



มหาวิทยาลัยศรีปทุม

รายงานการวิจัย

เรื่อง

การศึกษาการกระจายความร้อนของการทำลายเซลล์มะเร็งย่านความถี่
ไมโครเวฟด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

A STUDY OF HEAT DISTRIBUTION FOR MICROWAVE
ABLATION USING FINITE ELEMENT

เพชร นันทิวัฒนา

มหาวิทยาลัยศรีปทุม
SRIPATUM UNIVERSITY

งานวิจัยนี้ ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยศรีปทุม

ปีการศึกษา 2551

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยศรีปทุมอย่างสูงที่ได้ให้การสนับสนุนงบประมาณทั้งหมดและได้ให้เวลาในการทำโครงการวิจัยนี้ รวมทั้งขอขอบคุณสำนักวิจัยที่ได้อำนวยความสะดวกและประสานงานอย่างดีเยี่ยมในการดำเนินโครงการวิจัยนี้ และขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพันธ์ ตั้งจิตกุศลมั่น ผู้ทรงคุณวุฒิที่ปรึกษางานวิจัย ที่ได้สละเวลาให้คำแนะนำในการแก้ไขปรับปรุงตลอดการดำเนินงานและการเขียนรายงานวิจัยนี้

Acknowledgements

The author highly acknowledges Sripatum University for fully support of this research. Thanks are also expressed to his colleagues in the Bureau of Research for their kind and crucial co-operations. The author also wishes to express his profound and sincere thanks to Assistant Professor Dr. Supan Tungjitkusolmun, advisor of the research, for his valuable guidance and timely suggestions throughout the process of the research.

มหาวิทยาลัยศรีปทุม
SRIPATUM UNIVERSITY

หัวข้อวิจัย : การศึกษาการกระจายความร้อนของการทำลายเซลล์มะเร็งย่านความถี่ไมโครเวฟ
ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ผู้วิจัย : นายเพชร นันทิวัฒนา

หน่วยงาน : ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

ปีที่พิมพ์ : พ.ศ. 2553

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้นำเสนอการศึกษาการกระจายความร้อนของการทำลายเซลล์มะเร็งย่านความถี่ไมโครเวฟด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่ความถี่ 2.45 GHz ผ่านสายอากาศที่นำมาทดลอง 4 แบบ ประกอบด้วย สายอากาศแบบปลายเปิด สายอากาศแบบปลายเป็นฉนวน สายอากาศแบบปลายเป็นโลหะ และสายอากาศแบบเปิดช่อง โดยทำการศึกษาผลของการกระจายความร้อนเนื่องจากการปรับกำลังส่งที่ 50W, 100W และ 150W และระยะเวลาที่ 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 วินาที ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าหากมีการเพิ่มกำลังส่งหรือเพิ่มระยะเวลาจะทำให้เพิ่มปริมาณในการทำลายเซลล์ที่เป็นสัดส่วนกัน โดยสายอากาศแบบปลายเปิดสามารถทำลายเซลล์ได้ปริมาณสูงสุด แต่มีการกระจายความร้อนกลับมาที่ด้ามจับสูงสุด สายอากาศแบบปลายเป็นโลหะและสายอากาศแบบปลายเป็นฉนวนมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับสายอากาศแบบปลายเปิด สายอากาศแบบเปิดช่องมีการกระจายความร้อนอย่างสม่ำเสมอและมีรูปร่างการทำลายเซลล์ที่สมมาตร แต่ให้ปริมาณในการทำลายเซลล์ต่ำที่สุด

คำสำคัญ :

Research Title : A Study of Heat Distribution for Microwave Ablation Using Finite Element

Name of Researcher : Mr. Petch Nantivatana

Name of Institution : Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,
Sripatum University

Year of Publication : B.E. 2553

ABSTRACT

This research presents three-dimensional finite element analyses of microwave ablation at frequency of 2.45 GHz. We studied the characteristics of various antennas for microwave ablation. Four configurations of antennas were considered: open-tip, dielectric-tip, metal-tip and slot. We analyzed the temperature distributions power at 50w, 100w and 150w and time at 30s, 60s, 90s, 120s, 150s and 180s. From the simulation results, the open-tip antenna had a largest volume but causes backward heating problem at higher power levels or during extended ablations. The metal-tip antenna and dielectric-tip antenna had similar the open-tip antenna. The slot antenna had uniform temperature distributions and symmetry shape but it had a smallest volume.

มหาวิทยาลัยศรีปทุม
SRIPATUM UNIVERSITY

Keywords : Ablation, Microwave, Finite Element, Temperature Distribution

สารบัญ

บทที่	หน้า
1	บทนำ..... 1
1.1	ความสำคัญและที่มาของการวิจัย 1
1.2	วัตถุประสงค์ของการวิจัย 2
1.3	คำถามการวิจัย 2
1.4	สมมติฐานการวิจัย 3
1.5	ขอบเขตของการวิจัย 3
1.6	นิยามศัพท์เฉพาะ 3
2	วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง 4
2.1	ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับเรื่องที่วิจัย 4
2.2	ทฤษฎีที่รองรับ หรือกรอบความคิดทางทฤษฎี 5
2.2.1	สมการความร้อนในทางชีววิทยา (The Bio-heat Equation)..... 5
2.2.2	สมการการดูดซับความร้อน..... 6
2.2.3	การวิเคราะห์ทางด้านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า..... 6
2.2.3.1	สมการแมกซ์เวลล์ (Maxwell's Equations)..... 7
2.2.3.2	การเดินทางของคลื่นในตัวกลางที่เป็นเนื้อเยื่อ..... 7
2.2.4	ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method)..... 8
2.3	ผลการวิจัยที่เกี่ยวข้อง 10
2.4	สรุป 12
3	ระเบียบวิธีการวิจัย 13
3.1	รูปแบบการวิจัย หรือแบบแผนการวิจัย 13
3.2	ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง 13
3.3	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย 13
3.4	เครื่องมือการวิจัย 14
3.5	การรวบรวมข้อมูล 14
3.6	การวิเคราะห์ข้อมูล 15

บทที่	สารบัญ(ต่อ)	หน้า
4	ผลการวิเคราะห์ข้อมูล	20
4.1	การทดลองที่ 1 ผลของการกระจายความร้อนของสายอากาศ	20
4.1.1	การกระจายความร้อนของสายอากาศแบบปลายเปิด.....	20
4.1.2	การกระจายความร้อนของสายอากาศแบบปลายเป็นฉนวน.....	26
4.1.3	การกระจายความร้อนของสายอากาศแบบปลายเป็นโลหะ.....	32
4.1.4	การกระจายความร้อนของสายอากาศแบบช่องเปิด.....	38
4.2	การทดลองที่ 2 ผลของการแพร่กระจาย SAR ของสายอากาศ.....	44
4.2.1	การแพร่กระจาย SAR ของสายอากาศแบบปลายเปิด.....	44
4.2.2	การแพร่กระจาย SAR ของสายอากาศแบบปลายเป็นฉนวน.....	48
4.2.3	การแพร่กระจาย SAR ของสายอากาศแบบปลายเป็นโลหะ.....	52
4.2.4	การแพร่กระจาย SAR ของสายอากาศแบบเปิดช่อง.....	56
5	สรุปและข้อเสนอแนะ	61
	บรรณานุกรม	63
	ประวัติย่อผู้วิจัย	66

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	แสดงขนาดทางมิติของสายอากาศ..... 16
3.2	สรุปจำนวนเอลิเมนต์ของสายอากาศที่ใช้แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์..... 18
3.3	รายละเอียดของค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเนื้อเยื่อ..... 19
4.1	ผลการกระจายความร้อนของสายอากาศแบบปลายเปิดที่ 50 W..... 20
4.2	ผลการกระจายความร้อนของสายอากาศแบบปลายเปิดที่ 100 W..... 22
4.3	ผลการกระจายความร้อนของสายอากาศแบบปลายเปิดที่ 150 W..... 24
4.4	ผลการกระจายความร้อนของสายอากาศแบบปลายเป็นฉนวนที่ 50 W..... 26
4.5	ผลการกระจายความร้อนของสายอากาศแบบปลายเป็นฉนวนที่ 100 W..... 28
4.6	ผลการกระจายความร้อนของสายอากาศแบบปลายเป็นฉนวนที่ 150 W..... 29
4.7	ผลการกระจายความร้อนของสายอากาศแบบปลายเป็นโลหะที่ 50 W..... 32
4.8	ผลการกระจายความร้อนของสายอากาศแบบปลายเป็นโลหะที่ 100 W..... 33
4.9	ผลการกระจายความร้อนของสายอากาศแบบปลายเป็นโลหะที่ 150 W..... 35
4.10	ผลการกระจายความร้อนของสายอากาศแบบเปิดช่องที่ 50 W..... 38
4.11	ผลการกระจายความร้อนของสายอากาศแบบเปิดช่องที่ 100 W..... 39
4.12	ผลการกระจายความร้อนของสายอากาศแบบเปิดช่องที่ 150 W..... 41
4.13	แสดงปริมาตรของการทำลายเนื้อเยื่อที่อุณหภูมิสูงกว่า 50 องศาเซลเซียส..... 44
4.14	ผลการแพร่กระจาย SAR ของสายอากาศแบบปลายเปิด 50W..... 45
4.15	ผลการแพร่กระจาย SAR ของสายอากาศแบบปลายเปิด 100W..... 46
4.16	ผลการแพร่กระจาย SAR ของสายอากาศแบบปลายเปิด 150W..... 47
4.17	ผลการแพร่กระจาย SAR ของสายอากาศแบบปลายเป็นฉนวนที่ 50W..... 49
4.18	ผลการแพร่กระจาย SAR ของสายอากาศแบบปลายเป็นฉนวนที่ 100W..... 50
4.19	ผลการแพร่กระจาย SAR ของสายอากาศแบบปลายเป็นฉนวนที่ 150W..... 51
4.20	ผลการแพร่กระจาย SAR ของสายอากาศแบบปลายโลหะที่ 50W..... 53
4.21	ผลการแพร่กระจาย SAR ของสายอากาศแบบปลายโลหะที่ 100W..... 54
4.22	ผลการแพร่กระจาย SAR ของสายอากาศแบบปลายโลหะที่ 150W..... 55
4.23	ผลการแพร่กระจาย SAR ของสายอากาศแบบเปิดช่องที่ 50W..... 57
4.24	ผลการแพร่กระจาย SAR ของสายอากาศแบบเปิดช่องที่ 100W..... 58

ตารางที่	สารบัญตาราง(ต่อ)	หน้า
4.25	ผลการแพร่กระจาย SAR ของสายอากาศแบบเปิดช่องที่ 150W.....	59



มหาวิทยาลัยศรีปทุม
SRIPATUM UNIVERSITY

สารบัญภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
2.1 กราฟแสดงผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์มะเร็ง.....	4
2.2 แสดงแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ถูกแบ่งออกเป็นเอลิเมนต์และ โหนด.....	9
3.1 สายอากาศแบบปลายเปิด (Open tip: OT).....	14
3.2 สายอากาศแบบมีปลายฉนวน (Dielectric tip: DT).....	15
3.3 สายอากาศที่มีปลายเป็น โลหะ (Metal tip: MT).....	15
3.4 สายอากาศแบบเปิดช่อง (Slot).....	15
3.5 แสดงลำดับการวิเคราะห์ปัญหาด้วยโปรแกรม Comsol Multiphysics.....	17
3.6 แบบจำลองสายอากาศทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่แบ่งเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ.....	18
4.1 แสดงค่าของแถบสีเทียบกับอุณหภูมิของตาราง 4.1 – ตาราง 4.9.....	21
4.2 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความร้อนของสายอากาศแบบปลายเปิดที่ 50 W.....	22
4.3 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความร้อนของสายอากาศแบบปลายเปิดที่ 100 W.....	23
4.4 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความร้อนของสายอากาศแบบปลายเปิดที่ 150 W.....	25
4.5 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความร้อนของสายอากาศแบบปลายเปิดที่เวลา 30 วินาที.....	25
4.6 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความร้อนของสายอากาศแบบปลายเป็นฉนวนที่ 50 W.....	27
4.7 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความร้อนของสายอากาศแบบปลายเป็นฉนวนที่ 100W.....	29
4.8 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความร้อนของสายอากาศแบบปลายเป็นฉนวนที่ 150W.....	31
4.9 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความร้อนของสายอากาศแบบปลายเป็นฉนวนที่เวลา 30 วินาที.....	31
4.10 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความร้อนของสายอากาศแบบปลายเป็น โลหะที่ 50W.....	34
4.11 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความร้อนของสายอากาศแบบปลายเป็น โลหะที่ 100W.....	35

สารบัญภาพประกอบ(ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4.12 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความร้อนของสายอากาศแบบปลายเป็น โลหะที่ 150W.....	37
4.13 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความร้อนของสายอากาศแบบปลายเป็น โลหะที่เวลา 30 วินาที.....	37
4.14 แสดงค่าของแถบสีเทียบกับอุณหภูมิของตาราง 4.10 – ตาราง 4.12.....	38
4.15 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความร้อนของสายอากาศแบบเปิดช่องที่ 50W.....	40
4.16 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความร้อนของสายอากาศแบบเปิดช่องที่ 100W.....	41
4.17 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความร้อนของสายอากาศแบบเปิดช่องที่ 150W.....	42
4.18 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความร้อนของสายอากาศแบบเปิดช่องที่เวลา 30 วินาที....	43
4.19 แสดงค่าของแถบสีเทียบกับค่า SAR.....	48
4.20 แสดงค่า SAR ของสายอากาศแบบปลายเปิดที่กำลังส่งต่างๆ.....	48
4.21 แสดงค่า SAR ของสายอากาศแบบปลายเป็นฉนวนที่กำลังส่งต่างๆ.....	52
4.22 แสดงค่า SAR ของสายอากาศแบบปลายเป็น โลหะที่กำลังส่งต่างๆ.....	56
4.23 แสดงค่า SAR ของสายอากาศแบบเปิดช่องที่กำลังส่งต่างๆ.....	60

คำนำ

รายงานวิจัยนี้เป็นผลมาจากการสนับสนุนให้บุคลากรภายในมหาวิทยาลัยศรีปทุมได้มีโอกาสผลิตผลงานวิจัยที่มีคุณภาพและเผยแพร่ออกสู่ภายนอก โดยให้อาจารย์เสนอโครงการที่สำนักวิจัยซึ่งมีทั้งการวิจัยวิชาการและการวิจัยสถาบัน ทั้งนี้เพื่อให้คณาจารย์ได้พัฒนาความรู้และประสบการณ์ทางวิชาการอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ยังเป็นแนวทางในการขอรับทุนอุดหนุนงานวิจัยจากหน่วยงานภายนอกและนำไปสู่การขยายกรอบความร่วมมือทางวิชาการกับหน่วยงานภายนอกต่อไป

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยวิชาการเพื่อนำวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์มาศึกษารูปแบบการกระจายความร้อนที่จะเกิดขึ้นในเนื้อเยื่อตับที่เป็นมะเร็ง เมื่อส่งคลื่นไมโครเวฟที่มีความถี่ 2.45 GHz ผ่านสายอากาศแต่ละแบบ 4 แบบ ประกอบด้วย สายอากาศแบบปลายเปิด สายอากาศแบบปลายเป็นฉนวน สายอากาศแบบปลายเป็นโลหะ และสายอากาศแบบเปิดช่อง โดยศึกษาผลของการปรับกำลังส่งที่ 50W, 100W และ 150W และระยะเวลาที่ 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 วินาที เพื่อใช้ประกอบการตัดสินใจในการรักษาของแพทย์

ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่ารายงานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ในการพัฒนางานวิชาการในด้านระบบไฟฟ้ากำลังต่อไป และหากมีข้อผิดพลาดประการใดผู้วิจัยต้องขออภัยไว้ ณ ที่นี้ด้วย และยินดีน้อมรับคำแนะนำเพื่อปรับปรุงแก้ไขต่อไป

นายเพชร นันทิวัดนา

ผู้วิจัย

กุมภาพันธ์ 2553

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย

ในปัจจุบันอัตราของผู้ป่วยมะเร็งตับที่เกิดขึ้นมีจำนวนมาก วิธีการรักษามะเร็งสามารถกระทำได้หลายวิธีเช่น

1. Alcohol Ablation เป็นการฉีดแอลกอฮอล์ ร่วมกับความร้อนเข้าไปทำลายเซลล์มะเร็ง ซึ่งจะทำให้แอลกอฮอล์ร่วมกับเลือดเกิดเป็นลิ่มเลือด ส่งผลให้แพทย์ไม่สามารถทราบตำแหน่งเซลล์มะเร็งที่แน่นอนขณะทำการรักษา

2. Chemoemtherapy เป็นเพียงการยับยั้งเซลล์มะเร็งเท่านั้น ไม่สามารถทำลายเซลล์มะเร็งได้

3. LiTT (Laser-induced thermotherapy) วิธีการนี้แพทย์ต้องมีความเชี่ยวชาญเป็นอย่างยิ่ง และใช้ต้นทุนในการรักษาสูง

4. Cryo Surgery เป็นการใช้ความเย็นในการรักษา และต้องมีการผ่าตัดร่วมด้วย ทำให้เกิดอัตราการติดเชื้อสูง

5. RFA (Radio Frequency Ablation) ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ในการรักษาโรคมะเร็ง โดยเรียกวิธีนี้ว่า HiTT (High frequency induced thermotherapy) ซึ่งเป็นการเหนี่ยวนำไฟฟ้ากระแสสลับทำให้เกิดความถี่สูงถึง 375 – 500 kHz และให้กำลังสูงสุด 60 วัตต์ โดยการรักษากระทำผ่านทางผิวหนังและใช้เข็มเป็นตัวเจาะเข้าไปยังเซลล์มะเร็ง ส่วนปลายเข็มจะเกิดความร้อน (D. Haemmerich et al., 2001) โดยจะมีน้ำเกลือเป็นตัวนำความร้อนจากปลายเข็มแผ่กระจายทำลายมะเร็งได้ดีขึ้น ส่วนพลังงานที่ใช้จะต้องขึ้นกับขนาดมะเร็งและคุณสมบัติของแพทย์ผู้ทำการรักษา สามารถรักษามะเร็งได้ในระยะที่ 1 จนถึงระยะที่ 3 ซึ่งถือได้ว่าเป็นระยะที่ค่อนข้างรุนแรงแล้ว การกระทำดังกล่าวจะต้องทำภายใต้เครื่องอัลตราซาวด์เพื่อจะดูตำแหน่งของเซลล์มะเร็งตลอดเวลาที่ทำการรักษา การใช้คลื่นความถี่วิทยุถึงแม้ดูเหมือนจะประสบความสำเร็จในการรักษา แต่ก็ยังมีข้อจำกัดในด้านของขนาดเซลล์มะเร็งที่จะถูกทำลาย คือก้อนมะเร็งที่มีขนาดใหญ่จะไม่สามารถรักษาด้วยวิธีนี้ได้ เนื่องจากเมื่อเนื้อเยื่อตับมีอุณหภูมิสูงกว่า 90 องศาเซลเซียส จะทำให้ตับมีความต้านทานสูงมาก จนสนามไฟฟ้าไม่สามารถแพร่ออกไปในเนื้อเยื่อตับได้ ขนาดของเซลล์มะเร็งที่ถูกทำลายจึงมีขนาดค่อนข้างเล็ก และไม่สามารถกำหนดรูปแบบการกระจายความร้อนในก้อนมะเร็งที่จะทำลายได้

6. ไมโครเวฟ เป็นการแผ่รังสีความร้อน ในปัจจุบันยังไม่เป็นที่พอใจเท่าไหร่นักเพราะการทำลายเซลล์มะเร็งไม่สมบูรณ์เท่าที่ควร การทำลายเซลล์มะเร็งด้วยคลื่นไมโครเวฟนั้นทำได้โดยการ

ส่งคลื่นไมโครเวฟผ่านสายอากาศที่เสียบอยู่ในเซลล์เนื้อเยื่อที่เป็นมะเร็ง ซึ่งเมื่อส่งคลื่นไมโครเวฟผ่านสายอากาศ ทำให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีการกระจายออกไปยังเนื้อเยื่อที่เป็นมะเร็ง ก็ทำให้เนื้อเยื่อที่เป็นมะเร็งมีการดูดซับพลังงาน ซึ่งทำให้เกิดความร้อนในเนื้อเยื่อมะเร็งอย่างรวดเร็ว เมื่อความร้อนที่เกิดขึ้นในเนื้อเยื่อที่เป็นมะเร็งสูง 50 องศาเซลเซียส ก็จะทำให้เนื้อเยื่อมะเร็งนั้นตายหรือฝ่อ (A.S. Wright et al., 2003)

สำหรับประเทศไทย คลื่นไมโครเวฟยังไม่มีการใช้จริงยังเป็นลักษณะงานวิจัยมากกว่า การทำลายเซลล์มะเร็งด้วยความถี่ไมโครเวฟในต่างประเทศ ส่วนใหญ่จะเป็นการวิจัยในลักษณะทดลองกับเนื้อเยื่อจริง แล้วทำการวัดการดูดซับความร้อนในเนื้อเยื่อ ซึ่งผลการทดลองที่ได้ จะไม่สามารถมองเห็นลักษณะคุณสมบัติบางประการ ที่เกิดขึ้นภายในเนื้อเยื่อ แต่จะเห็นลักษณะของขอบเขตที่ถูกทำลายแล้วหลังการทดลอง ซึ่งลักษณะบางประการที่ไม่สามารถมองเห็นได้ เช่น คุณสมบัติการกระจายตัวของสนามแม่เหล็ก สนามไฟฟ้า รูปแบบการกระจายตัวของอุณหภูมิ ลักษณะของการเกิดรอยแผล อุณหภูมิที่จุดต่างๆในเนื้อเยื่อ ซึ่งคุณสมบัติที่สำคัญต่างๆนี้ สามารถที่จะเห็นได้จากการใช้แบบจำลองบนเครื่องคอมพิวเตอร์

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์มาศึกษา รูปแบบการกระจายความร้อนที่จะเกิดขึ้นในเนื้อเยื่อตับที่เป็นมะเร็งเมื่อส่งคลื่นไมโครเวฟที่ความถี่ 2.45 GHz ผ่านสายอากาศแต่ละแบบ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

วัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้คือ

1. เพื่อศึกษาการนำวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาการกระจายความร้อนในเนื้อเยื่อ
2. เพื่อศึกษาผลของสนามแม่เหล็ก และสนามไฟฟ้าที่มีผลต่อการกระจายความร้อน
3. เพื่อเปรียบเทียบลักษณะการกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นในเนื้อเยื่อตับที่เป็นมะเร็งของสายอากาศแต่ละแบบ

1.3 คำถามการวิจัย

เมื่อคลื่นความถี่ไมโครเวฟจากสายอากาศ ผ่านเนื้อเยื่อและเซลล์มะเร็ง จะมีลักษณะการแพร่กระจายของสนามแม่เหล็ก สนามไฟฟ้า และความร้อนอย่างไร

1.4 สมมุติฐานการวิจัย

การศึกษาการทำลายก้อนมะเร็งในเนื้อเยื่อตับที่ผ่านมาได้มีการศึกษาการกระจายความร้อนเมื่อส่งคลื่นความถี่วิทยุเข้าไปทำลายก้อนมะเร็งซึ่งผลที่ได้ก็แสดงให้เห็นข้อจำกัดทางด้านขนาดของก้อนมะเร็งที่ถูกทำลาย และการกำหนดรูปแบบของการกระจายความร้อน ดังนั้นจึงได้มีนำเสนอการศึกษารูปแบบการกระจายความร้อนเมื่อส่งคลื่นความถี่ไมโครเวฟแทนคลื่นความถี่วิทยุ โดยนำวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้ในการแก้ไขปัญหาทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองบนเครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์จะเป็นการแก้ไขปัญหาโดยการสร้างแบบจำลองขึ้น และแบบจำลองจะมีคุณลักษณะเสมือนเนื้อเยื่อตับ โดยอาศัยการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ลงในแบบจำลอง พารามิเตอร์จะถูกนำมาใช้ในสมการทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้ในการคำนวณ

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

ขอบเขตของงานวิจัยจะเป็นการใช้วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อศึกษาวิเคราะห์รูปแบบการกระจายตัวของสนามแม่เหล็ก สนามไฟฟ้า และการกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นในเนื้อเยื่อตับที่เป็นมะเร็ง เมื่อส่งคลื่นไมโครเวฟที่ความถี่ 2.45 GHz ผ่านสายอากาศแต่ละประเภทประกอบด้วย

- สายอากาศแบบปลายเปิด (Open tip)
- สายอากาศแบบปลายเป็นฉนวน (Dielectric tip)
- สายอากาศแบบปลายเป็นโลหะ (Metal tip)
- สายอากาศแบบเปิดช่อง (Slot)

1.6 นิยามศัพท์เฉพาะ

Finite Element

วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขสำหรับแก้สมการเชิงอนุพันธ์

Antenna

สายอากาศ

Ablation

การทำลายเซลล์

Electromagnetic field

สนามแม่เหล็กไฟฟ้า

Radio frequency

คลื่นความถี่วิทยุ

Microwave

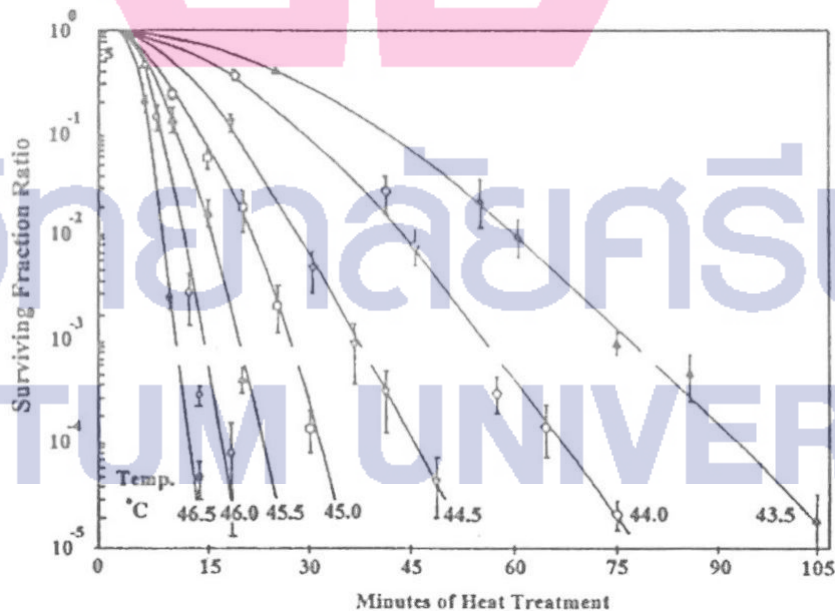
คลื่นความถี่ไมโครเวฟ

บทที่ 2

วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับเรื่องที่เกี่ยวข้อง

การใช้ความร้อนในการรักษาโรคมะเร็ง เป็นการรักษาที่ทำให้อุณหภูมิ ณ บริเวณนั้นสูงขึ้น อยู่ในช่วง 41 – 46 องศาเซลเซียส (A.W. Guy, 1984), (G.M. Hahn, 1984) เซลล์ที่อยู่ในบริเวณนั้นๆ จะได้รับผลกระทบ และมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับอุณหภูมิ การใช้ความร้อนในการรักษาโรคมะเร็ง ได้มีการพัฒนาเทคนิคที่เรียกว่า Hyperthermal cancer therapy ซึ่งมีการเริ่มใช้มาตั้งแต่ปี ค.ศ.1960 โดยการรักษาโรคมะเร็งโดยใช้ความร้อน เป็นรูปแบบการรักษาโรคมะเร็งแบบใหม่ ซึ่งมีพื้นฐาน และหลักการทางชีววิทยาที่สามารถพิสูจน์ ทดลอง และสามารถอธิบายได้ ซึ่งในปัจจุบันการรักษาโรคมะเร็ง โดยใช้ความร้อนนี้สามารถรักษาโรคมะเร็งชนิดต่างๆ ได้ทั่วร่างกาย และได้ผลการรักษาที่น่าสนใจ การรักษาโรคมะเร็งด้วยความร้อน อาศัยหลักการให้ความร้อนกับเซลล์มะเร็งอยู่ในช่วง 41 – 46 องศาเซลเซียส และรักษาระดับของอุณหภูมิไว้ให้คงที่ พื้นฐานของปรากฏการณ์ทางชีววิทยาสำหรับการรักษาโรคมะเร็งด้วยความร้อน จะมีอยู่สองปริมาณที่มีความสำคัญในการรักษา คือ อุณหภูมิ และเวลาในการให้ความร้อน



ภาพประกอบ 2.1 กราฟแสดงผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์มะเร็ง

ซึ่งตามภาพประกอบ 2.1 จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลา ที่ส่งผลต่อปริมาณเซลล์มะเร็งที่ตายจากการให้ความร้อน เมื่อให้อุณหภูมิสูงแก่เซลล์มะเร็งในช่วงเวลาเริ่มต้น เซลล์มะเร็งจะสูญเสียเป็นจำนวนมาก แต่เมื่อมีการลดอุณหภูมิที่ให้แก่เซลล์มะเร็งผลกระทบที่เกิดขึ้นคือ ต้องใช้เวลามากขึ้นเพื่อทำให้เซลล์มะเร็งตาย ในการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น แก่เซลล์จำนวนเซลล์จะเกิดการสูญเสียมาก และจะทำให้เซลล์ปกติที่อยู่รอบๆ เซลล์มะเร็งได้รับความเสียหายได้เช่นกัน ดังนั้นในการเพิ่มอุณหภูมิให้เหมาะสมนั้น สามารถทำลายเซลล์มะเร็งได้จำนวนมาก และไม่เป็นอันตรายแก่เซลล์ปกติ

2.2 ทฤษฎีที่รองรับ หรือกรอบความคิดทางทฤษฎี

2.2.1 สมการความร้อนในทางชีววิทยา (The Bio-heat Equation)

ในการวิเคราะห์ด้วยความถี่ไมโครเวฟได้พิจารณาถึงสนามไฟฟ้า สนามแม่เหล็ก และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในเนื้อเยื่อ การดูดซับความร้อนที่เกิดขึ้นในเนื้อเยื่อ ซึ่งมีรูปแบบของสมการ หรือตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลต่อการกระจายความร้อน (M.G. Skinner et al., 1998), (H.H. Pennes, 1948) แสดงดังสมการที่ (2.1)

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k \cdot \nabla T) - h_b c_b \omega_b (T_b - T) + Q_m + Q_{ext} \quad (2.1)$$

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

ρ = ความหนาแน่นจำเพาะของเนื้อเยื่อ (kg/m³)

c = ค่าความจุความร้อนจำเพาะของเนื้อเยื่อ (J/kg.K)

k = ค่าความนำความร้อนของเนื้อเยื่อ (W/m.K)

h_b = สัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากเลือดที่ไหลซึมอยู่ในเนื้อเยื่อ

ρ = ความหนาแน่นเลือด (kg/m³)

c_b = ค่าความร้อนจำเพาะของเลือด (J/kg.K)

ω_b = อัตราไหลเลือด (1/s)

T_b = ค่าอุณหภูมิเลือด (37 °C)

Q_m = ค่าความร้อนจากกระบวนการเมตาโบลิซึมของเม็ดเลือด (W/m³)

Q_{ext} = ค่าความร้อนจากภายนอก (W/m³)

จากสมการ Bioheat (2.1) ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ ได้ละทิ้งค่าตัวแปรจำนวน 2 ตัว คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากเลือดที่ไหลซึมอยู่ในเนื้อเยื่อ (h_p) และพลังงานที่สร้างขึ้นโดยกระบวนการเมตาโบลิซึมของเม็ดเลือด (Q_m) ซึ่งค่าตัวแปรทั้ง 2 นี้ จะถือว่ามีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับปริมาณ Q_{ext}

2.2.2 สมการการดูดซับความร้อน

พิจารณาจาก สนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก ที่มีการแพร่กระจายลงเนื้อเยื่อ จะเกิดการสูญเสียพลังงานในเนื้อเยื่อ (K. Saito et al., 2000) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.2)

$$SAR = \frac{1}{\rho} Q_{ext} = \frac{\sigma}{\rho} |E|^2 \quad (2.2)$$

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

2.2.3 การวิเคราะห์ทางด้านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

สนามแม่เหล็กไฟฟ้าในรูปทั่วไปแล้วจะเป็นคลื่นซึ่งเป็นสัญญาณที่มีฮาร์โมนิก (Time – Harmonic Field) หรืออีกนัยหนึ่งคือ เป็นสัญญาณที่มีคาบการแกว่งที่แน่นอน ซึ่งโดยทั่วไปแล้วมักจะแทนด้วยผลรวมของสัญญาณรูปไซน์ที่สามารถใช้ฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ เขียนได้ทั้งฟังก์ชันโคไซน์ ฟังก์ชันไซน์ หรือฟังก์ชันเอ็กโปเนนเชียลเชิงซ้อน ถ้าพิจารณาสนามแม่เหล็ก

ไฟฟ้าเป็นสัญญาณโคไซน์ก็จะได้ $\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = j\omega \vec{E}$ ในกรณีที่สนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นสัญญาณรูปซายนั่น สามารถวิเคราะห์ผลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีต่อตัวกลางได้ง่ายโดยพิจารณาการตอบสนองของช่วงเวลาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นสัญญาณชาน์คงตัว (Steady state) ซึ่งสามารถอนุมานอัตราการเปลี่ยนแปลงกับเวลา $\frac{\partial}{\partial t}$ คือ การเฉลี่ยด้วยค่า $j\omega$ ทำให้ได้สมการแมกซ์เวลล์

2.2.3.1 สมการแมกซ์เวลล์ (Maxwell's Equations)

$$\nabla \times \vec{H} = -j\omega\epsilon\vec{E} + \sigma\vec{E} \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (2.4)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.5)$$

$$\vec{D} = \epsilon\vec{E} \quad (2.6)$$

$$\vec{B} = \mu\vec{H} \quad (2.7)$$

เมื่อ

\vec{E}	=	สนามไฟฟ้า
\vec{D}	=	ฟลักซ์ของสนามไฟฟ้า
\vec{H}	=	ความเข้มสนามแม่เหล็ก
ρ	=	ความหนาแน่นของประจุเชิงปริมาตร
\vec{B}	=	สนามแม่เหล็ก
ϵ	=	ค่าความยินยอมทางไฟฟ้า
μ	=	ค่าความซึมซาบแม่เหล็ก

2.2.3.2 การเดินทางของคลื่นในตัวกลางที่เป็นเนื้อเยื่อ

เนื้อเยื่อจัดเป็นตัวกลางที่มีค่าคงที่ประจำตัวกลาง เป็นตัวกลางชนิดกึ่งไดอิเล็กทริกกึ่งตัวนำ จากสมการของเฮล์มโฮลทซ์ (Helmholtz) ในฟรีสเปซความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้าจะได้ดังสมการที่ (2.8)

$$\nabla^2 \vec{E} + \omega^2 \mu \epsilon \vec{E} = 0 \quad (2.8)$$

ในกรณีที่ตัวกลางมีสภาพความนำไฟฟ้าจำกัดที่ค่าๆหนึ่ง เช่น คลื่นเดินทางผ่านตัวกลางที่เป็นเนื้อเยื่อจะให้ความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้าดังสมการที่ (2.9)

$$\nabla^2 \vec{E} + \omega^2 \mu \epsilon \left(1 + j \frac{\sigma}{\omega \epsilon}\right) \vec{E} = 0 \quad (2.9)$$

และสมการหาสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเมื่อให้คลื่นเดินทางในทิศทาง $+Z$

$$\vec{E} = E_0 e^{-j\gamma z} \quad (2.10)$$

เมื่อกำหนดให้ γ มีค่าดังสมการที่ (2.11)

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)} = \omega\sqrt{\mu\epsilon} \left(j\frac{\sigma}{\omega\epsilon} - 1 \right) \quad (2.11)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} \gamma &= \text{เป็นค่าคงที่ในการเดินทางของคลื่น} \\ \alpha &= \text{Re}(\gamma) \text{ สัมประสิทธิ์ในการลดทอนของคลื่น} \\ \beta &= \text{Im}(\gamma) \text{ ค่าคงที่ทางเฟส} \end{aligned}$$

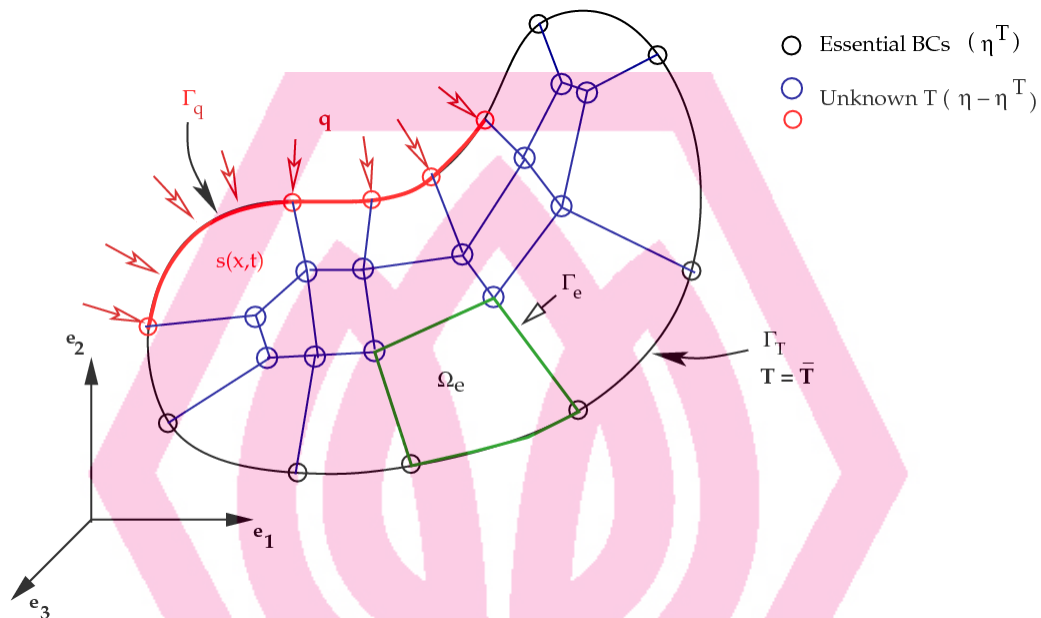
สามารถหาสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นได้ดังสมการที่ (2.12)

$$\vec{H} = \frac{\gamma}{j\omega\mu} (E_0 e^{-j\gamma z}) \quad (2.12)$$

2.2.4 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method)

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method : FEM) เป็นวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขชนิดหนึ่งสำหรับแก้สมการเชิงอนุพันธ์ ในการแก้ปัญหาหนึ่งๆด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์จะทำการแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นเนื้อที่หลายๆชิ้นที่เรียกว่าเอลิเมนต์ (Element) ซึ่งสามารถจำลองรูปแบบที่เที่ยงตรง ดังภาพประกอบ 2.2 ในการแก้ปัญหาใดปัญหาหนึ่ง ปัญหานั้นจะต้องประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมา การหาค่าผลเฉลยแม่นยำ (Exact solution) จะประกอบด้วยค่าต่างๆ เป็นจำนวนอนันต์ ซึ่งเราไม่สามารถหาค่าผลเฉลยได้ จึงต้องเปลี่ยนค่าทั้งหมดที่เป็นอนันต์ให้เป็นจำนวนที่นับได้ (Finite) ทำการแทนรูปร่างลักษณะของปัญหาด้วยเอลิเมนต์ที่มีขนาดต่างๆกัน หลักการทางไฟไนต์เอลิเมนต์จะเริ่มจากการพิจารณาเอลิเมนต์ที่ละเอียดเอลิเมนต์ ทำการสร้างสมการให้แก่แต่ละเอลิเมนต์ที่สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหานั้นๆ จากนั้นจึงนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นมาประกอบเข้าด้วยกัน รวมเป็นระบบสมการชุด

ใหญ่ จากนั้นทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต ที่ให้มาลงในสมการชุดใหญ่ แล้วจึงทำการแก้สมการ และจะเกิดผลเฉลยโดยประมาณที่ตำแหน่งต่างๆ ของปัญหานั้น



ภาพประกอบ 2.2 แสดงแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ถูกแบ่งออกเป็นเอลิเมนต์และโหนด

กระบวนการวิเคราะห์ปัญหาใดๆ โดยทั่วไปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จะประกอบไปด้วย 5 ขั้นตอนหลักๆ ดังนี้

1. การแบ่งโดเมนของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ กระบวนการขั้นตอนแรกนี้ โดยปกติใช้เวลามากในทางปฏิบัติ เพราะจำเป็นต้องสร้างรูปร่างของปัญหาอย่างถูกต้องขึ้นมาก่อน รูปร่างของปัญหาอาจประกอบด้วยส่วนเว้าส่วนโค้งที่มีความซับซ้อนในขั้นตอนนี้จึงจำเป็นอย่างมาก
2. การเลือกใช้ชนิดของเอลิเมนต์ เอลิเมนต์ย่อยที่แบ่งบนโดเมนของปัญหานั้นอาจเป็นเอลิเมนต์ในรูปแบบของสามเหลี่ยมหรือสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่าก็ได้ หากแบ่งออกเป็นเอลิเมนต์สามเหลี่ยม ตัวไม่รู้ค่าจะอยู่ที่มุมทั้งสามของสามเหลี่ยมนั้นซึ่งเรียกกันว่าจุดต่อ(Node) การเลือกใช้ชนิดเอลิเมนต์จะสอดคล้องกับลักษณะการกระจายของตัวไม่รู้ค่าที่สมมุติขึ้นบนเอลิเมนต์นั้นๆ เช่น หากเลือกใช้เอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบสามจุดต่อที่มุมทั้งสามแล้ว ลักษณะการกระจายของตัวไม่รู้ค่าบนเอลิเมนต์นั้นจะถูกสมมุติให้อยู่ในรูปแบบของแผ่นเรียบ เป็นต้น แต่หากเลือกใช้เอลิเมนต์แบบสี่เหลี่ยมแบบสี่จุดต่อที่มุมทั้งสี่ ลักษณะการกระจายของตัวไม่รู้ค่าบนเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมนี้อาจไม่เรียบแต่โค้งไปโค้งมาได้ ดังนั้นการเลือกใช้เอลิเมนต์ชนิดต่างๆกันจึงมีผลโดยตรงกับผลลัพธ์ที่จะคำนวณได้

3. การประดิษฐ์สมการไฟไนต์เอลิเมนต์ สมการเชิงอนุพันธ์ที่สอดคล้องกับปัญหาที่วิเคราะห์อยู่นั้นจะถูกเปลี่ยนไปเป็นสมการทางพีชคณิตที่เรียกกันว่า สมการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่จะถูกสร้างขึ้นสำหรับแต่ละเอลิเมนต์เนื่องจากเอลิเมนต์ต่างมีขนาดไม่เท่ากันกระบวนการประดิษฐ์สมการไฟไนต์จากสมการเชิงอนุพันธ์นี้นับเป็นหัวใจหลักของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพราะหากมีความเข้าใจในขั้นตอนนี้แล้วก็สามารถประยุกต์ใช้วิธีการทำนองเดียวกันนี้ในการแก้ปัญหาชนิดอื่นๆได้

4. การรวมสมการไฟไนต์เอลิเมนต์เข้าด้วยกันแล้วแก้ระบบสมการใหญ่ สมการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่อยู่ในรูปแบบของสมการทางพีชคณิตซึ่งได้ประดิษฐ์ขึ้นสำหรับแต่ละเอลิเมนต์ในขั้นตอนนี้แล้วจำเป็นต้องนำมารวมกันอย่างถูกต้องและมีหลักการ การประกอบสมการไฟไนต์เอลิเมนต์แต่ละสมการเข้าด้วยกัน จะก่อให้เกิดระบบสมการขนาดใหญ่ จากนั้นจึงประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตของปัญหานั้นๆก่อนแก้ระบบสมการขนาดใหญ่ชุดนั้น เพื่อหาผลลัพธ์ที่จุดต่อ ซึ่งผลลัพธ์ที่จุดต่อเหล่านี้ อาจแทนค่าอุณหภูมิหากเป็นการวิเคราะห์ปัญหาด้านถ่ายเทความร้อน เป็นต้น

