

การวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ สำหรับการศึกษาลักษณะการทำลายเซลล์มะเร็ง
ในตับแบบโพลาร์ และแบบไบโพลาร์ช่วงคลื่นความถี่วิทยุ

FINITE ELEMENT ANALYSES FOR A STUDY OF HEPATIC CANCER TISSUE
DESTRUCTION USING MONOPOLAR AND BIPOLEAR RADIO-FREQUENCY
ABLATION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2548

ISBN 974-15-1408-5

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การวิเคราะห์แรงไฟไนต์เอลิเมนต์ สำหรับการศึกษาลักษณะการทำลายเซลล์มะเร็ง
ในระดับแบบโมนโพลาร์ และแบบไบโพลาร์ช่วงคลื่นความถี่วิทยุ

FINITE ELEMENT ANALYSES FOR A STUDY OF HEPATIC CANCER TISSUE
DESTRUCTION USING MONOPOLAR AND BIPOLAR RADIO-FREQUENCY
ABLATION



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 60525
วัน,เดือน,ปี - 3 ก.ค. 2549

.b.....
.i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2548

ISBN 974-15-1408-5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**FINITE ELEMENT ANALYSES FOR A STUDY OF HEPATIC
CANCER TISSUE DESTRUCTION USING MONOPOLAR AND
BIPOLAR RADIO-FREQUENCY ABLATION**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRONICS ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2005

ISBN 974-15-1408-5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2005

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้เอาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการศึกษาลักษณะการทำลายเซลล์มะเร็งในระดับแบบโมนโพลาร์และแบบไบโพลาร์ ช่วงคลื่นความถี่วิทยุ
นักศึกษา	นายอาเขต บุญทาราม
รหัสนักศึกษา	45061133
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
พ.ศ.	2545
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.สุพันธุ์ ตั้งจิตกุศลรัตน์

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อวิเคราะห์ลักษณะการทำลายเซลล์มะเร็งในระดับแบบโมนโพลาร์ และแบบไบโพลาร์ช่วงคลื่นความถี่วิทยุ ซึ่งจะเปรียบเทียบให้เห็นถึง ผลกระทบของรอยแผลที่เกิดจากการจัดวางอิเล็กโทรดแบบต่างๆ และ ขอบเขตการทำลายเซลล์มะเร็งที่เกิดขึ้น ในการวิเคราะห์มีลักษณะการจำลองแบบ 3 มิติ จำลองลักษณะการวางอิเล็กโทรด 2 รูปแบบ ควบคุมเวลาในการจำลอง 600 วินาที และอุณหภูมิสูงสุดที่ 90 °C การทดลองที่ 1 เป็นการจำลองลักษณะการทำลายเซลล์มะเร็งแบบโมนโพลาร์ การทดลองที่ 2–5 เป็นการจำลองลักษณะการทำลายเซลล์มะเร็งแบบไบโพลาร์ ที่มีลักษณะการวางแบบขนานกัน การทดลองที่ 6–9 เป็นการจำลองลักษณะการทำลายเซลล์มะเร็งแบบไบโพลาร์ ที่มีลักษณะการวางอิเล็กโทรดที่ขนานกัน และไขว้กัน 90 องศา ผลการทดลองพบว่าลักษณะการสร้างรอยแผล ของอิเล็กโทรดแบบโมนโพลาร์จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 33 มิลลิเมตร ซึ่งจะมีขนาดที่เล็กกว่าแบบไบโพลาร์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 53 มิลลิเมตร (การทดลองที่ 2) ส่วนในการทดลองที่ 2–5 และ 6–9 จะเป็นการวางอิเล็กโทรดแบบไบโพลาร์ พิจารณาผลกระทบของระยะห่าง และลักษณะของรอยแผล ซึ่งในการทดลองที่ 4–5 และการทดลองที่ 8–9 ลักษณะของรอยแผลระหว่างอิเล็กโทรด จะไม่เชื่อมติดกัน และในการทดลองที่ 2–5 และ 6–9 แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของรอยแผล จากการวางอิเล็กโทรด

Thesis Title Finite element analyses for a study of hepatic cancer tissue destruction using Monopolar and bipolar radio-frequency ablation

Student Mr. Arket Boontaram

Student ID. 45061133

Degree Master of Engineering

Programme Electronic Engineer

Year 2005

Thesis Advisor Asst. Prof. Dr. Supan Tungjikusolmun

ABSTRACT

This abstract proposes finite element method to analyze the destruction cancer tissue of monopolar and bipolar using radio frequency. The comparison shows the impact of lesion occurred due to the various electrode placements and the destruction area of the cancer tissue. Three dimension types have been used during the analysis: 2 types of electrodes placement under 600 seconds at 90°C maximum temperature.

The first experiment was monopolar cancer tissue destruction, the 2-5 experiments were bipolar cancer tissue destruction parallely placed.

The 6-9 experiments were bipolar cancer tissue destruction with electrodes parallely and crossly placed at 90°C.

The experiments found the lesion developed by monopolar electrode had 33 mm. diameter which were smaller than the lesion developed by Bipolar which had 53 mm. diameter. (the second experiment) the 2-5 and 6-9 experiments were Bipolar electrode placement which showed the impact, distance and characteristics of the lesions.

The 4-5 and 8-9 experiments showed that the characteristics of the lesions between electrodes were not connected. In 2-5 and 6-9 experiments, there were some differences of the lesion characteristics developed by the placement of electrodes.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี ด้วยความช่วยเหลือจากบุคคลหลายๆท่าน ซึ่งผู้เขียนขอขอบคุณทุกๆ ท่านดังต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ ผ.ศ. ดร. สุพันธุ์ ตั้งจิตกุศลมั่น ผู้ซึ่งให้คำแนะนำและติดตามเกี่ยวกับงานวิจัยตลอดมา

ขอขอบพระคุณคุณพ่อและคุณแม่ ผู้ซึ่งคอยให้การอบรมสั่งสอน เลี้ยงดู สนับสนุนการศึกษา ตลอดจนให้กำลังใจเสมอมา

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

อาเขต บุญทาราม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	IV
สารบัญ.....	V
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	2
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	3
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	3
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	4
1.6 โครงสร้างวิทยานิพนธ์.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีการกระจายความร้อนในเนื้อเยื่อ.....	5
2.1 พื้นฐานการกระจายความร้อนภายในเนื้อเยื่อ.....	5
2.2 สมการความร้อนทางชีววิทยา (Bioheat Equation).....	6
2.2.1 คุณสมบัติ สภาพความนำความร้อน สภาพความนำไฟฟ้า และความร้อน จำเพาะ บนแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์.....	7
2.2.1.1 คุณสมบัติสภาพความนำไฟฟ้า.....	8
2.2.1.2 คุณสมบัติสภาพความนำความร้อน.....	9
2.2.1.3 คุณสมบัติความร้อนจำเพาะ.....	10
2.2.2 พิจารณาผลของขนาดแบบจำลองที่แตกต่างกัน.....	11
2.2.3 พิจารณาผลกระทบของอุณหภูมิภายในเนื้อเยื่อ เนื่องจากระยะทางระหว่างอิม เล็กโทรดและกราวด์.....	13
บทที่ 3 ทฤษฎีการใช้วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์.....	15
3.1 ทฤษฎีการใช้วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์.....	15
3.2 การแก้ปัญหาทางความร้อนและไฟฟ้าแบบ 3 มิติ.....	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.1 การแก้ปัญหาทางความร้อน.....	16
3.2.2 การแก้ปัญหาทางไฟฟ้า.....	19
3.2 ทฤษฎีการใช้วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในการหาผลเฉลยของแบบจำลอง.....	22
3.3 การใช้โปรแกรม ANSYS สร้างแบบจำลอง.....	23
บทที่ 4 การประมวลผลการทดลองวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม ANSYS.....	24
4.1 การกำหนดค่าคงที่ต่างๆ	24
4.2 การออกแบบแบบจำลอง	25
4.3 การ MESH แบบจำลอง	26
4.4 การกำหนดขอบเขตบนแบบจำลอง	29
4.5 การประมวลผลข้อมูลบนแบบจำลอง.....	30
บทที่ 5 ผลการทดลองแบบจำลองคำนวณโดยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์.....	33
5.1 ผลการทดลองแบบจำลองแบบโมโนโพลาร์.....	34
5.2 ผลการทดลองแบบจำลองไบโพลาร์ (แบบขนาน)	34
5.2.1 แบบจำลองที่ 2 การวางอิเล็กโทรดแบบไบโพลาร์แบบขนาน และมีระยะห่างการวาง 20 มิลลิเมตร.....	34
5.2.2 แบบจำลองที่ 3 การวางอิเล็กโทรดแบบไบโพลาร์แบบขนาน และมีระยะห่างการวาง 30 มิลลิเมตร.....	35
5.2.3 แบบจำลองที่ 4 การวางอิเล็กโทรดแบบไบโพลาร์แบบขนาน และมีระยะห่างการวาง 40 มิลลิเมตร.....	36
5.2.4 แบบจำลองที่ 5 การวางอิเล็กโทรดแบบไบโพลาร์แบบขนาน และมีระยะห่างการวาง 50 มิลลิเมตร.....	37
5.3 ผลการทดลองแบบจำลองไบโพลาร์ (แบบขนานและไขว้กัน 90 องศา)	38
5.3.1 แบบจำลองที่ 6 การวางอิเล็กโทรดแบบไบโพลาร์แบบไขว้กัน 90 องศา และมีระยะห่างการวาง 20 มิลลิเมตร.....	38
5.3.2 แบบจำลองที่ 7 การวางอิเล็กโทรดแบบไบโพลาร์แบบไขว้กัน 90 องศา และมีระยะห่างการวาง 30 มิลลิเมตร.....	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.3.3 แบบจำลองที่ 8 การวางอิเล็กโทรดแบบไบโพลาร์แบบไขว้กัน 90 องศา และมีระยะห่างการวาง 40 มิลลิเมตร.....	40
5.3.4 แบบจำลองที่ 9 การวางอิเล็กโทรดแบบไบโพลาร์แบบไขว้กัน 90 องศา และมีระยะห่างการวาง 50 มิลลิเมตร.....	41
5.4 ขนาดรอยแผลที่เกิดขึ้นในส่วนการทดลองที่ 1-5.....	42
5.5 ปริมาตรของรอยแผลและปริมาตรรวมของระบบ.....	43
บทที่ 6 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	44
6.1 สรุปผลงานวิจัย.....	44
6.2 ข้อเสนอแนะในการพัฒนาต่อไป.....	45
เอกสารอ้างอิง.....	46
ภาคผนวก ก ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....	49
ประวัติผู้เขียน.....	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงค่าสภาพความนำไฟฟ้าที่ถูกควบคุมกำลังวัตต์ที่ 7 วัตต์.....	8
2.2 แสดงค่าสภาพความนำไฟฟ้าที่ถูกควบคุมอุณหภูมิในระบบ 70 องศาเซลเซียส.....	9
2.3 แสดงค่าสภาพความนำความร้อนที่ถูกควบคุมกำลังวัตต์ที่ 7 วัตต์.....	9
2.4 แสดงค่าสภาพความนำความร้อนที่ถูกควบคุมอุณหภูมิในระบบ 70 องศาเซลเซียส.....	10
2.5 แสดงค่าความร้อนจำเพาะที่ถูกควบคุมกำลังวัตต์ที่ 7 วัตต์.....	10
2.6 แสดงค่าความร้อนจำเพาะที่ถูกควบคุมอุณหภูมิในระบบ 70 องศาเซลเซียส.....	11
4.1 คุณสมบัติจำเพาะของวัสดุที่ความถี่ 500kHz.....	25
4.2 แสดงจำนวนของเอลิเมนต์ และ โหนด ภายในการทดลองที่ 1-9.....	30
5.1 ตารางแสดงขนาดของรอยแผลที่เกิดขึ้นที่อิเล็กโทรด A.....	42
5.2 ตารางแสดงขนาดของรอยแผลที่เกิดขึ้นที่อิเล็กโทรด B.....	42
5.3 แสดงปริมาตรของรอยแผล และปริมาตรรวมของระบบ.....	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 กราฟแสดงผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์มะเร็ง.....	6
2.2 แสดงลักษณะเส้นผ่านศูนย์กลางส่วนต่างๆของรอยแผล.....	8
2.3 ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางที่เปลี่ยนแปลง.....	11
2.4 แสดงลักษณะการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าที่ออกจากอิเล็กโทรดคู่ผิววนนอกของเนื้อเยื่อ ปกติ.....	12
2.5 แสดงผลการทดลอง ผลกระทบของขนาดที่แตกต่างกันของแบบจำลอง.....	13
2.6 แสดงภาพตัดขวางรูปแบบการวางอิเล็กโทรด บนเซลล์มะเร็งที่มีลักษณะเอียงขวาและ ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เวลา 600 วินาที.....	14
2.7 แสดงภาพตัดขวางรูปแบบการวางอิเล็กโทรด บนเซลล์มะเร็งที่มีการวางบนจุดศูนย์กลาง ของแบบจำลอง และลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เวลา 600 วินาที.....	14
3.1 แสดงแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ถูกแบ่งออกเป็นเอลิเมนต์และ โหนด.....	15
3.2 การแบ่งรูปร่างลักษณะของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์แบบต่างๆ.....	15
3.3 ลักษณะ โครงสร้างแบบ Solid69.....	19
3.4 ลักษณะ โครงสร้างแบบ Solid69 ที่ถูกใช้ในการคำนวณ.....	23
3.5 โครงสร้างการใช้โปรแกรม ANSYS สร้างแบบจำลอง.....	23
4.1 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของความนำไฟฟ้าเนื้อเยื่อดับปกติ และเนื้อเยื่อดับที่เป็นมะเร็ง.....	25
4.2 ขนาดของอิเล็กโทรด และค้ำจับ.....	26
4.3 ขนาดของเซลล์มะเร็งดับและ เซลล์ปกติ.....	26
4.4 การออกแบบแบบจำลองแบบ โมโน โพลาร์.....	27
4.5 การออกแบบแบบจำลองแบบไบโพลาร์ (อิเล็กโทรดขนานกัน).....	27
4.6 การออกแบบแบบจำลองแบบไบโพลาร์ (อิเล็กโทรดขนานและไขว้กัน 90 องศา).....	28
4.7 การแสดงการ MESH แบบจำลองแบบ โมโน โพลาร์.....	29
4.8 แสดงการ MESH แบบจำลองแบบไบโพลาร์ (อิเล็กโทรดขนานกัน).....	29
4.9 แสดงการ MESH แบบจำลองแบบไบโพลาร์(อิเล็กโทรดขนานกันและไขว้กัน 90 องศา).	30
4.10 แสดงการกำหนดเงื่อนไขและขอบเขตของอิเล็กโทรดแบบ โมโน โพลาร์.....	31
4.11 แสดงการกำหนดเงื่อนไขและขอบเขตของอิเล็กโทรดแบบไบโพลาร์ (อิเล็กโทรดขนานกัน).....	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
4.12 การกำหนดเงื่อนไขและขอบเขตของอิเล็กทรอนิกส์แบบไบโพลาร์ (ขนานกันและไขว้กัน 90 องศา)	31
5.1 ภาพแสดงส่วนตัดขวางในแนวต่างๆ เพื่อใช้ดูลักษณะของรอยแผลที่ถูกทำลาย.....	33
5.2 ภาพแสดงส่วนตัดขวางในแนวต่างๆ เพื่อใช้ดูลักษณะของรอยแผลที่ถูกทำลาย.....	33
5.3 แสดงภาพตัดขวางส่วนต่างๆ และลักษณะของรอยแผล 3 มิติ ที่อุณหภูมิมากกว่า 50 °C (การทดลองที่ 1).....	34
5.4 แสดงภาพตัดขวางส่วนต่างๆ และลักษณะของรอยแผล 3 มิติ ที่อุณหภูมิมากกว่า 50 °C (การทดลองที่ 2).....	35
5.5 แสดงภาพตัดขวางส่วนต่างๆ และลักษณะของรอยแผล 3 มิติ ที่อุณหภูมิมากกว่า 50 °C (การทดลองที่ 3).....	36
5.6 แสดงภาพตัดขวางส่วนต่างๆ และลักษณะของรอยแผล 3 มิติ ที่อุณหภูมิมากกว่า 50 °C (การทดลองที่ 4).....	37
5.7 แสดงภาพตัดขวางส่วนต่างๆ และลักษณะของรอยแผล 3 มิติ ที่อุณหภูมิมากกว่า 50 °C (การทดลองที่ 5).....	38
5.8 แสดงภาพตัดขวางส่วนต่างๆ และลักษณะของรอยแผล 3 มิติ ที่อุณหภูมิมากกว่า 50 °C (การทดลองที่ 6).....	39
5.9 แสดงภาพตัดขวางส่วนต่างๆ และลักษณะของรอยแผล 3 มิติ ที่อุณหภูมิมากกว่า 50 °C (การทดลองที่ 7).....	40
5.10 แสดงภาพตัดขวางส่วนต่างๆ และลักษณะของรอยแผล 3 มิติ ที่อุณหภูมิมากกว่า 50 °C (การทดลองที่ 8).....	41
5.11 แสดงภาพตัดขวางส่วนต่างๆ และลักษณะของรอยแผล 3 มิติ ที่อุณหภูมิมากกว่า 50 °C (การทดลองที่ 9).....	41
5.12 รูปแบบจำลองแสดงขนาดรอบแผลที่เกิดขึ้นในการทดลองส่วนที่ 1- 5.....	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

ในปัจจุบันผู้ป่วยที่เป็นมะเร็ง ที่เกิดขึ้นภายในตับ มีอัตราการตายมากกว่า 1 ล้านคนต่อปี ทั่วโลก วิธีการในการรักษาจะแบ่งได้หลายๆแบบ ซึ่งสามารถยกตัวอย่างได้คือ [1–2] การฉายรังสี การใช้เคมีบำบัด การใช้ความเย็น การใช้ความร้อน การใช้คลื่นไมโครเวฟ การผ่าตัด การใช้ความร้อนร่วมกับการฉายรังสี [3–4] วิธีการผ่าตัดเอาก้อนเนื้อมะเร็งออก เป็นรูปแบบหนึ่งที่ทำให้ผลการรักษาที่ดี แต่ในบางกรณีไม่สามารถทำการผ่าตัดออกได้ อันเนื่องจากผู้ป่วยร่างกายไม่สมบูรณ์ มีโรคแทรกซ้อนอายุมาก หรือมีโรคอื่น ๆ รวมอยู่ด้วย การใช้ความร้อนเป็นวิธีการหนึ่ง ที่สามารถใช้ได้กับผู้ป่วยที่มีลักษณะดังกล่าว การใช้ความร้อนจะทำให้ก้อนเซลล์มะเร็งที่ได้รับความร้อนมีการฝ่อลง และสามารถเป็นการยับยั้งมิให้โรคดำเนินไปเร็วขึ้น อาการจะทุเลาเบาบางลง แต่มิได้หายขาดเลย [5–6] การใช้วิธีการนี้ได้ถูกใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยลักษณะบาดแผลที่เกิดขึ้น มีขนาดที่เล็กมาก และผู้ป่วยมีอัตราการรอดสูง อัตราในการรักษาถูก การรักษาในรูปแบบใช้คลื่นความถี่วิทยุ (Radiofrequency Ablation) [7] เป็นลักษณะการรักษาโดยการสร้างความร้อนย่านความถี่ช่วง 375 – 500 kHz วิธีการรักษาในลักษณะนี้ ได้มีผู้นำเสนอหลายๆ เทคนิค [8] เช่น Monopolar Electrode Techniques, Multiprobe Arrays, Bipolar Arrays, Saline Solution Injection during RF Ablation, Internally Cooled Electrodes, Clusterea Electrodes and Pulsed Application of RF วิธีการใช้เทคนิคแบบโมโนโพลาร์ ถูกนิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยปกติการใช้เทคนิคแบบโมโนโพลาร์ จะได้ขนาดรอยแผลที่เกิดขึ้น บนอวัยวะโรคกว้างประมาณ 16 มิลลิเมตร [9] ขนาดของรอยแผลสามารถขยายให้กว้างขึ้นได้ โดยใช้ น้ำเกลือช่วยในการนำพาความร้อน และไม่ให้เกิดความต้านทานสูงระหว่างเนื้อเยื่อและ อิเล็กโทรด [10] ผลของการใช้เทคนิคนี้สามารถทำลายเซลล์มะเร็งที่เกิดในระยะแรก และมีขนาดใหญ่อยู่ในช่วง 5-30 มิลลิเมตร [11] วิธีการใช้เทคนิคแบบไบโพลาร์ ถูกใช้ในการแก้ไขปัญหา ถ้าลักษณะของเซลล์มะเร็งมีขนาดใหญ่เกิน 30 มิลลิเมตรขึ้นไป [12] ในการใช้วิธีการรักษาด้วยอิเล็กโทรดแบบ Berchtold® electrodes ในแบบโมโนโพลาร์ และแบบไบโพลาร์ ลักษณะการเกิดรอยแผลที่ได้บนเนื้อเยื่อตับจะมีลักษณะ ellipsoidal [13] วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ได้ถูกนำมาใช้เพื่อ าบลักษณะของรอยแผลที่เกิดจากอิเล็กโทรดก่อนการทดลองจริง เช่น การใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อจำลองการฆ่าเซลล์มะเร็งในตับด้วยคลื่นไมโครเวฟ [14] การใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อจำลองการฆ่าเซลล์มะเร็งในหัวใจ [15] การใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อจำลองการฆ่าเซลล์มะเร็งในตับด้วยการใช้อิเล็กโทรดแบบ Expandable needle [16] การใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อจำลองการฆ่าเซลล์มะเร็งในตับด้วยการใช้อิเล็กโทรดแบบ Multi-Expandable needle [17] ในงานวิจัยนี้ได้ นำเสนอการใช้วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ จำลองเพื่อคัดค่าตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อระบบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำมาใช้งานจริงต้องดำเนินการตามกฎหมายว่าด้วยลิขสิทธิ์ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เช่น ลักษณะการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิในเนื้อเยื่อ ทำการวิเคราะห์ ในส่วนการทำลายเซลล์มะเร็งในระดับ แบบโมโนโพลาร์และแบบไบโพลาร์ หลักการใช้ความถี่ย่านความถี่วิทยุผ่านอิเล็กโทรด จะทำให้เกิดความร้อนขึ้นบริเวณก้อนเซลล์มะเร็ง ซึ่งรูปแบบอิเล็กโทรดโมโนโพลาร์ เราจะเปรียบเสมือนร่างกายเป็นกราวด์ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้น จะสามารถแพร่ออกมารอบๆ ตัวอิเล็กโทรด โดยที่เราไม่สามารถกำหนดลักษณะการทำลายเนื้อเยื่อที่เกิดขึ้นได้

วิธีการทำลายเซลล์มะเร็งแบบไบโพลาร์ เป็นวิธีการที่นำมาแก้ปัญหาแบบการทำลายก้อนเซลล์มะเร็งขนาดที่เล็กในแบบโมโนโพลาร์ โดยที่แบบไบโพลาร์จะสามารถกำหนดรูปแบบการทำลายได้อย่างแม่นยำ ได้ขนาดรอยแผลที่ใหญ่กว่าแบบโมโนโพลาร์ และสามารถทำลายเซลล์มะเร็งได้อย่างเฉพาะเจาะจง ที่เป็นเช่นนั้นเพราะมีลักษณะการใช้อิเล็กโทรดสองอัน ซึ่งอิเล็กโทรดตัวที่หนึ่งจะให้แรงดันไฟฟ้า และอิเล็กโทรดตัวที่สองจะให้กราวด์ ความร้อนที่เกิดขึ้นจะเกิดขึ้นรอบๆตัวของอิเล็กโทรดทั้งสอง การนำวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้ในการจำลองผล เป็นรูปแบบการหาผลเฉลยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบการประมาณค่า ซึ่งวิธีการนี้ได้ถูกใช้อย่างแพร่หลาย การนำวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้วิเคราะห์และออกแบบเครื่องมือทางการแพทย์ เป็นลักษณะที่ทำให้เราสามารถประหยัดค่าใช้จ่าย และสามารถประเมินผลการทดลองได้อย่างคร่าวๆ ก่อนการทดลองปฏิบัติจริง

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัญหาที่ 1 ในปัจจุบันการศึกษาขอบเขตของเซลล์มะเร็งในระดับที่ถูกทำลาย ด้วยวิธีการแผ่รังสีความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ จะเป็นลักษณะงานวิจัยที่ทดลองกับเนื้อเยื่อจริง ผลการทดลองที่ได้ จะไม่สามารถเห็นลักษณะบางประการ ที่เกิดขึ้นภายในเนื้อเยื่อดังการทดลอง แต่จะเห็นลักษณะของขอบเขตที่ถูกทำลายไปแล้วหลังการทดลอง ซึ่งลักษณะบางประการที่ไม่สามารถมองเห็นได้เช่น คุณสมบัติการกระจายตัวของกระแสไฟฟ้า รูปแบบการกระจายตัวของอุณหภูมิ ลักษณะของการเกิดรอยแผล อุณหภูมิที่จุดต่างๆในเนื้อเยื่อ ซึ่งคุณสมบัติที่สำคัญต่างๆนี้ สามารถที่จะเห็นได้จากการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การสร้างแบบจำลองด้วยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ จะเป็นวิธีการที่สามารถใช้มองปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นได้อย่างครบถ้วนก่อนการทดลองจริง ซึ่งเป็นวิธีการที่ประหยัดเวลา และค่าใช้จ่ายอย่างมาก การนำวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ช่วยในการวิเคราะห์แบบจำลอง ทำให้เราสามารถออกแบบอิเล็กโทรดลักษณะใหม่ๆ หรือเรียนรู้รูปแบบการวางอิเล็กโทรดในลักษณะต่างๆ และแก้ไขปัญหาต่างๆที่ยุ่งยากได้

ปัญหาที่ 2 เป็นลักษณะการเปรียบเทียบ ระหว่างรอยแผลที่เกิดขึ้นจากอิเล็กโทรดแบบโมนโพลาร์ และอิเล็กโทรดแบบไบโพลาร์ โดยจะพิจารณาถึงข้อจำกัดของรอยแผลที่เกิดขึ้นในอิเล็กโทรดแบบโมนโพลาร์ และการแก้ไขข้อจำกัดนี้โดยการใช้อิเล็กโทรดแบบไบโพลาร์

ปัญหาที่ 3 เป็นลักษณะเปรียบเทียบข้อจำกัด ของรอยแผลที่เกิดขึ้น โดยเกิดจากผลกระทบของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดทั้ง 2 ในแบบจำลองอิเล็กโทรดแบบไบโพลาร์

ปัญหาที่ 4 เป็นลักษณะการใช้แบบจำลองอิเล็กโทรดแบบไบโพลาร์ เพื่อดูรูปแบบของรอยแผลที่เกิดขึ้นจากการวางอิเล็กโทรดที่แตกต่างกัน

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

- เพื่อศึกษาวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ วิเคราะห์ปัญหาการกระจายความร้อนในเนื้อเยื่อ
- เพื่อศึกษาการกระจายตัวของความร้อนที่เกิดขึ้นในเนื้อเยื่อ แบบจำลองอิเล็กโทรดแบบโมนโพลาร์ และแบบจำลองอิเล็กโทรดแบบไบโพลาร์
- เพื่อศึกษาลักษณะของรอยแผลที่เกิดขึ้น จากแบบจำลองอิเล็กโทรดแบบไบโพลาร์ โดยพิจารณาถึงผลของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด
- เพื่อศึกษาลักษณะของรอยแผลที่เกิดขึ้น จากแบบจำลองอิเล็กโทรดแบบไบโพลาร์ โดยพิจารณาถึงผลของการวางอิเล็กโทรดที่แตกต่างกัน

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

การนำวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ แก้ไขปัญหาทางคณิตศาสตร์ ได้แม่นยำหรือไม่ ขึ้นอยู่กับสมการทางคณิตศาสตร์ และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ถูกใส่เข้าในการคำนวณ การใช้วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ทางการแพทย์ เป็นลักษณะการใช้อีกแบบหนึ่ง ในงานวิจัยนี้ จะใช้วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการศึกษาการกระจายตัวของความร้อนที่ถูกส่งออกจากอิเล็กโทรดสู่เนื้อเยื่อ ซึ่งในระบบได้ออกแบบแบบจำลองที่มีลักษณะเหมือนกัน

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

ตามวัตถุประสงค์ของการใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ วิเคราะห์การกระจายตัวของความร้อนที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในเนื้อเยื่อ จะเป็นไปตาม สมการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความร้อนทางชีววิทยา (Bioheat Equation) ซึ่งจะใช้ในการจำลองลักษณะการทำลายเนื้อเยื่อที่ผิดปกติในแบบโมโนโพลาร์ และแบบไบโพลาร์

1.5 ขอบเขตการวิจัย

ในงานวิจัยได้กำหนดขอบเขต การศึกษาความถูกต้องของการใช้วิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการวิเคราะห์แบบจำลองที่สร้างขึ้น ศึกษาลักษณะการกระจายความร้อนของอิเล็กโทรดแบบโมโนโพลาร์ และแบบไบโพลาร์ ศึกษาผลกระทบของระยะห่างจากการวางอิเล็กโทรดแบบไบโพลาร์ และลักษณะของการวางอิเล็กโทรดที่แตกต่างกัน

1.6 โครงสร้างวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะแบ่งเนื้อหาเป็น 6 บท ในแต่ละบทจะมีเนื้อหาดังต่อไปนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความจำเป็นและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมุติฐาน

แนวคิดของงานวิจัย และขอบเขตของงานวิจัย

บทที่ 2 กล่าวถึงแนวคิดและหลักการใช้วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิจัย โดยทำการศึกษาสมการที่ใช้ในการคำนวณแบบจำลอง การออกแบบจำลอง การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของระบบ

บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎี และหลักการกระจายความร้อนภายในเนื้อเยื่อ

บทที่ 4 อธิบาย การประมวลผล การทดลองวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการสร้างแบบจำลอง การกำหนดเงื่อนไขในการคำนวณ การประมวลผลแบบจำลอง การแสดงลักษณะของผลการจำลอง

บทที่ 5 แสดงถึงผลการทดลอง ในการวิเคราะห์แบบจำลองด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ ทำการทดลองใน 3 รูปแบบ คือ การจำลองการกระจายตัวของความร้อนภายในเนื้อเยื่อ ด้วยอิเล็กโทรดแบบโมโนโพลาร์ อิเล็กโทรดแบบไบโพลาร์ที่มีลักษณะขนานกัน อิเล็กโทรดแบบไบโพลาร์ ที่มีลักษณะขนานและไขว้กัน 90 องศา

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะแนวทางในการดำเนินงานวิจัยต่อไป

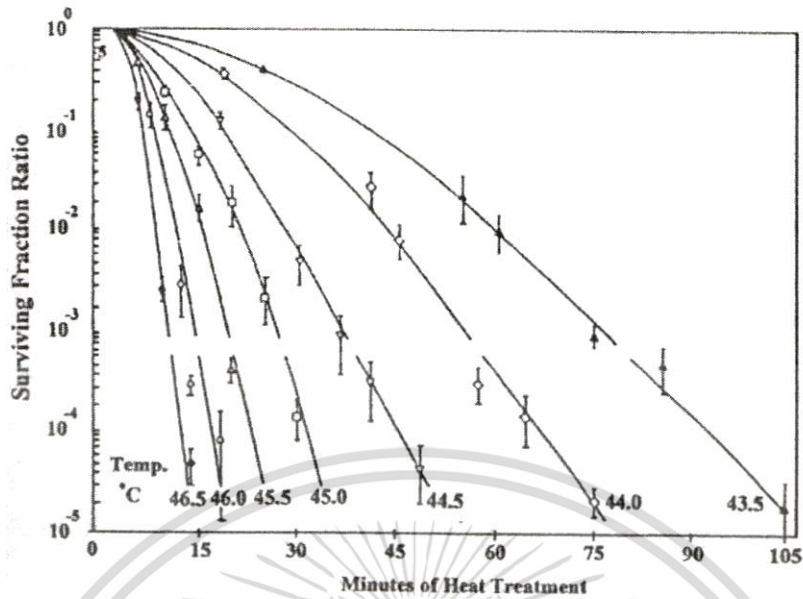
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีการกระจายความร้อนในเนื้อเยื่อ

2.1 พื้นฐานการกระจายความร้อนภายในเนื้อเยื่อ

การใช้ความร้อนในการรักษาโรค เป็นการรักษาที่ทำให้อุณหภูมิ ณ.บริเวณนั้น สูงขึ้นอยู่ในช่วง 41–50 °C [19–20] เซลล์ที่อยู่บริเวณนั้นๆ จะถูกผลกระทบ และมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับอุณหภูมิ การใช้ความร้อนในการรักษาโรคมะเร็ง ได้มีการพัฒนาเทคนิค ที่เรียกว่า Hyperthermal cancer therapy ซึ่งมีการเริ่มใช้มาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1960 การรักษาโรคมะเร็งโดยใช้ความร้อน เป็นรูปแบบการรักษาโรคมะเร็งแบบใหม่ ซึ่งมีพื้นฐาน และหลักการทางชีววิทยาที่สามารถพิสูจน์ ทดลอง และอธิบายได้ ซึ่งในปัจจุบันการรักษาโรคมะเร็ง โดยใช้ความร้อนนี้สามารถรักษาโรคมะเร็งชนิดต่างๆ ได้ทั่วร่างกาย และได้ผลการรักษาที่น่าสนใจ การรักษาโรคมะเร็งด้วยความร้อน อาศัยหลักการให้ความร้อนกับเซลล์มะเร็งอยู่ในช่วง 41–50 °C และรักษาระดับของอุณหภูมิไว้ให้คงที่ พื้นฐานของปรากฏการณ์ทางชีววิทยาสำหรับการรักษาโรคมะเร็งด้วยความร้อน จะมีอยู่สองปริมาณที่มีความสำคัญในการรักษา คือ อุณหภูมิ และเวลาในการให้ความร้อน ซึ่งตามรูปที่ 2.1 จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาที่ส่งผลต่อปริมาณเซลล์มะเร็งที่รอดตาย จากรูปที่ 2.1 เมื่อให้อุณหภูมิสูงแก่เซลล์มะเร็ง ในช่วงเวลาเริ่มต้นเซลล์มะเร็งจะสูญเสียเป็นจำนวนมาก แต่เมื่อมีการลดอุณหภูมิที่ให้แก่เซลล์มะเร็งผลกระทบที่เกิดขึ้นคือ ต้องใช้เวลามากขึ้นเพื่อทำให้เซลล์มะเร็งตาย ในการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงๆแก่เซลล์ จำนวนเซลล์จะเกิดการสูญเสียมาก และจะทำให้เซลล์ปกติที่อยู่รอบๆ เซลล์มะเร็งได้รับความเสียหายได้เช่นกัน ดังนั้นในการเพิ่มอุณหภูมิให้เหมาะสมนั้น สามารถทำลายเซลล์มะเร็งได้จำนวนมาก และไม่เป็นอันตรายแก่เซลล์ปกติ



รูปที่ 2.1 กราฟแสดงผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์มะเร็ง [18]

ในการใช้วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ วิเคราะห์ผลการจำลองที่เกิดขึ้นภายในระบบ เป็นวิธีการที่ถูกใช้ในงานวิจัยนี้ ซึ่งวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ จะถูกใช้ในการวิเคราะห์ ผลตอบสนองทางด้านอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในก้อนเนื้อเยื่อตับที่มีเซลล์ที่ผิดปกติอยู่ภายใน ในงานวิจัยจะกล่าวถึงการวิเคราะห์ลักษณะของรอยแผล ที่ขึ้นกับรูปแบบการวางของอิเล็กโทรดแบบโมโนโพลาร์ และการวางอิเล็กโทรดแบบไบโพลาร์ ในการสร้างแบบจำลอง [14–15] และวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ มีลักษณะการวิเคราะห์ในรูปแบบ 3 มิติ การสร้างแบบจำลองจะมีส่วนประกอบต่างๆ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้ 4 ส่วน คือ อิเล็กโทรด คัมจับ ก้อนเซลล์มะเร็งตับ และก้อนเซลล์ปกติ

2.2 สมการทางความร้อนทางชีววิทยา (Bioheat Equation)

ในรูปแบบสมการการกระจายตัวของความร้อน [21–22] ใช้ในการวิเคราะห์การกระจายความร้อน ภายในเนื้อเยื่อช่วงคลื่นความถี่วิทยุ ภายในสมการ ได้พิจารณาถึงกระแสที่ไหลผ่านภายในเนื้อเยื่อ พลังงานที่ถูกเก็บสะสมในรูปแบบของความร้อน การกระจายตัวของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านจากตัวอิเล็กโทรดลงสู่เนื้อเยื่อตับ การกระจายตัวของกระแสไฟฟ้า และการเก็บสะสมพลังงานในช่วงความถี่วิทยุ การแปรพลังงานที่สะสมเป็นรูปแบบของความร้อนที่กระจายตัวออกไปรอบๆ เนื้อเยื่อ ซึ่งรูปแบบของสมการที่ครอบคลุมตัวแปรต่างๆ เกิดขึ้นในเนื้อเยื่อตับ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot k \nabla T + J \cdot E - h_{b1}(T - T_{b1}) + Q_m \quad (2.1)$$

$$h_{b1} = \rho_{b1} c_{b1} \omega_{b1} \quad (2.2)$$

ρ = Density (kg/m³)

C = Specific heat (J/kg·K)

k = Thermal conductivity (W/m·K)

J = Current density (A/m²)

E = Electric field intensity (V/m)

T_{b1} = Temperature of the blood (assumed to be 37 °C)

ρ_{b1} = The blood density (kg/m³)

c_{b1} = Specific heat of the blood (J/kg·K)

ω_{b1} = blood perfusion (1/s)

h_{b1} = The convective heat transfer coefficient accounting for blood perfusion in the model

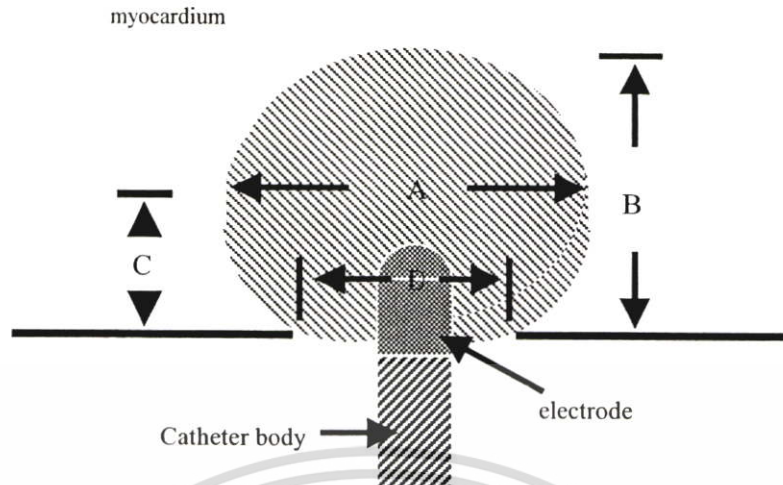
Q_m = The energy generated by the metabolic processes (W/m³)

จากสมการ Bioheat ที่ถูกนำมาใช้ ได้ละทิ้งค่าตัวแปรจำนวน 2 ตัว คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากเลือดที่ไหลซึมอยู่ในเนื้อเยื่อ (h_{b1}) และ พลังงานที่สร้างขึ้นโดยกระบวนการเมตาโบลิซึมของเม็ดเลือด (Q_m) ซึ่งค่าตัวแปรทั้ง 2 นี้ จะถือว่ามิต้าน้อยมาก เมื่อเทียบกับปริมาณ $J \cdot E$

2.2.1 คุณสมบัติ สภาพความนำความร้อน สภาพความนำไฟฟ้า และ ความร้อนจำเพาะ บนแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เนื้อเยื่อหัวใจ

จากงานวิจัยที่ได้กล่าวถึงนี้ [23] จะกล่าวถึงความถูกต้องของค่าคุณสมบัติ สภาพความนำความร้อน (Thermal conductivity) สภาพความนำไฟฟ้า (Electric conductivity) และ ความร้อนจำเพาะ (Specific heat capacity) ที่ถูกใช้ในวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ ในงานวิจัยได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 กรณี ในกรณีที่ 1 จะทำการทดลองโดยการควบคุมกำลังวัตต์ ที่ 7 วัตต์ ในกรณีที่ 2 จะทำการควบคุมอุณหภูมิในระบบไม่เกิน 70 °C ช่วงเวลาการทดลอง 60 วินาที ในแบบจำลองดังรูปที่ 2.2 เป็นแบบจำลองเนื้อเยื่อหัวใจ A แสดงเส้นผ่านศูนย์กลางสูงสุดของรอยแผล B แสดงความลึกสูงสุดของรอยแผล C แสดงความลึกจากเส้นผ่านศูนย์กลางสูงสุดของรอยแผล D เส้นผ่านศูนย์กลางผิวของรอยแผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะเส้นผ่านศูนย์กลางส่วนต่างๆ ของรอยแผล

2.2.1.1 คุณสมบัติสภาพความนำไฟฟ้า

วิธีการทดลองคุณสมบัติของสภาพความนำไฟฟ้า ทำการทดลองเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบ 4 กรณี กรณีที่ 1 กำหนดค่าสภาพความนำไฟฟ้า = 0.5 S/m และเพิ่มค่าขึ้นตามค่าอุณหภูมิ 2%/°C (control) กรณีที่ 2 กำหนดค่าสภาพความนำไฟฟ้าที่ไม่เปลี่ยนแปลง (fixed) กรณีที่ 3 เพิ่มค่าสภาพความนำไฟฟ้าขึ้น 50% (+50%) และในกรณีสุดท้าย ลดค่าสภาพความนำไฟฟ้าลง 50% (-50%)

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าสภาพความนำไฟฟ้าที่ถูกควบคุมกำลังวัตต์ที่ 7 วัตต์

Results	A	B	C	D	V	T_{max}	D_{max}	T_{tip}	ΔV
mm	mm	mm	mm	mm	mm ³	°C	mm	°C	
Control	9.6	6.7	2.7	4.4	207.7	94.7	0.78	78.6	—
Fixed	8.3	5.8	2.3	4.0	132.3	79.4	0.78	65.9	-36.3%
+50%	9.4	6.2	2.6	5.3	173.3	100.0	0.64	85.3	-16.6%
-50%	7.2	5.4	2.4	2.6	85.9	69.9	0.78	59.8	-58.6%

ตารางที่ 2.1 แสดงผลกระทบของค่าสภาพความนำไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนเนื้อเยื่อหัวใจ จากการควบคุมกำลังวัตต์ (7W) เวลาในการทดลอง 60 วินาที ในการทดลอง (+50%) อุณหภูมิที่เนื้อเยื่อมีค่าเกิน 100 °C ที่เวลา 30 วินาที จึงทำการหยุดการทดลอง V แทนปริมาตรของรอยแผล T_{max} แทนค่าอุณหภูมิสูงสุดของรอยแผลบนเนื้อเยื่อหัวใจ D_{max} เป็นตำแหน่งของ T_{max} ที่วัดจากค้ำจับ ΔV แทนปริมาตรของรอยแผล ความผิดพลาดของ ΔV ในการทดลอง Fixed +50% และ -50% เทียบกับ การทดลอง Control อยู่ที่ -36.3% -16.6% และ -58.6%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 แสดงค่าสภาพความนำไฟฟ้าที่ถูกควบคุมอุณหภูมิในระบบ 70 °C

Results mm	A mm	B mm	C mm	D mm	V mm ³	T _{max} °C	D _{max} mm	ΔV
Control	9.1	6.4	2.6	4.0	175.4	84.3	0.78	—
Fixed	9.4	6.3	2.6	4.4	182.1	86.6	0.78	+3.8%
+50%	8.8	6.2	2.6	4.0	156.2	83.6	0.78	-10.9%
-50%	9.3	6.7	2.6	4.0	197.4	84.6	0.78	+12.9%

ตารางที่ 2.2 เป็นการทดลองกรณีความคุมอุณหภูมิ ปริมาตรของรอยแผล ความผิดพลาดของ ΔV ในการทดลอง Fixed +50% และ -50% เทียบกับ การทดลอง Control อยู่ที่ +3.8% -10.9% และ -12.9% ซึ่งในการทดลองค่าสภาพความนำไฟฟ้าที่ถูกควบคุมอุณหภูมิ จะได้ค่าที่ผิดพลาดน้อยกว่า การทดลองค่าสภาพความนำไฟฟ้าที่ความคุมกำลังงานที่ 7W

2.2.1.2 คุณสมบัติสภาพความนำความร้อน

วิธีการทดลองคุณสมบัติของสภาพความนำความร้อน ทำการทดลองเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบ 4 กรณี กรณีที่ 1 กำหนดค่าสภาพความนำความร้อน ที่มีการเปลี่ยนแปลงตาม Bhavaraju และ Valvano (control) กรณีที่ 2 กำหนดค่าสภาพความนำความร้อน $5.31 \times 10^{-4} \text{ Wmm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ที่ไม่เปลี่ยนแปลง (fixed) กรณีที่ 3 เพิ่มสภาพความนำความร้อนขึ้น 100% (+100%) และในกรณีสุดท้าย ลดค่าสภาพความนำความร้อนลง 50% (-50%)

ตารางที่ 2.3 แสดงค่าสภาพความนำความร้อนที่ถูกควบคุมกำลังวัตต์ที่ 7 วัตต์

Results mm	A mm	B mm	C mm	D mm	V mm ³	T _{max} °C	D _{max} mm	T _{tip} °C	ΔV
Control	9.6	6.7	2.7	4.4	207.7	94.7	0.78	78.4	—
Fixed	9.6	6.6	2.7	4.4	204.6	90.2	0.78	75.5	-1.5%
+100%	7.0	5.3	2.2	3.6	81.6	67.4	0.75	61.0	-60.7%
-50%	8.2	5.0	2.0	4.4	108.8	100.0	0.43	84.4	-47.6%

ตารางที่ 2.3 แสดงค่าความนำความร้อนที่ควบคุมกำลังวัตต์ 7 วัตต์ ความแตกต่างสูงสุดของ ปริมาตรรอยแผล -60.7% (การทดลอง +100%) ในการทดลองที่ -50% ถูกหยุดที่ 16 วินาที (อุณหภูมิ 100 °C) ขนาดของรอยแผลที่ได้จากการทดลองนี้จะน้อยที่สุด ในการทดลอง +100% อุณหภูมิ T_{max} (67.4 °C) จะน้อยที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 แสดงค่าสภาพความนำความร้อนที่ถูกควบคุมอุณหภูมิในระบบ 70 °C

Results mm	A mm	B mm	C Mm	D mm	V mm ³	T _{max} °C	D _{max} mm	ΔV
Control	9.1	6.4	2.6	4.0	175.4	84.3	0.78	—
Fixed	9.2	6.5	2.6	4.0	181.6	83.2	0.78	+3.5%
+100%	9.0	6.5	2.6	4.8	173.2	79.1	0.78	-1.3%
-50%	8.7	5.9	2.6	2.6	138.6	89.3	0.78	-21.0%

ตารางที่ 2.4 จะเป็นการทดลองที่ควบคุมอุณหภูมิ ความแตกต่างของปริมาตรรอยแผลที่มากที่สุด -21% (การทดลอง -50%) ปริมาตรของรอยแผลที่มากที่สุด 181.6 mm³ (Fixed) ปริมาตรรอยแผลที่น้อยที่สุด 138.6 mm³ (-50%) ความผิดพลาดของ ΔV ในการทดลอง Fixed +100% และ -50% เทียบกับ การทดลอง Control อยู่ที่ +3.5% -1.3% และ -21.0% ซึ่งในการทดลองค่าสภาพความนำความร้อนที่ถูกควบคุมอุณหภูมิจะได้ค่าที่ผิดพลาดน้อยกว่า การทดลองค่าสภาพความนำความร้อนที่ควบคุมกำลังงานที่ 7W

2.2.1.3 คุณสมบัติความร้อนจำเพาะ

วิธีการทดลองคุณสมบัติของความร้อนจำเพาะ ทำการทดลองเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบ 4 กรณี กรณีที่ 1 กำหนดค่าสภาพความร้อนจำเพาะ ที่มีการเปลี่ยนแปลงตาม Bhavaraju และ Valvano (control) กรณีที่ 2 กำหนดค่าความร้อนจำเพาะ 3.111 Jg⁻¹K⁻¹ ที่ไม่เปลี่ยนแปลง (fixed) กรณีที่ 3 เพิ่มความร้อนจำเพาะขึ้น 100% (+100%) และในกรณีสุดท้าย ลดค่าความร้อนจำเพาะลง 50% (-50%)

ตารางที่ 2.5 แสดงค่าความร้อนจำเพาะที่ถูกควบคุมกำลังวัตต์ที่ 7 วัตต์

Results mm	A mm	B mm	C mm	D mm	V mm ³	T _{max} °C	D _{max} mm	T _{tip} °C	ΔV
Control	9.6	6.7	2.7	4.4	207.7	94.7	0.78	78.35	—
Fixed	9.6	6.7	2.7	4.4	207.7	90.4	0.78	75.64	0%
+100%	8.3	5.4	2.2	4.0	119.2	86.1	0.66	72.74	-42.6%
-50%	11.1	7.6	3.4	4.8	297.4	99.5	0.78	80.87	+43.2%

ตารางที่ 2.5 ปริมาตรของรอยแผลสูงสุด 297.4 mm³ (-50%) ปริมาตรของรอยแผลที่น้อยที่สุด 119.2 mm³ (+100%) อุณหภูมิสูงสุด 99.5 °C (-50%) และอุณหภูมิต่ำสุด 86.1 °C (+100%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

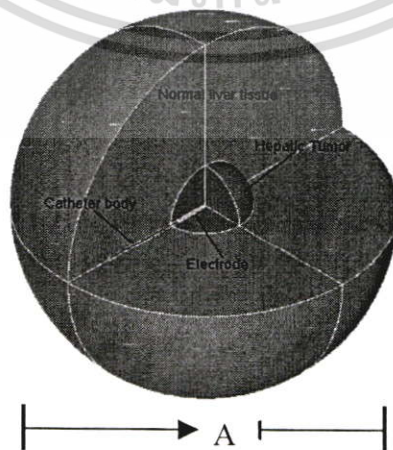
ตารางที่ 2.6 แสดงค่าความร้อนจำเพาะที่ถูกควบคุมอุณหภูมิในระบบ 70 °C

Results	A	B	C	D	V	T _{max}	D _{max}	ΔV
mm	mm	mm	mm	mm	mm ³	°C	mm	
Control	9.1	6.4	2.6	4.0	175.4	84.3	0.78	—
Fixed	9.0	6.4	2.6	4.0	168.7	84.4	0.78	-3.8%
+100%	8.3	5.6	2.3	4.0	123.9	83.2	0.75	-29.4%
-50%	9.7	6.9	3.0	4.0	207.7	84.6	0.78	+18.4%

ตารางที่ 2.6 แสดงระบบที่ควบคุมอุณหภูมิ ขนาดความแตกต่างของปริมาตรที่มากที่สุด -9.4% (+100%) ขนาดปริมาตรที่มากที่สุด 207.7 mm³ (-50%) ขนาดปริมาตรที่น้อยที่สุด 123.9 mm³ (+100%) ความผิดพลาดของ ΔV ในการทดลอง Fixed +100% และ -50% เทียบกับ การทดลอง Control อยู่ที่ +3.8% -29.4% และ -18.4% ซึ่งในการทดลองค่าความร้อนจำเพาะที่ถูกควบคุมอุณหภูมิจะได้ค่าที่ผิดพลาดน้อยกว่า การทดลองค่าความร้อนจำเพาะที่ควบคุมกำลังงานที่ 7W

จากการทดลองเพื่อพิจารณาคุณสมบัติของ สภาพความนำไฟฟ้า สภาพความนำความร้อน และ ความร้อนจำเพาะ ที่ถูกทดสอบใน 2 กรณี คือควบคุมกำลังวัตต์ที่ให้กับระบบ และควบคุมอุณหภูมิ ของระบบที่ 70 °C จากผลการทดลองวิธีการควบคุมอุณหภูมิจะให้ค่าความแตกต่างของปริมาตร ของรอยแผลที่น้อยกว่า วิธีการควบคุมกำลังวัตต์ ผลของการใส่ค่าคุณสมบัติลงใน ไฟไนต์เอลิเมนต์ ในแบบ Fixed -50% +50% และ +100% เทียบกับ แบบ Control ในแบบ Fixed จะให้ค่าความแตกต่างของปริมาตรรอยแผลที่น้อยที่สุด ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ ฉบับนี้ จะใช้การควบคุมค่าคุณสมบัติ สภาพความนำไฟฟ้า สภาพความนำความร้อน และ ความร้อนจำเพาะ ในแบบ Fixed

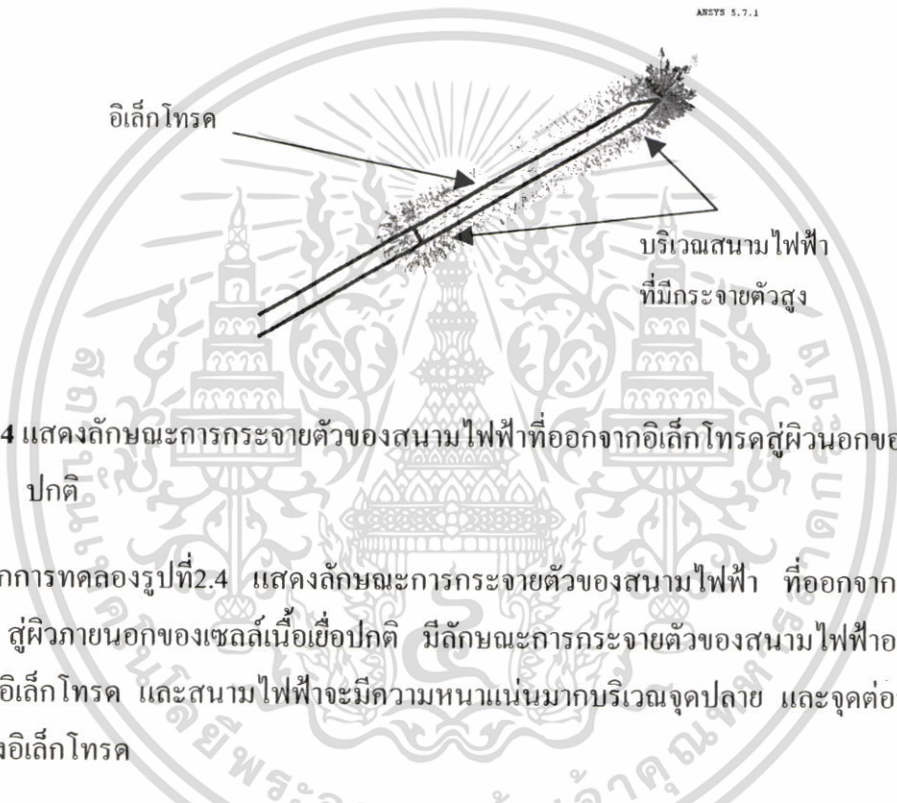
2.2.2 พิจารณาผลของขนาดแบบจำลองที่แตกต่างกัน (เปลี่ยนแปลงขนาดของเซลล์ปกติ)



รูปที่ 2.3 ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางที่เปลี่ยนแปลง (เส้นผ่านศูนย์กลางระยะ A)

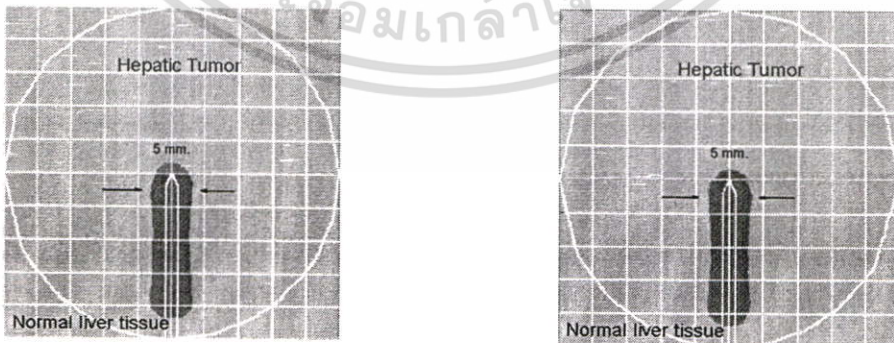
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใช้งานเห็นใบโฆษณาหรือการดำเนินการใดๆ ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองผลของขนาดบนแบบจำลองที่แตกต่างกัน ในการจำลองจะพิจารณาลักษณะการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น จากผิวอิเล็กโทรด ออกสู่ผิวภายนอกสุดของเซลล์ปกติ การกำหนดเงื่อนไข กระทำได้ 2 แบบ เริ่มจาก เงื่อนไขที่ 1 แบบคงที่แรงดัน ทำการกำหนดแรงดันที่ 50 โวลต์ และทดลองในเวลา 10 วินาที เงื่อนไขที่ 2 กำหนดการทดลองกับแบบจำลอง โดยการเปลี่ยนแปลงแบบจำลองที่เป็นเซลล์ปกติ 3 ขนาด ทำการเปลี่ยนแปลงขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์ที่ปกติระยะ A โดยใช้ ทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 400 มิลลิเมตร ทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 200 มิลลิเมตร และทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 60 มิลลิเมตร



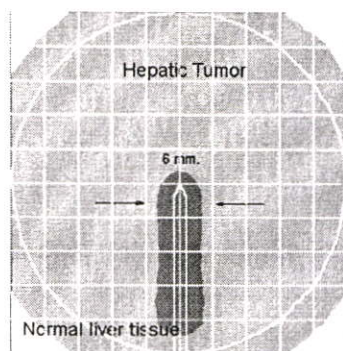
รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าที่ออกจากอิเล็กโทรดผิวภายนอกของเนื้อเยื่อปกติ

จากการทดลองรูปที่2.4 แสดงลักษณะการกระจายตัวของสนามไฟฟ้า ที่ออกจากผิวของอิเล็กโทรด ผิวภายนอกของเซลล์เนื้อเยื่อปกติ มีลักษณะการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าออกไปรอบๆ ตัวของอิเล็กโทรด และสนามไฟฟ้าจะมีความหนาแน่นมากบริเวณจุดปลาย และจุดต่อระหว่างค้ำจับ ของอิเล็กโทรด



รูปที่ 2.5 (ก) เส้นผ่านศูนย์กลาง 400 มิลลิเมตร รูปที่ 2.5 (ข) เส้นผ่านศูนย์กลาง 200 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



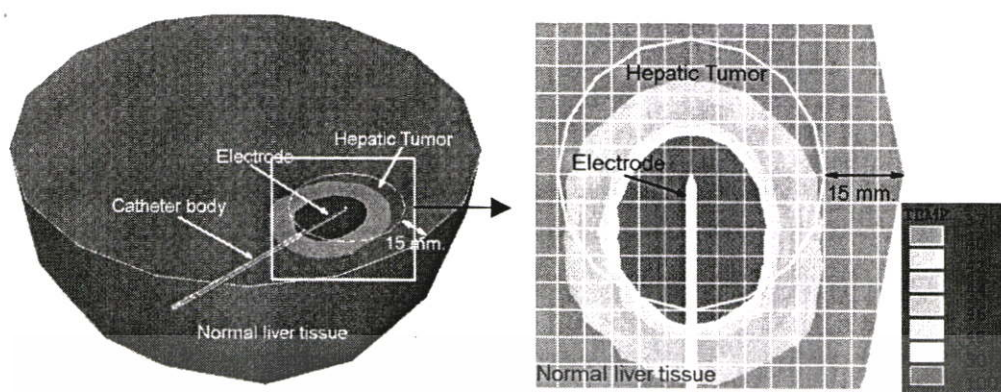
รูปที่ 2.5 (ค) เส้นผ่านศูนย์กลาง 60 มิลลิเมตร

รูปที่ 2.5 แสดงผลการทดลอง ผลกระทบของขนาดที่แตกต่างกันของแบบจำลอง

จากการทดลองรูปที่ 2.5 ทำการเปลี่ยนขนาดของเซลล์ปกติโดยให้มีขนาดที่แตกต่างกันมากๆ ศึกษาผลกระทบของความร้อนที่เกิดขึ้น พบว่าที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 400 (รูปที่ 2.5ก) และ 200 (รูปที่ 2.5ข) มิลลิเมตร ผลกระทบของสนามไฟฟ้าต่อขนาดเซลล์ปกติจะมีผลน้อยมาก ส่วนการจำลองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 มิลลิเมตร (รูปที่ 2.5ค) สนามไฟฟ้าจะวิ่งออกในระยะสั้นๆ และความเข้มของสนามไฟฟ้าจะสูง ซึ่งจะทำให้เกิดผลของรอยแผลที่มีขนาดใหญ่กว่าการทดลองที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 400 และ 200 มิลลิเมตร ในการสร้างแบบจำลองเซลล์ปกติ เพื่อลดผลกระทบของความร้อนที่เกิดขึ้น แบบจำลองเซลล์ปกติที่สร้างขึ้นต้องมีขนาดใหญ่กว่าเซลล์ที่เป็นมะเร็งอย่างน้อย 2 เท่า

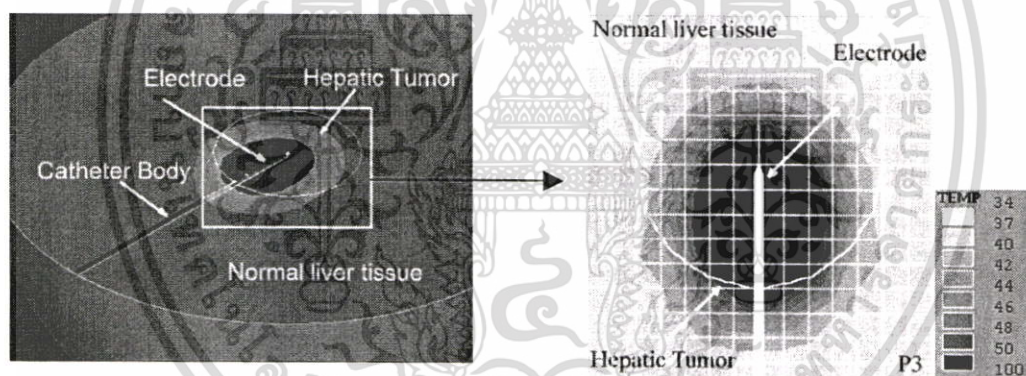
2.2.3 พิจารณาผลกระทบของอุณหภูมิภายในเนื้อเยื่อ เนื่องจากระยะทางระหว่างอิเล็กโทรด และกราวด์

ในการทดลองจะพิจารณาถึงลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เกิดขึ้น จากลักษณะของเซลล์มะเร็งที่มีการวางในตำแหน่ง เอียงขวา ห่างจากจุดขอบของเซลล์ปกติ 15 มิลลิเมตร กำหนดให้อิเล็กโทรดและด้ามจับ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร ยาว 20 มิลลิเมตร และ 80 มิลลิเมตร ตามลำดับ เซลล์มะเร็งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร และเซลล์ปกติขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 200 มิลลิเมตร ทำการทดลองแบบควบคุมอุณหภูมิที่ 90 °C เวลา 600 วินาที



รูปที่ 2.6 แสดงภาพตัดขวางรูปแบบการวางอิเล็กโทรด บนเซลล์มะเร็งที่มีลักษณะเอียงขวาและลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เวลา 600 วินาที

รูปที่ 2.6 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิที่มีการวางอิเล็กโทรด และเซลล์มะเร็งในลักษณะเอียงขวา โดยผิวด้านนอกของเซลล์มะเร็งห่างจากผิวด้านในของเซลล์ปกติ 15 มิลลิเมตร ขนาดปริมาตรของรอยแผลที่ได้ $1.2 \times 10^4 \text{ mm}^3$



รูปที่ 2.7 แสดงภาพตัดขวางรูปแบบการวางอิเล็กโทรด บนเซลล์มะเร็งที่มีการวางบนจุดศูนย์กลางของแบบจำลอง และลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เวลา 600 วินาที

รูปที่ 2.7 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแบบจำลองที่มีการวางอิเล็กโทรด และเซลล์มะเร็งที่จุดศูนย์กลาง ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิจะมีลักษณะกระจายออกไปรอบๆ มีรูปร่างเหมือนหัวไม้ขีด มีปริมาตรของรอยแผล $1.2 \times 10^4 \text{ mm}^3$

จากการทดลองดังรูปที่ 2.6 และรูปที่ 2.7 เป็นการทดลองที่เปรียบเทียบลักษณะของรอยแผลที่เกิดขึ้นในแบบจำลองที่เหมือนกัน แต่มีความแตกต่างกันในส่วนของการวางอิเล็กโทรด และเซลล์มะเร็ง ซึ่งในรูปที่ 2.6 จะมีการวางอิเล็กโทรดและเซลล์มะเร็งเอียงทางขวาห่างจากขอบเซลล์ปกติ 15 มิลลิเมตร ในรูปที่ 2.7 เป็นการวางอิเล็กโทรดและเซลล์มะเร็งตรงจุดศูนย์กลางของแบบจำลอง ลักษณะของรอยแผลที่เกิดขึ้นทั้ง 2 รูปแบบมีลักษณะที่เหมือนกัน และปริมาตรของรอยแผลที่ใกล้เคียงกัน

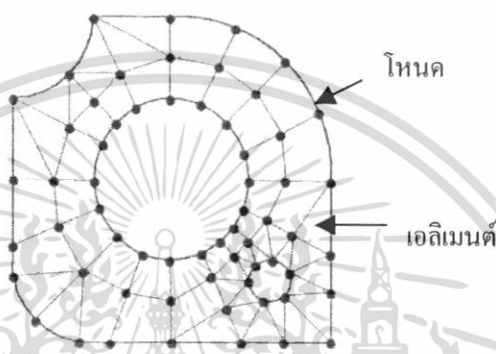
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ทฤษฎีการใช้วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์

3.1 ทฤษฎีการใช้วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์

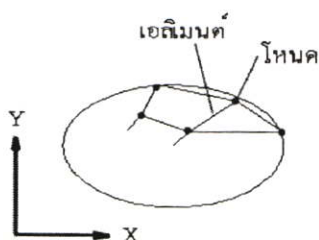
ในการแก้ปัญหาหนึ่งๆ ด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ จะทำการแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นเนื้อที่หลายๆ ชิ้นที่เรียกว่าเอลิเมนต์ ซึ่งสามารถจำลองรูปแบบที่เที่ยงตรง ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ถูกแบ่งออกเป็นเอลิเมนต์ และ โหนด [25]

ในการแก้ปัญหาใดปัญหาหนึ่ง ปัญหาหนึ่งจะต้องประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมา การหาค่าผลเฉลยแม่นยำตรง (exact solution) จะประกอบด้วยค่าต่างๆ เป็นจำนวนอนันต์ ซึ่งเราไม่สามารถหาค่าผลเฉลยได้เลย จึงต้องเปลี่ยนค่าทั้งหมดที่เป็นอนันต์ให้เป็นจำนวนที่นับได้ (finite) ทำการแทนรูปร่างลักษณะของปัญหาด้วยเอลิเมนต์ (element) ที่มีขนาดต่างๆ กัน หลักการทางไฟไนต์เอลิเมนต์จะเริ่มจากการพิจารณาเอลิเมนต์ทีละเอลิเมนต์ ทำการสร้างสมการให้แต่ละเอลิเมนต์ที่สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหานั้นๆ จากนั้นจึงนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นมาประกอบเข้าด้วยกัน รวมเป็นระบบสมการชุดใหญ่ จากนั้นทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต ที่ให้มาลงในสมการชุดใหญ่ แล้วจึงทำการแก้สมการ และจะเกิดผลเฉลยโดยประมาณ ที่ตำแหน่งต่างๆ ของปัญหานั้น

วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์จะประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ๆ 6 ขั้นตอนดังนี้



รูปที่ 3.2 การแบ่งรูปร่างลักษณะของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์แบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ที่สงวนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ขั้นตอนที่1 ทำการแบ่งขอบเขตรูปร่างของปัญหาที่ต้องการหาผลลัพธ์ ออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ
 ดังรูปที่ 3.2
- ขั้นตอนที่2 เลือกฟังก์ชันประมาณภายในเอลิเมนต์ (element interpolation function)
- ขั้นตอนที่3 สร้างสมการของเอลิเมนต์
- ขั้นตอนที่4 นำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่ได้มาประกอบรวมกันเป็นสมการระบบใหญ่
- ขั้นตอนที่5 ทำการประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต (boundary conditions) แล้วจึงแก้สมการเพื่อหาค่าตัวที่ไม่ทราบค่า อาจเป็นค่าของอุณหภูมิที่จุดต่างๆ ถ้าเป็นปัญหาที่เกี่ยวกับความร้อน
- ขั้นตอนที่6 เมื่อคำนวณค่าต่างๆ ที่จุดต่อออกมาแล้ว ก็สามารถหาค่าอื่นๆ ที่ต้องการทราบต่อไปได้ เช่นเมื่อรู้อุณหภูมิที่จุดต่างๆ ก็สามารถหาค่าการถ่ายเทความร้อนได้

3.2 การแก้ปัญหทางความร้อนและไฟฟ้าแบบ 3 มิติ

ในการใช้ทฤษฎีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในการประมวลผล ในงานวิจัยเป็นการใช้ทฤษฎีทางคณิตศาสตร์รูปแบบของเมตริกซ์ ซึ่งจะมีความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และไฟฟ้า ในสมการรูปแบบเมตริกซ์ที่ใช้ดังนี้

3.2.1 การแก้ปัญหทางความร้อน

จากสมการ Bioheat equation พิจารณาทางด้านของความร้อนเพียงอย่างเดียว

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot k \nabla T \Rightarrow \rho c \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot k \nabla T = 0 \quad (3.1)$$

กำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น $T(x,y,z,0) = T_0(x,y,z)$ เมื่อ T_0 = อุณหภูมิเริ่มต้นของวัตถุ
 สร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับเอลิเมนต์ที่ประกอบด้วย m จุดต่อ (วิธีถ่วงน้ำหนักเศษค้ำ) [25]
 ความหมายของตัวแปรที่ใช้ในหัวข้อ 3.2.1

R = เศษตกค้าง

W = ฟังก์ชันน้ำหนัก

N_i = ฟังก์ชันประมาณภายในเอลิเมนต์

$[C]$ = เมตริกซ์ของความร้อนจำเพาะ

$\{Q_c\}$ = โหลดเวกเตอร์อันเนื่องมาจากความนำความร้อน

$[K]$ = เอลิเมนต์ของการนำความร้อน

$\{T\}$ = เวกเตอร์อุณหภูมิที่โหนด

$\{\dot{T}\}$ = เวกเตอร์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่โหนดโดยสัมพันธ์กับเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\int_{\Omega^{(e)}} w_i R d\Omega = 0 \quad i=1,2,\dots,m \quad (3.2)$$

$$\int_{\Omega^{(e)}} (w_i, N_i, \Phi_i) d\Omega + \int_{\Gamma^{(e)}} (w_i, N_i, \Phi_i) d\Gamma = 0 \quad (3.3)$$

จากสมการที่ 3.3 ในพจน์แรกจะเกี่ยวข้องกับโดเมนของเอลิเมนต์ $\Omega^{(e)}$ ในส่วนพจน์ที่ 2 จะเป็นส่วนที่เกี่ยวข้องกับขอบเขตของเอลิเมนต์ $\Gamma^{(e)}$

$$\int_{\Omega^{(e)}} w_i \left(\rho c \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot k \nabla T \right) d\Omega = 0 \quad (3.4)$$

แทน ∇ ด้วย ดังนั้น $\frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}$ สมการที่ 3.4 จะถูกทำให้อยู่ในสมการที่ 3.5 และ 3.6 กำหนดให้ k เป็นค่าคงที่

$$\int_{\Omega^{(e)}} w_i \left(\rho c \frac{\partial T}{\partial t} - \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] \right) d\Omega = 0 \quad (3.5)$$

$$\int_{\Omega^{(e)}} w_i \rho c \frac{\partial T}{\partial t} d\Omega - \int_{\Omega^{(e)}} w_i \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] d\Omega = 0 \quad (3.6)$$

ทำการอินทิเกรตสมการที่ 3.6 โดยใช้ทฤษฎีของเกาส์ (Gauss's theorem)

$$\int_{\Omega^{(e)}} x(\nabla \cdot \vec{Y}) d\Omega = \int_{\Gamma^{(e)}} x(\vec{Y} \cdot \hat{n}) d\Gamma = \int_{\Omega^{(e)}} (\nabla x \cdot \vec{Y}) d\Omega \quad (3.7)$$

ทำการเปรียบเทียบ $\int_{\Omega^{(e)}} x(\nabla \cdot \vec{Y}) d\Omega$ กับพจน์ที่ 2 ของสมการที่ 3.6

$$x = w_i \quad (3.8)$$

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial}{\partial y} \hat{j} + \frac{\partial}{\partial z} \hat{k} \quad (3.9)$$

$$\vec{Y} = k \frac{\partial T}{\partial x} \hat{i} + k \frac{\partial T}{\partial y} \hat{j} + k \frac{\partial T}{\partial z} \hat{k} \quad (3.10)$$

ดังนั้น

$$(\nabla \cdot \vec{Y}) = \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right) \quad (3.11)$$

จาก $\hat{n} = n_x \hat{i} + n_y \hat{j} + n_z \hat{k}$ ดังนั้น

$$\bar{Y} \cdot \hat{n} = k \frac{\partial T}{\partial x} n_x + k \frac{\partial T}{\partial y} n_y + k \frac{\partial T}{\partial z} n_z \quad (3.12)$$

$$x(\bar{Y} \cdot \hat{n}) = W_i \left(k \frac{\partial T}{\partial x} n_x + k \frac{\partial T}{\partial y} n_y + k \frac{\partial T}{\partial z} n_z \right) \quad (3.13)$$

$$\nabla x = \frac{\partial W_i}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial W_i}{\partial y} \hat{j} + \frac{\partial W_i}{\partial z} \hat{k} \quad (3.14)$$

$$\nabla x \cdot \bar{Y} = \frac{\partial W_i}{\partial x} k \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial W_i}{\partial y} k \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial W_i}{\partial z} k \frac{\partial T}{\partial z} \quad (3.15)$$

แทน $W_i = N_i$ ลงในสมการที่ 3.6

$$\int_{\Omega^{(e)}} N_i \rho c \frac{\partial T}{\partial t} d\Omega - \int_{\Gamma^{(e)}} N_i \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x + k_y \frac{\partial T}{\partial y} n_y + k_z \frac{\partial T}{\partial z} n_z \right) d\Gamma + \int_{\Omega^{(e)}} \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} k \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} k \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial N_i}{\partial z} k \frac{\partial T}{\partial z} \right) d\Omega = 0 \quad (3.16)$$

$$\int_{\Omega^{(e)}} N_i \rho c \frac{\partial T}{\partial t} d\Omega + \int_{\Omega^{(e)}} \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} k \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} k \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial N_i}{\partial z} k \frac{\partial T}{\partial z} \right) d\Omega = \int_{\Gamma^{(e)}} N_i \left(k \frac{\partial T}{\partial x} n_x + k \frac{\partial T}{\partial y} n_y + k \frac{\partial T}{\partial z} n_z \right) d\Gamma \quad (3.17)$$

สมมุติลักษณะผลเฉลยโดยประมาณในรูปแบบดังนี้

$$T(x, y, z, t) = [N(x, y, z)] \{T(t)\} \quad (3.18)$$

กำหนด

$$N_i = \{N\} [N], \frac{\partial T}{\partial x} = \left[\frac{\partial N}{\partial x} \right] \{T\}, \frac{\partial T}{\partial y} = \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right] \{T\}, \frac{\partial T}{\partial z} = \left[\frac{\partial N}{\partial z} \right] \{T\} \quad (3.19)$$

แทนสมการที่ 3.19 ลงในสมการที่ 3.17

$$\int_{\Omega^{(e)}} \rho c \{N\} [N] d\Omega \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} \right\} + \int_{\Omega^{(e)}} \left(\left[\frac{\partial N}{\partial x} \right] k \left[\frac{\partial N}{\partial x} \right] + \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right] k \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right] + \left[\frac{\partial N}{\partial z} \right] k \left[\frac{\partial N}{\partial z} \right] \right) d\Omega \{T\} = \int_{\Gamma^{(e)}} N \left(k \frac{\partial T}{\partial x} n_x + k \frac{\partial T}{\partial y} n_y + k \frac{\partial T}{\partial z} n_z \right) d\Gamma \quad (3.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้

$$[C] = \int_{\Omega^{(e)}} \rho c \{N\} [N] d\Omega \quad (3.21)$$

$$\{\dot{T}\} = \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} \right\} \quad (3.22)$$

$$[K_c] = \int_{\Omega^{(e)}} \left(\left\{ \frac{\partial N}{\partial x} \right\} k \left[\frac{\partial N}{\partial x} \right] + \left\{ \frac{\partial N}{\partial y} \right\} k \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right] + \left\{ \frac{\partial N}{\partial z} \right\} k \left[\frac{\partial N}{\partial z} \right] \right) d\Omega \quad (3.23)$$

$$\{Q_c\} = \int_{\Gamma^{(e)}} N \left(k \frac{\partial T}{\partial x} n_x + k \frac{\partial T}{\partial y} n_y + k \frac{\partial T}{\partial z} n_z \right) d\Gamma \quad (3.25)$$

สมการไฟไนต์เอลิเมนต์ทางความร้อนที่อยู่ในรูปทั่วไปดังนี้

$$[C]\{\dot{T}\} + [K_c]\{T\} = \{Q_c\} \quad (3.26)$$

3.2.2 การแก้ปัญหาทางไฟฟ้า

จากสมการลาปลาซ (Laplace equation) ถูกใช้ในการหาการกระจายตัวของแรงดัน

$$\nabla \cdot \sigma \nabla V = 0 \quad (3.27)$$

สร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับเอลิเมนต์ที่ประกอบด้วย m จุด (วิธีถ่วงน้ำหนักเศษค้ำ)

$$\int_{\Omega^{(e)}} W_i \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\sigma \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\sigma \frac{\partial V}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\sigma \frac{\partial V}{\partial z} \right) \right) d\Omega = 0 \quad (3.28)$$

ความหมายของตัวแปรที่ใช้ในหัวข้อ 3.2.2

$\{B\}$ = โหลดเวกเตอร์อันเนื่องมาจากการไหลของกระแสที่โหนด

$[K_c]$ = เอลิเมนต์ของการนำไฟฟ้า

$\{V\}$ = เวกเตอร์แรงดันที่โหนด

σ = สภาพการนำไฟฟ้า

ทำการอินทิเกรตสมการที่ 3.28 โดยใช้ทฤษฎีของเกาส์ (Gauss's theorem)

$$x = W_i \quad (3.29)$$

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial}{\partial y} \hat{j} + \frac{\partial}{\partial z} \hat{k} \quad (3.30)$$

$$\vec{Y} = \sigma \frac{\partial V}{\partial x} \hat{i} + \sigma \frac{\partial V}{\partial y} \hat{j} + \sigma \frac{\partial V}{\partial z} \hat{k} \quad (3.31)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$(\nabla \cdot \vec{Y}) = \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\sigma \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\sigma \frac{\partial V}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\sigma \frac{\partial V}{\partial z} \right) \right) \quad (3.32)$$

เนื่องจาก $\hat{n} = n_x \hat{i} + n_y \hat{j} + n_z \hat{k}$ ดังนั้น

$$\vec{V} \cdot \hat{n} = \sigma \frac{\partial V}{\partial x} n_x + \sigma \frac{\partial V}{\partial y} n_y + \sigma \frac{\partial V}{\partial z} n_z \quad (3.33)$$

$$x(\vec{V} \cdot \hat{n}) = W_i \left(\sigma \frac{\partial V}{\partial x} n_x + \sigma \frac{\partial V}{\partial y} n_y + \sigma \frac{\partial V}{\partial z} n_z \right) \quad (3.34)$$

$$\nabla_x = \frac{\partial W_i}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial W_i}{\partial y} \hat{j} + \frac{\partial W_i}{\partial z} \hat{k} \quad (3.35)$$

$$\nabla_x \cdot \vec{Y} = \frac{\partial W_i}{\partial x} \sigma \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial W_i}{\partial y} \sigma \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W_i}{\partial z} \sigma \frac{\partial V}{\partial z} \quad (3.36)$$

แทน $W_i = N_i$ ลงในสมการที่ 3.28

$$\int_{\Gamma^{(e)}} N_i \left(\sigma \frac{\partial V}{\partial x} n_x + \sigma \frac{\partial V}{\partial y} n_y + \sigma \frac{\partial V}{\partial z} n_z \right) d\Gamma - \int_{\Omega^{(e)}} \left(\left\{ \frac{\partial N_i}{\partial x} \right\} \sigma \frac{\partial V}{\partial x} + \left\{ \frac{\partial N_i}{\partial y} \right\} \sigma \frac{\partial V}{\partial y} + \left\{ \frac{\partial N_i}{\partial z} \right\} \sigma \frac{\partial V}{\partial z} \right) d\Omega = 0 \quad \text{เมื่อ } i=1,2,\dots,m \quad (3.37)$$

$$\int_{\Gamma^{(e)}} N_i \left(\sigma \frac{\partial V}{\partial x} n_x + \sigma \frac{\partial V}{\partial y} n_y + \sigma \frac{\partial V}{\partial z} n_z \right) d\Gamma = \int_{\Omega^{(e)}} \left(\left\{ \frac{\partial N_i}{\partial x} \right\} \sigma \frac{\partial V}{\partial x} + \left\{ \frac{\partial N_i}{\partial y} \right\} \sigma \frac{\partial V}{\partial y} + \left\{ \frac{\partial N_i}{\partial z} \right\} \sigma \frac{\partial V}{\partial z} \right) d\Omega = 0 \quad \text{เมื่อ } i=1,2,\dots,m \quad (3.38)$$

กำหนด

$$\frac{\partial V}{\partial x} = \left[\frac{\partial N}{\partial x} \right]_{(1 \times m)} \{V\}_{(m \times 1)}, \quad \frac{\partial V}{\partial y} = \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right]_{(1 \times m)} \{V\}_{(m \times 1)}, \quad \frac{\partial V}{\partial z} = \left[\frac{\partial N}{\partial z} \right]_{(1 \times m)} \{V\}_{(m \times 1)} \quad (3.39)$$

แทนสมการที่ 3.39 ลงในสมการที่ 3.38

$$\int_{\Omega^{(e)}} \left(\left\{ \frac{\partial N}{\partial x} \right\} \sigma \left[\frac{\partial N}{\partial x} \right] + \left\{ \frac{\partial N}{\partial y} \right\} \sigma \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right] + \left\{ \frac{\partial N}{\partial z} \right\} \sigma \left[\frac{\partial N}{\partial z} \right] \right) d\Omega \{V\} = \int_{\Gamma^{(e)}} \{N\} \left(\sigma \frac{\partial V}{\partial x} n_x + \sigma \frac{\partial V}{\partial y} n_y + \sigma \frac{\partial V}{\partial z} n_z \right) d\Gamma \quad (3.40)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้

$$[K_v] = \int_{\Omega^{(e)}} \left(\left\{ \frac{\partial N}{\partial x} \right\} \sigma \left[\frac{\partial N}{\partial x} \right] + \left\{ \frac{\partial N}{\partial y} \right\} \sigma \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right] + \left\{ \frac{\partial N}{\partial z} \right\} \sigma \left[\frac{\partial N}{\partial z} \right] \right) d\Omega \quad (3.41)$$

$$[I] = \int_{\Gamma^{(e)}} \{N\} \left(\sigma \frac{\partial V}{\partial x} n_x + \sigma \frac{\partial V}{\partial y} n_y + \sigma \frac{\partial V}{\partial z} n_z \right) d\Gamma \quad (3.42)$$

สมการไฟไนต์เอลิเมนต์ทางไฟฟ้าที่อยู่ในรูปทั่วไปดังนี้

$$[K_v]\{V\} = \{I\} \quad (4.43)$$

ทำการจัดสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์ทางความร้อนและไฟฟ้า

$$\begin{bmatrix} [C] & [0] \\ [0] & [0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{T} \\ 0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_c] & [0] \\ [0] & [K_v] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T \\ V \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Q_c \\ I \end{Bmatrix} \quad (4.44)$$

เมื่อ

$[C]$ = เมตริกซ์ของความร้อนจำเพาะ

$[K_c]$ = เอลิเมนต์ของการนำความร้อน

$[K_v]$ = เอลิเมนต์ของการนำไฟฟ้า

$\{T\}$ = เวกเตอร์ของอุณหภูมิที่โหนด

$\{\dot{T}\}$ = เวกเตอร์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่โหนดโดยสัมพันธ์กับเวลา

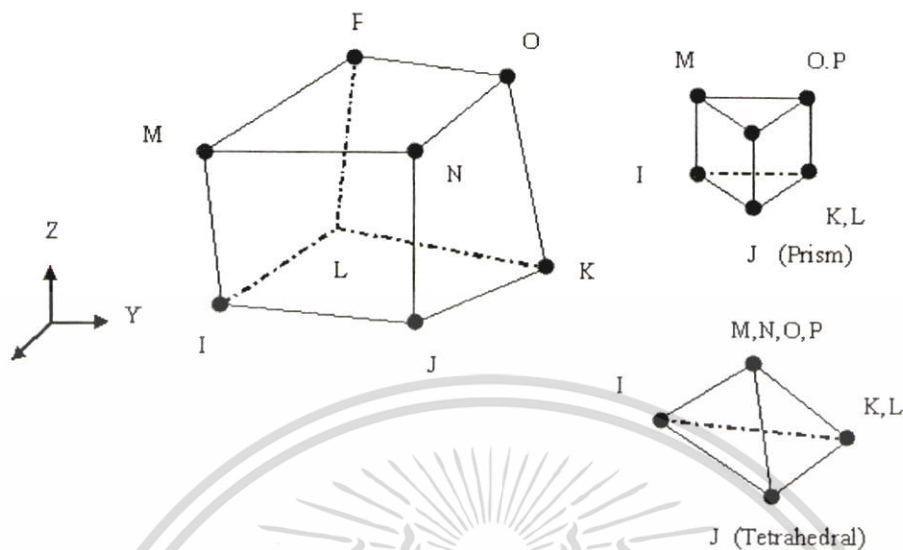
$\{V\}$ = เวกเตอร์แรงดันที่โหนด

$\{Q_c\}$ = โหลดเวกเตอร์อื่นเนื่องมาจากความนำความร้อน

$\{I\}$ = โหลดเวกเตอร์อื่นเนื่องมาจากการไหลของกระแสที่โหนด

จากสมการที่ 4.44 เป็นสมการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในรูปทั่วไปที่มีความสัมพันธ์ของความร้อนและไฟฟ้า ซึ่งการหาผลเฉลยสามารถทำได้โดยการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต และทำการประมวลผลโดยใช้คอมพิวเตอร์ ในลักษณะการคำนวณจะแบ่งโดยการคำนวณทางไฟฟ้าเสียก่อน และนำผลการคำนวณที่ได้ทำการคำนวณทางความร้อน หลังจากได้ผลการคำนวณทางความร้อนแล้วจึงนำไปในการประมวลผลทางไฟฟ้าต่อไป

3.2 ทฤษฎีการใช้วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในการหาผลเฉลยของแบบจำลอง

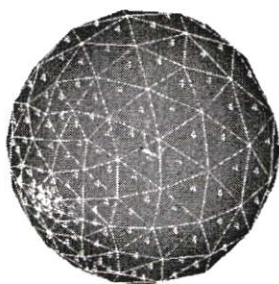


รูปที่ 3.4 ลักษณะ โครงสร้างแบบ Solid69

จากแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ มีลักษณะของการประมวลผลที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิและไฟฟ้า ในการเลือกโครงสร้างของแบบจำลอง จะมีความสำคัญเพราะการเลือกใช้โครงสร้างที่ถูกต้องจะส่งผลถึงการประมวลผลค่าปัญหาที่เกิดขึ้นได้อย่างถูกต้อง ในงานวิจัยชิ้นนี้ได้เลือกโครงสร้างแบบ Solid69 ลักษณะของโครงสร้างชนิดนี้ จะเป็นลักษณะการใช้งาน แบบการคำนวณ 3 มิติ พิจารณาผลของความร้อน และสภาพความนำไฟฟ้า ในโครงสร้างจะมีจำนวนโหนดสูงสุด 8 โหนด ซึ่งในส่วนของเอลิเมนต์ และ โหนดจะสามารถเปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะของโครงสร้างได้ดังรูปที่ 3.5

ในโครงสร้างของเอลิเมนต์แบบ Solid69 สามารถที่จะมีการเปลี่ยนแปลงรูปทรงได้หลายๆ รูปแบบดังรูปที่ 3.5 ขึ้นอยู่กับลักษณะของโครงสร้างแบบจำลอง ที่เราได้ทำการออกแบบขึ้น ในโหนดต่างๆ จะมีชื่อเรียกประจำโหนด คือ โหนด I, J, K, L, M, N, O และ P และมีพารามิเตอร์ที่อิสระคือ อุณหภูมิ (TEMP) และ แรงดัน (VOLT) ในโครงสร้างลักษณะนี้ สามารถใส่ค่าพารามิเตอร์ เพื่อใช้ในการคำนวณได้แก่ ค่าความนำความร้อนในแนวแกน X, Y, Z (KXX, KYY, KZZ), ความหนาแน่นจำเพาะ (DENS), ค่าความร้อนจำเพาะ (c), ค่าความต้านทานในแนวแกน X, Y, Z (RSVX, RSVY, RSVZ)

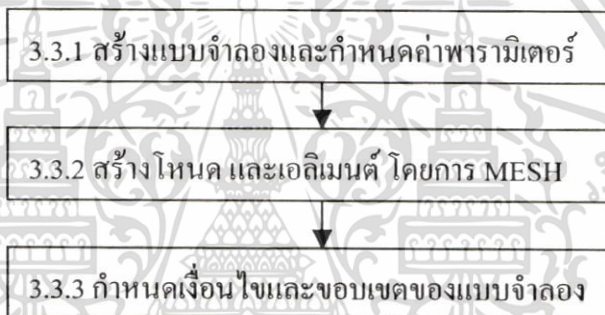
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 ลักษณะโครงสร้างแบบ Solid69 ที่ถูกใช้ในการคำนวณ

3.3 การใช้โปรแกรม ANSYS สร้างแบบจำลอง

ในการจำลอง และสร้างแบบจำลอง โดยโปรแกรม ANSYS ต้องมีหลักการสร้างอยู่ 3 ส่วน ดังนี้



รูปที่ 3.5 โครงสร้างการใช้โปรแกรม ANSYS สร้างแบบจำลอง

ส่วนที่ 1 เป็นการกล่าวถึงการสร้างแบบจำลอง ซึ่งต้องมีการวางแผนการทดลองไว้ก่อนล่วงหน้า เริ่มจากการสร้างแบบจำลอง การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง และการกำหนดส่วนต่างๆ ของวัสดุที่ใช้ในเป็นแบบจำลอง

ส่วนที่ 2 เป็นการกล่าวถึงการสร้างโหนด และเอลิเมนต์ จากการ MESH ซึ่งวิธีการ MESH ของตัวโปรแกรม ANSYS สามารถทำการ MESH ได้หลายวิธี เช่นการ MESH แบบอัตโนมัติ การ MESH แบบกำหนดเอง ซึ่งในการ MESH แบบกำหนดเอง สามารถทำการ MESH ได้หลายรูปแบบ เช่น การ MESH แบบเส้น MESH แบบผิว MESH แบบปริมาตร ในการ MESH แบบกำหนดเองนี้ ผู้ที่สร้างควรจะมีความรู้ในตัวโปรแกรม ANSYS พอสมควร

ส่วนที่ 3 เป็นการกำหนดการวิเคราะห์ผล หรือเป็นการกำหนดค่าขอบเขตเงื่อนไขเริ่มต้น เพื่อให้โปรแกรมสามารถทำการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในแบบจำลองได้อย่างถูกต้อง ซึ่งในส่วนนี้ นอกจากการกำหนดเงื่อนไขในการคำนวณแล้ว ในลักษณะปัญหาที่เกี่ยวกับอุณหภูมิ และ ไฟฟ้า ต้องมีการกำหนดเวลาในการประมวลผลด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การประมวลผลการทดลองวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วย โปรแกรม ANSYS

ในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรมที่ชื่อว่า ANSYS เวอร์ชัน 5.7 ซึ่งใช้ในการสร้างแบบจำลอง การกำหนดค่าคุณสมบัติจำเพาะต่างๆของวัสดุภายในการทดลอง การกำหนดเงื่อนไขต่างๆในระบบ และการเก็บเงื่อนไขนั้นเพื่อทำการประมวลผล ในงานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองผลแบบจำลองบนเครื่องคอมพิวเตอร์พีซีระบบปฏิบัติการ Windows 2000 (โดยมี RAM 256 MB Harddisk 40 GB CPU 1.3 GByte)

4.1 ลักษณะการควบคุมอุณหภูมิ

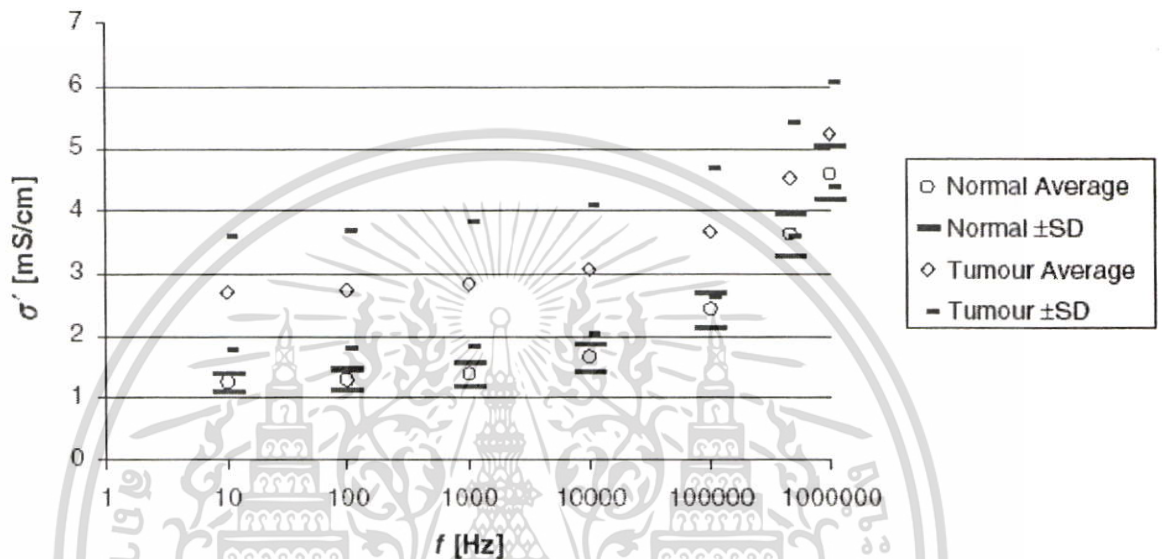
ในการทดลองมีการจำลองลักษณะการควบคุมอุณหภูมิภายในระบบที่ 90°C จากระยะเวลา 1 – 600 วินาที ในการจำลองเริ่มจากการกำหนดแรงดันค่าๆหนึ่ง บนผิวของอิเล็กโทรด A และกำหนดคราฟต์ที่ผิวนอกสุดของเนื้อเยื่อตับที่ปกติ (กรณีที่ 1) หรือกำหนดคราฟต์ที่ผิวของอิเล็กโทรด B (กรณีที่ 2 – 9) จากนั้นทำการประมวลผลขั้นที่ 1 เริ่มจาก 1 – 10 วินาที พิจารณาอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบริเวณปลายอิเล็กโทรด อุณหภูมิที่เกิดขึ้นอยู่นอกช่วง $89^{\circ}\text{C} - 92^{\circ}\text{C}$ ต้องเริ่มทำการจำลองใหม่ แต่ถ้าอุณหภูมิอยู่ในช่วงก็สามารถทำการจำลองต่อไปในขั้นที่ 2 โดยในขั้นที่ 2 จะพิจารณาเหมือนการจำลองขั้นที่ 1 โดยทำการจำลองต่อไปในช่วง 11 – 20 วินาที ในขั้นที่ 3 จะทำการจำลองในช่วง 21 – 60 วินาที ในขั้นที่ 4 จะทำการจำลองในช่วง 61 – 120 วินาที ในขั้นที่ 5 จะทำการจำลองในช่วง 121 – 180 วินาที ในขั้นที่ 6 จะทำการจำลองในช่วง 181 – 240 วินาที ในขั้นที่ 7 จะทำการจำลองในช่วง 241 – 300 วินาที ในขั้นที่ 8 จะทำการจำลองในช่วง 301 – 360 วินาที ในขั้นที่ 9 จะทำการจำลองในช่วง 361 – 400 วินาที ในขั้นที่ 10 จะทำการจำลองในช่วง 401 – 500 วินาที และ ในขั้นที่ 11 จะทำการจำลองในช่วง 500 – 600 วินาที ในการจำลองจะทำการจำลองควบคุมอุณหภูมิ 11 ขั้นตอนในขั้นตอนที่ 1 – 2 มีช่วงเวลาในการจำลองที่แคบ เพราะช่วงเวลานี้จะเป็นช่วงเวลาที่มีการเปลี่ยนของอุณหภูมิในระบบสูง ในขั้นตอนที่ 3 – 9 จะเป็นช่วงที่อุณหภูมิเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยลงกว่าในการจำลองช่วงแรก ระยะเวลาที่ใช้ในการจำลองจึงสามารถขยายกว้างได้มากขึ้น ขั้นตอนที่ 10 – 11 เป็นช่วงเวลาที่อุณหภูมิมักมีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมากเมื่อเทียบกับในสองช่วงที่ได้กล่าวไปก่อนหน้านี้ ระยะเวลาในการจำลองจึงมีการขยายได้กว้างถึง 100 วินาที อุณหภูมิที่เกิดขึ้นโดยเฉลี่ยจากช่วงเวลาการจำลองทั้งหมดจะอยู่ที่ 90°C ซึ่งเมื่อเราทำการจำลองในขั้นตอนใดแล้วเกิดอุณหภูมิอยู่นอกช่วง ต้องทำการจำลองในขั้นตอนนั้นใหม่จนกว่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่ 90°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การกำหนดค่าคงที่ต่างๆ

ในการกำหนดค่าที่ใช้ในตัวโปรแกรม ANSYS ได้ทำการใช้ค่าสภาพความนำไฟฟ้า (σ) [26] จากรูปที่ 4.1 โดยพิจารณาการใช้ค่าสภาพความนำไฟฟ้าของเนื้อเยื่อตับปกติ และเนื้อเยื่อตับที่เป็นมะเร็ง ที่ความถี่ 500 kHz



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของสภาพนำไฟฟ้าเนื้อเยื่อตับปกติ และเนื้อเยื่อตับที่เป็นมะเร็ง [26]

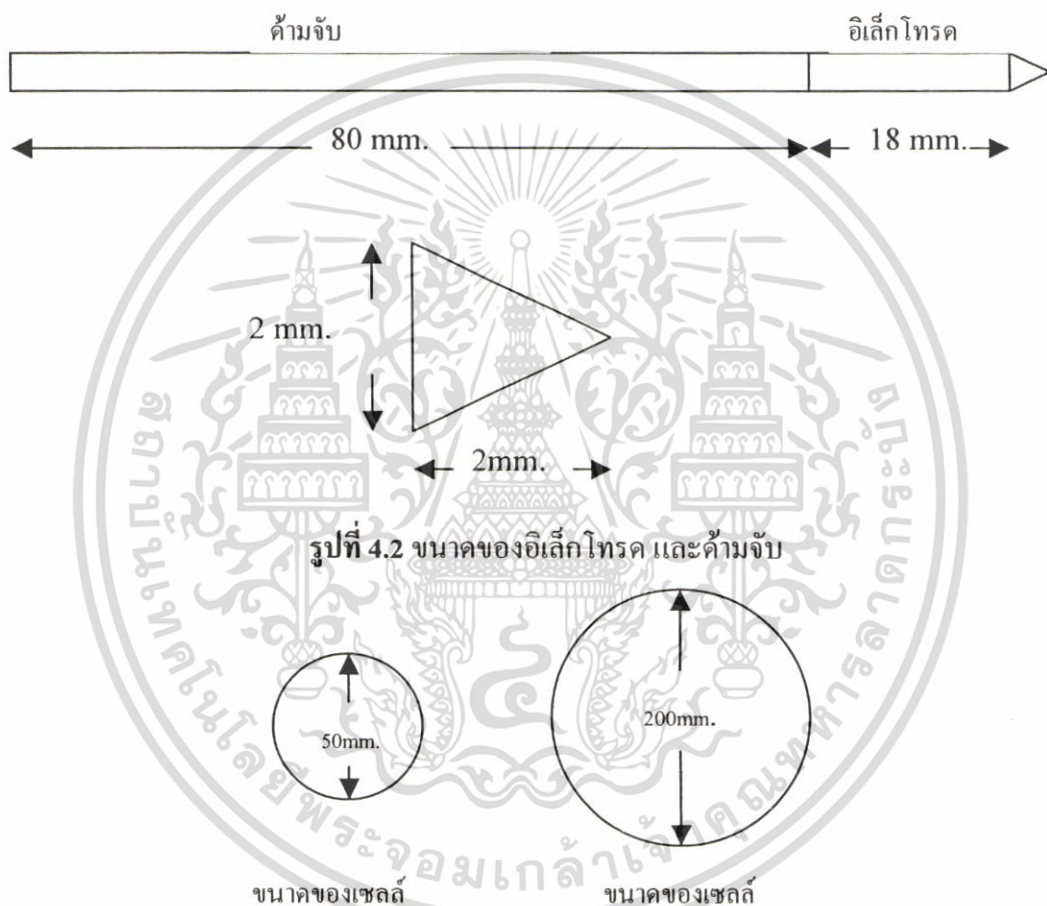
ในงานวิจัยได้มีการใช้ค่าคุณสมบัติจำเพาะต่างๆ ของวัสดุอุปกรณ์ใน 4 ส่วน ซึ่งได้แก่ อิเล็กโทรด, คัมจับ, เซลล์เนื้อมะเร็ง และเซลล์เนื้อปกติ ที่ความถี่ 500 kHz แสดงค่าในตารางที่ 4.1 โดยที่ค่าต่างๆเหล่านี้ เป็นค่าคุณสมบัติจำเพาะที่จะถูกนำมาใช้ ในการวิเคราะห์โดยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์แบบจำลอง 3 มิติ ในส่วนของตารางที่ 4.1 ได้กล่าวถึงค่าตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการจำลอง ได้แก่ ความหนาแน่นจำเพาะ (kg/m^3), ค่าความร้อนจำเพาะ (J/kg.K), ค่าความนำความร้อน (W/m.K), และค่าความนำไฟฟ้าของวัสดุ (S/m)

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติจำเพาะของวัสดุที่ความถี่ 500kHz [16]

FE region	Material	$\rho[\text{kg/m}^3]$	$c[\text{J/kg.K}]$	$k[\text{W/m.K}]$	$\sigma[\text{S/m}]$
Electrode	Ni-Ti	6450	840	18	$1 \cdot 10^8$
Tissue	เซลล์ปกติ	1060	3600	0.512	0.300
Tissue	เซลล์มะเร็ง	1060	3600	0.512	0.400
Catheter body	Polyurethane	70	1045	0.026	10^{-5}

ค่าคุณสมบัติจำเพาะของ ดับที่ผิดปกติ $k = 0.57 \text{ W/m.K}$ $\rho = 1040 \text{ kg/m}^3$ และ $c = 3628 \text{ J/kg.K}$ [14] ซึ่งคุณสมบัติจำเพาะต่างๆนี้มีค่าใกล้เคียงกับค่าคุณสมบัติจำเพาะของเซลล์ปกติ ในการทดลองนี้มุ่งเน้นในการศึกษาในส่วนของสภาพความนำไฟฟ้า เพราะเป็นตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อระบบมากที่สุด ค่าคุณสมบัติจำเพาะของเซลล์ปกติ และเซลล์มะเร็ง จึงได้ถูกกำหนดให้มีค่าเหมือนกัน แต่แตกต่างกันที่ค่าสภาพความนำไฟฟ้า ในเซลล์ปกติจะมีค่า 0.3 S/m เซลล์มะเร็งจะมีค่า 0.4 S/m

4.3 การออกแบบแบบจำลอง

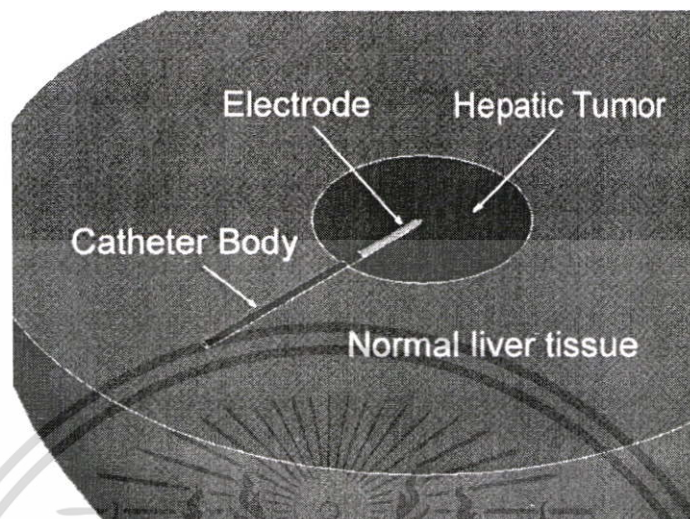


รูปที่ 4.3 ขนาดของเซลล์มะเร็งดับและ เซลล์ปกติ

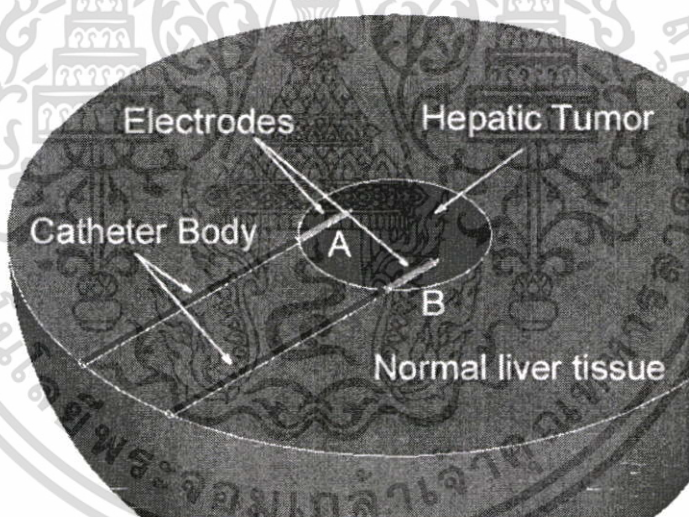
ในการทดลองนี้ได้ออกแบบอิเล็กโทรด ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร ยาว 20 มิลลิเมตร โดยแบ่งเป็นส่วนตัวของโพรบ 18 มิลลิเมตร และส่วนปลาย 2 มิลลิเมตร ในส่วนของด้ามจับมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร ยาว 80 มิลลิเมตรดังรูปที่ 4.2 [27] มีการออกแบบให้เนื้อเยื่อมะเร็งมีลักษณะเป็นทรงกลมขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร และวางทับกันอยู่บนเนื้อเยื่อที่ปกติ ที่มีลักษณะเป็นทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 200 มิลลิเมตรดังรูปที่ 4.3 ซึ่งทั้งในรูปที่ 4.2 และ 4.3 จะเป็นการแสดงขนาดและรูปร่างโดยรวม ของแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ในงานวิจัยชิ้นนี้ ซึ่ง

ในการวิเคราะห์แบบจำลองการทำลายเซลล์มะเร็งในตับ ได้ทำการออกแบบการทดลอง ออกเป็น 2

ส่วน ส่วนที่ 1 เป็นการออกแบบจำลองแบบโมโนโพลาร์ ส่วนที่2 เป็นการออกแบบจำลองแบบไบโพลาร์ ซึ่งในแบบจำลองได้ถูกออกแบบ และทำการทดลอง จำนวน 9 แบบ



รูปที่ 4.4 การออกแบบแบบจำลองแบบโมโนโพลาร์

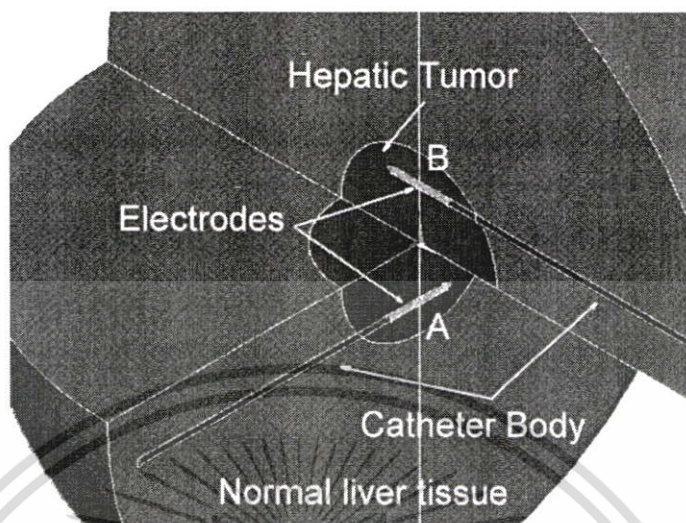


รูปที่ 4.5 การออกแบบแบบจำลองแบบไบโพลาร์ (อิเล็กโทรดขนานกัน)

ในรูปที่ 4.4 เป็นรูปแสดงส่วนตัดขวางของแบบจำลอง ที่ถูกใช้ในการจำลองการฆ่าเซลล์มะเร็งในระดับแบบโมโนโพลาร์ ในแบบจำลองได้มีการออกแบบเป็นส่วนต่างๆ 4 ส่วน คือ electrode, Hepatic Tumor, Normal Liver tissue และ Catheter Body ซึ่งในส่วนอิเล็กโทรดจะถูกออกแบบ ให้ถูกครอบคลุมด้วยเซลล์มะเร็ง

ในรูปที่ 4.5 เป็นรูปแสดงส่วนตัดขวางของแบบจำลองแบบไบโพลาร์ ซึ่งจะใช้อิเล็กโทรด 2 อันวางในลักษณะขนานกันอยู่ภายในเนื้อเยื่อ ในการทดลองจะมีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างของอิเล็กโทรด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2 การทดลองแบบไบโพลาร์ จะถูกทดลองที่ระยะห่างของอิเล็กโทรด 20, 30, 40 และ 50 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.6 การออกแบบแบบจำลองแบบไบโพลาร์ (อิเล็กโทรดขนานและไขว้กัน 90 องศา)

ในรูปที่ 4.6 เป็นรูปแสดงส่วนตัดขวางของแบบจำลองแบบไบโพลาร์ ซึ่งจะใช้อิเล็กโทรด 2 อันวางในลักษณะขนานกันและไขว้กัน 90 องศาภายในเนื้อเยื่อ ในการทดลองจะมีการเปลี่ยนแปลงระยะทางของอิเล็กโทรดที่ระยะห่างของอิเล็กโทรด 20, 30, 40 และ 50 มิลลิเมตร

กรณีที่ 1 เป็นแบบจำลองอิเล็กโทรดแบบโมนโพลาร์

กรณีที่ 2 เป็นแบบจำลองไบโพลาร์ ที่มีรูปแบบการวางอิเล็กโทรดที่ขนานกัน โดยอิเล็กโทรดตัวที่ 1 และตัวที่ 2 อยู่ห่างกัน 20 มิลลิเมตร

กรณีที่ 3 เป็นแบบจำลองไบโพลาร์ ที่มีรูปแบบการวางอิเล็กโทรดที่ขนานกัน โดยอิเล็กโทรดตัวที่ 1 และตัวที่ 2 อยู่ห่างกัน 30 มิลลิเมตร

กรณีที่ 4 เป็นแบบจำลองไบโพลาร์ ที่มีรูปแบบการวางอิเล็กโทรดที่ขนานกัน โดยอิเล็กโทรดตัวที่ 1 และตัวที่ 2 อยู่ห่างกัน 40 มิลลิเมตร

กรณีที่ 5 เป็นแบบจำลองไบโพลาร์ ที่มีรูปแบบการวางอิเล็กโทรดที่ขนานกัน โดยอิเล็กโทรดตัวที่ 1 และตัวที่ 2 อยู่ห่างกัน 50 มิลลิเมตร

กรณีที่ 6 เป็นแบบจำลองไบโพลาร์ ที่มีรูปแบบการวางอิเล็กโทรดที่ไขว้กัน 90 องศาโดยที่อิเล็กโทรดตัวที่ 1 และตัวที่ 2 ขนานกันและอยู่ห่างกัน 20 มิลลิเมตร

กรณีที่ 7 เป็นแบบจำลองไบโพลาร์ ที่มีรูปแบบการวางอิเล็กโทรดที่ไขว้กัน 90 องศาโดยที่อิเล็กโทรดตัวที่ 1 และตัวที่ 2 ขนานกันและอยู่ห่างกัน 30 มิลลิเมตร

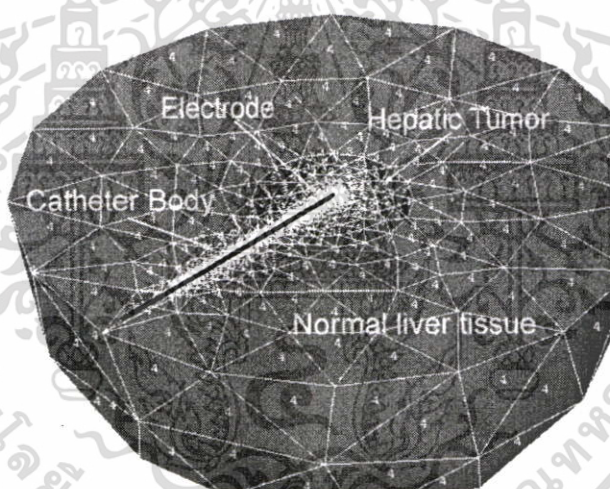
กรณีที่ 8 เป็นแบบจำลองไบโพลาร์ ที่มีรูปแบบการวางอิเล็กโทรดที่ไขว้กัน 90 องศาโดยที่อิเล็กโทรดตัวที่ 1 และตัวที่ 2 ขนานกันและอยู่ห่างกัน 40 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

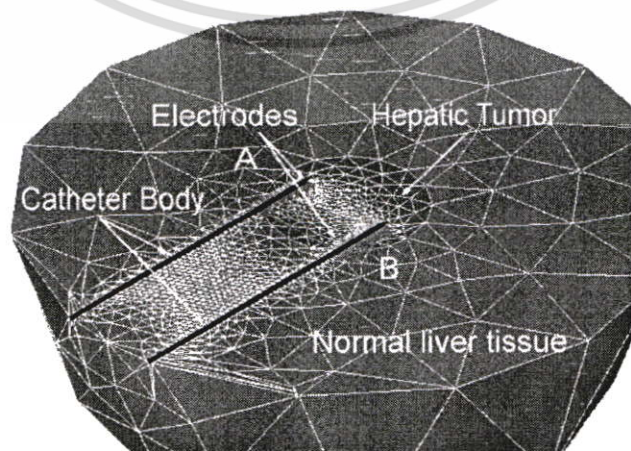
กรณีที่ 9 เป็นแบบจำลองไบโพลาร์ ที่มีรูปแบบการวางอิเล็กโทรดที่ไขว้กัน 90 องศาโดยที่
อิเล็กโทรดตัวที่ 1 และ ตัวที่ 2 ขนานกันและอยู่ห่างกัน 50 มิลลิเมตร

4.4 การ MESH แบบจำลอง

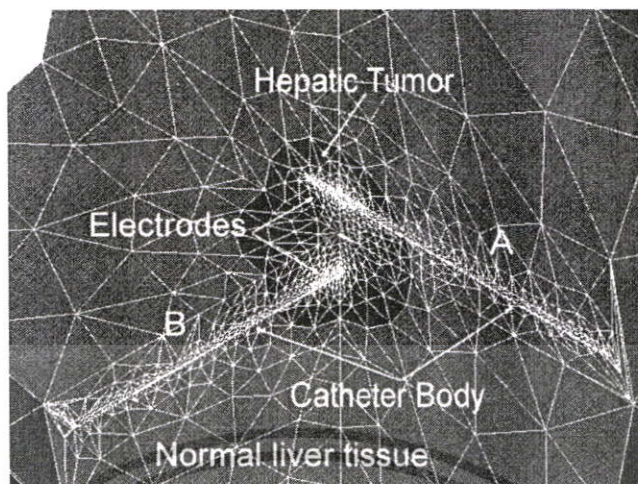
ในรูปที่ 4.7, 4.8 และ 4.9 จะเป็นการแสดงการ MESH แบบจำลอง ด้วยโปรแกรม ANSYS ซึ่ง
ในรูปที่ 4.7 จะเป็นการแสดงการ MESH แบบจำลองแบบโมนโพลาร์ ซึ่งได้มีการกำหนดความ
หนาแน่นของจำนวนโหนด มากที่สุดบริเวณอิเล็กโทรด และพื้นที่ที่ครอบคลุมภายในเนื้อเยื่อที่ผิดปกติ
ในรูปที่ 4.8 จะเป็นการแสดงการ MESH แบบจำลองแบบไบโพลาร์ (อิเล็กโทรดขนานกัน) ใน
การ MESH แบบจำลองจะกำหนดความหนาแน่นของโหนด อยู่ภายในอิเล็กโทรดทั้ง 2 และกระจาย
ตัวออกรอบๆอิเล็กโทรด ในรูปที่ 4.9 จะเป็นการแสดงการ MESH แบบจำลองแบบไบโพลาร์ (อิเล็ก
โทรดขนานกันและไขว้กัน 90 องศา) ความหนาแน่นของโหนด จะมากที่สุดอยู่บริเวณจุดแบ่งกลาง
ของอิเล็กโทรดทั้ง 2



รูปที่ 4.7 การแสดงการ MESH แบบจำลองแบบโมนโพลาร์



เอกสารนี้เป็นเอกสาร **รูปที่ 4.8** แสดงการ MESH แบบจำลองแบบไบโพลาร์ (อิเล็กโทรดขนานกัน) บนด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 แสดงการ MESH แบบจำลองแบบไบ โพลาร์ (อิเล็กโทรดขนานกัน และ ไขว้กัน 90 องศา)

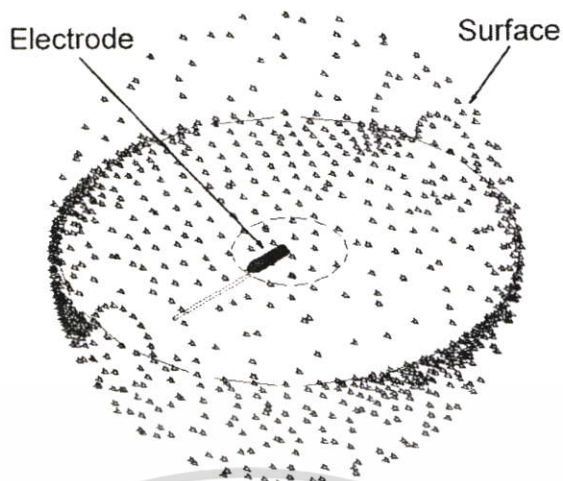
ตารางที่ 4.2 แสดงจำนวนของเอลิเมนต์ และ โหนด ภายในการทดลองที่ 1-9

case	Elements	nodes
1	7605	1399
2	16598	3028
3	20469	3620
4	28236	3932
5	25594	4540
6	22460	3917
7	37938	6605
8	21485	3821
9	28990	5515

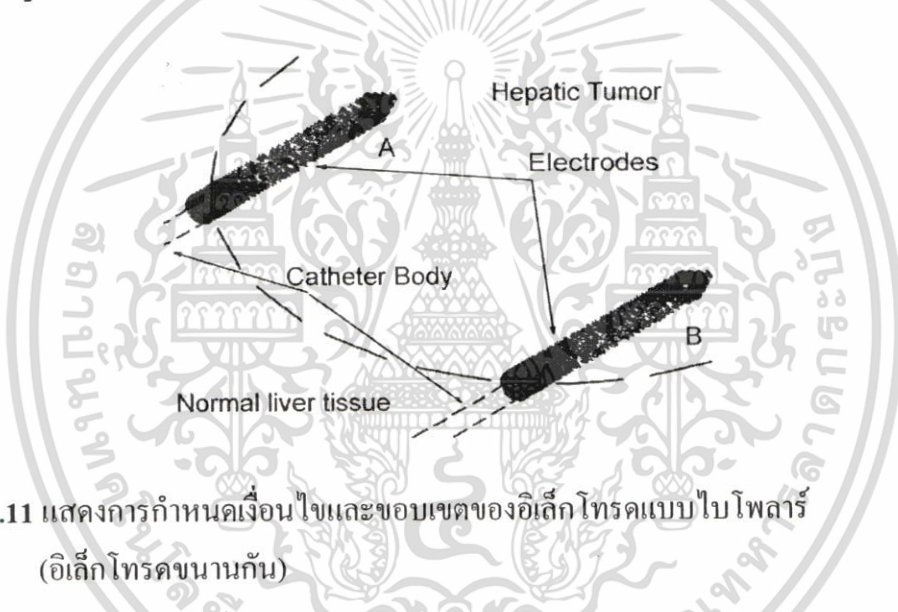
ตารางที่ 4.2 แสดงจำนวนเอลิเมนต์ และ โหนด ที่เกิดขึ้นจากการ MESH ในส่วนการทดลองกรณีที่ 1-9 การสร้างแบบจำลองถูกสร้างขึ้นภายใต้โครงสร้างแบบ Solid69 โครงสร้างในรูปแบบ Solid69 เป็นรูปแบบโครงสร้างที่ทางโปรแกรม ANSYS ได้กำหนดใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลอง 3 มิติ ที่มีการคำนวณปัญหาที่เกี่ยวข้องกับความร้อน และ ไฟฟ้า

4.5 การกำหนดขอบเขตบนแบบจำลอง

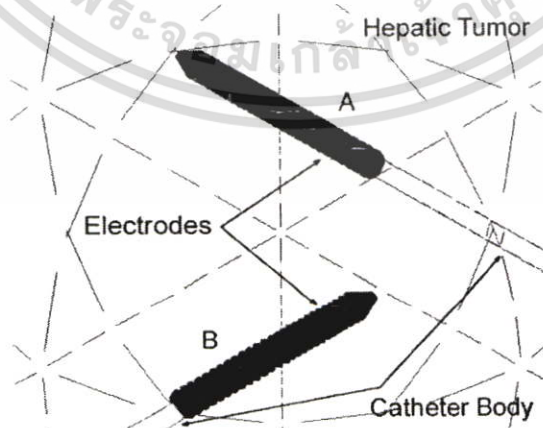
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 แสดงการกำหนดเงื่อนไขและขอบเขตของอิเล็กโทรดแบบโมโนโพลาร์



รูปที่ 4.11 แสดงการกำหนดเงื่อนไขและขอบเขตของอิเล็กโทรดแบบไบโพลาร์ (อิเล็กโทรดขนาดเท่ากัน)



รูปที่ 4.12 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต ของอิเล็กโทรดแบบไบโพลาร์

(ขนาดเท่ากันและไขว้กัน 90 องศา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 4.10, 4.11, และ 4.12 เป็นรูปที่แสดงการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต การให้แรงดันแก่อิเล็กโทรดในแบบจำลองแบบต่างๆ ในรูปที่ 4.10 การกำหนดเงื่อนไข ได้กำหนดแรงดันรอบๆ ผิวอิเล็กโทรด และกำหนดกราวด์ที่ผิวนอกสุดของเนื้อเยื่อเซลล์ปกติ ซึ่งเป็นการบังคับให้สนามไฟฟ้าวิ่งจากผิวอิเล็กโทรดสู่ผิวเซลล์ปกติด้านนอก ในการทดลองต้องมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่ให้กับผิวอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้นหรือลดลง โดยการพิจารณาจากอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นภายในระบบไม่เกิน 90°C ในรูปที่ 4.11 และ 4.12 เป็นการกำหนดเงื่อนไขและขอบเขตของการวางอิเล็กโทรดแบบไบโพลาร์ การกำหนดแรงดันจะถูกควบคุมตามอุณหภูมิที่เกิดขึ้น และถูกกำหนดขึ้นที่ผิวอิเล็กโทรด A และกำหนดให้ผิวอิเล็กโทรด B เป็นกราวด์ ในการกำหนดในลักษณะนี้จะเป็นการบังคับให้สนามไฟฟ้าเกิดขึ้นระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสอง ดังนั้นอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจะเกิดในส่วนที่สนามไฟฟ้าไหลผ่าน และอุณหภูมิที่สูงสุดจะเกิดขึ้นบริเวณส่วนปลายของอิเล็กโทรดทั้งสอง เพราะเกิดจากคุณลักษณะของการไหลเข้า และออกของสนามไฟฟ้าที่มีค่าเท่ากัน

4.6 การประมวลผลข้อมูลบนแบบจำลอง

ในการวิเคราะห์ปัญหาของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่มีความเกี่ยวข้องกับระบบอุณหภูมิและระบบไฟฟ้า ในตัวโปรแกรม ANSYS จะทำการวิเคราะห์ปัญหา โดยจะประมวลผลปัญหาต่างๆ ให้เสร็จก่อน แล้วจึงนำผลลัพธ์ที่ได้ ไปใช้ในอีกปัญหาหนึ่ง และผลที่จากปัญหานั้นที่ได้ทำการคำนวณเสร็จสิ้นแล้ว จะถูกนำไปคำนวณย้อนกลับ กับปัญหาตั้งต้น

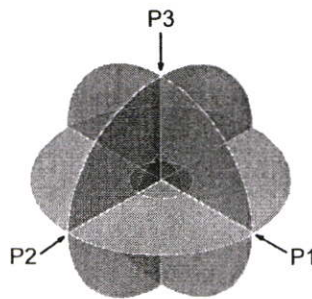
บทที่ 5

ผลการทดลองแบบจำลองคำนวณโดยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์

ในการทดลอง มีการกำหนดเงื่อนไขในการทดลอง เพื่อใช้เป็นการวางขอบเขต และเงื่อนไข ดังนี้ ทำการควบคุมอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นได้ในระบบที่ 90 °C และทำการควบคุมเวลาที่ 600 วินาที ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 9 กรณี กรณีที่ 1 เป็นการจำลองเพื่อใช้ดูลักษณะ การทำลายเซลล์มะเร็ง แบบโมโนโพลาร์ กรณีที่ 2-5 และกรณีที่ 6-9 เป็นการจำลองเพื่อดูลักษณะการทำลายเซลล์มะเร็ง ไบโพลาร์ ที่สามารถสร้างขนาดรอยแผลที่ใหญ่กว่าแบบโมโนโพลาร์ ผลกระทบของระยะทางต่อ ลักษณะของรอยแผล และผลกระทบของรอยแผล ที่เกิดจากลักษณะการวางอิเล็กโทรดแบบไบโพลาร์ที่เปลี่ยนแปลงไป การแสดงผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากการทดลองด้วยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ แสดงเป็นภาพตัดขวางในแนวต่างๆ ซึ่งสามารถใช้สัญลักษณ์ P1 ,P2 และ P3 ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ภาพแสดงส่วนตัดขวางในแนวต่างๆ เพื่อใช้ดูลักษณะของรอยแผลที่ถูกทำลาย



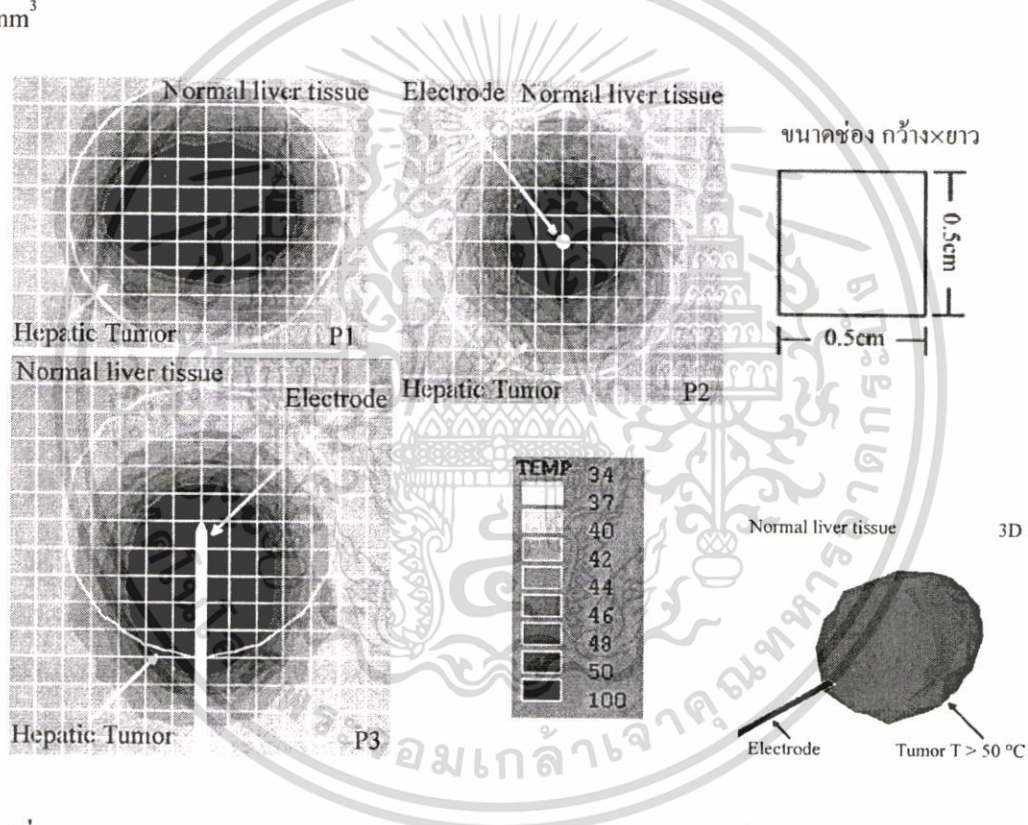
รูปที่ 5.2 ภาพแสดงส่วนตัดขวางในแนวต่างๆ เพื่อใช้ดูลักษณะของรอยแผลที่ถูกทำลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการวิจัยเท่านั้น มิอนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้บริจอื่นจนต้นการคำ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1 ผลการทดลองแบบจำลองแบบโมนโพลาร์

ในการทดลองการทำไฟไนต์เอลิเมนต์ กับแบบจำลองที่มีรูปแบบการวางอิเล็กโทรดแบบโมนโพลาร์ ทำการกำหนดแรงดันที่อิเล็กโทรด และกำหนดผิวนอกของเนื้อเยื่อเซลล์ปกติเป็นกราวด์ ในการกำหนดแรงดันที่เพิ่มขึ้น หรือลดลง จะพิจารณาจากอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นภายในระบบ ซึ่งในการจำลองผลนี้จะควบคุมอุณหภูมิสูงสุด ที่ 90°C

จากการทดลอง รูปที่ 5.3 มีลักษณะของรอยแผลแบบ ellipsoidal ซึ่งจะเป็นลักษณะรอยแผลแบบสมบรูณ์ ที่เกิดจากการใช้อิเล็กโทรดแบบ Berchtold® HITT ความยาวของรอยแผลสูงสุด ที่พิจารณาจากแกนที่ยาวที่สุด 38 มิลลิเมตร และความกว้างของรอยแผลสูงสุด ที่พิจารณาจากแกนที่สั้นที่สุด 33 มิลลิเมตร ปริมาตรของรอยแผลที่พิจารณาจากอุณหภูมิมากกว่า 50°C เท่ากับ $1.2 \times 10^4 \text{ mm}^3$



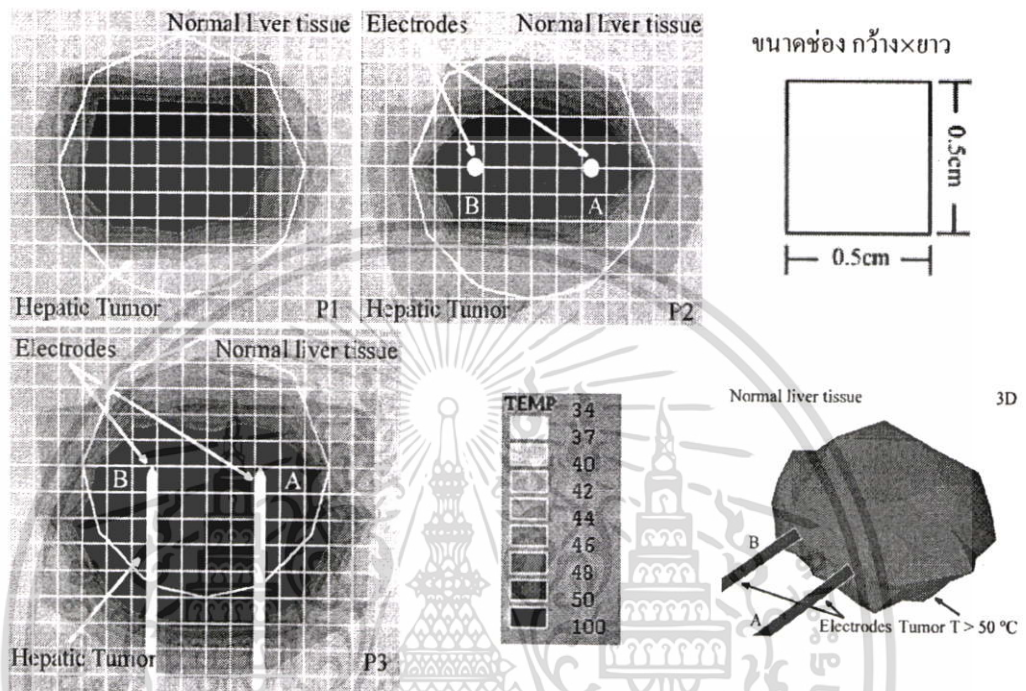
รูปที่ 5.3 แสดงภาพตัดขวางส่วนต่างๆ และลักษณะของรอยแผล 3 มิติ ที่อุณหภูมิมากกว่า 50°C (การทดลองที่ 1)

5.2 ผลการทดลองแบบจำลองไบโพลาร์ (แบบขนาน)

5.2.1 แบบจำลองที่ 2 การวางอิเล็กโทรดแบบไบโพลาร์แบบขนาน และมีระยะห่างการวาง 20 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น. ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น. อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดลองการทำไฟไนต์เอลิเมนต์กับแบบจำลองที่มีรูปแบบการวางอิเล็กโทรดที่ ขนานกัน โดยอิเล็กโทรดตัวที่ 1 และตัวที่ 2 อยู่ห่างกัน 20 มิลลิเมตร ทำการทดลองโดยการให้แรงดัน ที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิที่กำหนดไว้สูงสุดที่ 90 °C บนอิเล็กโทรด A และกำหนดแรงดัน 0 โวลต์ บนอิเล็กโทรด B ในการจำลองผลที่เกิดขึ้นจะเกิดความต่างศักย์ขึ้น สนามไฟฟ้าจากอิเล็กโทรด A จะเคลื่อนที่เข้าสู่อิเล็กโทรด B ความร้อนจะเกิดขึ้นระหว่างอิเล็กโทรดทั้ง 2



รูปที่ 5.4 แสดงภาพตัดขวางส่วนต่างๆ และลักษณะของรอยแผล 3 มิติ ที่อุณหภูมิมากกว่า 50 °C (การทดลองที่ 2)

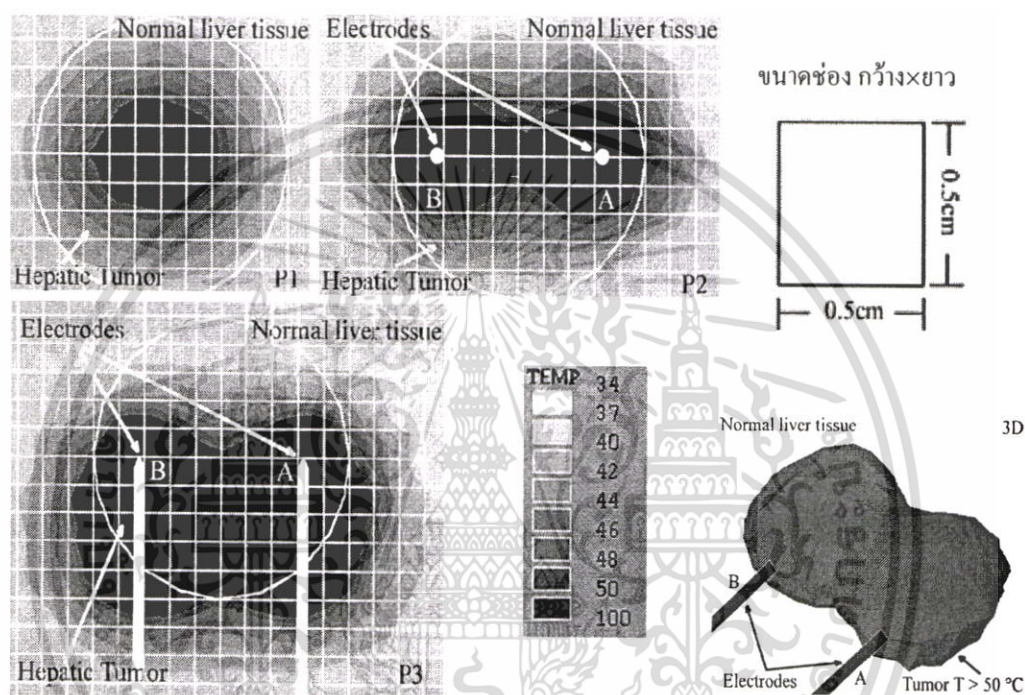
จากการทดลองในรูปที่ 5.4 การวางอิเล็กโทรดแบบไบโพลาร์ ลักษณะของรอยแผลจะเกิดขึ้นครอบคลุมอิเล็กโทรดทั้ง 2 ขนาดของรอยแผลพิจารณาจากแกนที่ยาวที่สุด 53 มิลลิเมตร และความกว้างของรอยแผลสูงสุด ที่พิจารณาจากแกนที่สั้นที่สุด 37 มิลลิเมตร ปริมาตรของรอยแผลที่พิจารณาจากอุณหภูมิมากกว่า 50 °C เท่ากับ $2.5 \times 10^4 \text{ mm}^3$

5.2.2 แบบจำลองที่3 การวางอิเล็กโทรดแบบไบโพลาร์แบบขนาน และมีระยะห่างการวาง 30 มิลลิเมตร

ในการทดลองการทำไฟไนต์เอลิเมนต์กับแบบจำลองที่มีรูปแบบการวางอิเล็กโทรดที่ ขนานกัน โดยอิเล็กโทรดตัวที่ 1 และตัวที่ 2 อยู่ห่างกัน 30 มิลลิเมตร ทำการทดลองโดยการให้แรงดัน ที่

เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิที่กำหนดไว้สูงสุดที่ 90 °C บนอิเล็กโทรด A และกำหนดแรงดัน 0 โวลต์ บนอิเล็กโทรด B ในการจำลองผลที่เกิดขึ้นจะเกิดความต่างศักย์ขึ้น สนามไฟฟ้าจากอิเล็กโทรด A จะเคลื่อนที่เข้าสู่อิเล็กโทรด B ความร้อนจะเกิดขึ้นระหว่างอิเล็กโทรดทั้ง 2

จากการทดลองในรูปแบบที่ 5.5 การวางอิเล็กโทรดแบบไบโพลาร์ ลักษณะของรอยแผลจะเกิดขึ้น ครอบคลุมอิเล็กโทรดทั้ง 2 ขนาดของรอยแผล พิจารณาจากแกนที่ยาวที่สุด 60 มิลลิเมตร และความ กว้างของรอยแผลสูงสุด ที่พิจารณาจากแกนที่สั้นที่สุด 40 มิลลิเมตร ปริมาตรของรอยแผลที่ พิจารณาจากอุณหภูมิมากกว่า 50 °C เท่ากับ $2.8 \times 10^4 \text{ mm}^3$

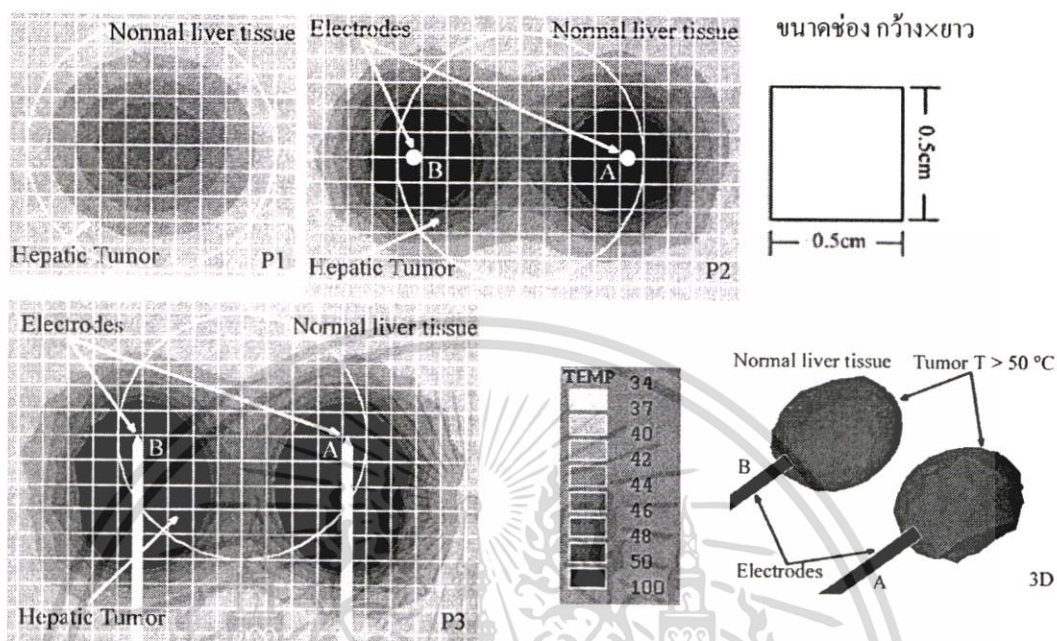


รูปที่ 5.5 แสดงภาพตัดขวางส่วนต่างๆ และลักษณะของรอยแผล 3 มิติ ที่อุณหภูมิมากกว่า 50 °C (การทดลองที่ 3)

5.2.3 แบบจำลองที่ 4 การวางอิเล็กโทรดแบบไบโพลาร์แบบขนาน และมีระยะห่างการวาง 40 มิลลิเมตร

ในการทดลองการทำไฟไนต์เอลิเมนต์กับแบบจำลองที่มีรูปแบบการวางอิเล็กโทรดที่ ขนานกัน โดยอิเล็กโทรดตัวที่ 1 และตัวที่ 2 อยู่ห่างกัน 40 มิลลิเมตร ทำการทดลองโดยการให้แรงดัน ที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิที่กำหนดไว้สูงสุดที่ 90 °C บนอิเล็กโทรด A และกำหนดแรงดัน 0 โวลต์ บนอิเล็กโทรด B ในการจำลองผลที่เกิดขึ้นจะเกิดความต่างศักย์ขึ้น สนามไฟฟ้าจากอิเล็กโทรด A จะเคลื่อนที่เข้าสู่อิเล็กโทรด B ความร้อนจะเกิดขึ้นระหว่างอิเล็กโทรดทั้ง 2

จากการทดลองในรูปที่ 5.6 การวางอิเล็กโทรดแบบไบโพลาร์ ลักษณะของรอยแผลจะเกิดขึ้น จะครอบคลุมอิเล็กโทรด และแยกออกจากกัน ปริมาตรของรอยแผลที่พิจารณาจากอุณหภูมิมากกว่า 50°C เท่ากับ $2.3 \times 10^4 \text{ mm}^3$

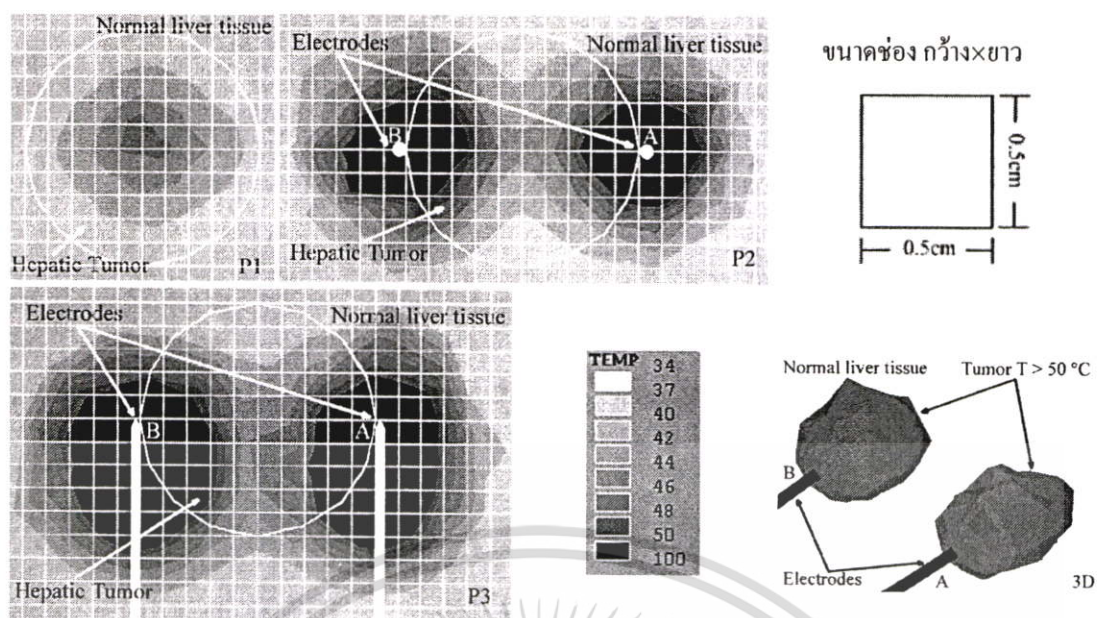


รูปที่ 5.6 แสดงภาพตัดขวางส่วนต่างๆ และลักษณะของรอยแผล 3 มิติ ที่อุณหภูมิมากกว่า 50 °C (การทดลองที่ 4)

5.2.4 แบบจำลองที่ 5 การวางอิเล็กโทรดแบบไบโพลาร์แบบขนาน และมีระยะห่างการวาง 50 มิลลิเมตร

ในการทดลองการทำไฟไนต์เอลิเมนต์กับแบบจำลองที่มีรูปแบบการวางอิเล็กโทรดที่ ขนานกัน โดยอิเล็กโทรดตัวที่ 1 และตัวที่ 2 อยู่ห่างกัน 50 มิลลิเมตร ทำการทดลองโดยการให้แรงดัน ที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิที่กำหนดไว้สูงสุดที่ 90 °C บนอิเล็กโทรด A และกำหนดแรงดัน 0 โวลต์ บนอิเล็กโทรด B ในการจำลองผลที่เกิดขึ้นจะเกิดความต่างศักย์ขึ้น สนามไฟฟ้าจากอิเล็กโทรด A จะเคลื่อนที่เข้าสู่อิเล็กโทรด B ความร้อนจะเกิดขึ้นระหว่างอิเล็กโทรดทั้ง 2

จากการทดลองในรูปที่ 5.7 การวางอิเล็กโทรดแบบไบโพลาร์ ลักษณะของรอยแผลจะเกิดขึ้น จะครอบคลุมอิเล็กโทรด และแยกออกจากกัน ปริมาตรของรอยแผลที่พิจารณาจากอุณหภูมิมากกว่า 50 °C เท่ากับ $2.9 \times 10^4 \text{ mm}^3$



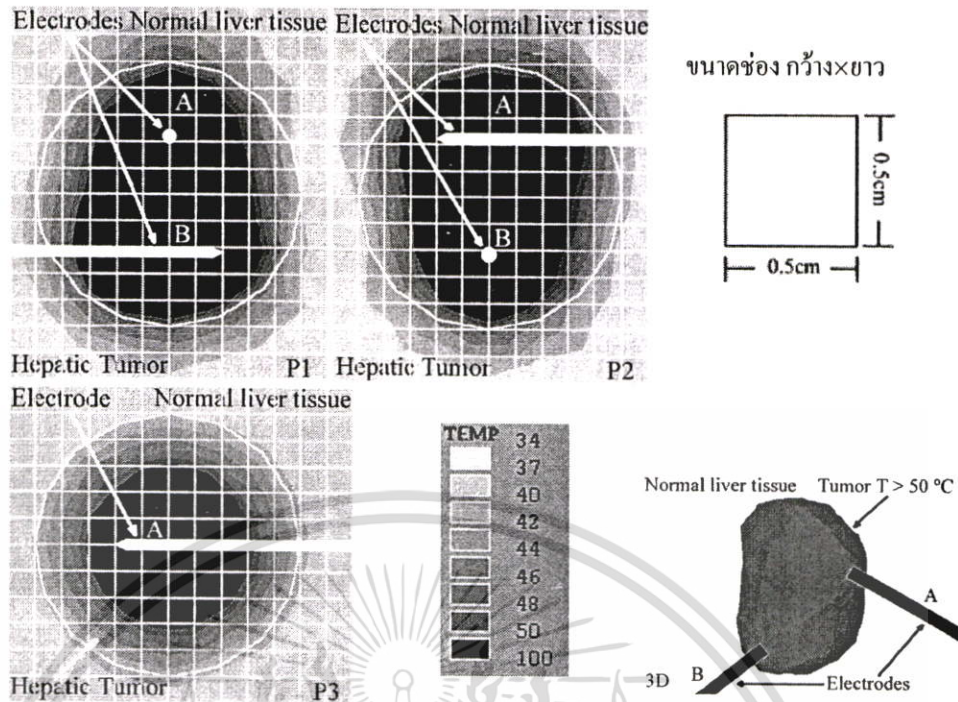
รูปที่ 5.7 แสดงภาพตัดขวางส่วนต่างๆ และลักษณะของรอยแผล 3 มิติ ที่อุณหภูมิมากกว่า 50 °C (การทดลองที่ 5)

5.3 ผลการทดลองแบบจำลองไบโพลาร์ (แบบขนานและไขว้กัน 90 องศา)

5.3.1 แบบจำลองที่ 6 การวางอิเล็กโทรดแบบไบโพลาร์แบบไขว้กัน 90 องศา และมีระยะห่างการวาง 20 มิลลิเมตร

ในการทดลองการทำไฟไนต์เอลิเมนต์กับแบบจำลองที่มีรูปแบบการวางอิเล็กโทรดที่ ไขว้กัน 90 องศา โดยอิเล็กโทรดตัวที่ 1 และตัวที่ 2 อยู่ห่างกัน 20 มิลลิเมตร ทำการทดลองโดยการให้แรงดัน ที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิที่กำหนดไว้สูงสุดที่ 90°C บนอิเล็กโทรด A และกำหนดแรงดัน 0 โวลต์บนอิเล็กโทรด B

จากการทดลองในรูปที่ 5.8 การวางอิเล็กโทรดแบบไบโพลาร์ ลักษณะของรอยแผลจะเกิดขึ้น จะมีลักษณะที่แตกต่าง จากการทดลองที่ 2 โดยลักษณะของรอยแผลที่เกิดขึ้น จะมีลักษณะเป็นไปตามการวางของอิเล็กโทรด และครอบคลุมอิเล็กโทรดทั้ง 2 ขนาดของรอยแผล พิจารณาจากแกนที่ยาวที่สุด 53 มิลลิเมตร และความกว้างของรอยแผลสูงสุด ที่พิจารณาจากแกนที่สั้นที่สุด 33 มิลลิเมตร ปริมาตรของรอยแผลที่พิจารณาจากอุณหภูมิมากกว่า 50 °C เท่ากับ $2.7 \times 10^4 \text{ mm}^3$



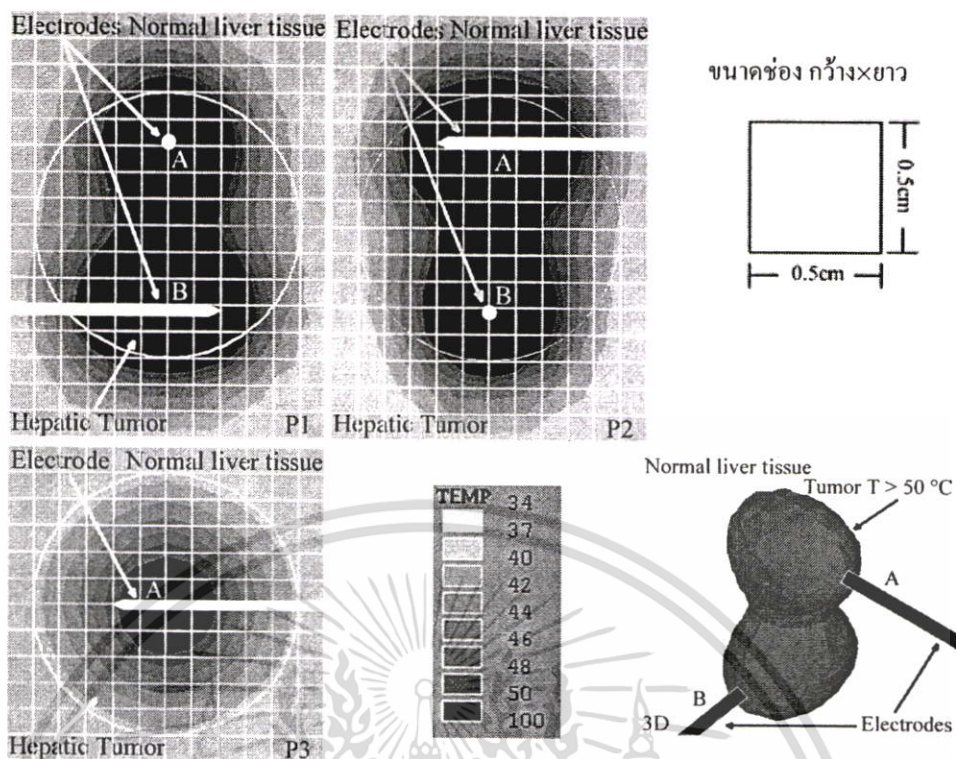
รูปที่ 5.8 แสดงภาพตัดขวางส่วนต่างๆ และลักษณะของรอยแผล 3 มิติ ที่อุณหภูมิมากกว่า $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (การทดลองที่ 6)

5.3.2 แบบจำลองที่ 7 การวางอิเล็กโทรดแบบไบโพลาร์แบบไขว้กัน 90 องศา และมีระยะห่างการวาง 30 มิลลิเมตร

ในการทดลองการทำไฟไนต์เอลิเมนต์กับแบบจำลองที่มีรูปแบบการวางอิเล็กโทรดที่ไขว้กัน 90 องศา โดยอิเล็กโทรดตัวที่ 1 และตัวที่ 2 อยู่ห่างกัน 30 มิลลิเมตร ทำการทดลองโดยการให้แรงดันที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิที่กำหนดไว้สูงสุดที่ $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ บนอิเล็กโทรด A และกำหนดแรงดัน 0 โวลต์บนอิเล็กโทรด B

จากการทดลองในรูปที่ 5.9 การวางอิเล็กโทรดแบบไบโพลาร์ ลักษณะของรอยแผลจะเกิดขึ้นจะมีลักษณะที่แตกต่าง จากการทดลองที่ 2 โดยลักษณะของรอยแผลที่เกิดขึ้น จะมีลักษณะเป็นไปตามการวางของอิเล็กโทรด และครอบคลุมอิเล็กโทรดทั้ง 2 ขนาดของรอยแผล พิจารณาจากแกนที่ยาวที่สุด 56 มิลลิเมตร และความกว้างของรอยแผลสูงสุด ที่พิจารณาจากแกนที่สั้นที่สุด 35 มิลลิเมตร ปริมาตรของรอยแผลที่พิจารณาจากอุณหภูมิมากกว่า $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ เท่ากับ $2.6 \times 10^4\text{ mm}^3$

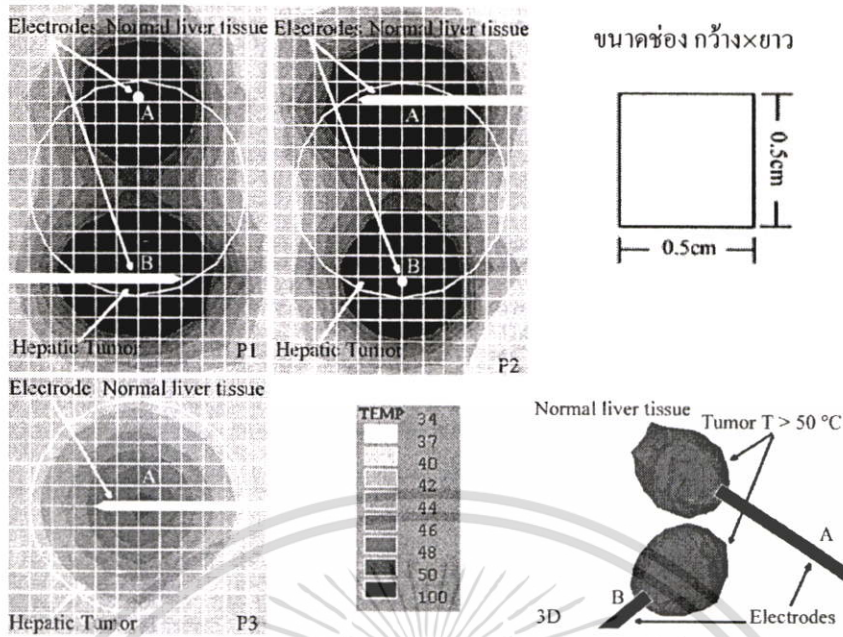
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.9 แสดงภาพตัดขวางส่วนต่างๆ และลักษณะของรอยแผล 3 มิติ ที่อุณหภูมิมากกว่า 50 °C (การทดลองที่ 7)

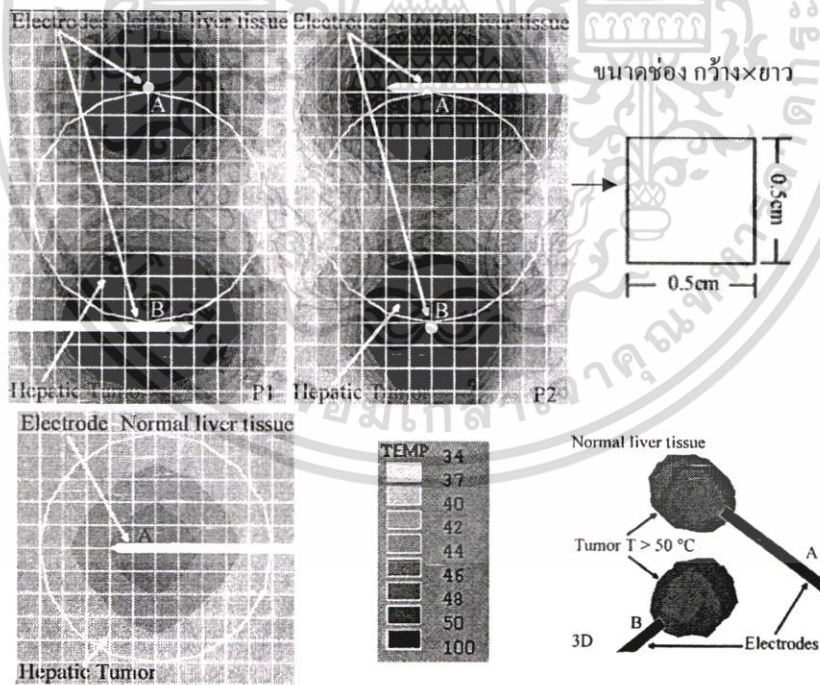
5.3.3 แบบจำลองที่ 8 การวางอิเล็กโทรดแบบไบโพลาร์แบบไขว้กัน 90 องศา และมีระยะห่างการวาง 40 มิลลิเมตร

ในการทดลองการทำไฟไนต์เอลิเมนต์กับแบบจำลองที่มีรูปแบบการวางอิเล็กโทรดที่ไขว้กัน 90 องศา โดยอิเล็กโทรดตัวที่ 1 และตัวที่ 2 อยู่ห่างกัน 40 มิลลิเมตร ในลักษณะของการจำลองผลจะใช้ดูผลกระทบระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับลักษณะรอยแผลที่เกิดขึ้นเทียบกับการทดลองที่ 4 จากการทดลองในรูปที่ 5.10 การวางอิเล็กโทรดแบบไบโพลาร์ ที่มีระยะห่าง 40 มิลลิเมตร ผลกระทบของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดทั้ง 2 ส่งผลถึงลักษณะของรอยแผล ในเวลา 600 วินาที โดยลักษณะของรอยแผลที่พิจารณาอุณหภูมิมากกว่า 50 °C จะมีลักษณะ ellipsoidal เหมือนกับการทดลองที่ 4 แต่ลักษณะของรอยแผลจะเกิดขึ้นตามลักษณะของการวางอิเล็กโทรด ปริมาตรของรอยแผลที่พิจารณาจากอุณหภูมิมากกว่า 50 °C เท่ากับ $2.7 \times 10^4 \text{ mm}^3$



รูปที่ 5.10 แสดงภาพตัดขวางส่วนต่างๆ และลักษณะของรอยแผล 3 มิติ ที่อุณหภูมิมากกว่า 50°C (การทดลองที่ 8)

5.3.4 แบบจำลองที่ 9 การวางอิเล็กโทรดแบบโพลาร์แบบไขว้กัน 90 องศา และมีระยะห่างการวาง 50 มิลลิเมตร



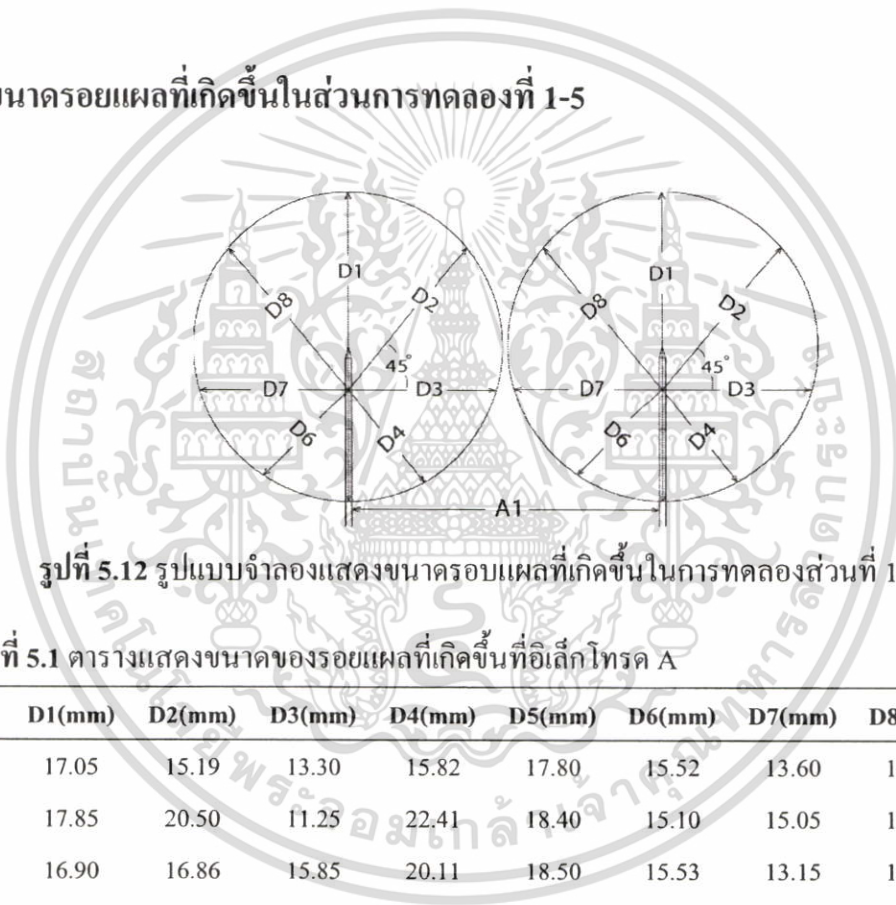
รูปที่ 5.11 แสดงภาพตัดขวางส่วนต่างๆ และลักษณะของรอยแผล 3 มิติ ที่อุณหภูมิมากกว่า 50°C (การทดลองที่ 9)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดลองการทำไฟไนต์เอลิเมนต์กับแบบจำลองที่มีรูปแบบการวางอิเล็กโทรดที่ ไขว้กัน 90 องศา โดยอิเล็กโทรดตัวที่ 1 และตัวที่ 2 อยู่ห่างกัน 50 มิลลิเมตร ในลักษณะของการจำลองผลจะใช้คู่มือกระแทกระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับลักษณะรอยแผลที่เกิดขึ้นเทียบกับการทดลองที่ 4

จากการทดลองในรูปที่ 5.11 การวางอิเล็กโทรดแบบไบโพลาร์ ที่มีระยะห่าง 50 มิลลิเมตร ผลกระทบของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดทั้ง 2 ส่งผลถึงลักษณะของรอยแผล ในเวลา 600 วินาที โดยลักษณะของรอยแผลที่พิจารณาอุณหภูมิมากกว่า 50°C จะมีลักษณะ ellipsoidal เหมือนกับการทดลองที่ 5 แต่ลักษณะของรอยแผลจะเกิดขึ้นตามลักษณะของการวางอิเล็กโทรด ปริมาตรของรอยแผลที่พิจารณาจากอุณหภูมิมากกว่า 50°C เท่ากับ $2.9 \times 10^4 \text{ mm}^3$

5.4 ขนาดรอยแผลที่เกิดขึ้นในส่วนการทดลองที่ 1-5



รูปที่ 5.12 รูปแบบจำลองแสดงขนาดรอยแผลที่เกิดขึ้นในการทดลองส่วนที่ 1-5

ตารางที่ 5.1 ตารางแสดงขนาดของรอยแผลที่เกิดขึ้นที่อิเล็กโทรด A

Case	D1(mm)	D2(mm)	D3(mm)	D4(mm)	D5(mm)	D6(mm)	D7(mm)	D8(mm)
1	17.05	15.19	13.30	15.82	17.80	15.52	13.60	16.80
2	17.85	20.50	11.25	22.41	18.40	15.10	15.05	15.39
3	16.90	16.86	15.85	20.11	18.50	15.53	13.15	14.34
4	17.10	15.47	14.55	15.77	17.25	15.07	12.60	15.25
5	18.70	19.5	17.56	16.83	17.55	15.18	13.83	17.65

ตารางที่ 5.2 ตารางแสดงขนาดของรอยแผลที่เกิดขึ้นที่อิเล็กโทรด B

Case	D1(mm)	D2(mm)	D3(mm)	D4(mm)	D5(mm)	D6(mm)	D7(mm)	D8(mm)
1	-	-	-	-	-	-	-	-
2	18.15	15.03	15.05	14.57	18.35	22.21	10.90	20.70
3	16.50	13.83	13.60	16.18	18.70	19.74	16.15	16.57
4	16.47	14.87	12.55	15.24	17.30	16.43	14.70	15.72
5	19.55	19.02	13.37	14.70	18.00	16.85	15.25	17.65

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.12 แสดงการวัดขนาดรอยแผลที่เกิดขึ้นบนอิเล็กทรอนิกส์โทรด A และ B ในส่วนการทดลองที่ 1-5 ในส่วนของตารางที่ 5.1 เป็นการแสดงระยะรอยแผลที่เกิดขึ้นบนอิเล็กทรอนิกส์โทรด A และ ตารางที่ 5.2 เป็นการแสดงระยะรอยแผลที่เกิดขึ้นบนอิเล็กทรอนิกส์โทรด B

5.5 ปริมาตรของรอยแผลและปริมาตรรวมของระบบ

ในตารางที่ 5.3 แสดงปริมาตรของรอยแผลที่อุณหภูมิมากกว่า 50 °C สัดส่วนของปริมาตรของรอยแผลเทียบกับปริมาตรเนื้อเยื่อทั้งหมด พิจารณาการทดลองกรณีที่ 1-5 โดยในกรณีที่ 1 (monopolar) จะให้ปริมาตรรอยแผลที่น้อยที่สุดเพียง 0.31 % เมื่อเทียบกับกรณี 2-5 (bipolar) ในกรณีที่ 2-5 จะมีปริมาตรรอยแผลที่ 0.72 %, 0.798%, 0.632% และ 0.759% ในกรณีที่ 6-9 จะมีปริมาตรรอยแผลที่ 0.69%, 0.67%, 0.704 และ 0.76%

ตารางที่ 5.3 แสดงปริมาตรของรอยแผล และปริมาตรรวมของระบบ

CASE	Lesion (mm ³)	Normal liver tissue (mm ³)
CASE1 monopolar	1.2×10^4	3.8×10^5
CASE2 bipolar 20 mm.	2.5×10^4	3.5×10^5
CASE3 bipolar 30 mm.	2.8×10^4	3.5×10^5
CASE4 bipolar 40 mm.	2.3×10^4	3.7×10^5
CASE5 bipolar 50 mm.	2.9×10^4	3.8×10^5
CASE6 bipolar 2cm90 mm.	2.7×10^4	3.9×10^5
CASE7 bipolar 3cm90 mm.	2.6×10^4	3.9×10^5
CASE8 bipolar 4cm90 mm.	2.7×10^4	3.9×10^5
CASE9 bipolar 5cm90 mm.	2.9×10^4	3.9×10^5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลงานวิจัย

ก่อนการสร้างระบบขึ้นทดสอบจริง การใช้วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้วิเคราะห์รูปแบบโครงสร้างของระบบที่เราต้องการสร้างขึ้นทดสอบ การสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ผลจากวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ นั้นเป็นวิธีการที่ประหยัดเวลา และใช้งบประมาณที่ต่ำมาก โดยที่เราสามารถสร้างระบบขึ้นทดสอบได้หลายรูปแบบ เมื่อได้รูปแบบที่เหมาะสมแล้วจึงทำการทดสอบกับระบบจริง ดังเช่นในงานวิจัยนี้ ในการทดลองกับระบบจริงเป็นการที่ใช้งบประมาณที่สูงมาก การใช้วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ จึงเป็นการช่วยลดค่าใช้จ่าย และสามารถเลือกรูปแบบที่ต้องการ ได้อย่างดี ในงานวิจัยได้แบ่งการทดลองออก 9 กรณีในกรณีที่ 1 จะเป็นการวางอิเล็กโทรดในแบบโมโนโพลาร์ และกรณีที่ 2-9 จะมีการวางอิเล็กโทรดแบบไบโพลาร์ แต่จะแตกต่างกันที่ ในกรณีที่ 2-5 จะเป็นการวางอิเล็กโทรดแบบขนาน และในกรณีที่ 6-9 จะเป็นการวางอิเล็กโทรดแบบขนานและไขว้กัน 90

ในการทดลองและนำผลการทดลองในกรณีที่ 1 เทียบกับกรณีที่ 2 จะเห็นได้ว่าการใช้อิเล็กโทรดแบบโมโนโพลาร์ จะมีข้อจำกัดในด้านการสร้างขนาดของรอยแผลที่เกิดขึ้นเมื่อเชื่อมต่อ (ขนาดของการสร้างรอยแผลไม่เกิน 30 มิลลิเมตร) เวลาการทดลอง 600 วินาที ซึ่งเราไม่สามารถใช้การทดลองในกรณีที่ 1 กับกรณีที่เมื่อเชื่อมต่อมีขนาดใหญ่เกิน 30 มิลลิเมตรได้ การใช้อิเล็กโทรดแบบไบโพลาร์จึงนำมาใช้ทดแทนเมื่อต้องการรอยแผลที่มีขนาดใหญ่เกิน 30 มิลลิเมตร

ในการทดลอง และนำผลการทดลองในกรณีที่ 2-5 มาเทียบกันจะพบว่าระยะทาง ต่อการวางอิเล็กโทรดในแบบไบโพลาร์ จะส่งผลกระทบต่อความสมบูรณ์ของรอยแผล โดยในกรณีที่ 2-3 และ 6-7 จะเป็นการวางอิเล็กโทรดระยะห่าง 20 มิลลิเมตร และ 30 มิลลิเมตร จะให้ผลขนาดของรอยแผลที่มีความสมบูรณ์ แต่ในกรณีที่ 4-5 และ 8-9 เป็นการวางอิเล็กโทรดระยะห่าง 40 มิลลิเมตร และ 50 มิลลิเมตร จะให้รอยแผลที่ไม่สมบูรณ์ และมีลักษณะของรอยแผลที่ไม่ติดต่อกันแยกออกจากกันอย่างเด็ดขาด ในการใช้งานจึงไม่สามารถนำกรณีที่ 4-5 และ 8-9 มาใช้งานได้

ในการทดลอง และนำผลการทดลองในกรณีที่ 2-3 และ 6-7 มาเทียบกัน โดยดูผลกระทบที่เกิดจากการวางอิเล็กโทรดที่แตกต่างกัน ซึ่งลักษณะการวางอิเล็กโทรดที่แตกต่างกัน ส่งผลกระทบต่อลักษณะของรอยแผล จากผลการทดลองในกรณีที่ 2-3 และ 6-7 นี้ให้เห็นลักษณะการสร้างของรอยแผลที่แตกต่างกัน เพื่อสามารถเลือกใช้งานในการทำลายเซลล์มะเร็งที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2 ข้อเสนอแนะในการพัฒนาต่อไป

ในแนวทางการพัฒนาในขั้นตอนต่อไป จะเป็นการทดสอบกับระบบการทดลองจริง ซึ่งจะใช้ดับหมู หรือดับวัว ในการทดลอง จะใช้เครื่องมือกำเนิดความถี่ ซึ่งสามารถกำหนดความถี่ย่านวิทยุ ช่วง 375-500 KHz ทำการทดลองกับเนื้อเยื่อดับจริง เพื่อทำการเปรียบเทียบเทียบกับผลการทดลองของแบบจำลองที่ได้จากการใช้วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยจะทดสอบอยู่ 9 กรณี

กรณีที่ 1 เป็นแบบจำลองอิเล็กโทรดแบบโมนโพลาร์

กรณีที่ 2 เป็นแบบจำลองไบโพลาร์ ที่มีรูปแบบการวางอิเล็กโทรดที่ ขนานกัน โดยอิเล็กโทรดตัวที่ 1 และ ตัวที่ 2 อยู่ห่างกัน 20 มิลลิเมตร

กรณีที่ 3 เป็นแบบจำลองไบโพลาร์ ที่มีรูปแบบการวางอิเล็กโทรดที่ ขนานกัน โดยอิเล็กโทรดตัวที่ 1 และ ตัวที่ 2 อยู่ห่างกัน 30 มิลลิเมตร

กรณีที่ 4 เป็นแบบจำลองไบโพลาร์ ที่มีรูปแบบการวางอิเล็กโทรดที่ ขนานกัน โดยอิเล็กโทรดตัวที่ 1 และ ตัวที่ 2 อยู่ห่างกัน 40 มิลลิเมตร

กรณีที่ 5 เป็นแบบจำลองไบโพลาร์ ที่มีรูปแบบการวางอิเล็กโทรดที่ ขนานกัน โดยอิเล็กโทรดตัวที่ 1 และ ตัวที่ 2 อยู่ห่างกัน 50 มิลลิเมตร

กรณีที่ 6 เป็นแบบจำลองไบโพลาร์ ที่มีรูปแบบการวางอิเล็กโทรดที่ไขว้กัน 90 องศาโดยที่ อิเล็กโทรดตัวที่ 1 และตัวที่ 2 ขนานกันและอยู่ห่างกัน 20 มิลลิเมตร

กรณีที่ 7 เป็นแบบจำลองไบโพลาร์ ที่มีรูปแบบการวางอิเล็กโทรดที่ไขว้กัน 90 องศาโดยที่ อิเล็กโทรดตัวที่ 1 และตัวที่ 2 ขนานกันและอยู่ห่างกัน 30 มิลลิเมตร

กรณีที่ 8 เป็นแบบจำลองไบโพลาร์ ที่มีรูปแบบการวางอิเล็กโทรดที่ไขว้กัน 90 องศาโดยที่ อิเล็กโทรดตัวที่ 1 และตัวที่ 2 ขนานกันและอยู่ห่างกัน 40 มิลลิเมตร

กรณีที่ 9 เป็นแบบจำลองไบโพลาร์ ที่มีรูปแบบการวางอิเล็กโทรดที่ไขว้กัน 90 องศาโดยที่ อิเล็กโทรดตัวที่ 1 และตัวที่ 2 ขนานกันและอยู่ห่างกัน 50 มิลลิเมตร

ในการทดลองกับระบบจริงเราไม่จำเป็นต้องทำการทดลองในทุกๆกรณี แต่ทำการเลือกในแต่ละกรณีที่น่าสนใจ โดยใช้การตัดสินใจจากผลการวิเคราะห์จากวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการทดลองจะเป็นการเปรียบเทียบผลการทดลองจริงกับผลที่ได้จากวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งถ้าผลการทดลองจริง มีลักษณะของรอยแผลที่ใกล้เคียงกับการวิเคราะห์โดยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ จึงสามารถสรุปได้ว่าการใช้วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถนำมาใช้วิเคราะห์งานในลักษณะนี้และสามารถพัฒนาวิธีการนี้เพื่อใช้ในการออกแบบอิเล็กโทรดในขั้นสูงต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] C. O. Esquivel, E. B. Keeffe, G.Garcia, J.C.Imperial, M.Millan, H.Monge, and S. K.So. “Hepaticneoplasms: Advances in treatment.” **J. Gastroenterol. Hepatol.**, vol. 14 (suppl.), 1999. pp. 37–41.
- [2] Sanchez R, vanSonnenberg E, D’Agostino H, Goodacre B, Esch O. “Percutaneous tissue ablation by radiofrequency thermal energy as a preliminary to tumor ablation.” **Minim Invasive Therl.**, vol. 2, 1993. pp. 299–305.
- [3] I.B. Choi and others. “Regional Hyperthermia in Combination with Radiation Therapy in Non-Small Cell Lung Cancer.” **Processing of the 7th International Congress on Hyperthermic Oncology**, Rome, vol.2. April 1996. pp. 73-74.
- [4] K. Tsuji, T. Kuroda and M.Sato. “Treatment of Non-Small Cell Lung Cancer by Combination Therapy of Radiation and Hyperthermai.” **Proceeding of the 7th International Congress on Hyperthermic Oncology**, Rome, vol.2, April 1996. pp. 75-77.
- [5] พรทิพา พินา “Biological Aspects of Hyperthermic Oncology.” **มะเร็งวิวัฒน์. ปีที่ 1, ฉบับที่ 1 (ตุลาคม 2537) : 1-9.**
- [6] ประมุข พรหมรัตนพงษ์ “Clinical Application of Hyperthermia.” **มะเร็งวิวัฒน์. ปีที่ 1, ฉบับที่ 1 (ตุลาคม 2537) : 15-23**
- [7] G. Scott Gazelle, S. Nahum Goldberg, Luigi Solbjati and Tito Livraghi, “Tumor Ablation with Radio-frequency Energy.” **Radiology2000.**, vol.217, 2000. pp. 633–646.
- [8] S.Rossi, E.Buscarini, R.Garbagnati, M.D.Stasi, P.Quaretti, M.Rago, A.Zangrandi, S.Andreola, D.Silverman, and L.Buscarini, “Percutaneous treatment of small hepatic tumors by an expandable RF needle electrode.” **Amer.J. Radiol.**, vol.170, 1998. pp.1015-1022.
- [9] Diethard Schmidt, Jochen Trubenbach, Jens Brieger, Claudius Koenig, Holger Putzhammer, Stephan H. Duda, Claus D.Claussen and Philippe L.Pereira, “Automated Saline-Enhanced Radiofrequency Thermal Ablation: Initial Results in Ex Vivo Bovine Livers.” **American Journal of Roentgenology**, vol.180, 2003. pp.163-165.
- [10] Goldberg SN, Gazelle GS, Halpern EF, Rittman WJ, Mueller PR, Rosenthal DI, “Tissue ablation with radiofrequency: effect of probe size, gauge, duration, and temperature on

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- lesion volume.” **Acad Radiol. Eng**, vol.2, 1995. pp. 399–404.
- [11] J. hansler, D. Becker, W. Muller, D. Neureiter, E.G. Hahn, “Ultraschallgesteuerte Interstitielle Hochfrequenz-Thermotherapie(HFTT)-In-vitro-Untersuchng an der Rinderleber.” **Ultraschall in Med. Eng**, 1998. pp. 59–63.
- [12]McGahan JP, Wei-Zhong G, Brock JM, Tesluk H, Jines CD, “Hepatic ablation using bipolar Radiofrequency electrocautery.” **Radiolog.**, vol.3 , 1996. pp. 418–422.
- [13] Caroline Villard, Luc Soler, Nicolas Papier, Vincent Agnus, Sylvain Thery, Afshin Gangi, Didier Mutter, and Jacques Marescaux, “Virtual Radiofrequency Ablation of Liver Tumors.” **IRCAD**, 1, place de Hopital, F67091 STRASBOURG, France (www.ircad.org)
- [14] P. Liang, B. Dong, X. Yu, D. Yu, Z. Cheng, L. Su, J. Peng, Q. Nan, and H. Wang, “Computer-Aided Dynamic Simulation of Microwave-Induced Thermal Distribution in Coagulation of Liver Cancer.” **IEEE Trans. Biomed. Eng**, vol.48, no.7, 2001. pp. 821–829.
- [15] S. Tungjitkusolmun, Eung Je Woo, Hong Cao, Jang-Zern Tsai; J.G. Webster, F.T. Lee, Jr, D.M. Mahvi, V.R. Vorperian, “Finite Element Analyses of Uniform Current Density Electrodes for Radio-Frequency Cardiac Ablation.” **IEEE Trans. Biomed. Eng**, vol.47, no.1, 2000. pp.32-40.
- [16] S. Tungjitkusolmun, S.T. Staelin, D. Haemmerich, Jang-Zern Tsai; Hong Cao; J.G. Webster, F.T. Lee, Jr, D.M. Mahvi, V.R. Vorperian, “Three-Dimensional Finite-Element Analyses for Radio-Frequency Hepatic Tumor Ablation.” **IEEE Trans. Biomed. Eng**, vol.49, no.1, 2002. pp.3-9.
- [17] Dieter Haemmerich, S. Tyler Staelin, S. Tungjitkusolmun, Fred T. Lee, Jr., David M.Mahvi, and John G.Webster, “Hepatic Bipolar Radio-Frequency Ablation Between Separated Multiprong Electrodes.” **IEEE Trans. Biomed. Eng**, vol.48, no.10, 2001. pp.1145-1152.
- [18]J.P.McGahan, J.M.Brock, H.Tesluk, W.-Z.Gu, P.Schneider, and P.D.Browing, “Hepatic ablation with use of radio-frequency electrocautery in the animal model.” **J.Vasc. Inter. Radiol.**, vol.3, 1992. pp.291-297.
- [19] A.W.Guy. “History of Biological Effects and Medical Application of Microwave Energy.” **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, vol. MTT-32, No.9,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- September 1984. pp. 1182-1199.
- [20] G.M.Hahn. "Hyperthermia for the Engineer: A Shost Biological Primer." **IEEE Transaction on Biomedical Engineering**, vol. BME-31 , No.1, January 1984. pp.3-8.
- [21] H.H. Pennes. "Analysis of Tissue and Arterial Blood Temperature in Resting Forearm." **Journal of Applied Physiology**. vol. 1, 1948. pp.93-122
- [22] J. Chato, "Heat transfer to blood vessels." **ASME Trans. Biomech. Eng.**, vol. 102, 1980. pp. 110–118.
- [23] Isaac Chang. "Finite Element Analysis of Hepatic Radiofrequency Ablation Probes Using Temperature-Dependent Electrical Conductivity." **BioMedical Engineering Online**, May 2003, pp. 2-12.
- [24] S. Tungjitkusolmun, E.J. Woo, H. Cao, J.-Z. Tsai; V.R. Vorperian; J.G. Webster "Thermal electrical Finite element modelling for radio frequency cardiac ablation: effects of changes in myocardial properties." **Medical & Biological Engineering & Computing**, vol.38, 2000. pp.562-568.
- [25] ปราโมทย์ เศษอำไพ. 2537. **ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม**. กรุงเทพฯ:จุฬาลงกรณ์
- [26] D. Haemmerich ,S T Staelin ,J Z Tsai, S Tungjitkusolmun, D M Mahvi, and J G Webster, "In vivo electrical conductivity of hepatic tumours." **Institute of Physics Publishing, Physiol. meas.**, 2003. pp.251-260.
- [27]Highfrequency induced thermotherapy (HiTT) ELEKTROTOMHiTT106
<http://www.BERCHTOLD.de>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] S. Tungjitkusolmun, A. Boontaram, P. Lertprasert, M. Krairiksh “Finite Element Analysis of Hepatic Radiofrequency Ablation Probes Using Temperature-Dependent Electrical Conductivity.” **IASTED International Conference on Biomedical Eng.**, February 2005



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายอาเขต บุญทาราม เกิดเมื่อวันที่ 5 มกราคม พ.ศ. 2521 ณ. จังหวัดเชียงใหม่ สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2545 และประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สาขาอิเล็กทรอนิกส์ ณ. วิทยาลัยเทคนิคเชียงใหม่ ปีการศึกษา 2541



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้