

บทที่ 3

วิธีการในการวิจัย

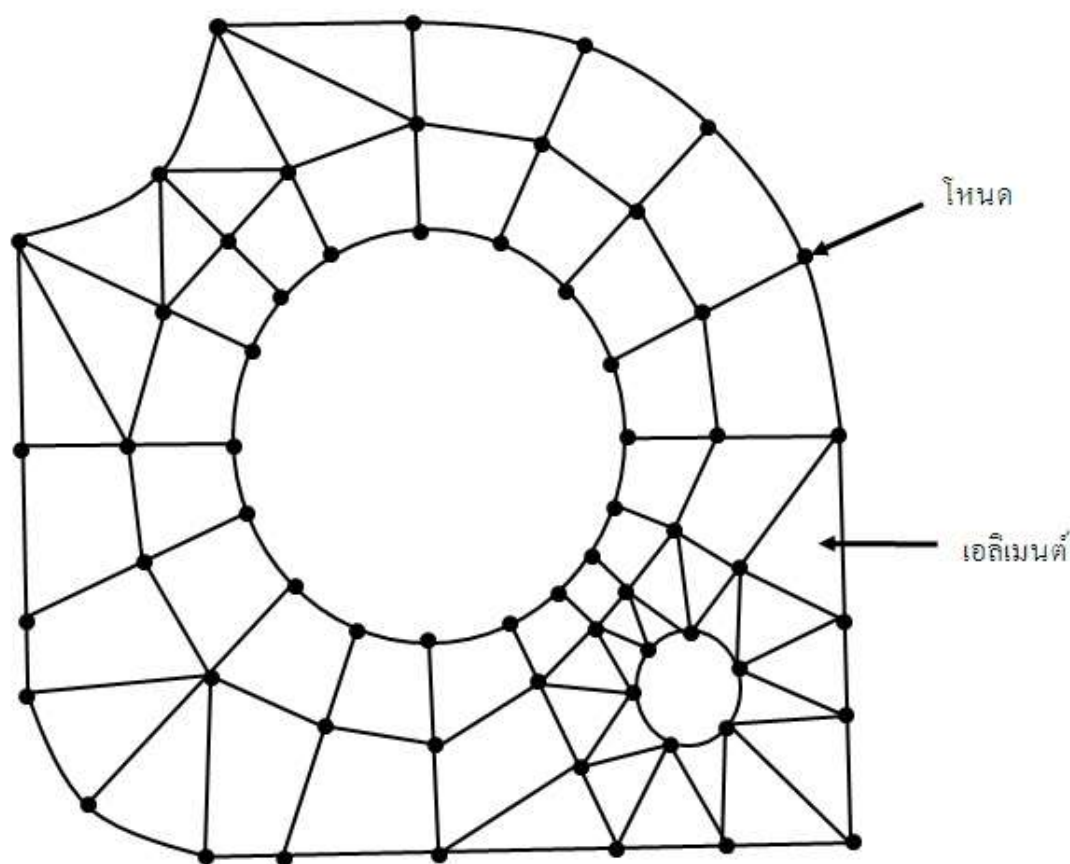
3.1 บทนำ

จากบทที่ 2 ได้กล่าวถึงการนำสายอากาศมาใช้ในการทำลายเซลล์มะเร็ง ด้วยคลื่นความถี่ไมโครเวฟ จะเห็นได้ว่าสายอากาศที่ได้ถูกนำเสนอจะมีลักษณะของการทำลายเซลล์มะเร็งที่แตกต่างกัน

ในบทนี้ จะกล่าวถึงโครงสร้างของสายอากาศ 3 แบบ คือ สายอากาศแบบปลายเปิด (COA) สายอากาศแบบสล็อต (CSA) และสายอากาศแบบสล็อตที่มีฉนวนหุ้ม (CSAI) แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ การจัดเตรียมการทดลองเพื่อยืนยันความถูกต้องของผลที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ รายละเอียดพารามิเตอร์ คุณสมบัติทางไฟฟ้า และคุณสมบัติทางด้านการส่งผ่านความร้อนของสายอากาศ ในเนื้อเยื่อตับที่ใช้ในการจำลองการทำงานด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์

3.2 ทฤษฎีการใช้วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์

ในการแก้ปัญหาหนึ่งๆ ด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ จะทำการแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นเนื้อที่หลายๆ ชิ้นที่เรียกว่า เอลิเมนต์ ซึ่งสามารถจำลองรูปแบบที่เที่ยงตรง ดังรูปที่ 3.1



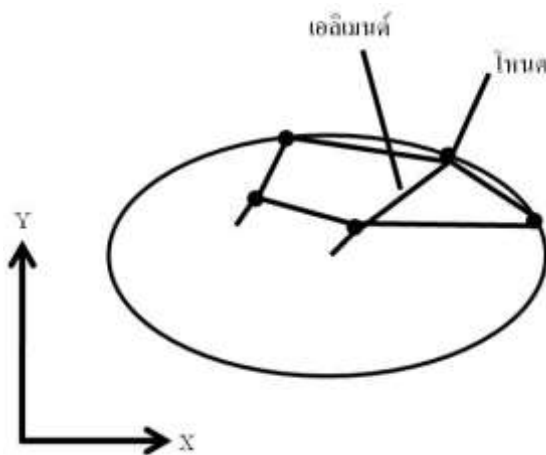
รูปที่ 3.1 แสดงแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ถูกแบ่งออกเป็นเอลิเมนต์ และ โหนด [1]

ในการแก้ปัญหาใดปัญหาหนึ่ง ปัญหานั้นจะต้องประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมา การหาค่าผลเฉลยแม่นยำตรง (exact solution) จะประกอบด้วยค่าต่างๆ เป็นจำนวนอนันต์ ซึ่งเราไม่สามารถหาค่าผลเฉลยได้เลยจึงต้องเปลี่ยนค่าทั้งหมดที่เป็นอนันต์ให้เป็นจำนวนที่นับได้ (finite) ทำการแทนรูปร่างลักษณะของปัญหาคด้วยเอลิเมนต์ (element) ที่มีขนาดต่างๆ กัน

หลักการทางไฟไนต์เอลิเมนต์จะเริ่มจากการพิจารณาเอลิเมนต์ทีละเอลิเมนต์ ทำการสร้างสมการให้แต่ละเอลิเมนต์ที่สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหานั้นๆ จากนั้นจึงนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นมาประกอบเข้าด้วยกัน รวมเป็นระบบสมการชุดใหญ่ จากนั้นทำการ

กำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ให้มาลงในสมการชุดใหญ่แล้วจึงทำการแก้สมการ และจะเกิดผลเฉลยโดยประมาณที่ตำแหน่งต่างๆ ของปัญหานั้น

วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์จะประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ๆ 6 ขั้นตอนดังนี้



รูปที่ 3.2 การแบ่งรูปร่างลักษณะของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์แบบต่างๆ

ขั้นตอนที่ 1 ทำการแบ่งขอบเขตรูปร่างของปัญหาที่ต้องการหาผลลัพธ์ ออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ ดังรูปที่ 3.2

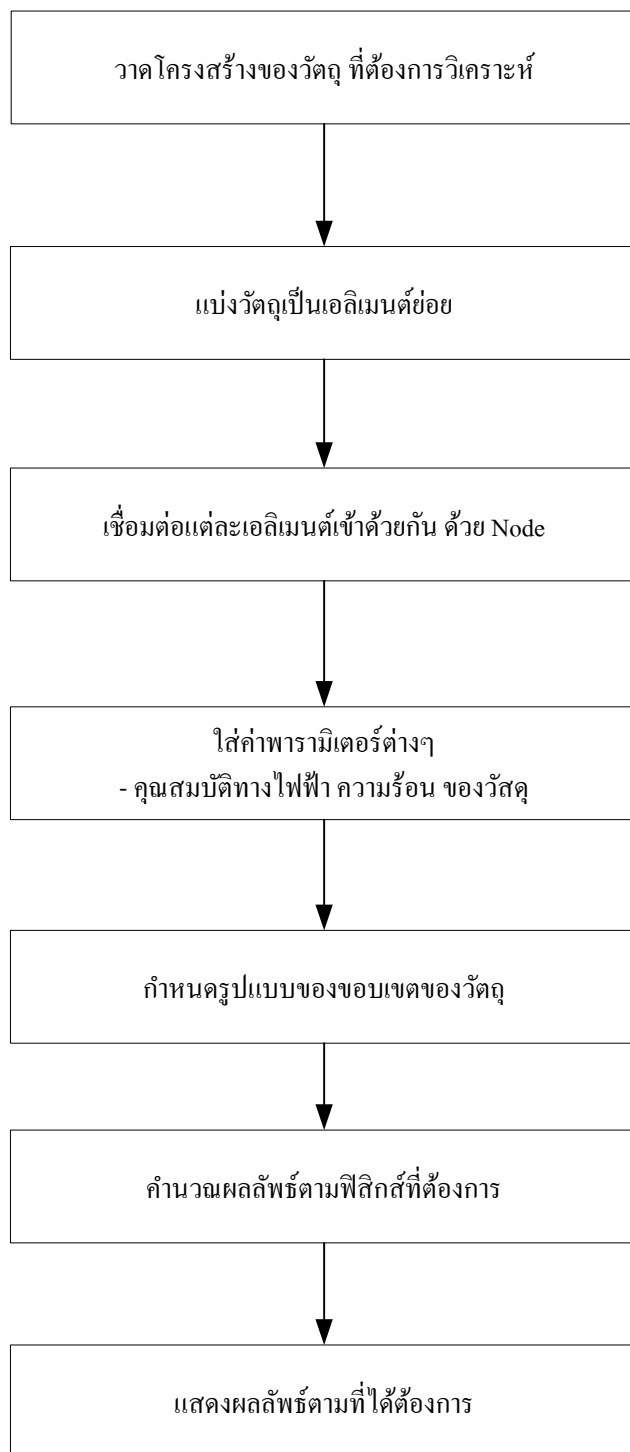
ขั้นตอนที่ 2 เลือกฟังก์ชันประมาณภายในเอลิเมนต์ (element interpolation function)

ขั้นตอนที่ 3 สร้างสมการของเอลิเมนต์

ขั้นตอนที่ 4 นำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่ได้มาประกอบรวมกันเป็นสมการระบบใหญ่

ขั้นตอนที่ 5 ทำการประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต (boundary conditions) แล้วจึงแก้สมการเพื่อหาค่าตัวที่ไม่ทราบค่า อาจเป็นค่าของอุณหภูมิที่จุดต่างๆ ถ้าเป็นปัญหาที่เกี่ยวข้องกับความร้อน

ขั้นตอนที่ 6 เมื่อคำนวณค่าต่างๆ ที่จุดต่อออกมาแล้วก็สามารถหาค่าอื่นๆ ที่ต้องการทราบต่อไปได้ เช่น เมื่อรู้อุณหภูมิที่จุดต่างๆ ก็สามารถหาค่าการถ่ายเทความร้อนได้