5. การคำนวณหาค่าอื่นๆที่เหลือ จากนั้นจึงเป็นการหาค่าอื่นๆที่ต้องการทราบเพื่อที่จะทำให้ปัญหานั้นได้รับการวิเคราะห์โดยสมบูรณ์ เช่นในการแก้ปัญหาด้านความร้อนเมื่อทราบอุณหภูมิตามตำแหน่งต่างๆ แล้วก็จะสามารถคำนวณหาปริมาณฟลักซ์ความร้อนที่ไหลผ่านได้

2.3 ผลการวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยทางการทำลายเซลล์มะเร็งโดยใช้คลื่นความถี่วิทยุและคลื่นความถี่ไมโครเวฟประกอบด้วย

งานวิจัยด้านสายอากาศหรือโพรบที่มีการออกแบบทดลองใช้มีลักษณะหลายรูปแบบเช่นสายอากาศแบบโมโนโพล สายอากาศแบบไดโพล สายอากาศแบบเปิดช่อง

(Labonte et al., 1996) ได้พิจารณาลักษณะต่างๆ ของสายอากาศแบบโมโนโพลหลายรูปแบบเพื่อส่งคลื่นไมโครเวฟเข้าไปทำลายเยื่อหุ้มหัวใจ สายอากาศแบบปลายเป็นโลหะจะใช้ได้ดีที่สุด

(L. Hamada et al., 2000) ได้ทดลองสายอากาศแบบไดโพลที่ความถี่ 915 MHz โดยมีความลึกของการสอดแทรกสายอากาศเข้าไปในเนื้อเยื่อจำลองที่แตกต่างกัน สายอากาศที่นำมาทดลองเป็นสายอากาศแบบไดโพลอย่างง่าย(Conventional antenna) และสายอากาศแบบไดโพลประยุกต์(New dipole antenna) สายอากาศแบบ Cap-Choke(Jame C. Lin et al., 1996) เป็นสายอากาศที่มีการนำมาจำลองทั้งที่ความถี่ 2.45 GHz และ 915 MHz(S. Pisa et al., 2001) สายอากาศแบบ Cap-Choke ทำให้เกิดการกระจายของความร้อนในเนื้อเยื่อได้ โดยไม่มีการสะท้อนกลับของกระแสในสายส่ง

นอกจากนี้ ผลของความร้อนก็ไม่ขึ้นกับความลึกที่สอดใส่สายอากาศลงไป เนื้อเยื่อ สามารถควบคุมตำแหน่งความร้อนซึ่งมันจะเกิดรอบๆ บริเวณปลายของสายอากาศนอกจากนี้ ยังมีผลการทดลองวางสายอากาศแบบคู่ซึ่งทำให้ขนาดของเซลล์มะเร็งที่ทำลายได้มีขนาดใหญ่ขึ้น

งานวิจัยทางด้านของการทดลองจำลองด้วยคอมพิวเตอร์เช่น การใช้วิธี Finite-Difference time-domain (FDTD), Antenna-Direction-Implicit Finite difference (ADI-FC) สำหรับการแก้สมการความร้อน (S. Pisa et al., 2003)

(Hurter et al., 1991) ได้ทำการออกแบบ และจำลองด้วยการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์กับสายอากาศแบบไดโพล โดยในการจำลองได้ปรับเปลี่ยนความลึกที่สอดใส่สายอากาศเข้าไปในเนื้อเยื่อซึ่งผลปรากฏว่าความลึกในการสอดใส่สายอากาศเข้าไปในเนื้อเยื่อ ซึ่งผลปรากฏว่าความลึกในการสอดใส่สายอากาศเข้าไปในเนื้อเยื่อมีผลต่อรูปแบบของแผลหรือการกระจายความร้อนที่เกิดขึ้น

นอกจากนี้เขายังบอกว่าสายอากาศจะมีการถ่ายทอดพลังงานสูงสุดเมื่อสายอากาศมีความยาว L ดังนี้ $L = \lambda_{eff} / 2$ และมีความยาวคลื่นดังสมการที่ (2.13)

$$\lambda_{eff} = \frac{c}{f \sqrt{\epsilon_{r,tissue}}} \quad (2.13)$$

เมื่อ

$\epsilon_{r,tissue}$ = ค่าความยินยอมทางไฟฟ้าของเนื้อเยื่อ

f = ความถี่ที่ใช้ในระบบ (Hz)

(G. Schaller et al., 1996) ได้พิจารณาสายอากาศแบบ Triaxial choke dipole ซึ่งสายอากาศแบบนี้สามารถทำให้เกิดการดูดซับความร้อน (SAR) ได้สูงกว่าสายอากาศแบบไดโพล และสายอากาศแบบเปิดช่อง (Slot antenna) SAR จะเกิดขึ้นสูงสุดที่ส่วนเปิดช่องของสายอากาศและความยาวของ Choke มีค่า $\lambda_{eff} / 4$ ความยาวของ Choke จะช่วยลดผลที่เกี่ยวกับความลึกที่สอดใส่สายอากาศเข้าไปในเนื้อเยื่อและความลึกในการกระจายค่า SAR

(Saito et al., 2001) ได้ทำการทดลองใช้สายอากาศแบบ Coaxial-fed slot สองอันมาทำการจำลองการทำลายเซลล์มะเร็งโดยใช้คลื่นไมโครเวฟที่ความถี่ 2.45 GHz ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองด้วยวิธี Tip-split ทำให้ขนาดเซลล์ที่ถูกทำลายมีขนาดใหญ่ขึ้น เพราะขนาดของเซลล์ที่ถูกทำลายเกิดจากกระแสที่ไหลจากสายอากาศทั้งสองอัน

2.4 สรุป

สำหรับประเทศไทย คลื่น ไมโครเวฟยังไม่มีการใช้จริงยังเป็นลักษณะงานวิจัยมากกว่า การทำลายเซลล์มะเร็งด้วยความถี่ไมโครเวฟในต่างประเทศ ส่วนใหญ่จะเป็นการวิจัยในลักษณะทดลองกับเนื้อเยื่อจริง แล้วทำการวัดการดูดซับความร้อนในเนื้อเยื่อ ซึ่งผลการทดลองที่ได้ จะไม่สามารถมองเห็นลักษณะคุณสมบัติบางประการ ที่เกิดขึ้นภายในเนื้อเยื่อ แต่จะเห็นลักษณะของขอบเขตที่ถูกทำลายแล้วหลังการทดลอง ซึ่งลักษณะบางประการที่ไม่สามารถมองเห็นได้ เช่น คุณสมบัติการกระจายตัวของสนามแม่เหล็ก สนามไฟฟ้า รูปแบบการกระจายตัวของอุณหภูมิ ลักษณะของการเกิดรอยแผล อุณหภูมิที่จุดต่างๆในเนื้อเยื่อ ซึ่งคุณสมบัติที่สำคัญต่างๆนี้ สามารถที่จะเห็นได้จากการใช้แบบจำลองบนเครื่องคอมพิวเตอร์

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์มาศึกษาการกระจายความร้อนที่จะเกิดขึ้นในเนื้อเยื่อตับที่เป็นมะเร็งเมื่อส่งคลื่น ไมโครเวฟที่ความถี่ 2.4 GHz ผ่านสายอากาศแต่ละแบบ

บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 รูปแบบการวิจัย หรือแบบแผนการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้นำวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์มาศึกษา รูปแบบการกระจายความร้อนที่จะเกิดขึ้นในเนื้อเยื่อตับที่เป็นมะเร็งเมื่อส่งคลื่นไมโครเวฟที่ความถี่ 2.45 GHz ผ่านสายอากาศแต่ละแบบประกอบด้วยสายอากาศ สายอากาศแบบปลายเปิด (Open tip) สายอากาศแบบปลายเป็นฉนวน (Dielectric tip) สายอากาศแบบปลายเป็นโลหะ (Metal tip) และสายอากาศแบบเปิดช่อง (Slot) ซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการประมวลผล เงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง การผสมเอลิเมนต์ และวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม Comsol Multiphysics

3.2 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

ในงานวิจัยนี้จะทำการวัดและทำการคำนวณหาผลการกระจายของสนามแม่เหล็ก การกระจายของสนามไฟฟ้า และการกระจายความร้อน ความร้อน และค่า SAR ที่ได้จากการป้อนสัญญาณความถี่ไมโครเวฟ ให้กับสายอากาศในรูปแบบต่างๆ จำนวน 4 แบบ ประกอบด้วย

- สายอากาศแบบปลายเปิด (Open tip)
- สายอากาศแบบปลายเป็นฉนวน (Dielectric tip)
- สายอากาศแบบปลายเป็นโลหะ (Metal tip)
- สายอากาศแบบเปิดช่อง (Slot)

3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.3.1 ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.3.2 ศึกษาการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์โดยใช้วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์

3.3.3 สร้างแบบจำลองของตับและเซลล์มะเร็ง

3.3.4 สร้างแบบจำลองของสายอากาศที่ใช้ในการวิจัยประกอบด้วย

- สายอากาศแบบปลายเปิด (Open tip)
- สายอากาศแบบปลายเป็นฉนวน (Dielectric tip)
- สายอากาศแบบปลายเป็นโลหะ (Metal tip)
- สายอากาศแบบเปิดช่อง (Slot)

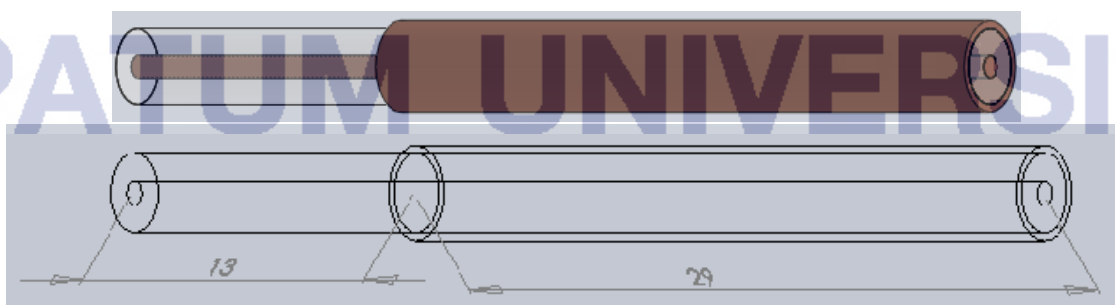
- 3.3.5 ทำการทดสอบและปรับปรุงแบบจำลองที่สร้างขึ้น
- 3.3.6 ทำการเก็บข้อมูลผลการทดลองการกระจายของสนามแม่เหล็ก
- 3.3.7 ทำการเก็บข้อมูลผลการทดลองการกระจายของสนามไฟฟ้า
- 3.3.8 ทำการเก็บข้อมูลผลการทดลองการกระจายความร้อน
- 3.3.9 ทำการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลอง
- 3.3.10 สรุปผล จัดทำรายงาน

3.4 เครื่องมือการวิจัย

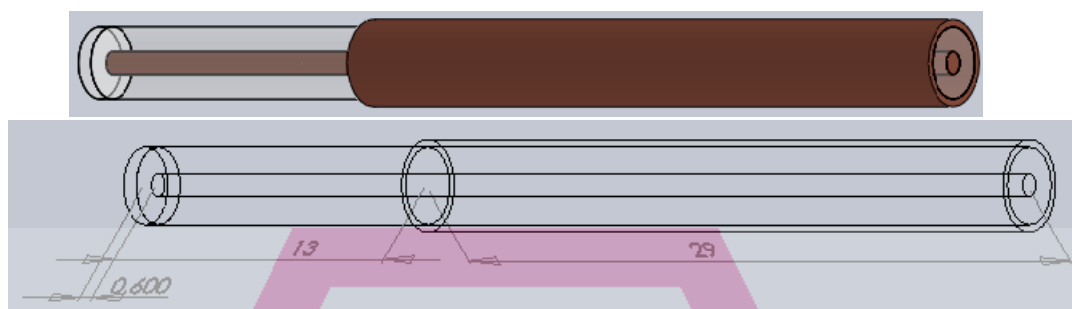
- 3.4.1 เครื่องคอมพิวเตอร์ประสิทธิภาพสูง
- 3.4.2 อุปกรณ์สำรองข้อมูล
- 3.4.3 โปรแกรมสำหรับการคำนวณไฟไนต์เอลิเมนต์ Comsol Multiphysics
- 3.4.4 เครื่องกำเนิดสัญญาณไมโครเวฟ

3.5 การรวบรวมข้อมูล

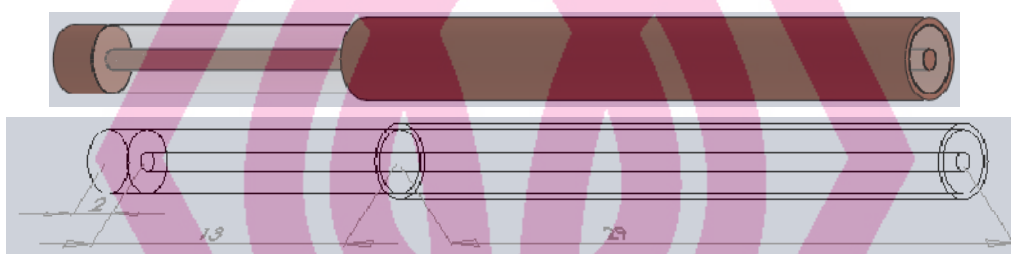
ในการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ได้วิเคราะห์โครงสร้างของสายอากาศแบบโมโนโพล โดยทั่วไป ซึ่งได้เปรียบเทียบกับรูปแบบทางเรขาคณิตของสายอากาศโมโนโพล ดังแสดงในภาพประกอบ 3.1 สายอากาศแบบปลายเปิด (Open tip) ซึ่งส่วนปลายของตัวนำจะสัมผัสกับเนื้อเยื่อโดยตรง ภาพประกอบ 3.2 สายอากาศแบบมีปลายฉนวน (Dielectric tip) ที่ปลายของสายอากาศจะถูกปิดอย่างสมบูรณ์ด้วยฉนวน ภาพประกอบ 3.3 สายอากาศที่มีปลายเป็นโลหะ (Metal tip) ซึ่งจะเพิ่มกระแสไฟฟ้าที่สัมผัสกับเซลล์หรือเนื้อเยื่อตับ และภาพประกอบ 3.4 สายอากาศแบบเปิดช่อง (Slot) ซึ่งจะทำให้การเปิดช่องรอบตัวนำนอกของสายอากาศ ในตาราง 3.1 แสดงขนาดทางมิติของสายอากาศ



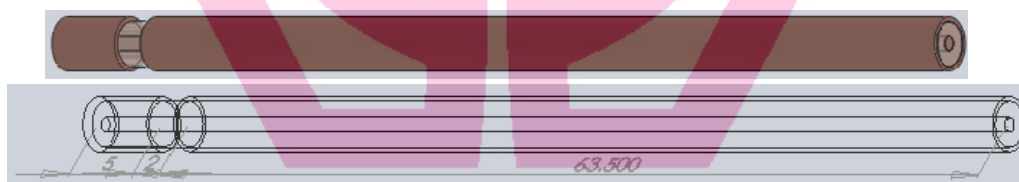
ภาพประกอบ 3.1 สายอากาศแบบปลายเปิด (Open tip: OT)



ภาพประกอบ 3.2 สายอากาศแบบมีปลายฉนวน (Dielectric tip: DT)



ภาพประกอบ 3.3 สายอากาศที่มีปลายเป็นโลหะ (Metal tip: MT)



ภาพประกอบ 3.4 สายอากาศแบบเปิดช่อง (Slot)

3.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

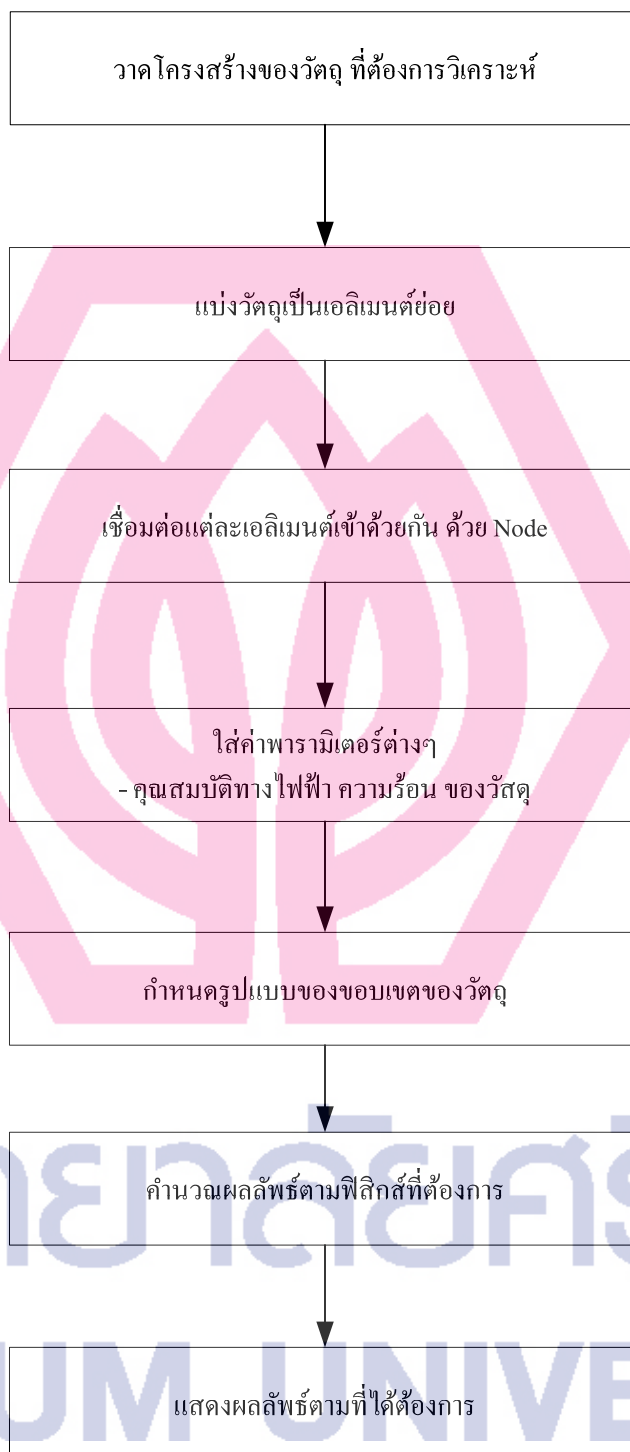
ในงานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลโดยจำลองการทำงานด้วยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ โดยใช้โปรแกรม Comsol Multiphysics version 3.4 บนระบบปฏิบัติการ 64 บิต Intel[®] Core[™] 2 Duo RAM DDR2 4 GB และ HD 200 GB ซึ่งมีขั้นตอนดังภาพประกอบ 3.5 โดยการจำลองการทำงานประกอบด้วย โมดูล 2 โมดูล ที่ใช้ในการจำลองการทำงาน คือ

- RF Module
- Heat Transfer (Bioheat Equation)

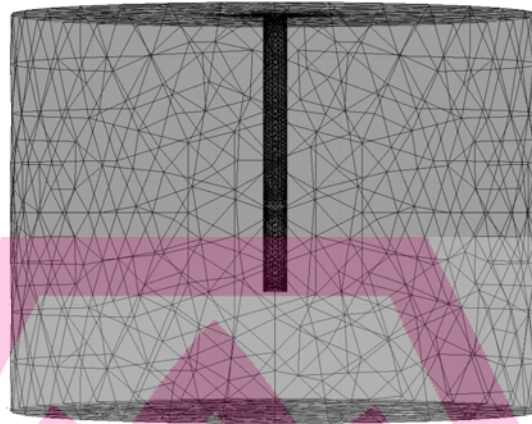
ในการคำนวณผลลัพธ์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์เมื่อนำไฟล์ที่สร้างรูปทรงจากโปรแกรม วาดรูปทรง 3 มิติ เป็นที่เรียบร้อยแล้ว เราจะใช้โปรแกรม Comsol Multiphysics ในการแบ่งชิ้นงานออกเป็นชิ้นย่อยๆ ที่เรียกว่า เอลิเมนต์ แสดงได้ดังภาพประกอบ 3.6

ตาราง 3.1 แสดงขนาดทางมิติของสายอากาศ

พารามิเตอร์	มิติของสายอากาศ (มิลลิเมตร)			
	สายอากาศ OT	สายอากาศ DT	สายอากาศ MT	สายอากาศ Slot
เส้นผ่านศูนย์กลางตัวนำใน	0.912	0.912	0.912	0.912
เส้นผ่านศูนย์กลางตัวนำนอก	3.581	3.581	3.581	3.581
เส้นผ่านศูนย์กลางไดอิเล็กทริก	2.985	2.985	2.985	2.985
ความยาวสล้อต	-	-	-	2
ความยาวของปลายเปิด	13	13	13	-
ความยาวของปลายฉนวน	-	0.6	-	-
ความยาวของปลายเป็นโลหะ	-	-	2	-
ความยาวของสายอากาศ	42	42.6	44	70



ภาพประกอบ 3.5 แสดงลำดับการวิเคราะห์ปัญหาด้วยโปรแกรม Comsol Multiphysics



ภาพประกอบ 3.6 แบบจำลองสายอากาศทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่แบ่งเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ

ในภาพประกอบ 3.6 แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบด้วย ชุดสายอากาศ และ เนื้อเชื้อ โดยสายอากาศจะแทงอยู่กึ่งกลางของเนื้อเชื้อรูปทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 เซนติเมตร และความสูง 8 เซนติเมตร

ส่วนของสายอากาศจะถูกแบ่งออกเป็นชั้นย่อยๆ ด้วยเอลิเมนต์ที่มีรูปแบบเป็นสามเหลี่ยม ขนาดของเอลิเมนต์สายอากาศที่ใช้มีขนาดอยู่ในช่วง 0.01-1 มิลลิเมตร ในส่วนของเอลิเมนต์ในเนื้อเชื้อตัวมีการกระจายของขนาดเอลิเมนต์ โดยบริเวณรอบๆ สายอากาศจะมีขนาดของเอลิเมนต์ที่เล็ก ส่วนบริเวณที่ห่างออกจากสายอากาศจะมีขนาดของเอลิเมนต์ที่ใหญ่ขึ้น เพื่อลดขนาดของหน่วยความจำของเครื่องในการจำลองการทำงาน ขนาดของเอลิเมนต์ของเนื้อเชื้อมีขนาดอยู่ในช่วง 0.1-1 มิลลิเมตร ในตาราง 3.2 แสดงจำนวนของเอลิเมนต์ของสายอากาศที่ทำการศึกษาและค่าของ Degree of freedom และค่าคงที่ต่างๆ ที่ใช้ในการจำลองการทำงาน รายละเอียดของพารามิเตอร์ของการคำนวณแสดงได้ดังตาราง 3.3

