที่ 4.2 จะพบว่าการใช้สายอากาศแบบ COA-COA จะให้การทำลายมากที่สุดเราจึงได้นำมาทดลองอีกครั้ง โดยมีการควบคุมอุณหภูมิทั้งสองวิธีทั้งแบบการปรับเปลี่ยนกำลังงานอินพุท และแบบการให้ค่ากำลังงานคงที่



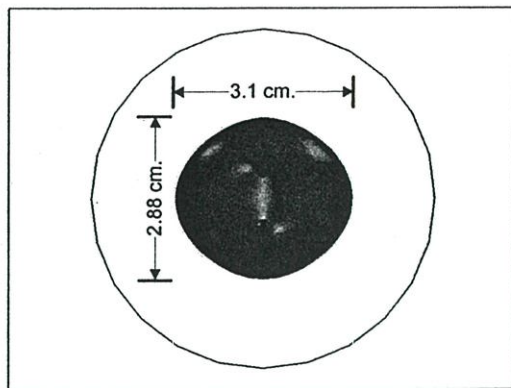
รูปที่ 4.15 แสดงลักษณะการแพร่กระจายความร้อนของการเลือกใช้สายอากาศชนิด COA-COA (0°)

- (ก) แสดงการกระจายในกรณีที่มีการคอนโทรลอุณหภูมิแบบปรับเปลี่ยนค่ากำลังงาน
- (ข) แสดงการกระจายในกรณีที่มีการคอนโทรลอุณหภูมิแบบให้กำลังงานคงที่

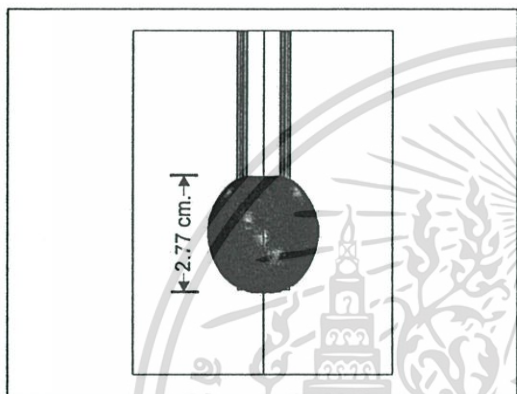
รูปที่ 4.15 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายความร้อนของสายอากาศแบบ (COA-COA (0°)) โดยควบคุมการเกิดอุณหภูมิสูงสุดให้อยู่ในช่วง $95^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ในรูป (ก) แสดงผลที่ได้จากการควบคุมอุณหภูมิแบบมีการปรับเปลี่ยนค่ากำลังงานขาเข้า รูป (ข) แสดงผลที่ได้จากการควบคุมอุณหภูมิแบบให้กำลังงานคงที่ กับสายอากาศ



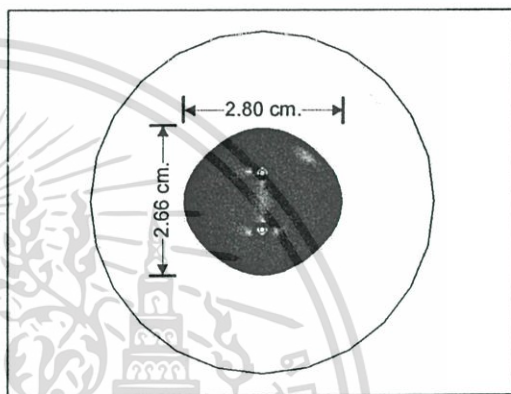
(ก)



(ข)



(ค)

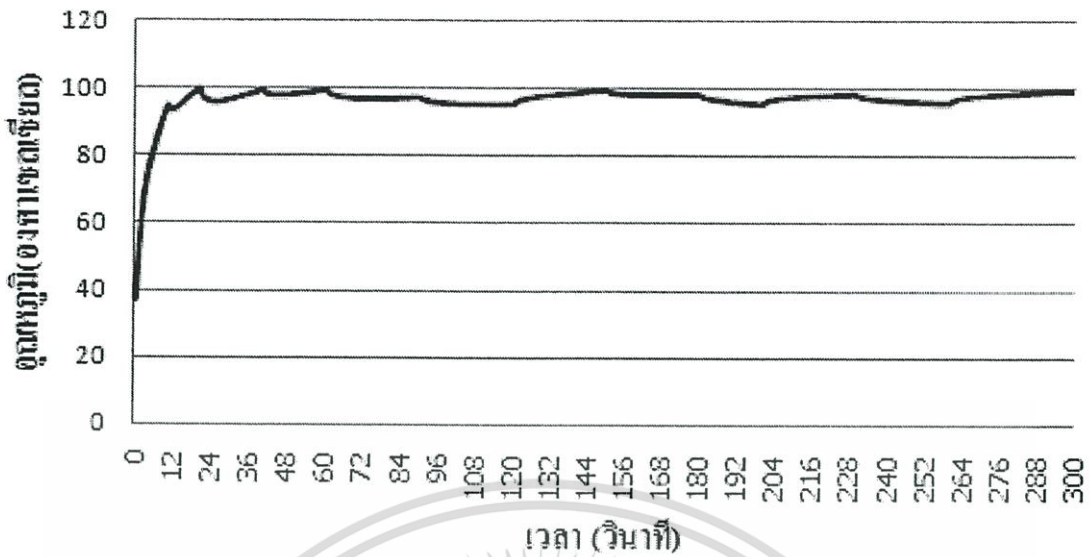


(ง)

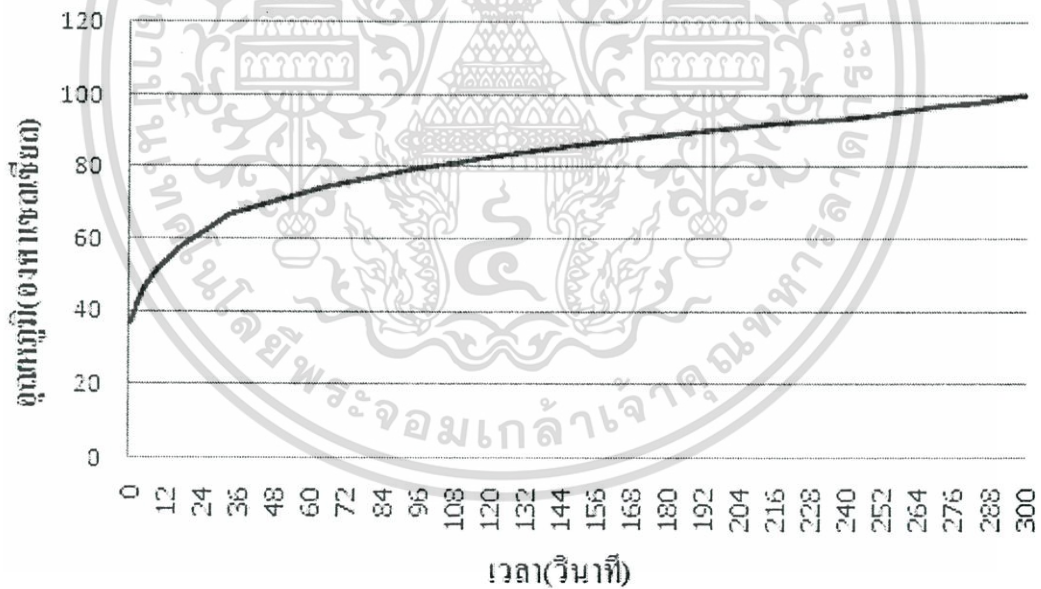
รูปที่ 4.16 แสดงขนาดปริมาตรและลักษณะการทำลายที่อุณหภูมิ 50°C – 100°C ของสายอากาศแบบ COA-COA ที่การจัดเรียง 0 องศา

(ก), (ข) จะแสดงการทำลายโดยใช้การควบคุมอุณหภูมิแบบการปรับเปลี่ยนค่ากำลังงาน
(ค), (ง) แสดงการทำลายโดยใช้การควบคุมอุณหภูมิแบบการให้ค่ากำลังงานคงที่

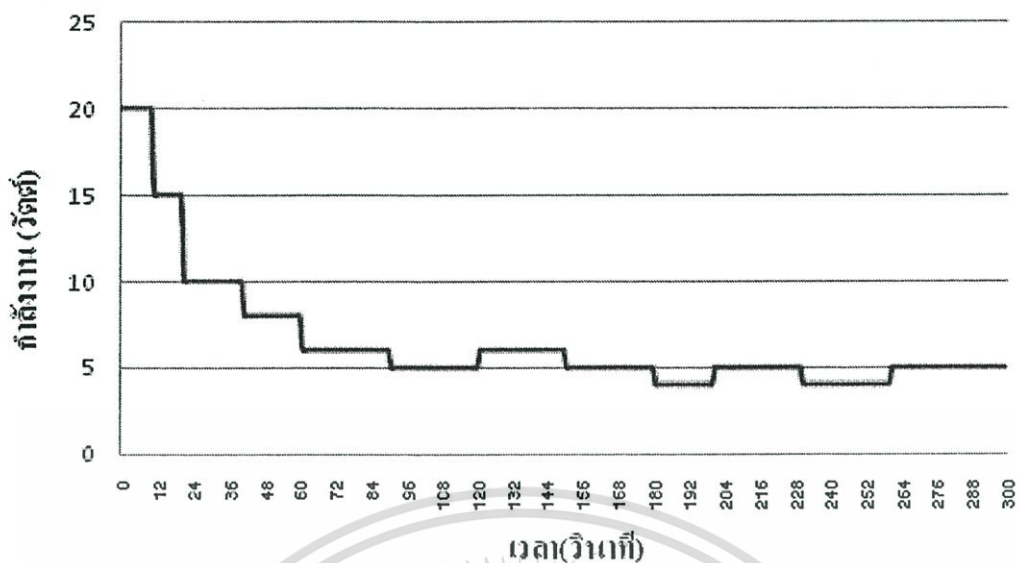
รูปที่ 4.16 แสดงขนาดและรูปร่างของการทำลายเซลล์มะเร็งที่เกิดขึ้น ของการควบคุมอุณหภูมิทั้งสองแบบ ซึ่งใน รูป (ก), (ข) จะเป็นการควบคุมอุณหภูมิแบบปรับเปลี่ยนค่ากำลังงานขาเข้าให้กับสายอากาศ รูป (ค), (ง) จะเป็นการควบคุมอุณหภูมิแบบให้ค่ากำลังงานคงที่กับสายอากาศ ซึ่งจะเห็นว่า การควบคุมแบบปรับเปลี่ยนกำลังงานขาเข้านั้นให้ขนาดของการทำลายที่ใหญ่กว่าแบบการให้ค่ากำลังงานคงที่ตลอดเวลา



กราฟที่ 4.10 แสดงการคอนโทรลอุณหภูมิที่บริเวณติดกับส่วน Open-Tip ของสายอากาศแบบ COA-COA (0°) โดยให้มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง $95^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ ซึ่งทำการคอนโทรลโดยปรับเปลี่ยนกำลังงานที่ป้อนให้กับสายอากาศในช่วง 20 – 4 W ในระยะเวลา 300 วินาที



กราฟที่ 4.11 แสดงอุณหภูมิที่บริเวณติดกับสายอากาศช่วงที่ทำการ Open-Tip แบบ COA-COA (0°) โดยให้ค่ากำลังงานคงที่กับสายอากาศที่ 15W ในระยะเวลา 300 วินาที และให้ระดับอุณหภูมิสูงสุดไม่เกิน $95^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$

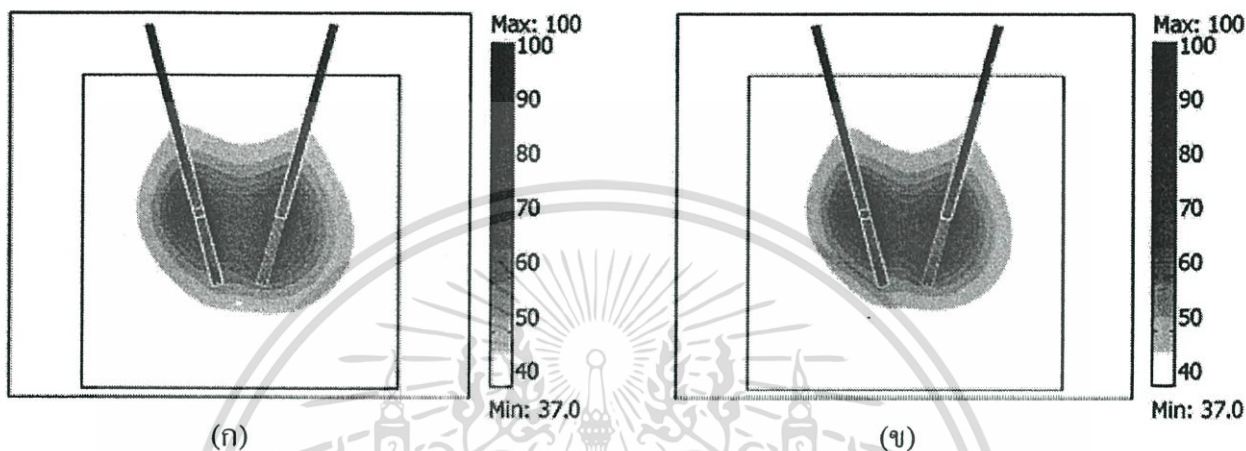


กราฟที่ 4.12 แสดงการปรับค่ากำลังงานที่ใช้ในการคอนโทรลเพื่อรักษาระดับอุณหภูมิของสายอากาศแบบ COA-COA (0°) ให้คงที่ในช่วง $95^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ โดยมีการปรับค่ากำลังงานในช่วง 20–4 W ในระยะเวลา 300 วินาที

กราฟที่ 4.10 แสดงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในเนื้อเยื่อโดยมีการควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง $95^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ ซึ่งใช้การควบคุมอุณหภูมิแบบ มีการปรับเปลี่ยนค่ากำลังงานขาเข้ากราฟที่ 4.11 แสดงรูปแบบการเกิดอุณหภูมิในเนื้อเยื่อโดยมีการให้ค่ากำลังงานขาเข้าที่คงที่กับสายอากาศ กราฟที่ 4.12 จะเป็นการแสดงรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างการเลือกค่ากำลังงานขาเข้ากับเวลาที่ใช้ในการทดลอง

4.4.2 แบบจำลองสายอากาศคู่ CSA-COA (30°) (T = 100°C, t = 300 s)

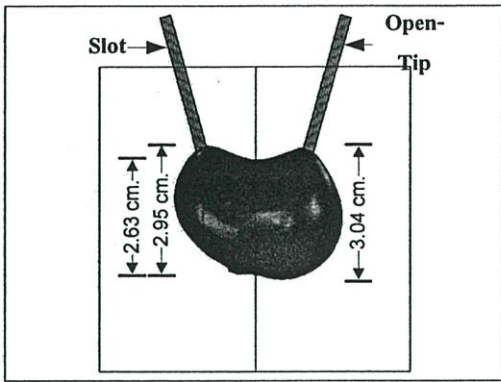
การทดลองนี้จะเป็นการนำเอารูปแบบคู่ของสายอากาศที่ทำให้การทำลายมากที่สุดที่การจัดเรียง 30 องศา ซึ่งจากการทดลองที่ 4.2 จะพบว่าการใช้สายอากาศแบบ CSA-COA จะทำให้การทำลายมากที่สุดเราจึงได้นำมาทดลองอีกครั้ง โดยมีการควบคุมอุณหภูมิทั้งสองวิธีทั้งแบบการปรับเปลี่ยนกำลังงานอินพุท และแบบการให้ค่ากำลังงานคงที่



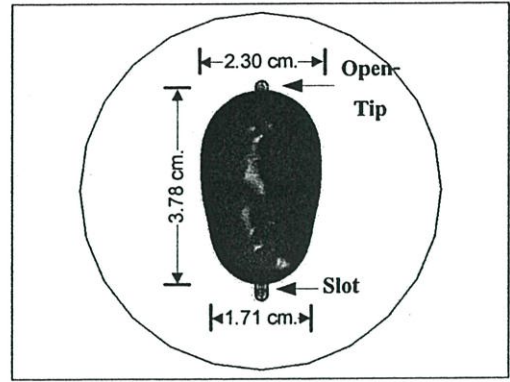
รูปที่ 4.17 แสดงลักษณะการแพร่กระจายความร้อนของการเลือกใช้สายอากาศชนิด CSA-COA (30°)

- (ก) แสดงการกระจายในกรณีที่มีการคอนโทรลอุณหภูมิแบบปรับเปลี่ยนค่ากำลังงานรูป
(ข) แสดงการกระจายในกรณีที่มีการคอนโทรลอุณหภูมิแบบป้อนกำลังงานคงที่

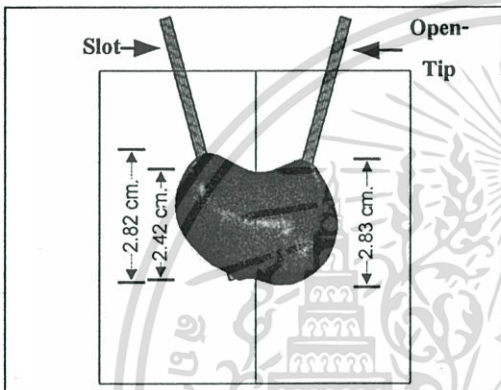
รูปที่ 4.17 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายความร้อนของสายอากาศแบบ (CSA-COA (30°)) โดยควบคุมการเกิดอุณหภูมิสูงสุดให้อยู่ในช่วง $95^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ในรูป (ก) แสดงผลที่ได้จากการควบคุมอุณหภูมิแบบมีการปรับเปลี่ยนค่ากำลังงานขาเข้า รูป (ข) แสดงผลที่ได้จากการควบคุมอุณหภูมิแบบให้กำลังงานคงที่ กับสายอากาศ



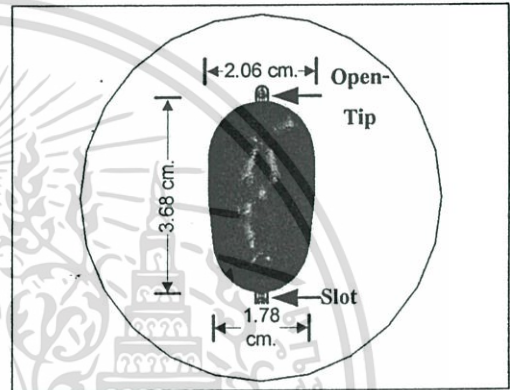
(ก)



(ข)



(ค)