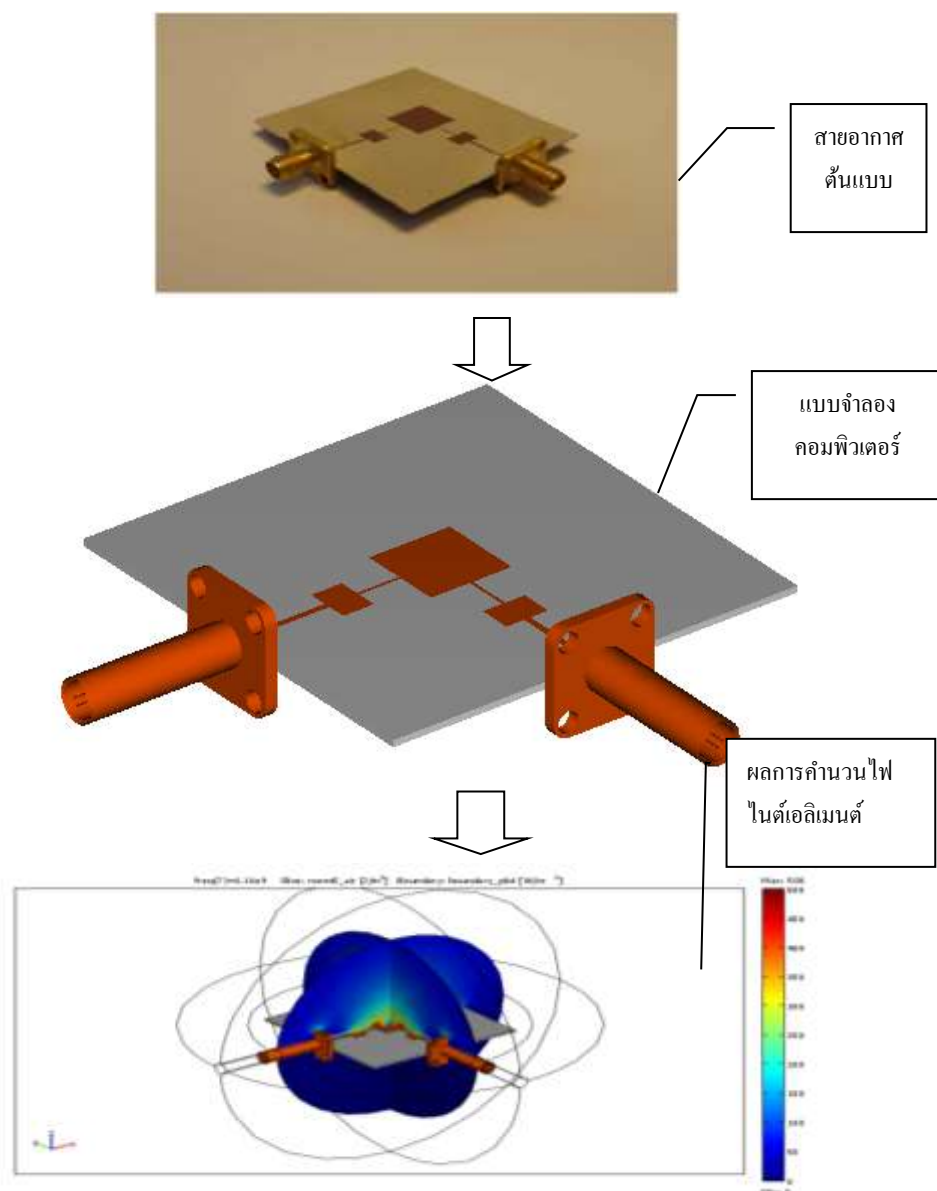


รูปที่ 3.3 แสดงขั้นตอนการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

จากรูปที่ 3.3 แสดงขั้นตอนการคำนวณไฟไนต์เอลิเมนต์ไล่ลำดับจากชั้นบนสุด ลงสู่ชั้นตอนด้านล่าง มีรายละเอียดดังนี้ ขั้นตอนแรก วาดโครงสร้างของชิ้นงานที่ต้องการทำการวิเคราะห์ ด้วยโปรแกรมสร้างชิ้นงาน 3 มิติ เช่น SolidWork Catia UG สร้างรูปแบบให้มีขนาดตามสัดส่วนเท่ากับของจริง แล้วส่งออกในรูปแบบมาตรฐาน ได้แก่ IGES STL STP เพื่อนำเข้าสู่โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ เช่น ANSYS COMSOL ABACUS โดยในงานวิจัย ผู้เขียนใช้โปรแกรม COMSOL (COMSOL Inc., Burlington, MA) ในการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งมีความโดดเด่นในการคำนวณแก้ปัญหาทางวิศวกรรมด้านไฟฟ้า เช่น ทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ทางด้านเคมี ที่มีอนุภาคเล็กๆ

ในขั้นตอนของการแบ่งชิ้นงานเป็นชิ้นย่อยๆ ไปยังขั้นตอนการใส่พารามิเตอร์ และคุณสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ ถึงขั้นตอนที่ทำการคำนวณผลลัพธ์ที่ได้แล้วแสดงผลออกมา ในขั้นตอนสุดท้ายถูกจัดการด้วยโปรแกรมคำนวณไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยเมื่อได้ผลออกมาแล้วจะมีการตรวจสอบความถูกต้องว่าขนาดของวัตถุนั้นมีขนาดเล็กหรือใหญ่ไป ทำให้ผลที่ได้ไม่ได้ตามต้องการ ถ้ามีการปรับปรุงโครงสร้างของวัตถุใหม่ก็จะเริ่มขั้นตอนตามไคอะแกรมจากบนสุดสู่ขั้นตอนสุดท้ายล่างสุด

ตัวอย่าง รูปที่ 3.4 เป็นตัวอย่างจริงที่ใช้วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์มาทำการวิเคราะห์ปัญหาทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยตัวอย่างเป็นการออกแบบสายอากาศ โดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์มาทำการออกแบบสายอากาศในย่านความถี่ที่ใช้งาน Wi-Fi หรือ GPS



รูปที่ 3.4 แสดงการนำไฟไนต์เอลิเมนต์มาทำการออกแบบสายอากาศ

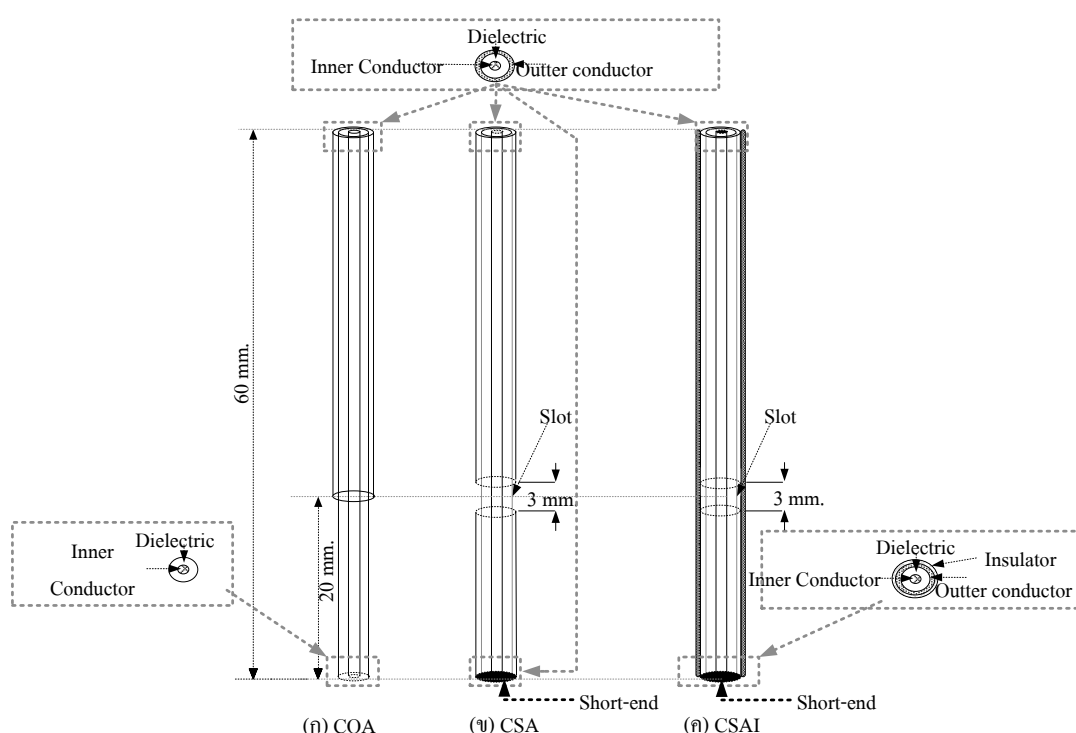
ในรูปที่ 3.4 แสดงการออกแบบสายอากาศด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยออกแบบสายอากาศ ทำการวาดโครงสร้างสายอากาศที่ต้องการทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมวาดแบบ 3 มิติ แล้วส่งเข้าสู่โปรแกรมทำการคำนวณไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อกำหนดพารามิเตอร์ ความถี่ในการใช้งาน และขอบเขตของการวิเคราะห์ โดยเลือกโมดูลในการคำนวณ Electromagnetic ทำการคำนวณ หลังจากทำการคำนวณค่าทาง Electromagnetic แล้วแสดงผลลัพธ์ต่างๆ เช่น รูปแบบการแพร่กระจายคลื่น ความถี่ที่ตอบสนอง ฯลฯ

จะเห็นได้ว่า วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถแสดงรายละเอียดต่างๆ ที่เราไม่สามารถมองเห็นด้วยตา หรือต้องใช้เครื่องมือวัดราคาแพง ซึ่งทำให้สามารถลดต้นทุน และค่าใช้จ่ายในการ

ออกแบบโครงสร้างที่เหมาะสมกับปัญหาต่างๆ ที่ต้องการแก้ปัญหาแล้วแสดงผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ แต่ในการคำนวณจำเป็นต้องใช้ประสิทธิภาพของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่สูงมาก

รายละเอียดต่อไปจะกล่าวถึงโครงสร้างของสายอากาศ 3 แบบ สายอากาศแบบปลายเปิด สายอากาศแบบสล็อต และสายอากาศแบบสล็อตที่มีฉนวนหุ้ม ที่ต้องการวิเคราะห์ การแพร่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้า และความร้อนที่เกิดขึ้นในเนื้อเยื่อ เพื่อนำมาใช้ในการรักษาโรคมะเร็งด้วยคลื่นความถี่ไมโครเวฟ

3.3 โครงสร้างของสายอากาศที่ทำการวิเคราะห์



รูปที่ 3.5 โครงสร้างของสายอากาศ (ก) ปลายเปิด (COA) (ข) แบบสล็อต(CSA)
(ค) แบบสล็อตที่มีฉนวนหุ้ม (CSAI)

ในรูปที่ 3.5 แสดงโครงสร้างสายอากาศ 3 แบบ ที่จะนำมาใช้ในการจำลองการทำงานด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ และในการทดลอง

สายอากาศแบบ COA เปิดตัวนำนอกออกความยาว 20 mm เพื่อครอบคลุมในช่วงที่มีขนาดสนามไฟฟ้าสูงสุด $\frac{3\lambda}{4} \approx 5.79$ cm และได้ทำการปรับเปลี่ยนความยาวสล็อตดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ปริมาตรการทำลายมะเร็งที่ตับของสายอากาศแบบสล็อตที่มีความยาวสล็อตต่างๆ

