

บทที่ 4

การประมวลผลการทดลองวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics

4.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการประมวลผลการทดลองวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics ซึ่งประกอบไปด้วย ซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการประมวลผล กระบวนการวิเคราะห์วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วย COMSOL Multiphysics ลักษณะการควบคุมอุณหภูมิของแบบจำลอง การออกแบบแบบจำลอง การกำหนดค่าคงที่ต่างๆของแบบจำลอง การ MESH แบบจำลอง การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลอง และการประมวลผลข้อมูลของแบบจำลอง

4.2 ซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการประมวลผล

สำหรับการทดลองวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม COMSOL Multiphysics เวอร์ชัน 3.2a มาทำการสร้างแบบจำลอง การกำหนดค่าคุณสมบัติจำเพาะต่างๆของวัสดุภายในการทดลอง การกำหนดเงื่อนไขต่างๆในระบบและการประมวลผลวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ การทดลองในงานวิจัยนี้ได้ทำการประมวลผลแบบจำลองบนเครื่องคอมพิวเตอร์พีซีระบบปฏิบัติการ Windows XP โดยมี ซีพียู 1.91 กิกะไบต์ แรม 1 กิกะไบต์ ฮาร์ดดิสก์ 60 กิกะไบต์

4.3 กระบวนการวิเคราะห์วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วย COMSOL Multiphysics



รูปที่ 4.1 กระบวนการวิเคราะห์วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics

จากรูปที่ 4.1 แสดงถึงกระบวนการวิเคราะห์วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics โดยประกอบไปด้วยขั้นตอนหลักๆ 3 ขั้นตอนดังนี้คือ

1. Preprocessing ในกระบวนการขั้นแรกของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics เริ่มจากการสร้างแบบจำลอง ในลำดับต่อมาที่จะเป็นการกำหนดส่วนต่างๆของวัสดุที่ใช้ในการทดลองรวมถึงการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในแบบจำลองด้วย ในต่อมาเป็นการกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลอง และสุดท้ายก็จะเป็นการเมชแบบจำลอง

2. Solution ในขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนของการกำหนดเวลาที่ใช้ประมวลผลของการจำลองซึ่งในงานวิจัยนี้เป็นการกำหนดเวลาที่ใช้ในการจำลองการทำลายเซลล์มะเร็งระดับด้วยคลื่นความถี่วิทยุและในงานวิจัยนี้เป็นการจำลองการทำลายเซลล์มะเร็งด้วยคลื่นวิทยุแบบควบคุมอุณหภูมิ ดังนั้นในส่วนของการกระบวนการขั้นนี้จึงต้องตรวจสอบให้อุณหภูมิในระบบมีค่าอยู่ในช่วงที่กำหนดไว้ในแบบจำลองด้วย

3. Postprocessing ในขั้นตอนนี้เป็นส่วนของการวิเคราะห์ผล ซึ่งในงานวิจัยนี้เป็นการจำลองการทำลายเซลล์มะเร็งระดับด้วยคลื่นความถี่วิทยุก็จะทำการวิเคราะห์ถึงผลการกระจายของอุณหภูมิ ลักษณะและขนาดของรอยแผลที่เกิดขึ้นรวมถึงการวิเคราะห์ข้อมูลด้านอื่นๆอีกเช่น การกระจายตัวของแรงดัน ความหนาแน่นของกระแส เป็นต้น