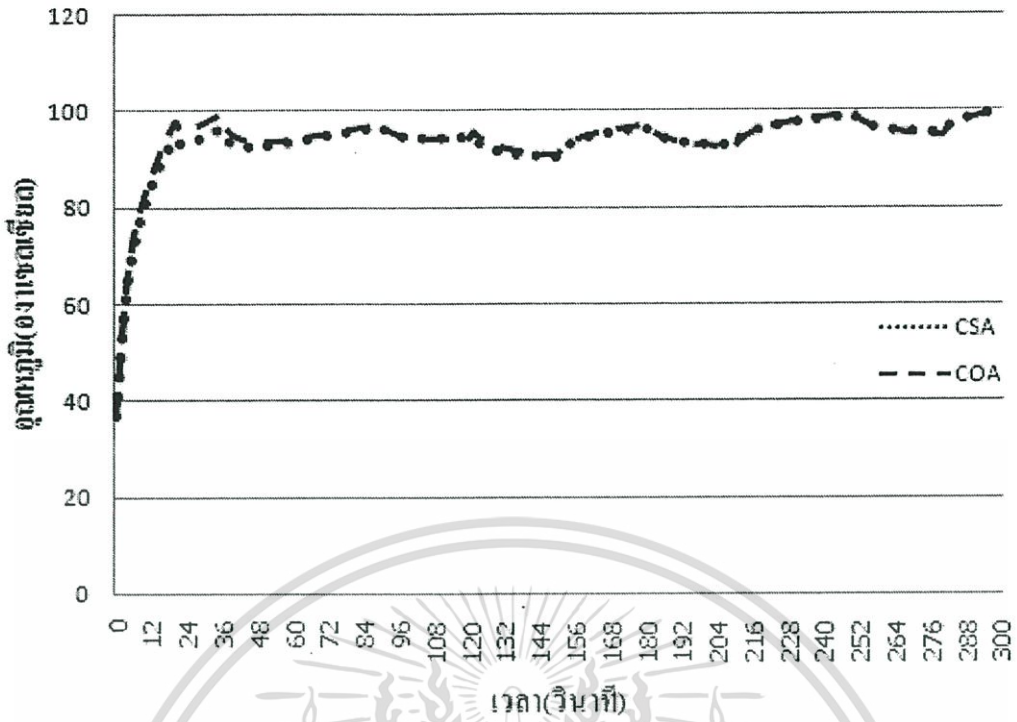


(ง)

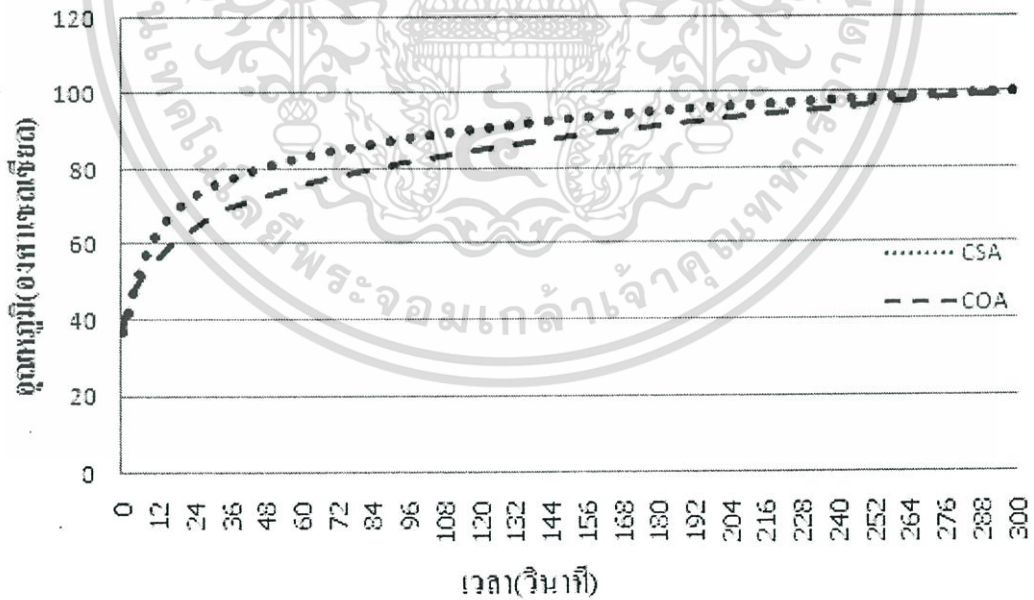
รูปที่ 4.18 แสดงขนาดปริมาตรและลักษณะการทำลายที่อุณหภูมิ 50°C – 100°C ของสายอากาศแบบ CSA-COA ที่การจัดเรียง 30 องศา

(ก), (ข) จะแสดงการทำลายโดยใช้การควบคุมอุณหภูมิแบบการปรับเปลี่ยนค่ากำลังงาน
(ค), (ง) แสดงการทำลายโดยใช้การควบคุมอุณหภูมิแบบการให้ค่ากำลังงานคงที่

รูปที่ 4.18 แสดงขนาดและรูปร่างของการทำลายเซลล์มะเร็งที่เกิดขึ้น ของการควบคุมอุณหภูมิทั้งสองแบบ ซึ่งใน รูป (ก), (ข) จะเป็นการควบคุมอุณหภูมิแบบปรับเปลี่ยนค่ากำลังงานขาเข้าให้กับสายอากาศ รูป (ค), (ง) จะเป็นการควบคุมอุณหภูมิแบบให้ค่ากำลังงานคงที่กับสายอากาศ ซึ่งจะเห็นว่า การควบคุมแบบปรับเปลี่ยนกำลังงานขาเข้านั้น ให้ขนาดของการทำลายที่ใหญ่กว่าแบบการให้ค่ากำลังงานคงที่ตลอดเวลา

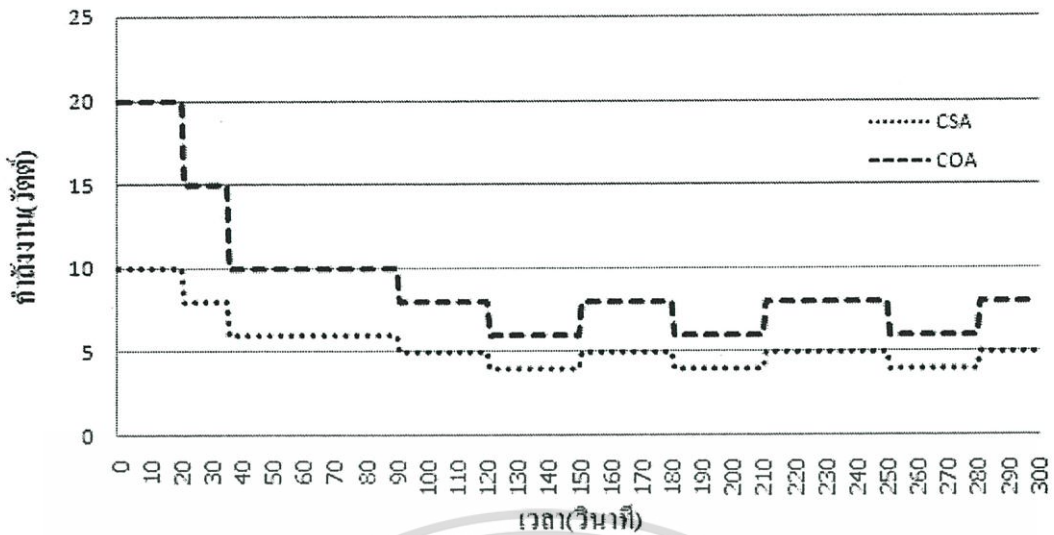


กราฟที่ 4.13 แสดงการคอนโทรลอุณหภูมิที่บริเวณติดกับ Slot และ Tip ของสายอากาศแบบ CSA-COA (30°) โดยให้มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง $95^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ซึ่งทำการคอนโทรลโดยปรับเปลี่ยนพลังงานที่ป้อนให้กับสายอากาศในช่วง 4–20W ในระยะเวลา 300 วินาที



กราฟที่ 4.14 แสดงอุณหภูมิที่บริเวณติดกับสายอากาศช่วงบริเวณ Slot และ Tip ของสายอากาศแบบ CSA-COA (30°) โดยให้ค่าพลังงานคงที่กับสายอากาศที่ 10W และ 15W ตามลำดับในระยะเวลา 300 วินาที และให้ระดับอุณหภูมิอยู่ในช่วง $95^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

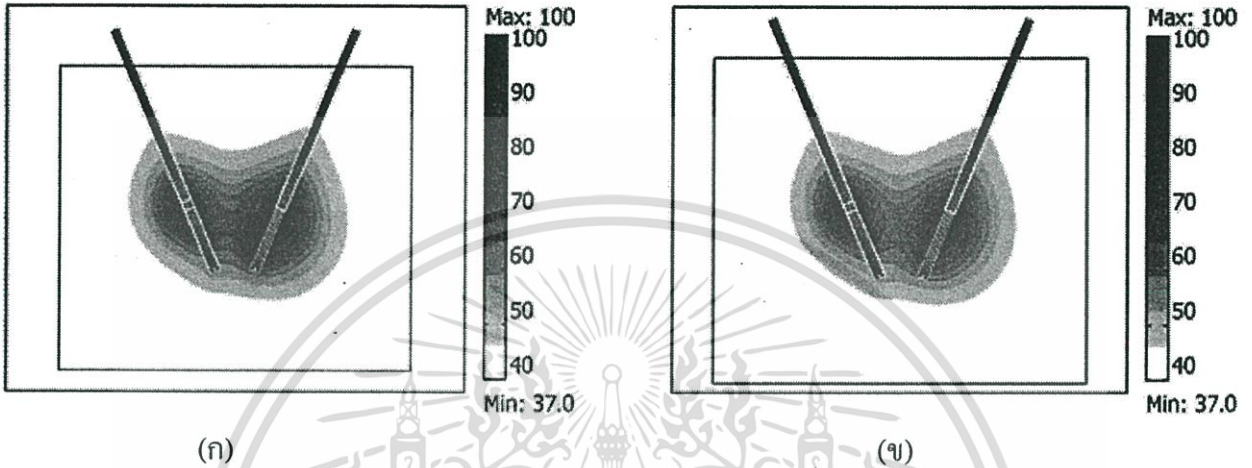


กราฟที่ 4.15 แสดงการปรับค่ากำลังงานที่ใช้ในการคอนโทรลเพื่อรักษาระดับอุณหภูมิให้คงที่ของสายอากาศแบบ CSA-COA (30°) อยู่ในช่วง $95^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ โดยมีค่ากำลังงานในช่วง 4–20W ในระยะเวลา 300 วินาที

กราฟที่ 4.13 แสดงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในเนื้อเยื่อโดยมีการควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง $95^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ซึ่งใช้การควบคุมอุณหภูมิแบบ มีการปรับเปลี่ยนค่ากำลังงานขาเข้ากราฟที่ 4.14 แสดงรูปแบบการเกิดอุณหภูมิในเนื้อเยื่อโดยมีการให้ค่ากำลังงานขาเข้าที่คงที่กับสายอากาศ กราฟที่ 4.15 จะเป็นการแสดงรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างการเลือกค่ากำลังงานขาเข้ากับเวลาที่ใช้ในการทดลอง

4.4.3 แบบจำลองสายอากาศคู่ CSA-COA (45°) (T = 100°C, t = 300 s)

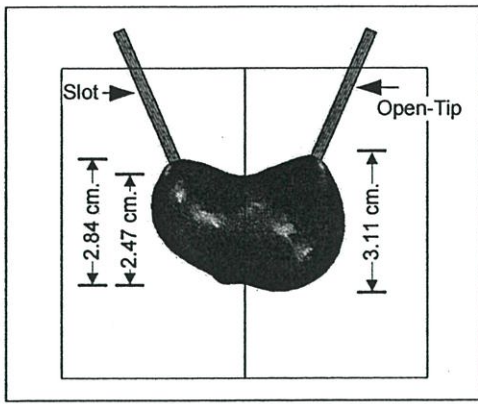
การทดลองนี้จะเป็นการนำเอารูปแบบคู่ของสายอากาศที่ทำให้การทำลายมากที่สุดที่การจัดเรียง 45 องศา ซึ่งจากการทดลองที่ 4.2 จะพบว่าการใช้สายอากาศแบบ CSA-COA จะทำให้การทำลายมากที่สุดที่เราจึงได้นำมาทดลองอีกครั้ง โดยมีการควบคุมอุณหภูมิทั้งสองวิธีทั้งแบบการปรับเปลี่ยนกำลังงานอินพุท และแบบการให้ค่ากำลังงานคงที่



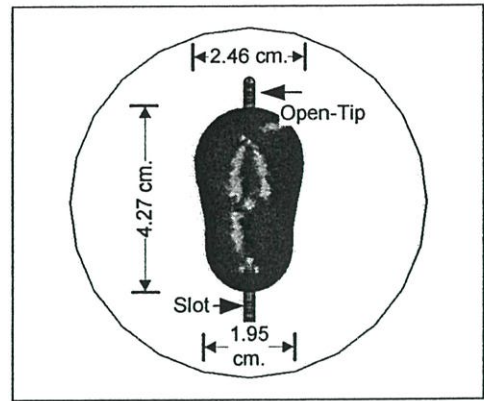
รูปที่ 4.19 แสดงลักษณะการแพร่กระจายความร้อนของการเลือกใช้สายอากาศชนิด CSA-COA (45°)

- (ก) แสดงการกระจายในกรณีที่มีการคอนโทรลอุณหภูมิแบบปรับเปลี่ยนค่ากำลังงาน
- (ข) แสดงการกระจายในกรณีที่มีการคอนโทรลอุณหภูมิแบบป้อนกำลังงานคงที่

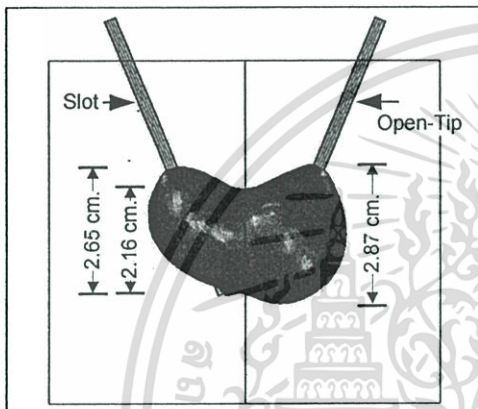
รูปที่ 4.19 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายความร้อนของสายอากาศแบบ (CSA-COA (45°)) โดยควบคุมการเกิดอุณหภูมิสูงสุดให้อยู่ในช่วง $95^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ในรูป (ก) แสดงผลที่ได้จากการควบคุมอุณหภูมิแบบมีการปรับเปลี่ยนค่ากำลังงานขาเข้า รูป (ข) แสดงผลที่ได้จากการควบคุมอุณหภูมิแบบให้กำลังงานคงที่ กับสายอากาศ



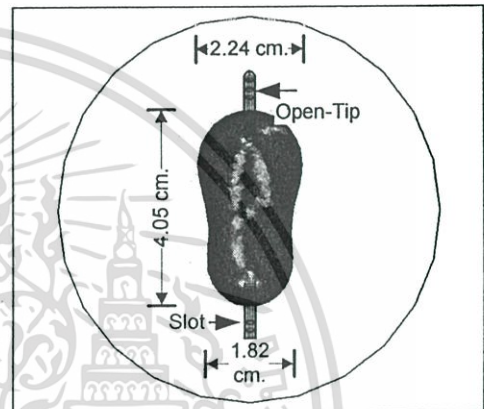
(ก)



(ข)



(ค)

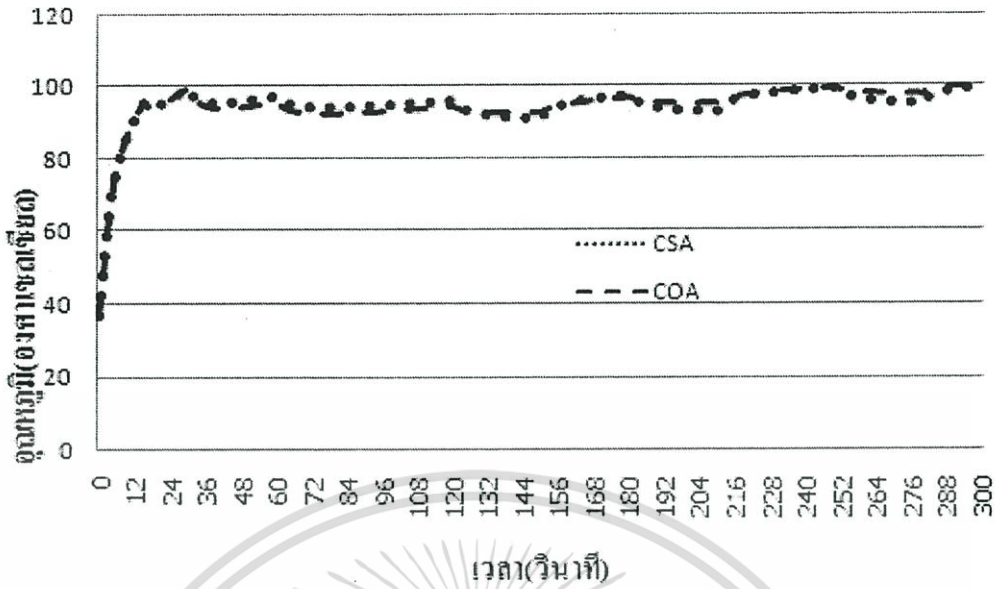


(ง)

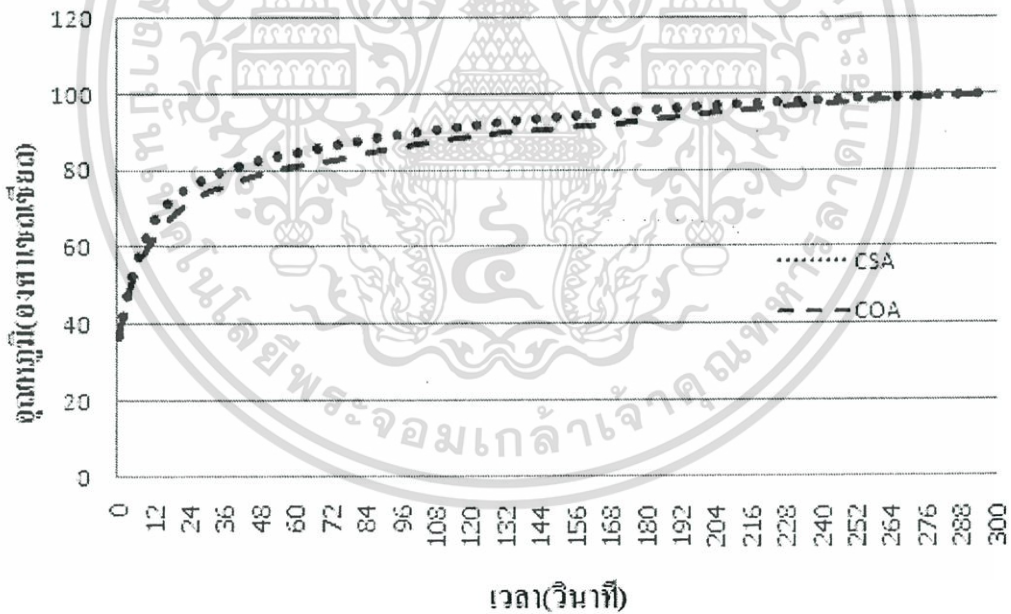
รูปที่ 4.20 แสดงขนาดปริมาตรและลักษณะการทำลายที่อุณหภูมิ 50°C – 100°C ของสายอากาศแบบ CSA-COA ที่การจัดเรียง 45 องศา

(ก), (ข) จะแสดงการทำลายโดยใช้การควบคุมอุณหภูมิแบบการปรับเปลี่ยนค่ากำลังงาน
(ค), (ง) แสดงการทำลายโดยใช้การควบคุมอุณหภูมิแบบการให้ค่ากำลังงานคงที่