ความยาวสล็อต	ปริมาตรการทำลาย (cm ³)
1 mm	6.36
2 mm	6.5
3 mm	6.8
4 mm	7.7

จากสายอากาศของ Hamada ที่ได้นำเสนอสายอากาศขนาดสล็อตมีความยาว 1 mm และในงานวิจัยนี้ต้องการสร้างสายอากาศที่มีการเจาะสล็อต เช่นเดียวกับ Hamada และต้องการสร้างขนาดของสายอากาศที่เหมาะสมแก่การสร้างใช้งานจริง และได้ทำการเจาะสล็อตขนาด 1 mm เช่นเดียวกับ Hamada แล้วปรากฏว่าเมื่อป้อนพลังงานขนาด 50 วัตต์ ไม่เกิดความร้อนขึ้นเนื่องจากขนาดสล็อตมีขนาดเล็กเกินไป ผู้วิจัยได้ทำการเพิ่มขนาดสล็อตให้มีความยาวขึ้นขนาด 3 mm ในการทดลองนั้นสามารถใช้งานได้กับฮาร์ดแวร์ที่มีอยู่ และได้คำนวณ FEM เปรียบเทียบขนาดของการทำลายมะเร็งของสายอากาศที่มีขนาดสล็อต 1 mm และ 3 mm พบว่ามีความแตกต่างกันน้อยมาก และในงานวิจัยนี้สายอากาศแบบสล็อตจะทำการเจาะสล็อตขนาด 3 mm

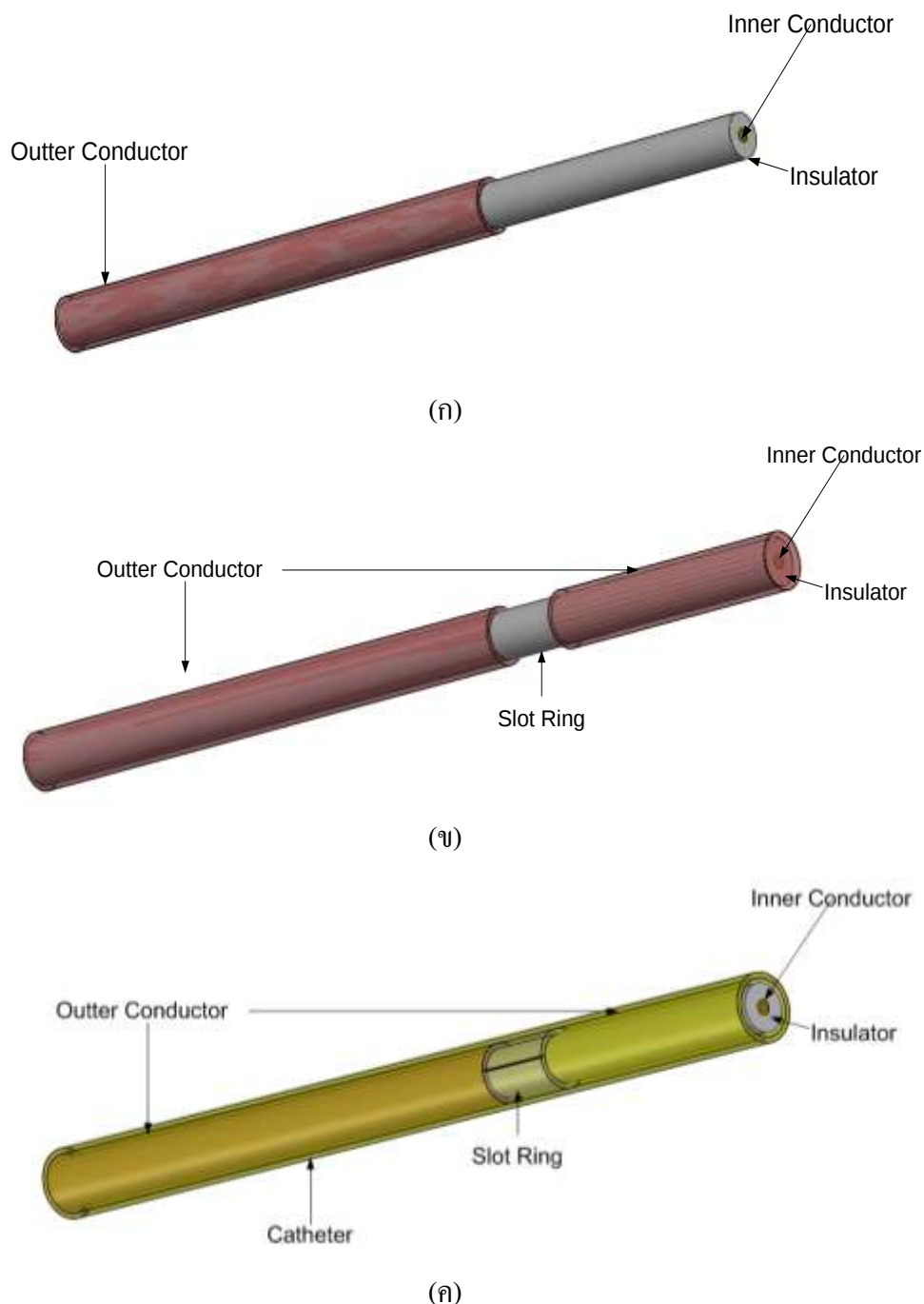
ขนาดของสายอากาศทั้ง 3 แสดงได้ในตารางที่ 3.1 โครงสร้างของสายอากาศทั้ง 3 มีโครงสร้างสายอากาศแบบโคแอกเชียลที่มีตัวนำด้านนอกที่แข็ง เรียกสายอากาศแบบนี้ว่า Semi-Rigid ความยาวสายอากาศเท่ากับ 6 เซนติเมตร

ในรูปที่ 3.5 (ก) เป็นโครงสร้างของสายอากาศแบบปลายเปิด (COA) โดยนำสายอากาศโคแอกเชียลแบบ Semi-Rigid มาปลอกตัวนำนอกออก ความยาว 2 เซนติเมตร ส่วนปลายของสายอากาศที่ปลอกตัวนำนอกออก เรียกว่า เป็นส่วนปลายเปิด

ในรูปที่ 3.5 (ข) แสดงโครงสร้างของสายอากาศแบบสล็อต (CSA) การสร้างสายอากาศนำเอาสายโคแอกเชียลแบบ Semi-Rigid มาตัดตัวนำนอกออกเป็นวงแหวน ความกว้างขนาด 3 มิลลิเมตร โดยระยะระหว่างปลายสายอากาศถึงกึ่งกลางสล็อตเท่ากับ 2 เซนติเมตร และส่วนปลายของสายอากาศทำการ short-circuit ตัวนำในกับตัวนำนอกเข้าด้วยกัน

ในรูปที่ 3.5 (ค) แสดงโครงสร้างของสายอากาศแบบสล็อตที่มีฉนวนหุ้ม (CSAI) โครงสร้างเหมือนกับสายอากาศแบบสล็อตในรูปที่ 3.5 (ข) โดยจะเพิ่มเติมโดยนำวัสดุ PTFE ที่เป็นท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าตัวนำนอกเล็กน้อย หุ้มสายอากาศแบบสล็อต และใช้ความร้อนเพื่อให้ท่อ PTFE เข้ารูปกับสายอากาศเพื่อเพิ่มการตอบสนองความถี่ของสายอากาศ (VSWR) ที่ความถี่ไมโครเวฟ (2.45 GHz) ให้ดีขึ้น

ต่อไปจะแสดงโครงสร้างของสายอากาศ โดยสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ทางผู้วิจัยวาดโครงสร้างของสายอากาศด้วยโปรแกรม SolidWorks Version 2007 (SolidWorks Corp Concord MA) แล้วส่งออกสายอากาศในรูปแบบ IGES เข้าสู่โปรแกรม COMSOL Multiphysics Version 3.4 (COMSOL Inc., Burlington, MA) เพื่อใช้ในการกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ และจำลองการทำงานด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์



รูปที่ 3.6 แบบจำลองสายอากาศด้วยคอมพิวเตอร์ (ก) ปลายเปิด (COA) (ข) แบบสลิต (CSA) (ค) แบบสลิตที่มีฉนวนหุ้ม (CSAI)

รูปที่ 3.6 แสดงโครงสร้างของสายอากาศ 3 แบบ คือสายอากาศแบบปลายเปิด แบบสล๊อต และแบบสล๊อตที่มีฉนวนหุ้ม ดังแสดงได้ในรูปที่ 3.6 (ก) (ข) และ (ค) ตามลำดับ ซึ่งในรูปที่แสดงเป็นรูปที่วาดจากโปรแกรมที่ทำการวาดโดยใช้โปรแกรม Solidwork (SolidWorks Corp Concord MA) โดยขนาดของสายอากาศทั้ง 3 แสดงได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดของขนาดของสายอากาศ

พารามิเตอร์	มิติของสายอากาศ (mm)		
	สายอากาศแบบสล๊อต	สายอากาศสล๊อตแบบมีฉนวนหุ้ม	สายอากาศแบบเปิดปลาย
เส้นผ่านศูนย์กลางตัวนำใน	0.912	0.912	0.912
เส้นผ่านศูนย์กลางตัวนำนอก	3.581	3.581	3.581
เส้นผ่านศูนย์กลางไดอิเล็กทริก	2.985	2.985	2.985
ความยาวสล๊อต	3	3	-
ความยาวจากปลายสายอากาศถึงกึ่งกลางของสล๊อต	20	20	-
ความยาวของปลายเปิด	-	-	20
ความหนาของฉนวนหุ้มภายนอก	-	1	-
ความยาวของสายอากาศ	60	60	60

ในรูปต่อไป แสดงรูปสายอากาศจริง ที่ได้ทำการออกแบบ ประกอบด้วยสายอากาศแบบ
ปลายเปิด สายอากาศแบบสล็อต และสายอากาศแบบสล็อตที่มีฉนวนหุ้ม ดังแสดงได้ดังรูปที่ 3.7
(ก) – (ค)



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 3.7 แสดงรูปสายอากาศแบบ (ก) ปลายเปิด (COA) (ข) สล็อต (CSA) และ
(ค) สล็อตที่มีฉนวนหุ้ม (CSAI)

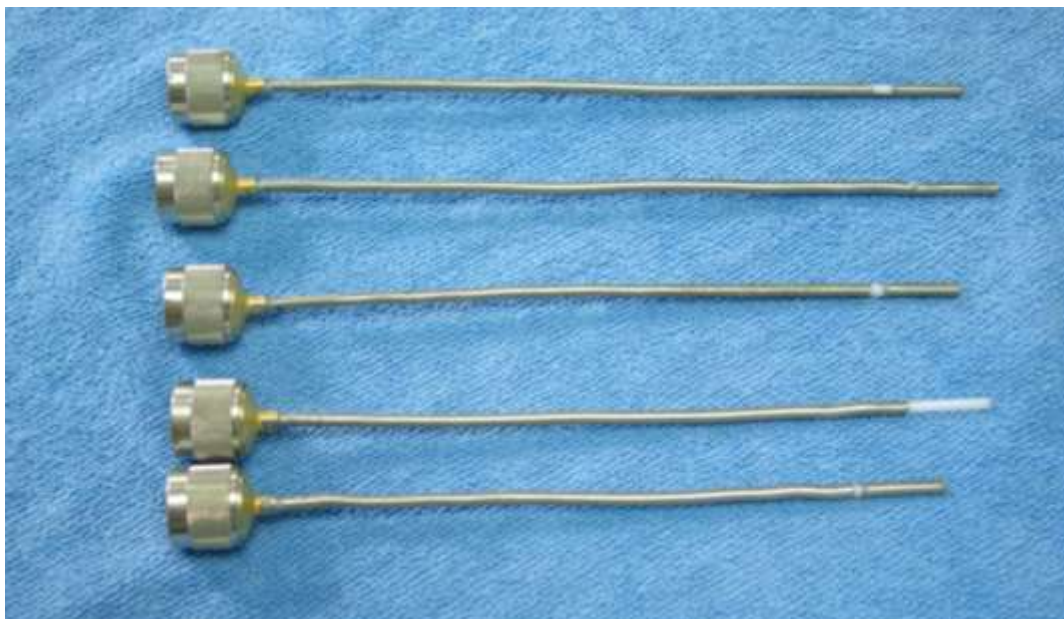
รูปแสดงสายอากาศจริง โดยสายอากาศถูกสร้างขึ้นจากสายนำสัญญาณแบบแข็งในย่านความถี่
ไมโครเวฟ ซึ่งเป็นสายนำสัญญาณโคแอกเซียลแบบ Semi-Rigid