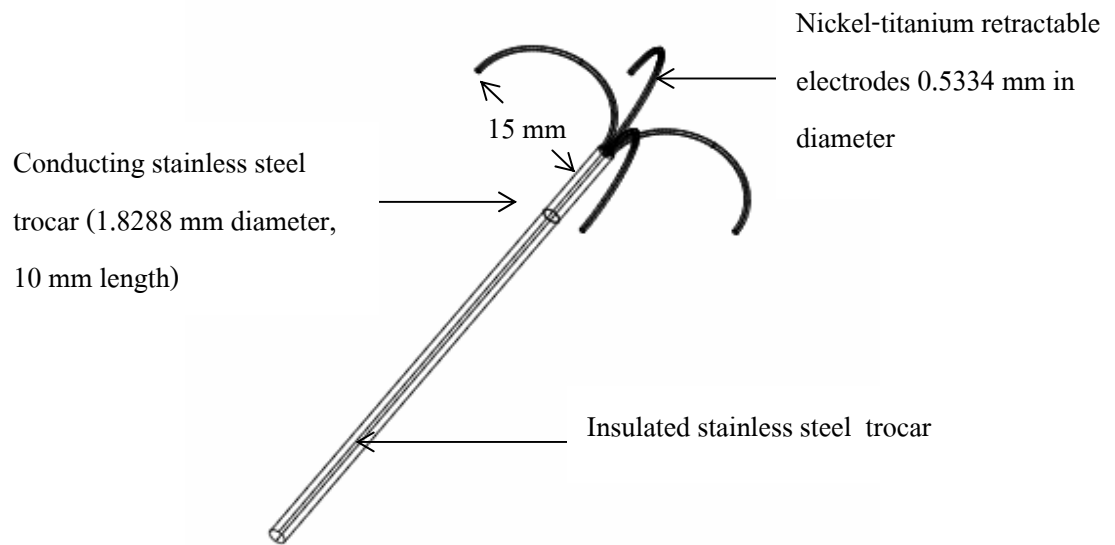
4.4 ลักษณะการควบคุมอุณหภูมิของแบบจำลอง

ในการทำลายเซลล์มะเร็งด้วยคลื่นความถี่วิทยุที่มีการใช้รักษาอยู่ในปัจจุบันจะมีรูปแบบอยู่ 2 รูปแบบ คือ แบบควบคุมกำลัง (Power controlled) และแบบควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controlled) โดยในแบบควบคุมกำลังจะมีรูปแบบการควบคุมก็จะทำการจ่ายค่ากำลังให้คงที่ตามที่ เราได้ทำการกำหนดค่ากำลังไว้ ส่วนในแบบควบคุมอุณหภูมิจะมีเทอร์มิสเตอร์หรือเทอร์โมคัปเปิล อยู่ที่ปลายอิเล็กโทรดเพื่ออ่านค่าอุณหภูมิซึ่งจะคอยปรับค่ากำลังที่จ่ายออกมาให้มีค่าตามอุณหภูมิที่ตั้งไว้ โดยส่วนมากในการใช้งานในทางคลินิกจะใช้วิธีการทำลายเซลล์มะเร็งด้วยคลื่นความถี่วิทยุในแบบการควบคุมอุณหภูมิ [5] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการทดลองที่มีการจำลองการทำลายเซลล์มะเร็งด้วยคลื่นความถี่วิทยุในแบบควบคุมอุณหภูมิ โดยการทดลองในงานวิจัยนี้จะเป็นการทำลายเซลล์มะเร็งด้วยคลื่นความถี่วิทยุแบบควบคุมอุณหภูมิภายในระบบจะควบคุมที่อุณหภูมิที่ 90°C ระยะเวลาในการทำลาย 600 วินาที ซึ่งรูปแบบของการควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ในการจำลองจะเป็นดังนี้ คือ ในการจำลองเริ่มจากการกำหนดค่าแรงดันค่าๆหนึ่ง บนผิวของอิเล็กโทรดและกำหนดกราวด์ที่ผิวนอกสุดของเนื้อเยื่อตับ จากนั้นทำการประมวลผลขั้นตอนที่ 1 เริ่มจาก 1 – 10 วินาที พิจารณาอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบริเวณปลายอิเล็กโทรด อุณหภูมิที่เกิดขึ้นอยู่นอกช่วง $89^{\circ}\text{C} - 92^{\circ}\text{C}$ จะต้องเริ่มทำการจำลองใหม่ แต่ถ้าอุณหภูมิอยู่ในช่วงก็สามารถทำการจำลองต่อไปในขั้นที่ 2 โดยในขั้นที่ 2 จะพิจารณาเหมือนกับการจำลองในขั้นตอนที่ 1 โดยทำการจำลองต่อไปในช่วง 11 – 20 วินาที ในขั้นตอนที่ 3 จะทำการจำลองในช่วง 21 – 60 วินาที ในขั้นตอนที่ 4 จะทำการจำลองในช่วง 61 – 120 วินาที ในขั้นตอนที่ 5 จะทำการจำลองในช่วง 121 – 180 วินาที

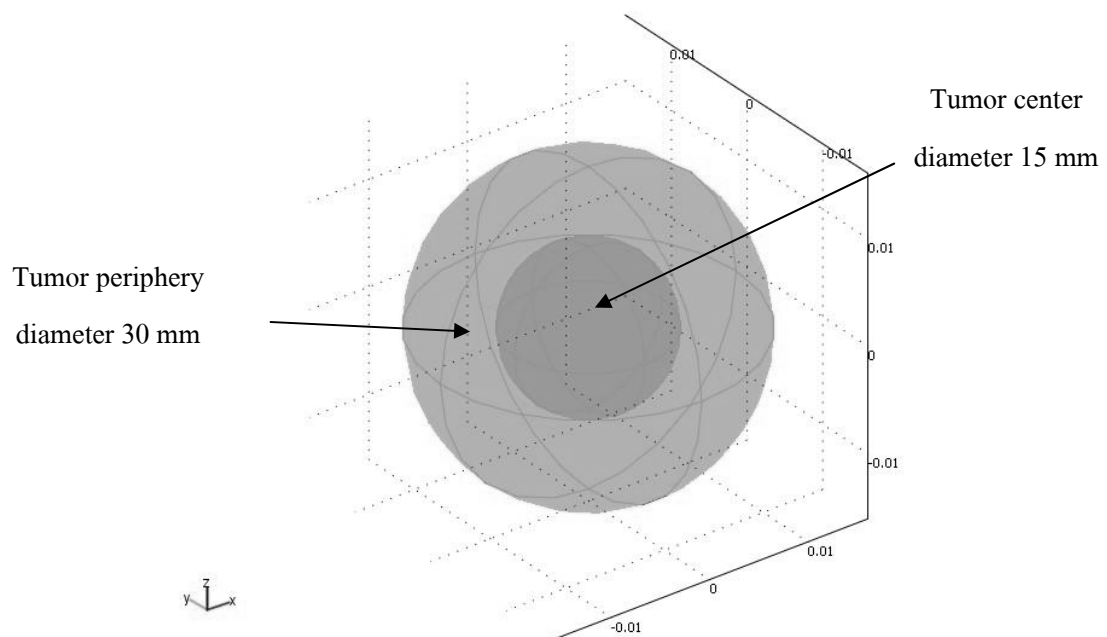
ในขั้นตอนที่ 6 จะทำการจำลองในช่วง 180 – 240 วินาที ในขั้นตอนที่ 7 จะทำการจำลองในช่วง 241 – 300 วินาที ในขั้นตอนที่ 8 จะทำการจำลองในช่วง 301 – 360 วินาที ในขั้นตอนที่ 9 จะทำการจำลองในช่วง 361 – 400 วินาที ในขั้นตอนที่ 10 จะทำการจำลองในช่วง 401 – 500 วินาที ในขั้นตอนที่ 11 ทำการจำลองในช่วง 500 – 600 วินาที ในการจำลองจะทำการจำลองควบคุมอุณหภูมิ 11 ขั้นตอนในขั้นตอนที่ 1 – 2 มีช่วงเวลาในการจำลองที่แคบ เพราะช่วงเวลานี้จะเป็นช่วงเวลาที่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในระบบสูง ในขั้นตอนที่ 3 – 9 จะเป็นช่วงเวลาที่อุณหภูมิเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยลงกว่าในการจำลองช่วงแรก ระยะเวลาที่ใช้ในการจำลองจึงสามารถขยายกว้างได้มากขึ้น ขั้นตอนที่ 10 – 11 เป็นช่วงเวลาที่อุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมากเมื่อเทียบกับในสองช่วงที่ได้กล่าวไปก่อนหน้านี้ ระยะเวลาในการจำลองจึงมีการขยายได้กว้างถึง 100 วินาที อุณหภูมิที่เกิดขึ้นโดยเฉลี่ยจากช่วงเวลาของการจำลองทั้งหมดจะอยู่ที่ 90 °C ซึ่งเมื่อเราทำการจำลองในขั้นตอนใดแล้วอุณหภูมิที่เกิดขึ้นอยู่นอกช่วง จะต้องทำการจำลองในขั้นตอนนั้นใหม่จนกว่าจะมีอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 90 °C