ตาราง 3.2 สรุปจำนวนเอลิเมนต์ของสายอากาศที่ใช้แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์

สายอากาศ	เอลิเมนต์	Degree of freedom
สายอากาศแบบปลายเปิด (Open tip)	47,198	327,680
สายอากาศแบบมีปลายฉนวน (Dielectric tip)	47,308	327,973
สายอากาศที่มีปลายเป็นโลหะ (Metal tip)	48,568	336,306
สายอากาศแบบเปิดช่อง (Slot)	70,752	471,427

ตาราง 3.3 รายละเอียดของค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเนื้อเยื่อตับ

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

บทที่ 4

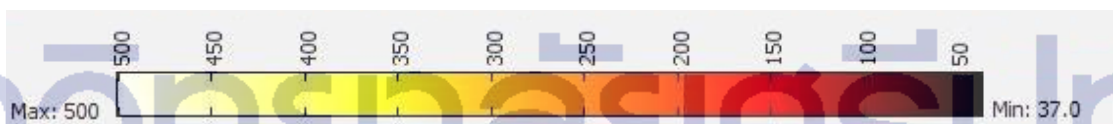
ผลการทดลองด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์

ในงานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลโดยจำลองการทำงานด้วยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ โดยใช้โปรแกรม Comsol Multiphysics บนระบบปฏิบัติการ 64 บิต โดยจำลองการทำงานประกอบด้วย โมดูล 2 โมดูล ที่ใช้ในการจำลองการทำงาน คือ RF Module และ Heat Transfer (Bioheat Equation) ซึ่งในการศึกษาจะพิจารณาผลของการกระจายความร้อนที่เนื้อเยื่อ และผลของค่า SAR ที่ได้จากการแพร่กระจายของสนามไฟฟ้า ของทำการกำหนดค่าพารามิเตอร์ทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ค่าคุณสมบัติของวัสดุ และค่าคุณสมบัติของเนื้อเยื่อ กำหนดเงื่อนไขขอบของการคำนวณ

4.1 การทดลองที่ 1 ผลของการกระจายความร้อนของสายอากาศ

4.1.1 การกระจายความร้อนของสายอากาศแบบปลายเปิด (Open tip)

สำหรับการวิเคราะห์การกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นในตัวของสายอากาศแบบปลายเปิด ได้ทำการส่งคลื่นไมโครเวฟที่ความถี่ 2.45 GHz เข้าไปในเนื้อเยื่อที่กำลังส่ง 50W, 100W และ 150W และใช้ระยะเวลา 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 วินาที ดังแสดงผลการทดลองในตาราง 4.1 – ตาราง 4.3

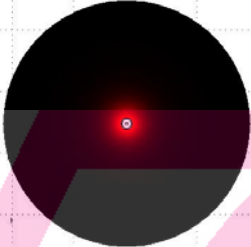
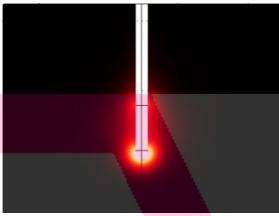
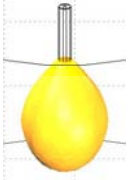
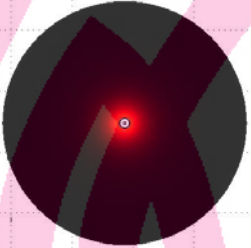
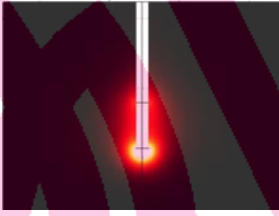
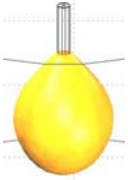
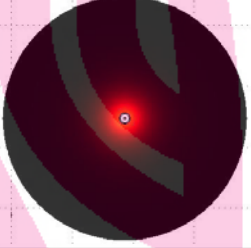
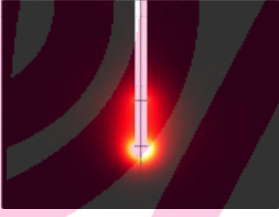
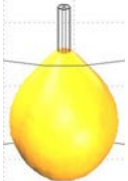
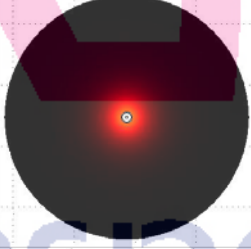
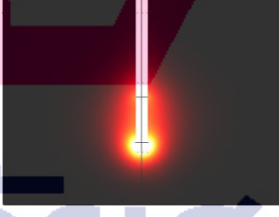

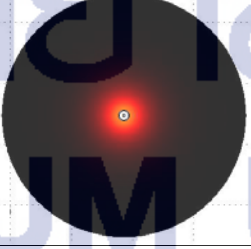
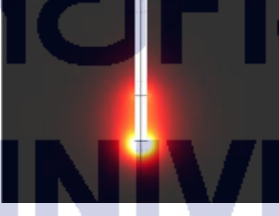



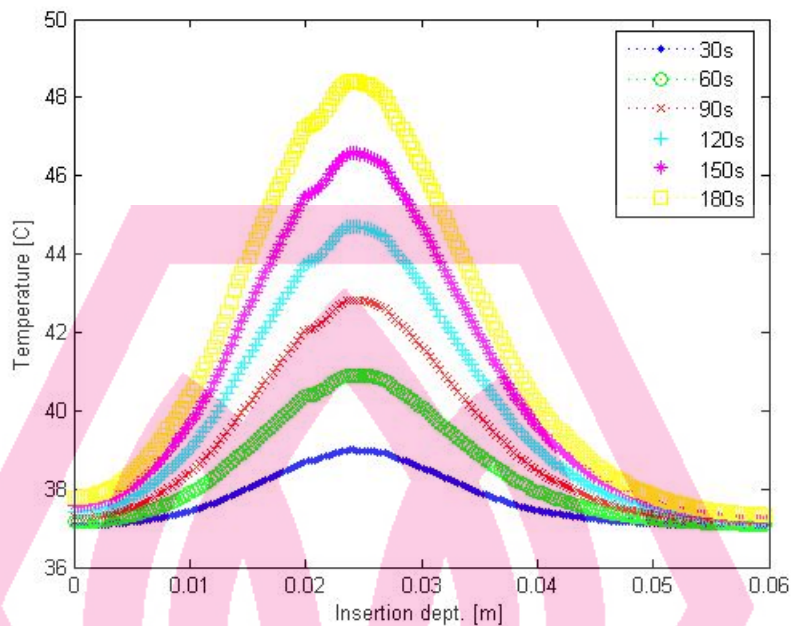
ภาพประกอบ 4.1 แสดงค่าของแถบสีเทียบกับอุณหภูมิของตาราง 4.1 – ตาราง 4.9

ตาราง 4.1 ผลการกระจายความร้อนของสายอากาศแบบปลายเปิดที่ 50 W

เวลา (วินาที)	ด้านบน	ด้านข้าง	3 มิติ
30			

ตาราง 4.1(ต่อ) ผลการกระจายความร้อนของสายอากาศแบบปลายเปิดที่ 50 W

เวลา (วินาที)	ด้านบน	ด้านข้าง	3 มิติ
60			
90			
120			
150			
180			



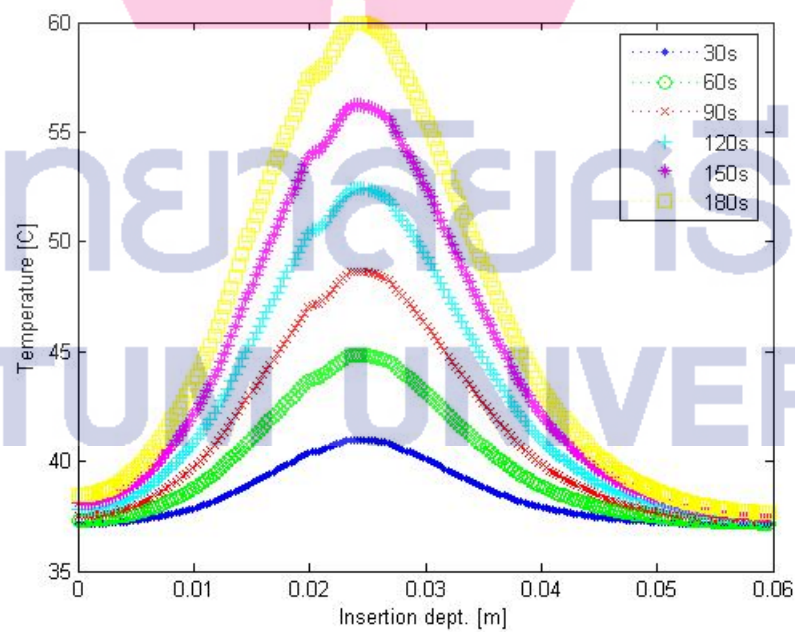
ภาพประกอบ 4.2 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความร้อนของสายอากาศแบบปลายเปิดที่ 50 W

ตาราง 4.2 ผลการกระจายความร้อนของสายอากาศแบบปลายเปิดที่ 100 W

เวลา (วินาที)	ด้านบน	ด้านข้าง	3 มิติ
30			
60			
90			


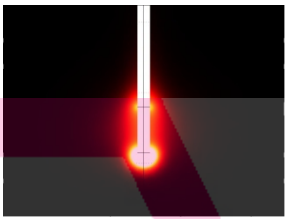
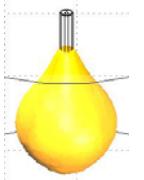

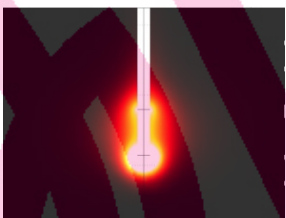
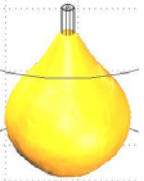

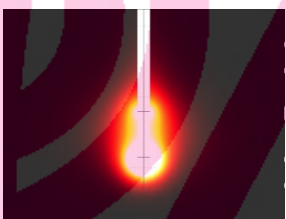
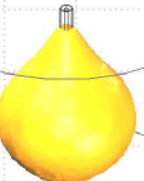

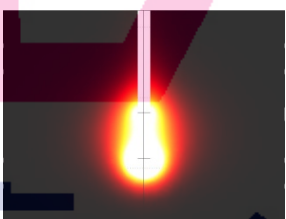


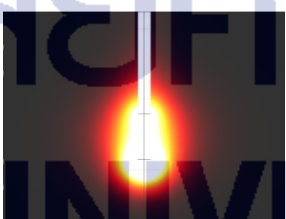
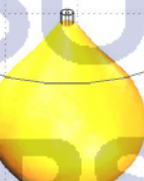
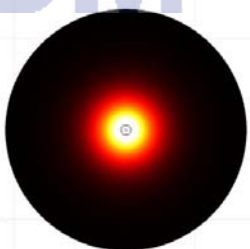
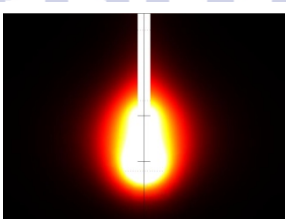

ตาราง 4.2(ต่อ) ผลการกระจายความร้อนของสายอากาศแบบปลายเปิดที่ 100 W

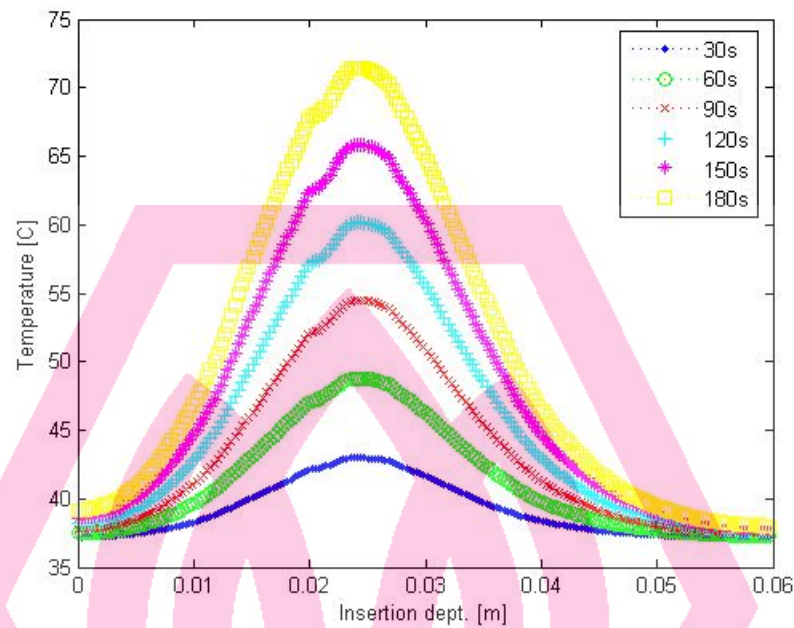
เวลา (วินาที)	ด้านบน	ด้านข้าง	3 มิติ
120			
150			
180			



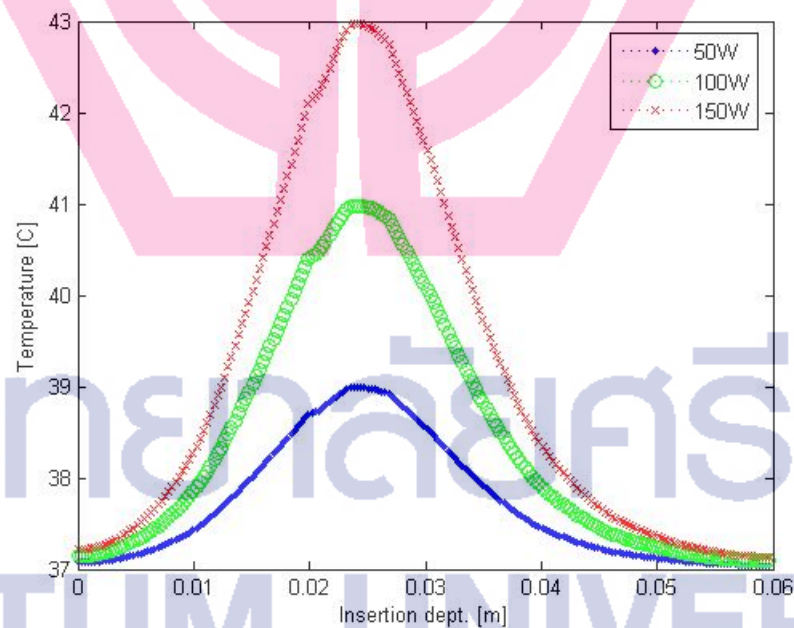
ภาพประกอบ 4.3 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความร้อนของสายอากาศแบบปลายเปิดที่ 100 W

ตาราง 4.3 ผลการกระจายความร้อนของสายอากาศแบบปลายเปิดที่ 150 W

เวลา (วินาที)	ด้านบน	ด้านข้าง	3 มิติ
30			
60			
90			
120			
150			
180			



ภาพประกอบ 4.4 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความร้อนของสายอากาศแบบปลายเปิดที่ 150 W



ภาพประกอบ 4.5 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความร้อนของสายอากาศแบบปลายเปิดที่เวลา 30 วินาที

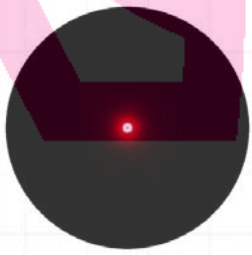

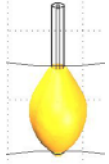


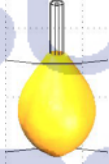
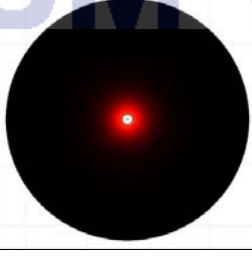
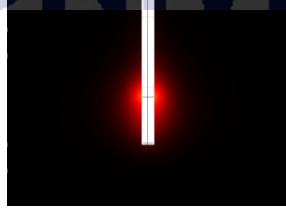
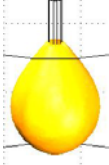
จากผลการทดลองในตาราง 4.1 – ตาราง 4.3 แสดงผลของการแพร่กระจายความร้อนที่มองจากด้านบน และด้านข้างของเนื้อเยื่อตับ และรูปทรง 3 มิติของการกระจายความร้อนของสายอากาศแบบปลายเปิด (Open tip) จะเห็นว่าสายอากาศมีการกระจายความร้อนเริ่มที่ปลายของสายอากาศ

และแพร่กระจายความร้อนออก โดยถ้าใช้เวลาในการป้อนกำลังงานมาก ก็มีแนวโน้มจะทำให้พื้นที่ในการแพร่กระจายความร้อนมากขึ้น ดังแสดงในภาพประกอบ 4.2 - ภาพประกอบ 4.4 ค่าของอุณหภูมิที่ระยะ 5 มิลลิเมตร จากกึ่งกลางของสายอากาศเพื่อใช้เปรียบเทียบค่าของสายอากาศที่เวลาต่างๆและหากทำการเพิ่มกำลังส่งจาก 50W ขึ้นเป็น 100W และ 150W ผลที่ได้จากการแพร่กระจายความร้อนจะขนาดที่ใหญ่กว่าที่ 50W ที่ระยะเวลาเดียวกัน สามารถเทียบผลจากกราฟในภาพประกอบ 4.5 ค่าของอุณหภูมิที่ระยะ 5 มิลลิเมตร จากกึ่งกลางของสายอากาศที่เวลา 30 วินาที

4.1.2 การกระจายความร้อนของสายอากาศแบบปลายเป็นฉนวน (Dielectric tip)

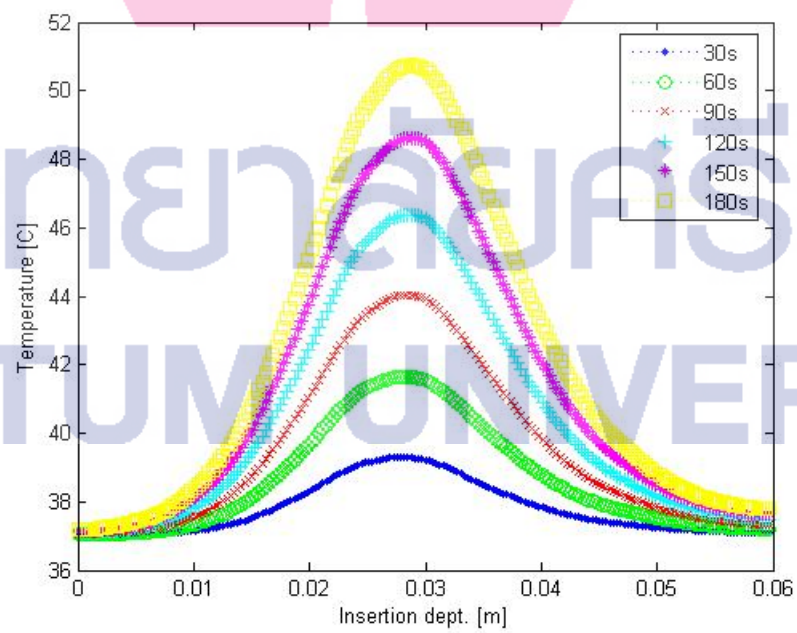
สำหรับการวิเคราะห์การกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นในตัวของสายอากาศแบบปลายเป็นฉนวน ได้ทำการส่งคลื่นไมโครเวฟที่ความถี่ 2.45 GHz เข้าไปในเนื้อเยื่อที่กำลังส่ง 50W, 100W และ 150W และใช้ระยะเวลา 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 วินาที ดังแสดงผลการทดลองในตาราง 4.4 – ตาราง 4.6

ตาราง 4.4 ผลการกระจายความร้อนของสายอากาศแบบปลายเป็นฉนวนที่ 50 W

เวลา (วินาที)	ด้านบน	ด้านข้าง	3 มิติ
30			
60			
90			

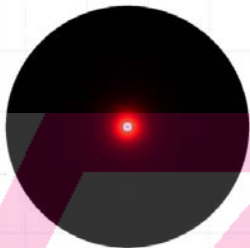
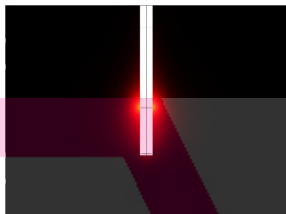
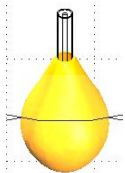

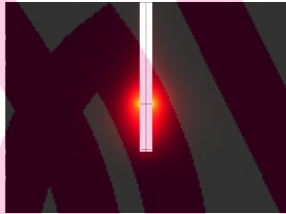
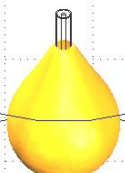

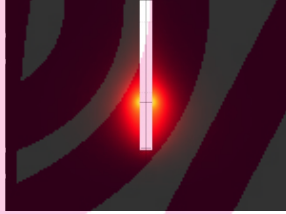
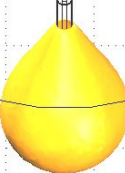
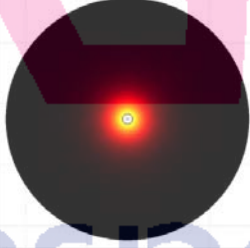



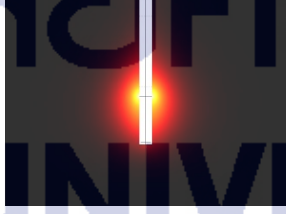
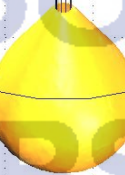
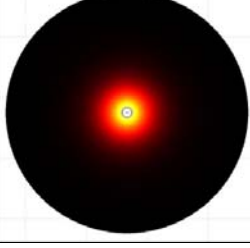
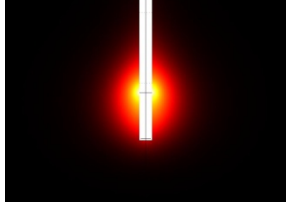