หลังจากที่สร้างสายอากาศแล้ว นำสายอากาศที่สร้างขึ้นนำไปวัด ทดสอบคุณสมบัติด้านการใช้
งานในความถี่ไมโครเวฟ 2.45GHz ด้วยเครื่องวัดคุณสมบัติสายอากาศ ยี่ห้อ Bird Site Analyzer®
Model SA-6000EX ตัวรูปเครื่องและรูปการใช้งานแสดงได้ดังรูปที่ 3.8 และ รูปที่ 3.9



รูปที่ 3.8 แสดงเครื่องมือวัดคุณสมบัติสายอากาศ Bird Site Analyzer® Model SA-6000EX

จากรูปที่ 3.8 แสดงเครื่องมือวัดคุณสมบัติสายอากาศ Bird Site Analyzer® Model SA-6000EX ต่อไปแสดงรูปสายอากาศต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง และแสดงผลที่ได้จากการวัดคุณสมบัติของสายอากาศทั้ง 3 โดยจะวัดคุณสมบัติของสายอากาศ คือ VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) และค่า Return Loss ของสายอากาศทั้ง 3 แบบ แสดงได้ดังรูป

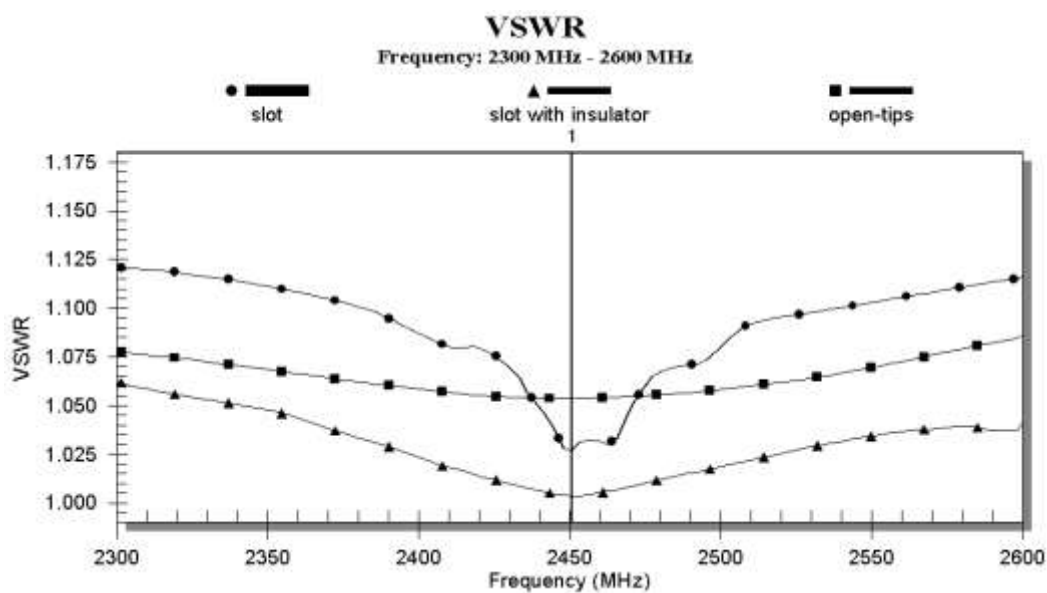


รูปที่ 3.9 สายอากาศที่ใช้ในระบบ MWA

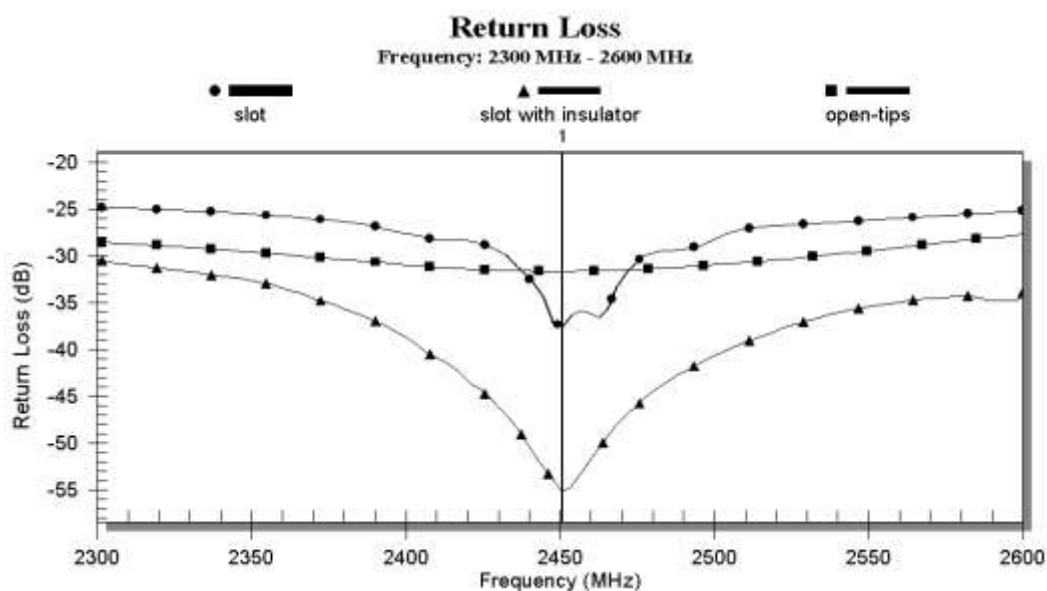
ในรูปที่ 3.9 เป็นตัวอย่างสายอากาศที่ใช้งานในย่านความถี่ไมโครเวฟ ซึ่งดัดแปลงจากสายอากาศแบบโคแอกเซียล ที่มีตัวนำนอกชนิดแข็ง ใช้งานในการเชื่อมต่อสัญญาณของอุปกรณ์ความถี่สูง โดยคอนเนคเตอร์เชื่อมต่อเป็นแบบ N-type เชื่อมต่อกับแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ไมโครเวฟ 2.45GHz

ในรายละเอียดต่อไปจะแสดงผลที่ได้จากเครื่องมือวัดคุณสมบัติสายอากาศ โดยแสดงผลในย่านความถี่ 2,300-2,600 MHz และเราจะสนใจที่ความถี่ใช้งานที่ 2.45 GHz สายอากาศที่ทำการทดสอบได้แก่ สายอากาศแบบปลายเปิด (COA) สายอากาศแบบสลัสด (CSA) และสายอากาศแบบสลัสดที่มีฉนวนหุ้ม (CSAI) แสดงคุณสมบัติการตอบสนองความถี่ใช้งานในค่าของ VSWR และ Return Loss แสดงรายละเอียดได้ ดังรูปกราฟ 3.10 และ รูปกราฟ 3.11

3.4 คุณสมบัติของสายอากาศ



รูปที่ 3.10 แสดงค่า VSWR(Voltage Standing Wave Ratio) ของสายอากาศแบบปลายเปิด, สายอากาศแบบสล๊อต และสายอากาศแบบสล๊อตที่มีฉนวนหุ้ม ในย่านความถี่ 2,300-2,600 MHz



รูปที่ 3.11 แสดงค่า Return Loss ในหน่วย dB ของสายอากาศแบบปลายเปิด สายอากาศแบบสล๊อต และสายอากาศแบบสล๊อตที่มีฉนวนหุ้ม ในย่านความถี่ 2,300-2,600 MHz

ในรูปที่ 3.10 และ 3.11 แสดงค่าคุณสมบัติของสายอากาศในรูปแบบ VSWR และ Return Loss ของสายอากาศแบบปลายเปิด แบบสล็อต และสล็อตที่มีฉนวนหุ้ม ซึ่งจากกราฟเป็นผลจากการวัดคุณสมบัติที่ได้จากเครื่องวัดคุณสมบัติสายอากาศ Bird Site Analyzer® Model SA-6000EX โดยสายอากาศที่ทำการทดสอบค่า VSWR และค่า Return Loss ที่ความถี่ไมโครเวฟที่ใช้งาน 2.45 GHz สายอากาศทั้ง 3 รูปแบบมีค่า VSWR ที่ต่ำมาก โดยสายอากาศแบบปลายเปิด มีค่า VSWR เท่ากับ 1.065 และ Return Loss (-31.75 dB) สายอากาศแบบสล็อต (short-end) มีค่า VSWR เท่ากับ 1.03 และ Return Loss (-37.55 dB) และสายอากาศแบบสล็อตที่มีฉนวนหุ้ม มีค่า VSWR เท่ากับ 1.015 และ Return Loss (-54.72 dB) ซึ่งเมื่อพิจารณาจะพบว่าสายอากาศที่ใช้มีค่า VSWR และ Return Loss ที่ต่ำมาก เมื่อนำไปใช้งานจะมีค่าของการส่งผ่านพลังงานได้สูงสุด

3.5 แบบจำลองสายอากาศทางไฟฟ้าในต์เอลิเมนต์

ในการจำลองการทำงาน เราใช้การจำลองการทำงานด้วยวิธีการทางไฟฟ้าในต์เอลิเมนต์ 3 มิติ โดยใช้โปรแกรม Comsol Multiphysic version 3.4 บนระบบปฏิบัติการ 64 บิต Sun Fire 240 (2 processor with Ram 8 GB) โดยการจำลองการทำงานประกอบด้วย โมดูล 2 โมดูล ที่ใช้ในการจำลองการทำงาน คือ