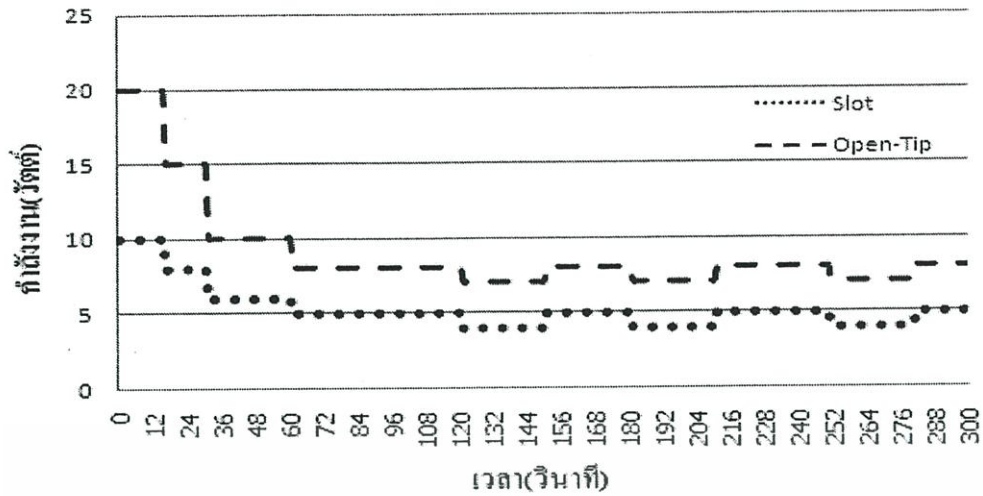
รูปที่ 4.20 แสดงขนาดและรูปร่างของการทำลายเซลล์มะเร็งที่เกิดขึ้น ของการควบคุมอุณหภูมิทั้งสองแบบ ซึ่งใน รูป (ก), (ข) จะเป็นการควบคุมอุณหภูมิแบบปรับเปลี่ยนค่ากำลังงานขาเข้าให้กับสายอากาศ รูป (ค), (ง) จะเป็นการควบคุมอุณหภูมิแบบให้ค่ากำลังงานคงที่กับสายอากาศ ซึ่งจะเห็นว่า การควบคุมแบบปรับเปลี่ยนกำลังงานขาเข้านั้น ให้ขนาดของการทำลายที่ใหญ่กว่าแบบการให้ค่ากำลังงานคงที่ตลอดเวลา



กราฟที่ 4.16 แสดงการคอนโทรลอุณหภูมิที่บริเวณติดกับ Slot และ Tip ของสายอากาศแบบ CSA-COA (45°) โดยให้ม้อณหภูมิอยู่ในช่วง 95°C ± 5°C ซึ่งทำการคอนโทรนโดยปรับเปลี่ยนพลังงานที่ป้อนให้กับสายอากาศในช่วง 4–20W ในระยะเวลา 300 วินาที



กราฟที่ 4.17 แสดงอุณหภูมิที่บริเวณติดกับสายอากาศช่วงบริเวณ Slot และ Tip ของสายอากาศแบบ CSA-COA (45°) โดยให้ค่าพลังงานคงที่กับสายอากาศที่ 10W และ 15W ตามลำดับในระยะเวลา 300 วินาที และให้ระดับอุณหภูมิอยู่ในช่วง 95°C ± 5°C

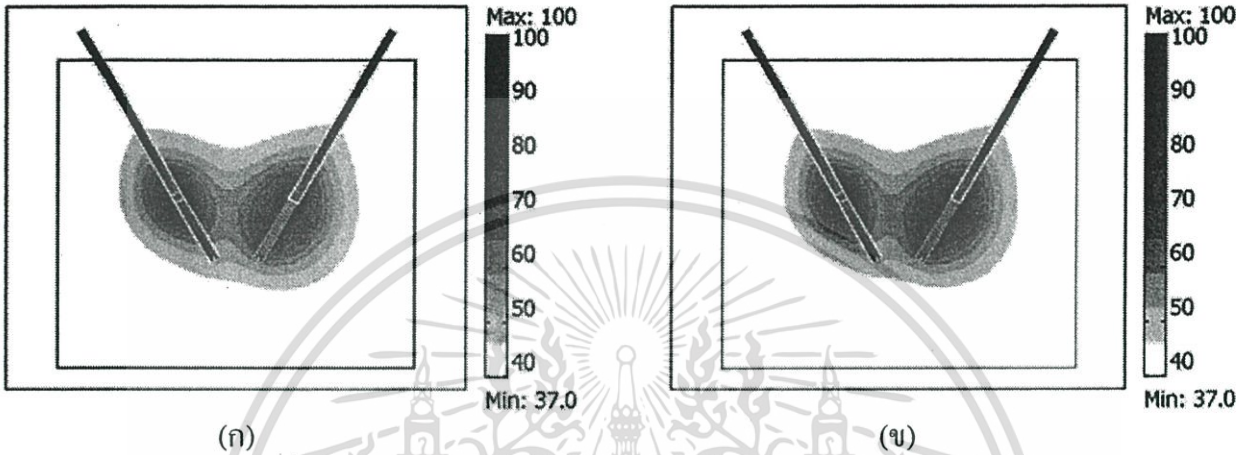


กราฟที่ 4.18 แสดงการปรับค่ากำลังงานที่ใช้ในการคอนโทรลเพื่อรักษาระดับอุณหภูมิของสายอากาศแบบ CSA-COA (45°) ให้คงที่ในช่วง $95^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ โดยมีการปรับค่ากำลังงานในช่วง 4–20 W ในระยะเวลา 300 วินาที

กราฟที่ 4.16 แสดงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในเนื้อเยื่อโดยมีการควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง $95^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ ซึ่งใช้การควบคุมอุณหภูมิแบบ มีการปรับเปลี่ยนค่ากำลังงานขาเข้ากราฟที่ 4.17 แสดงรูปแบบการเกิดอุณหภูมิในเนื้อเยื่อโดยมีการให้ค่ากำลังงานขาเข้าที่คงที่กับสายอากาศ กราฟที่ 4.18 จะเป็นการแสดงรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างการเลือกค่ากำลังงานขาเข้ากับเวลาที่ใช้ในการทดลอง

4.4.4 แบบจำลองสายอากาศคู่ CSA-COA (60°) ($T = 100^\circ\text{C}$, $t = 300\text{ s}$)

การทดลองนี้จะเป็นการนำเอารูปแบบคู่ของสายอากาศที่ทำให้การทำลายมากที่สุดที่การจัดเรียง 60 องศา ซึ่งจากการทดลองที่ 4.2 จะพบว่าการใช้สายอากาศแบบ CSA-COA จะทำให้การทำลายมากที่สุดเราจึงได้นำมาทดลองอีกครั้ง โดยมีการควบคุมอุณหภูมิทั้งสองวิธีทั้งแบบการปรับเปลี่ยนกำลังงานอินพุท และแบบการให้ค่ากำลังงานคงที่



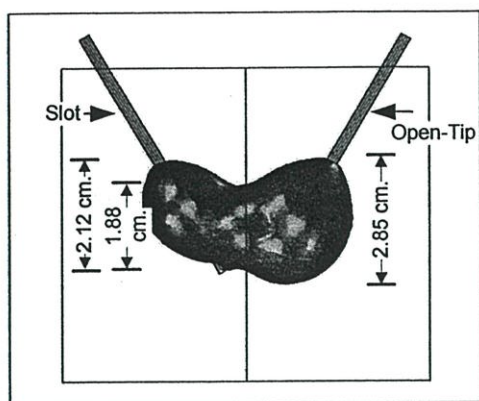
รูปที่ 4.21 แสดงลักษณะการแพร่กระจายความร้อนของการเลือกใช้สายอากาศชนิด

CSA-COA (60°)

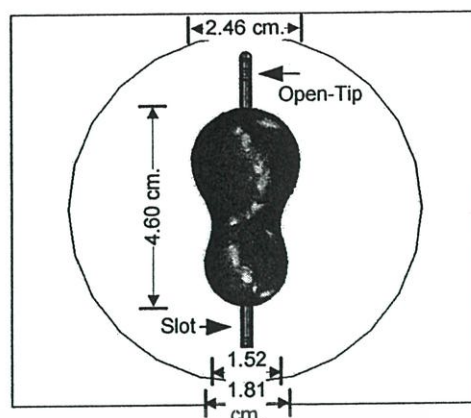
(ก) แสดงการกระจายในกรณีที่มีการคอนโทรลอุณหภูมิแบบปรับเปลี่ยนค่ากำลังงานรูป

(ข) แสดงการกระจายในกรณีที่มีการคอนโทรลอุณหภูมิแบบป้อนกำลังงานคงที่

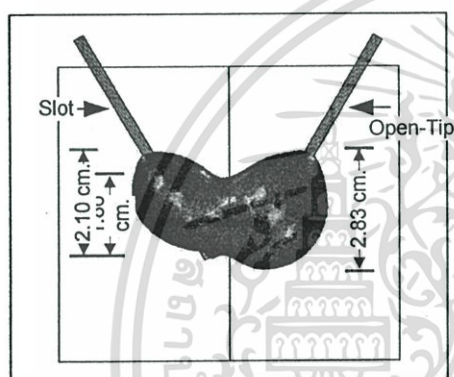
รูปที่ 4.21 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายความร้อนของสายอากาศแบบ (CSA-COA (60°)) โดยควบคุมการเกิดอุณหภูมิสูงสุดให้อยู่ในช่วง $95^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ ในรูป (ก) แสดงผลที่ได้จากการควบคุมอุณหภูมิแบบมีการปรับเปลี่ยนค่ากำลังงานขาเข้า รูป (ข) แสดงผลที่ได้จากการควบคุมอุณหภูมิแบบให้กำลังงานคงที่ กับสายอากาศ



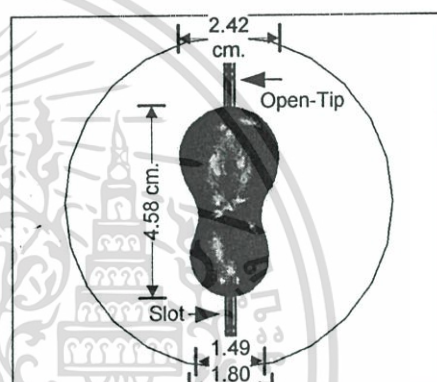
(ก)



(ข)



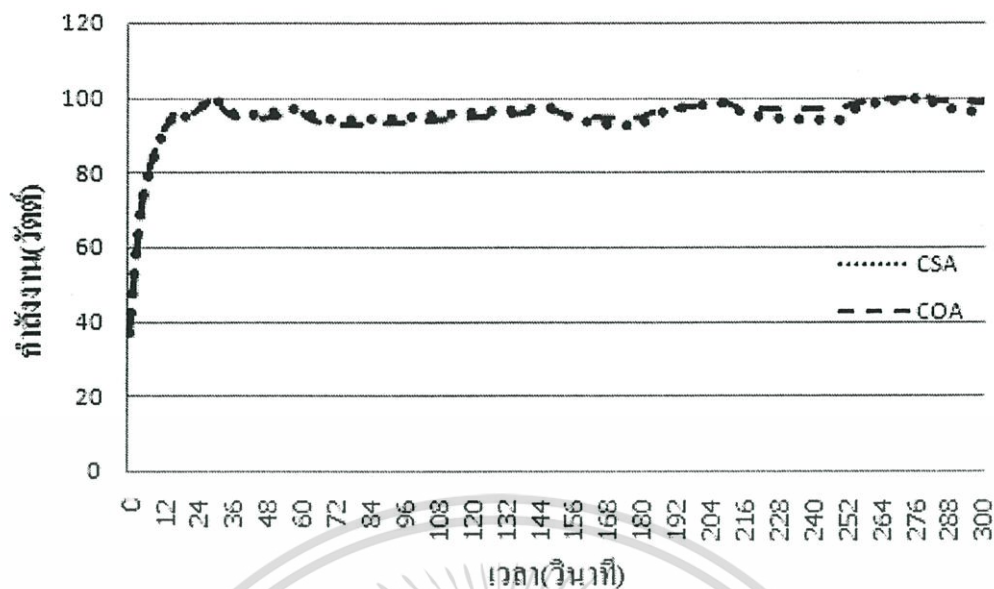
(ค)



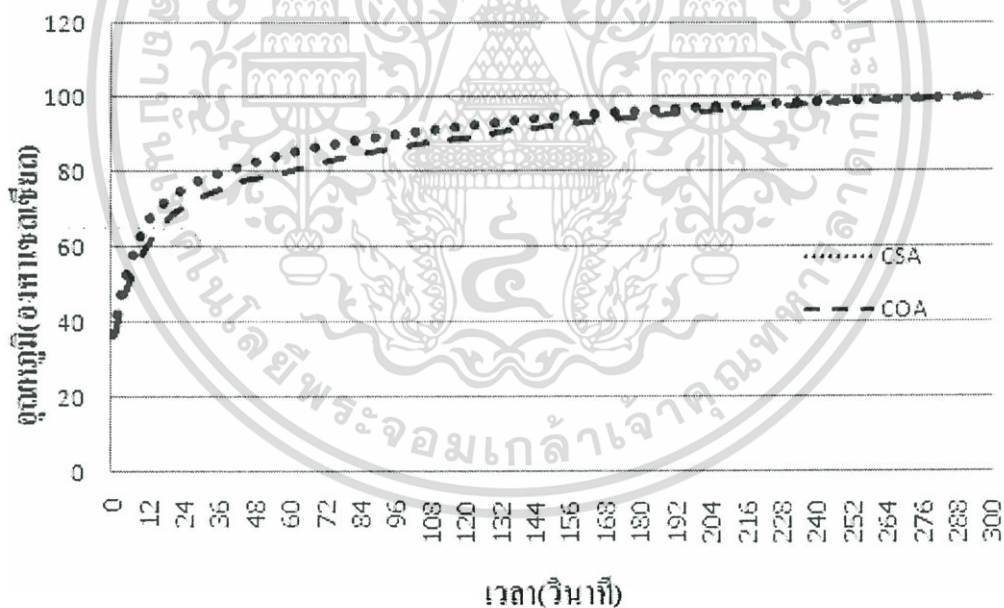
(ง)

รูปที่ 4.22 แสดงขนาดปริมาตรและลักษณะการทำลายที่อุณหภูมิ 50°C – 100°C ของสายอากาศแบบ CSA-COA ที่การจัดเรียง 60 องศา
 (ก), (ข) จะแสดงการทำลายโดยใช้การควบคุมอุณหภูมิแบบการปรับเปลี่ยนค่ากำลังงาน
 (ค), (ง) แสดงการทำลายโดยใช้การควบคุมอุณหภูมิแบบการให้ค่ากำลังงานคงที่

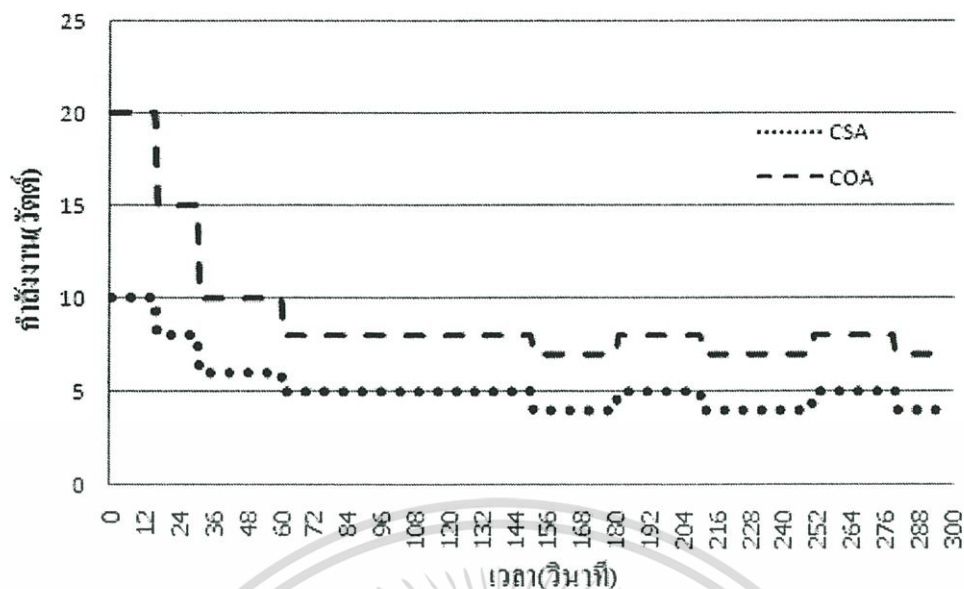
รูปที่ 4.22 แสดงขนาดและรูปร่างของการทำลายเซลล์มะเร็งที่เกิดขึ้น ของการควบคุมอุณหภูมิ ทั้งสองแบบ ซึ่งใน รูป (ก), (ข) จะเป็นการควบคุมอุณหภูมิแบบปรับเปลี่ยนค่ากำลังงานขาเข้าให้กับสายอากาศ รูป (ค), (ง) จะเป็นการควบคุมอุณหภูมิแบบให้ค่ากำลังงานคงที่กับสายอากาศ ซึ่งจะเห็นว่า การควบคุมแบบปรับเปลี่ยนกำลังงานขาเข้านั้น ให้ขนาดของการทำลายที่ใหญ่กว่าแบบการให้ค่ากำลังงานคงที่ตลอดเวลา



กราฟที่ 4.19 แสดงการคอนโทรลอุณหภูมิที่บริเวณติดกับ Slot และ Tip ของสายอากาศแบบ CSA-COA (60°) โดยให้มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง $95^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ ซึ่งทำการคอนโทรลโดยปรับเปลี่ยนพลังงานที่ป้อนให้กับสายอากาศในช่วง 4–20W ในระยะเวลา 300 วินาที



กราฟที่ 4.20 แสดงอุณหภูมิที่บริเวณติดกับสายอากาศช่วงบริเวณ Slot และ Tip ของสายอากาศแบบ CSA-COA (60°) โดยให้ค่าพลังงานคงที่กับสายอากาศที่ 10W และ 15W ตามลำดับในระยะเวลา 300 วินาที และให้ระดับอุณหภูมิอยู่ในช่วง $95^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$

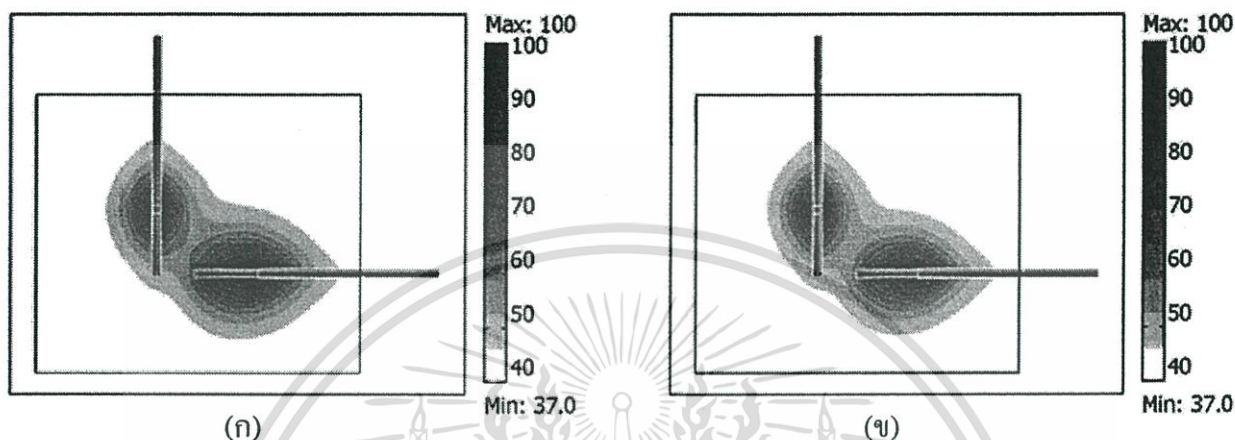


กราฟที่ 4.21 แสดงการปรับค่ากำลังงานที่ใช้ในการคอนโทรลเพื่อรักษาระดับอุณหภูมิของสายอากาศแบบ CSA-COA (60°) ให้คงที่ในช่วง $95^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ โดยมีการปรับค่ากำลังงานในช่วง 4–20W ในระยะเวลา 300 วินาที