ตาราง 4.4(ต่อ) ผลการกระจายความร้อนของสายอากาศแบบปลายเป็นฉนวนที่ 50 W

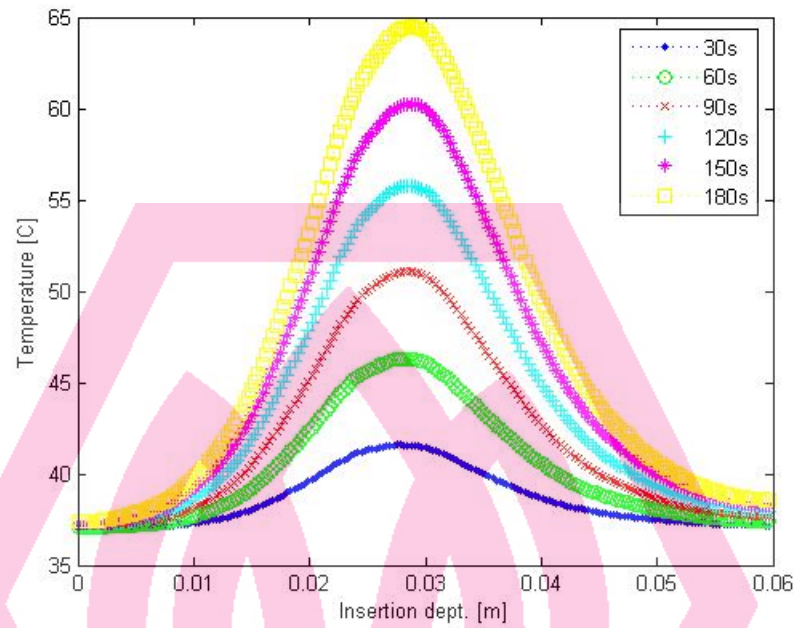
เวลา (วินาที)	ด้านบน	ด้านข้าง	3 มิติ
120			
150			
180			



ภาพประกอบ 4.6 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความร้อนของสายอากาศแบบปลายเป็นฉนวนที่ 50 W

ตาราง 4.5 ผลการกระจายความร้อนของสายอากาศแบบปลายเป็นฉนวนที่ 100 W

เวลา (วินาที)	ด้านบน	ด้านข้าง	3 มิติ
30			
60			
90			
120			
150			
180			


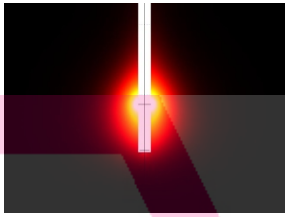


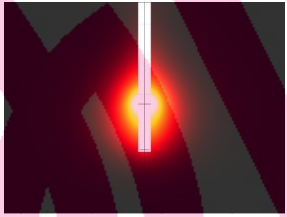


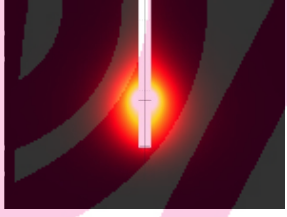



ภาพประกอบ 4.7 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความร้อนของสายอากาศแบบปลายเป็นฉนวนที่ 100W

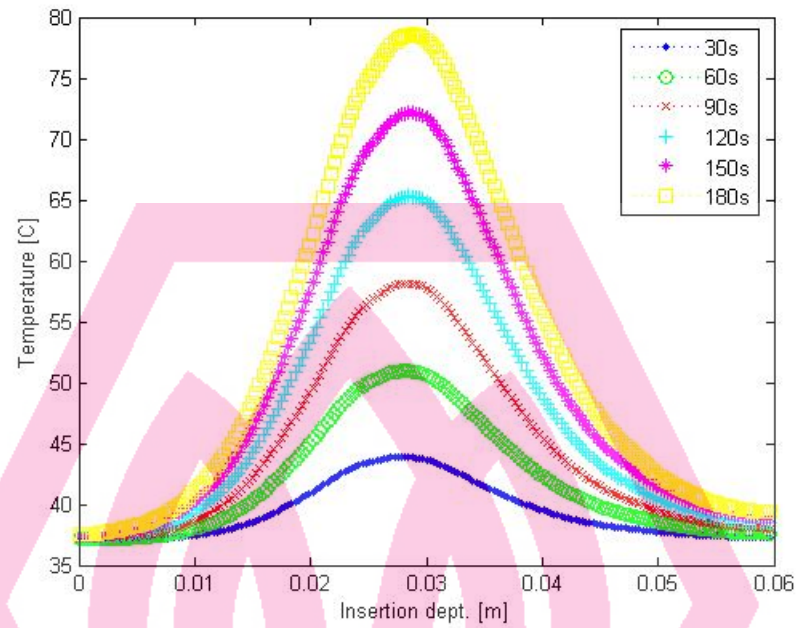
ตาราง 4.6 ผลการกระจายความร้อนของสายอากาศแบบปลายเป็นฉนวนที่ 150 W

เวลา (วินาที)	ด้านบน	ด้านข้าง	3 มิติ
30			
60			
90			

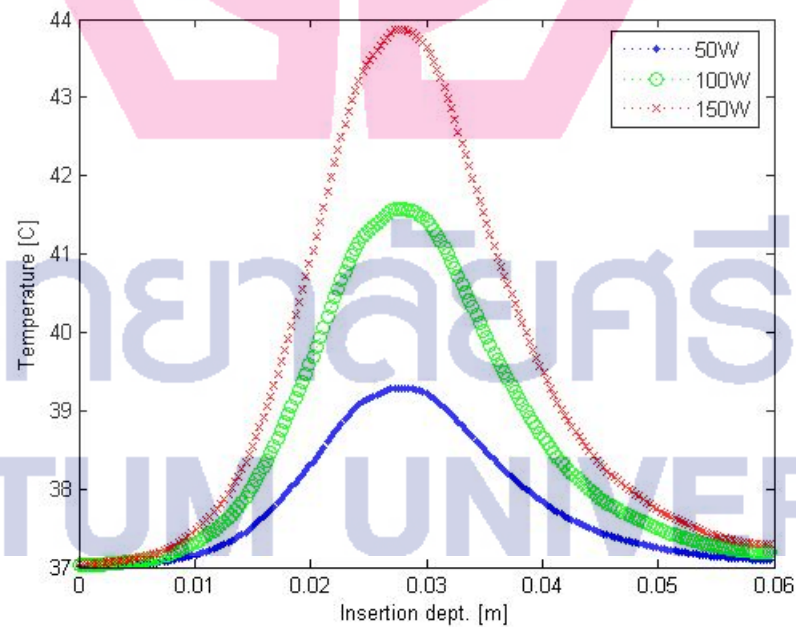
ตาราง 4.6(ต่อ) ผลการกระจายความร้อนของสายอากาศแบบปลายเป็นฉนวนที่ 150 W

เวลา (วินาที)	ด้านบน	ด้านข้าง	3 มิติ
120			
150			
180			

จากผลการทดลองในตาราง 4.4 – ตาราง 4.6 แสดงผลของการแพร่กระจายความร้อนที่มองจากด้านบน และด้านข้างของเนื้อเชื้อดับ และรูปทรง 3 มิติของการกระจายความร้อนของสายอากาศแบบปลายเป็นฉนวน (Dielectric tip) จะเห็นว่าสายอากาศมีการกระจายความร้อนเริ่มที่กลางของสายอากาศ ระหว่างตัวนำนอกกับฉนวน และแพร่กระจายความร้อนออก โดยถ้าใช้เวลาในการป้อนกำลังงานมาก ก็มีแนวโน้มจะทำให้พื้นที่ในการแพร่กระจายความร้อนมากขึ้น ดังแสดงในภาพประกอบ 4.6 - ภาพประกอบ 4.8 ค่าของอุณหภูมิที่ระยะ 5 มิลลิเมตร จากกึ่งกลางของสายอากาศเพื่อใช้เปรียบเทียบค่าของสายอากาศที่เวลาต่างๆและหากทำการเพิ่มกำลังส่งจาก 50W ขึ้นเป็น 100W และ 150W ผลที่ได้จากการแพร่กระจายความร้อนจะขนาดที่ใหญ่กว่าที่ 50W ที่ระยะเวลาเดียวกัน สามารถเทียบผลจากกราฟในภาพประกอบ 4.9 ค่าของอุณหภูมิที่ระยะ 5 มิลลิเมตร จากกึ่งกลางของสายอากาศที่เวลา 30 วินาที



ภาพประกอบ 4.8 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความร้อนของสายอากาศแบบปลายเป็นฉนวนที่ 150W


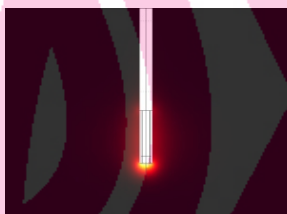
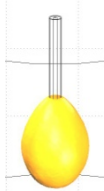

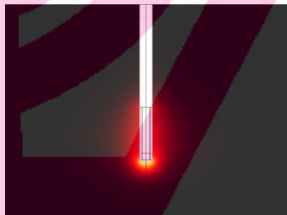
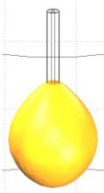

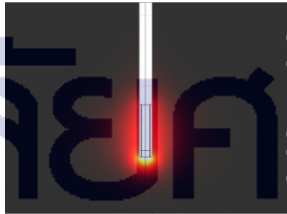


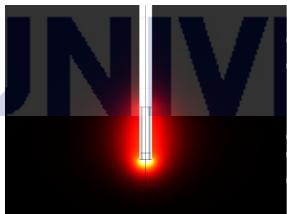



ภาพประกอบ 4.9 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความร้อนของสายอากาศแบบปลายเป็นฉนวนที่ เวลา 30 วินาที


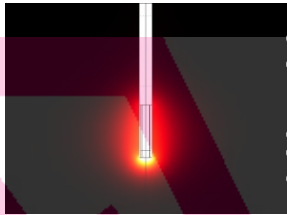
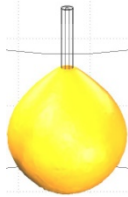

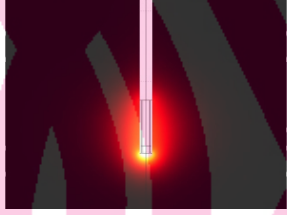
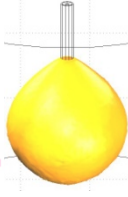
4.1.3 การกระจายความร้อนของสายอากาศแบบปลายเป็นโลหะ (Metal Tip)

สำหรับการวิเคราะห์การกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นในตัวของสายอากาศแบบปลายเป็นโลหะ ได้ทำการส่งคลื่นไมโครเวฟที่ความถี่ 2.45 GHz เข้าไปในเนื้อเยื่อที่กำลังส่ง 50W, 100W และ 150W และใช้ระยะเวลา 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 วินาที ดังแสดงผลการทดลองในตาราง 4.7 – ตาราง 4.9


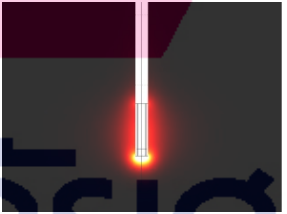
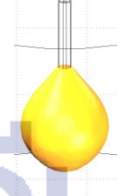
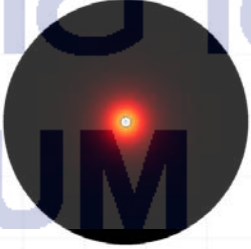
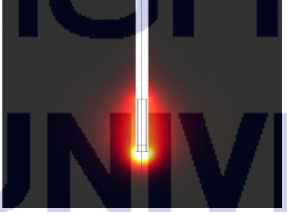

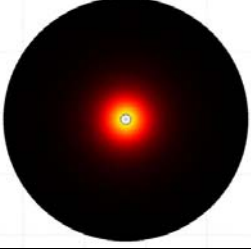
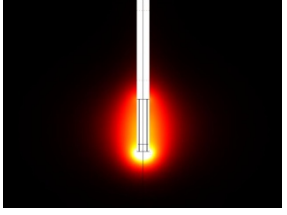
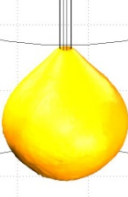
ตาราง 4.7 ผลการกระจายความร้อนของสายอากาศแบบปลายเป็นโลหะที่ 50 W

เวลา (วินาที)	ด้านบน	ด้านข้าง	3 มิติ
30			
60			
90			
120			

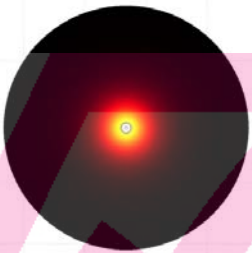
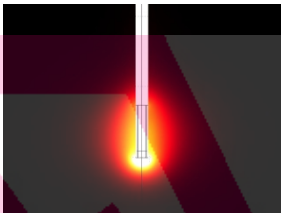
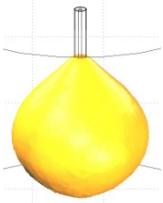
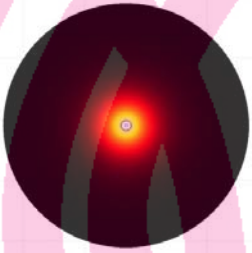
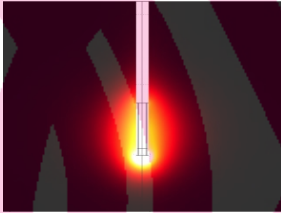
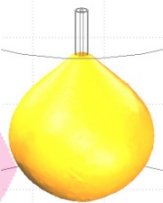

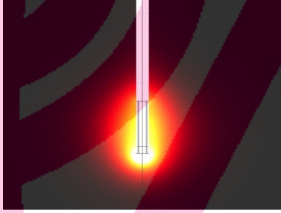
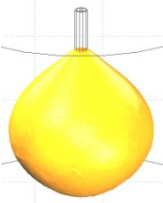
ตาราง 4.7(ต่อ) ผลการกระจายความร้อนของสายอากาศแบบปลายโลหะที่ 50 W

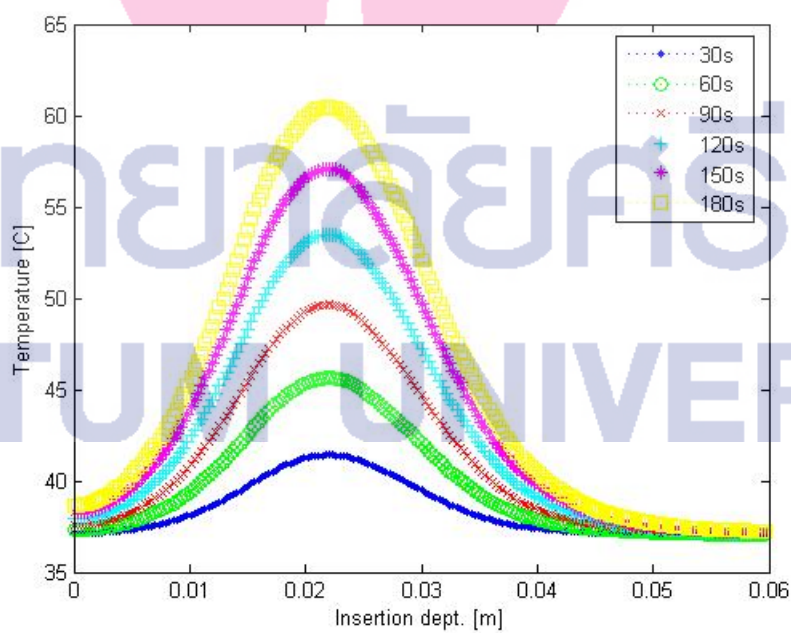
เวลา (วินาที)	ด้านบน	ด้านข้าง	3 มิติ
150			
180			

ตาราง 4.8 ผลการกระจายความร้อนของสายอากาศแบบปลายเป็นโลหะที่ 100 W

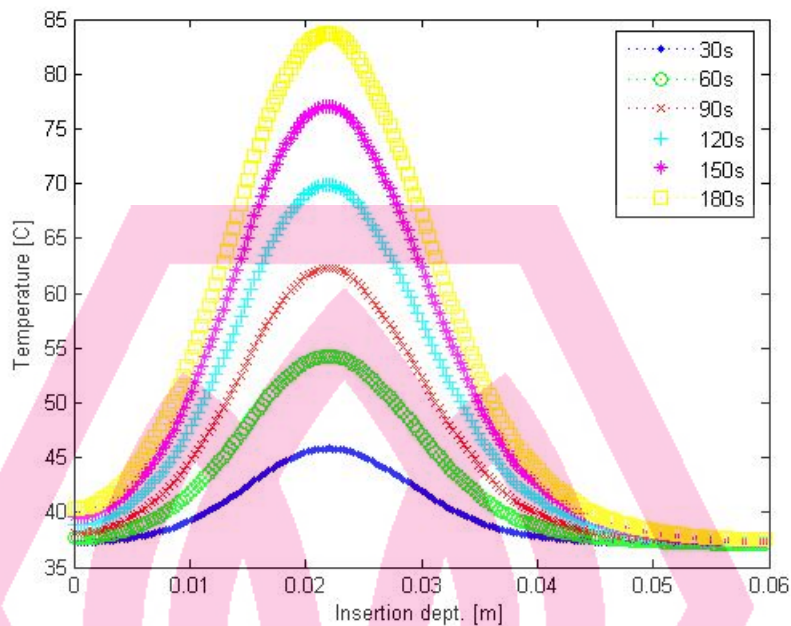
เวลา (วินาที)	ด้านบน	ด้านข้าง	3 มิติ
30			
60			
90			

ตาราง 4.8(ต่อ) ผลการกระจายความร้อนของสายอากาศแบบปลายเป็นโลหะที่ 100 W

เวลา (วินาที)	ด้านบน	ด้านข้าง	3 มิติ
120			
150			
180			



ภาพประกอบ 4.10 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความร้อนของสายอากาศแบบปลายเป็นโลหะที่

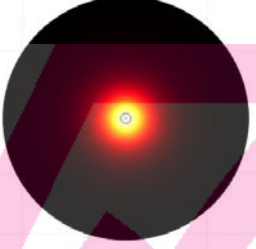
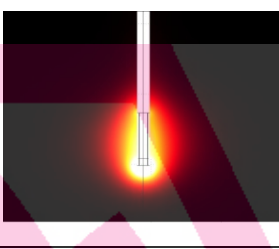
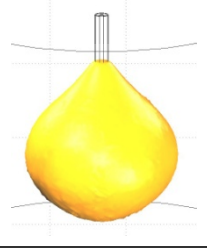

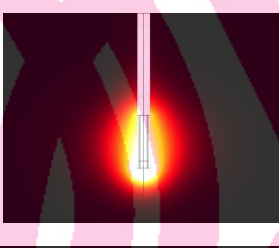
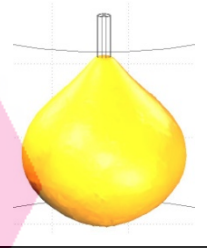

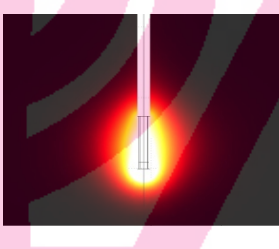
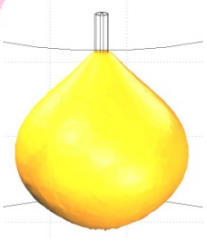

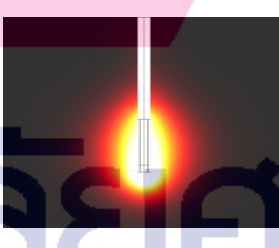
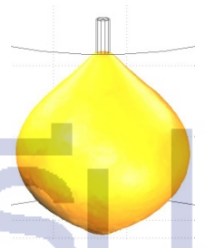


ภาพประกอบ 4.11 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความร้อนของสายอากาศแบบปลายเป็นโลหะที่ 100W

ตาราง 4.9 ผลการกระจายความร้อนของสายอากาศแบบปลายเป็นโลหะที่ 150 W

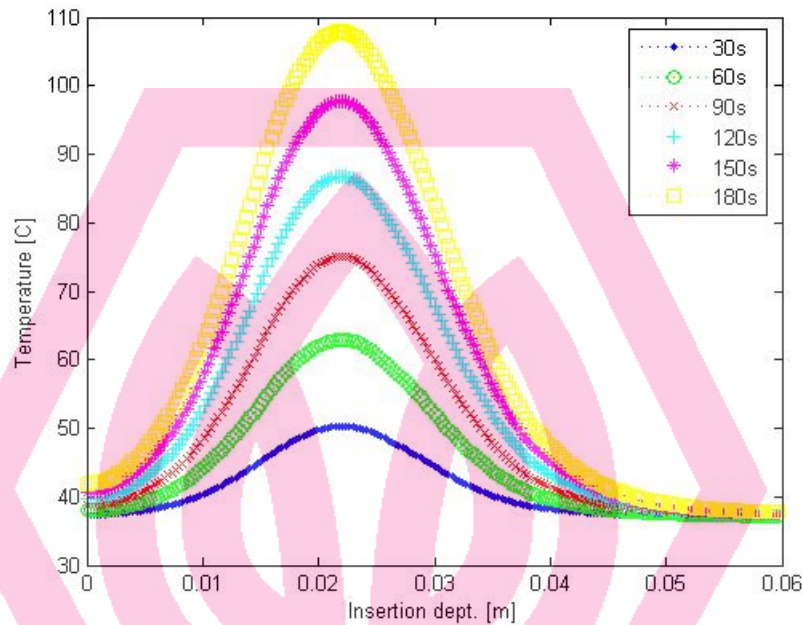
เวลา (วินาที)	ด้านบน	ด้านข้าง	3 มิติ
30			
60			

ตาราง 4.9(ต่อ) ผลการกระจายความร้อนของสายอากาศแบบปลายเป็นโลหะที่ 150W

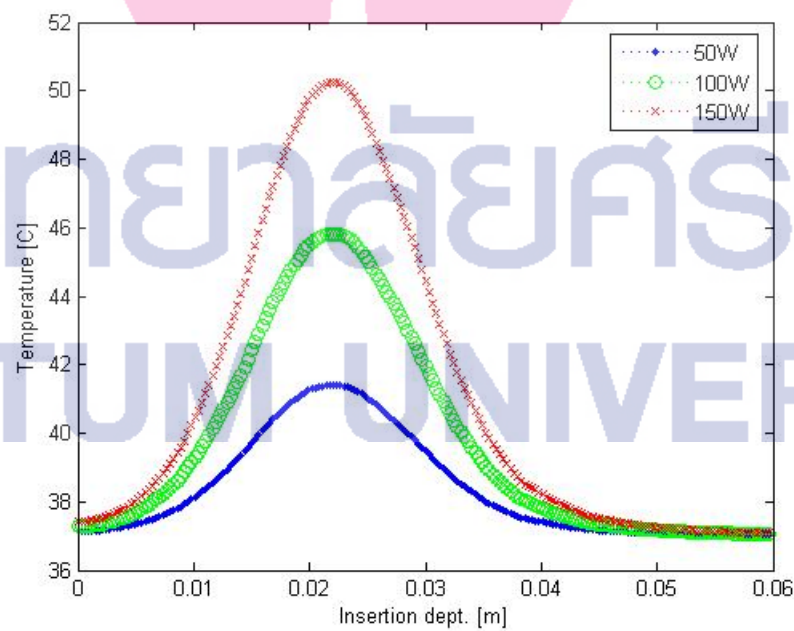
เวลา (วินาที)	ด้านบน	ด้านข้าง	3 มิติ
90			
120			
150			
180			