RF Module

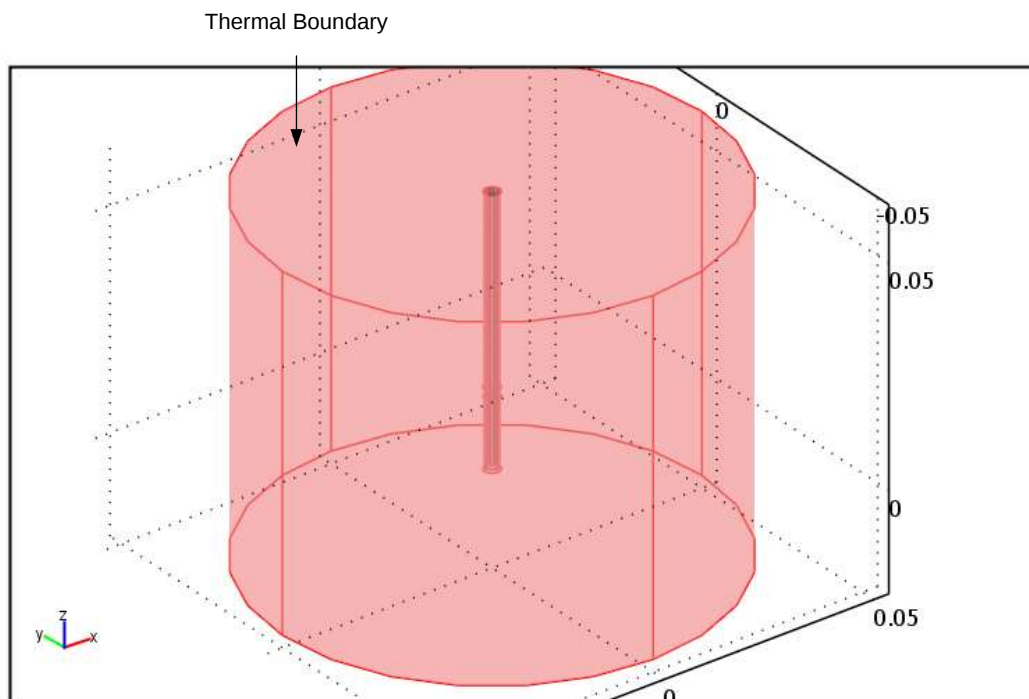
Heat Transfer (Bioheat Equation)

3.5.1 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition)

ในการกำหนดขอบเขตของการกำหนดเงื่อนไข ในระบบไฟฟ้าในต์เอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์การทำลายเซลล์มะเร็งด้วยคลื่นไมโครเวฟ ทำการกำหนดเงื่อนไขของขอบเขตของโมดูลของ Electromagnetic (RF Module) และ โมดูล Heat Transfer (Bioheat Equation) เพื่อกำหนดรายละเอียดที่ใช้ในการคำนวณด้วยไฟฟ้าในต์เอลิเมนต์ มีรายละเอียดดังนี้

3.5.1.1 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของ Heat Transfer

ในการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของ Heat Transfer เราจะมีเงื่อนไขขอบเขตอยู่ 2 กลุ่ม คือ Thermal Boundary Condition และ Continuity แสดงรายละเอียดได้ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 แสดงเงื่อนไขขอบเขตของ Heat Transfer ในการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

เงื่อนไขขอบเขตในรูปแบบ Thermal Boundary Condition มีรูปแบบของเงื่อนไขที่มีความสัมพันธ์ตามสมการ 3.1

$$n \cdot (k \nabla T) = 0 \quad (3.1)$$

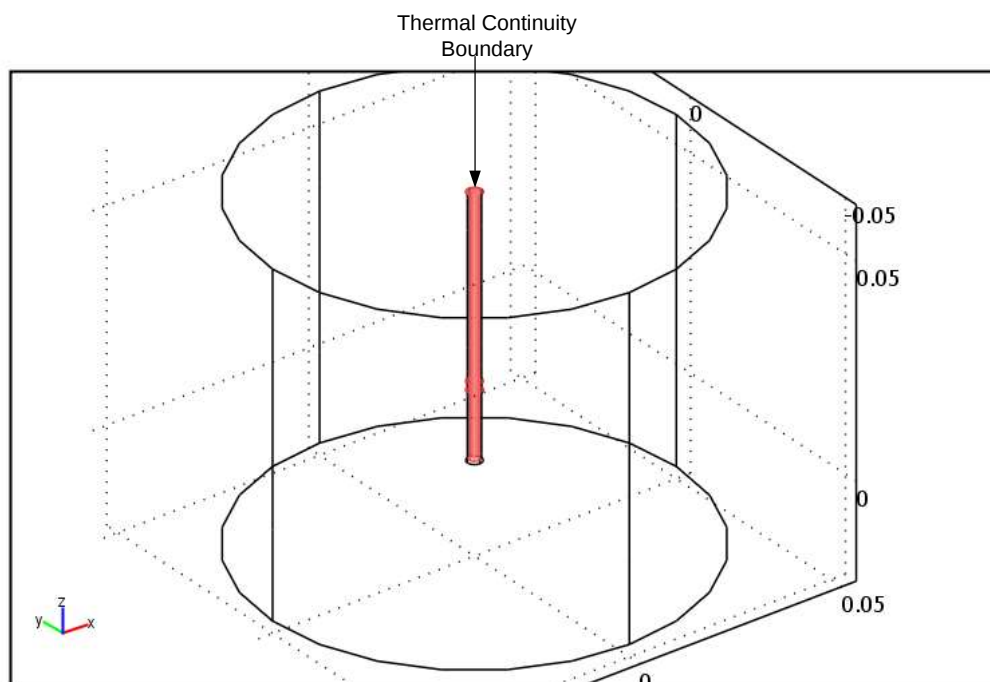
โดยที่

n คือ ทิศทางการเคลื่อนที่ของฟลักซ์ความร้อน

k คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนในเนื้อเยื่อ

T คือ อุณหภูมิ

ในขอบเขตของเนื้อเยื่อด้านนอกถูกกำหนดให้เป็นฉนวนกันความร้อน เพื่อให้การแสดงผล ถูกแสดงเฉพาะในส่วนที่เป็นเนื้อเยื่อ ไม่นำความร้อนออกนอกพื้นที่ที่ไม่ต้องการวิเคราะห์



รูปที่ 3.13 แสดงเงื่อนไขขอบเขตของ Heat Transfer ในการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

เงื่อนไขขอบเขตในรูปแบบ Thermal Continuity ในรูปที่ 3.13 มีรูปแบบของเงื่อนไขที่มีความสัมพันธ์ตามสมการ 3.2

$$n \cdot (k_u \nabla T \cdot k_d \nabla T_d) = 0 \quad (3.2)$$

โดยที่

n คือ ทิศทางการเคลื่อนที่ฟลักซ์ความร้อน

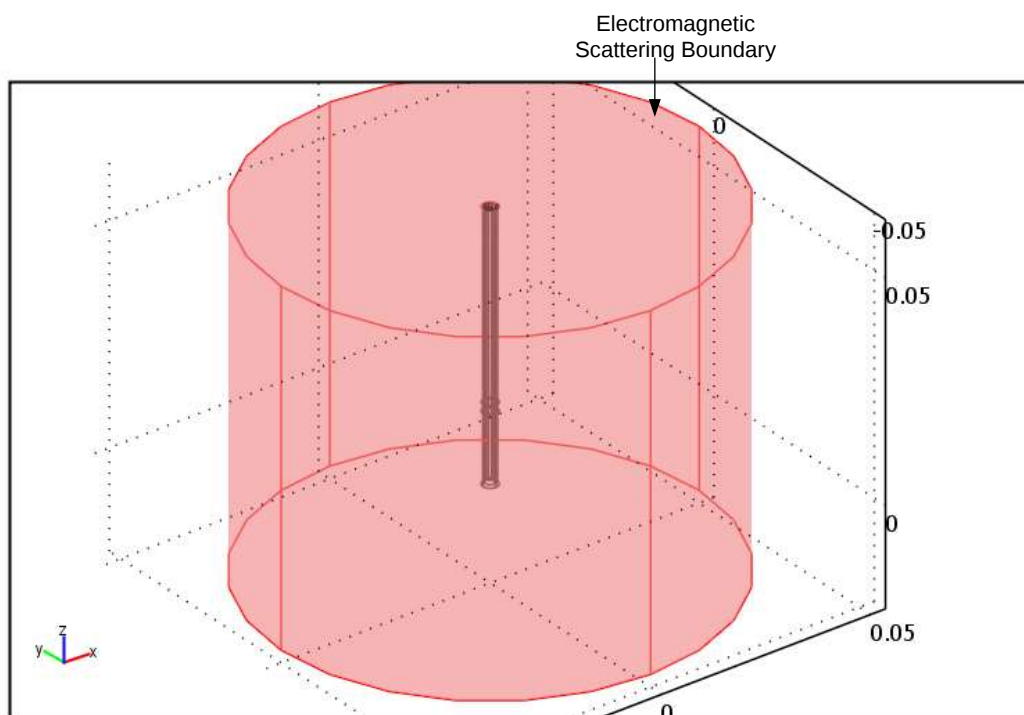
k_u, k_d คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุลำดับที่ 1 และ 2

T, T_d คือ อุณหภูมิใดๆ

นิยามของ Thermal continuity คือ การเชื่อมโยงความร้อนของวัสดุที่แตกต่างกัน ให้มีการสูญเสียน้อยที่สุด เสมือนกับเป็นวัสดุเดียวกัน เพื่อลดปัญหาเรื่องการสูญเสียที่เกิดขึ้นกับวัสดุที่แตกต่างกัน

3.5.1.2 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของ RF Module (Electromagnetic)

ในการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของ RF Module (Electromagnetic) เราจะมีเงื่อนไขขอบเขตอยู่ 4 กลุ่ม คือ Scattering Perfect Electric Conductor Continuity และ Port แสดงรายละเอียดได้ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 แสดงเงื่อนไขขอบเขตของ RF Module (Electromagnetic) ในการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

เงื่อนไขขอบเขตในรูปแบบ Scattering มีรูปแบบของเงื่อนไขที่มีความสัมพันธ์ตามสมการ 3.3

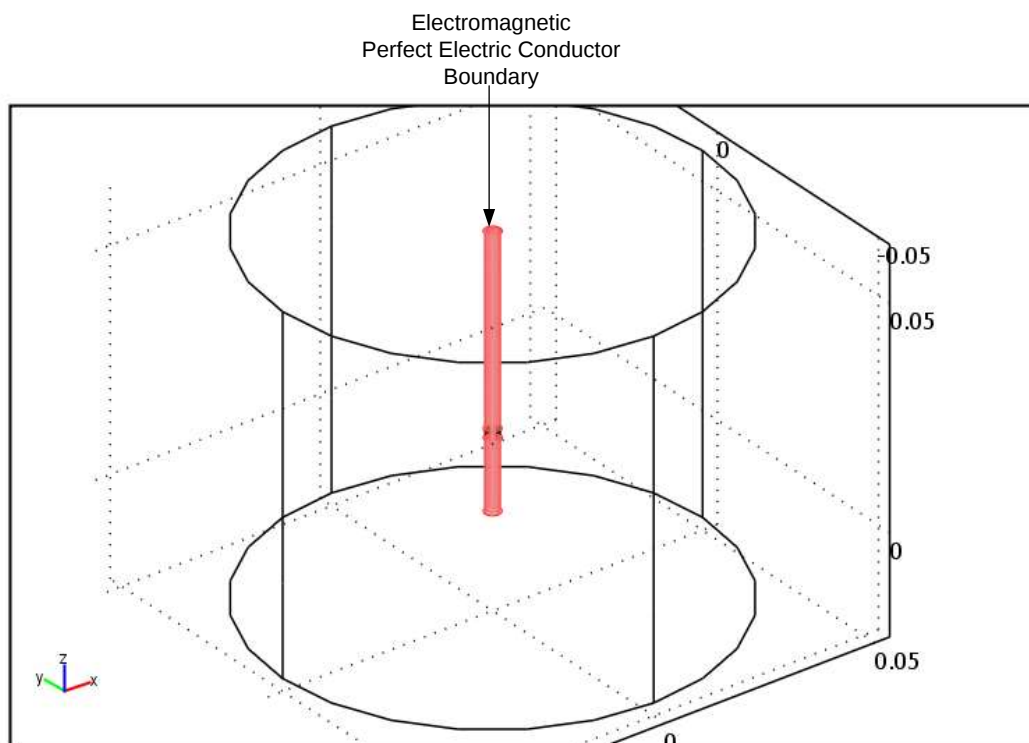
$$n \times (\nabla \times E) - jkn \times (E \times n) = -n \times (E_0 \times jk(n - k)) \exp(-jk \cdot r) \quad (3.3)$$