4.5 การออกแบบแบบจำลอง

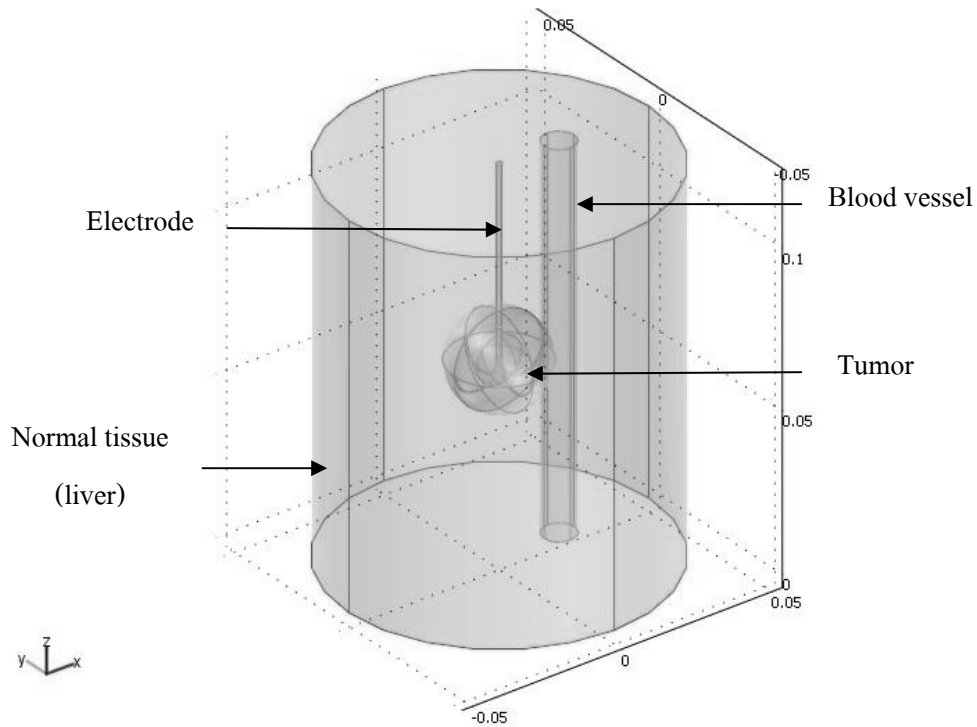
สำหรับการทดลองในงานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างแบบจำลองการทำลายเซลล์มะเร็งระดับด้วยคลื่นความถี่วิทยุ โดยใช้โพรบ (Probe) ที่ใช้ในการทำลายเซลล์มะเร็งระดับคือ โพรบ (15 gauge) [RITA Medical Systems Model 30 (RITA Medical System, Inc., Mountain View, CA)] โดยมีโครงสร้างและขนาดของโพรบดังแสดงในรูปที่ 4.2 แบบจำลองของโพรบจะถูกครอบคลุมด้วยแบบจำลองเนื้อเยื่อตับที่มีรูปทรงเป็นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร และมีความยาว 120 มิลลิเมตร และจากที่งานวิจัยนี้แบ่งการทดลองออกเป็นการทำลายในเนื้อเยื่อตับปกติกับการทำลายในก้อนเซลล์มะเร็ง จึงได้ทำการออกแบบให้ก้อนเซลล์มะเร็งมีลักษณะเป็นทรงกลม โดยก้อนเซลล์มะเร็งส่วนใน (Tumor center) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร และก้อนเซลล์มะเร็งส่วนนอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.2 แสดงขนาดและโครงสร้างของโพรบที่ใช้ในการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