จากผลการทดลองในตาราง 4.7 – ตาราง 4.9 แสดงผลของการแพร่กระจายความร้อนที่มองจากด้านบน และด้านข้างของเนื้อเยื่อตับ และรูปทรง 3 มิติของการกระจายความร้อนของสายอากาศแบบปลายเป็นโลหะ (Metal tip) จะเห็นว่าสายอากาศมีการกระจายความร้อนเริ่มที่ปลายของสายอากาศ และแพร่กระจายความร้อนออก โดยถ้าใช้เวลาในการป้อนกำลังงานมาก ก็มีแนวโน้มจะทำให้พื้นที่ในการแพร่กระจายความร้อนมากขึ้น ดังแสดงในภาพประกอบ 4.10 - ภาพประกอบ 4.12 ค่าของอุณหภูมิที่ระยะ 5 มิลลิเมตร จากกึ่งกลางของสายอากาศเพื่อใช้เปรียบเทียบค่าของสายอากาศที่เวลาต่างๆและหากทำการเพิ่มกำลังส่งจาก 50W ขึ้นเป็น 100W และ 150W ผลที่ได้จากการแพร่กระจายความร้อนจะขนาดที่ใหญ่กว่าที่ 50W ที่ระยะเวลาเดียวกัน สามารถเทียบผลจาก

กราฟในภาพประกอบ 4.13 ค่าของอุณหภูมิที่ระยะ 5 มิลลิเมตร จากกึ่งกลางของสายอากาศที่เวลา 30 วินาที



ภาพประกอบ 4.12 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความร้อนของสายอากาศแบบปลายเป็นโลหะที่ 150W



ภาพประกอบ 4.13 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความร้อนของสายอากาศแบบปลายเป็นโลหะที่ เวลา 30 วินาที

4.1.4 การกระจายความร้อนของสายอากาศแบบเปิดช่อง (Slot)

สำหรับการวิเคราะห์การกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นในตัวของสายอากาศแบบเปิดช่อง ได้ทำการส่งคลื่นไมโครเวฟที่ความถี่ 2.45 GHz เข้าไปในเนื้อเยื่อที่กำลังส่ง 50W, 100W และ 150W และใช้ระยะเวลา 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 วินาที ดังแสดงผลการทดลองในตาราง 4.10 – ตาราง 4.12


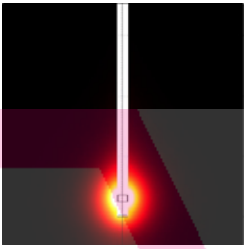


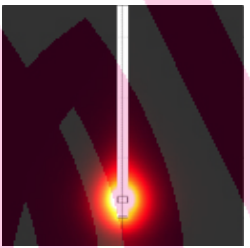
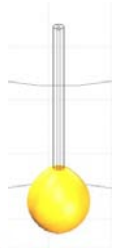


ภาพประกอบ 4.14 แสดงค่าของแถบสีเทียบกับอุณหภูมิของตาราง 4.10 – ตาราง 4.12


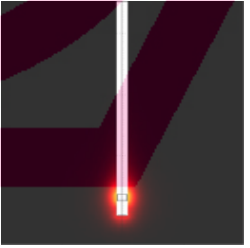
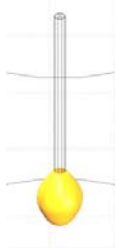

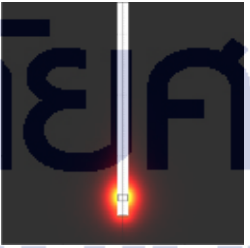

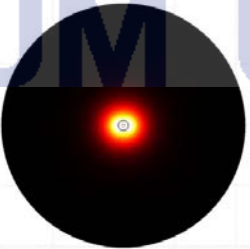
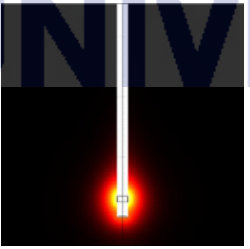
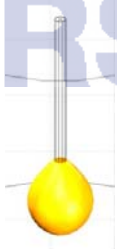
ตาราง 4.10 ผลการกระจายความร้อนของสายอากาศแบบเปิดช่องที่ 50 W

เวลา (วินาที)	ด้านบน	ด้านข้าง	3 มิติ
30			
60			
90			
120			


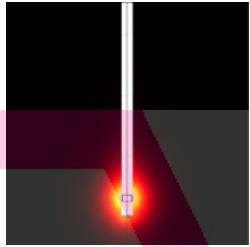
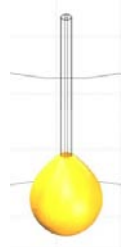

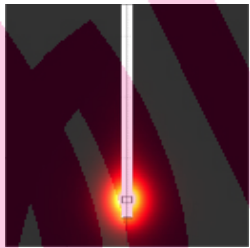
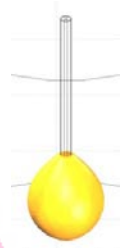

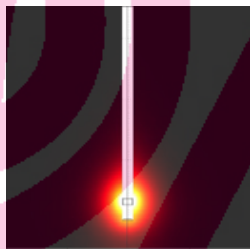
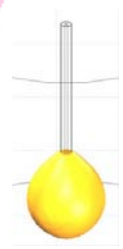
ตาราง 4.10(ต่อ) ผลการกระจายความร้อนของสายอากาศแบบเปิดช่องที่ 50 W

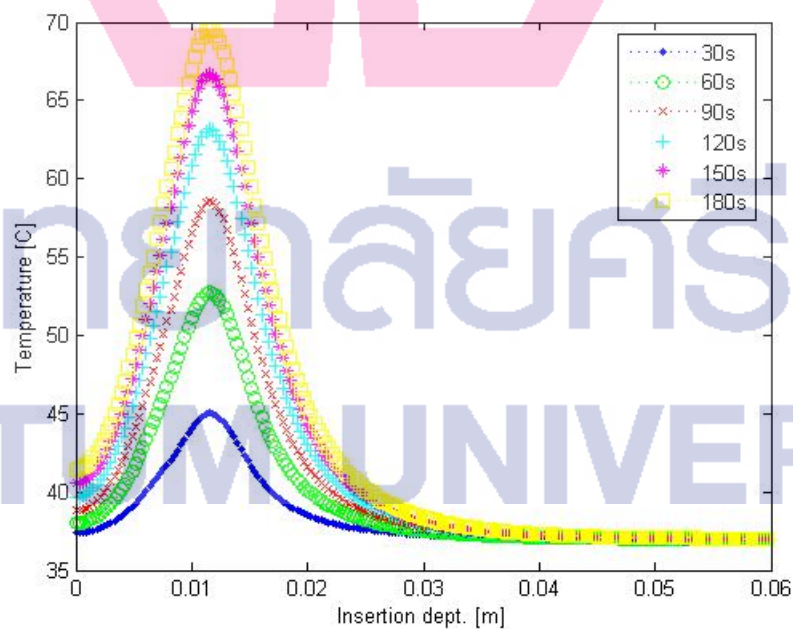
เวลา (วินาที)	ด้านบน	ด้านข้าง	3 มิติ
150			
180			

ตาราง 4.11 ผลการกระจายความร้อนของสายอากาศแบบเปิดช่องที่ 100 W

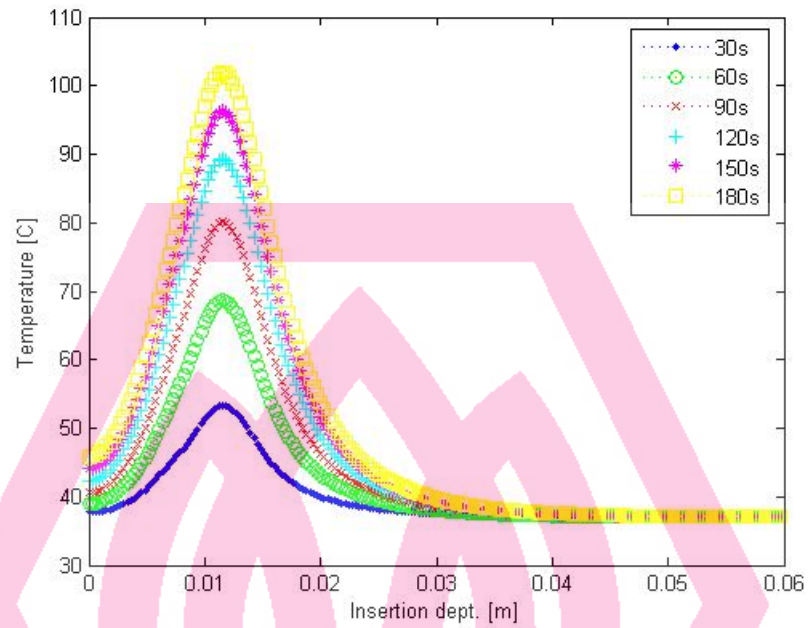
เวลา (วินาที)	ด้านบน	ด้านข้าง	3 มิติ
30			
60			
90			

ตาราง 4.11(ต่อ) ผลการกระจายความร้อนของสายอากาศแบบเปิดช่องที่ 100 W

เวลา (วินาที)	ด้านบน	ด้านข้าง	3 มิติ
120			
150			
180			



ภาพประกอบ 4.15 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความร้อนของสายอากาศแบบเปิดช่องที่ 50W

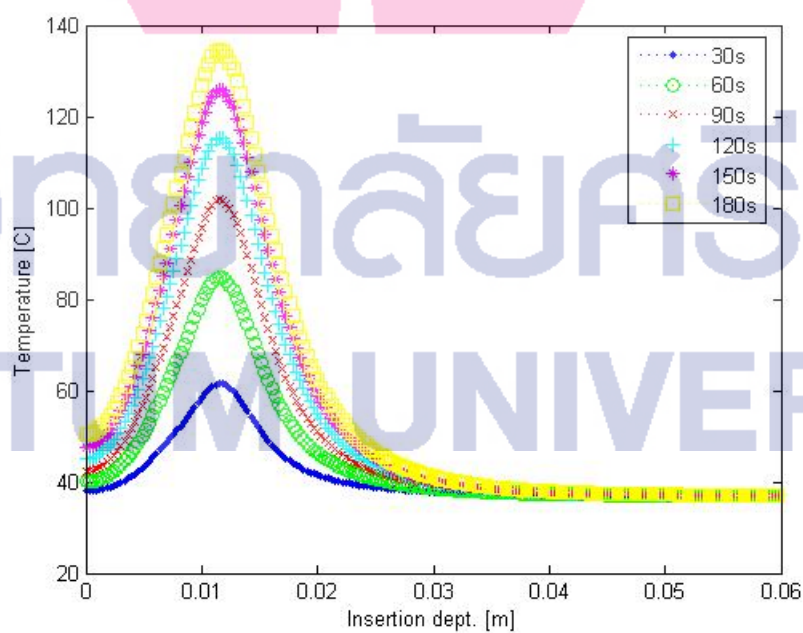
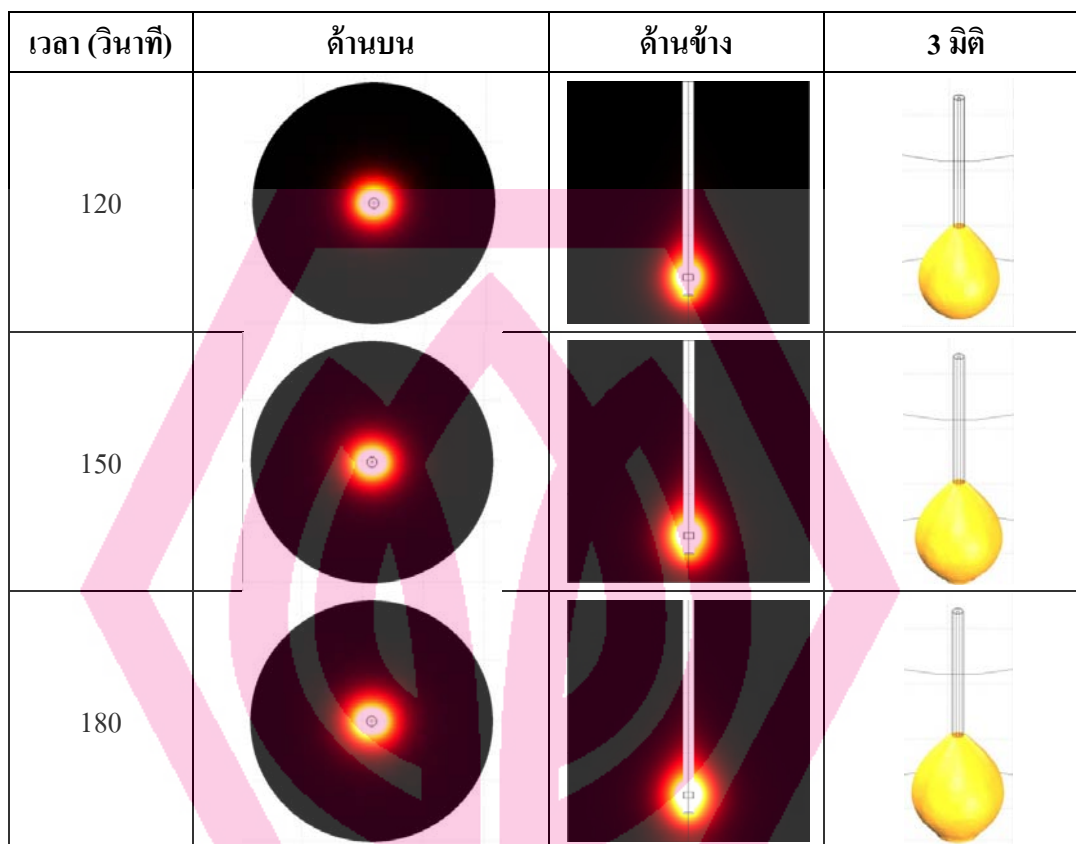


ภาพประกอบ 4.16 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความร้อนของสายอากาศแบบเปิดช่องที่ 100W

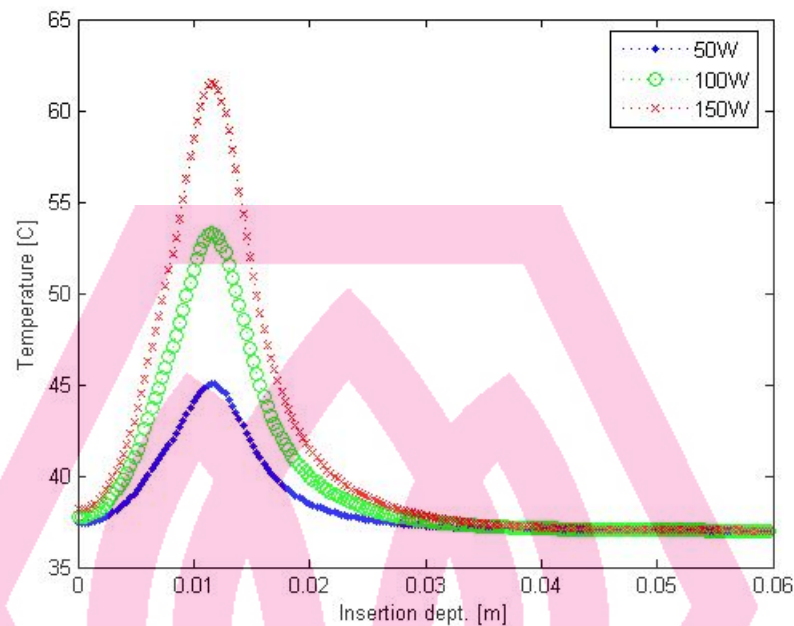
ตาราง 4.12 ผลการกระจายความร้อนของสายอากาศแบบเปิดช่องที่ 150 W

เวลา (วินาที)	ด้านบน	ด้านข้าง	3 มิติ
30			
60			
90			

ตาราง 4.12(ต่อ) ผลการกระจายความร้อนของสายอากาศแบบเปิดช่องที่ 150 W



ภาพประกอบ 4.17 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความร้อนของสายอากาศแบบเปิดช่องที่ 150W



ภาพประกอบ 4.18 กราฟเปรียบเทียบการกระจายความร้อนของสายอากาศแบบเปิดช่องที่เวลา 30 วินาที

จากผลการทดลองในตาราง 4.10 – ตาราง 4.12 แสดงผลของการแพร่กระจายความร้อนที่มองจากด้านบน และด้านข้างของเนื้อเยื่อตับ และรูปทรง 3 มิติของการกระจายความร้อนของสายอากาศแบบเปิดช่อง (Slot) จะเห็นว่าสายอากาศมีการกระจายความร้อนเริ่มที่ช่องเปิดของสายอากาศ และแพร่กระจายความร้อนออก โดยถ้าใช้เวลาในการป้อนกำลังงานมาก ก็มีแนวโน้มจะทำให้พื้นที่ในการแพร่กระจายความร้อนมากขึ้น ดังแสดงในภาพประกอบ 4.15 - ภาพประกอบ 4.17 ค่าของอุณหภูมิที่ระยะ 5 มิลลิเมตร จากกึ่งกลางของสายอากาศเพื่อใช้เปรียบเทียบค่าของสายอากาศที่เวลาต่างๆและหากทำการเพิ่มกำลังส่งจาก 50W ขึ้นเป็น 100W และ 150W ผลที่ได้จากการแพร่กระจายความร้อนจะขนาดที่ใหญ่กว่าที่ 50W ที่ระยะเวลาเดียวกัน สามารถเทียบผลจากกราฟในภาพประกอบ 4.18 ค่าของอุณหภูมิที่ระยะ 5 มิลลิเมตร จากกึ่งกลางของสายอากาศที่เวลา 30 วินาที

จากการทดลองสามารถแสดงค่าปริมาณของการทำลายเซลล์ที่อุณหภูมิสูงกว่า 50 องศาเซลเซียส ของแต่ละสายอากาศเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบได้ดังตาราง 4.13

ตาราง 4.13 แสดงปริมาณของการทำลายเนื้อเยื่อที่อุณหภูมิสูงกว่า 50 องศาเซลเซียส

	ปริมาณ (ลูกบาศก์เซนติเมตร)					
	เวลา (วินาที)					
	30	60	90	120	150	180
สายอากาศแบบปลายเปิด						
50W	4.638	9.229	13.239	16.951	20.328	23.410
100W	8.596	15.928	22.313	27.990	33.381	38.190
150W	11.986	21.518	29.601	36.980	43.503	49.893
สายอากาศแบบปลายเป็นฉนวน						
50W	2.520	5.280	7.771	10.133	12.162	14.151
100W	5.287	10.190	14.486	18.352	21.866	25.226
150W	7.713	14.288	20.025	25.143	29.730	34.092
สายอากาศแบบปลายโลหะ						
50W	4.443	8.761	12.567	15.998	19.131	22.001
100W	8.552	15.752	21.872	27.494	32.342	36.900
150W	12.086	21.541	29.695	36.547	42.963	48.908
สายอากาศแบบเปิดช่อง						
50W	0.666	1.478	2.232	2.964	3.649	4.256
100W	1.565	3.201	4.728	6.246	7.614	8.950
150W	2.348	4.716	6.920	9.064	11.149	13.076


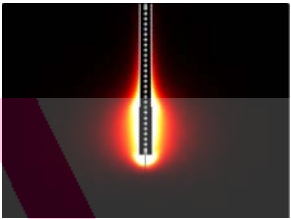

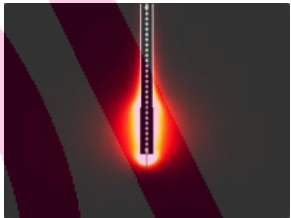
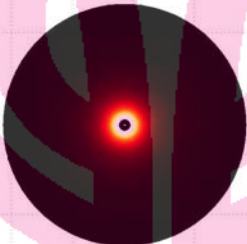
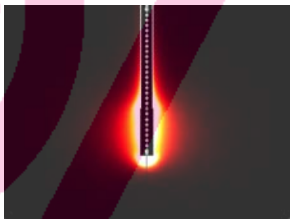




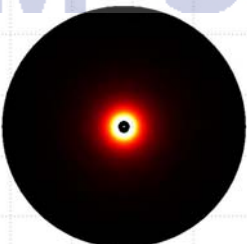
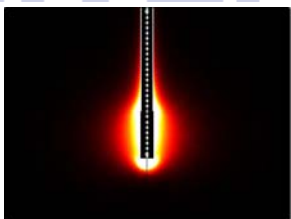
4.2 การทดลองที่ 2 ผลของการแพร่กระจาย SAR ของสายอากาศ

4.2.1 การแพร่กระจาย SAR ของสายอากาศแบบปลายเปิด (Open tip)

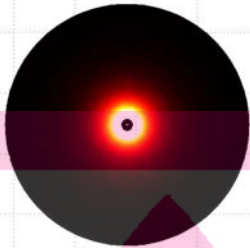
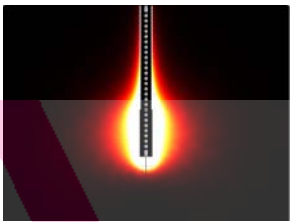
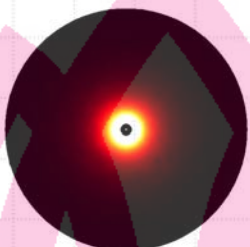
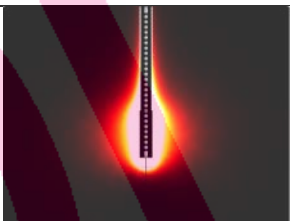
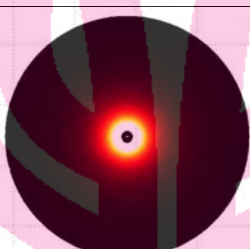
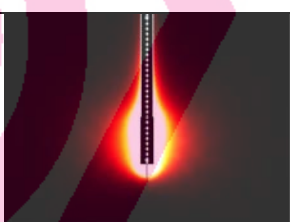
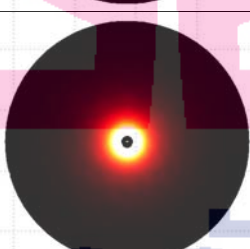
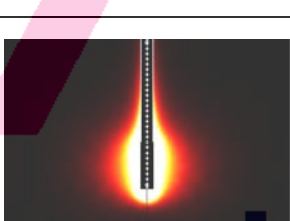