โดยที่

n คือ ทิศทางการเคลื่อนที่ของฟลักซ์ความร้อน

k คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนในเนื้อเยื่อ

E, E_0 คือ สนามไฟฟ้าตำแหน่งต่างๆ และสนามไฟฟ้าเริ่มต้นที่ตำแหน่งต่างๆ



รูปที่ 3.15 แสดงเงื่อนไขขอบเขตของ RF Module (Electromagnetic) ในการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

เงื่อนไขขอบเขตในรูปแบบ Perfect Electric Conductor ในรูปที่ 3.15 มีรูปแบบของเงื่อนไขที่มีความสัมพันธ์ตามสมการ 3.4

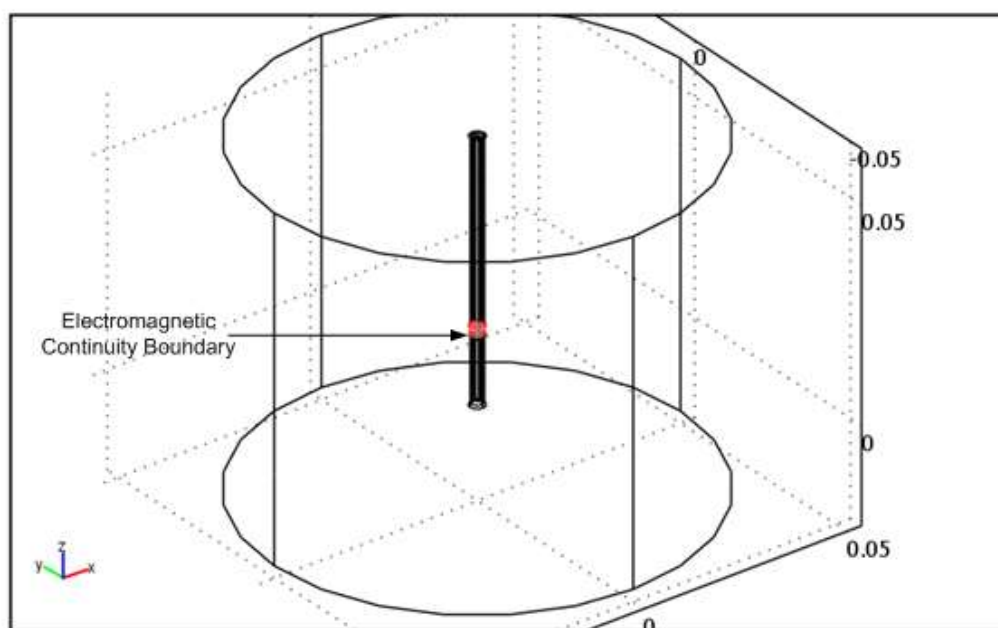
$$n \times E = 0 \quad (3.4)$$

โดยที่

n คือ ทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น

E คือ สนามไฟฟ้า

นิยามของ Perfect Electric Conductor คือ ตัวนำสนามไฟฟ้าที่สมบูรณ์ ในวัสดุที่เป็น Perfect Electric Conductor เพื่อบ่งบอกว่าในวัสดุนั้นมีเฉพาะสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในทิศทางตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของคลื่นเท่านั้น ฉะนั้นจะมีเฉพาะสนามไฟฟ้ารอบๆ สายอากาศเท่านั้น



รูปที่ 3.16 แสดงเงื่อนไขขอบเขตของ RF Module(Electromagnetic) ในการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

เงื่อนไขขอบเขตในรูปแบบ Continuity ในรูปที่ 3.16 มีรูปแบบของเงื่อนไขที่มีความสัมพันธ์ตามสมการ 3.5

$$\begin{aligned} n \times (H_1 - H_2) &= 0 \\ n \times (E_1 - E_2) &= 0 \end{aligned} \quad (3.5)$$

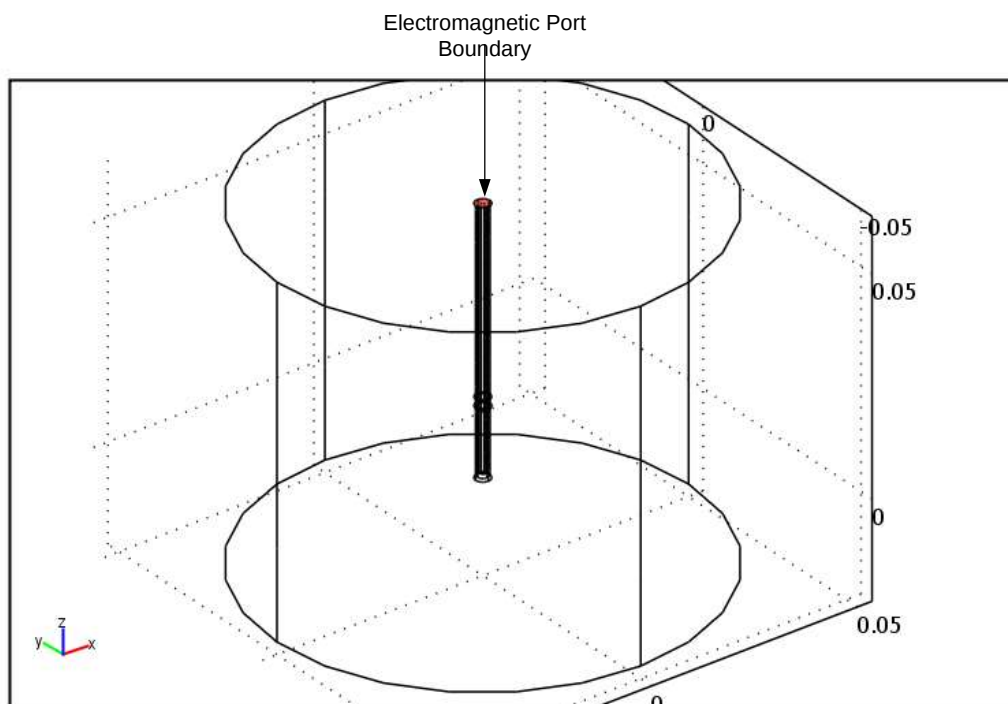
โดยที่

n คือ ทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น

H_1, H_2 คือ สนามแม่เหล็กในตัวกลางของวัสดุที่ 1 และ 2

E_1, E_2 คือ สนามไฟฟ้าในตัวกลางของวัสดุที่ 1 และ 2

นิยามของ Continuity ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า คือ จุดที่จะเป็นส่วนเชื่อมต่อขององค์ประกอบคลื่นสนามแม่เหล็ก และสนามไฟฟ้า



รูปที่ 3.17 แสดงเงื่อนไขขอบเขตของ RF Module (Electromagnetic) ในการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

เงื่อนไขขอบเขตในรูปแบบ Port (ตำแหน่งป้อนคลื่นความถี่ที่มีระดับพลังงาน) ในรูปที่ 3.17 มีรูปแบบของเงื่อนไขที่มีความสัมพันธ์ตามสมการ 3.6

$$s = \int (E - E_2) \cdot E_2 / \int E_2 \cdot E_2 \quad (3.6)$$

โดยที่

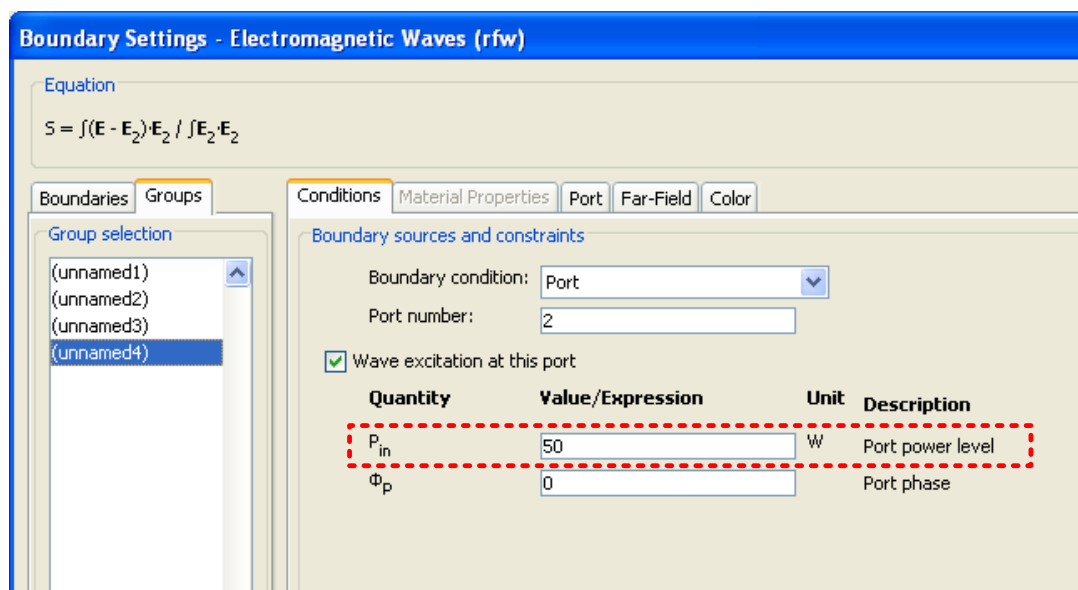
s คือ พลังงานที่ขอบเขตที่ตำแหน่งใดๆ

E_1, E_2 คือ สนามไฟฟ้าในตัวกลางของวัสดุที่ 1 และ 2

ส่วนของ Port ใน โปรแกรม COMSOL ใช้เพื่อกำหนดรูปแบบของการรับสัญญาณเข้าในรูปแบบต่างๆ และกำหนดระดับพลังงานที่ป้อน และยังสามารถที่จะกำหนดเฟสของสัญญาณที่เข้ามาได้อีกด้วย

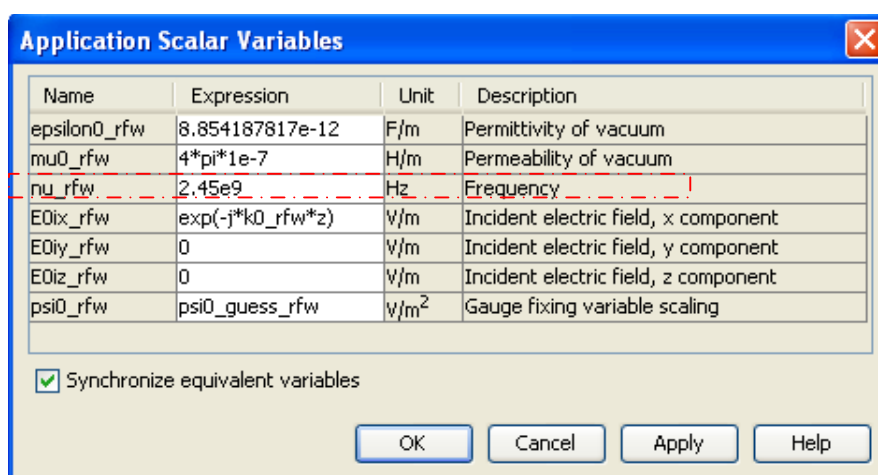
โดยในการกำหนดค่าที่ใช้ในการจำลองการทำงาน กำหนดรูปแบบของ Port เป็น โคแอกเซียล ป้อนความถี่ 2.45 GHz กำลังงาน 50 วัตต์