รูปที่ 4.3 แสดงขนาดและลักษณะของก้อนเซลล์มะเร็ง



รูปที่ 4.4 แสดงแบบจำลองเนื้อเยื่อตับที่มีก้อนเซลล์มะเร็งและเส้นเลือดขนาดใหญ่

ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วนดังนี้ คือ ส่วนแรกเป็นการจำลองในแบบจำลองเนื้อเยื่อตับปกติ โดยศึกษาถึงผลของเส้นเลือดขนาดใหญ่ที่ระยะต่างๆระหว่างอิเล็กโทรดกับหลอดเลือดต่อการทำลายเซลล์มะเร็งด้วยคลื่นความถี่วิทยุ ซึ่งแบ่งออกเป็น

กรณีที่ 1 แบบจำลองเนื้อเยื่อตับปกติไม่มีเส้นเลือดขนาดใหญ่

กรณีที่ 2 แบบจำลองเนื้อเยื่อตับปกติ โดยมีระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดติดกับกับเส้นเลือดขนาดใหญ่

กรณีที่ 3 แบบจำลองเนื้อเยื่อตับปกติ โดยมีระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับเส้นเลือดขนาดใหญ่เท่ากับ 1 มิลลิเมตร

กรณีที่ 4 แบบจำลองเนื้อเยื่อตับปกติ โดยมีระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับเส้นเลือดขนาดใหญ่เท่ากับ 3 มิลลิเมตร

กรณีที่ 5 แบบจำลองเนื้อเยื่อตับปกติ โดยมีระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับเส้นเลือดขนาดใหญ่เท่ากับ 5 มิลลิเมตร

และในส่วนที่สองเป็นแบบจำลองเนื้อเยื่อตับที่มีก้อนเซลล์มะเร็ง โดยศึกษาถึงผลของเส้นเลือดขนาดใหญ่ที่ระยะห่างต่างๆระหว่างอิเล็กโทรดกับเส้นเลือดขนาดใหญ่ต่อการทำลายเซลล์มะเร็งด้วยคลื่นความถี่วิทยุ ซึ่งแบ่งออกเป็น

กรณีที่ 1 แบบจำลองก้อนเซลล์มะเร็ง ไม่มีเส้นเลือดขนาดใหญ่

กรณีที่ 2 แบบจำลองเนื้อเยื่อตับปกติ โดยมีระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดติดกับเส้นเลือดขนาดใหญ่

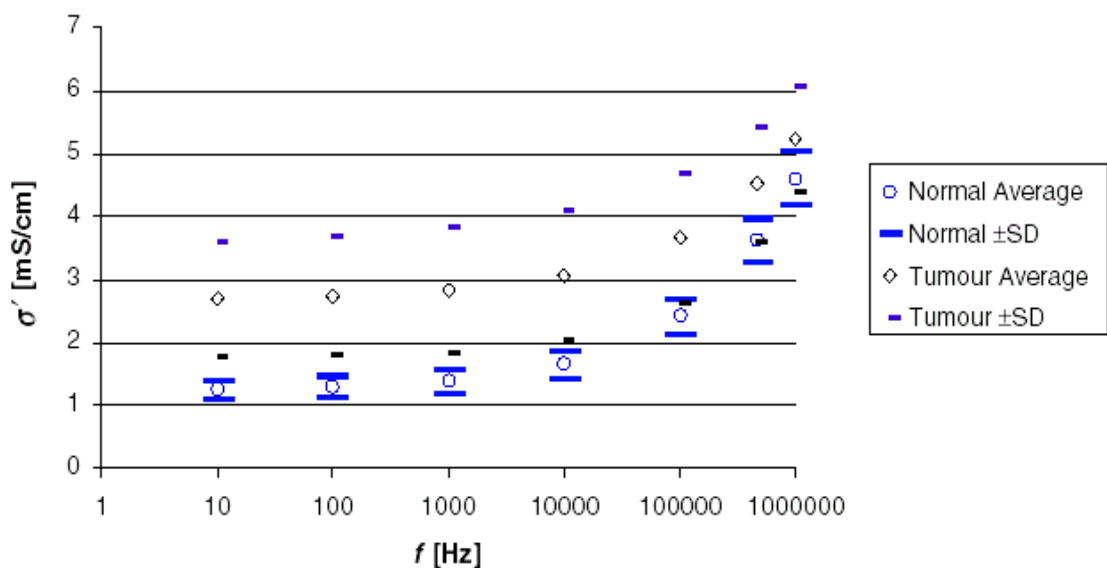
กรณีที่ 3 แบบจำลองก้อนเซลล์มะเร็ง โดยมีระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับเส้นเลือดขนาดใหญ่เท่ากับ 1 มิลลิเมตร

กรณีที่ 4 แบบจำลองก้อนเซลล์มะเร็ง โดยมีระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับเส้นเลือดเท่ากับ 3 มิลลิเมตร

กรณีที่ 5 แบบจำลองก้อนเซลล์มะเร็ง โดยมีระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับเส้นเลือดเท่ากับ 5 มิลลิเมตร

4.6 การกำหนดค่าคงที่ต่างๆของแบบจำลอง

การกำหนดค่าคงที่ต่างๆที่ใช้ในแบบจำลองของงานวิจัยนี้ ได้ทำการกำหนดค่าสภาพการนำไฟฟ้า (σ) [23] ดังแสดงในรูปที่ โดยพิจารณาการใช้สภาพการนำไฟฟ้าของเนื้อเยื่อตับปกติ และเนื้อเยื่อที่เป็นมะเร็งที่มีความถี่ 500 kHz



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของสภาพการนำไฟฟ้าเนื้อเยื่อตับปกติและเนื้อเยื่อที่เป็นมะเร็ง [23]

สำหรับแบบจำลองในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้มีการใช้ค่าคุณสมบัติจำเพาะต่างๆของวัสดุในแบบจำลอง โดยใช้ค่าคุณสมบัติต่างๆ จากงานวิจัย [5-10] ซึ่งจะประกอบไปด้วยวัสดุ 7 ส่วน คือ อิเล็กโทรด, Trocar, คีมจับ (Catheter), เนื้อเยื่อตับปกติ, ก้อนเซลล์มะเร็งส่วนใน (Tumor center), ก้อนเซลล์มะเร็งส่วนนอก (Tumor periphery) และเลือด ดังแสดงในตารางที่ 4.1 โดยค่าต่างๆ

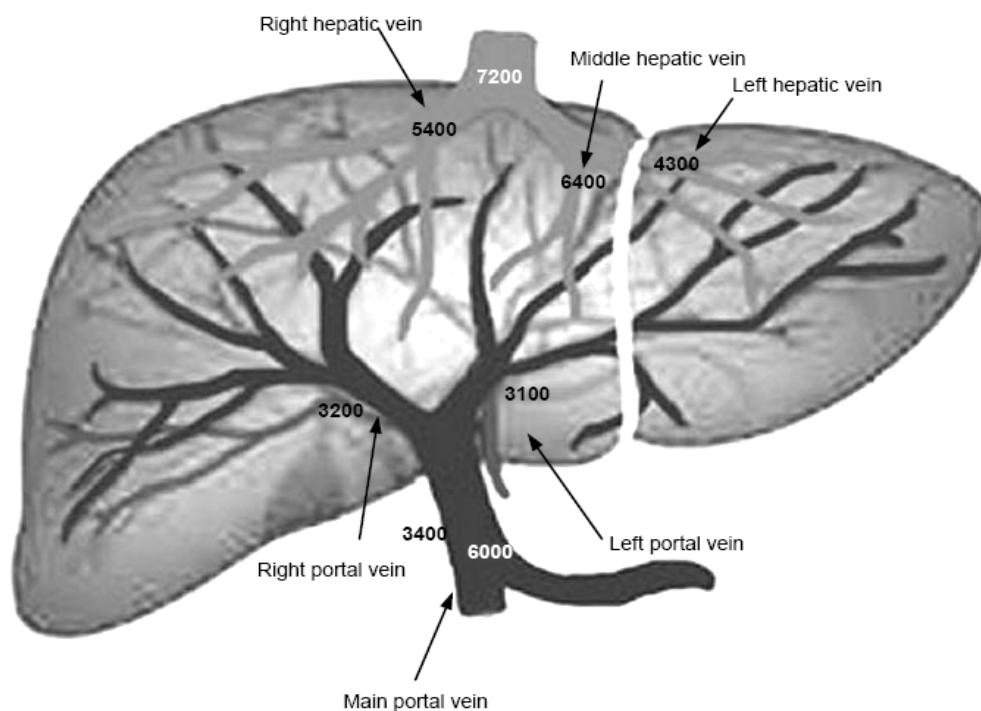
เหล่านี้เป็นค่าคุณสมบัติจำเพาะของวัสดุที่นำมาใช้กับแบบจำลองของงานวิจัยนี้เพื่อนำมาทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์แบบจำลอง 3 มิติ ในส่วนของตารางที่ 4.1 ได้แสดงค่าคุณสมบัติทางด้านการร้อน ค่าคุณสมบัติด้านทางไฟฟ้า และตัวแปรต่างๆที่ใช้กับแบบจำลอง ซึ่งได้แก่ ความหนาแน่นจำเพาะ (kg/m^3), ค่าความร้อนจำเพาะ ($J/kg \cdot K$), ค่าการนำความร้อน ($W/m \cdot K$) และค่าการนำไฟฟ้าของวัสดุ (S/m)

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติจำเพาะของวัสดุที่ความถี่ 500 kHz ที่ใช้กับแบบจำลอง

FE region	Material	ρ [kg/m^3]	c [$J/kg \cdot K$]	k [$W/m \cdot K$]	σ [S/m]
Electrode	Ni-Ti	6450	840	18	1×10^8
Trocar	Stainless steel	21500	135	71	4×10^6
Catheter body	Polyurethane	70	1045	0.026	1×10^{-5}
Tissue	Normal Tissue	1060	3600	0.512	0.300
Tissue	Tumor center	1060	3600	0.512	0.400
Tissue	Tumor periphery	1060	3600	0.512	0.400
เลือด	เลือด	1000	4180	0.543	0.667

ค่าคุณสมบัติจำเพาะของ ดัชนีที่ผิดปกติ $k = 0.57 W/m \cdot K$, $\rho = 1040 kg/m^3$ และ $c = 3628 J/kg \cdot K$ [17] ซึ่งคุณสมบัติจำเพาะต่างๆนี้มีค่าใกล้เคียงกับค่าคุณสมบัติจำเพาะของเซลล์ปกติ ในการทดลองนี้มุ่งเน้นในการศึกษาในส่วนของสภาพความนำไฟฟ้า เพราะเป็นตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อระบบมากที่สุด ค่าคุณสมบัติจำเพาะของเซลล์ปกติและเซลล์มะเร็ง จึงกำหนดให้มีค่าเท่ากันแต่มีค่าที่แตกต่างกันในส่วนของคุณค่าสภาพความนำไฟฟ้า ในเนื้อเยื่อผิดปกติมีค่าเท่ากับ $0.3 S/m$ และส่วนของเซลล์มะเร็งมีค่าเท่ากับ $0.4 S/m$

แบบจำลองของงานวิจัยนี้ในส่วนของคุณค่าการไหลเวียนของเลือด (Blood perfusion rate) ในเนื้อเยื่อผิดปกติได้กำหนดให้มีค่ากับ $\omega_{bl} = 6.4 \times 10^{-3} 1/s$ [5] และจากการศึกษา [7] พบว่าคุณค่าการไหลเวียนของเลือดในเนื้อเยื่อจะมีค่าน้อยกว่าค่าอัตราการไหลของเลือดในเนื้อเยื่อปกติ ดังนั้นในส่วนของคุณค่าการไหลเวียนของเลือดในก้อนเซลล์มะเร็งของแบบจำลองในงานวิจัยนี้จึงกำหนดให้มีค่าน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของค่าการไหลเวียนของเลือดในเนื้อเยื่อปกติ โดยก้อนเซลล์มะเร็งส่วนในกำหนดให้ไม่มีการไหลเวียนในก้อนเซลล์มะเร็ง ส่วนก้อนเซลล์มะเร็งส่วนนอกกำหนดให้มีค่าน้อยกว่าค่าการไหลเวียนของเลือดในเนื้อเยื่อปกติที่ครึ่งหนึ่ง จึงมีการไหลเวียนเลือดเท่ากับ $3.2 \times 10^{-3} 1/s$

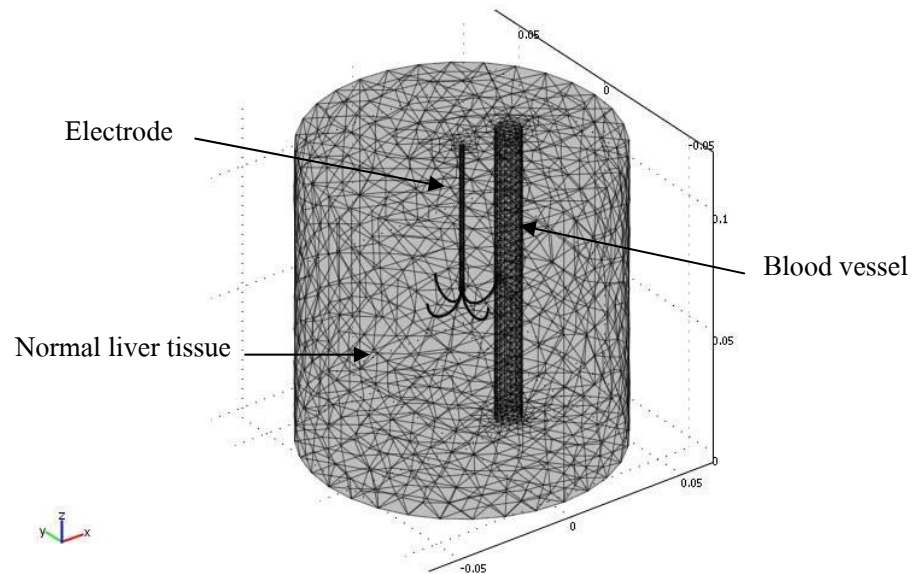


รูปที่ 4.6 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของเส้นเลือดขนาดใหญ่ภายในตับ [18]

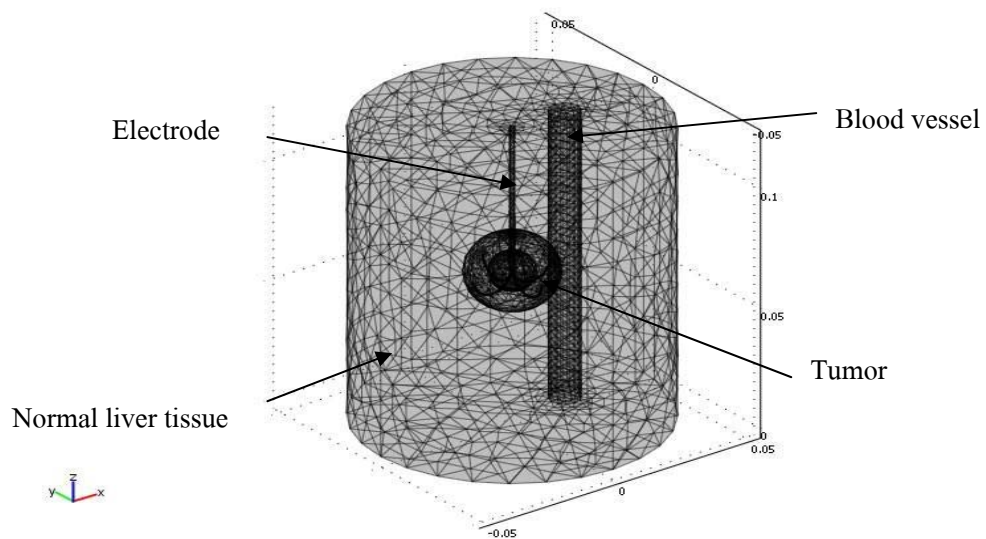
ในงานวิจัยนี้นอกจากจะทำการศึกษาถึงการกระจายอุณหภูมิในเนื้อเยื่อจากการทำลายเซลล์มะเร็งด้วยคลื่นความถี่วิทยุในเนื้อเยื่อตับปกติและก้อนเซลล์มะเร็งแล้ว ยังได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบจากเส้นเลือดขนาดใหญ่ภายในตับต่อการทำลายเซลล์มะเร็งด้วยคลื่นความถี่วิทยุ ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า จะตรวจพบการเจริญเติบโตของก้อนเซลล์มะเร็งตรงบริเวณใกล้กับเส้นเลือดขนาดใหญ่ และผลจากเส้นเลือดขนาดใหญ่ต่อการทำลายเซลล์มะเร็งด้วยคลื่นความถี่วิทยุจะให้ผลการรักษาที่ไม่สมบูรณ์อันเนื่องมาจากผลของการระบายความร้อนของเลือดในเส้นเลือดขนาดใหญ่ [4] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงออกแบบให้แบบจำลองของเนื้อเยื่อตับมีเส้นเลือดขนาดใหญ่รวมอยู่ในแบบจำลองด้วย ซึ่งกำหนดให้เส้นเลือดขนาดใหญ่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตรและให้ค่าสัมประสิทธิ์ของการพาความร้อนของเส้นเลือดขนาดใหญ่เท่ากับ $3200 \text{ W}(\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$ [18]

4.7 การ MESH แบบจำลอง

ในรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 จะการแสดงผลการเมชแบบจำลองด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics ของแบบจำลองเนื้อเยื่อตับปกติและเนื้อเยื่อตับที่ประกอบไปด้วยเซลล์มะเร็ง และเส้นเลือดขนาดใหญ่โดยใช้เอลิเมนต์เป็นแบบ tetrahedral elements การเมชแบบจำลองหรือการแบ่งแบบจำลองออกเป็นเอลิเมนต์เล็กๆจะเมชในลักษณะที่ไม่มีรูปแบบหรือขนาดตายตัวแต่ละส่วนของอวัยวะ ก้อนเซลล์มะเร็ง เส้นเลือดขนาดใหญ่จะเมชแบบละเอียด แต่บริเวณเนื้อเยื่อตับปกติจะเมชในลักษณะที่ค่อนข้างหยาบ ทั้งนี้เพราะเมื่อทำการเมชแบบละเอียดเท่ากันทั้งหมดจะทำให้มีจำนวนโหนดและเอลิเมนต์ที่มากทำให้ใช้หน่วยความจำของคอมพิวเตอร์และเวลาในการคำนวณค่อนข้างมากจนอาจส่งผลให้โปรแกรมมีข้อผิดพลาดไม่สามารถทำการเมชแบบจำลองได้ แต่หากทำการเมชในลักษณะที่หยาบเหมือนกันทั้งหมดก็จะทำให้ผลที่ได้จากการคำนวณมีความผิดพลาดมากตามไปด้วยถึงแม้จะใช้เวลาในการคำนวณน้อยก็ตาม ดังนั้นการเมชแบบจำลองของงานวิจัยนี้จะพิจารณาตามความสำคัญโดยส่วนที่ต้องการความถูกต้องสูงก็จะทำการเมชแบบจำลองแบบละเอียด ส่วนที่พิจารณาแล้วไม่มีผลต่อการคำนวณหรือว่ามีผลน้อยก็จะทำการเมชส่วนนั้นแบบหยาบ



รูปที่ 4.7 แสดงการ MESH แบบจำลองเนื้อเยื่อตับปกติและเส้นเลือดขนาดใหญ่



รูปที่ 4.8 แสดงการ MESH แบบจำลองก้อนเซลล์มะเร็งและเส้นเลือดขนาดใหญ่

ตารางที่ 4.2 แสดงจำนวนเอลิเมนต์ของแบบจำลองเนื้อเยื่อตับปกติทั้ง 5 กรณี

Case	Elements	Number of degree of freedom
1	49346	17488
2	50306	17878
3	50430	17956
4	50853	18080
5	50927	18112

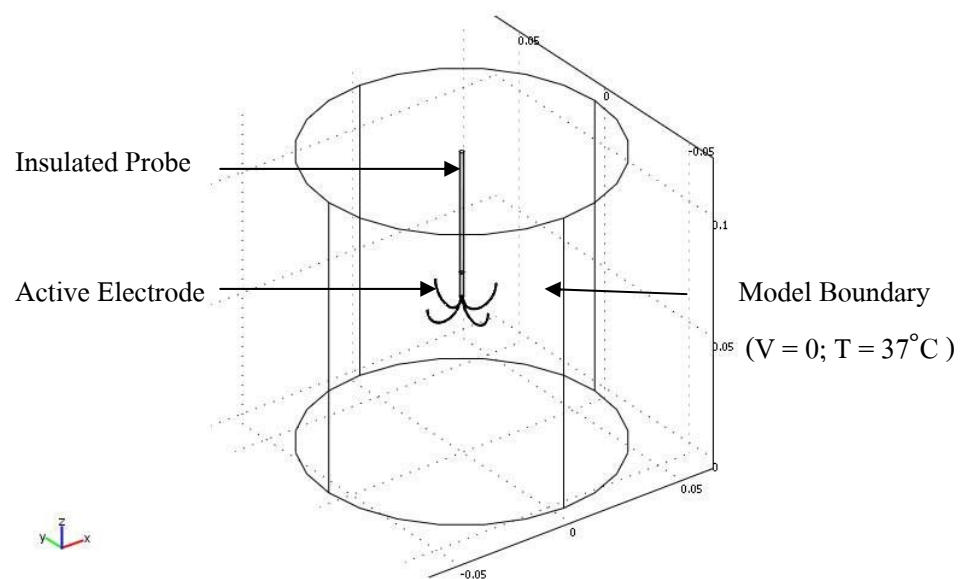
ตารางที่ 4.3 แสดงจำนวนเอลิเมนต์ของแบบจำลองก้อนเซลล์มะเร็งทั้ง 5 กรณี

Case	Elements	Number of degree of freedom
1	48464	16944
2	60597	21136
3	59771	20840
4	60262	21008
5	60995	21727

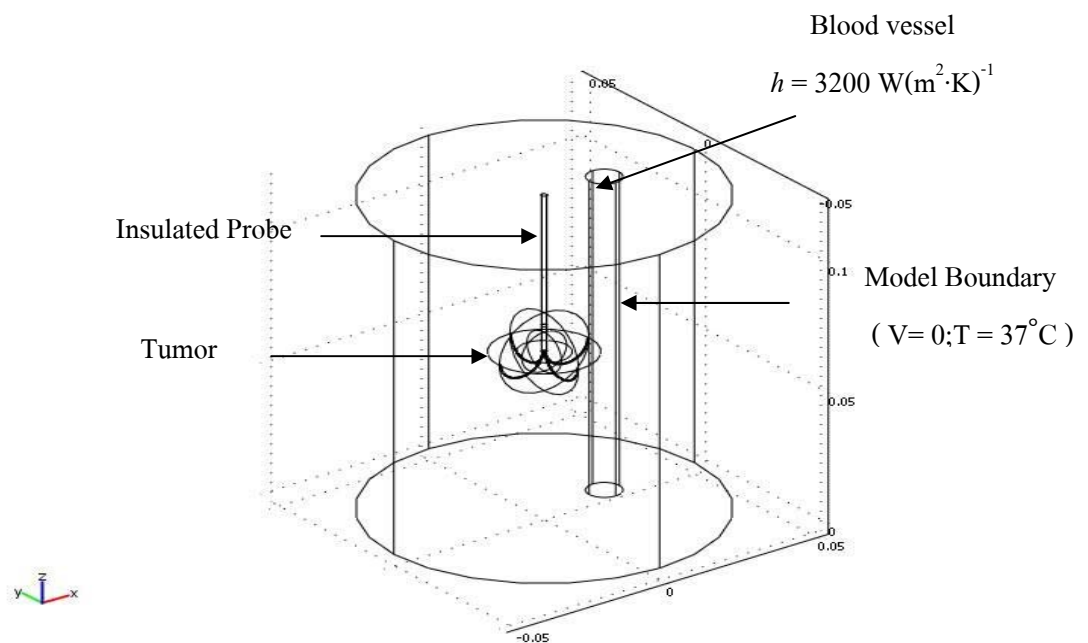
จากตารางที่ 4.2 และ 4.3 แสดงถึงจำนวนเอลิเมนต์ของแบบจำลองทั้งสองลักษณะโดยส่วนของตารางที่ 4.2 จะเป็นการ จากการ MESH ในส่วนของการทดลองกับแบบจำลองเนื้อเยื่อตับปกติ ทั้งหมด 5 กรณี และตารางที่ 4.3 จะเป็นการ จากการ MESH ในส่วนของการทดลองกับแบบจำลองเนื้อเยื่อตับที่มีก้อนเซลล์มะเร็งทั้งหมด 5 กรณี

4.8 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตบนแบบจำลอง

สำหรับการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตบนแบบจำลองเนื้อเยื่อตับ ได้กำหนดแรงดันรอบๆ ผิวของอิเล็กโทรดและกำหนดกราวด์ที่ผิวนอกสุดของเนื้อเยื่อตับ ซึ่งเป็นการบังคับให้สนามไฟฟ้าวิ่งจากผิวอิเล็กโทรดสู่ผิวของเซลล์เนื้อเยื่อด้านนอก ในการทดลองต้องมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่ให้กับผิวอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้นหรือลดลง โดยพิจารณาจากอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นภายในระบบไม่เกิน 90°C การกำหนดแรงดันจะถูกควบคุมตามอุณหภูมิที่เกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.9 และ 4.10



รูปที่ 4.9 แสดงการกำหนดขอบเขตของแบบจำลองเนื้อเยื่อตับปกติ



รูปที่ 4.10 แสดงการกำหนดขอบเขตของแบบจำลองเนื้อเยื่อตับที่มีก้อนเซลล์มะเร็ง

4.9 การประมวลผลข้อมูลบนแบบจำลอง

ในการวิเคราะห์ปัญหาของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่มีความเกี่ยวข้องกับระบบอุณหภูมิจำลองและระบบไฟฟ้า ในส่วนของโปรแกรม COMSOL Multiphysics จะทำการวิเคราะห์ปัญหาแบบควบคู่กันไปทั้งในส่วนของการคำนวณความร้อนและกับทางด้านไฟฟ้า หรือสามารถประมวลผลปัญหาทางด้านหนึ่งก่อน แล้วจึงนำผลลัพธ์ที่ได้ ไปใช้ในอีกปัญหาหนึ่ง โดยในงานวิจัยนี้ในการประมวลผลข้อมูลบนแบบจำลองจะเป็นการประมวลผลแบบควบคู่กันไปทั้งสองด้านคือทางด้านความร้อนและทางไฟฟ้า