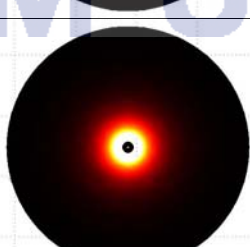
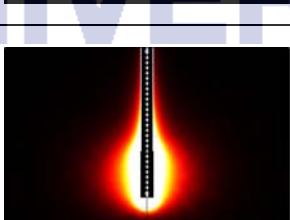
สำหรับการวิเคราะห์การกระจายค่า SAR ที่เกิดจากสนามไฟฟ้าของสายอากาศแบบปลายเปิด โดยทำการส่งคลื่นไมโครเวฟที่ความถี่ 2.45 GHz เข้าไปที่กำลังส่ง 50W, 100W และ 150W และใช้ระยะเวลา 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 วินาที ดังแสดงผลการทดลองในตาราง 4.14

– ตาราง 4.16

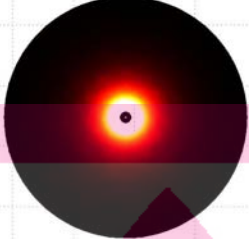
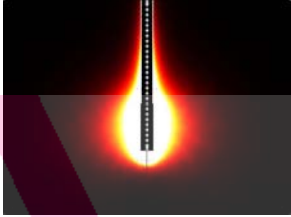
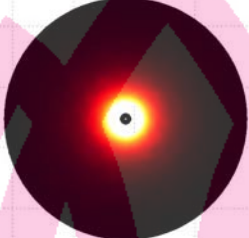
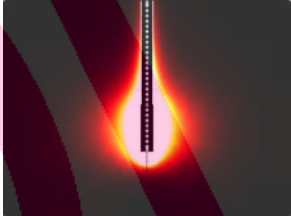
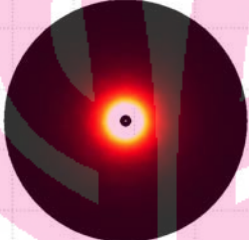
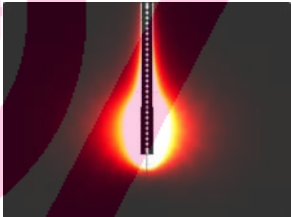
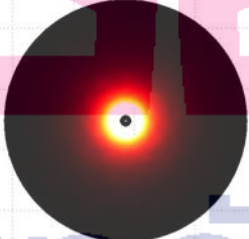
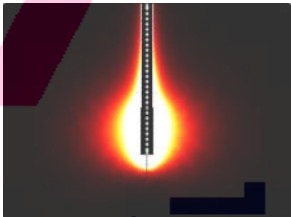



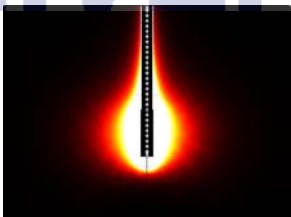
ตาราง 4.14 ผลการแพร่กระจาย SAR ของสายอากาศแบบปลายเปิดที่ 50W

เวลา (วินาที)	ด้านบน	ด้านข้าง
30		
60		
90		
120		
150		
180		

ตาราง 4.15 ผลการแพร่กระจาย SAR ของสายอากาศแบบปลายเปิดที่ 100W

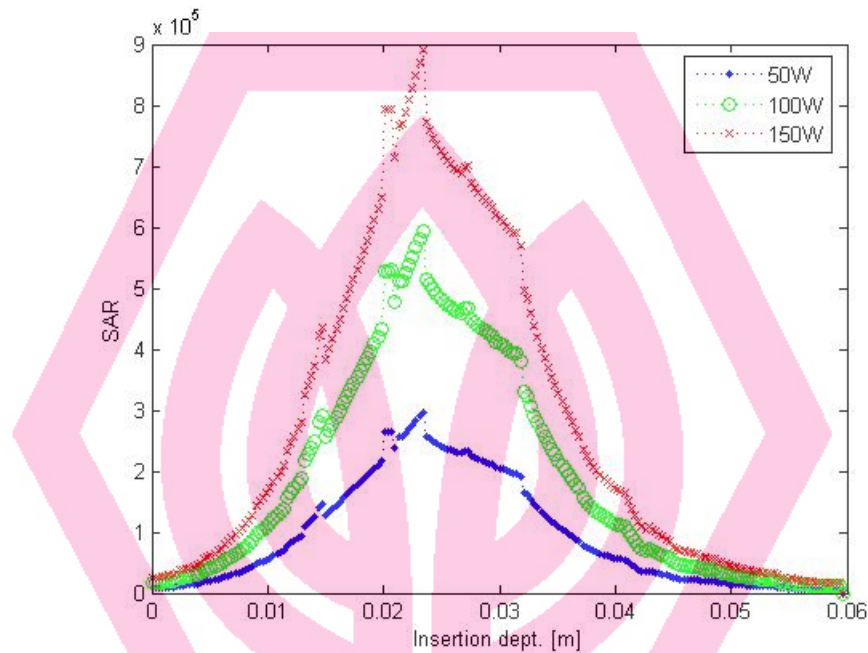
เวลา (วินาที)	ด้านบน	ด้านล่าง
30		
60		
90		
120		
150		
180		

ตาราง 4.16 ผลการแพร่กระจาย SAR ของสายอากาศแบบปลายเปิดที่ 150W

เวลา (วินาที)	ด้านบน	ด้านล่าง
30		
60		
90		
120		
150		
180		



ภาพประกอบ 4.19 แสดงค่าของแถบสีเทียบกับค่า SAR



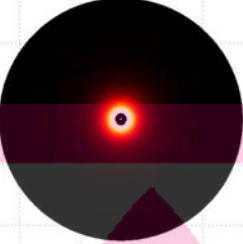
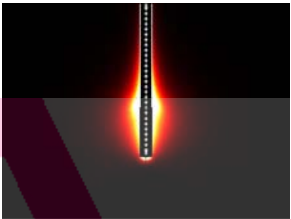
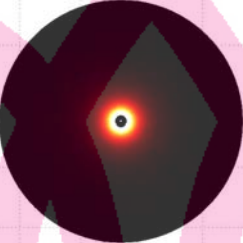
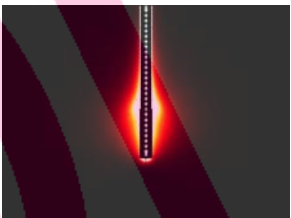
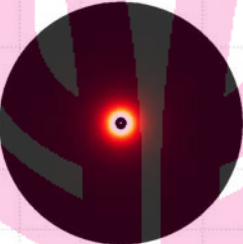
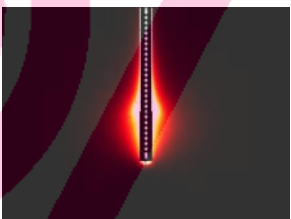


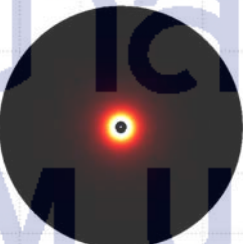

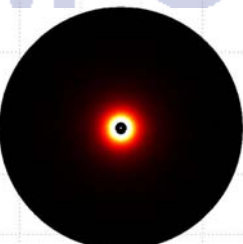
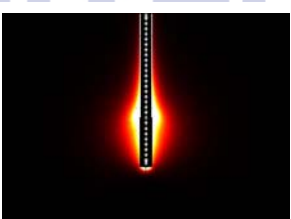
ภาพประกอบ 4.20 แสดงค่า SAR ของสายอากาศแบบปลายเปิดที่กำลังส่งต่างๆ

จากผลการทดลองในตาราง 4.14 – ตาราง 4.16 แสดงผลของการแพร่กระจายค่า SAR ที่เกิดจากสนามไฟฟ้า มองจากด้านบน และด้านข้างของเนื้อเยื่อตับ ของสายอากาศแบบปลายเปิด จะเห็นว่าสายอากาศมีการแพร่กระจายสนามไฟฟ้าที่คงที่ไม่ขึ้นกับเวลา และมีรูปทรงที่สอดคล้องกับการกระจายความร้อน และแสดงการเปรียบเทียบค่า SAR ของสายอากาศแบบปลายเปิดที่กำลังส่งต่างๆ ดังแสดงในภาพประกอบ 4.20

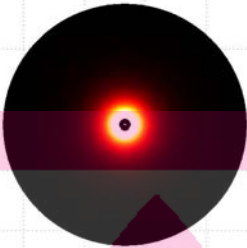
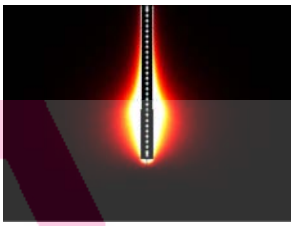
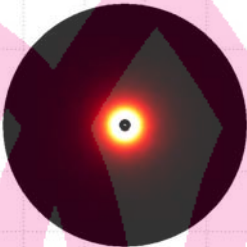
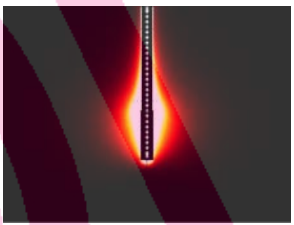
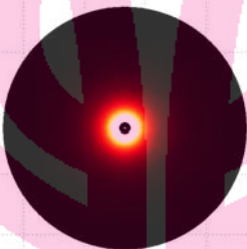
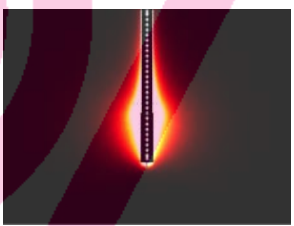




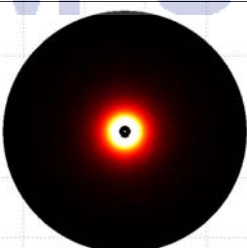
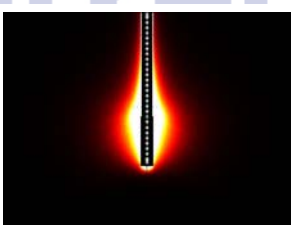
4.2.2 การแพร่กระจาย SAR ของสายอากาศแบบปลายเป็นฉนวน (Dielectric tip)

สำหรับการวิเคราะห์การกระจายค่า SAR ที่เกิดจากสนามไฟฟ้าของสายอากาศแบบปลายเป็นฉนวน โดยทำการส่งคลื่นไมโครเวฟที่ความถี่ 2.45 GHz เข้าไปที่กำลังส่ง 50W, 100W และ 150W และใช้ระยะเวลา 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 วินาที ดังแสดงผลการทดลองในตาราง 4.17 – ตาราง 4.19

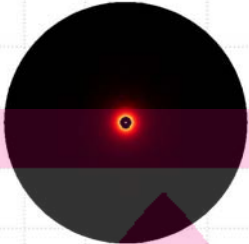
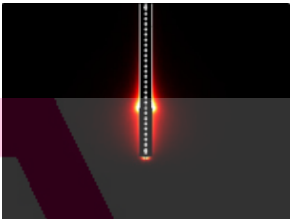
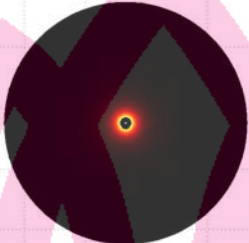
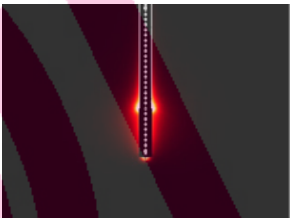
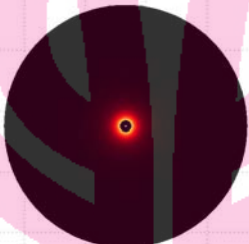
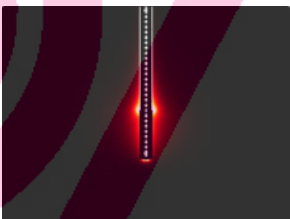


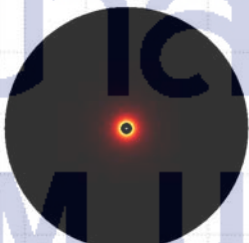

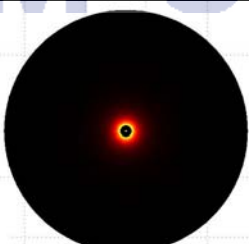
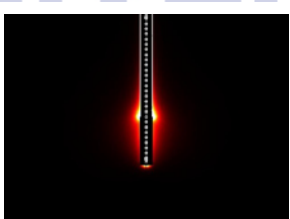
ตาราง 4.17 ผลการแพร่กระจาย SAR ของสายอากาศแบบปลายเป็นฉนวนที่ 50W

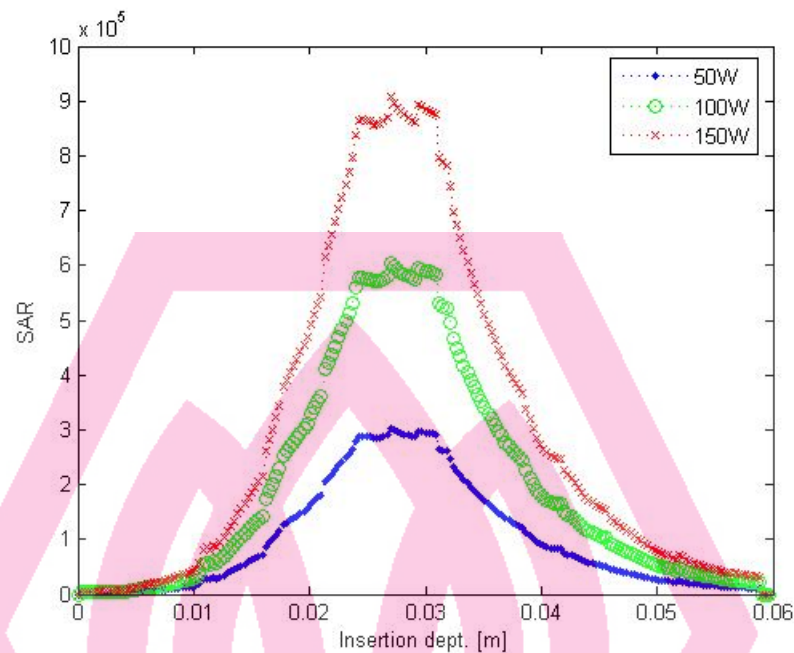
เวลา (วินาที)	ด้านบน	ด้านข้าง
30		
60		
90		
120		
150		
180		

ตาราง 4.18 ผลการแพร่กระจาย SAR ของสายอากาศแบบปลายเป็นฉนวนที่ 100W

เวลา (วินาที)	ด้านบน	ด้านข้าง
30		
60		
90		
120		
150		
180		

ตาราง 4.19 ผลการแพร่กระจาย SAR ของสายอากาศแบบปลายเป็นฉนวนที่ 150W

เวลา (วินาที)	ด้านบน	ด้านข้าง
30		
60		
90		
120		
150		
180		



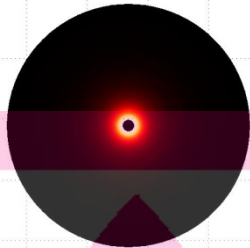
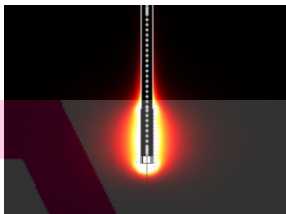
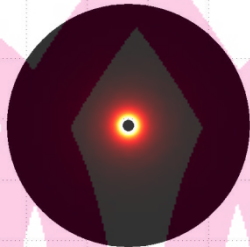
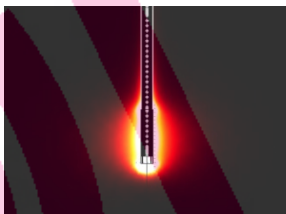
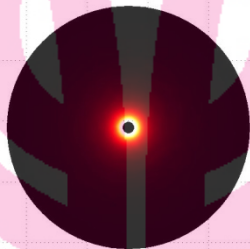
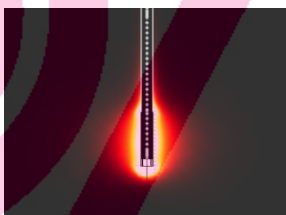

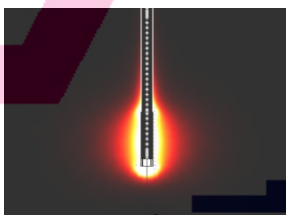


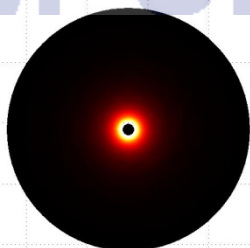
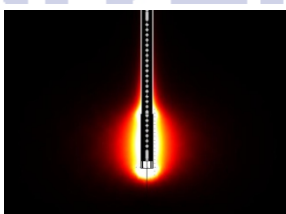
ภาพประกอบ 4.21 แสดงค่า SAR ของสายอากาศแบบปลายเป็นฉนวนที่กำลังส่งต่างๆ

จากผลการทดลองในตาราง 4.17 – ตาราง 4.19 แสดงผลของการแพร่กระจายค่า SAR ที่เกิดจากสนามไฟฟ้า มองจากด้านบน และด้านข้างของเนื้อเยื่อตับ ของสายอากาศแบบปลายเป็นฉนวน จะเห็นว่าสายอากาศมีการแพร่กระจายสนามไฟฟ้าที่คงที่ไม่ขึ้นกับเวลา และมีรูปทรงที่สอดคล้องกับการกระจายความร้อน และแสดงการเปรียบเทียบค่า SAR ของสายอากาศแบบปลายเป็นฉนวนที่กำลังส่งต่างๆ ดังแสดงในภาพประกอบ 4.21

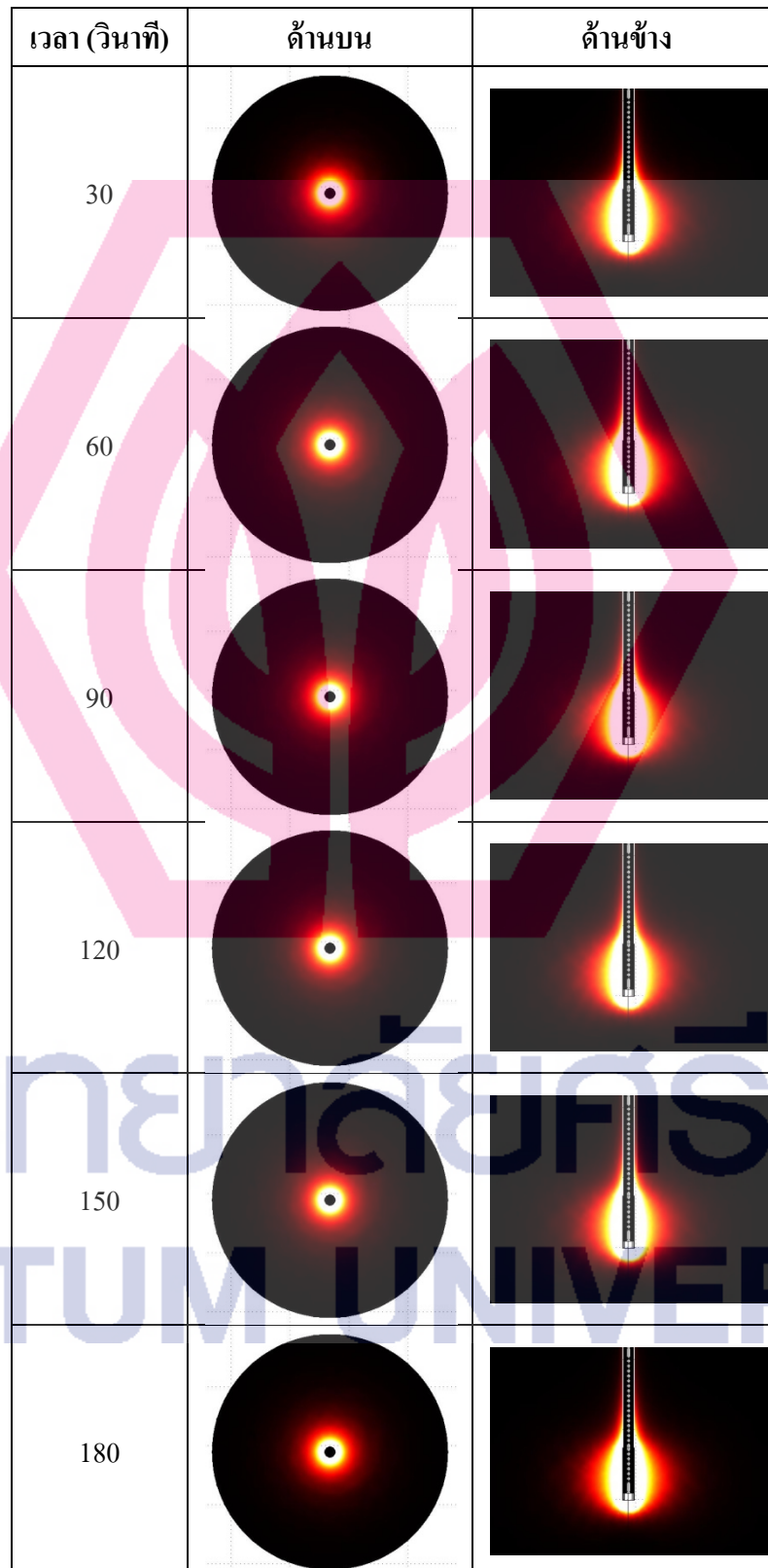
4.2.3 การแพร่กระจาย SAR ของสายอากาศแบบปลายเป็นโลหะ (Metal tip)

สำหรับการวิเคราะห์การกระจายค่า SAR ที่เกิดจากสนามไฟฟ้าของสายอากาศแบบปลายเป็นโลหะ โดยทำการส่งคลื่นไมโครเวฟที่ความถี่ 2.45 GHz เข้าไปที่กำลังส่ง 50W, 100W และ 150W และใช้ระยะเวลา 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 วินาที ดังแสดงผลการทดลองในตาราง 4.20 – ตาราง 4.22