กราฟที่ 4.19 แสดงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในเนื้อเยื่อโดยมีการควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง $95^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ ซึ่งใช้การควบคุมอุณหภูมิแบบ มีการปรับเปลี่ยนค่ากำลังงานขาเข้ากราฟที่ 4.20 แสดงรูปแบบการเกิดอุณหภูมิในเนื้อเยื่อโดยมีการให้ค่ากำลังงานขาเข้าที่คงที่กับสายอากาศ กราฟที่ 4.21 จะเป็นการแสดงรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างการเลือกค่ากำลังงานขาเข้ากับเวลาที่ใช้ในการทดลอง

4.4.5 แบบจำลองสายอากาศคู่ CSA-COA (90°) (T = 100°C, t = 300 s)

การทดลองนี้จะเป็นการนำเอารูปแบบคู่ของสายอากาศที่ทำให้การทำลายมากที่สุดที่การจัดเรียง 90 องศา ซึ่งจากการทดลองที่ 4.2 จะพบว่าการใช้สายอากาศแบบ CSA-COA จะทำให้การทำลายมากที่สุดเราจึงได้นำมาทดลองอีกครั้ง โดยมีการควบคุมอุณหภูมิทั้งสองวิธีทั้งแบบการปรับเปลี่ยนกำลังงานอินพุท และแบบการให้ค่ากำลังงานคงที่

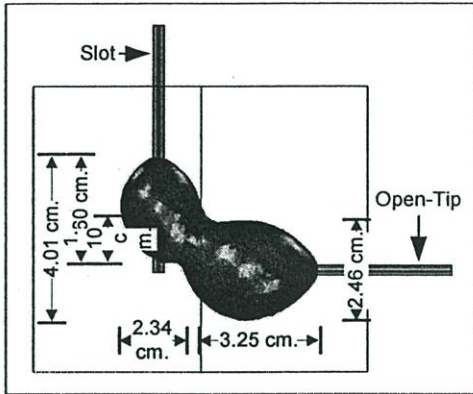


รูปที่ 4.23 แสดงลักษณะการแพร่กระจายความร้อนของการเลือกใช้สายอากาศชนิด CSA-COA (90°)

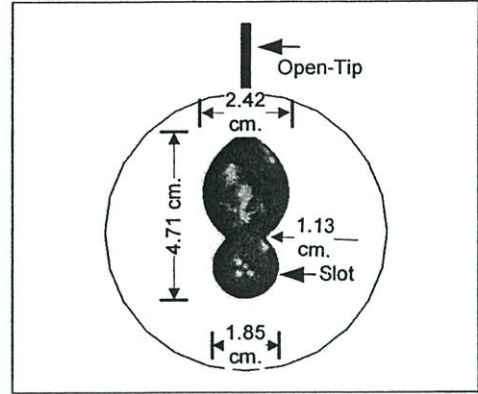
- (ก) แสดงการกระจายในกรณีที่มีการคอนโทรลอุณหภูมิแบบปรับเปลี่ยนค่ากำลังงานรูป
(ข) แสดงการกระจายในกรณีที่มีการคอนโทรลอุณหภูมิแบบป้อนกำลังงานคงที่

รูปที่ 4.23 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายความร้อนของสายอากาศแบบ (CSA-COA (90°))

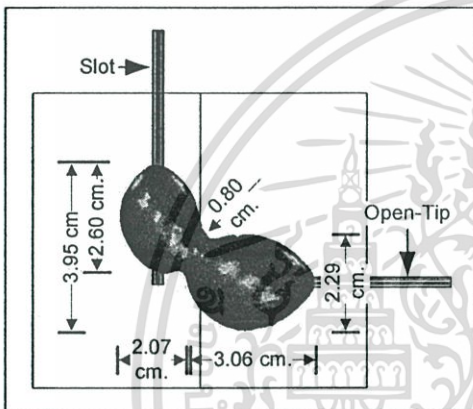
โดยควบคุมการเกิดอุณหภูมิสูงสุดให้อยู่ในช่วง $95^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ในรูป (ก) แสดงผลที่ได้จากการควบคุมอุณหภูมิแบบมีการปรับเปลี่ยนค่ากำลังงานขาเข้า รูป (ข) แสดงผลที่ได้จากการควบคุมอุณหภูมิแบบให้กำลังงานคงที่ กับสายอากาศ



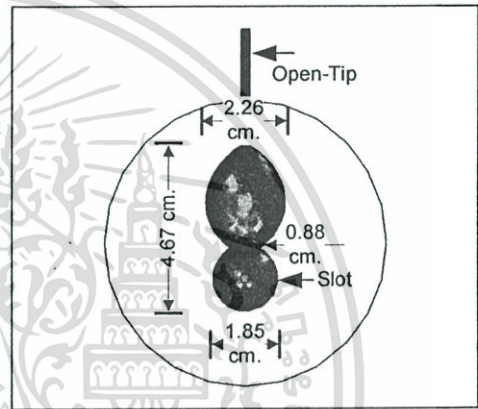
(ก)



(ข)



(ค)



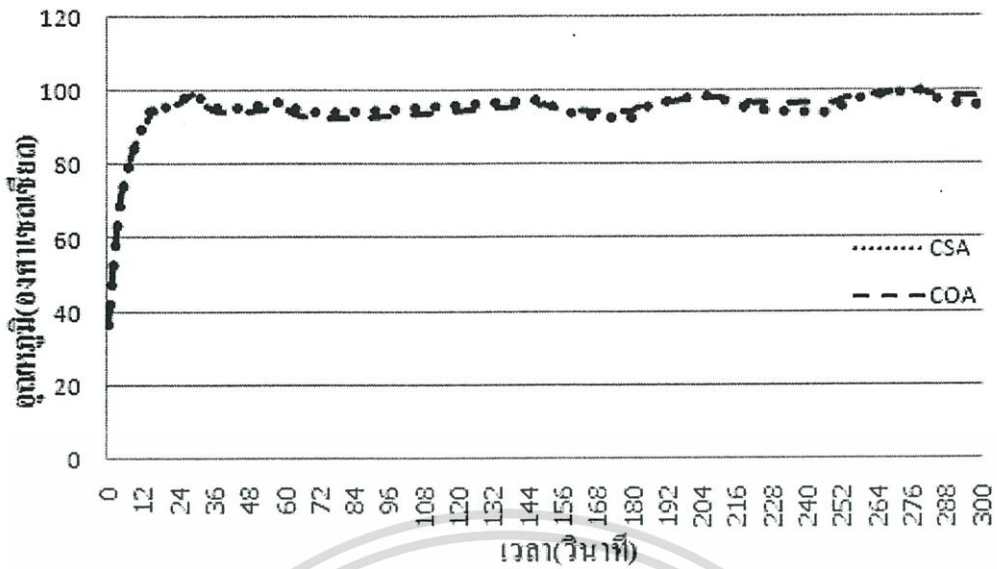
(ง)

รูปที่ 4.24 แสดงขนาดปริมาตรและลักษณะการทำลายที่อุณหภูมิ 50°C – 100°C ของสายอากาศแบบ CSA-COA ที่การจัดเรียง 90 องศา

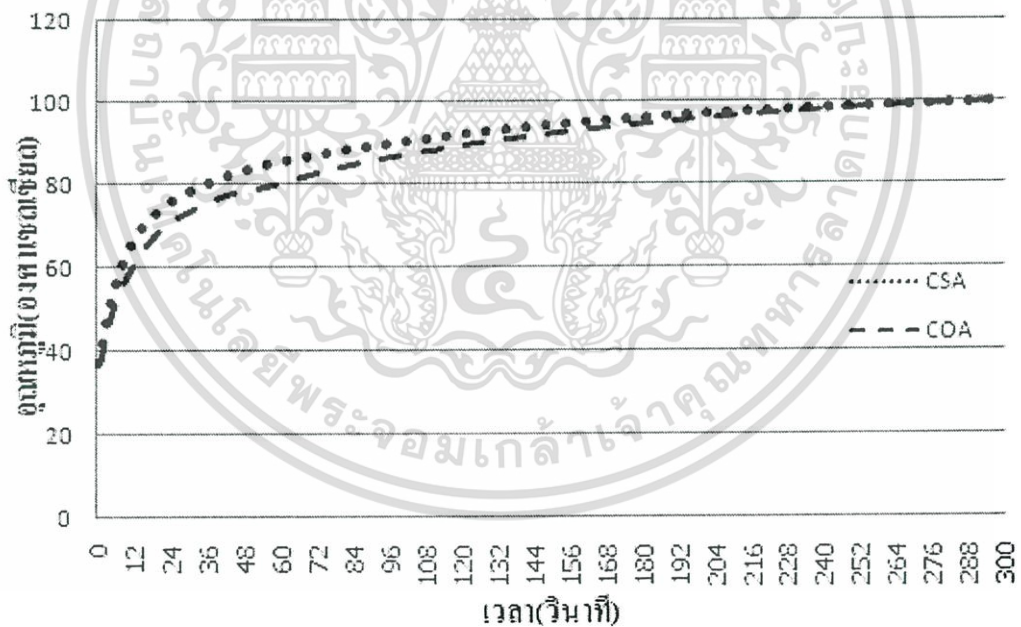
(ก), (ข) จะแสดงการทำลายโดยใช้การควบคุมอุณหภูมิแบบการปรับเปลี่ยนค่ากำลังงาน

(ค), (ง) แสดงการทำลายโดยใช้การควบคุมอุณหภูมิแบบการให้ค่ากำลังงานคงที่

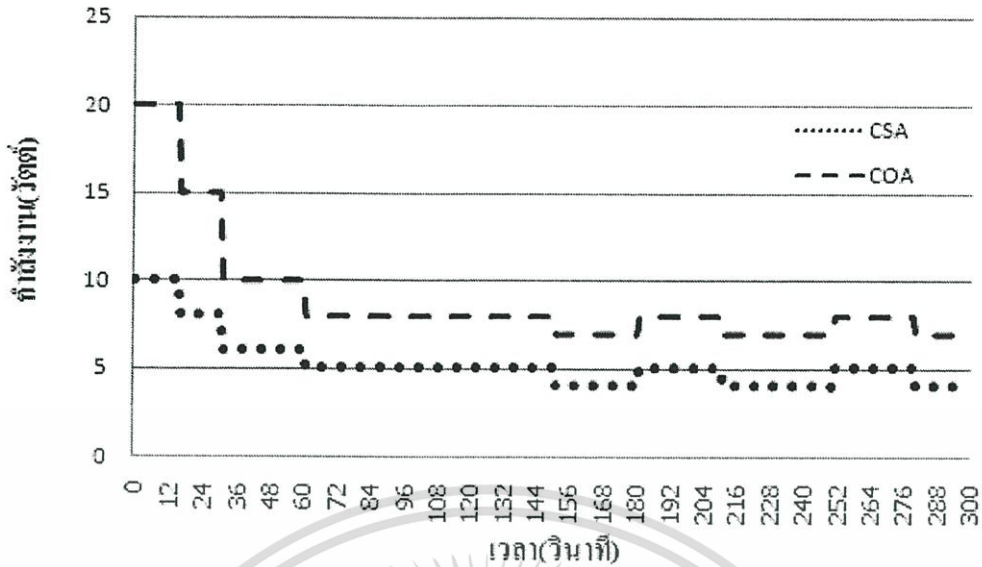
รูปที่ 4.24 แสดงขนาดและรูปร่างของการทำลายเซลล์มะเร็งที่เกิดขึ้น ของการควบคุมอุณหภูมิทั้งสองแบบ ซึ่งใน รูป (ก), (ข) จะเป็นการควบคุมอุณหภูมิแบบปรับเปลี่ยนค่ากำลังงานขาเข้าให้กับสายอากาศ รูป (ค), (ง) จะเป็นการควบคุมอุณหภูมิแบบให้ค่ากำลังงานคงที่กับสายอากาศ ซึ่งจะเห็นว่า การควบคุมแบบปรับเปลี่ยนกำลังงานขาเข้านั้น ให้ขนาดของการทำลายที่ใหญ่กว่าแบบการให้ค่ากำลังงานคงที่ตลอดเวลา



กราฟที่ 4.22 แสดงการคอนโทรลอุณหภูมิที่บริเวณติดกับ Slot และ Tip ของสายอากาศแบบ CSA-COA (90°) โดยให้มียุณหภูมิอยู่ในช่วง $95^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ซึ่งทำการคอนโทรลโดยปรับเปลี่ยนพลังงานที่ป้อนให้กับสายอากาศในช่วง 20 – 4 W ในระยะเวลา 300 วินาที



กราฟที่ 4.23 แสดงอุณหภูมิที่บริเวณติดกับสายอากาศช่วงบริเวณ Slot และ Tip ของสายอากาศแบบ CSA-COA (90°) โดยให้ค่าพลังงานคงที่กับสายอากาศที่ 10W และ 15W ตามลำดับในระยะเวลา 300 วินาที และให้ระดับอุณหภูมิอยู่ในช่วง $95^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$



กราฟที่ 4.24 แสดงการปรับค่ากำลังงานที่ใช้ในการคอนโทรลเพื่อรักษาระดับอุณหภูมิของสายอากาศแบบ CSA-COA (90°) ให้คงที่ในช่วง $95^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ โดยมีการปรับค่ากำลังงานในช่วง 20 – 4 W ในระยะเวลา 300 วินาที

กราฟที่ 4.22 แสดงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในเนื้อเยื่อโดยมีการควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง $95^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ ซึ่งใช้การควบคุมอุณหภูมิแบบ มีการปรับเปลี่ยนค่ากำลังงานจากเข้ากราฟที่ 4.23 แสดงรูปแบบการเกิดอุณหภูมิในเนื้อเยื่อ โดยมีการให้ค่ากำลังงานขาเข้าที่คงที่กับสายอากาศ กราฟที่ 4.24 จะเป็นการแสดงรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างการเลือกค่ากำลังงานขาเข้ากับเวลาที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 4.4 แสดงปริมาณของการทำลายจากการจัดเรียงสายอากาศในองศาต่างๆที่ได้จากการทดลองที่ 4.4 โดยแสดงค่าการทำลายที่อุณหภูมิ $50^\circ\text{C} - 100^\circ\text{C}$ ซึ่งแสดงทั้งในส่วนของ การให้ค่ากำลังงานคงที่ และมีการปรับเปลี่ยนค่ากำลังงาน

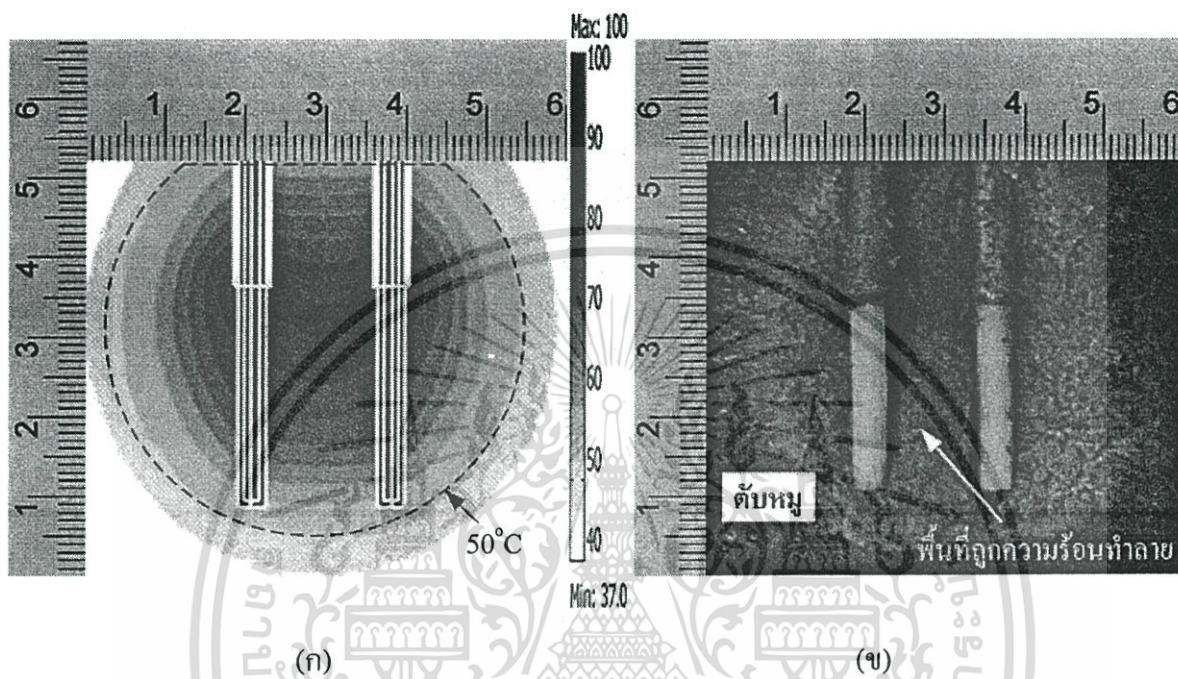
รูปแบบของวิธีการควบคุมอุณหภูมิที่ป้อนให้สายอากาศ	ปริมาณการทำลายที่เกิดจากการจัดเรียงในมุมมองศาต่างๆเป็นลูกบาศก์เซนติเมตร (cm^3)				
	COA-COA (0°)	CSA-COA (30°)	CSA-COA (45°)	CSA-COA (60°)	CSA-COA (90°)
ให้ค่ากำลังงานคงที่	15.84	16.29	15.07	14.76	13.28
ปรับเปลี่ยนค่ากำลังงาน	16.77	17.53	16.11	15.94	15.77

จากการทดลองที่ 4.4 จะเป็นการนำเอาแต่ละรูปแบบลักษณะของสาขาของการจัดเรียงที่ให้ผล ปริมาณการทำลายมากที่สุดจากการทดลองที่ 4.2 โดยนำกลับมาทดลองอีกครั้งโดยมีการ กำหนดการควบคุมอุณหภูมิที่เกิดขึ้นที่เนื้อเยื่อ ซึ่งในการทดลองในครั้งนี้ได้แบ่งวิธีการควบคุม อุณหภูมิที่เกิดขึ้นออกเป็นอีก สองวิธีการทดลอง โดยวิธีแรกเราจะทดลองโดยการควบคุมอุณหภูมิ แบบ การปรับเปลี่ยนค่ากำลังงานที่ป้อนให้กับสายอากาศ โดยมีการปรับเปลี่ยนกำลังงานอยู่ในช่วง 4–20 W และวิธีที่สองโดยการเลือกค่ากำลังงานคงที่ค่าหนึ่งป้อนให้กับสายอากาศโดยไม่ทำให้ อุณหภูมิที่เวลาสุดท้ายมีค่าเกินกำหนด ซึ่งค่าอุณหภูมิที่เราเลือกใช้เป็นขอบเขตของการทดลองใน ครั้งนี้นั้นจะอยู่ในช่วง $95^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ เมื่อเราได้ทำการทดลองแล้วทำให้เราทราบว่า การที่เราทำการ ควบคุมอุณหภูมิแบบมีการปรับเปลี่ยนค่ากำลังงาน เพื่อรักษาระดับของความร้อนให้คงที่อยู่ ตลอดเวลานั้นจะส่งผลที่ดีต่อปริมาณในการทำลายทั้งในด้านของ ความกว้างความยาว ความลึกที่ เกิดขึ้นและในรูปของผลรวมปริมาณของการทำลายที่มากขึ้น ซึ่งเป็นผลดีกว่าการที่จะใช้การ ควบคุมความร้อน โดยการเลือกค่ากำลังงานที่คงที่มาก ในระยะเวลาของการทดลองที่เท่ากัน นอกจากนี้ผลของรูปร่างลักษณะการทำลายที่เกิดขึ้นจากการจัดวางสายอากาศที่องศาต่าง ๆ นั้น ยังคงมีรูปร่างและลักษณะที่ใกล้เคียงกัน ทั้งจากการทดลองแบบปรับเปลี่ยนค่ากำลังงานและแบบ การให้กำลังงานคงที่

4.5 เปรียบเทียบผลการจำลองการทำงานด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ กับการทดลองกับเนื้อเยื่อ

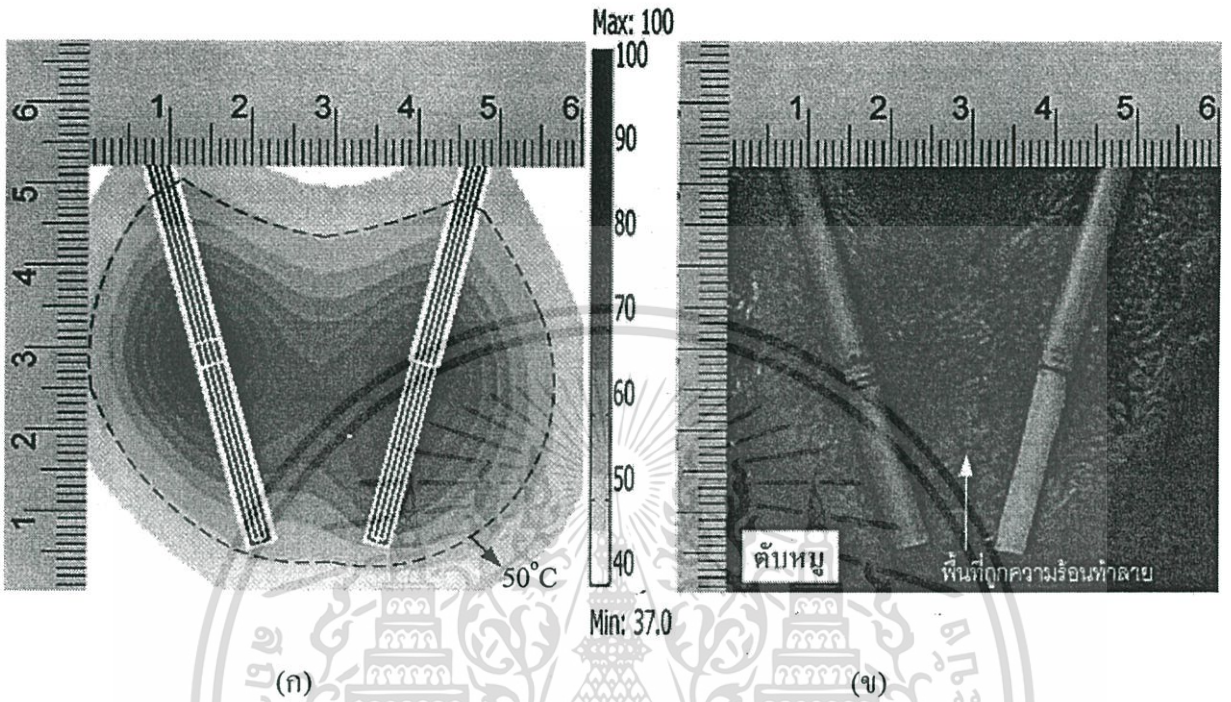
แบบ *In Vitro*

ในหัวข้อนี้จะเป็นการเปรียบเทียบผลของรูปแบบการทำลายที่การจัดเรียงมุมองศาต่างๆของแต่ละคู่สายอากาศที่ได้จากการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ เทียบกับการทดลองในเนื้อเยื่อแบบ *in vitro* โดยในการทดลองนั้นเราต้องการดูผลทางกายภาพเทียบกันว่ามีลักษณะรูปร่างการทำลายที่ เหมือนหรือใกล้เคียงกันมากน้อยเพียงใด ซึ่งในการทดลองนี้เราจะใช้การทดลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ ให้ค่ากำลังงานคงที่กับสายอากาศทั้งสอง ที่ 20 วัตต์ทั้งสอง เนื่องจากว่าเครื่องที่ใช้ในการ ทดลองกับเนื้อเยื่อแบบ *in vitro* นั้นยังไม่สามารถปรับเปลี่ยนค่ากำลังงานที่ป้อนให้สายอากาศได้ แบบอัตโนมัติ เนื่องจากอยู่ในช่วงกำลังพัฒนาระบบ จึงทำให้เราเลือกที่จะใช้การควบคุมอุณหภูมิ แบบการให้กำลังงานคงที่กับสายอากาศแทน เพื่อให้ขั้นตอนในการทดลองจริงเหมือนกับที่จำลอง ในไฟไนต์เอลิเมนต์มากที่สุด โดยในการทดลองเราจะให้กำลังงานกับสายอากาศคงที่ที่ 20 วัตต์เป็น เวลา 300 วินาที



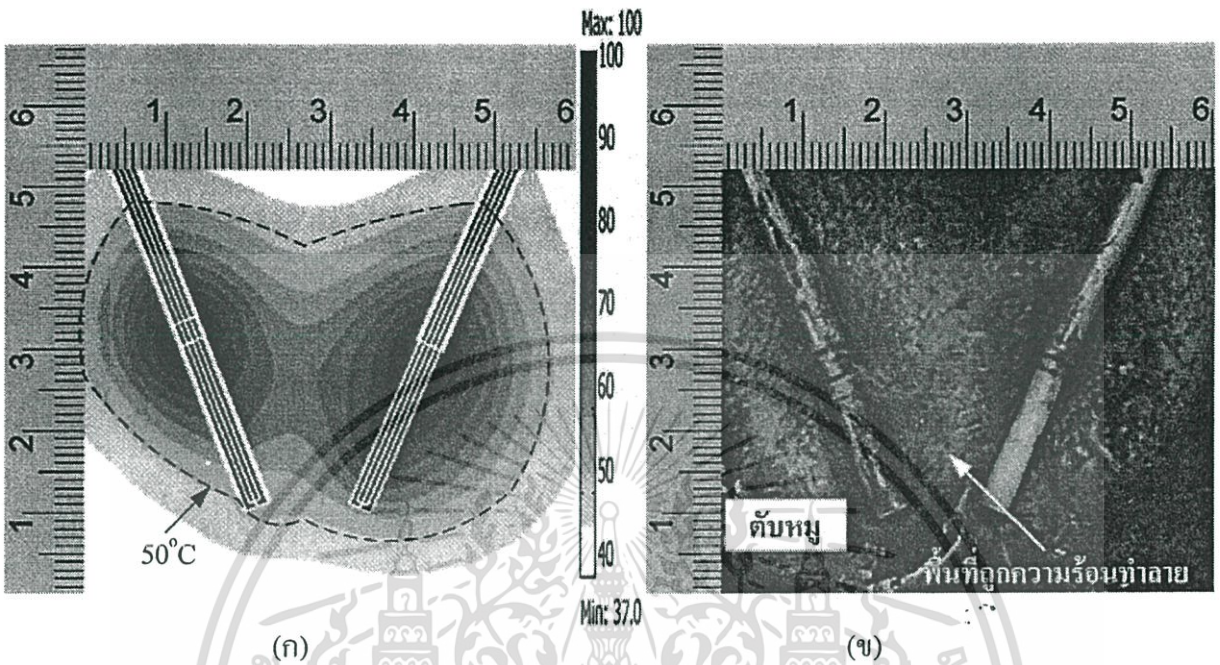
รูปที่ 4.25 แสดงการเปรียบเทียบผลจากการทดลองด้วยไฟไนต์อิเล็กโทรด กับผลที่ได้จากการทดลองกับเนื้อเยื่อ *in vitro* (ตับหมู) ของการจัดเรียงสายอากาศแบบ COA-COA (0°)
 (ก) แสดงลักษณะการแพร่กระจายของอุณหภูมิจากไฟไนต์อิเล็กโทรดที่ 50°C
 (ข) แสดงผลของการกระจายอุณหภูมิในเนื้อเยื่อตับที่ได้จากการทดลองจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



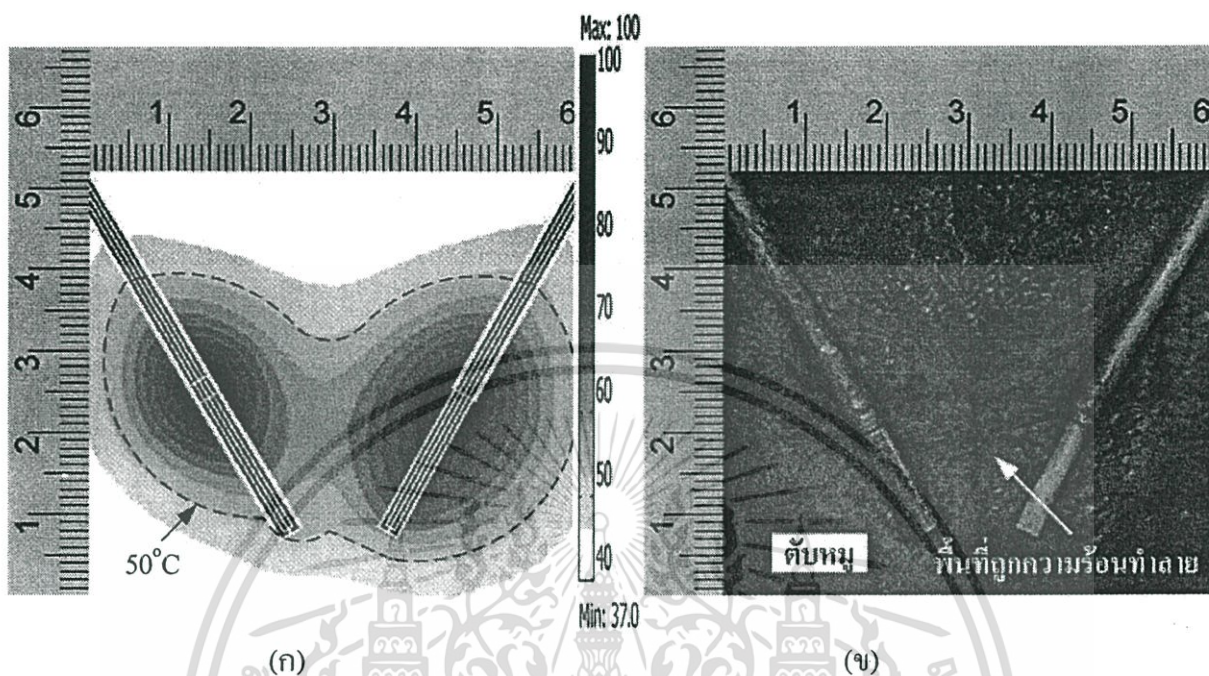
รูปที่ 4.26 แสดงการเปรียบเทียบผลจากการทดลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ กับผลที่ได้จากการทดลองกับเนื้อเยื่อ *in vitro* (ตับหนู) ของการจัดเรียงสายอากาศแบบ CSA-COA (30°)
 (ก) แสดงลักษณะการแพร่กระจายของอุณหภูมิจากไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ 50°C
 (ข) แสดงผลของการกระจายอุณหภูมิในเนื้อเยื่อตับที่ได้จากการทดลองจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



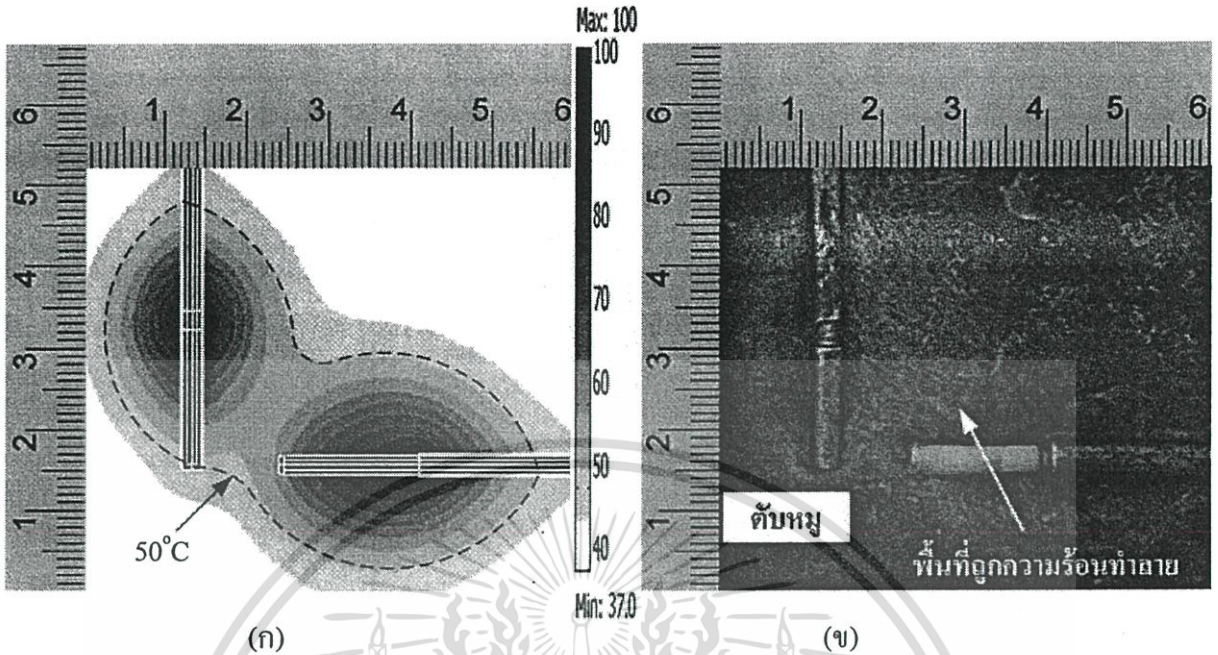
รูปที่ 4.27 แสดงการเปรียบเทียบผลจากการทดลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ กับผลที่ได้จากการทดลองกับเนื้อเยื่อ *in vitro* (ดับหมู) ของการจัดเรียงสายอากาศแบบ CSA-COA (45°)
 (ก) แสดงลักษณะการแพร่กระจายของอุณหภูมิจากไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ 50°C
 (ข) แสดงผลของการกระจายอุณหภูมิในเนื้อเยื่อดับที่ได้จากการทดลองจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.28 แสดงการเปรียบเทียบผลจากการทดลองด้วยไฟไนต์เลเซอร์กับผลที่ได้จากการทดลองกับเนื้อเยื่อ *in vitro* (ตับหมู) ของการจัดเรียงสายอากาศแบบ CSA-COA (60°)
 (ก) แสดงลักษณะการแพร่กระจายของอุณหภูมิจากไฟไนต์เลเซอร์ที่ 50°C
 (ข) แสดงผลของการกระจายอุณหภูมิในเนื้อเยื่อตับที่ได้จากการทดลองจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.29 แสดงการเปรียบเทียบผลจากการทดลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ กับผลที่ได้จากการทดลองกับเนื้อเยื่อ *in vitro* (ดัดหมู) ของการจัดเรียงสายอากาศแบบ CSA-COA (90°)
 (ก) แสดงลักษณะการแพร่กระจายของอุณหภูมิจากไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ 50°C
 (ข) แสดงผลของการกระจายอุณหภูมิในเนื้อเยื่อดัดที่ได้จากการทดลองจริง

ในรูปที่ 4.25 – 4.29 จะแสดงผลของการจำลองผลการทดลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์เทียบกับผลของการทดลองจริง ในเนื้อเยื่อดัดหมู ซึ่งเราได้ทำการทดลองทั้งหมด 5 รูปแบบการจัดเรียงมุมสายอากาศโดยเลือกเอาชุดของสายอากาศที่ทำให้การทำลายมากที่สุดมาทำการทดลอง เทียบกับการทดลองจริง ผลจากการทดลองจะเห็นว่า ทั้งการใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดลองในเนื้อเยื่อดัดหมูนั้น ให้ผลของรูปร่างการทำลายที่คล้ายคลึงกันมาก โดยในส่วนของผลการทดลองจริงนั้นเมื่อสังเกตจะพบว่า มีลักษณะพื้นที่ของการทำลาย ที่มากกว่าการทดลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์เล็กน้อย เราจึงได้ทำการคำนวณหาค่าปริมาตรพื้นที่ผิวในการทำลายออกมาเพื่อให้ได้ขนาดของการทำลายที่ชัดเจนมากขึ้นดังแสดงในตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.5 แสดงขนาดพื้นที่ผิวของการทำลายเนื้อเยื่อที่ อุณหภูมิ 50°C ของการทดลองแบบไฟไนต์เอลิเมนต์เทียบกับผลการทดลองจริงในเนื้อเยื่อตับหมู

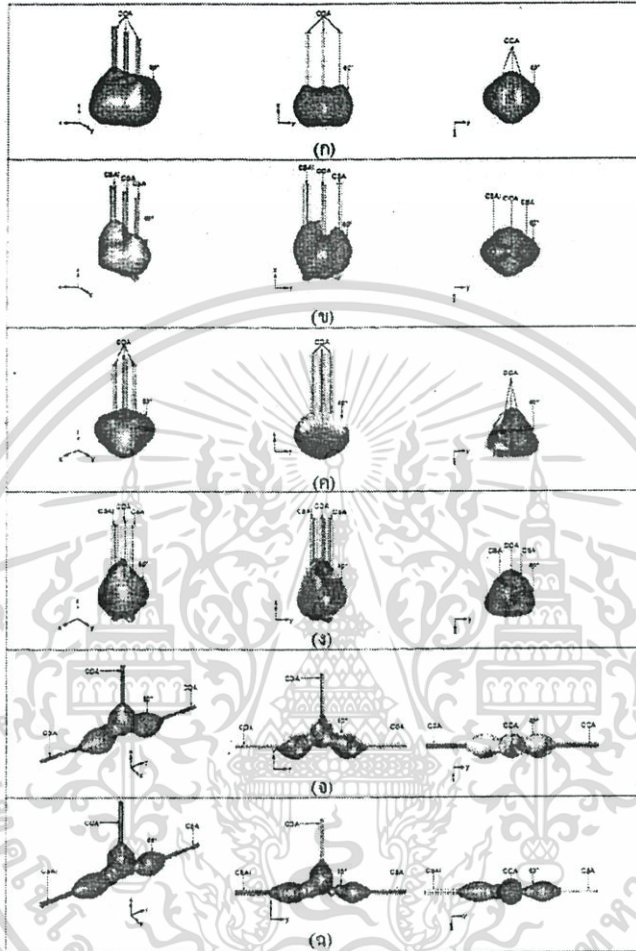
ลักษณะการจัดเรียงและชนิดของสายอากาศ	ผลการจำลองด้วย FEM			ผลการทดลองในตับหมู		
	กว้าง (cm.)	ยาว (cm.)	พื้นที่ทำการทำลาย (cm ²)	กว้าง (cm.)	ยาว (cm.)	พื้นที่ทำการทำลาย (cm ²)
COA-COA (0°)	4.30	5.10	16.40	5.10	5.20	19.60
CSA-COA (30°)	4.50	5.55	17.54	5.15	5.60	20.64
CSA-COA (45°)	4.19	5.90	16.25	4.80	6.22	19.43
CSA-COA (60°)	3.41	5.58	14.28	4.20	5.91	17.83
CSA-COA (90°)	4.52	5.35	12.16	4.71	5.85	14.81

จากตารางที่ 4.5 จะเป็นการเปรียบเทียบพื้นที่ผิวที่ถูกทำลายที่อุณหภูมิเท่ากับ 50°C ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่สามารถทำให้เซลล์ตายได้ ของการจำลองด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ เทียบกับการทดลองจริงด้วยตับหมู ซึ่งผลที่ได้จะเห็นว่าผลของการทดลองจริงนั้นมีขนาดปริมาตรพื้นที่ที่ใหญ่กว่าผลของการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยที่ทุกการทดลองให้ผลแตกต่างกันที่ประมาณ 3 ตารางเซนติเมตร โดยการทดลองที่ให้ผลใกล้เคียงกันมากที่สุดคือแบบ CSA-COA (90°) และการทดลองที่ให้ผลต่างกันมากที่สุดคือ COA-COA (60°) ส่วนผลของการทดลองที่ให้พื้นที่การทำลายมากที่สุดคือ CSA-COA (30°) และการจัดเรียงที่ให้พื้นที่การทำลายน้อยที่สุดคือแบบ CSA-COA (90°)

4.6 เปรียบเทียบผลการทดลองกับผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เรานำเสนอนี้เป็นงานวิจัยที่มีลักษณะการวิจัยคล้ายกับที่ เรานำเสนอจึงได้นำมาเสนอร่วมกับงานที่เรากำลังวิจัย เพื่อเป็นข้อมูลอ้างอิงเกี่ยวกับการใช้งานสายอากาศร่วมกัน แล้วสามารถทำให้เกิดรูปแบบ ของการทำลายเซลล์มะเร็งที่หลากหลายมากขึ้น โดยในการวิจัยของ พัชรพงษ์นั้น มีการใช้สายอากาศแบบ Triaxial antenna [19] โดยการนำเอาสายอากาศ 3 ชนิดมาต่อใช้ร่วมกันคือแบบ Coaxial Open-Tip Antenna (COA), Coaxial Slot Antenna (CSA), Coaxial Slot Antenna with Insulator (CSAI), และมีการนำสายอากาศทั้งสามมาใช้งานร่วมกัน โดยมีการจัดเรียงสายอากาศ 3 แบบคือ Array, Triangular, T-Shape, โดยมีการทดลอง 2 ชุด ชุดละ 3 รูปแบบการจัดเรียงในชุดแรก จะใช้ สายอากาศแบบ (COA) 3 สายอากาศต่อร่วมกัน ชุดที่ 2 ใช้สายอากาศ (COA), (CSA),

(CSAI), อย่างละต้นใช้งานร่วมกัน และทำการทดลองจริงกับเนื้อเยื่อแบบ *in vitro* ใช้กำลังงานที่ 50 วัตต์คงที่ เวลา 60 วินาที



รูปที่ 4.30 แสดงผลที่ได้จากการทดลองโดยใช้สายอากาศแบบ Triaxial Antenna

รูปที่ 4.30 เป็นการแสดงลักษณะรูปร่างของการทำลายเซลล์มะเร็งโดยใช้สายอากาศแบบ Triaxial Antenna ซึ่งเป็นผลที่ได้จากการทดลองของ ภักทรพงษ์ ที่การจ่ายกำลังงานขาเข้าที่ 50 W และเวลา 300 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 แสดงผลที่ได้จากการทดลองโดยใช้สายอากาศแบบ Triaxial Antenna
(COA-COA-COA)

ลักษณะการจัดวาง สายอากาศ		ผลการจำลอง FEM			ผลการทดลองในดับหมุ		
		กว้าง (cm.)	ยาว (cm.)	พื้นที่ การ ทำลาย (cm ²)	กว้าง (cm.)	ยาว (cm.)	พื้นที่ การ ทำลาย (cm ²)
Array		3.40	4.10	13.94	3.01±0.9	3.90±0.8	11.74
Triangular	Front	2.10	2.00	4.20	2.01±0.7	1.82±0.8	3.64
	Back	2.90	3.00	8.70	2.74±0.6	2.94±0.9	8.05
T-Shape		4.5	8.00	21.00	4.37±0.8	7.91±0.7	20.54

ตารางที่ 4.7 แสดงผลที่ได้จากการทดลองโดยใช้สายอากาศแบบ Triaxial Antenna
(COA-CSA-CSAI)

ลักษณะการจัดวาง สายอากาศ		ผลการจำลอง FEM			ผลการทดลองในดับหมุ		
		กว้าง (cm.)	ยาว (cm.)	พื้นที่ การ ทำลาย (cm ²)	กว้าง (cm.)	ยาว (cm.)	พื้นที่ การ ทำลาย (cm ²)
Array		3.40	4.10	13.94	3.01±0.9	3.90±0.8	11.74
Triangular	Front	2.10	2.00	4.20	2.01±0.7	1.82±0.8	3.64
	Back	2.90	3.00	8.70	2.74±0.6	2.94±0.9	8.05
T-Shape		4.5	8.00	21.00	4.37±0.8	7.91±0.7	20.54

จากตารางที่ 4.6 และ 4.7 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกันกับที่เราได้ทำการทดลองพบว่ามีการทำลายที่คล้ายกันโดยให้ผลของการทดลองด้วย FEM กับผลการทดลองจริงที่ใกล้เคียงกันและเมื่อดูจากรูปร่างของการทำลาย ในการใช้สายอากาศแบบ Triaxial พบว่าการจัดเรียงแบบ Array และการจัดเรียงแบบ Triangular จะให้การทำลายที่คล้ายกับการที่เราทดลองโดยใช้สายอากาศแบบ COA-COA (0°) และแบบ CSA-COA (0°) เมื่อเปรียบเทียบผลของพื้นที่การทำลายพบว่าการที่เราใช้สายอากาศแบบสองต้นสามารถให้การทำลายที่มีปริมาตรที่ใกล้เคียงและในบางรูปแบบการจัดเรียงยังสามารถให้การทำลายที่มากกว่าเช่นที่การจัดเรียงมุม 30° สามารถให้พื้นที่การทำลายมากกว่าการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้สายอากาศแบบ Triaxial ทั้งสามรูปแบบการจัดเรียง ทำให้เราสามารถสรุปได้ว่าการที่เราใช้กำลังงานอินพุตและสายอากาศที่น้อยกว่านั้นสามารถให้พื้นที่การทำลายที่มากขึ้นได้โดยการใช้เวลาที่มากขึ้น แต่ทั้งนี้ในการจัดทำกรทดลองนี้นั้นเราต้องการให้เห็นถึงว่า การที่เราใช้สายอากาศแบบสองแท่งนั้นสามารถ ประยุกต์รูปแบบการทำลายได้หลากหลายมากกว่า และสามารถใช้งานได้สะดวกกว่า โดยเฉพาะ เมื่อเราดูที่การจัดเรียงสายอากาศแบบ T-Shape จะพบว่าเป็นเรื่องยากในการที่จะนำมาใช้จริงกับผู้ป่วย และเมื่อพิจารณาที่กำลังงานที่ป้อนให้ นั้น จะพบว่าการทดลองใช้สายอากาศแบบ Triaxial นั้นให้กำลังงานที่สูงถึง 50 วัตต์ เมื่อเทียบกับการทดลองที่ใช้สายอากาศแบบสองแท่งที่เราทดลองนั้น ใช้กำลังงานสูงสุดเพียง 20 วัตต์เท่านั้น เนื่องจากว่าการที่ใช้กำลังงานที่สูงนั้นมีความเสี่ยงต่ออันตรายที่อาจเกิดขึ้นได้ ทั้งที่ตัวสายอากาศเองและยังส่งผลกระทบต่อการใช้งานจริงได้เพราะ การที่เราส่งกำลังงานสูงนั้นจะทำให้เกิดค่า SAR [6] ที่สูงมากตามไปด้วย ดังนั้นเวลาใช้งานค่า SAR ที่สูงนั้นอาจส่งผลกระทบต่อเนื้อเยื่อที่ดี ที่เราไม่ต้องการทำลายได้ จึงเป็นเรื่องที่ดีกว่าที่เราเลือกที่จะใช้กำลังงานที่ต่ำลง เพราะเป็นเรื่องง่ายกว่าในการควบคุมพื้นที่ที่ต้องการทำลายโดยไม่ให้เนื้อเยื่อดีถูกทำลายไปด้วย



บทที่ 5

สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลงานวิจัย

การใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์มาทำการสร้างแบบจำลองก่อนการสร้างระบบการทดสอบจริง เป็นอีกวิธีการหนึ่งซึ่งช่วยให้เราสามารถออกแบบและสร้างระบบขึ้นมาตามที่เรต้องการทดสอบได้ หรืออาจนำมาใช้กับการทดลองกับระบบที่สามารถทดลองจริงได้ การสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ผลการทดลองจากวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นนับว่าเป็นวิธีการที่ทำให้เราประหยัดเวลา เพราะวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์จะช่วยลดขั้นตอนและระยะเวลาที่ยุ่งยากไปได้มากทีเดียวเมื่อเทียบกับการทดลองจริง นอกจากนี้ยังช่วยลดค่าใช้จ่ายในการทดลองอีกด้วย เพราะนอกจากข้อดีดังกล่าวข้างต้นแล้วเรายังสามารถปรับเปลี่ยนรูปแบบการทดลองในระหว่างที่ทำการทดลองได้อีกด้วย

ในส่วนของงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการกระจายอุณหภูมิในการทำลายเซลล์มะเร็งระดับด้วยวิธีการ มัลติโพรบ โดยการนำเอาสายอากาศมาใช้งานร่วมกันสองสายอากาศ ซึ่งสายอากาศที่ใช้ในการทดลองนั้นมีสองชนิด คือ แบบ Slot กับ Open-Tip โดยในการทดลองนั้นเรายังได้แบ่งการทดลองออกเป็นแบบการใช้สายอากาศชนิดเดียวกันร่วมกันและการใช้สายอากาศต่างชนิดกันร่วมกันทำงาน รวมไปถึง การออกแบบลักษณะการจัดวางสายอากาศในการทดลองเพื่อให้เกิดรูปร่างของการทำลายที่แตกต่างกันออกไปมากขึ้นเพื่อให้สะดวกและ เหมาะสมกับการเลือกใช้งานจริงให้ได้ ประสิทธิภาพในการทำลายมากที่สุด โดย ได้ออกแบบการจัดเรียงเป็น 5 รูปแบบของเสา คือ 0, 30, 45, 60, และ 90 องศา นอกจากนี้ยัง ได้มีการทดลองเกี่ยวกับรูปแบบของการควบคุมอุณหภูมิที่เกิดขึ้นที่สายอากาศโดยมีการควบคุมสองวิธี คือการใช้รูปแบบการปรับเปลี่ยนกำลังงานและการใช้การควบคุมแบบการให้ค่ากำลังงานคงที่ ที่เหมาะสม การที่เราต้องมีการควบคุมอุณหภูมิที่เกิดขึ้นนั้นก็เนื่องจากการป้องกันอันตรายที่อาจเกิดขึ้นได้จากการที่สายอากาศทำให้เกิดความร้อนสูงมากขึ้น จนเกินไปอาจทำให้เกิดอันตรายต่อผู้ใช้งานและผู้ป่วยได้ รวมไปถึงสายอากาศที่ใช้อาจจะ ชำรุดเสียหายได้ง่ายเนื่องจากความร้อนนั้นสูงเกินไป

ในส่วนของการศึกษาการกระจายอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากการทดลองการจัดเรียงสายอากาศในมุมองศาต่าง ๆ นั้น ทำให้เกิดรูปแบบการทำลายที่เพิ่มขึ้นสามารถนำไปใช้ประกอบรวมกับการตัดสินใจในการเลือกใช้งาน ให้เหมาะสมกับรูปแบบของเซลล์มะเร็งที่เกิดขึ้นได้ ทำให้ลดเวลาในการวิเคราะห์ผลที่จะเกิดขึ้นจากการรักษาได้และทำให้เกิดประสิทธิภาพในการทำลายเซลล์มะเร็งที่มากขึ้น และจากงานวิจัยนี้ที่ได้ทำการพิจารณาถึงการควบคุมอุณหภูมิสองแบบ จากการทดลองพบว่าการควบคุมอุณหภูมิแบบมีการปรับเปลี่ยนค่ากำลังงานอินพุทนั้นจะให้ผลของการทำลายที่มีประสิทธิภาพมากกว่าการที่เราจะใช้การควบคุมแบบการให้ค่ากำลังงานคงที่ตลอดเวลาเนื่องจาก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การที่เราใช้การควบคุมแบบมีการปรับเปลี่ยนค่ากำลังงานนั้น ในช่วงเวลาเริ่มต้นเราสามารถที่จะให้กำลังงานที่สูงก่อนเพื่อให้เกิดความร้อนที่สูงขึ้นในเวลาอันรวดเร็วแล้ว จึงมีการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานไปเรื่อยๆเพื่อรักษาระดับของอุณหภูมิให้คงที่มากที่สุด ทำให้เกิดการกระจายตัวของความร้อนที่มีค่าคงที่ตลอดเวลาจึงทำให้มีปริมาณในการทำลายเซลล์มะเร็งที่ดี กว่าเมื่อเทียบกับการให้กำลังงานอินพุทแบบคงที่ และช่วยลดเวลาในการรักษาลงได้

จากการจำลองผลด้วย FEM เราจะพบว่าเมื่อพิจารณาที่ปริมาตรของการทำลายนั้น การจัดเรียงที่ให้การทำลายมากที่สุดจะอยู่ที่ การใช้คู่สายอากาศแบบ CSA-COA (30°) ส่วนการจัดเรียงที่ให้การทำลายน้อยที่สุดคือการใช้คู่สายอากาศแบบ CSA-COA (90°) เมื่อทดลองในเนื้อเยื่อตับหมู ก็พบว่ามิลักษณะการทำลายที่เหมือนกับการจำลองด้วย FEM ทั้งในลักษณะของการทำลายและปริมาตรพื้นที่ผิวของการทำลาย

ผลที่ได้จากการทดลองจริงในเนื้อเยื่อตับเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองด้วย ไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่ามีขนาดพื้นที่ผิวการทำลายและรูปร่างที่ใกล้เคียงกัน โดยการทดลองจริงนั้นมีขนาดที่ได้ออกมาใหญ่กว่าประมาณ 3 ตารางเซนติเมตรจากการวิเคราะห์สาเหตุที่ผลจริงมีขนาดใหญ่นั้นเนื่องมาจากการที่ เกิดไอน้ำความร้อนขึ้นที่บริเวณที่ถูกทำลายทำให้ไอน้ำแทรกซึมเข้าไปตามช่องว่างรอยต่อของเนื้อเยื่อตับที่เรทดลอง เนื่องจากว่าเนื้อเยื่อที่เรานำมาทดลองนั้นก่อนการทดลองเราได้ทำการ ผ่าออกเป็นสองชั้นแล้วสอดสายอากาศเข้าไป ซึ่งทำให้เกิดบริเวณช่องว่างระหว่างชั้นสองชั้น ทำให้เกิดไอน้ำความร้อนผ่านตามช่องไปทำลายเนื้อเยื่อเป็นบริเวณที่กว้างขึ้น ซึ่งในส่วนของไอน้ำที่เกิดขึ้นนั้นเรายังไม่ได้นำมาวิเคราะห์ร่วมในกระบวนการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ รวมไปถึงเนื้อเยื่อที่เราใช้ในการทดลองจริงนั้นเป็นเนื้อเยื่อแบบ *in vitro* จึงทำให้อุณหภูมิเริ่มต้นที่เนื้อเยื่อไม่คงที่ ที่ 37°C ตลอดเวลาเหมือนในการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์

5.2 ข้อเสนอแนะในการพัฒนาต่อไป

จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าการสร้างแบบจำลองโดยนำวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้ในการจำลองระบบการทำลายเซลล์มะเร็งด้วยคลื่นความถี่ไมโครเวฟนับว่าเป็นวิธีการที่มีประโยชน์เป็นอย่างมาก โดยทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการทดลองและสามารถออกแบบการทดลองในส่วนที่เราไม่สามารถทำจริงได้ ดังนั้นในงานวิจัยต่อไปการนำวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้จำลองก่อนทำการรักษาจริงเป็นอีกวิธีหนึ่งที่จะช่วยให้เราสามารถวางแผนการรักษาได้อย่างสมบูรณ์ที่สุด และเพื่อให้แบบจำลองที่เราทำการสร้างขึ้นมา มีความสมบูรณ์ใกล้เคียงกับระบบจริงมากที่สุดจึงควรหาแนวทางในการศึกษาวิธีการที่นำมาสร้างแบบจำลองการทำลายเซลล์มะเร็งด้วยคลื่นความถี่ไมโครเวฟให้มีความถูกต้องมากที่สุด ดังเช่น ค่าพารามิเตอร์ด้านความร้อน ด้านไฟฟ้า รวมถึงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในแบบจำลอง การไหลของโลหิตภายในตับ และการเกิดไอน้ำความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขึ้นภายในเนื้อเยื่อ รวมถึงพัฒนาซอฟต์แวร์เพื่อนำมาใช้ในการจำลองการทำลายเซลล์มะเร็งระดับด้วยคลื่นความถี่ไมโครเวฟขึ้นมาโดยเฉพาะด้าน เป็นต้น เพื่อใช้เป็นเครื่องมือสำหรับการวางแผนก่อนการรักษาของแพทย์ในต่อไป และในส่วนของ การทดลองจริงนั้น ควรมีการพัฒนาเครื่องกำเนิดคลื่นไมโครเวฟให้สามารถควบคุมการทำงานได้ง่ายขึ้นและ สามารถปรับเปลี่ยนกำลังงานได้อย่างอัตโนมัติ ซึ่งเป็นสิ่งที่จำเป็นมาก เพื่อที่จะสามารถทำให้ผลการทดลองจริงนั้นมีความสมจริงกับการจำลองด้วย FEM มากที่สุด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

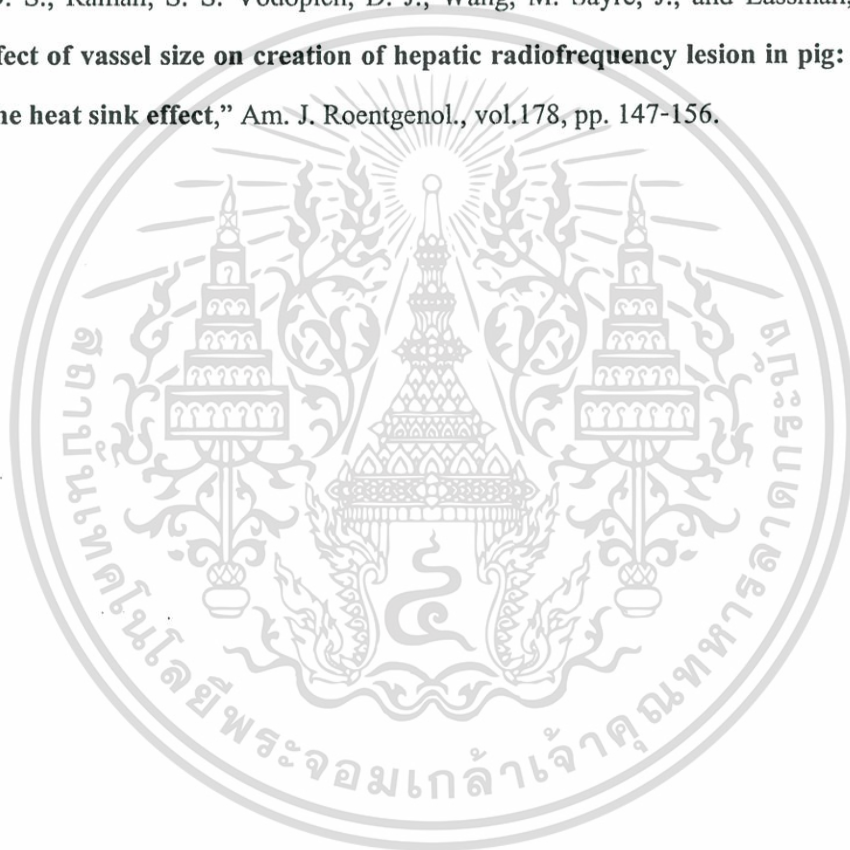
- [1] T. J. Vogl, T. K. Helmberger, M. G. Mack, and M. F. Reiser (Eds.), **“Ablative techniques (percutaneous) Thermal Ablative Techniques,”** in Percutaneous Tumor Ablation in Medical Radiology, Berlin, Germany: Springer, 2008, pp. 7-32.
- [2] J. P. McGahan, J. M. Brock, H. Tesluk, W.-Z. Gu, P. Schneider, and P. D. Browning, **“Hepatic ablation with use of radio-frequency electrocautery in the animal model,”** J. Vasc. Inter. Radiol., vol.3, 1992, pp. 291-297.
- [3] S. Labonte, A. Blais, S. R. Legault, H. O. Ali, and L. Roy, **“Monopole antennas for microwave catheter ablation,”** IEEE Trans. Micro. Theory Tech., vol. 44, no. 10, pp.1832-1840, Oct. 1996.
- [4] L. Hamada, K. Saito, H. Yoshimura, and K. Ito, **“Dielectric-Loaded coaxial-slot antenna for interstitial microwave hyperthermia: longitudinal, control of heating patterns,”** Int. J. Hyperthermia, vol. 16, pp. 216-229, 2000.
- [5] K. Saito, Y. Hayashi, H. Yoshimura, and K. Ito, **“Heating characteristics of array applicator composed of two slot-coaxial slot antennas for microwave coagulation therapy,”** IEEE Trans. Microwave. Theory Tech., vol. 48, no. 11, pp.1800-1806, Nov. 2000.
- [6] K. Saito, Y. Hayashi, H. Yoshimura, and K. Ito, **“Estimation of SAR distribution of tip-split array applicator for microwave coagulation therapy using of finite element method,”** IEICE Trans. Electronics., vol. E84-C, no.7, pp. 948-954, Jul. 2001.
- [7] Perter M. Van Den Berg. A. T. De Hoop, A. Segal and N. Pragman, **“A computational model of the electromagnetic heating of biological tissue with application to hyperthermic cancer therapy,”** IEEE Trans. Biomed. Eng, vol. 30, no. 12, December 1983.
- [8] D. Heammerich, A. T. Wright, D. M. Mahvi, J. G. Webster, F. T. Lee Jr, **“Hepatic bipolar radiofrequency ablation creates coagulation zones close to blood vessel: a finite element study,”** Med. Biol. Eng. Comput., vol. 41, pp. 317-323, 2003.
- [9] Issac A. Chang, Uyen D. Nguyen, **“Thermal modeling of lesion growth with radiofrequency ablation devices,”** Biomedical Engineering Online, August 2004.

เอกสาร [10] S. Tungjitkusolmun, Eung Je Woo, Hong Cao, Jang Zern Tsai, J. Webster, F. T. Lee, F. T. Lee Jr., D. M. Mahvi, V. R. Vorperian, **“Finite Element Analyses of Uniform Current**

- Density Electrode for Radio-Frequency Cardiac Ablation,”** IEEE Trans. Biomed Eng., vol. 47, no. 1, pp. 32-40, 2002.
- [11] S. Tungjitkusolmun, S. T. Staelin, D. Haemmerich, J. Z. Tsai, H. Cao, J. G. Webster, F. T. Lee, Jr., D. M. Mahvi, and V.R. Voperian, **“Three-dimensional finite element analyses for radio-frequency hepatic tumor ablation,”** IEEE Trans. Biomed. Eng., vol. 49, pp. 3-9, 2002.
- [12] S. Gabriel, **“The dielectric properties of biological tissues. I. literature survey,”** Phys Med Biol, vol. 41, pp. 2231-2249, 1996.
- [13] S. Gabriel, **“The dielectric properties of biological tissues. II. measurements in the frequency range 10 Hz to 20 GHz,”** Phys Med Biol, vol. 41, pp. 2251-2269, 1996.
- [14] S. Gabriel, **“The dielectric properties of biological tissues. III. Parametric models for the dielectric spectrum of tissues,”** Phys Med Biol, vol. 41, pp. 2271-2293, 1996.
- [15] A. Wright, F. T. Lee, and D. M. Mahvi, **“Hepatic microwave ablation with multiple antennas results in synergistically larger zones of coagulation necrosis,”** Ann Surg Oncol, vol. 10, pp. 275-283, 2003.
- [16] T. L. Fong, **“Liver cancer online document”**, [Online]. Available: http://www.medicinenet.com/liver_cancer/article.htm
- [17] ปราโมทย์ เศษอำไพ. ไฟฟ้าอินทรีย์ในทางงานวิศวกรรม. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์. 2537.
- [18] อาเขต บุญทรากรม. **“การวิเคราะห์ทางไฟฟ้าอินทรีย์สำหรับการศึกษาลักษณะการทำลายเซลล์มะเร็งในตับแบบโมโนโพลาร์ และแบบไบโพลาร์ช่วงคลื่นความถี่วิทยุ.”** วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2548.
- [19] ภัทรพงษ์ ผาสุกกิจ. **“การออกแบบและวิเคราะห์สายอากาศสำหรับทำลายเซลล์มะเร็งตับเฉพาะจุดด้วยคลื่นไมโครเวฟโดยวิธีไฟฟ้าอินทรีย์.”** วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2552.
- [20] มนตรี ไชยชาญยุทธม. **“วิธีการทางไฟฟ้าอินทรีย์เพื่อวิเคราะห์ลักษณะการทำลายเซลล์มะเร็งในตับโดยใช้สายอากาศในช่วงความถี่ 2.45 GHz.”** วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2548.
- [21] สุพันธ์ ศรีณนิตย์. การถ่ายเทความร้อน. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ ศ.ส.ท. 2545.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [22] ทวีศักดิ์ บูรณวุฒิ, อารี พร้อมเพชรรัตน์. **สาระสำคัญวิชาสรีระวิทยา**. กรุงเทพมหานคร: หจก. นำอักษรการพิมพ์. 2543.
- [23] A. W. Guy, “**History of biological effects and Medical application of microwave energy,**” IEEE Transaction on Microwave Therapy and Techniques, vol. MTT-32, no. 9, pp. 1182-1199, September 1984.
- [24] P. Liang, B. Dong, X. Yu, D. Yu, Z. Cheng, Li Su, J. Peng, Q. Nan, “**Computer-Aided Dynamic Simulation of Microwave-Induced Thermal Distribution in Coagulation of Liver Cancer,**” IEEE Trans. Biomed. Eng., vol. 48, no. 7, pp. 821-829, July 2001.
- [25] Lu, D. S., Raman, S. S. Vodopich, D. J., Wang, M. Sayre, J., and Lassman, C. (2002): “**Effect of vessel size on creation of hepatic radiofrequency lesion in pig: assessment of the heat sink effect,**” Am. J. Roentgenol., vol.178, pp. 147-156.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1. Kulachat Yencham, P. Phasukkit, M. Sansworasil, S. Tungjitkusolmun, “**Comparision of lesion dimentionts and angular placements in cancer cells destruction of double microwave antennas using Slot and Open-Tip designs.**” International Symposium on Biomedical Engineering (ISBME 2008), pp. 61-63, Bangkok, Thailand, November 10-11, 2008.

<http://www.kmutl.ac.th/isbm08>

ISBME & BMIECON 2008

The 1st International Symposium on Biomedical Engineering (ISBME 2008)
and
The 2nd International Engineering Biomedical Conference (IEBC 2008)

ISBME & BMIECON 2008

November 10-11, 2008 Bangkok, Thailand

ISBME & BMIECON 2008

November 10-11, 2008 Bangkok, Thailand

PROGRAM AND ABSTRACTS

The 3rd International Symposium on Biomedical Engineering (ISBME 2008)
in conjunction with
The 1st Biomedical Engineering International Conference (BMIECON 2008)

Organized by:
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand
Department of Electrical, Electronic, and Engineering Engineering, Faculty of Engineering,
Department of Electronic and Electrical Engineering, School of Engineering, Ministry of Education,
Science and Technology

Sponsors:
IEEE
IECU
IFMBE
NECTEC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COMPARISON OF LESION DIMENSIONS AND ANGULAR PLACEMENTS IN CANCER CELLS DESTRUCTION FO DOUBLE MICROWAVE ANTENNAS USING SLOT AND OPEN-TIP DESIGNS

Kulachat Yencham¹, Pattarapong Phasukkit¹, Manas Sangvorasil², Supan Tungjitkusolmun²

¹Computer Research and Service Center, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, 10520, Thailand

²Department of Electronics, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Chalokkrung RD, Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand

ABSTRACT

This paper present technique to large lesions area by used multi-antenna it's used frequency 2.45GHz. Pattern and size of area to destroy of liver cancer cell effect to position and distance between antenna. Authors present two antenna were Slot (open-ends) and Open-tip by to deal with array and orthogonal 3-D Line Element Method used to solve this problem. The result of 3-D Finite Element present large volumes to destroy cancer cell (temperature > 50 Celsius) related to position and distance between antenna. It increase large area and decrease power and time operate to come alongside one antenna.

1. INTRODUCTION

Resection of liver tumors has been shown to increase both 5-year overall and disease-free survival [1–3]. However, many patients have tumors that are surgically unrespectable either because of unfavorable anatomy or poor hepatic reserve [4]. A number of ablative technologies have been developed to enable local control of liver tumors without resection.

In the United States, the two most commonly used ablation methodologies are cryotherapy [5–7] and radiofrequency (RF) ablation [8]. Cryotherapy is generally performed during surgery and has the potential for the simultaneous use of multiple probes. RF ablation may be performed at laparotomy, laparoscopically, or percutaneously.

No currently available RF systems have the capacity to drive multiple electrically independent electrodes. Local recurrence rates for RF ablation have varied from 2% to 40%, depending on followup and technique [8, 10]. Criticism of RF ablation has focused on the potential for incomplete ablation near blood vessels because of the heat sink effect of local blood flow [8, 11], difficulty in ultrasound imaging of RF lesions, [2] and evidence of surviving tumor cells even within RF lesions [3]. Although less commonly

used in clinical practice, microwave (MW) ablation offers many of the benefits of RF but has several theoretical advantages that may offer improved performance near blood vessels. The zone of active tissue heating in RF is limited to a few millimeters surrounding the active electrode, with the remainder of tissue being heated by thermal conduction [4]. Compared with RF,

MWs have a much broader field of power density (up to 2 cm surrounding the antenna) with a correspondingly larger zone of active heating [5]. This may allow for more uniform tumor kill both within a targeted zone and next to vessels. RF is also limited by the increase in impedance with tissue boiling and charring, [6] because water vapor and char act as electrical insulators. MW energy does not seem to be subject to this limitation, thus, lesion temperature may be driven considerably higher. Like RF, MW ablation may be performed as an open, [7] laparoscopic, [8] or percutaneous [9] procedure. Use of MW has been most prevalent in Asia to date, where a number of case series have shown it to be effective in local control of both hepatocellular carcinoma and metastatic colorectal carcinoma. [2] One limitation of MW has been the inability to treat large tumors without numerous overlapping ablations; in one study this required a mean of 4.6 ablations. [7] Recent engineering advances have allowed the design of MW antennas that are tuned to the dielectric properties of liver, reducing feedback and increasing the amount of energy deposited into the surrounding tissue. This new MW ablation system (Vivant Medical, Inc., Mountain View, CA) has the potential to create larger, hotter lesions than previously possible. Additionally, the prototype MW generator has the capacity to drive up to eight antennas at one time. This ability to perform multiple ablations simultaneously may allow for the treatment of large tumors with concurrent overlapping lesions or for the ablation of several anatomically separate lesions at one time. Multiple probe ablations should reduce the need for repeat treatments, decrease inadequate treatment of larger tumors, and increase the speed of the therapy, thereby decreasing the complication rate. This study was designed to assess the feasibility of multiple-probe MW ablation in an *in vivo* porcine model. We hypothesized that sequential multiple-probe hepatic ablation would create larger zones of



coagulation necrosis than single probe ablation because of the additive effect of creating multiple overlapping lesions. We further hypothesized that simultaneous multiple-probe MW ablation would create synergistically larger lesions than either single probe or sequentially activated multiple-probe ablation because of shielding of the lesion center from blood flow-mediated cooling.

2. ANTENNA STRUCTURE.

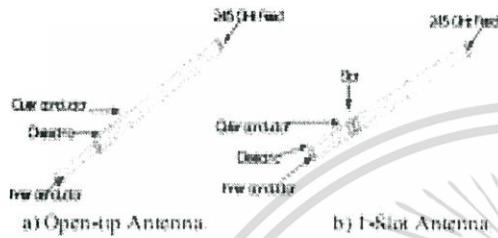


Figure 1. Structure of Antenna
a) open-tip antenna b) Slot antenna

In figure 1. a) open-tip antenna, rigid coaxial that outer conductor is rigid dimension of antenna were 4 mm of inner diameter, 3 mm diameter of dielectric and 5mm diameter. Distance from end of antenna to open-tip is 20 mm antenna have long are 80 cm (connector to end) in figure 1 b) is one slot coaxial open-end dimension of antenna save as open-tip antenna but different that had slot ring 3 mm at 20mm tend to center of slot antenna). Both antenna insert microwave 2.45 GHz and 20 watts power

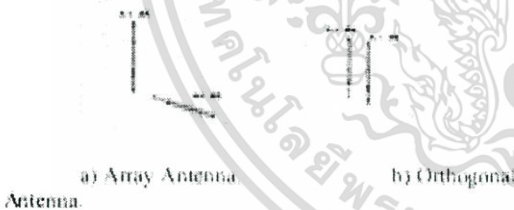


Figure 2. a) Array Antenna and b) Orthogonal Antenna

3. BIOHEAT EQUATION

The bioheat equation below was employed to analyze heat generated from electric energy [9]. We solved the bioheat equation to obtain the thermal distribution in hepatic cancer tissue.

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = \rho C_b w_b (T_b - T) + Q_m + Q_a \quad (3)$$

In this study, we are interested in the effect of the number of slots on SAR and the temperature distribution. Thus we

performed all analyses in steady state using the following equation:

$$\nabla \cdot (-k \nabla T) = \rho C_b w_b (T_b - T) + Q_m + Q_a \quad (3)$$

Where

- ρ = Density (kg/m³)
- C = Specific heat (J/kg.K)
- K = Thermal conductivity (W/m.K)
- J = Current density (A/m²)

Since Q_m is negligible, we excluded it from our FE models. We also omitted h_{bl} from our preliminary studies.

- E = Electric field intensity (V/m)
- T_{bl} = Temperature of the blood
- ρ_{bl} = The blood density (kg/m³)
- c_{bl} = Specific heat of the blood(J/kg.K)
- w_{bl} = blood perfusion (1/s)
- h_{bl} = The convective heat transfer coefficient accounting for blood perfusion in the model
- Q_a = The energy generated by the metabolic processes (W/m³)

3.1. Finite Element Method

The finite element method (FEM) involves dividing a complex geometry into small elements for a system of partial differential equation, evaluated at nodes or edges. In this paper, we performed computer simulation using the finite element method. We selected HEMLAB 3.0a (Comsol Inc, Burlington, MA), to solve our thermal-electrical problems. In process of Finite element method, we used a nonuniform mesh and an axisymmetric model in this study. We ran our simulation on a personal computer with 3.0 GHz Intel Pentium 4 processor, and 1 GB of RAM.

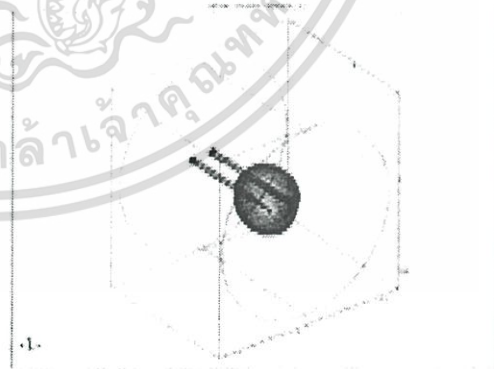


Figure 3. Lesion dimension of liver cancer to destroy, (temperature > 50 Celsius)



In figure 3 dimension of liver cancer cell to destroy by to be attentive area of temperature in liver more than 50 Celsius. From figure area to destroy have large area more than single antenna and power and time that operates is minimums if distance and position between antenna appropriate, but distance between antenna not appropriate pattern to destroy area separate to two area. Good distance between two antenna is 2 cm, pattern and size is good by insert power into antenna is 20 watts 1 minutes. From the results effect of angle between antennas is not affect to temperature to appear in liver tissue.

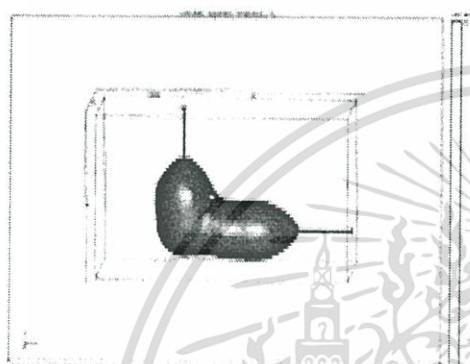


Figure 4. Lesion dimension of liver cancer to destroy. (temperature > 50 Celsius)

TABLE 1
SUMMARY OF VOLUME LIVER CANCER TO DESTROY (TEMPERATURE > 50 CELSIUS)

Antenna A	Antenna B	Volume (cm ³)	Position
Slot	Slot	7.383527	Array
Open-tip	Open-tip	6.496534	Array
Slot	Open-tip	7.9500031	Array
Slot	Slot	7.563619	Orthogonal
Open-tip	Open-tip	7.850792	Orthogonal
Slot	Open-tip	7.574174	Orthogonal

In table 1 present volume of liver cancer cell to destroy by used 3-D Finite Element to determine area in tissue at temperature higher than 50 Celsius. by used two antenna (slot, open-tip) at array and orthogonal. From the result after insert power at 20 watts 1 minute's a different of volumes have a few. But in this case open-tip with open-tips when used array position it's had minimum volume, that single open-tip antenna had maximum temperature distribution from antenna more than slot antenna. If used open-tip with slot-antenna (high temperature distribution) the total of temperature distribution too much. This multi-antenna technique had to large size volume of liver cancer to destroy and used few time that a patient to get few to feel pain.

4. CONCLUSION

From 3-D Finite element result we used multi antenna technique used to MCT (Microwave Coagulation Therapy) system. The result had large volume more than single antenna but used power and time same as single antenna. Then a patient to get a few to feel pain because we used short time to destroy large liver cancer cell and temperature distribution had uniform. In single probe when to destroy large volume just insert high power to antenna or long operate time that to make to a few pain to a patient thus in this paper present the way to destroy large volume cancer by had a few to feel pain.

REFERENCES

- [1]. Weber SM, Jarnagin WR, DeMatteo RP, Blumgart LH, Fong Y. Survival after resection of multiple hepatic colorectal metastases. *Ann Surg Oncol* 2000;7:643-50.
- [2]. Chu C, Lee TF Jr, Bekkers LF, Niederhuber JE, Nguyen BT, Mahvi DM. Rationale for the combination of cryoablation with surgical resection of hepatic tumors. *J Gastrointest Surg* 2001;5:206-13.
- [3]. Wood TF, Rose DM, Chong M, Allegra DP, Foshag LI, Bilezik AJ. Radiofrequency ablation of 231 unresectable hepatic tumors: indication, limitations, and completion. *Ann Surg Oncol* 2000;7:593-600.
- [4]. Chinn SH, Lee TF Jr, Kennedy GD, et al. Effect of vascular occlusion on radiofrequency ablation of the liver: results in a porcine model. *AJR Am J Roentgenol* 2000;176:789-95.
- [5]. Chu CH, Lee TF Jr, Gurney JM, et al. CT versus sonography for monitoring radiofrequency ablation in porcine liver. *AJR Am J Roentgenol* 2000;175:705-11.
- [6]. Solbiato L, Jafar T, Goldberg SN, et al. Percutaneous US-guided radio-frequency tissue ablation of liver metastases: treatment and follow-up in 16 patients. *Radiology* 2000;202:195-203.
- [7]. De Baere T, Denys A, Johns WB, et al. Radiofrequency liver ablation: experimental comparative study of water-cooled versus expandable systems. *AJR Am J Roentgenol* 2001;176:187-92.
- [8]. Lee TF Jr, Heaningerch D, Wright AS, Johnson C, Mahvi DM, Webster JG. A device that allows for multiple simultaneous radio-frequency ablation in separated areas of the liver: feasibility study in the porcine model. Paper presented at radiological society of North America 87th Scientific Assembly and Annual Meeting, November 17, 2001, Chicago, IL.

ภาคผนวก ข. สมการทางไฟฟ้าที่เกี่ยวข้อง

ข.1 การวิเคราะห์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์

สนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยทั่วไปแล้วจะเป็นคลื่นที่เป็นสัญญาณที่มีฮาร์โมนิก (Time-Harmonic Field) หรืออีกนัยหนึ่งคือเป็นสัญญาณที่มีคาบการแกว่งที่แน่นอน ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะแทนด้วยผลรวมของสัญญาณรูปไซน์ที่สามารถใช้ฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ เขียนได้ทั้งฟังก์ชันโคไซน์ ฟังก์ชันไซน์ หรือฟังก์ชันเอ็กโปเนนเชียลเชิงซ้อน ถ้าพิจารณาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นสัญญาณโคไซน์ก็จะได้ $\frac{\partial E}{\partial t} = j\omega E$ ในกรณีที่สนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นสัญญาณรูปไซน์นั้น สามารถวิเคราะห์ผลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีต่อตัวกลางได้ง่ายโดยพิจารณาการตอบสนองของช่วงเวลาที่สนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นสัญญาณไซน์คงตัว (Steady state) ซึ่งสามารถอนุมานอัตราการเปลี่ยนแปลงกับเวลา $\frac{\partial}{\partial t}$ คือการเฉลี่ยด้วยค่า $j\omega$ ทำให้ได้สมการแมกซ์เวลล์ตามหัวข้อที่ข.1.1 ซึ่งเป็นการเขียนในลักษณะของเฟสเซอร์

ข.1.1 สมการของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's Equation)

$$\nabla \times E = -j\omega\mu H \quad (\text{ข.1.1.1})$$

$$\nabla \times H = j\omega\epsilon E + \sigma E \quad (\text{ข.1.1.2})$$

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (\text{ข.1.1.3})$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (\text{ข.1.1.4})$$

$$D = \epsilon E \quad (\text{ข.1.1.5})$$

$$B = \mu H \quad (\text{ข.1.1.6})$$

เมื่อ

E = ความเข้มของสนามไฟฟ้า

H = ความเข้มของสนามแม่เหล็ก

D = ความหนาแน่นของฟลักซ์ไฟฟ้า

B = ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก

ϵ = ค่าความยินยอมทางไฟฟ้า

μ = ค่าความซึมซาบแม่เหล็ก

ρ = ค่าความหนาแน่นของประจุเชิงปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.1.2 สมการคลื่นสำหรับตัวกลางที่เป็นตัวนำ

เมื่อพิจารณาตัวกลางที่เป็นตัวนำ ในตัวกลางนี้สภาพนำไฟฟ้าจะไม่เป็นศูนย์ และมีกระแสการนำเกิดขึ้นซึ่งจากสมการของแมกซ์เวลล์

$$\nabla \times E = -\mu \frac{\partial H}{\partial t} \quad (\text{ข.1.2.1})$$

$$\nabla \times H = \mu \frac{\partial E}{\partial t} + J \quad (\text{ข.1.2.2})$$

ถ้า σ เป็นสภาพการนำของตัวกลางจากกฎของโอห์มจะให้ความหนาแน่นกระแสการนำมีค่าดังสมการที่ ข.1.2.3

$$J = \sigma E \quad (\text{ข.1.2.3})$$

ดังนั้นจากสมการ (ข.1.2.1) และ (ข.1.2.2) จะได้

$$\nabla \times H = \epsilon \frac{\partial E}{\partial t} + \sigma E \quad (\text{ข.1.2.4})$$

หาเคิร์ลของสมการ (ข.1.2.1) จะได้

$$\nabla \times \nabla \times E = \mu \nabla \times \frac{\partial H}{\partial t} = -\mu \frac{\partial}{\partial t} \nabla \times H$$

แทนค่า $\nabla \times H$ จากสมการ (ข.1.2.4) จะได้

$$\nabla \times \nabla \times E = -\mu \epsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} - \mu \sigma \frac{\partial E}{\partial t}$$

แต่

$$\nabla \times \nabla \times E = \nabla(\nabla \cdot E) - \nabla^2 E$$

ดังนั้น

$$\nabla(\nabla \cdot E) - \nabla^2 E = -\mu \epsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} - \mu \sigma \frac{\partial E}{\partial t}$$

$$\nabla^2 E - \mu \epsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} - \mu \sigma \frac{\partial E}{\partial t} = \nabla(\nabla \cdot E) \quad (\text{ข.1.2.5})$$

สำหรับตัวกลางที่เป็นเนื้อเดียวกัน ϵ มีค่าคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในภาควิชาเรียนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ $\nabla \cdot D = \rho$ เนื่องจากประจุสุทธิของตัวนำอยู่ที่ผิว ภายในตัวนำไม่มีประจุ ρ จึงเท่ากับศูนย์ ดังนั้น

$$\nabla \cdot E = \frac{1}{\epsilon} \nabla \cdot D = \frac{1}{\epsilon} \nabla \cdot D = \frac{1}{\epsilon} \rho = 0$$

จากสมการ (ข.1.2.5) จะได้

$$\nabla^2 E - \mu\epsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} - \mu\sigma \frac{\partial E}{\partial t} = 0 \quad (\text{ข.1.2.6})$$

สมการ (ข.1.2.6) คือสมการคลื่นสำหรับ E ในทำนองเดียวกันสามารถหาสมการคลื่นสำหรับ H ได้โดยหาเกร็ดของสมการ (ข.1.2.4) จะได้

แทนค่า

$$\nabla \times \nabla \times H = \epsilon \times \frac{\partial}{\partial t} \nabla \times E + \sigma \nabla \times E$$

และ

$$\nabla \times \nabla \times H = \nabla(\nabla \cdot H) - \nabla^2 H$$

จะได้

$$\nabla \times E = -\mu \frac{\partial H}{\partial t}$$

แต่

$$\nabla(\nabla \cdot H) - \nabla^2 H = -\mu\epsilon \times \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} - \mu\sigma \frac{\partial H}{\partial t}$$

ดังนั้น

$$\nabla \cdot H = \frac{1}{\mu} \nabla \cdot B = 0$$

$$\nabla^2 H - \mu\epsilon \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} - \mu\sigma \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (\text{ข.1.2.7})$$

สมการ (ข.1.2.7) คือสมการคลื่นสำหรับ H

ข.1.3 สมการของแมกซ์เวลล์ที่แปรเปลี่ยนตามเวลา

ในการปฏิบัติแหล่งกำเนิดส่วนมากจะให้ความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้ารวมทั้งสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กแปรเปลี่ยนตามเวลาเป็นเส้นโค้งรูปไซน์ตัวอย่างเช่น

$$E = E_0 \cos \omega t = E_0 \cos 2\pi f t$$

$$\text{หรือ } E = E_0 \sin \omega t = E_0 \sin 2\pi f t \quad (\text{ข.1.3.1})$$

เมื่อความถี่ของการแปรเปลี่ยนจากสมการ (ข.1.3.1) แสดงว่ามีแฟกเตอร์ (factor) ของเวลาที่เป็นเส้นโค้งรูปไซน์ปรากฏในทุกพจน์ในสมการใดๆ เมื่อกำหนดให้

$E(r, t)$ เป็นสนามไฟฟ้าที่แปรเปลี่ยนตามเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่โดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้สนามไฟฟ้าที่แปรเปลี่ยนตามเวลาดังนี้

$$E(r,t) = \text{Re}[E(r)e^{j\omega t}] \quad (\text{ข.1.3.2})$$

เมื่อ $E(r)$ เป็นจำนวนเชิงซ้อน (complex number) ในทำนองเดียวกันจะได้รับการจัด
ไฟฟ้าความเข้มของสนามแม่เหล็กและสนามแม่เหล็กที่แปรเปลี่ยนตามเวลาดังนี้

$$D(r,t) = \text{Re}[D(r)e^{j\omega t}] \quad (\text{ข.1.3.3})$$

$$H(r,t) = \text{Re}[H(r)e^{j\omega t}] \quad (\text{ข.1.3.4})$$

$$B(r,t) = \text{Re}[B(r)e^{j\omega t}] \quad (\text{ข.1.3.5})$$

เมื่อ $D(r), H(r), B(r)$ เป็นจำนวนเชิงซ้อน
พิจารณาจากสมการของแมกซ์เวลล์เคิร์ลของสนามแม่เหล็ก เมื่อมีการแปรเปลี่ยนตามเวลา

$$\nabla \times H = \frac{\partial D}{\partial t} + J \quad (\text{ข.1.3.6})$$

แทนค่า $D(r,t)$ และ $H(r,t)$ จากสมการ (ข.1.3.3) และ (ข.1.3.4) ในสมการ (ข.1.3.6) จะได้

$$\begin{aligned} \nabla \times [\text{Re } H(r)e^{j\omega t}] &= \frac{\partial}{\partial t} [\text{Re } D(r)e^{j\omega t}] + \text{Re}[J(r)e^{j\omega t}] \\ \text{Re}[\nabla \times H(r)] &= \text{Re}[j\omega D(r) + J(r)] \end{aligned}$$

ถ้าความสัมพันธ์นี้เป็นจริงทุกค่าของ t จะได้

$$\nabla \times H = j\omega D + J \quad (\text{ข.1.3.7})$$

ในทำนองเดียวกัน จากสมการของแมกซ์เวลล์เคิร์ลของสนามไฟฟ้าที่แปรเปลี่ยนตามเวลาจะได้

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (\text{ข.1.3.8})$$

แทนค่า $E(r,t)$ และ $B(r,t)$ จากสมการ (ข.1.3.2) ในสมการ (ข.1.3.8) จะได้

$$\begin{aligned} \nabla \times [\text{Re } E(r)e^{j\omega t}] &= -\frac{\partial}{\partial t} [\text{Re } B(r)e^{j\omega t}] \\ \text{Re}[\nabla \times E(r)] &= -\text{Re}[j\omega B(r)] \\ \nabla \times E &= -j\omega B \end{aligned} \quad (\text{ข.1.3.9})$$

ดังนั้นสมการของแมกซ์เวลล์ที่แปรเปลี่ยนตามเวลาเป็นเส้นโค้งรูปชานันท์ จึงมีรูปแบบดังสมการ
ทั้งสี่ (ข.1.3.10) ข้างล่างโดยจัดในรูปแบบอนุพันธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 \nabla \cdot B &= 0 \\
 \nabla \times E &= -j\omega B \\
 \nabla \times H &= j\omega D + J
 \end{aligned}
 \tag{ข.1.3.10}$$

ข.1.4 การเดินทางของคลื่นในตัวกลางที่ไม่มีการสูญเสีย

สำหรับสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่แปรเปลี่ยนตามเวลาเป็นเส้นโค้งรูปไซน์ สมการคลื่นสำหรับสนามไฟฟ้าในตัวกลางที่ไม่มีการสูญเสียพลังงานมีรูปแบบดังนี้

$$\nabla^2 E = \mu\epsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}$$

แทนค่า $E(r,t) = \text{Re } E(r)e^{j\omega t}$ จะได้

$$\begin{aligned}
 \nabla^2 [\text{Re } E(r)e^{j\omega t}] &= \mu\epsilon \frac{\partial^2}{\partial t^2} [\text{Re } E(r)e^{j\omega t}] \\
 \text{Re } \nabla^2 E(r) &= \mu\epsilon \text{Re } (j\omega)^2 E(r) \\
 \nabla^2 E &= -\omega^2 \mu\epsilon E
 \end{aligned}
 \tag{ข.1.4.1}$$

เรียกสมการ (ข.1.4.1) ว่าสมการของเฮล์มโฮลทซ์ ดังนั้นในตัวกลางที่เป็นตัวนำถ้า สนามไฟฟ้าแปรเปลี่ยนตามเวลาสมการคลื่น (2.2.2.6) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \nabla^2 E + \omega^2 \mu\epsilon E - j\omega\mu\sigma E &= 0 \\
 \nabla^2 E + (\omega^2 \mu\epsilon - j\omega\mu\sigma)E &= 0
 \end{aligned}
 \tag{ข.1.4.2}$$

เมื่อ $\frac{\partial E}{\partial t} = j\omega E$ และ $\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = -\omega^2 E$

ในทำนองเดียวกัน สมการคลื่นสำหรับสนามแม่เหล็ก H (ข.1.4.7) สามารถเขียนได้ในรูปแบบเดียวกันดังนี้

$$\nabla^2 H + (\omega^2 \mu\epsilon - j\omega\mu\sigma)H = 0 \tag{ข.1.4.3}$$

ข.2 สมการความสัมพันธ์ระหว่างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและอุณหภูมิ

ความสัมพันธ์ระหว่างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า กับความร้อนที่ใช้ในวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์มี รูปแบบของสมการทางคณิตศาสตร์แบบเมตริกซ์ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (ข.2.1)

$$\begin{bmatrix} [C] & [0] \\ [0] & [0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{i\} \\ \{0\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_c] & [0] \\ [0] & [K_v] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{i\} \\ \{0\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{Q\} \\ \{I\} \end{Bmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น กรุณาอย่าให้นำไปใช้ประโยชน์ (ข.2.1) การค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{เมื่อ } \{Q\} = \{Q^{nd}\} + \{Q^g\} + \{Q^J\} + \{Q^c\}$$

และ

- [C] = เมตริกซ์ของความร้อนจำเพาะ
 {T} = เอลิเมนต์ของการนำความร้อน
 {T} = เวกเตอร์การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่โหนด โดยสัมพันธ์กับเวลา
 {V} = เวกเตอร์แรงดันที่โหนด
 [K_c] = เวกเตอร์อัตราการไหลของความร้อนที่โหนดนั้นๆ
 [K_v] = เวกเตอร์อัตราการเกิดความร้อนภายใน
 [K^m] = เวกเตอร์อัตราการเกิดความร้อนจากสมการ Joule heating
 {Q} = ความร้อนรวม
 {Qnd} = เวกเตอร์อัตราการไหลของความร้อนที่โหนดนั้นๆ
 {Q^g} = เวกเตอร์อัตราการเกิดความร้อนภายใน
 {Q^J} = เวกเตอร์การเกิดความร้อนจากสมการ Joule heating
 {Q^c} = เวกเตอร์การพาความร้อนที่ผิว
 {I} = โหลดเวกเตอร์อันเนื่องมาจากการไหลของกระแสที่โหนด

จากสมการที่ (ข.2.1) เป็นสมการที่มีการใช้ลักษณะการคำนวณของเมตริกซ์ที่มีความสัมพันธ์รูปแบบของอุณหภูมิ และกระแสไฟฟ้า ฟลักซ์แม่เหล็ก และค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิ ซึ่งจะถูกกำหนดด้วยการนำพาความร้อน Q, อุณหภูมิ T, ความร้อนจำเพาะ C, การนำพาความร้อน K และในส่วนของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับพลังงานทางไฟฟ้า จะถูกกำหนดด้วยแรงดัน V, กระแส I, ในสมการค่าของพารามิเตอร์ Q^J เวกเตอร์อัตราการเกิดความร้อนจากสมการ Joule heat ดังสมการที่ (ข.2.2)

$$Q^J = \text{Re} \left(\frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n [\rho] \{J_{ii}\} \cdot \{J_{ii}\}^* \right) \quad (\text{ข.2.2})$$

เมื่อ

- Q^J = Joule Heat ต่อหน่วยปริมาตร
 n = จำนวนเอลิเมนต์ที่อินทิเกรต
 Re = จำนวนจริงขององค์ประกอบ
 [ρ] = เมตริกซ์ของสภาพความต้านทาน
 {J_{ii}} = ความหนาแน่นของกระแสรวมในแต่ละเอลิเมนต์
 {J_{ii}}^{*} = คอนจูเกตของค่าความหนาแน่นของกระแสรวมในแต่ละเอลิเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อผู้อื่น และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายกุลชาติ เย็นฉ่ำ เกิดเมื่อวันที่ 2 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2526 ที่จังหวัดกำแพงเพชร สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ จากภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังในปีการศึกษา 2549 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ชีวการแพทย์ ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2550



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้