ตัวอย่างของการกำหนดค่าพลังงานให้กับ PORT แสดงได้ดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 แสดงการกำหนดพลังงานให้กับ PORT

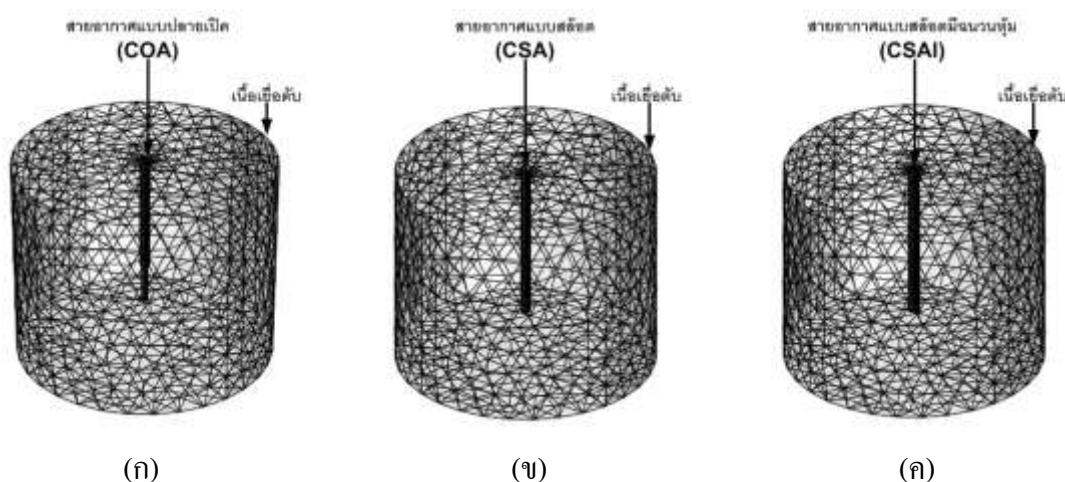
หลังจากกำหนดขนาดของกำลังงานที่ใส่ให้กับขอบเขต ที่เป็น PORT เรียบร้อยแล้ว ต่อไปเป็นการกำหนดความถี่ไมโครเวฟ 2.45 GHz โดยกำหนดที่ Application Scalar Variable แสดงได้ดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 แสดงการกำหนดความถี่ 2.4 GHz ให้กับ Electromagnetic Module

รายละเอียดของการกำหนดค่าขอบเขตเงื่อนไขต่างๆ นอกเหนือจากนี้สามารถดูรายละเอียดเพิ่มเติมได้ในเอกสารอ้างอิง.

ในการคำนวณผลลัพธ์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ เมื่อนำไฟล์ที่สร้างรูปทรงจากโปรแกรม วาดรูปทรง 3 มิติ เป็นที่เรียบร้อยแล้ว เราจะใช้โปรแกรม Comsol ในการแบ่งชิ้นงานออกเป็นชิ้นย่อยๆ ที่เรียกว่า เอลิเมนต์ แสดงได้ดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 แบบจำลองสายอากาศทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (ก) ปลายเปิด (COA) (ข) แบบสล๊อต(CSA) (ค) แบบสล๊อตที่มีฉนวนหุ้ม (CSAI)

ในรูปที่ 3.20 แสดงแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของสายอากาศแบบปลายเปิด (COA) สายอากาศแบบสล๊อต (CSA) และสายอากาศแบบสล๊อตที่มีฉนวนหุ้ม (CSAI)

แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ประกอบด้วย ชุดสายอากาศ และเนื้อเยื่อ โดยสายอากาศจะวางอยู่กึ่งกลางของเนื้อเยื่อรูปทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 เซนติเมตร และความสูง 8 เซนติเมตร

ส่วนของสายอากาศจะถูกแบ่งออกเป็นชิ้นย่อยๆ ด้วยเอลิเมนต์ที่มีรูปแบบเป็นสามเหลี่ยม ขนาดของเอลิเมนต์สายอากาศที่ใช้มีขนาดอยู่ในช่วง 0.01-1 มิลลิเมตร ในส่วนของเอลิเมนต์ในเนื้อเยื่อตัวนำมีการกระจายของขนาดเอลิเมนต์ โดยบริเวณรอบๆ สายอากาศจะมีขนาดของเอลิเมนต์ที่เล็ก ส่วนบริเวณที่ห่างออกจากสายอากาศจะมีขนาดของเอลิเมนต์ที่ใหญ่ขึ้น เพื่อลดขนาดของหน่วยความจำของเครื่องในการจำลองการทำงาน ขนาดของเอลิเมนต์ของเนื้อเยื่อมีขนาดอยู่ในช่วง 0.1-1 มิลลิเมตร

โดยสร้างรูปแบบของสายอากาศและส่วนประกอบต่างๆ ด้วย Solid work version.2007 ส่งออกในรูปแบบ IGES ไปยังโปรแกรม Comsol Multiphysic Version 3.4 เพื่อทำการใส่ Boundary และค่าคงที่ ต่างๆ ที่ใช้ในการจำลองการทำงาน รายละเอียดของพารามิเตอร์ของการ Simulation แสดงได้ดังนี้

ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองการทำงาน Density of Tissue = 1050 [kg/m^3], Specific heat of Liver = 3700 [$J/kg \cdot K$], Density of Blood = 1000 [kg/m^3], Specific heat of Blood = 3639 [$J/kg \cdot K$], Blood perfusion rate = 3.6×10^{-3} [$m^3/kg \cdot S$], Thermal conductivity of Liver = 0.56 [S/m]

พารามิเตอร์ทางด้านคุณสมบัติไฟฟ้า ϵ_{liver} (Relative permittivity) = 43.03, σ_{liver} (Electrical conductivity) [S/m] = 1.69, $\epsilon_{dielectric}$ = 2.03, $\epsilon_{insulator}$ = 2.6 สายอากาศที่นำมาใช้ในการทดลอง คือ สายนำสัญญาณ Coaxial แบบแข็งที่เรียกว่า Semi-rigid 141(RG402 M17/130-RG402 Copper Jacket) โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.141 นิ้ว (3.525 mm) Maximum Frequency = 35 GHz เมื่อใช้ร่วมกับ Connector N-type (Maximum Frequency = 18 GHz) โดยมีค่าพารามิเตอร์ของสายนำสัญญาณดังนี้ Inner Conductor Silver Plated Copper Clad Steel (Diameter = 0.51mm), Dielectric (Solid PTFE) Diameter = 3.02 mm, Minimum Bend Radius inches(mm) = 6.35 mm. ดูรายละเอียดเพิ่มเติมได้ที่ อ้างอิง

รายละเอียดพารามิเตอร์ต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.3 รายละเอียดของค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเนื้อเยื่อตับ

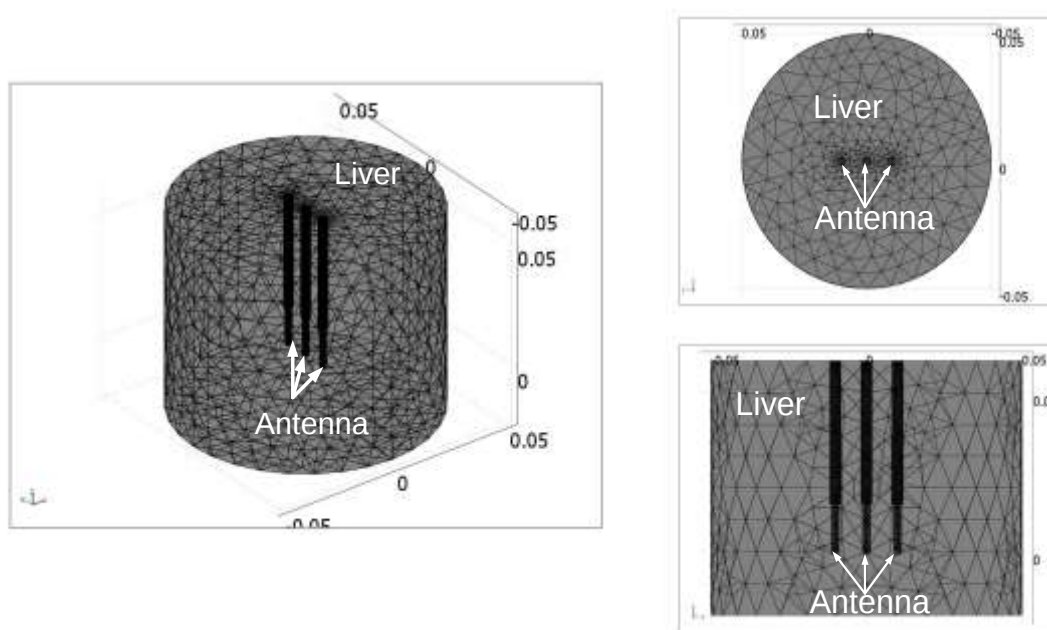
ρ_{liver} = Density of liver	1,050 [kg/m^3]
C_{liver} = Specific heat of liver	3,700 [$J/ kg \cdot K$]
ρ_{bl} = Density of blood	1,000 [kg/ m^3]
C_{bl} = Specific heat of blood	3,639 [$J/ kg \cdot K$]
W_{bl} = Blood perfusion rate	3.6×10^{-3} [$m^3/kg.s$]
k = Thermal conductivity of liver	0.56 [S/ m]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

ตารางที่ 3.4 สรุปจำนวนเอลิเมนต์ของสายอากาศที่ใช้แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์

Configuration	(elements)
Single COA	27,394
Single CSA	30,451
Single CIA	50,096
Array COA	60,420
Triangular COA	71,789
Orthogonal COA	74,283
Array (CSA+COA+CIA)	78,295
Triangular (CSA+COA+CIA)	85,337
Orthogonal (CSA+COA+CIA)	92,037

รายละเอียดจำนวนเอลิเมนต์จะสัมพันธ์กับความซับซ้อนของโครงสร้าง และการจัดวางสายอากาศ โดยพิจารณาสายอากาศแบบดัดเดี่ยวจะเห็นว่าสายอากาศแบบสล็อตที่มีฉนวนหุ้ม มีจำนวนเอลิเมนต์สูงกว่าแบบอื่นๆ และการจัดวางสายอากาศแบบ T-Shape ของการใช้สายอากาศ 3 ด้าน มีจำนวนเอลิเมนต์สูงกว่าแบบอาร์เรย์ และแบบสามเหลี่ยม ในการใช้สายอากาศแบบผสมจะมีจำนวนเอลิเมนต์ที่สูงกว่าการใช้สายอากาศแบบเดียวกัน ทั้ง 3 ด้าน ทุกรูปแบบของการจัดวาง

ซึ่งจำนวนเอลิเมนต์ที่สูงๆ จะใช้หน่วยความจำในการประมวลผลที่มากกว่าแบบจำลองที่มีเอลิเมนต์น้อยๆ ดังนั้นในการประมวลผลจำเป็นอย่างยิ่งจะต้องคำนึงถึงจำนวนเอลิเมนต์ เพื่อจัดสรรหน่วยความจำให้เพียงพอ ซึ่งรายละเอียดต่อไปนี้จะเป็นส่วนของการอธิบายขนาดของหน่วยความจำของการใช้สายอากาศ 3 ด้าน แต่ละการจัดวาง

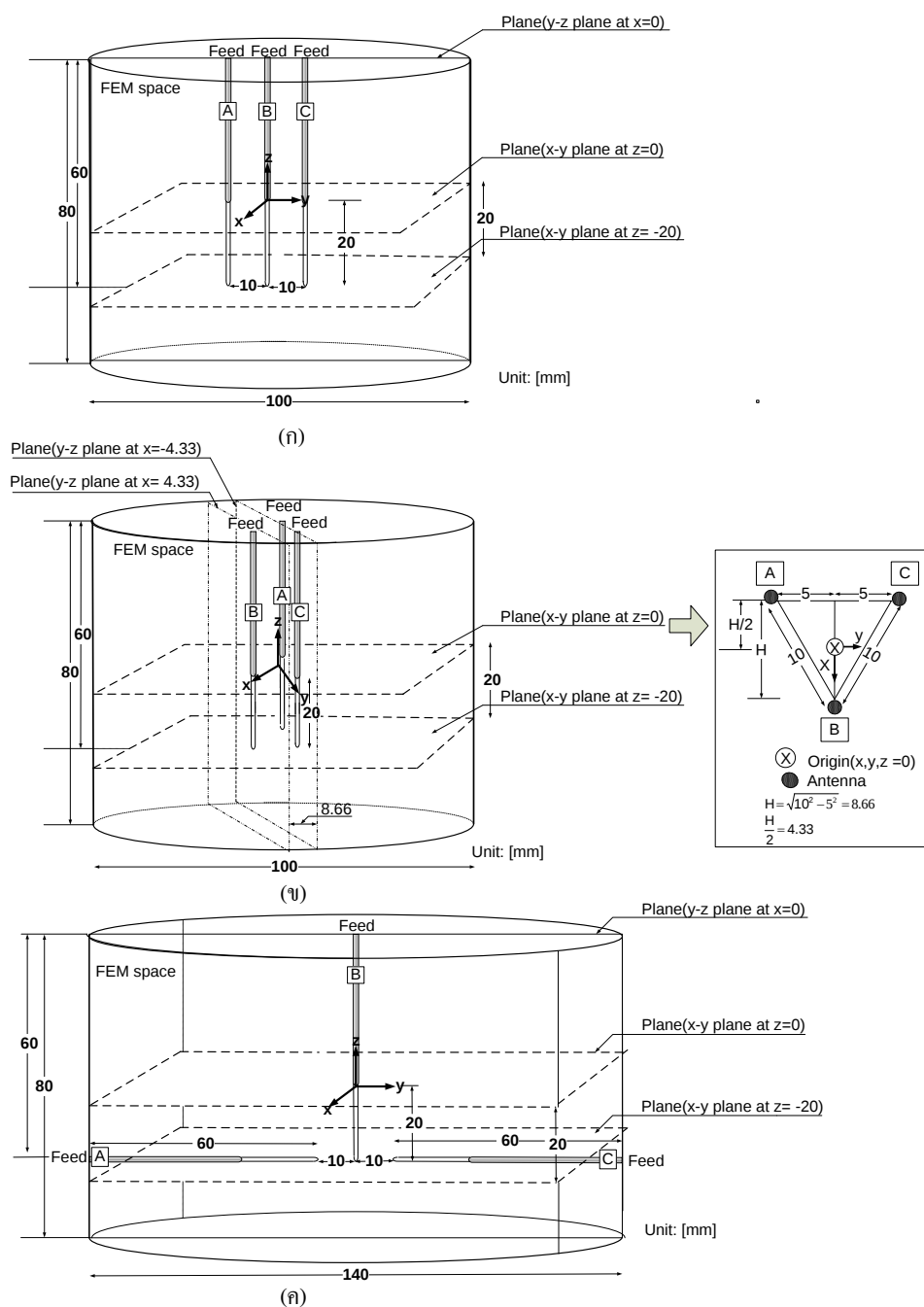


รูปที่ 3.21 แสดงแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของสายอากาศแบบหลายคัน

รูปที่ 3.21 แสดงรูปแบบของการทำไฟไนต์เอลิเมนต์โดยการจัดรูปแบบของ Mesh แบบไม่สม่ำเสมอ โดยในรูปแสดงมุมมอง ในรูปแบบ 3 มิติ, ด้านบน และด้านข้าง ในการ Mesh ที่ใช้ในการจำลองการทำงานในบทความชุดนี้ สังเกตเห็นได้ว่า บริเวณรอบๆ สายอากาศ จะมีการจัดวาง Mesh ที่ละเอียด และเมื่อห่างจากสายอากาศออกมาจะมีขนาดของเอลิเมนต์ที่ใหญ่ขึ้น จำนวนเอลิเมนต์ของการจัดเรียงสายอากาศทั้ง 3 แบบที่ใช้ในการจำลองการทำงาน มีจำนวนเอลิเมนต์เฉลี่ย เจ็ดหมื่น เอลิเมนต์ ค่า Degree of Freedom เฉลี่ยประมาณ 600,000 ใช้ค่า Memory ในการ Run แต่ละกรณี ประมาณ 3 – 4 GB

ต่อไปจะกล่าวถึงระนาบของการแสดงผล ที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยจะกล่าวถึงรูปแบบการจัดวางสายอากาศทั้ง 3 รูปแบบ คือจัดวางสายอากาศแบบอาร์เรย์ วางแบบทำมุมสามเหลี่ยม และวางแบบรูป “T” เพื่อประกอบการพิจารณาการกระจายของปริมาณ SAR และอุณหภูมิในเนื้อเยื่อ

3.6 การจัดวางระนาบในการแสดงผลการจำลองการทำงานด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์



รูปที่ 3.22 แสดงระนาบของการพิจารณาแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ รูปแบบ (ก) อาร์เรย์
(ข) วางแบบทำมุมสามเหลี่ยม และ (ค) วางแบบรูป “T”

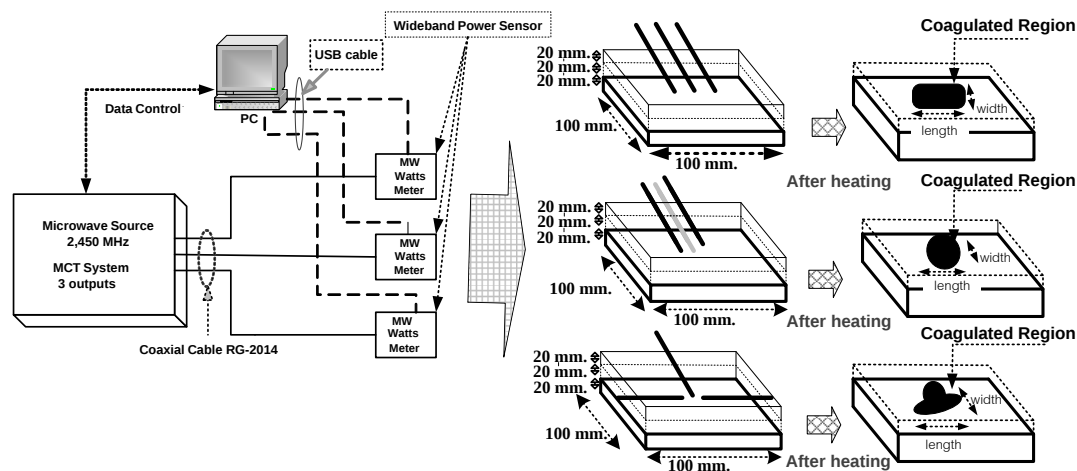
รูปที่ 3.22 แสดงการจัดวางสายอากาศ 3 รูปแบบ โดยในรูป (ก) แสดงรูปแบบการจัดวางสายอากาศแบบอาร์เรย์ โดยระยะห่างของสายอากาศมีระยะห่างเท่ากับ 1 เซนติเมตร สายอากาศแต่ละต้นมีขนาดความยาวของสายอากาศเท่ากับ 6 เซนติเมตร

ในรูป (ข) แสดงการจัดเรียงสายอากาศในลักษณะวางแบบสามเหลี่ยม โดยระยะห่างจากสายอากาศ “A” ถึง “B” มีขนาดเท่ากับ 1 เซนติเมตร และระหว่าง “B” ถึง “C” มีระยะห่างเท่ากับ 1 เซนติเมตร โดยการจัดวางเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า แสดงได้ดังรูป ขนาดของความยาวของสายอากาศมีขนาดเท่ากับ 6 เซนติเมตร

ในรูป (ค) แสดงรูปแบบการจัดวางแบบรูป “T” โดยสายอากาศ “A” และสายอากาศ “C” วางทำมุมตั้งฉาก 90 องศา กับสายอากาศ “B” ระยะห่างของสายอากาศ “A” และ “C” ห่างจากสายอากาศ “B” ด้วยระยะที่เท่ากัน เท่ากับ 1 เซนติเมตร สายอากาศทุกๆ ต้น มีความยาวเท่ากับ 6 เซนติเมตร

ต่อไปจะกล่าวถึง การจัดเตรียมการทดลอง เพื่อใช้ในการยืนยันความถูกต้องของการจำลองการทำงานด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์

3.7 การจัดเตรียมการทดลอง (Experiment Setup)



รูปที่ 3.23 ไดอะแกรมการทดลองสายอากาศแบบหลายต้น ที่มีการจัดวางแบบอาร์เรย์
วางแบบทำมุมสามเหลี่ยม และวางรูป “T”.

จากรูปที่ 3.23 แสดงรายละเอียดไดอะแกรมของการทดลอง โดยทางผู้วิจัยจะทำการทดลองสายอากาศ 3 ต้น จัดวางแบบอาร์เรย์, แบบทำมุมสามเหลี่ยม และแบบวางตามรูป “T” ในการทดลองประกอบด้วย แหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ไมโครเวฟความถี่ (2.45 GHz) ที่มี 3 เอาต์พุต โดยควบคุมกำลังงาน และเวลาผ่านทางคอมพิวเตอร์

เอาท์พุท ทั้ง 3 ถูกแสดงค่าระดับของกำลังงานด้วยเครื่องวัด (wideband power sensor) เชื่อมต่อไปแสดงผลด้วยคอมพิวเตอร์ เอาท์พุททั้ง 3 นำไปป้อนให้กับสายอากาศแต่ละต้น

ในการทดลองทำการตัดดับหมู ขนาดกว้าง ยาว และหนา 100, 100 และ 20 มิลลิเมตร จำนวน 3 ชิ้น วางกับสายอากาศทั้ง 3 ตามการจัดวางแบบอาร์เรย์ แบบสามเหลี่ยม และแบบ T-Shape การทดลองป้อนกำลังงานขนาด 50 วัตต์ ให้กับสายอากาศแต่ละต้น ระยะเวลา 1 นาที

ผลที่ได้ให้ดูการเปลี่ยนสีของดัด (ซึ่งจะมีการเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิสูงกว่า 60 องศาเซลเซียส) ในเอกสารอ้างอิง