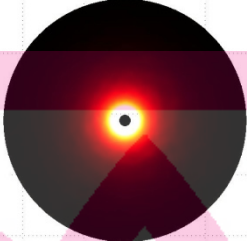
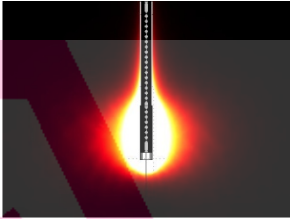

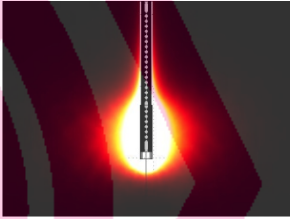
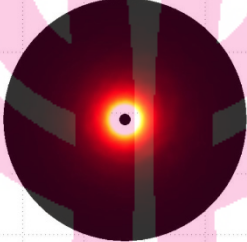
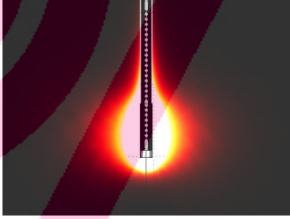

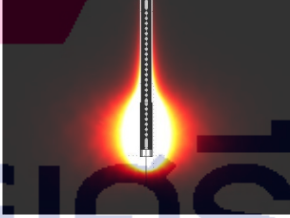


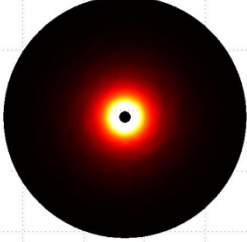
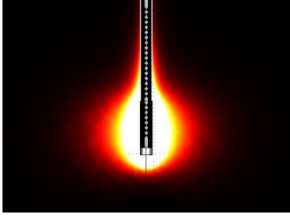
ตาราง 4.20 ผลการแพร่กระจาย SAR ของสายอากาศแบบปลายโลหะที่ 50W

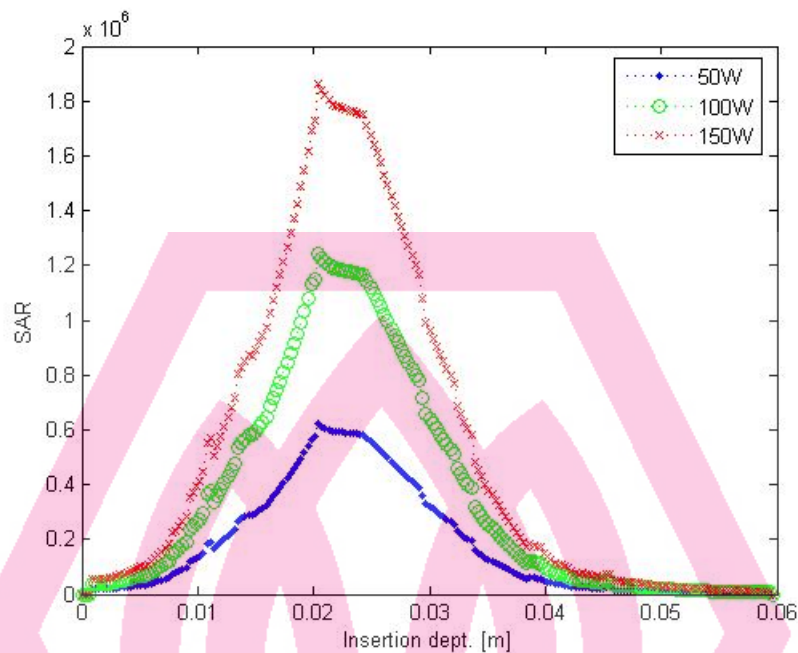
เวลา (วินาที)	ด้านบน	ด้านข้าง
30		
60		
90		
120		
150		
180		

ตาราง 4.21 ผลการแพร่กระจาย SAR ของสายอากาศแบบปลายโลหะที่ 100W



ตาราง 4.22 ผลการแพร่กระจาย SAR ของสายอากาศแบบปลายโลหะที่ 150W

เวลา (วินาที)	ด้านบน	ด้านข้าง
30		
60		
90		
120		
150		
180		



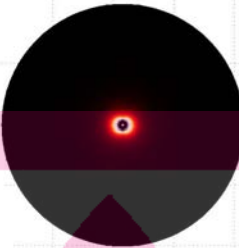
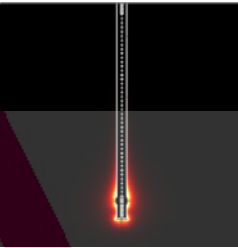

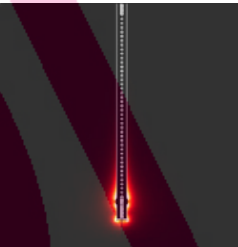

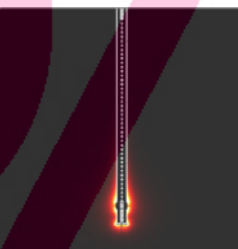

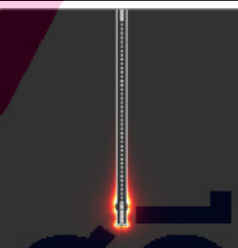

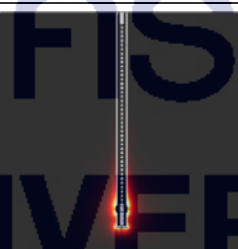
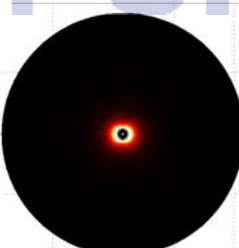
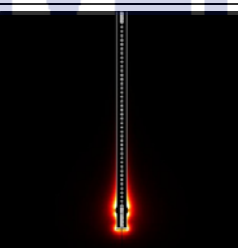
ภาพประกอบ 4.22 แสดงค่า SAR ของสายอากาศแบบปลายเป็นโลหะที่กำลังส่งต่างๆ

จากผลการทดลองในตาราง 4.20 – ตาราง 4.22 แสดงผลของการแพร่กระจายค่า SAR ที่เกิดจากสนามไฟฟ้า มองจากด้านบน และด้านข้างของเนื้อเยื่อตับ ของสายอากาศแบบปลายเป็นโลหะ จะเห็นว่าสายอากาศมีการแพร่กระจายสนามไฟฟ้าที่คงที่ไม่ขึ้นกับเวลา และมีรูปทรงที่สอดคล้องกับการกระจายความร้อน และแสดงการเปรียบเทียบค่า SAR ของสายอากาศแบบปลายเป็นโลหะที่กำลังส่งต่างๆ ดังแสดงในภาพประกอบ 4.22


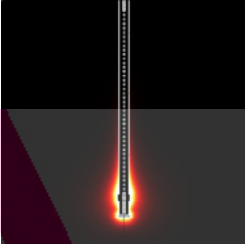

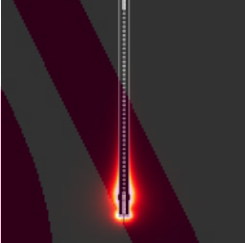

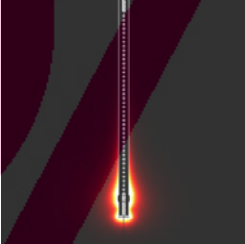

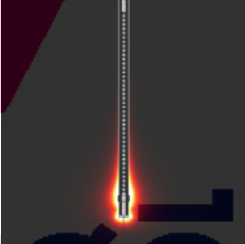



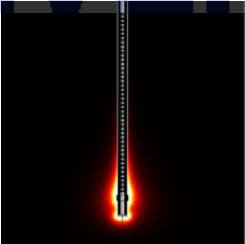
4.2.4 การแพร่กระจาย SAR ของสายอากาศแบบเปิดช่อง (Slot)

สำหรับการวิเคราะห์การกระจายค่า SAR ที่เกิดจากสนามไฟฟ้าของสายอากาศแบบเปิดช่อง โดยทำการส่งคลื่นไมโครเวฟที่ความถี่ 2.45 GHz เข้าไปที่กำลังส่ง 50W, 100W และ 150W และใช้ระยะเวลา 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 วินาที ดังแสดงผลการทดลองในตาราง 4.23 – ตาราง 4.25


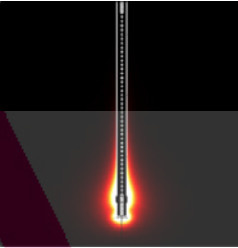

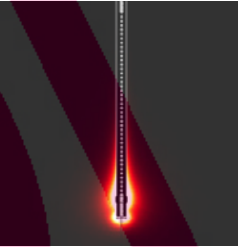

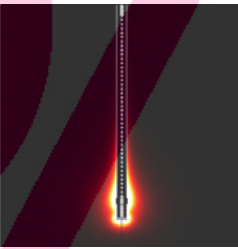

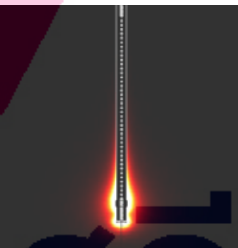

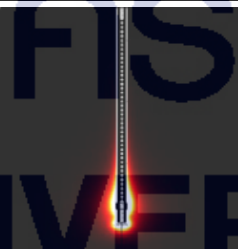
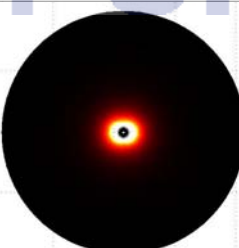
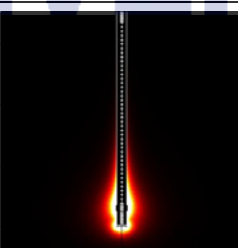
ตาราง 4.23 ผลการแพร่กระจาย SAR ของสายอากาศแบบเปิดช่องที่ 50W

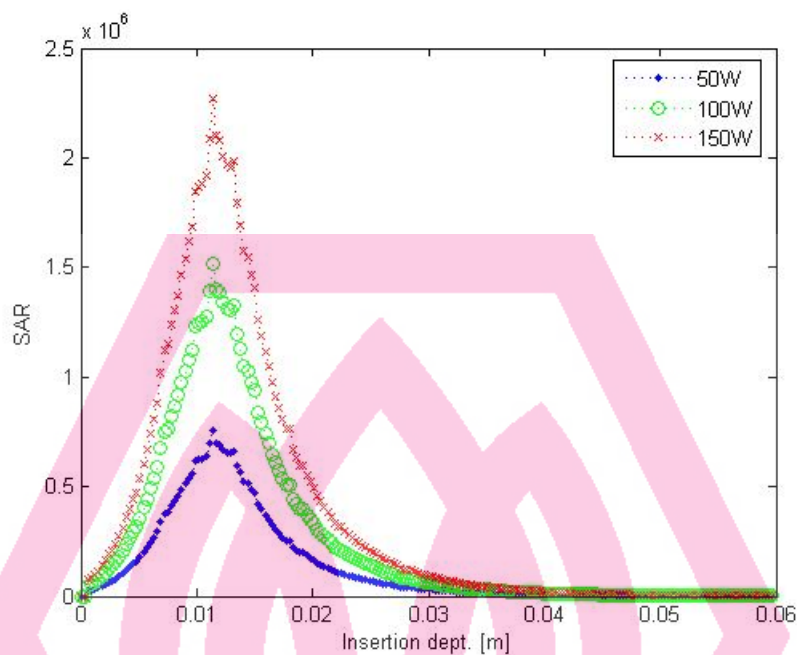
เวลา (วินาที)	ด้านบน	ด้านข้าง
30		
60		
90		
120		
150		
180		

ตาราง 4.24 ผลการแพร่กระจาย SAR ของสายอากาศแบบเปิดช่องที่ 100W

เวลา (วินาที)	ด้านบน	ด้านข้าง
30		
60		
90		
120		
150		
180		

ตาราง 4.25 ผลการแพร่กระจาย SAR ของสายอากาศแบบเปิดช่องที่ 150W

เวลา (วินาที)	ด้านบน	ด้านข้าง
30		
60		
90		
120		
150		
180		



ภาพประกอบ 4.23 แสดงค่า SAR ของสายอากาศแบบเปิดช่องที่กำลังส่งต่างๆ

จากผลการทดลองในตาราง 4.23 – ตาราง 4.25 แสดงผลของการแพร่กระจายค่า SAR ที่เกิดจากสนามไฟฟ้า มองจากด้านบน และด้านข้างของเนื้อเยื่อตับ ของสายอากาศแบบเปิดช่อง จะเห็นว่าสายอากาศมีการแพร่กระจายสนามไฟฟ้าที่คงที่ไม่ขึ้นกับเวลา และมีรูปทรงที่สอดคล้องกับการกระจายความร้อน และแสดงการเปรียบเทียบค่า SAR ของสายอากาศแบบเปิดช่อง ที่กำลังส่งต่างๆ ดังแสดงในภาพประกอบ 4.23

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการคำนวณผลของการกระจายความร้อน และการกระจายค่า SAR ที่เกิดจากสนามไฟฟ้าของสายอากาศแบบต่างๆ 4 แบบ ประกอบด้วย สายอากาศแบบปลายเปิด สายอากาศแบบปลายเป็นฉนวน สายอากาศแบบปลายเป็นโลหะ และสายอากาศแบบเปิดช่อง โดยใช้วิธีการคำนวณไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม Comsol Multiphysics ที่ความถี่ 2.45 GHz ที่กำลังส่ง 50W, 100W และ 150W ที่เวลา 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 วินาที

จากผลการทดลองจะเห็นว่าสายอากาศทุกแบบ มีการกระจายความร้อนที่เพิ่มขึ้นหากมีการเพิ่มกำลังส่ง หรือเพิ่มเวลา เนื่องจากค่าสนามไฟฟ้ามีการแพร่กระจายในเนื้อเยื่อ จะเกิดการสูญเสียพลังงานในเนื้อเยื่อ เพราะเนื้อเยื่อมีการดูดซับพลังงาน ซึ่งพลังงานที่สูญเสียไปจะกลายเป็นความร้อน สำหรับค่าการกระจาย SAR ที่เกิดจากสนามไฟฟ้านั้นจะไม่ขึ้นอยู่กับเวลา โดยสายอากาศแต่ละชนิดจะมีข้อดีข้อเสียที่สามารถสรุปได้ดังนี้

สายอากาศแบบปลายเปิด เป็นสายอากาศที่มีการกระจายของความร้อน ที่ตำแหน่งของปลายเปิด โดยเริ่มจากปลายสุดของสายอากาศ และมีการเพิ่มของการกระจายความร้อนอย่างต่อเนื่องหากมีการให้เวลามากขึ้น หรือเพิ่มกำลังส่ง จะทำให้ปริมาณของการทำลายเซลล์สูงขึ้น โดยสายอากาศแบบปลายเปิดนี้จะให้ปริมาณการทำลายเซลล์สูงที่สุด เมื่อเทียบกับสายอากาศชนิดอื่น แต่หากให้เวลาและกำลังงานที่มากจะทำให้เนื้อเยื่อบริเวณใกล้กับปลายสายอากาศมีความร้อนสูง จะเห็นว่าความร้อนที่เกิดขึ้นมีการกระจายตัวอย่างไม่สม่ำเสมอ และมีการกระจายความร้อนกลับมาที่ด้ามจับสูงดังแสดงในผลการทดลอง

สายอากาศแบบปลายเป็นฉนวน เป็นสายอากาศที่มีการกระจายของอุณหภูมิที่ตำแหน่งของปลายเปิด โดยเริ่มจากกลางสายอากาศบริเวณรอยต่อระหว่างตัวนำนอกกับส่วนที่เปิดของสายอากาศ และมีการเพิ่มของการกระจายอุณหภูมิอย่างต่อเนื่องหากมีการให้เวลามากขึ้น หรือเพิ่มกำลังส่ง และให้ปริมาณของการทำลายเซลล์สูงเป็นอันดับที่ 3 เทียบกับสายอากาศชนิดอื่น และมีการกระจายของความร้อนกลับมาที่ด้ามจับสูงดังแสดงในผลการทดลอง แต่มีคุณสมบัติที่ดีกว่าสายอากาศแบบปลายเปิด

สายอากาศแบบปลายเป็นโลหะ เป็นสายอากาศที่มีการกระจายของอุณหภูมิที่ตำแหน่งของปลายเปิด โดยเริ่มจากปลายสุดของสายอากาศ เช่นเดียวกับสายอากาศแบบปลายเปิด และมีการเพิ่มของการกระจายอุณหภูมิอย่างต่อเนื่องหากมีการให้เวลามากขึ้น หรือเพิ่มกำลังส่ง และให้ปริมาณ

ของการทำลายเซลล์สูงเป็นอันดับที่ 2 เทียบกับสายอากาศชนิดอื่น แต่หากให้เวลาและกำลังงานที่มากจะทำให้เนื้อเยื่อบริเวณใกล้กับปลายสายอากาศมีความร้อนสูง และมีการกระจายความร้อนกลับมาที่ด้ามจับต่ำกว่าสายอากาศ 2 แบบแรก ดังแสดงในผลการทดลอง

สายอากาศแบบเปิดช่อง เป็นสายอากาศที่มีการกระจายของอุณหภูมิที่ตำแหน่งของช่องเปิด และมีการเพิ่มของการกระจายอุณหภูมิอย่างสม่ำเสมอ และไม่เกิดปัญหาการกระจายความร้อนกลับมาที่ด้ามจับ มีรูปทรงที่สม่ำเสมอ แต่จะมีขนาดของปริมาตรการทำลายเซลล์ที่ต่ำที่สุดเทียบกับสายอากาศชนิดอื่น ดังแสดงในผลการทดลอง

ในการเลือกใช้งานการทำลายเซลล์จริงจะขึ้นอยู่กับ ขนาดและรูปทรงของมะเร็งในผู้ป่วยแต่ละคน ซึ่งจะมีรูปทรงที่ไม่แน่นอน และขึ้นอยู่กับลักษณะของแพทย์ โดยงานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอการทำงานของสายอากาศ 4 แบบ ที่ทำการปรับกำลังส่ง และเวลา เพื่อให้เห็นผลของการทำลายเซลล์เบื้องต้นประกอบการตัดสินใจของแพทย์ประกอบการรักษา

บรรณานุกรม

- A.S. Wright, F.T. Lee, Jr. and D.M. Mahvi. 2003. "Hepatic microwave ablation with multiple antennas results in synergistically larger zones of coagulation necrosis." **Ann sure Oncol.** 10 : 275-283.
- A.W. Guy. 1984. "History of Biological Effects and Medical Application of Microwave Energy." **IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques.** Mit-32, 9 : 1182-1199.
- D. Haemmerich, S.T. Sraelin, S. Tungjitkusolmun, F.T. Lee, Jr., D.M. Mahvi, and J.G. Webster. 2001. "Hepatic bipolar radio-frequency ablation between separated multiprong electrodes." **IEEE Trans Biomed Eng.** 48 : 1145-1152.
- G.M. Hahn. 1984. "Hyperthermia for the Engineer: A Short Biological Primer." **IEEE Transactions on Biomedical Engineering.** BME-31, 1 : 3-8.
- G. Schaller, J. Erb and R. Engelbrecht. 1996. "Field Simulation of Dipole Antenna for Interstitial Microwave Hyperthermia." **IEEE Transactions on Microwave Theory and Tech.** 44 : 887-895.
- H.H. Pennes. 1948. "Analysis of Tissue and Arterial Blood Temperature in Resting Forearm." **Journal of Applied Physiology.** 1 : 93-122.
- James C. Lin and Yu-Jin Wang. 1996. "The Cap-Choke Catheter Antenna for Microwave Ablation Treatment." **IEEE Transactions on Biomedical Engineering.** 43, 6 : 657-660.
- K. Saito, Y. Hayashi, H. Yoshimura, K. Ito. 2000. "Heating characteristics of array applicator composed of two coaxial-slot antennas for microwave coagulation therapy." **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques.** 48, 11 : 1800-1806.
- K. Saito, T. Taniguchi, H. Yoshimura and K. Ito. 2001. "Estimation of SAR Distribution of a Tip-Split Array Application for Microwave Coagulation Therapy Using the Finite Difference Method." **IECE Transactions Electronic.** E84-C : 948-954.
- L. Hamada, K. Saito, H. Yoshmura and K. Ito. 2000. "Dielectric-Loaded coaxial-slot antenna for interstitial microwave hyperthermia: longitudinal, control of heating patterns." **Int. J. Hyperthermia.** 16 : 219-229.

- M.G. Skinner, M.N. Iizuka, M.C. Kolios and M.D. Sherar. 1998. "A theoretical comparison of energy sources- microwave, ultrasound and laser – for interstitial thermal therapy." **Physics in Medicine and Biology**. 43 : 3535-3537.
- S. Labbonte, A. Blais, S.R Legault, H.O. Ali and L. Roy. 1996. "Monopole antennas for microwave catheter ablation." **IEEE Transactions on Microwave Theory and Tech.** 44 : 1832-1840.
- S. Pisa, M. Cavagnaro, P. Bernardi and J.C. Lin. 2001. "A 915-MHz antenna for microwave thermal ablation treatment: physical design computer modeling and experimental measurement." **IEEE Transactions on Biomedical Engineering**. 48 : 599-601.
- S.Pisa, M. Cavagnaro, E. Piuze, P. Bernardi and J.C. Lin. 2003. "Power density and temperature distributions produced by interstitial arrays of sleeved-slot antennas for hyperthermic cancer therapy." **IEEE Transactions on Microwave Theory and Tech.** 51, 12 : 2418-2426.
- W. Hurter, F. Reinbold and W.J. Lorenz. 1991. "A Dipole Antenna for Interstitial Microwave Hyperthermia." **IEEE Transactions on Microwave Theory and Tech.** 39 : 1048-1054.

ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ	นายเพชร นันทิวัดนา
วัน เดือน ปีเกิด	19 กรกฎาคม 2520
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	11/41 หมู่บ้านสราสินีเพลส ซ.พหลโยธิน 48 แยก 5 ถ.พหลโยธิน แขวงอนุสาวรีย์ เขตบางเขน จังหวัดกรุงเทพฯ 10220
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	อาจารย์ประจำ
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2543 วศ.บ. จากมหาวิทยาลัยศรีปทุม พ.ศ. 2549 วศ.ม. จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง