

## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การออกแบบโพรบนำคลื่นไมโครเวฟแบบ ใ้คงจอเพื่อใช้ในการทำลายเซลล์มะเร็งที่เกิดขึ้น  
กับต่อมลูกหมาก

Microwave hyperthermia applicator design for prostate cancer treatments

ผศ.ดร.ภัทรพงษ์ ผาสุกกิจ

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2556

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การออกแบบโพรบนำคลื่นไมโครเวฟแบบ โค้งงอเพื่อใช้ในการทำลายเซลล์มะเร็งที่เกิดขึ้น  
กับต่อมลูกหมาก

Microwave hyperthermia applicator design for prostate cancer treatments

ศศ.ดร.ภัทรพงษ์ ผาสุขกิจ

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2556

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

12840270

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่งทุนวิจัย  
เงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ 2558



ดร.ภัทรพงษ์ ผาสุภกิจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่องานวิจัย: การออกแบบโพรมีนาคลื่นไมโครเวฟแบบ โคงงอเพื่อใช้ในการทำลายเซลล์มะเร็งที่เกิดขึ้น กับต่อม  
ลูกหมาก

นักวิจัย:..... ศศ.ดร.ภัทรพงษ์ ผาสุกกิจ.....

คณะ: วิศวกรรมศาสตร์..... สาขาวิชา: วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์.....

### บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้ทำการออกแบบและพัฒนาสายอากาศเพื่อประยุกต์ใช้ในการทำลายเนื้อร้ายหรือเนื้อเยื่อที่มีการเจริญเติบโตผิดปกติ ที่เกิดขึ้นกับต่อมลูกหมาก โดยใช้ระบบการสร้างความร้อนเข้าไปบำบัดรักษาเนื้อเยื่อบริเวณต่อมลูกหมากให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นจนทำให้เนื้อเยื่อเกิดการหดตัว ทำให้ขนาดของต่อมลูกหมากที่โตลดลง โดยทำการออกแบบสายอากาศแบบที่มีการเกาะยึดเข้ากับอวัยวะต่อมลูกหมาก โดยมีการป้องกันการเคลื่อนที่เมื่อขณะทำการสร้างความร้อน โดยสายอากาศที่ใช้ ใช้สายอากาศในย่านความถี่ 2.45 GHz ที่ระดับความแรงของกำลังงานขนาด 50-100 วัตต์ โดยทำการให้พลังงานตั้งแต่ หนึ่งนาที่เป็นต้นไป โดยสายอากาศที่ทำการประยุกต์ใช้ มีการกระจายรอบตัว ทางที่มวิจัยใช้สายอากาศพื้นฐานคือ สายอากาศแบบปลายเปิด และสายอากาศแบบเปิดรอบวงแหวน ทำการศึกษารูปแบบของการสร้างความร้อนในเนื้อเยื่อต่อมลูกหมาก เพื่อนำไปผลิตสร้างใช้จริงในอนาคต

คำสำคัญ: ต่อมลูกหมาก, ระบบการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ, สมการความร้อนทางชีววิทยา.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Research Title: Microwave hyperthermia applicator design for prostate cancer treatments**

**Researcher:**..... Asst.Prof. Dr.Pattarapong Phasukkit.....

**Faculty:** Engineering..... **Department:** Electronic Engineering.....

---

### ABSTRACT

This research designed and developed antenna for application in the destruction of tumor or abnormal tissue growth. Happens to the prostate using a heat treatment to the prostate tissue to heat up and cause tissue shrinkage. The size of the prostate to grow down. Antenna designs that cling to the organs, the prostate. The defense motion while on heat. By use of Antenna at frequency 2.45 GHz at a power of 50-100 watts of power to provide energy from about One minute onwards by the application of a distributed antenna around. The research team is using a basic antenna. Antenna open ends And the open- ring antenna Studied form of heat generation in tissues of the prostate. To create the actual production in the future.

**Keywords :** Prostate , Microwave Ablation , Bio heat Equation.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	3
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดในการวิจัย.....	3
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.6 โครงสร้างวิทยานิพนธ์.....	4
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีพื้นฐาน .....	5
2.1 กายวิภาคศาสตร์และสรีรวิทยาของต่อมลูกหมาก.....	5
2.2 โรคต่อมลูกหมากโต.....	6
2.2.1 ต่อมลูกหมากโตชนิดธรรมดา.....	6
2.2.2 สาเหตุ.....	6
2.2.3 อาการของต่อมลูกหมากโต.....	6
2.2.4 การรักษา.....	7
2.2.4.1 การรักษาแบบประคับประคอง.....	7
2.2.4.2 การรักษาโดยการใช้ยา .....	7
2.2.4.3 การรักษาด้วยการผ่าตัด.....	7
1. การส่องกล้องตัดต่อมลูกหมาก (Transurethral resection of prostate, TUR-P).....	7
2. การผ่าตัดเปิดเพื่อตัดต่อมลูกหมาก (open prostatectomy).....	7
3. การผ่าตัดแบบอื่นๆ.....	7
2.3 พื้นฐานการกระจายความร้อนภายในเนื้อเยื่อ .....	8
2.4 ความหมายของคลื่นไมโครเวฟ และความสามารถเกิดความร้อนในเนื้อเยื่อ.....	9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.4.1 ความหมายของไมโครเวฟ.....	9
2.4.2 การนำเอาไมโครเวฟไปใช้งาน.....	10
2.4.3 การนำเอาไมโครเวฟไปใช้งานทางการแพทย์.....	10
2.4.4 ผลต่อสุขภาพเมื่อได้รับคลื่นไมโครเวฟ.....	10
2.5 สายนำสัญญาณสำหรับความถี่ไมโครเวฟ.....	11
2.6 สายโคแอกเซียล.....	14
2.7 หลักการถ่ายเทความร้อน.....	17
2.8 สมการการพาและการนำ.....	17
2.9 สมการความร้อนในทางชีววิทยา.....	18
2.10 กระบวนการแก้ปัญหา.....	17
2.10.1 สมการเชิงอนุพันธ์ย่อย.....	17
2.11 ไฟไนต์เอลิเมนต์และองค์ประกอบความรู้ที่จำเป็น.....	17
<b>บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....</b>	<b>21</b>
3.1 การออกแบบ.....	21
3.1.1 โครงสร้างสายอากาศพื้นฐาน.....	22
3.1.2 โครงสร้างสายอากาศที่ออกแบบ.....	22
3.1.3 โครงสร้างแบบบอลลูนที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	23
3.1.4 การพัฒนาการวิเคราะห์สายอากาศชนิดบอลลูน.....	24
3.2 คุณสมบัติของสายอากาศ.....	24
3.3 แบบจำลองสายอากาศทางไฟไนต์เอลิเมนต์.....	27
3.4 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต.....	30
3.5 การจัดเตรียมการทดลอง.....	32
3.5.1 การเตรียมการทดลองสายอากาศชนิดบอลลูนที่ได้จากการวิเคราะห์.....	32
3.5.2 การเตรียมการทดลองสายอากาศชนิดบอลลูนที่ได้จากการพัฒนาในห้องปฏิบัติการเฉพาะทาง.....	32
<b>บทที่ 4 ผลการจำลองการทำงานและผลการทดลอง.....</b>	<b>36</b>
4.1 ผลการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	36
4.1.1 สายอากาศชนิดบอลลูนที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.1.2 ผลการทดลองสายอากาศชนิดบอลลูนที่มีการพัฒนา.....	39
4.2 ผลการทดลอง.....	42
4.2.1 ผลการทดลองที่ 1.....	42
4.2.2 ผลการทดลองที่ 2.....	43
4.2.3 ผลการทดลองที่ 3.....	44
บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	48
5.1 สรุปผลงานวิจัย.....	48
5.2 ข้อเสนอแนะในการพัฒนาต่อไป.....	48
อ้างอิง.....	49
ภาคผนวก ก.....	51
ประวัติผู้เขียน.....	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 รายละเอียดของขนาดของสายอากาศ.....	23
3.2 รายละเอียดของค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารละลาย.....	29
3.3 สรุปจำนวนอิเล็กเมนต์ของสายอากาศที่ใช้แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์.....	29



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อ VII และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงกายวิภาคศาสตร์ของต่อมลูกหมาก.....	5
2.2 กราฟแสดงผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์มะเร็ง.....	8
2.3 แสดงสเปกตรัมแถบความถี่ในย่านความถี่ต่างๆ.....	9
2.4 แสดงการนำคลื่นไมโครเวฟไปใช้งาน.....	10
2.5 แสดงรูปคลื่น (ก) คลื่น TEM (ข) คลื่น TE (ค) คลื่น TM.....	13
2.6 แสดงโครงสร้างสายอากาศ (ก) สายโคแอกเซียล (ข) แบบใช้โซลิตไดอิเล็กตริก.....	14
2.7 แสดงการกระจายของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในสายโคแอกเซียล.....	15
2.8 แสดงทิศทางสนาม E และ H ที่แพร่กระจายไปตามสายโคแอกเซียล.....	16
3.1 แบบจำลองสายอากาศด้วยคอมพิวเตอร์ (ก) สายอากาศ (ข) ภาพตัดขวางของสายอากาศ.....	22
3.2 โครงสร้างขนาดสายอากาศที่ห่อหุ้มด้วยบอลลูน.....	22
3.3 โครงสร้างแบบจำลองบอลลูน.....	23
3.4 การพัฒนาการวิเคราะห์สายอากาศชนิดบอลลูน.....	24
3.5 สายอากาศ.....	25
3.6 เครื่องวัดคุณสมบัติสายอากาศ Bird Site Analyzer® Model SA-6000EX.....	25
3.7 กราฟแสดงค่า VSWR ของสายอากาศแบบบอลลูน ในย่านความถี่ 2,430-2,470 MHz.....	26
3.8 กราฟแสดงค่า Return Loss ของสายอากาศแบบบอลลูน ในย่านความถี่ 2,430-2,470 MHz.....	26
3.9 แสดงการกำหนดพลังงานให้กับ Port.....	27
3.10 แสดงการกำหนดความถี่ 2.45 GHz ให้กับ Electromagnetic Module.....	28
3.11 แบบจำลองสายอากาศทางไฟไนต์เอลิเมนต์.....	28
3.12 แสดงเงื่อนไขขอบเขตของ Slot ในการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์.....	30
3.13 แสดงเงื่อนไขขอบเขตของบอลลูนในการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์.....	31
3.14 แสดงเงื่อนไขขอบเขตของเนื้อเยื่อในการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์.....	31
3.15 การจัดเตรียมการทดลอง.....	32
3.16 การวางตำแหน่งบอลลูนสายอากาศในบริเวณต่อมลูกหมาก.....	33
3.17 แสดงผังการทดลองโดยใช้บอลลูนสายอากาศไมโครเวฟ.....	33
3.18 สายอากาศบอลลูนไมโครเวฟ.....	34
3.19 แสดงเครื่องอัลตราซาวด์ที่ใช้ในการทดลอง.....	34
3.20 แสดงกล้องถ่ายภาพทางการแพทย์ที่ใช้ในการบันทึกการทดลองผลการวิจัย.....	35
4.1 การกระจายสนามไฟฟ้า.....	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา VIII และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การกระจาย SAR.....	37
4.3 การกระจายตัวของอุณหภูมิ.....	37
4.4 การกระจายอุณหภูมิภายในบอลลูนที่ 0.5 นาที, 1 นาที, 2 นาที และ 10 นาที.....	38
4.5 อุณหภูมิภายในบอลลูน.....	38
4.6 การกระจายของสนามไฟฟ้า.....	40

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 แสดงอุณหภูมิภายในบอลลูนสายอากาศ.....	40
4.8 กราฟแสดงคุณสมบัติของสารละลาย.....	40
4.9 การกระจายตัวของอุณหภูมิในบอลลูนที่ 1 นาที 2 นาที 10 นาที และ 15 นาที.....	41
4.10 แสดงภาพอัลตราซาวด์เมื่อบอลลูนสายอากาศอยู่ในเนื้อเยื่อต่อมลูกหมาก.....	41
4.11 แสดงขนาดของบอลลูนเมื่ออยู่ในเนื้อเยื่อ.....	42
4.12 กราฟแสดงผลการทดลองอุณหภูมิภายในบอลลูนสายอากาศ.....	43
4.13 กราฟแสดงคุณสมบัติของสารละลาย.....	44
4.14 แสดงสายอากาศบอลลูนที่ใช้ในการทดลอง.....	44
4.15 แสดงภาพอัลตราซาวด์เมื่อบอลลูนสายอากาศอยู่ในเนื้อเยื่อต่อมลูกหมาก.....	45
4.16 แสดงขนาดของบอลลูนเมื่ออยู่ในเนื้อเยื่อ.....	45
4.17 เนื้อเยื่อก่อนการทดลอง.....	46
4.18 ผลการทดลอง Burn เนื้อเยื่อด้วยสายอากาศแบบบอลลูนด้วยคลื่นไมโครเวฟ.....	46
4.19 แสดงผลประสิทธิภาพการทำลาย.....	47

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โรคต่อมลูกหมากโตเป็นโรคที่พบได้บ่อยในผู้สูงอายุชายโดยอุบัติการณ์ของการเกิดโรคต่อมลูกหมากโตจากการสำรวจความชุกในผู้ชายของประเทศอิหร่านที่มีอายุตั้งแต่ 40 ปีขึ้นไปพบว่าผู้ชายในกลุ่มอายุ 40-49 ปี จะป่วยเป็นโรคต่อมลูกหมากโตร้อยละ 1.2 และร้อยละ 36 ในกลุ่มอายุมากกว่า 70 ปี และจากการสำรวจความชุกของโรคต่อมลูกหมากโตในเมืองโซล ประเทศเกาหลีใต้พบอุบัติการณ์การเกิดโรคต่อมลูกหมากโตร้อยละ 48.4 ในกลุ่มอายุ 50-59 ปี และร้อยละ 52.6 ในกลุ่มอายุ 60-69 ปี เพิ่มสูงขึ้นเป็นร้อยละ 67.3 และร้อยละ 70 ในกลุ่มอายุ 70-79 ปี และอายุมากกว่าหรือเท่ากับ 80 ปี ตามลำดับ (Kim et al., 2010) ในประเทศไทยพบสถิติของโรคต่อมลูกหมากโตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นโดยมีอัตราป่วยต่อประชากร 100,000 คน เท่ากับ 116.38, 130.80 และ 141.95 ในปี พ.ศ. 2550-2552 ตามลำดับ (สำนักนโยบายและยุทธศาสตร์ กระทรวงสาธารณสุข, 2552) และสถิติของโรคในหอผู้ป่วยศัลยกรรมระบบทางเดินปัสสาวะ โรงพยาบาลราชบุรี พบโรคต่อมลูกหมากโตติดอันดับ 1 ใน 5 อันดับแรกของโรกระบบทางเดินปัสสาวะมาโดยตลอด โดยพบร้อยละ 15.66 ของผู้ป่วยทั้งหมดที่เข้ามารับการบริการ ซึ่งผู้ป่วยที่เข้ามาได้รับการรักษาส่วนใหญ่จะอายุมากกว่า 60 ปีขึ้นไป โดยพบร้อยละ 80 ของผู้ป่วยโรคต่อมลูกหมากโตทั้งหมด (สถิติหอผู้ป่วยศัลยกรรมระบบทางเดินปัสสาวะ โรงพยาบาลราชบุรี, 2551-2553) [1]

จนปัจจุบันมีงานวิจัยที่ออกมานำเสนองานวิจัยที่หลากหลาย แต่การรักษาโรคต่อมลูกหมากโตในปัจจุบันมีหลายวิธีด้วยกันแต่ละวิธีก็ขึ้นกับระยะของโรคที่ตรวจพบ ซึ่งจะแตกต่างกันออกไป ซึ่งแต่ละแบบโดยสรุป คร่าวๆ ดังนี้ 1. การรักษาแบบประคับประคอง ใช้ในกรณีมีอาการไม่มากและไม่มีอาการแทรกซ้อน 2. การใช้ยา 3. การผ่าตัด (TURP) 4. การรักษาวิธีอื่นๆ เช่น การใช้ความร้อนที่ได้จากไมโครเวฟ (MICROWAVE), คลื่นวิทยุ (RADIO-FREQUENCY), คลื่นเสียงอัลตราซาวด์ (ULTRASOUND), หรือเลเซอร์ (LASER)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งแต่ละวิธีที่กล่าวมาข้างต้นนี้ก็เหมาะกับเงื่อนไขของการรักษาในแต่ละแบบ เช่น การผ่าตัด มีข้อเสียคือ การสูญเสียเลือด อาจจะต้องให้เลือดในบางรายหากต่อมลูกหมากใหญ่มากก็ต้องใช้วิธีการ ผ่าตัดผ่าน หน้าท้องเหนือหัวเหน่าจากนั้นแพทย์ก็ผ่าตัดเอาต่อมลูกหมากออก การรักษาด้วยความ ร้อนมีการตระหนักอย่างกว้างขวางว่าเป็นทางเลือกในทางการแพทย์สำหรับการรักษาเนื้อเยื่อที่มี รูปร่างผิดปกติ ความร้อนจะส่งผลกระทบต่อโปรตีนที่อยู่ในเนื้อเยื่อเซลล์เนื้อเยื่อจะมีการคลายเซลล์ และความยืดหยุ่น ภายใน 10 ปีที่ผ่านมาเทคนิคการรักษาจากคลื่นวิทยุและคลื่นไมโครเวฟ เป็นที่รู้จัก กันอย่างแพร่หลายของเทคนิคนี้คือการระเหยของโรคมะเร็งตับไมโครเวฟ [2] พลังงานไมโครเวฟถูก ปลดปล่อยออกมาโดยตรงจากสายอากาศออกแบบมาเพื่อเนื้อเยื่อมะเร็ง เซลล์มะเร็งเป็นส่วนใหญ่ถูก ทำลายโดยความร้อนที่เกิดจากการสั่นไหวของเนื้อเยื่อปฏิสัมพันธ์คลื่นช่วงความถี่ที่ต่ำกว่า แล้วยัง ดำเนินการเทคนิคนี้ในอวัยวะอื่นที่เป็นมะเร็งอีกด้วย [3]

ในปี 2012 การประยุกต์ใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในความถี่วิทยุในการรักษาหลอดลม ในผู้ป่วย โรคหอบหืด [4] ความร้อนจากสายอากาศที่ออกแบบที่มีทรงบอลลูนจะใช้ในการขยายทางเดินหายใจ ในปอด ช่วงไมโครเวฟถูกนำไปใช้ในการรักษาเส้นเลือดอุดตันที่ขาที่เกิดจากความผิดปกติของเส้นเลือด [5] อย่างไรก็ตามในทั้งการวิจัยสายอากาศคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ายังคงติดต่อดังตรงโครงสร้างของ เนื้อเยื่อ ข้อเสียนี้อาจจะก่อให้เกิดการเผาไหม้อย่างรุนแรงต่อเนื้อเยื่อหลังกระบวนการรักษา โรสและ คณะ [6] ในปี 2010 มีนำเสนอการใช้ประโยชน์ต่างๆ ของการบอลลูนห่อหุ้มในการประยุกต์ใช้ทาง การแพทย์

ในการวิจัยเราออกแบบสายอากาศไมโครเวฟชนิดบอลลูนสำหรับการบำบัดรักษาเนื้อเยื่อที่ ผิดปกติแคบ โดยอาศัยความร้อนที่เกิดจากพลังงานไมโครเวฟที่ 2.45 จิกกะเฮิร์ต จะถูกโอนเข้าไปใน เนื้อเยื่อทางน้ำเกลือในบอลลูน บอลลูนที่ร้อนนี้จะนำมาขยายช่องแคบในอวัยวะ เช่น หลอดลม และ ระบบทางเดินปัสสาวะ เราต้องการใช้สายอากาศแบบสลิต ซึ่งมีความเข้มสูงมีลักษณะเป็นวงแหวน เมื่อมีอุณหภูมิที่สูงจะมีการกระจายความร้อนในน้ำเกลือไปยังบอลลูนตามโครงสร้างของสายอากาศนี้ ปปรากฏการณ์นี้สามารถสังเกตเห็นจากการขยายของคลื่นไฟฟ้าและรูปแบบการกระจายอุณหภูมิในน้ำ เกลือเหล่านี้ พารามิเตอร์ที่กล่าวถึงเป็นที่คาดการณ์และจำลองความสามารถโดยโดยใช้ FEM ใน พื้นที่สามมิติ (3D)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาการกระจายความร้อนของระบบคลื่นไมโครเวฟที่มีการออกแบบสายอากาศชนิดบอลลูนสำหรับการบำบัดโรคต่อมลูกหมากโต โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

1.2.2 เพื่อนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาเป็นแนวทางทดลองกับเนื้อเยื่อแบบ in vitro

1.2.3 เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาการบำบัดรักษาโรคต่อมลูกหมากโตต่อไปในอนาคต

## 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

เนื่องจากเมื่อคลื่นไมโครเวฟจะเคลื่อนที่เข้าไปในวัสดุที่ประกอบด้วยโมเลกุลที่มีความเป็นขั้วโมเลกุลเหล่านั้นจะเคลื่อนที่เนื่องจากได้รับแรงกระทำสลับไปมาอย่างรวดเร็วจากสนามไฟฟ้าเกิดการชนกันระหว่างโมเลกุล ทำให้เกิดความร้อนอย่างรวดเร็ว เมื่อน้ำเป็นโมเลกุลมีขั้วและมีจำนวนมากที่สุดในอวัยวะต่างๆของร่างกาย ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้อาหลักการการเกิดความร้อนของคลื่นไมโครเวฟรวมทั้งการออกแบบสายอากาศชนิดบอลลูนที่มีสารละลาย (normal saline) เป็นตัวนำพาความร้อนและมีการกระจายความร้อนในบอลลูนนี้มาประยุกต์ใช้ในการบำบัดรักษาโรคต่อมลูกหมากโต ซึ่งโรคต่อมลูกหมากโตเกิดจากความเปลี่ยนแปลงของเนื้อเยื่อ ความร้อนที่เกิดจากคลื่นไมโครเวฟและสายอากาศชนิดบอลลูนน่าจะช่วยขยายท่อปัสสาวะบริเวณต่อมลูกหมากได้ โดยนำเอาวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้ในการแก้ปัญหาคณิตศาสตร์ของแบบจำลองที่สร้างขึ้น เพื่อที่จะสามารถมองเห็นรูปแบบการกระจายตัวของความร้อนที่เกิดขึ้นในสายอากาศชนิดบอลลูนได้ชัดเจนยิ่งขึ้น และทางผู้วิจัยยังมองเห็นว่าการนำเอาคลื่นไมโครเวฟมาใช้ในการบำบัดรักษาโรคต่อมลูกหมากโตจะเป็นแนวทางในการรักษาที่ดี เนื่องจากการบำบัดรักษาไม่มีผลที่บริเวณเนื้อเยื่อแล้วระยะเวลาในการรักษาน้อย ผู้ป่วยพักฟื้นสั้นส่งผลให้ผู้ป่วยมีคุณภาพชีวิตที่ดีขึ้นหลังจากการบำบัดรักษา

## 1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) หรือ FEM ซึ่งเป็นวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขชนิดหนึ่งสำหรับแก้สมการเชิงอนุพันธ์ในการแก้ปัญหาการวิเคราะห์ ด้านความร้อนใช้สมการความร้อนทางชีววิทยา เพื่อศึกษาลักษณะการกระจายตัวของความร้อนหรืออุณหภูมิในบอลูนและปฏิกิริยาของคลื่นไมโครเวฟกับต่อมลูกหมากที่เกิดขึ้นกับแบบจำลองที่สร้างขึ้น และศึกษาการทำลายต่อมลูกหมากรูปแบบ 3 มิติ รวมทั้งศึกษาผลกระทบกับต่อมลูกหมาก

### 1.5 ขอบเขตการวิจัย

- การใช้ระเบียบวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อศึกษาการจำลองและวิเคราะห์
- ศึกษาการกระจายความร้อนภายในต่อมลูกหมาก เมื่อส่งคลื่นไมโครเวฟ ความถี่ 2.45 GHz ผ่านสายอากาศโคแอกเซียล
- ทำการทดลองกับเนื้อเยื่อแบบภายนอกร่างกาย (In-Vitro) เพื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลอง

### 1.6 โครงสร้างวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บทในแต่ละบทจะมีเนื้อหา ดังต่อไปนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย สมมติฐานของการศึกษา ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย และขอบเขตของงานวิจัย

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องซึ่งจะประกอบไปด้วย โรคต่อมลูกหมากโตและวิธีการรักษา ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ความหมายของคลื่นไมโครเวฟ พื้นฐานการกระจายความร้อนในเนื้อเยื่อ สนามแม่เหล็กไฟฟ้าและปฏิกิริยาของคลื่นไมโครเวฟกับเนื้อเยื่อ และสมการความร้อนทางชีววิทยา

บทที่ 3 กล่าวถึงหลักการและวิธีการจำลอง ด้วยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรม COMSOL Multiphysics ในการวิเคราะห์ อธิบายถึงโครงสร้าง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบจำลองของบอลูนในต่อมลูกหมากและโครงสร้างสายอากาศที่นำมาใช้ซึ่ง  
ออกแบบมาจากสายอากาศจริงค่าพารามิเตอร์ของเนื้อเยื่อ และขั้นตอนการทดลอง

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการจำลองและผลการทดลอง โดยจะวิเคราะห์ผลการ  
กระจายตัวของความร้อนและขอบเขตการทำลายของคลื่นไมโครเวฟ และผลกระทบที่  
เกิดขึ้นในต่อมลูกหมากที่ได้จากการจำลองทางคณิตศาสตร์และผลที่ได้จากการทดลอง  
จริงกับต่อมลูกหมากแบบ in-vitro

บทที่ 5 กล่าวถึงสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะถึงแนวทางในงานวิจัยต่อไป

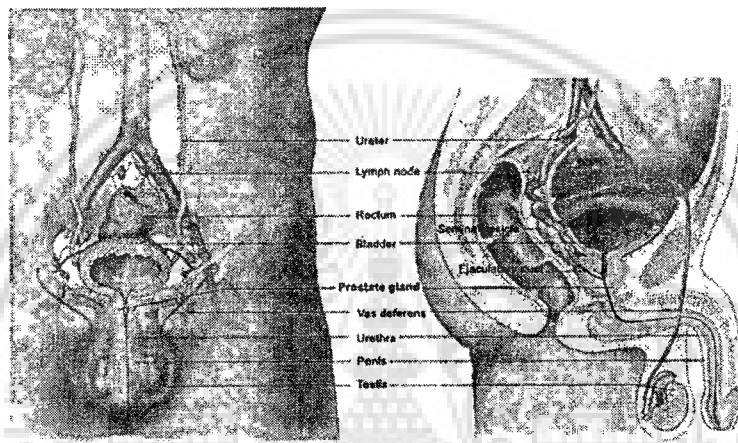


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# หลักการและทฤษฎีพื้นฐาน

### 2.1 กายวิภาคศาสตร์และสรีรวิทยาของต่อมลูกหมาก [7]



รูปที่ 2.1 แสดงกายวิภาคศาสตร์ของต่อมลูกหมาก

ต่อมลูกหมาก (Prostate gland) ประกอบด้วยส่วนของ Fibromuscular และ Glandular วางอยู่ใต้ต่อกระเพาะปัสสาวะ (Urinary bladder) มีน้ำหนักประมาณ 20 กรัม ภายในมีส่วนของทางเดินปัสสาวะส่วนหลัง (Posterior urethra) ยาวประมาณ 2.5 ซม. ซึ่งเป็นของ Inner longitudinal muscular layer ซึ่งต่อเนื่องมาจากในกระเพาะปัสสาวะ

- ด้านหน้า ยึดไว้ด้วย Puboprostatic ligament
- ด้านล่าง ยึดไว้ด้วย Urogenital diaphragm
- ด้านหลัง มีท่อนำเชื้ออสุจิ (Ejaculatory duct) มาทางทะลุแนวเฉียงไปเปิดบริเวณพื้นด้านล่าง (floor) ของท่อปัสสาวะที่ผ่านต่อมลูกหมาก (Prostatic urethra) บริเวณส่วนที่เรียกว่า Verumontanum ซึ่งอยู่ ถัดจาก striated external urinary sphincter ไปเล็กน้อย

ต่อมลูกหมาก เป็นอวัยวะส่วนหนึ่งของอวัยวะในระบบสืบพันธุ์ของเพศชาย อยู่ตรงคอกระเพาะปัสสาวะหุ้มอยู่รอบท่อปัสสาวะ ส่วนต้นทางด้านหน้าของท่อทวารหนัก ขนาดปกติ กว้าง × ยาว × หนา ราว 3 × 4 × 2 ซม. น้ำหนักประมาณ 1 ออนซ์ รูปร่างคล้ายลูกแพร์กลับหัว หรือลูกเกาลัด ต่อมลูกหมากเป็นโรงงานสร้างน้ำเมือกหล่อเลี้ยงตัวอสุจิ ซึ่งถือว่ามีความสำคัญอย่างยิ่งต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบสืบพันธุ์เพศชาย ต่อมลูกหมากเป็นอวัยวะในระบบสืบพันธุ์ของเพศชาย บางคนเรียกว่าเป็นต่อมเพศชาย บางคนเรียกว่าเป็นต่อมเสริม บางทีก็เรียกว่า ต่อมสร้างของเหลวผู้หญิงไม่มีต่อมลูกหมาก

## 2.2 โรคต่อมลูกหมากโต [8]

เป็นการเจริญเติบโตที่ผิดปกติของกลุ่มเซลล์ต่อมลูกหมากที่อยู่รอบๆ ท่อปัสสาวะเมื่อโตมากจะบีบรัดท่อปัสสาวะให้ตีบแบนและยาวทำให้เกิดการอุดตัน บริเวณท่อทางเดินปัสสาวะ เป็นผลให้ปัสสาวะไหลไม่สะดวก

### 2.2.1 ต่อมลูกหมากโตชนิดธรรมดา

ต่อมลูกหมากเป็นอวัยวะหนึ่งของระบบสืบพันธุ์เพศชาย เป็นก้อน คล้ายลูกเกาต์ล้อมรอบท่อปัสสาวะส่วนต้น ต่อจากคอกระเพาะปัสสาวะติดชิดด้านในของกระดูกหัวเหน่าและหน้าต่อทวารหนัก มีขนาดโดยประมาณคือ กว้าง 2 เซนติเมตร ยาว 4 เซนติเมตร และหนา 2 เซนติเมตร ทำหน้าที่สร้างของเหลวและสารที่หล่อเลี้ยงตัวอสุจิให้แข็งแรงและสามารถสืบพันธุ์ได้ขณะที่อยู่ในช่องคลอดหลังการร่วมเพศ

ต่อมลูกหมากโตเป็นความผิดปกติที่มีความเจริญเพิ่มทั้งขนาดและจำนวนเซลล์มากกว่าปกติ ทำให้ ต่อมลูกหมากโตเป็นก้อนเนื้องอกซึ่งมี 2 ชนิด คือ

- ชนิดธรรมดา จะพบบ่อยมาก
- ชนิดร้ายแรง (มะเร็ง) ลักษณะเซลล์ไม่เหมือนเซลล์ปกติ และเจริญรวดเร็วมีการ

แพร่กระจายของเซลล์ไปยังอวัยวะอื่น

ต่อมลูกหมากโตชนิดธรรมดา ไม่ใช่มะเร็งและไม่กลายเป็นมะเร็ง แต่ทั้งสองโรคอาจพบร่วมกันได้ในบางคน ทั้งนี้เนื่องจากตำแหน่งที่เกิดโรทั้งสองอยู่กันคนละบริเวณของต่อมลูกหมาก

### 2.2.2 สาเหตุ

สาเหตุที่แน่ชัดไม่มีใครทราบ แต่คิดว่าเกิดจาก

1. อายุมากขึ้น พบว่าชายที่อายุ 51-60 ปี มีอุบัติการณ์ของต่อมลูกหมากโต 50% หากอายุถึง 80 ปี อุบัติการณ์เกือบถึง 100%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ฮอริโมนเพศชาย Testosterone ส่วนใหญ่จากลูกอัณฑะ ส่วนน้อยจากต่อมหมวกไต ซึ่งจะเปลี่ยนไปเป็นฮอริโมน Dihydrotestosterone (DHT) โดยเอ็นไซม์ 5 - alpha Reductase (5 - อัลฟา รีดักเตส) ในต่อมลูกหมาก สารเหล่านี้จะช่วยกระตุ้นให้ต่อมลูกหมากโตขึ้น

### 2.2.3 อาการของต่อมลูกหมากโต

1. ปัสสาวะบ่อยทั้งกลางวันและกลางคืน ปวดปัสสาวะบ่อยจนบางครั้งก็รดก่อนถึงห้องน้ำ
2. ปัสสาวะไม่ค่อยออกต้องรอนาน
3. ปัสสาวะนานกว่าจะหมด
4. ปัสสาวะไม่พุ่ง, ลำปัสสาวะอ่อนลง
5. กระปริดกระปรอย, ถ่ายๆ หยดๆ หลายครั้ง
6. ปัสสาวะไม่หยุด, ยังเหลือตกค้าง
7. บางครั้งมีอาการอักเสบร่วมด้วยทำให้ปัสสาวะปวดแสบ

### 2.2.4 การรักษา

จุดมุ่งหมายเพื่อให้ผู้ป่วยปัสสาวะได้เหมือนปกติ วิธีรักษามี 3 วิธี คือ

#### 2.2.4.1 การรักษาแบบประคับประคอง

ใช้ในกรณีมีอาการไม่มากและไม่มีอาการแทรกซ้อน

#### 2.2.4.2 การรักษาโดยการฉายยา

ยารักษาต่อมลูกหมากโตที่เป็นที่ยอมรับกันมี 2 ชนิด

ก. ยาที่ลดขนาดต่อมลูกหมาก ได้แก่ กลุ่มยาด้านเอ็นไซม์ 5 - อัลฟา รีดักเตส โดยยาจะไปยับยั้งที่สาเหตุคือ เอ็นไซม์ 5 - อัลฟา รีดักเตส ทำให้ DHT ลดลง มีผลทำให้ต่อมลูกหมากเล็กลง, อาการปัสสาวะขัดดีขึ้น

ข. ยาลดอาการเกร็งของกล้ามเนื้อเรียบในเนื้อต่อมลูกหมาก, ทำให้อาการดีขึ้น ได้แก่ กลุ่มยาด้านอัลฟา

#### 2.2.4.3 การรักษาด้วยการผ่าตัด

1. การส่องกล้องตัดต่อมลูกหมาก (Transurethral resection of prostate, TUR-P) เป็นการผ่าตัดโดยการส่องกล้องย้อนกลับเข้าไปทางท่อปัสสาวะและใช้ลวดไฟฟ้าคว้านเอาเนื้อต่อมลูกหมากออกมา เพื่อแก้ไขการอุดตันทางออกของกระเพาะปัสสาวะ ภายหลังจากการผ่าตัด แพทย์จะคา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายสวนปัสสาวะไว้จนปัสสาวะใสดีแล้วจึงจะถอดสายสวนออก ซึ่งมักจะใช้เวลาประมาณ 1 – 3 วัน อย่างไรก็ตามแผลบริเวณที่ทำผ่าตัดอาจใช้เวลาประมาณ 2 – 3 เดือนกว่าจะหายสนิท ดังนั้นผู้ป่วยจึงอาจมีอาการปัสสาวะแสบเป็นบางครั้ง แพทย์จึงมักแนะนำให้ผู้ป่วยหลีกเลี่ยงการออกกำลังกายหนัก หรือการยกของหนักในช่วง 2 – 3 เดือนแรกนี้ไปก่อน เพราะอาจทำให้เลือดออกมาขึ้นรวมทั้งมักให้ยาละลายเพื่อป้องกันอาการท้องผูกอันเป็นสาเหตุทำให้ต้องออกแรงเบ่งด้วย การผ่าตัดด้วยวิธีนี้ ปัจจุบันถือว่าเป็นการรักษามาตรฐานของโรคต่อมลูกหมากโต

2. การผ่าตัดเปิดเพื่อตัดต่อมลูกหมาก (open prostatectomy) เป็นการผ่าตัดเปิดเข้าไปยังบริเวณต่อมลูกหมาก แล้วตัดเอาเนื้อต่อมลูกหมากที่โตทางด้านในออก มักใช้วิธีนี้ในกรณีที่ต่อมลูกหมากโตมากจนไม่สามารถจะส่องกล้องตัดต่อมลูกหมากออกได้สมบูรณ์ในครั้งเดียว อย่างไรก็ตามการผ่าตัดด้วยวิธีนี้ผู้ป่วยจะเจ็บตัวมากกว่า และต้องการพักฟื้นที่นานกว่าการส่องกล้องตัดต่อมลูกหมากออก ภายหลังการผ่าตัดแพทย์จะคาสายสวนปัสสาวะไว้เช่นกัน แต่กว่าจะถอดสายสวนออกได้นั้นมักใช้เวลาประมาณ 5 – 7 วัน คำแนะนำในช่วงพักฟื้น 2 – 3 เดือนแรกนั้น ไม่แตกต่างกับการส่องกล้องตัดต่อมลูกหมาก

3. การผ่าตัดแบบอื่นๆ เช่น การใช้คลื่นวิทยุ หรือคลื่นไมโครเวฟทำลายต่อมลูกหมาก, การใช้กระแสไฟฟ้าทำลายต่อมลูกหมาก และการใช้เลเซอร์ทำลายต่อมลูกหมาก เป็นต้น วิธีเหล่านี้ถูกคิดค้นขึ้นเพื่อลดผลข้างเคียงของการผ่าตัดด้วยการส่องกล้องตัดต่อมลูกหมาก โดยเฉพาะในเรื่องของการเสียเลือดในขณะที่ทำผ่าตัด อย่างไรก็ตามผลการรักษาด้วยวิธีการเหล่านี้ยังด้อยกว่าการผ่าตัดด้วยการส่องกล้องตัดต่อมลูกหมาก วิธีการเหล่านี้จึงยังเป็นเพียงทางเลือกในผู้ป่วยบางรายเท่านั้น โดยเฉพาะผู้ป่วยที่มีโรคประจำตัวมาก และอาจเป็นอันตรายหากมีการเสียเลือดมากและเร็วเกินไป

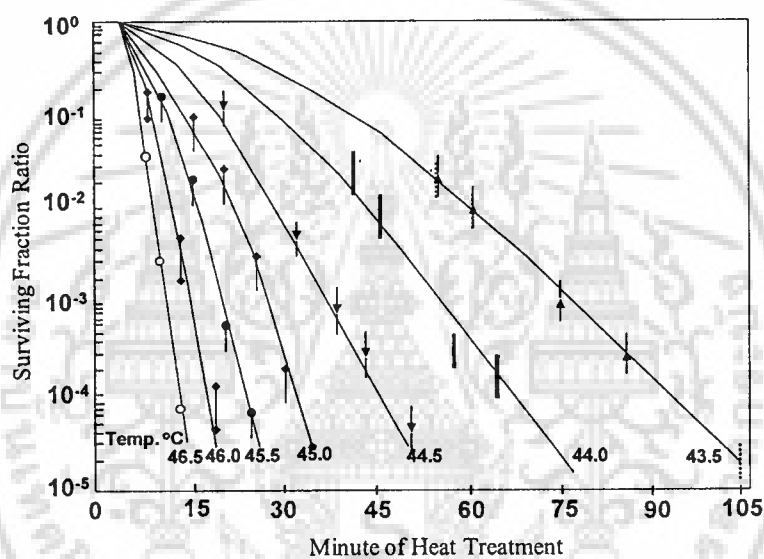
### 2.3 พื้นฐานการกระจายความร้อนภายในเนื้อเยื่อ [9]

การใช้ความร้อนในการรักษาโรค เป็นการรักษาที่ทำให้อุณหภูมิ ณ บริเวณนั้น สูงขึ้นเกิน 50 องศาเซลเซียส เซลล์เนื้อเยื่อที่อยู่บริเวณนั้นๆ จะได้รับผลกระทบ และมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับอุณหภูมิการใช้ความร้อนในการรักษาโรคมะเร็งได้มีการพัฒนาเทคนิค ที่เรียกว่า Hyper thermal cancer therapy ซึ่งมีการเริ่มใช้มาตั้งแต่ปี ค.ศ.1960

การรักษาโรคมะเร็งโดยใช้ความร้อน เป็นรูปแบบการรักษาโรคมะเร็งแบบใหม่ ซึ่งมีพื้นฐานและหลักการทางชีววิทยาที่สามารถ พิสูจน์ ทดลอง และสามารถอธิบายได้ซึ่งในปัจจุบันการรักษาโรคมะเร็ง โดยใช้ความร้อนนี้สามารถรักษาโรคมะเร็งชนิดต่างๆ ได้ทั่วร่างกาย และได้ผลการรักษาที่น่าสนใจ การรักษาโรคมะเร็งด้วยความร้อน อาศัยหลักการให้ความร้อนกับเซลล์มะเร็งอยู่ในช่วง 41–

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

46 องศาเซลเซียส และรักษาระดับของอุณหภูมิไว้ให้คงที่ พื้นฐานของปรากฏการณ์ทางชีววิทยา สำหรับการรักษาโรคมะเร็งด้วยความร้อน จะมีอยู่สองปริมาณที่มีความสำคัญในการรักษาคือ อุณหภูมิ และเวลาในการให้ความร้อน ซึ่งในรูปที่ 2.2 จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลา ที่ส่งผล ต่อปริมาณเซลล์มะเร็งที่ยังมีชีวิตอยู่จากการให้ความร้อน โดยเมื่อให้อุณหภูมิสูงแก่เซลล์มะเร็งในช่วงเวลาเริ่มต้นเซลล์มะเร็งจะสูญเสียเป็นจำนวนมาก แต่เมื่อมีการลดอุณหภูมิที่ให้แก่เซลล์มะเร็ง ผลกระทบที่เกิดขึ้นคือ ต้องใช้เวลามากขึ้นเพื่อทำให้เซลล์มะเร็งตาย ในการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น แก่เซลล์เนื้อเยื่อ จำนวนเซลล์จะเกิดการสูญเสียมาก และจะทำให้เซลล์ปกติที่อยู่รอบๆ เซลล์มะเร็งได้รับความเสียหายได้เช่นกัน ดังนั้นในการเพิ่มอุณหภูมิให้เหมาะสมนั้น สามารถทำลายเซลล์มะเร็งได้ จำนวนมาก และไม่เป็นอันตรายแก่เซลล์ปกติ



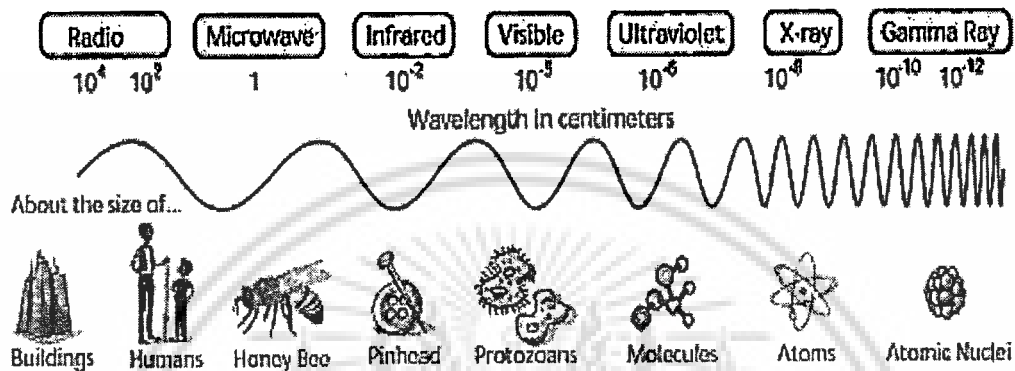
รูปที่ 2.2 กราฟแสดงผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์มะเร็ง

Brace 2003 สรุปว่า เมื่อให้ความร้อนที่สูงพอ ที่ระดับสูงกว่า 50 องศาเซลเซียสเซลล์เนื้อเยื่อจะถูกทำลายในทันที แต่ถ้าใช้ความร้อนต่ำกว่า ระยะเวลาที่จะทำให้เซลล์ตายนั้นจะต้องใช้ระยะเวลาที่สูงขึ้นและถ้าต้องการให้เซลล์เนื้อเยื่อถูกทำลายในทันที ในเนื้อเยื่อต้องมีอุณหภูมิสูงกว่า 50 องศาเซลเซียส ฉะนั้น ที่ระดับอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นระดับความร้อนที่แน่ใจได้ว่า เซลล์เนื้อเยื่อถูกทำลาย ซึ่งถ้าเราสามารถออกแบบแหล่งกำเนิดความร้อนที่สามารถสร้างความร้อนเกิดขึ้นเฉพาะที่ได้ ก็จะสามารถทำลายเซลล์มะเร็งที่อวัยวะต่างๆ ภายในร่างกาย ด้วยวิธีการสอดใส่ ด้วยการแทงเข้าไปในร่างกายโดยไม่ต้องเปิดช่องท้อง ทำให้การรักษาเกิดขึ้นเฉพาะที่ และมีขนาดของบาดแผลหลังผ่าตัดที่เล็ก ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้สนใจแนวทางในการออกแบบสายอากาศในย่านความถี่ไมโครเวฟ เพื่อจะสามารถนำคลื่นความถี่ไมโครเวฟส่งผ่านสู่นเนื้อเยื่อที่ต้องการทำลายได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 ความหมายของคลื่นไมโครเวฟ และความสามารถเกิดความร้อนในเนื้อเยื่อ

ความหมายของคลื่นไมโครเวฟถูกอธิบายด้วย รูปที่ 2.3 แสดงสเปกตรัมของความถี่ในย่านต่างๆ



รูปที่ 2.3 แสดงสเปกตรัมแถบความถี่ในย่านความถี่ต่างๆ

### 2.4.1 ความหมายของไมโครเวฟ

ไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เช่นเดียวกับแสงสว่างโดยอยู่ในช่วงของคลื่นวิทยุความถี่สูง (High frequency radio wave) เมื่อคลื่นมีความถี่สูงขึ้นความยาวคลื่นจะลดลง คลื่นที่มีความถี่สูงมากความยาวคลื่นจึงสั้นมาก ดังนั้นคลื่นชนิดนี้จึงได้ชื่อว่าไมโครเวฟซึ่งแปลว่าคลื่นสั้นมาก รังสีอินฟราเรด (Infrared) แสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet) และรังสีเอกซ์ (X-ray) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเช่นเดียวกันแต่มีความยาวคลื่นสั้นกว่าไมโครเวฟ

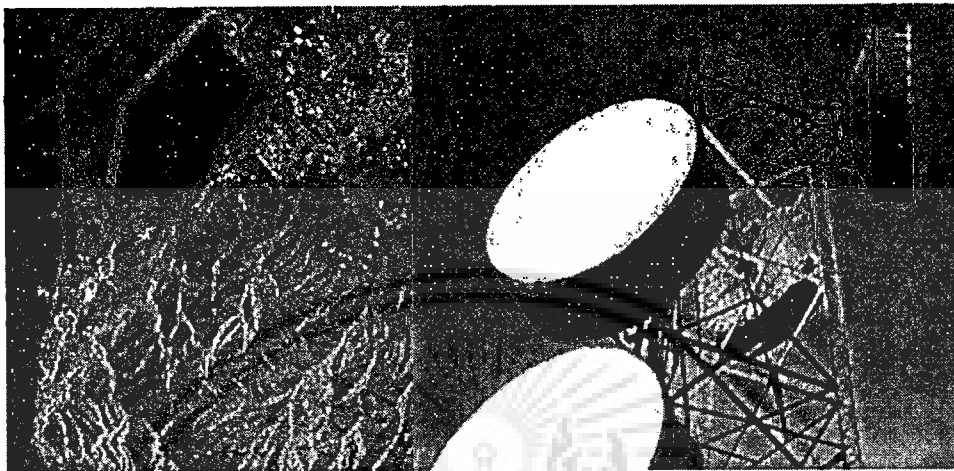
ไมโครเวฟที่เคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง อาจจะทะลุผ่านไป เกิดการสะท้อนหรือถูกดูดกลืนวัตถุที่เป็นโลหะจะสะท้อนไมโครเวฟทั้งหมดส่วนวัตถุที่ไม่ใช่โลหะ เช่น แก้ว หรือพลาสติก ไมโครเวฟจะเคลื่อนที่ผ่านไปได้บางส่วน วัตถุที่มีความชื้น เช่น ร่างกายคนเราหรืออาหารจะดูดกลืนพลังงานของไมโครเวฟถ้าพลังงานที่ถูกดูดกลืนเอาไว้มากกว่าพลังงานที่คายออกมาอุณหภูมิก็จะสูงขึ้น

### 2.4.2 การนำเอาไมโครเวฟไปใช้งาน

โดยทั่วไปไมโครเวฟมิใช่ในงานด้านการสื่อสารผ่านดาวเทียม โทรศัพท์เคลื่อนที่เรดาร์ อุปกรณ์นำร่องทางการบินและการเดินเรือ นอกจากนั้นยังมีการนำไปใช้ในการให้ความร้อนทางอุตสาหกรรมและการรักษาโดยการใช้ความร้อนในช่วงเวลาที่ผ่านมานาน มีการใช้ไมโครเวฟตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บ้านเรือน ทางอุตสาหกรรมและการพาณิชย์เพิ่มขึ้นจำนวนมาก รูปที่ 2.4 แสดงการทำงานบางส่วนของไมโครเวฟ [10]



รูปที่ 2.4 แสดงการนำคลื่นไมโครเวฟไปใช้งาน

#### 2.4.3 การนำเอาไมโครเวฟไปใช้งานทางการแพทย์

ทางการแพทย์นำคลื่นไมโครเวฟมาใช้ในการรักษาบ้างเหมือนกัน แต่เป็นคลื่นไมโครเวฟที่มีความถี่คลื่นน้อยกว่าไมโครเวฟที่ใช้ปรุงอาหาร เพราะต้องการเพียงความร้อนขนาดอุ่นๆ สบายๆ หรือความร้อนสูงขึ้นอีกเล็กน้อยขนาดพอทนได้ เช่น ทางเวชศาสตร์ฟื้นฟูใช้ไมโครเวฟความถี่ต่ำเพื่อใช้คลายอาการปวดกล้ามเนื้อหรือปวด ตามข้อซึ่งมีความร้อนขนาดอุ่นๆ กำลังสบายๆ

ทางด้านรังสีรักษาและระบบทางเดิน ปัสสาวะใช้ไมโครเวฟความถี่สูงขึ้นไปกว่าทางเวชศาสตร์ฟื้นฟู ให้ความร้อนสูงขึ้นแต่ไม่ถึงจุดเดือด ใช้รักษาทำลายเซลล์มะเร็งเฉพาะที่ตื้นๆ ร่วมกับการรักษาด้วยรังสีและยารักษามะเร็ง เครื่องเดียวกันนี้ยังสามารถใช้รักษาโรคต่อมลูกหมากโตในชายผู้สูงอายุ บางรายได้ด้วย [11]

#### 2.4.4 ผลต่อสุขภาพเมื่อได้รับคลื่นไมโครเวฟ

ถ้าได้รับไมโครเวฟปริมาณสูงจะทำให้เกิดความร้อนในกรณีที่เป็นเนื้อเยื่อของร่างกาย ความร้อนที่สูงเกินไปจะทำให้เป็นอันตราย เช่น เกิดการไหม้ของเนื้อเยื่อที่อยู่ลึกลงไป หรือเรียกว่า Hyperthermia มีงานวิจัยเรื่องนี้กันอย่างกว้างขวางแต่ยังไม่มีที่ยืนยันที่แน่นอนถึงผลกระทบของการได้รับไมโครเวฟว่ามีปริมาณระดับใดที่จะส่งผลให้เกิดมะเร็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรายละเอียดที่ได้กล่าวมา แสดงให้เห็นว่าคลื่นความถี่ไมโครเวฟสามารถที่จะทำให้เกิดความร้อนขึ้นในเนื้อเยื่อได้ โดยถ้ามีการออกแบบส่วนของการนำคลื่นไมโครเวฟที่ดี จะสามารถบังคับจุดปล่อยคลื่นไปยังตำแหน่งต่างๆ ได้ ซึ่งหมายความว่าสามารถที่จะนำไปใช้ทำลายเซลล์มะเร็งที่อุณหภูมิต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียสได้ โดยคลื่นความถี่ไมโครเวฟ ซึ่งรายละเอียดที่เกี่ยวข้องส่วนต่อไปคือ รูปแบบของการเดินทางของคลื่น เพื่อให้เราเข้าใจถึงตัวนำที่นำมาใช้ว่ามีรูปแบบของโหมดการเดินทางของคลื่นอย่างไร

## 2.5 สายนำสัญญาณสำหรับความถี่ไมโครเวฟ

สายนำสัญญาณหรือทรานสมิSSION LINE (Transmission line) ทำหน้าที่เป็นสื่อกลางในการนำพาคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากที่แห่งหนึ่งไปยังที่อีกแห่งหนึ่ง ตัวสายนำสัญญาณอาจจะใช้แท่งตัวนำขึ้นเดี่ยว จำพวกเวฟไกด์ หรือแท่งตัวนำ 2 ชั้น จำพวกสายคู่ขนาน (Two-wire line), อาจจะเป็นพวกโคแอกเซียล, สตรีปไลน์ และไมโครสตรีป สายนำสัญญาณซึ่งใช้กันในความถี่ย่านไมโครเวฟสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภทด้วยกัน คือ

1. สายนำสัญญาณแบบคู่ขนาน (Two-wire lines)
2. สายโคแอกเซียล (Coaxial)
3. เวฟไกด์ (Waveguide)
4. สตรีปไลน์และไมโครสตรีป (Stripline and Microstrip)

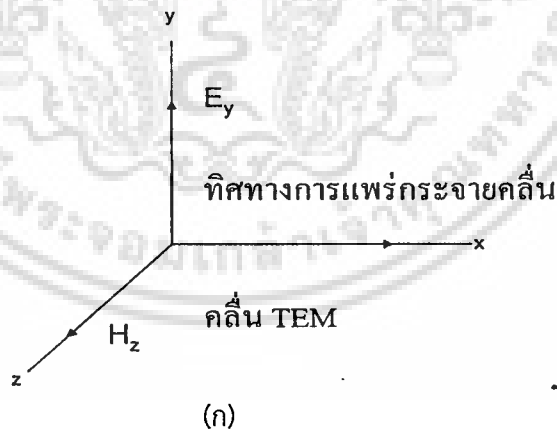
สายนำสัญญาณแบบคู่ขนานนั้น นิยมใช้กันในตอนต้น หรือแถบความถี่ย่านต่ำสุดของสเปกตรัมความถี่ไมโครเวฟ เนื่องจากที่ความถี่สูงขึ้น สายชนิดนี้จะมีการสูญเสียที่เรียกว่า Radiation loss มากขึ้น ซึ่งเป็นความสูญเสียเนื่องจากการแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกจากตัวสายนำสัญญาณ ดังนั้นที่ความถี่สูงขึ้นจึงหันมาใช้สายโคแอกเซียลแทน ซึ่งสายโคแอกเซียลได้ขจัดปัญหาของ Radiation loss โดยการชีลด์ตัวมันเองด้วยแผ่นตัวนำล้อมรอบ สายชนิดนี้ประกอบด้วยแท่งตัวนำภายในซึ่งเป็นตัวนำพาคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และแท่งตัวนำล้อมรอบ ซึ่งอาจใช้เป็นแผ่นตัวนำหรือถักสานด้วยเส้นตัวนำขนาดเล็กเป็นร่างแหล้อมรอบก็ได้ แต่สายโคแอกเซียลก็มีข้อเสียตรงที่สามารถทนกำลังงานได้ต่ำ เมื่อความถี่สูงขึ้นจะเกิดการสูญเสียเนื่องจากผิวตัวนำหรือที่เรียกว่าสกินเอฟเฟกต์ (Skin effect) เป็นผลให้มีการลดทอนสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านสายโคแอกเซียลมากขึ้น จึงเป็นข้อจำกัดของสายชนิดนี้ทำให้เหมาะสมสำหรับงานสื่อสารระยะใกล้ (Short-line length) ซึ่งความสูญเสียทางกำลังงานระดับนี้ไม่มีผลต่อระบบมากนัก ดังนั้นที่ความถี่สูงมากขึ้นการใช้เวฟไกด์จึงเป็นสื่อกลางที่เหมาะสม เพราะมันสามารถนำพาคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีกำลังสูงไปได้ โดยเกิดการสูญเสียกำลังงานในตัวมันเองน้อยมาก สำหรับสตรีปไลน์และไมโครสตรีปนิยมใช้ประกอบในตัวอุปกรณ์ที่ใช้

ในย่านความถี่ไมโครเวฟ ใช้เป็นสายนำสัญญาณขนาดเล็กเชื่อมระหว่างอุปกรณ์ชนิดหนึ่งไปยังอุปกรณ์ข้างเคียง ซึ่งส่วนใหญ่ที่พบเห็นกันก็คือแถบที่ติดอยู่บนแผ่นวงจรพิมพ์ของอุปกรณ์ไมโครเวฟนั่นเอง

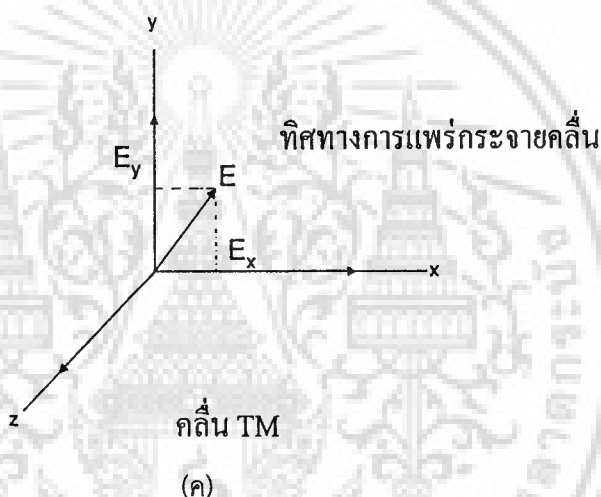
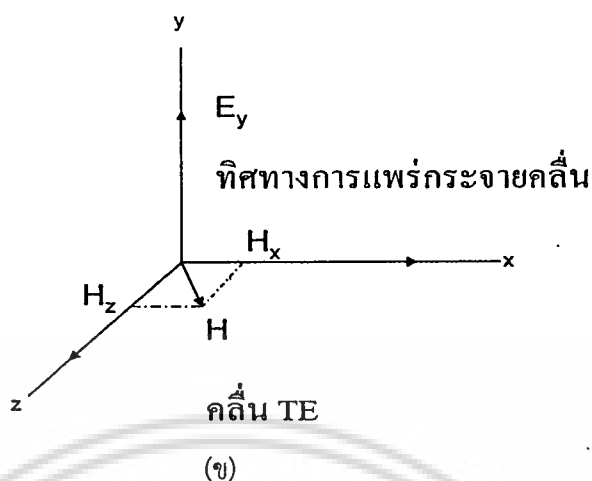
เราจะได้ทราบถึงพื้นฐานที่จำเป็นเพื่อสร้างความเข้าใจในเรื่องการเดินทางของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านสื่อกลางที่เป็นสายนำสัญญาณชนิดต่างๆ ความหมายของคำต่างๆ จำพวกความยาวคลื่น และความถี่คัทออฟ (Cutoff wavelength and frequency), ความเร็วเฟสและความเร็วกลุ่ม (Phase and group velocity), การนำพาคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Wave transmission), การแพร่กระจายของคลื่นในโหมดที่สูงกว่า (Higher mode), คาเรคเตอร์ริสติกอิมพีแดนซ์ รวมทั้งการใช้งานของสายนำสัญญาณทุกแบบ เริ่มจากสายคู่ขนาน, สายโคแอกเซียล, เวฟไกด์ทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular waveguide), สตรีปไลน์ และไมโครสตรีป

### โหมดการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นในสายนำสัญญาณ (Mode of Propagation)

ในสภาวะฟรีสเปซคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะแพร่กระจายออกไปเป็นลักษณะรูปทรงกลม (Spherical configuration) ตามที่เราได้ทราบกันมาแล้ว คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดการแพร่กระจายออกสู่ฟรีสเปซในลักษณะสนามไฟฟ้าแปรเปลี่ยนตามเวลาเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่แปรเปลี่ยนตามเวลา และสนามแม่เหล็กแปรเปลี่ยนตามเวลาก็เหนี่ยวนำสร้างสนามไฟฟ้าต่อไปเช่นกัน ทำให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีการแพร่กระจายออกไปเรื่อยๆ และค่อยๆ ถูกลดทอนด้วยตัวกลางจนหมดไป (ซึ่งในอุดมคติคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะต้องแพร่กระจายออกไปในฟรีสเปซได้เรื่อยๆ ไม่มีที่สิ้นสุด โดยไม่ถูกลดทอนด้วยตัวกลางเลย)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 แสดงรูปคลื่น (ก) คลื่น TEM (ข) คลื่น TE (ค) คลื่น TM

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกไปเป็นรูปทรงกลม (Spherical wave) เมื่อพิจารณาที่ระยะห่างไกลจากแหล่งกำเนิดคลื่นมากๆ พื้นที่เล็กๆ บนพื้นผิวทรงกลมสมมติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะกลายเป็นพื้นที่ระนาบแบน การพิจารณาสนามไฟฟ้า  $E$  และสนามแม่เหล็ก  $H$  บนพื้นผิวระนาบนี้จะทำมุมฉากซึ่งกันและกัน ฉะนั้น คลื่นรูปทรงกลมที่ระยะห่างออกไปจากแหล่งกำเนิดมากๆ จะกลายเป็นคลื่นระนาบ (Plane wave) และคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เป็นรูปทรงระนาบแบบนี้จะได้สนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กทำมุมฉากซึ่งกันและกัน โดยระนาบของสนามทั้งสองจะตั้งได้ฉากกับทิศทางการแพร่กระจายของคลื่นเองด้วย

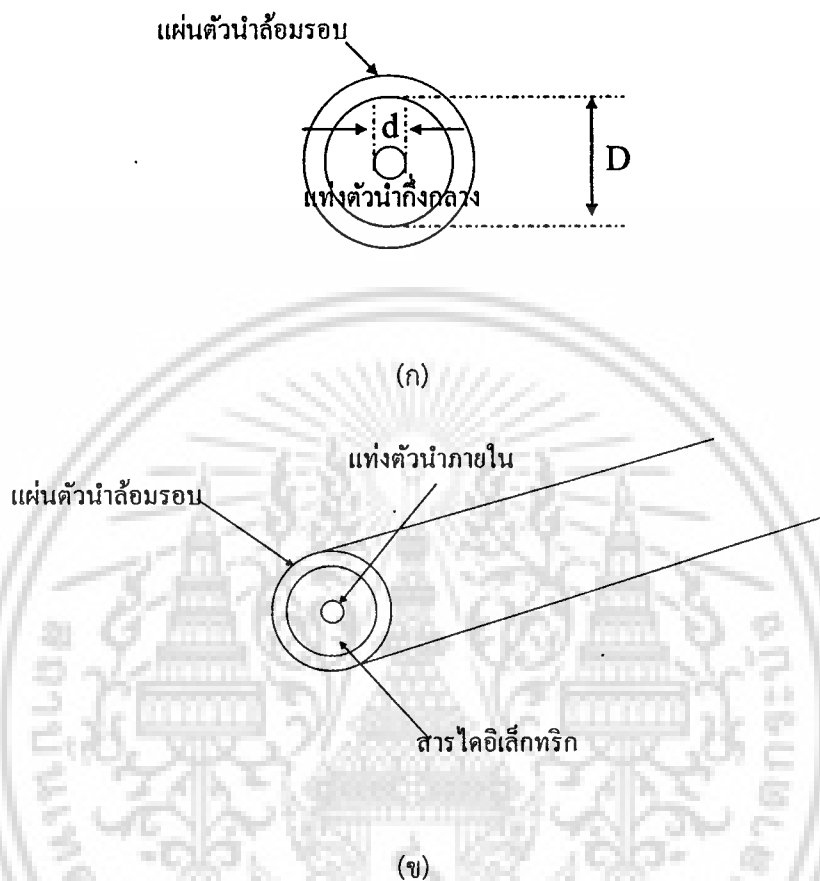
ขณะที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแพร่กระจายไปตามสายนำสัญญาณนั้น กลุ่มประจุและกระแสไฟฟ้าบนพื้นผิวของตัวนำของสายนำสัญญาณจะมีรูปแบบเป็นไปตามเงื่อนไขขอบเขต สำหรับ

โหมดในการแพร่กระจายคลื่นแบบสายนำสัญญาณแบบคู่ขนานที่เป็นโหมดหลัก (Principal mode) ก็คือ ทรานสเวอร์สอิเล็กโตรแมกเนติกเวฟ (Transverse electromagnetic wave) หรือจะเรียกว่า คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามขวางก็ได้ โดยที่โหมด (Mode) เป็นคำที่บอกลักษณะการเดินทางหรือการแพร่กระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งคลื่น TEM นี้จะเป็นคลื่นที่มีระนาบของคลื่นสนามแม่เหล็กและคลื่นสนามไฟฟ้ารูปไซน์วางอยู่ในลักษณะตามขวางกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.5 (ก) กรณีที่ขนาดความยาวคลื่นของสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้งานมีค่าใกล้เคียงกับขนาด (Dimension) ของสายหรือโถด จะทำให้เกิดโหมดการแพร่กระจายคลื่นที่แตกต่างกันมากขึ้น ซึ่งรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นต่างๆ กันนี้รวมเรียกว่าโหมดที่สูงกว่า หรือไฮเออร์โหมด (Higher mode) ไฮเออร์โหมดเป็นรูปแบบการแพร่กระจายของคลื่น ซึ่งมีความถี่สูงกว่าค่าความถี่เฉพาะที่มีชื่อเรียกว่าความถี่คัทออฟ (Cutoff frequency) ของสายนำสัญญาณ หรือเวฟไกด์ที่ใช้งาน สำหรับความถี่ต่ำสุด (Lowest frequency) และความยาวคลื่นสูงสุด หรือยาวที่สุด (Longest wavelength) ที่สามารถแพร่กระจายไปได้ในขนาดของสายนำสัญญาณหนึ่งๆ จะเป็นความถี่คัทออฟ (Cutoff frequency :  $f$ ) และความยาวคลื่นคัทออฟ (Cutoff wavelength :  $\lambda_{cutoff}$ ) ของสายนำสัญญาณนั้น รูปแบบการส่งคลื่นในลักษณะดังกล่าว จะเป็นโหมดต่ำสุด (Lowest mode) ในการส่งโดยมีชื่อเรียกโหมดนี้ว่า โหมดหลักของการแพร่กระจาย (Principal propagation mode) ส่วนไฮเออร์โหมด จะเป็นรูปแบบการส่งในโหมดที่สูงกว่า (เทียบกับโหมดหลัก) คลื่นที่แพร่กระจายในเวฟไกด์จะมี 2 โหมดคือ จะเป็นทรานสเวอร์สอิเล็กตริกเวฟ (Transverse electric wave : TE) หรือเรียกว่าคลื่นที่มีแนวสนามไฟฟ้าวางตามขวาง และทรานสเวอร์สแมกเนติกเวฟ (Transverse magnetic wave : TM) หรือเรียกว่าคลื่นที่มีแนวสนามแม่เหล็กวางตามขวาง ทรานสเวอร์สอิเล็กตริกเวฟ (สนาม H มีส่วนประกอบหรือเวกเตอร์ย่อยอยู่ในแกน x และ z ของสนาม E) แสดงไว้ตามรูปที่ 2.5 (ข) ส่วนทรานสเวอร์สแมกเนตริกเวฟ (สนาม E มีส่วนประกอบหรือเวกเตอร์ย่อยอยู่ในแกน x และ y ของสนาม H) แสดงไว้ตามรูปที่ 2.5 (ค)

## 2.6 สายโคแอกเซียล

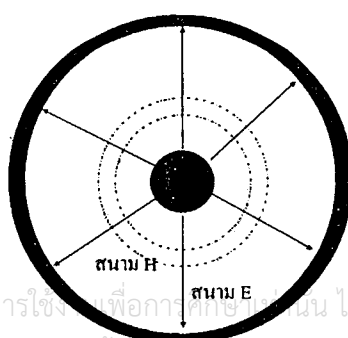
เมื่อความถี่ในการใช้งานสูงขึ้น การใช้สายคู่ขนานแบบเดิมไม่เหมาะสมจึงได้เปลี่ยนมาใช้สายอีกแบบหนึ่งมีชื่อว่า สายโคแอกเซียล สายโคแอกเซียลนี้จะประกอบด้วยตัวนำ 2 เส้นขนานกันเช่นเดิม แต่ตัวนำภายนอกจะเปลี่ยนรูปเป็นแผ่นตัวนำล้อมรอบแท่งตัวนำที่เหลือ ซึ่งวางในแนวศูนย์กลางใช้แกนร่วมกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.6 (ก) แท่งตัวนำภายในจะถูกจัดให้อยู่ในแนวศูนย์กลางได้ด้วยไดอิเล็กตริกสเปซเซอร์ ดังรูปที่ 2.6 (ข) หรือจะใช้สารไดอิเล็กตริกอัดแน่นเพื่อบังคับให้แท่งตัวนำ

วางตัวในแนวศูนย์กลาง ดังรูปที่ 2.6 (ค) ก็ได้สายโคแอกเชียลที่ใช้งานมีด้วยกันหลายแบบ แบ่งออกเป็นประเภทหลักๆ ได้ตามลักษณะรูปร่างภายนอก คือแบบ Flexible, Semi rigid และ Rigid



รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างสายอากาศ (ก) สายโคแอกเชียล (ข) แบบใช้โซลิตไดอิเล็กตริก

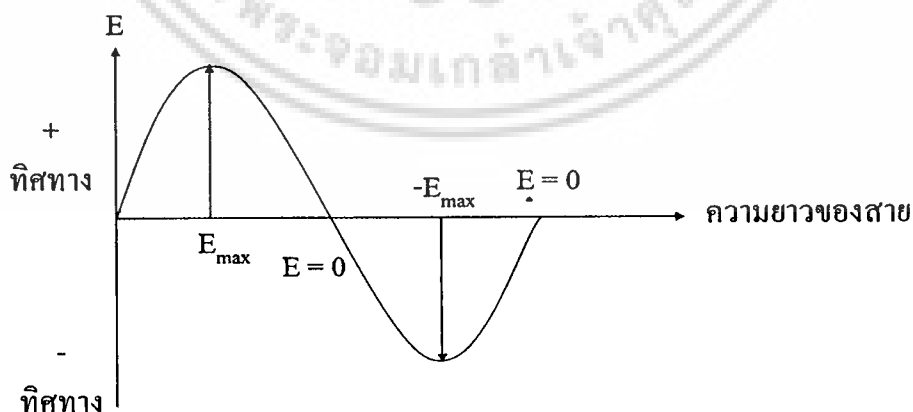
การส่งคลื่นในสายโคแอกเชียล สายโคแอกเชียลนั้นเป็นการดัดแปลงมาจากสายแบบคู่ขนานนั่นเอง ฉะนั้นมันจึงสามารถรับส่งคลื่นแบบ TEM ได้ และเรียกโหมดการส่งคลื่น TEM นี้ว่า โหมดหลัก (Principal mode) หรือโหมดเด่น (Dominant mode)



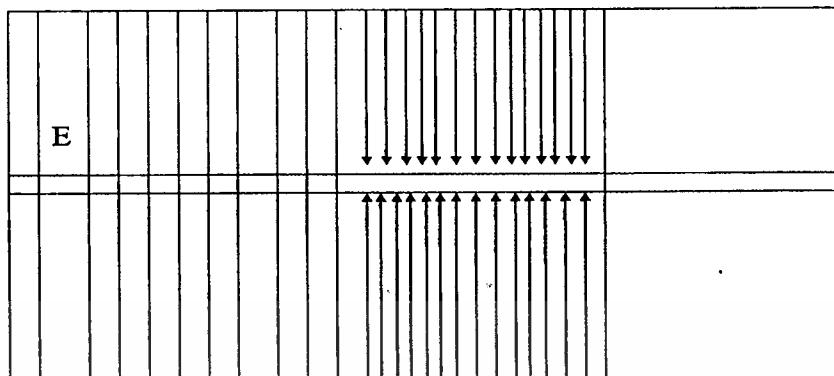
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้... ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
มองเจ้าทางปลาซสายโคแอกเชียล

### รูปที่ 2.7 แสดงการกระจายของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในสายโคแอกเซียล

การส่งกำลังไฟฟ้า (หรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า) ไปในสายโคแอกเซียลนั้นกระทำโดยอาศัยการเดินทางของคลื่นแรงดันและคลื่นกระแส ซึ่งเป็นผลให้เกิดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กขึ้นในสาย แสดงดังรูปที่ 2.7 เส้นทึบแสดงสนามไฟฟ้า เส้นประแสดงสนามแม่เหล็ก สนามไฟฟ้า  $E$  จะเกิดลักษณะเป็นรัศมีกระจายออกจากแท่งตัวนำศูนย์กลางภายในไปยังตัวนำภายนอกที่ล้อมรอบอยู่ และจากตัวนำภายนอกพุ่งเข้าสู่ตัวนำศูนย์กลางภายในสลับกันไป ส่วนสนามแม่เหล็ก  $H$  จะเกิดล้อมรอบแท่งตัวนำศูนย์กลางภายใน ทำมุมฉากกับสนามไฟฟ้า  $E$  สนามแม่เหล็กจะเกิดเป็นวงกลม มีศูนย์กลางร่วมกับตัวนำทั้งสองจากแท่งตัวนำภายในขยายออกเป็นวงกว้างไปสู่ตัวนำภายนอก ทิศทางการแพร่กระจายของคลื่นไปตามยาวของสายนั้น หากมาจากพอยน์ติงเวกเตอร์ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะแพร่กระจายไปตามที่ว่างระหว่างตัวนำทั้งสองโดยที่ความเข้มของสนามไฟฟ้าขึ้นกับความต่างศักย์ของแรงดันไฟฟ้าระหว่างตัวนำภายในและตัวนำภายนอก ส่วนความเข้มของสนามแม่เหล็กขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสที่ไหลผ่านตัวนำ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ TEM นี้ประกอบจากคลื่นสนามไฟฟ้าและคลื่นสนามแม่เหล็กที่เป็นรูปไซน์ ดังนั้น สนาม  $E$  และสนาม  $H$  จึงกลับทิศทางทุกๆ ครึ่งความยาวคลื่น ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.8



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 แสดงทิศทางสนาม E และ H ที่แพร่กระจายไปตามสายโคแอกเซียล

สำหรับค่าความยาวคลื่นของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เดินทางไปตามสายนั้น จะขึ้นอยู่กับค่าความถี่ของมันเอง และค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของสารไดอิเล็กตริก ระหว่างตัวนำทั้งสอง

สายโคแอกเซียลนั้นไม่มีข้อจำกัดเกี่ยวกับความถี่ที่ใช้งานได้ ดังนั้นสายโคแอกเซียลซึ่งทำงานในโหมดหลักหรือโหมด TEM จึงถือเป็นอุปกรณ์ที่ใช้งานในแถบความถี่กว้าง หรืออุปกรณ์บรอดแบนด์ (Broadband device) และค่าความยาวคลื่นของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสายโคแอกเซียล คำนวณได้จากสมการที่ (2.1)

$$\lambda_{\text{eff}} = \frac{c}{f \sqrt{\epsilon_{r,\text{tissue}}}} \quad (2.1)$$

จากสมการจะเห็นว่า ถ้าสารไดอิเล็กตริกที่ใช้ในสายเป็นอากาศ ค่าความยาวคลื่นจะไม่เปลี่ยนแปลง คือเท่ากับค่าความยาวคลื่นในฟรีสเปซ

## 2.7 หลักการถ่ายเทความร้อน (Principle of heat transfer) [11]

คือการที่ความร้อนเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งได้ 3 วิธีด้วยกัน คือ การนำ การพา และการแผ่รังสี การเคลื่อนที่ของความร้อนทั้ง 3 วิธีนี้จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิเกิดขึ้นแต่กลไกในการที่จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของความร้อนแต่ละวิธีแตกต่างกันซึ่งครีบรรยายความร้อนโดยวิธีการพา และมีอากาศเป็นสารตัวกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.1 การนำความร้อน (Conduction) คือวิธีการที่ความร้อนเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงกว่าไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำภายในตัวกลางเดียวกัน หรือเป็นการเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างตัวกลางที่ติดกัน แต่มีอุณหภูมิต่างกัน ในการนำความร้อนความร้อนจะเคลื่อนที่ผ่านโมเลกุลของสาร โดยที่โมเลกุลไม่เคลื่อนที่ การนำความร้อนจะเกิดได้ดีมากในตัวกลางที่เป็นของแข็ง

2.7.2 การพาความร้อน (Convection) คือวิธีการที่ความร้อนเคลื่อนที่ระหว่างผิวของของแข็งและของไหล ของไหลจะเป็นตัวพาความร้อนมาให้ หรือพาความร้อนออกจากผิวของของแข็ง กลไกที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการพาได้นั้น เกิดจากผลรวมของการนำความร้อน การสะสมพลังงานและการเคลื่อนที่ของการไหล

2.7.3 การแผ่รังสีความร้อน (Radiation) คือการที่ความร้อนเคลื่อนที่ได้โดยมิต้องอาศัยตัวกลางดังเช่นในการนำและการพา ในการแผ่รังสีความร้อนจะเคลื่อนที่ได้ดีในสุญญากาศ

## 2.8 สมการการพาและการนำ (Convection and Conduction) [12]

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q - \rho C_p u \cdot \nabla T \quad (2.2)$$

$\rho$  = ความหนาแน่น [Pa]

$C_p$  = Heat Capacity at Constant Pressure

$T$  = อุณหภูมิ [ $^{\circ}$ C]

$t$  = เวลา [s]

$k$  = Thermal conductivity

$Q$  = Spatial heat source (Microwave)

$u$  = Velocity [m/s]

## 2.9 สมการความร้อนในทางชีววิทยา (The Bio-heat Equation)

ในการวิเคราะห์ด้วยความถี่ไมโครเวฟได้พิจารณาถึงสนามไฟฟ้า สนามแม่เหล็ก และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในเนื้อเยื่อปอด การดูดซับความร้อนที่เกิดขึ้นในเนื้อเยื่อปอด ซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปแบบของสมการ หรือตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลต่อการกระจายความร้อน ในปอดแสดงดังสมการที่ (2.3)

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k \cdot \nabla T) - h_b C_b \omega_b (T_b - T) + Q_m + Q_{ext} \quad (2.3)$$

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

$\rho$  = ความหนาแน่นจำเพาะของเนื้อเยื่อ ( $\text{kg/m}^3$ )

$c$  = ค่าความจุความร้อนจำเพาะของเนื้อเยื่อ ( $\text{J/kg.K}$ )

$k$  = ค่าความนำความร้อนของเนื้อเยื่อ ( $\text{W/m.K}$ )

$h_b$  = สัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากเลือดที่ไหลซึมอยู่ในเนื้อเยื่อ

$\rho$  = ความหนาแน่นเลือด ( $\text{kg/m}^3$ )

$C_b$  = ค่าความร้อนจำเพาะของเลือด ( $\text{J/kg.K}$ )

$\omega_b$  = อัตราฉีดเลือด ( $1/\text{s}$ )

$T_b$  = ค่าอุณหภูมิเลือด ( $37^\circ\text{C}$ )

$Q_m$  = ค่าความร้อนจากกระบวนการเมตาโบลิซึมของเม็ดเลือด ( $\text{W/m}^3$ )

$Q_{ext}$  = ค่าความร้อนจากภายนอก ( $\text{W/m}^3$ )

จากสมการ Bioheat (2.3) ที่นำมาใช้ในงานวิจัยฉบับนี้ ได้ละทิ้งค่าตัวแปรจำนวน 2 ตัว คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากเลือดที่ไหลซึมอยู่ในเนื้อเยื่อ ( $h_b$ ) และพลังงานที่สร้างขึ้นโดยกระบวนการเมตาโบลิซึมของเม็ดเลือด ( $Q_m$ ) ซึ่งค่าตัวแปรทั้ง 2 นี้ จะถือว่ามีความน้อยมาก เมื่อเทียบกับปริมาณ  $Q_{ext}$

### 2.9.1 สมการการดูดซับความร้อน

พิจารณาจาก สนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก ที่มีการแพร่กระจายลงเนื้อเยื่อปอด จะเกิดการสูญเสียพลังงานในเนื้อเยื่อปอด ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของสมการ ดังสมการที่ (2.4)

$$SAR = \frac{1}{\rho} Q_{ext} = \frac{\sigma}{\rho} |E|^2 \quad (2.4)$$

เมื่อ

SAR = Specific absorption rate ( $\text{W/kg}$ )

$Q_{ext}$  = ค่าความร้อนที่เกิดขึ้นจากภายนอกเนื้อเยื่อ ( $\text{W/m}^3$ )

$\sigma$  = สภาพความนำไฟฟ้าของเนื้อเยื่อ ( $\text{S/m}$ )

$\rho$  = ความหนาแน่นจำเพาะ ( $\text{kg/m}^3$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.10 กระบวนการแก้ปัญหา

การวิเคราะห์ปัญหาต่างๆ ทางวิศวกรรม ไม่ว่าจะ เป็นปัญหาทางด้านกลศาสตร์ของแข็ง (Solid Mechanics) เช่น การหาค่าความเค้นในโครงสร้างและชิ้นงานกลใดๆ หรือจะเป็นปัญหาทางด้านการถ่ายเทความร้อน เช่น การหาการกระจายของอุณหภูมิในครีบบระบายความร้อนของหม้อแปลงและมอเตอร์ไฟฟ้า หรือจะเป็นปัญหาทางด้านการไหล เช่น การไหลของอากาศในห้องปรับอากาศ หรือจะเป็นปัญหาในศาสตร์อื่นๆ ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์ปัญหาเหล่านี้ ขึ้นอยู่กับปัจจัยหรือองค์ประกอบใหญ่ๆ 3 องค์ประกอบ กล่าวคือ ระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial differential equations) ที่อธิบายความจริงของปัญหานั้น เงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions) สำหรับปัญหาที่ทำการศึกษา และลักษณะรูปร่าง (Geometry) ของปัญหานั้น ทั้ง 3 องค์ประกอบนี้ หากองค์ประกอบใดองค์ประกอบหนึ่งเปลี่ยนแปลงไป ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นก็จะเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ความเข้าใจโดยลึกซึ้งในองค์ประกอบทั้งสามนี้มีความจำเป็นอย่างยิ่งต่อการวิเคราะห์ปัญหาด้วยการคำนวณ ความสำคัญในแต่ละองค์ประกอบที่จำเป็นต้องทำความเข้าใจสามารถอธิบายในภาพรวมได้ดังต่อไปนี้

### 2.10.1 สมการเชิงอนุพันธ์ย่อย

ปัญหาในงานวิศวกรรมต่างมีความลึกซึ้งของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่แตกต่างกันออกไป สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยสามารถจัดได้ว่าเป็นหัวใจซึ่งแสดงถึงความจริงที่เกิดขึ้นในปัญหานั้นๆ ยกตัวอย่างเช่น การวิเคราะห์ปัญหาการกลศาสตร์ของแข็งนั้นจำเป็นต้องเริ่มจากระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่อธิบายความสมดุลของแรงใน 3 ทิศทางซึ่งจำเป็นต้องถูกต้องอยู่เสมอไม่ว่าจะเป็นที่ตำแหน่งใดๆ ในปัญหานั้น การวิเคราะห์ปัญหาการถ่ายเทความร้อนจำเป็นต้องเริ่มจากสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่อธิบายความสมดุลของการถ่ายเทความร้อน หรือการวิเคราะห์ปัญหาการไหลนั้นจำเป็นต้องเริ่มจากระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่แสดงถึงการอนุรักษ์มวล โมเมนตัม และพลังงาน เป็นต้น สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยเหล่านี้ล้วนประกอบด้วยพจน์ต่างๆ ที่อยู่ในรูปแบบเชิงอนุพันธ์ (Derivative terms) ซึ่งใช้สัญลักษณ์คล้าย “เลขหกกลับทาง” ยกตัวอย่างเช่น ระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของการไหลแบบหนืดภายใต้สภาวะอยู่ตัวสองมิติ โดยคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ

## 2.11 ไฟไนต์เอลิเมนต์และองค์ประกอบความรู้ที่จำเป็น

ศักยภาพของโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้คำนวณพลศาสตร์ของการไหล มักทำให้ผู้วิเคราะห์เข้าใจว่าสามารถใช้โปรแกรมเพื่อหาผลลัพธ์ของการไหลสำหรับปัญหาใดๆ ได้โดยง่าย ในความเข้าใจจริงนั้น เนื่องจากโปรแกรมเหล่านี้ตั้งอยู่บนความรู้ทางคณิตศาสตร์และขั้นตอนการคำนวณที่ค่อนข้างลึกซึ้ง ผู้ที่จะสามารถใช้โปรแกรมเหล่านี้ได้ถูกต้องอย่างมีประสิทธิภาพจำเป็นต้องมีความรู้ที่เพียงพอ องค์ประกอบของความรู้ที่ต้องการนี้อาจจำแนกออกเป็น 5 ประการ คือความรู้ในระบบสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เชิงอนุพันธ์ย่อย (Set of partial differential equation) และความเข้าใจความหมายทางกายภาพ (Physical meaning) ของสมการเหล่านี้ความรู้ในระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical methods) ความรู้ในระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method) ความรู้พื้นฐานในการประดิษฐ์โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในส่วนของวิเคราะห์ และประสบการณ์ในการใช้เครื่องคอมพิวเตอร์

ความรู้ทั้ง 5 ประการดังกล่าวข้างต้น จะช่วยให้ผู้ใช้โปรแกรมเกิดความเข้าใจในกระบวนการแก้ปัญหาและมั่นใจผลลัพธ์ที่คำนวณได้ พื้นฐานความรู้ทั้ง 5 ประการนี้สามารถอธิบายในภาพรวมได้ดังนี้

1. ความรู้ในระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย โปรแกรมคอมพิวเตอร์ทางด้านการคำนวณ พลศาสตร์ของการไหล ล้วนตั้งอยู่บนการแก้ระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยระบบใดระบบหนึ่งที่กำหนดให้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาว่าโปรแกรมคอมพิวเตอร์นั้นถูกสร้างมาเพื่อแก้ปัญหาของการไหลที่ครอบคลุม (Governed) ด้วยระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยประเภทใด นอกจากนั้น ความเข้าใจทางกายภาพในแต่ละพจน์ของระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยนั้น ก็มีความสำคัญมากเช่นกันในการบ่งบอกศักยภาพ (Capability) และขอบเขตจำกัด (Limitation) ของโปรแกรมเอง พจน์ต่างๆในระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยนี้ยังบ่งบอกต่อไป การแก้ปัญหาด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์นี้ต้องการความลึกซึ้งของระเบียบวิธีการคำนวณมากน้อยเพียงใด และเป็นผลต่อเนื่องต่อเวลาที่ใช้ในการคำนวณปัญหานั้นๆ อย่างไร ดังนั้นความเข้าใจในระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยจึงมีความสำคัญที่จำเป็นต้องทำความเข้าใจก่อนลงมือใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์นั้น

2. ความเข้าใจในระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในปัจจุบันได้กลายมาเป็นวิชาบังคับในการเรียนวิศวกรรมศาสตร์หลายสาขานั้น เป็นความรู้พื้นฐานและองค์ประกอบหนึ่งที่สำคัญสำหรับการคำนวณ ความรู้พื้นฐานในระเบียบวิธีเชิงตัวเลขนี้ประกอบด้วย ความรู้ของฟังก์ชันของการประมาณภายใน (Interpolation functions) การดิฟเฟอเรนเชียลและการอินทิเกรตเชิงตัวเลข (Numerical differentiations and integrations) ความรู้พื้นฐานในการแก้สมการเชิงอนุพันธ์สามัญ (Ordinary differential equations) รวมทั้งสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial differential equations) และที่สำคัญที่สุดคือความรู้ในระเบียบวิธีต่างๆ ที่ใช้แก้ระบบสมการพีชคณิต (System of algebraic equations)

3. ความรู้ในระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การวิเคราะห์ปัญหาใดๆ ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นนั้นขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลัก 3 ประการ คือ ระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่ครอบคลุมปัญหานั้น เงื่อนไขขอบเขต และลักษณะรูปร่างปัญหานั้น ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นระเบียบวิธีที่ตอบสนองทำให้องค์ประกอบหลักทั้งสามที่ต้องการนี้มีความสมบูรณ์ [23]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

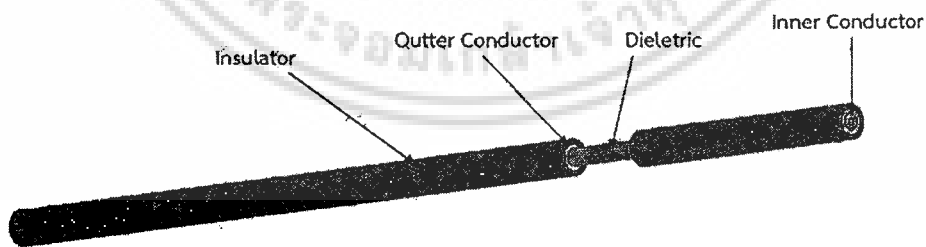
### วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาออกแบบสายอากาศไมโครเวฟชนิดบอลูนสำหรับการบำบัดรักษาในเนื้อเยื่อที่ผิดปกติแคบโรคต่อมลูกหมากโตโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ บทนี้เป็นวิธีดำเนินการวิจัยโดยจะกล่าวถึงการออกแบบโครงสร้างของสายอากาศที่ใช้ในการวิจัย แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ การทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศ รายละเอียดค่าพารามิเตอร์และคุณสมบัติทางไฟฟ้า และการจัดเตรียมการทดลองเพื่อยืนยันความถูกต้องของผลที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์

#### 3.1 การออกแบบ

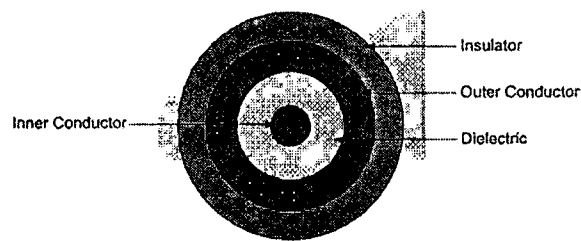
##### 3.1.1 โครงสร้างสายอากาศพื้นฐาน

ต่อไปจะแสดงโครงสร้างของสายอากาศ โดยสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ทางผู้วิจัยวาดโครงสร้างของสายอากาศด้วยโปรแกรม SolidWorks (Version 2013) แล้วส่งออกสายอากาศในรูปแบบ IGES เข้าสู่โปรแกรม COMSOL Multiphysics (Version 3.5) เพื่อใช้ในการกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ และจำลองการทำงานด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ รูปที่ 3.1



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

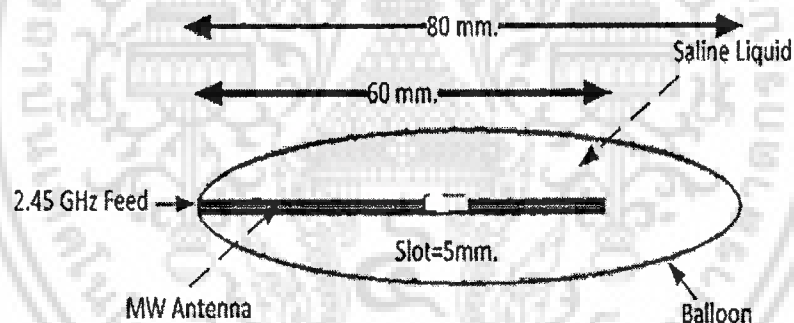


(ข)

รูปที่ 3.1 แบบจำลองสายอากาศด้วยคอมพิวเตอร์ (ก) สายอากาศ (ข) ภาพตัดขวางของสายอากาศ

### 3.1.2 โครงสร้างสายอากาศที่ออกแบบ

สายอากาศนี้จะถูกห่อหุ้มด้วยซิลิโคนรูปวงรีทรงบอลูน บอลูนนี้เป็นพองเต็มไปด้วยน้ำเกลือ สายอากาศนี้จะแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 โครงสร้างขนาดสายอากาศที่ห่อหุ้มด้วยบอลูน

จากรูปที่ 3.2 แสดงโครงสร้างขนาดของสายอากาศที่ใช้ในการวิเคราะห์ โดยผู้วิจัยจะทำการออกแบบสายอากาศชนิดบอลูน ผู้วิจัยต้องการออกแบบให้บริเวณการกระจายความร้อนได้ทั่วบริเวณภายในบอลูน เนื่องจากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมา พบว่าคลื่นไมโครเวฟจะแผ่ออกบริเวณรอยต่อ (Junction) มากที่สุด และโครงสร้างของสายอากาศจะสัมผัสกับเนื้อเยื่อโดยตรง โดยมีรายละเอียดของสายอากาศที่ออกแบบตามตารางที่ 3.1

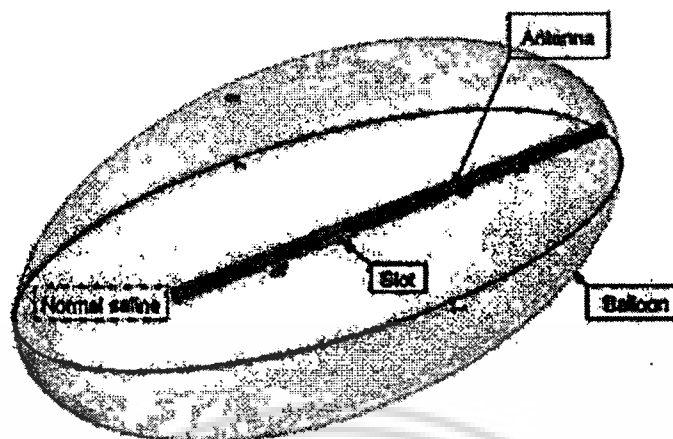
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดของขนาดของสายอากาศ

พารามิเตอร์	ขนาดของสายอากาศ(มิลลิเมตร)
เส้นผ่าศูนย์กลางของตัวนำนอก (Silver Plated Copper Clad Steel)	1.34
เส้นผ่าศูนย์กลางไดอิเล็กทริก (Solid PTFE)	0.85
เส้นผ่าศูนย์กลางของตัวนำใน (Silver Plated Copper Clad Steel)	0.32
เส้นผ่าศูนย์กลางนวมหุ้มด้านนอก (PTFE)	1.78
ความยาวของสายอากาศ	60
ความยาวของสล็อต	5
ความยาวของปลายสล็อตกับบอลลูน	20
เส้นผ่านศูนย์กลางของบอลลูน (long)	80
Ellipse shape (wide)	40

### 3.1.3 โครงสร้างแบบบอลลูนที่ใช้ในการวิเคราะห์

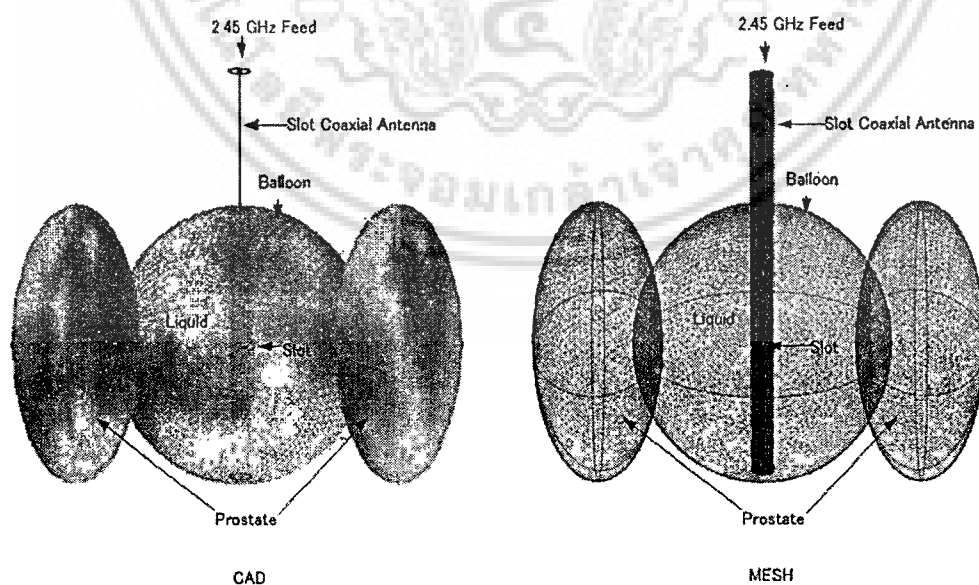
ในงานวิจัยนี้เรามุ่งเน้นในการออกแบบสายอากาศบอลลูนไมโครเวฟโดยใช้สายอากาศแบบสล็อต ชนิดบอลลูนมีด้วยของเหลวที่จะนำความร้อนจากพลังงานไมโครเวฟไปยังเนื้อเยื่อ



รูปที่ 3.3 โครงสร้างแบบจำลองบอลูน

### 3.1.4 การพัฒนาการวิเคราะห์สายอากาศชนิดบอลูน

งานวิจัยนี้เรามุ่งเน้นการพัฒนาในการออกแบบสายอากาศบอลูนไมโครเวฟโดยใช้สายอากาศแบบสลิต ชนิดบอลูนมีของเหลวที่จะนำความร้อนจากพลังงานไมโครเวฟไปยังเนื้อเยื่อทางผู้วิจัยเองได้วิเคราะห์เพิ่มเติมในของเนื้อเยื่อที่ต้องการทำลายบริเวณข้างเคียง ดังแสดงในรูปที่ 3.4

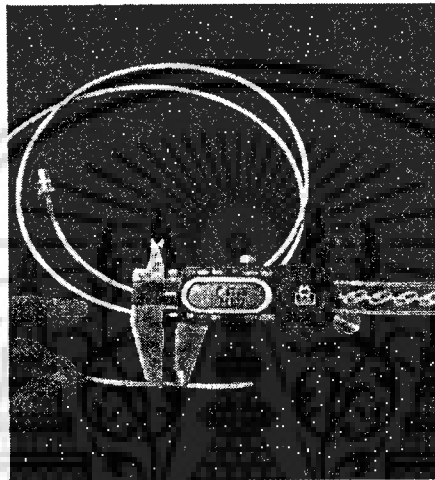


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### รูปที่ 3.4 การพัฒนาการวิเคราะห์สายอากาศชนิดบอลูน

#### 3.2 คุณสมบัติของสายอากาศ

สายอากาศที่ได้ทำการออกแบบข้างต้น ได้ทำการออกแบบจากสายอากาศจริง โดยสายอากาศถูกสร้างขึ้นจากสายนำสัญญาณในย่านความถี่ไมโครเวฟ ซึ่งเป็นสายนำสัญญาณโคแอกเซียล ดังแสดงในรูปที่ 3.4



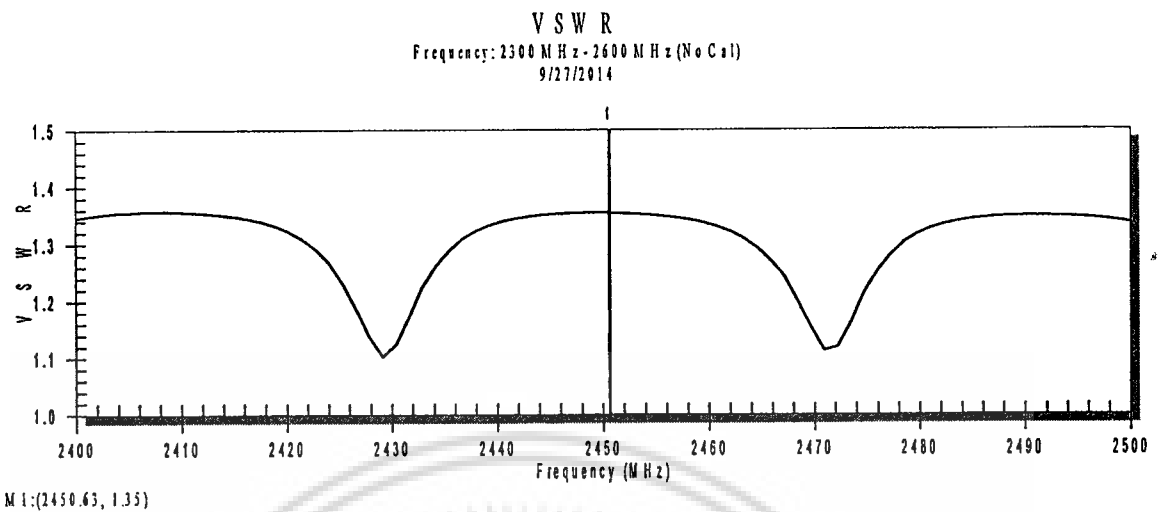
รูปที่ 3.5 สายอากาศ

หลังจากที่สร้างสายอากาศแล้ว นำสายอากาศที่สร้างขึ้นนำไปทดสอบคุณสมบัติด้านการใช้งานในความถี่ไมโครเวฟ 2.45 GHz ด้วยเครื่องวัดคุณสมบัติสายอากาศ ยี่ห้อ Bird Site Analyzer® Model SA-6000EX รูปที่ 3.5

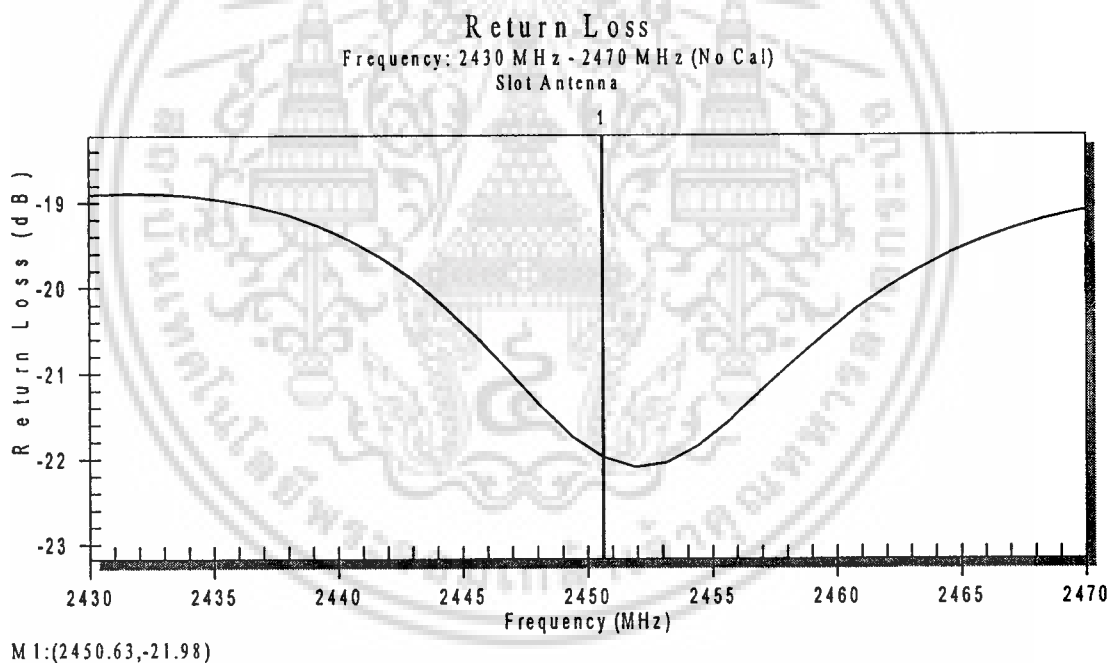


รูปที่ 3.6 เครื่องวัดคุณสมบัติสายอากาศ Bird Site Analyzer® Model SA-6000EX

ในลำดับต่อไปจะแสดงผลที่ได้จากเครื่องมือวัดคุณสมบัติสายอากาศ โดยแสดงผลในย่านความถี่ 2,430-2,470 MHz และเราจะสนใจที่ความถี่ใช้งานที่ 2.45 GHz ของสายอากาศ โดยจะวัดคุณสมบัติของสายอากาศ คือ VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) หรืออัตราส่วนที่คลื่นส่งไปต่อคลื่นสะท้อนกลับ ค่า VSWR ที่ได้ต้องไม่เกิน 1:5 (ยิ่งเข้าใกล้ 1 ยิ่งดี แสดงถึงการส่งผ่านได้ดี สะท้อนกลับน้อย) และค่า Return Loss ค่าที่ได้ต้องต่ำกว่า -20 dB (ยิ่งติดลบยิ่งดี เนื่องจากยิ่งสะท้อนกลับน้อย แสดงว่าคลื่นส่งผ่านไปได้ดี) แสดงรายละเอียดได้ดังรูปกราฟที่ 3.6 และ รูปกราฟที่ 3.7



รูปที่ 3.7 กราฟแสดงค่า VSWR ของสายอากาศแบบบอลูน ในย่านความถี่ 2,430-2,470 MHz



รูปที่ 3.8 กราฟแสดงค่า Return Loss ของสายอากาศแบบบอลูน ในย่านความถี่ 2,430-2,470 MHz

จากรูปที่ 3.6 และ 3.7 แสดงค่าคุณสมบัติของสายอากาศในรูปแบบ VSWR และ Return Loss ของสายอากาศทั้ง 3 แบบ ซึ่งจากกราฟเป็นผลจากการวัดคุณสมบัติที่ได้จากเครื่องวัดคุณสมบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศ Bird Site Analyzer® Model SA-6000EX สายอากาศที่ทำการทดสอบค่า VSWR และ Return Loss ที่ความถี่ไมโครเวฟที่ใช้งาน 2.45 GHz สายอากาศ โดยสายอากาศมีค่า VSWR เท่ากับ 1.35 และ Return Loss เท่ากับ -21.98 dB ซึ่งเมื่อพิจารณาจะพบว่าสายอากาศที่ใช้มีค่า VSWR และ Return Loss ที่ต่ำมาก เมื่อนำไปใช้งานจะมีค่าของการส่งผ่านพลังงานได้ดี

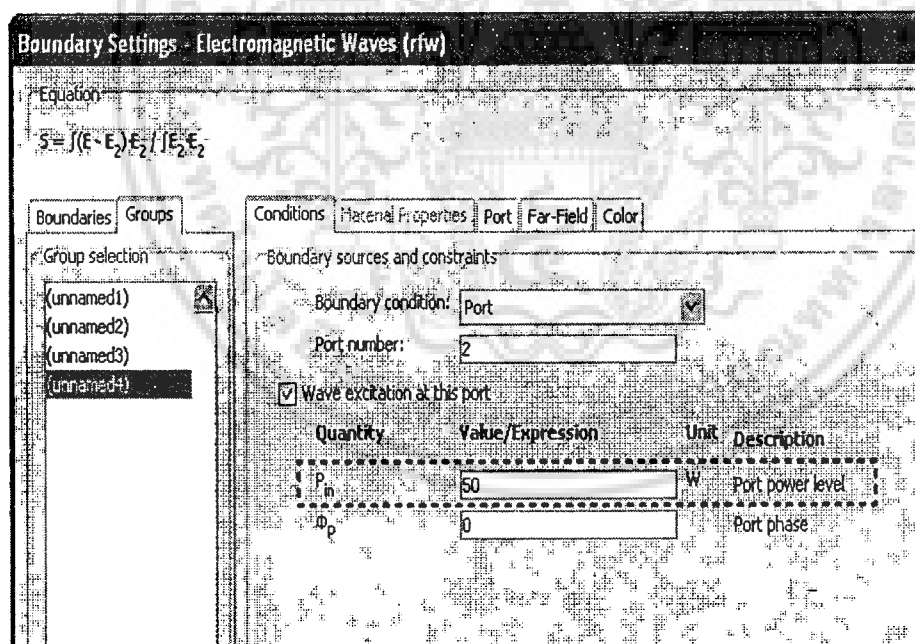
### 3.3 แบบจำลองสายอากาศทางไฟไนต์เอลิเมนต์

ในการจำลองการทำงาน เราใช้การจำลองการทำงานด้วยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรม Comsol Multiphysic (version 3.5) บนระบบปฏิบัติการ 64 บิต การจำลองการทำงาน ประกอบด้วยโมดูล 2 โมดูล คือ

Heat Transfer (Bioheat equation)

Electromagnetic (RF Module)

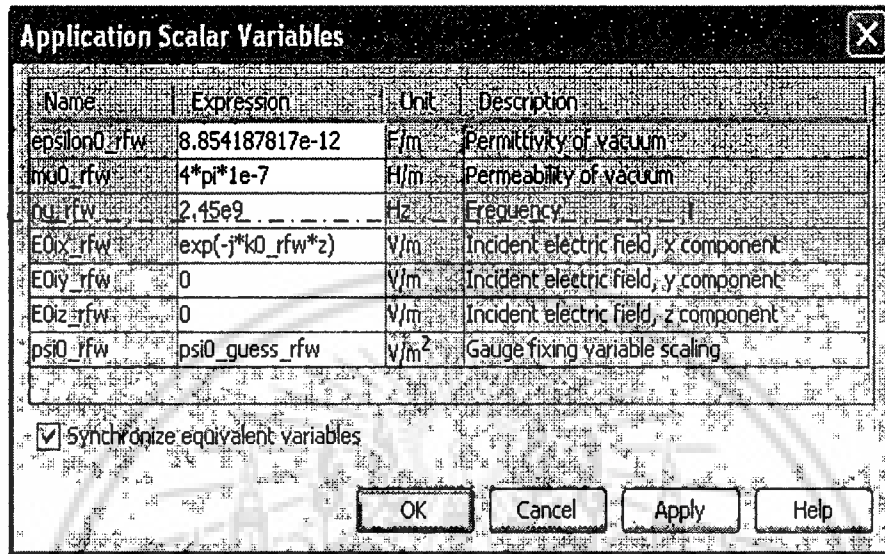
ตัวอย่างของการกำหนดค่าพลังงานให้กับ Port แสดงได้ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.9 แสดงการกำหนดพลังงานให้กับ Port

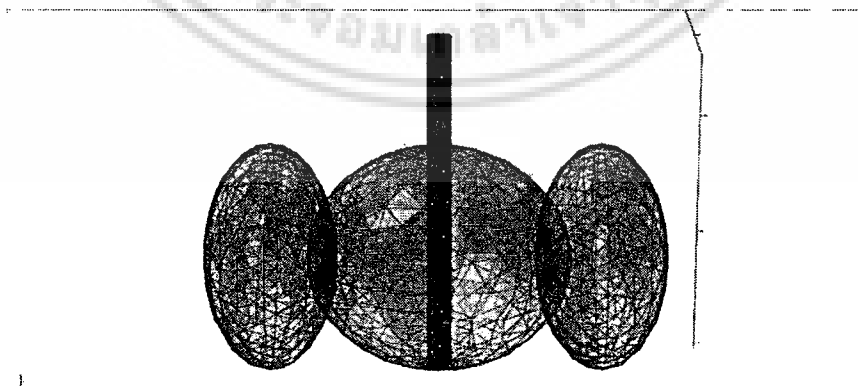
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากกำหนดขนาดของกำลังงานที่ใส่ให้กับขอบเขต ที่เป็น PORT เรียบร้อยแล้ว ต่อไปเป็นการกำหนดความถี่ไมโครเวฟ 2.45 GHz โดยกำหนดที่ Application Scalar Variable แสดงได้ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.10 แสดงการกำหนดความถี่ 2.45 GHz ให้กับ Electromagnetic Module รายละเอียดการกำหนดค่าขอบเขตเงื่อนไขต่างๆ นอกเหนือจากนี้สามารถดูรายละเอียดเพิ่มเติมในเอกสารอ้างอิง

ในการคำนวณผลลัพธ์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ เมื่อนำไฟล์ที่สร้างรูปทรงจากโปรแกรมวาดรูปทรง 3 มิติ เป็นที่เรียบร้อยแล้ว เราจะใช้โปรแกรม Comsol ในการแบ่งชิ้นงานออกเป็นย่อยๆ ที่เรียกว่า เอลิเมนต์ แสดงดังรูปที่ 3.11



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### รูปที่ 3.11 แบบจำลองสายอากาศทางไฟไนต์เอลิเมนต์

รูปที่ 3.11 แสดงแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของสายอากาศ แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบด้วย ชุดสายอากาศ และเนื้อเยื่อ โดยสายอากาศจะวางอยู่บริเวณต่อมลูกหมากที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง ส่วนของสายอากาศจะถูกแบ่งออกเป็นชั้นย่อยๆ ด้วยเอลิเมนต์ที่มีรูปแบบเป็นสามเหลี่ยมขนาดของเอลิเมนต์สายอากาศที่ใช้มีขนาดอยู่ในช่วง 0.01-1 มิลลิเมตร ในส่วนของเอลิเมนต์ในเนื้อเยื่อต่อมลูกหมากมีการกระจายของขนาดเอลิเมนต์ โดยบริเวณรอบๆสายอากาศจะมีขนาดเอลิเมนต์ที่เล็ก ส่วนบริเวณที่ห่างออกจากสายอากาศจะมีขนาดเอลิเมนต์ใหญ่ขึ้น เพื่อลดขนาดหน่วยความจำของเครื่องในการจำลองการทำงาน ขนาดของเอลิเมนต์ของเนื้อเยื่อมีขนาดอยู่ในช่วง 0.1-1 มิลลิเมตร

โดยโครงสร้างรูปแบบ IGES ไปยังโปรแกรม Comsol Multiphysic Version 3.5a เพื่อทำการใส่ Boundary และค่าคงที่ต่างๆที่ใช้ในการจำลองการทำงาน รายละเอียดของพารามิเตอร์ของการ Simulation แสดงได้ดังนี้

รายละเอียดค่าพารามิเตอร์ ต่างๆแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดของค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารละลาย

Density of saline	950 [kg/m <sup>3</sup> ]
Specific heat of Normal saline	42 [J/kg.K]
Thermal conductivity of Normal saline	0.53 [S /m]
Electrical conductivity of Normal saline	0.05 [S/ m]
Relative permittivity of Normal saline	60
Relative permittivity of dielectric	2.03
Relative permittivity of insulator	2.6
Density of Prostate	1045 [kg/m <sup>3</sup> ]
Specific heat of Prostate	3760 [J/kg.K]
Thermal conductivity of Prostate	0.51 [S /m]
Electrical conductivity of Prostate	0.91 [S/ m]
Relative permittivity of Normal Prostate	75.60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

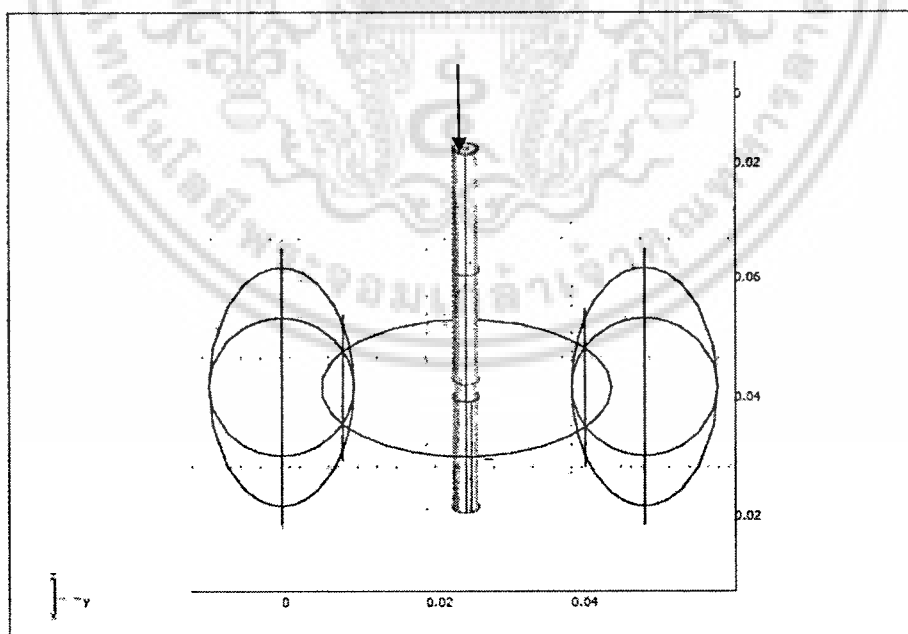
ตารางที่ 3.3 สรุปจำนวนเอลิเมนต์ของสายอากาศที่ใช้แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์

Configuration	(elements)
Antenna	184,854

รายละเอียดจำนวนเอลิเมนต์จะสัมพันธ์กับความซับซ้อนของโครงสร้าง และการจัดวางสายอากาศ และจะใช้หน่วยความจำในการประมวลผลที่มากกว่าแบบจำลองที่มีเอลิเมนต์น้อยๆ ดังนั้นในการประมวลผลจำเป็นจะต้องคำนึงถึงจำนวนเอลิเมนต์ เพื่อจัดสรรหน่วยความจำให้เพียงพอ และจำนวนเอลิเมนต์ยิ่งมาก แสดงถึงมีความละเอียดมากขึ้นด้วย

### 3.4 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition)

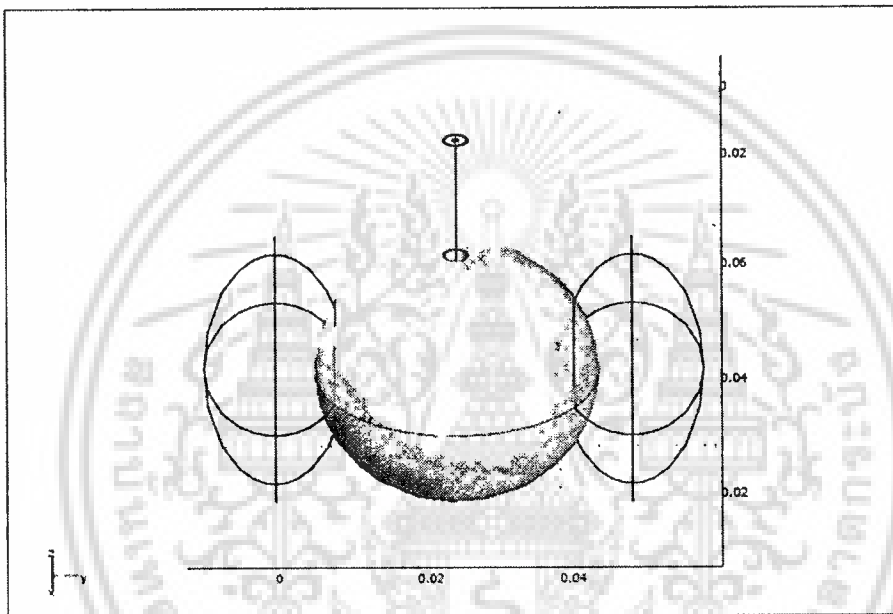
ในการกำหนดขอบเขตของการกำหนดเงื่อนไข ในระบบไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ การทำลายเซลล์มะเร็ิงด้วยคลื่นไมโครเวฟ ทำการกำหนดเงื่อนไขของขอบเขตของโมดูล เพื่อกำหนดรายละเอียดที่ใช้ในการคำนวณด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ มีรายละเอียดดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

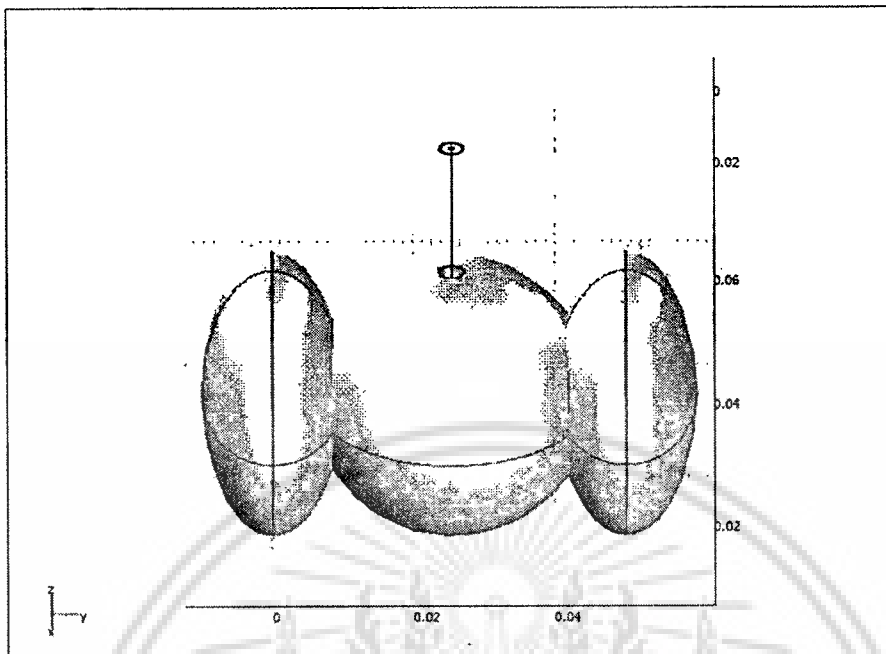
### รูปที่ 3.12 แสดงเงื่อนไขขอบเขตของ Port ในการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

จากรูปที่ 3.12 ส่วนของ Port ในโปรแกรม COMSOL ใช้เพื่อกำหนดรูปแบบของการรับสัญญาณเข้าในรูปแบบต่างๆ และกำหนดระดับพลังงานที่ป้อน และยังสมารถที่จะกำหนดเฟสของสัญญาณที่เข้ามาได้อีกด้วย โดยในการกำหนดค่าที่ใช้ในการจำลองการทำงาน กำหนดรูปแบบของ Port เป็น coaxial โดยมีกำลังงาน 50 วัตต์



### รูปที่ 3.13 แสดงเงื่อนไขขอบเขตของบอลลูนในการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



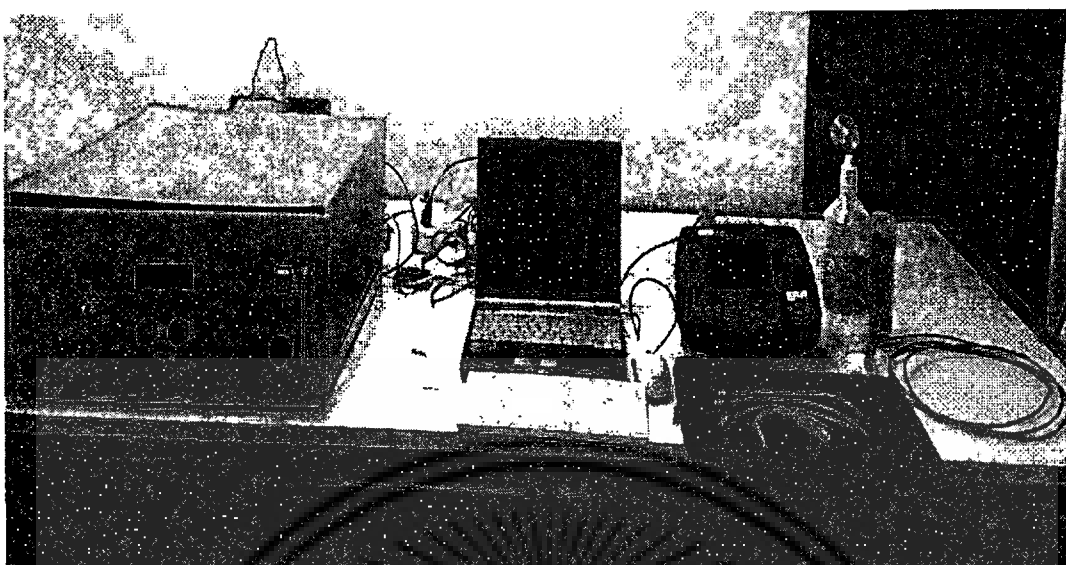
รูปที่ 3.14 แสดงเงื่อนไขขอบเขตของเนื้อเยื่อในการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

จากรูปที่ 3.14 ขอบเขตจุดที่คลื่นไมโครเวฟออกจากสายอากาศ โดยคลื่นจะออกบริเวณ Slot เพื่อกระจายความร้อนภายในบอลลูน

### 3.5 การจัดเตรียมการทดลอง (Experiment Setup)

#### 3.5.1 การเตรียมการทดลองสายอากาศชนิดบอลลูนที่ได้จากการวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



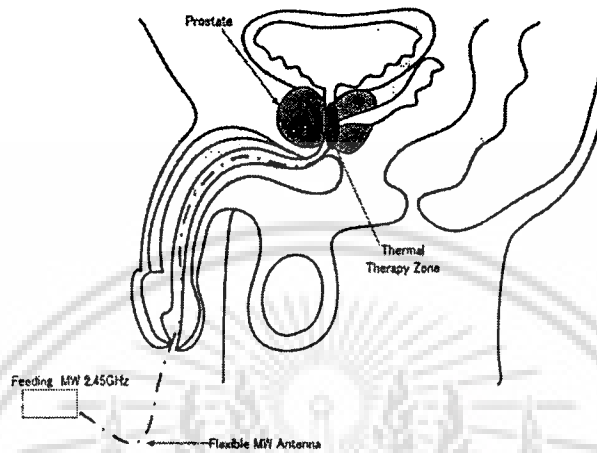
รูปที่ 3.15 การเตรียมการทดลอง

จากรูปที่ 3.14 แสดงการเตรียมอุปกรณ์เพื่อทำการทดลอง โดยทางผู้วิจัยจะทำการทดลองสายอากาศแบบบอลูน โดยใช้แหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ไมโครเวฟความถี่ (2.45 GHz) โดยควบคุมพลังงานและเวลา ผ่านทางคอมพิวเตอร์ เป็นการทดลองโดยใช้ไขควง เพื่อดูพื้นที่การทำลายแบบ 3 มิติ การวัดขนาดของบอลูนขณะอยู่ การทดลองใช้พลังงานขนาด 50 วัตต์ ป้อนให้กับสายอากาศ โดยใช้ระยะเวลา 10 นาที พร้อมบันทึกผลการทดลองและสังเกตการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น

3.5.2 การเตรียมการทดลองสายอากาศชนิดบอลูนที่ได้จากการพัฒนาในห้องปฏิบัติการเฉพาะทาง

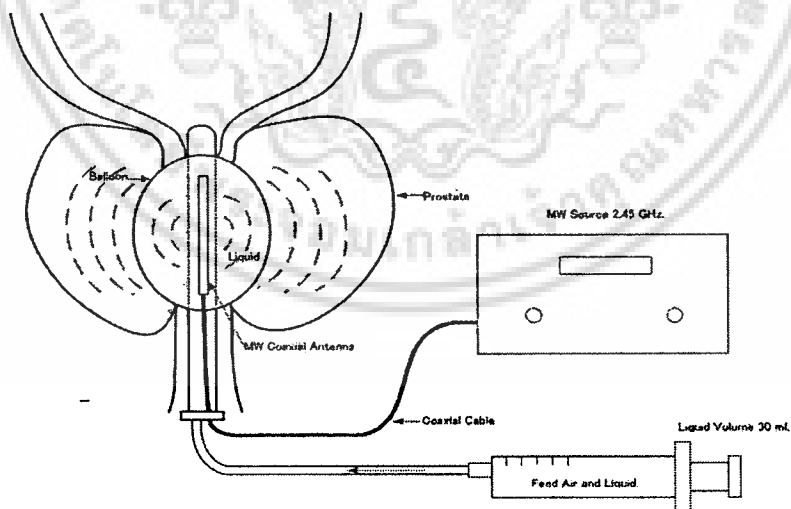
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5.2.1 วิธีการใส่บอลลูนเข้าไปในต่อมลูกหมากและการจัดวางตำแหน่ง



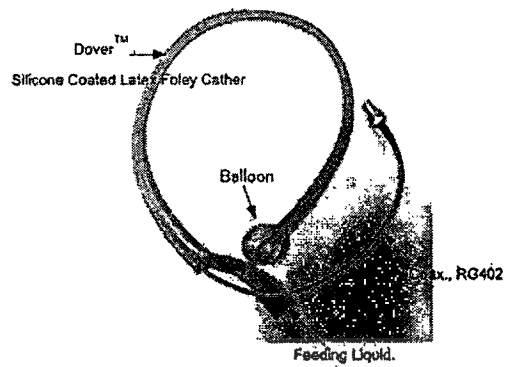
รูปที่ 3.16 การวางตำแหน่งบอลลูนสายอากาศในบริเวณต่อมลูกหมาก

### 3.5.2.1 การติดตั้งผลการทดลอง

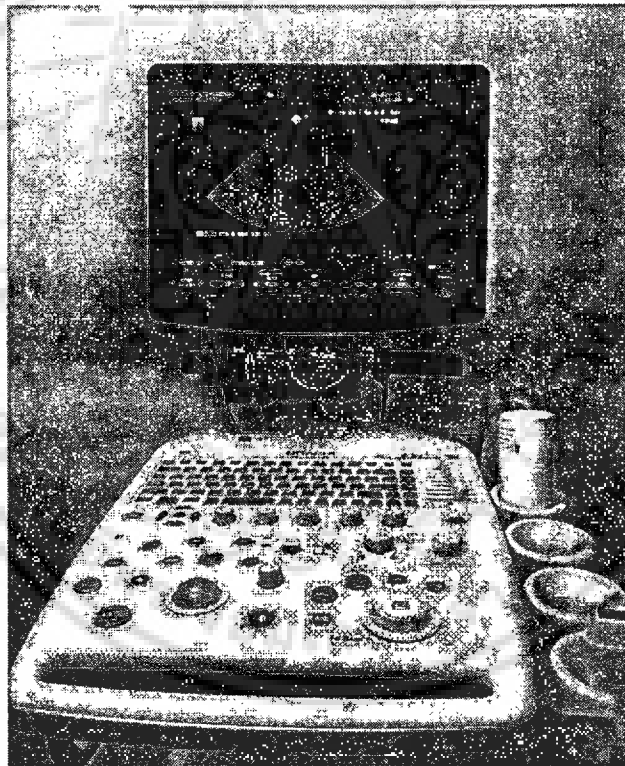


รูปที่ 3.17 แสดงผังการทดลองโดยใช้บอลลูนสายอากาศไมโครเวฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

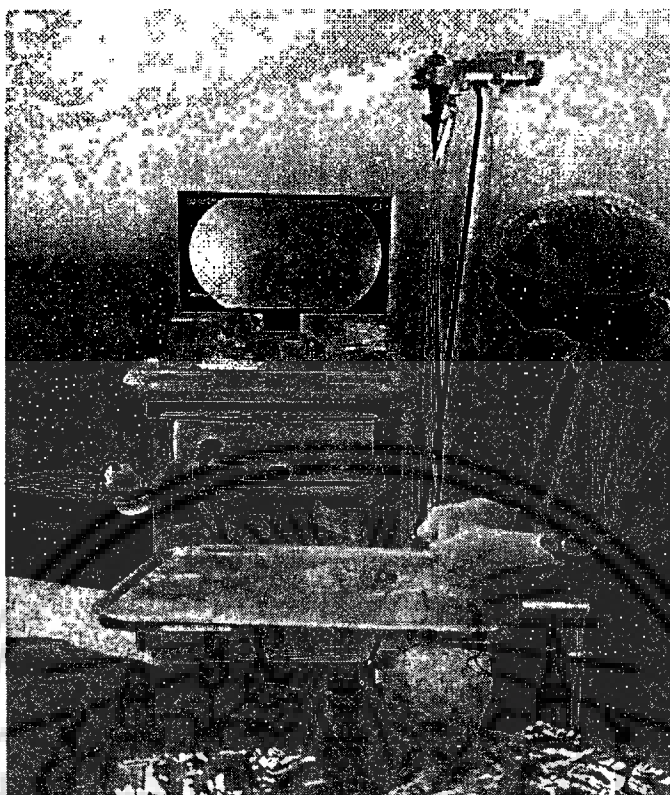


รูปที่ 3.18 สายอากาศบอลลูนไมโครเวฟ



รูปที่ 3.19 แสดงเครื่องอัลตราซาวด์ที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.20 แสดงกล้องถ่ายภาพทางการแพทย์ที่ใช้ในการบันทึกการทดลองผลการวิจัย

ในส่วนของการเตรียมการทดลองสายอากาศชนิดบอลลูนที่ได้จากการพัฒนาในห้องปฏิบัติการเฉพาะทาง รูปที่ 3.16 เป็นการวางตำแหน่งบอลลูนสายอากาศในบริเวณต่อมลูกหมาก ซึ่งอยู่บริเวณกึ่งกลางของต่อมลูกหมากก่อนถึงกระเพาะปัสสาวะ รูปที่ 3.17 เป็นการแสดงผังการทดลองโดยใช้บอลลูนเสาอากาศไมโครเวฟ โดยเราป้อนพลังงานคลื่นไมโครเวฟขนาด 2.45 GHz ให้กับสายอากาศชนิดที่ได้มีการออกแบบดังรูปที่ 3.18 แล้วเมื่อเรานำบอลลูนเข้าไปวางในบริเวณต่อมลูกหมากแล้วเราจะใช้เครื่องอัลตราซาวด์วัดและดูลักษณะการวางภายในต่อมปัสสาวะบริเวณต่อมลูกหมาก รูปที่ 3.19 แสดงรูปเครื่องอัลตราซาวด์ที่ใช้ในการวัด หลังเราที่ได้ทำการดูตำแหน่งที่ต้องการวางบอลลูนเรียบร้อยแล้ว จะทำการให้ความร้อนตามผลที่ทดลองจากคอมพิวเตอร์ โดยติดตามเวลาและอุณหภูมิ บันทึกผลการทดลอง หลังจากนั้นดูประสิทธิภาพการทำลายโดยใช้กล้องถ่ายภาพทางการแพทย์ ดังรูปที่ 3.20 แสดงกล้องถ่ายภาพทางการแพทย์ที่ ผลที่ได้จากการทดลองสีของเนื้อเยื่อเปลี่ยนแปลงไปจากกล้องถ่ายภาพทางการแพทย์และผ่าดูเนื้อเยื่อจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

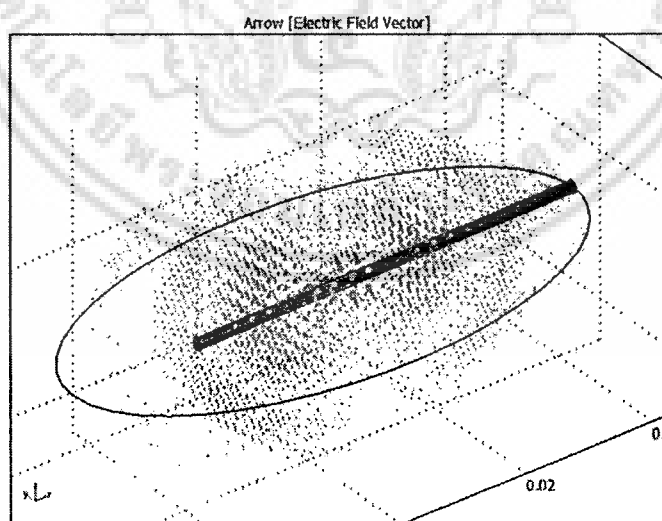
### ผลการจำลองการทำงานและผลการทดลอง

บทนี้จะกล่าวถึงผลการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งได้กำหนดค่าพลังงานเริ่มต้นที่เท่ากับ 50 วัตต์ ระยะเวลา 10 นาที อุณหภูมิอยู่ระหว่าง 50-75 องศาเซลเซียส และผลที่ได้จากการทดลอง การทดลองด้วยไข่ม้วนเพื่อดูลักษณะการทำลายแบบ 3 มิติ และการทดลองในเนื้อเยื่อต่อมลูกหมากโดยแสดงผลการทดลองการทำลายเนื้อเยื่อโดยใช้กล้องถ่ายภาพทางการแพทย์

#### 4.1 ผลการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

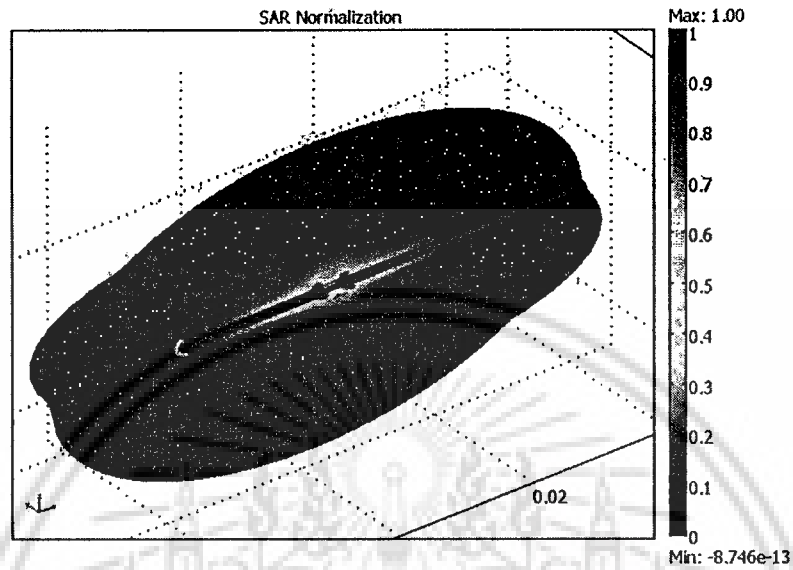
##### 4.1.1. สายอากาศชนิดบอลลูนที่ใช้ในการวิเคราะห์

ผลการจำลองทั้งหมดแสดงในรูปที่ 4.1 ดังต่อไปนี้ รูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นถึงรูปแบบการกระจายของสนามไฟฟ้า, SAR และอุณหภูมิ รูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นถึงรูปแบบการกระจายอุณหภูมิของพื้นผิวของบอลลูนในเวลารักษาเป็น 0.5, 1, 2 และ 10 นาที รูปที่ 4.5 แสดงการกระจายอุณหภูมิในมุมมองส่วนในเวลารักษาแต่ละจนกว่าจะเสร็จสิ้นการรักษาที่ 10 นาที

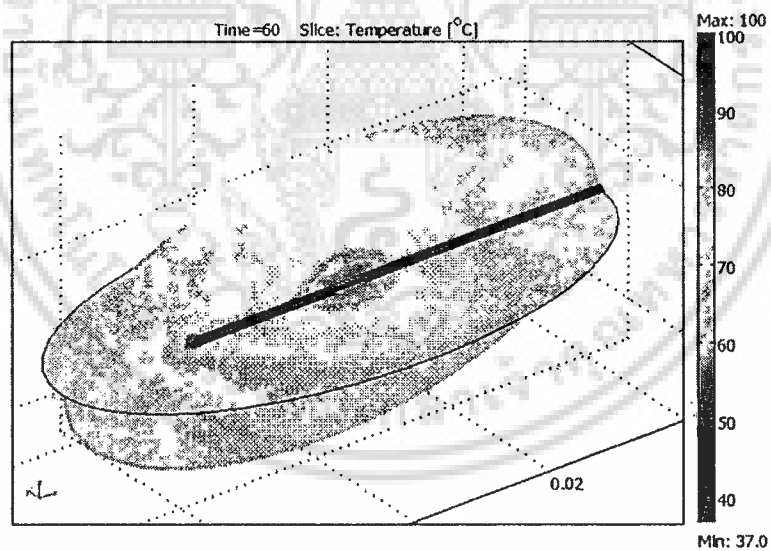


รูปที่ 4.1 การกระจายสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

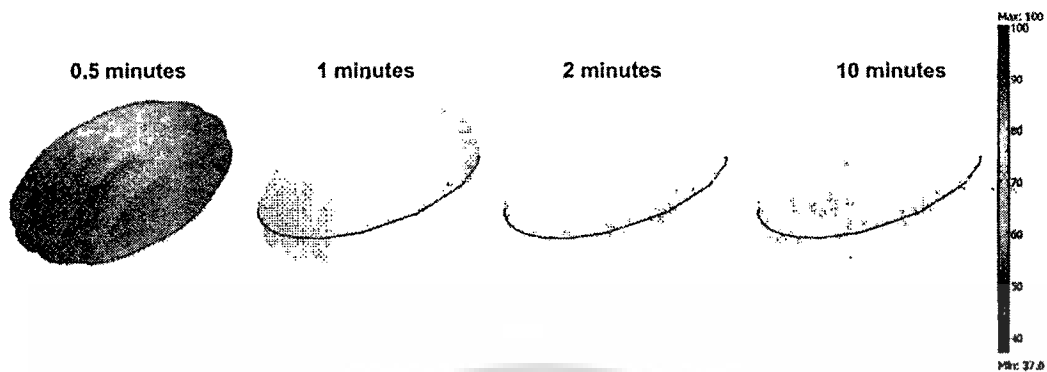


รูปที่ 4.2 การกระจาย SAR

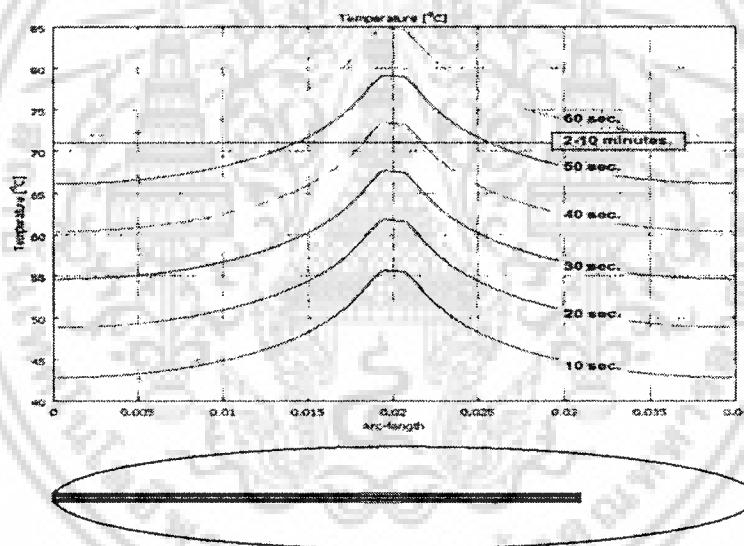


รูปที่ 4.3 การกระจายตัวของอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 การกระจายอุณหภูมิภายในบอลลูนที่ 0.5 นาที, 1 นาที, 2 นาที และ 10 นาที



รูปที่ 4.5 อุณหภูมิภายในบอลลูน

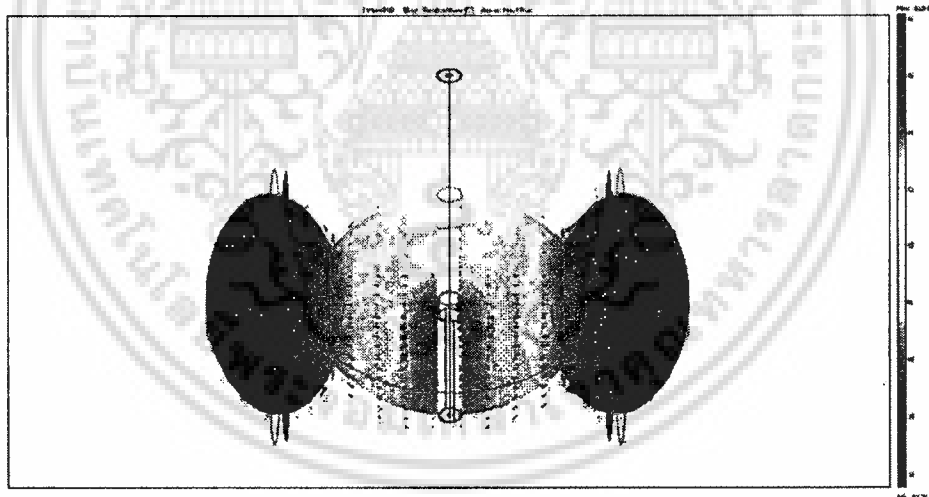
ในรูปที่ 4.1 การกระจายของสนามไฟฟ้าจากเสาอากาศไมโครเวฟสล็อตชนิดเห็นได้ชัดเจนเห็นได้รอบตำแหน่งช่องสลีตมีความเข้มไฟฟ้านี้จะสูง แล้วจะมีการกระจายสนามไฟฟ้าทั่วบอลลูน การกระจายตัวของ SAR ตามพารามิเตอร์แสดงในรูปที่ 4.3 นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นถึงรูปแบบการกระจายเช่นเดียวกับการแสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งจะมีการกระจายตัวเป็นอย่างมากที่ตำแหน่งช่องสลีต รูปแบบการกระจายความร้อนของของเหลวน้ำเกลือในบอลลูนที่แสดงในรูปที่ 4.4 ซึ่งจะสูงสุดที่ตำแหน่งช่องสลีต รูปที่ 4.4 แสดงการกระจายอุณหภูมิที่พื้นผิวบอลลูนกับเวลาการรักษาใด ๆ ในการศึกษาเบื้องต้นเราได้พิจารณาหาอุณหภูมิในการรักษาที่ดีที่สุดโดยแปลงพลังงานไมโครเวฟกับเสาอากาศของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราเพียง 1 นาที ที่ 0.5 และ 1 นาทีของเวลาการรักษาอุณหภูมิในบอลลูนยังไม่คงที่ ที่ 2-10, ความร้อนในปริมาณบอลลูนแสดงการกระจายไปอย่างราบรื่นและต่อเนื่อง รูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นกราฟความร้อนไปตามความยาวของเสาอากาศ แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งช่องสล็อตจะสูงกว่าส่วนอื่น หลังการรักษา 2 นาทีอุณหภูมิในปริมาณบอลลูนจะอยู่ที่ประมาณ 72 องศาเซลเซียส

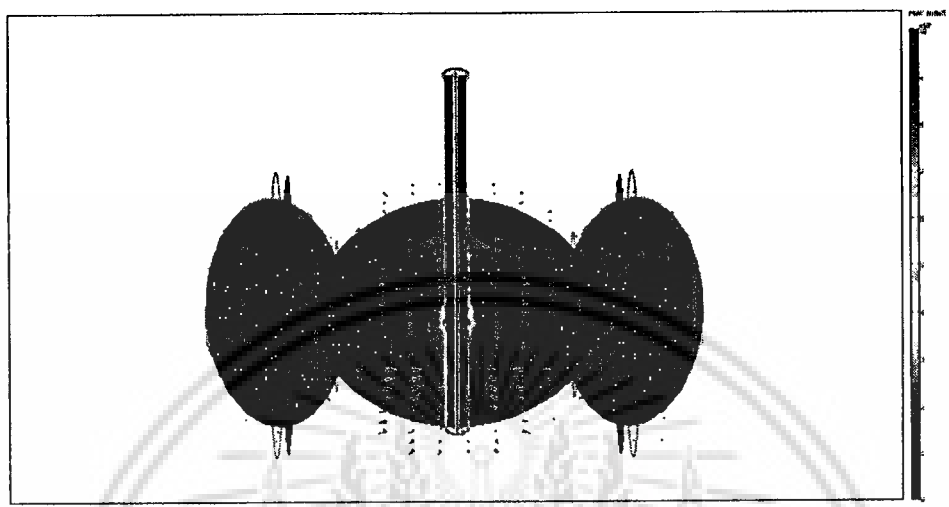
ในการออกแบบสายอากาศชนิดบอลลูนโดยใช้ที่มีการกระจายความร้อนเฉพาะพื้นที่ เมื่อโหล่ก็ตามที่มีความส่งความร้อนผ่านของเหลวและกำลังคลื่นไมโครเวฟที่เวลา 1 นาทีจะมีอุณหภูมิ 58 องศาเซลเซียส อุณหภูมิจะคงที่ 72 องศาเซลเซียสที่เวลา 8 นาที ความร้อนจะมีการกระจายตัวทั่วทั้งบอลลูน

#### 4.1.2 ผลการทดลองสายอากาศชนิดบอลลูนที่มีการพัฒนา

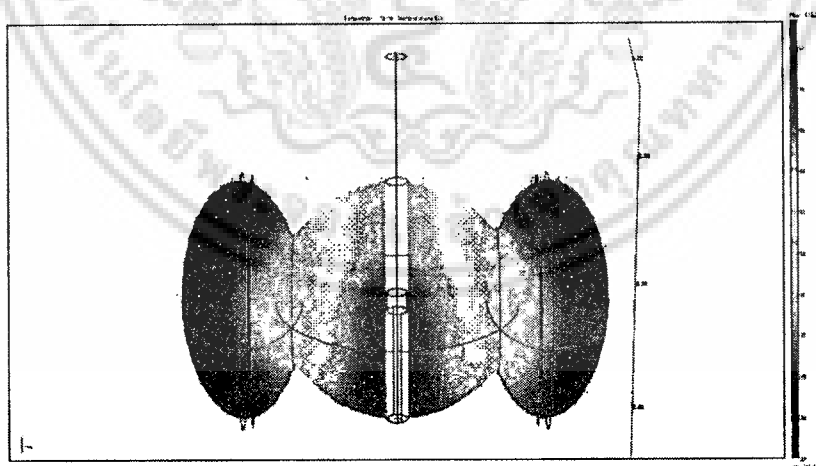


รูปที่ 4.6 การกระจายของสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

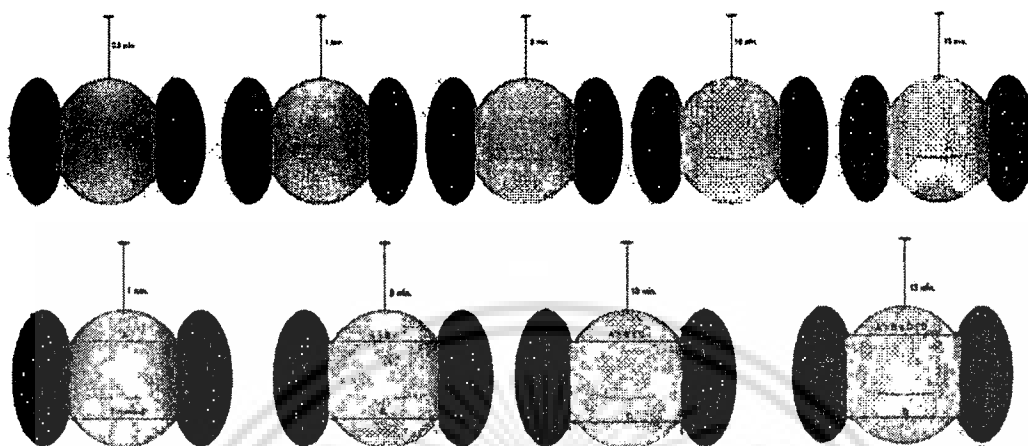


รูปที่ 4.7 การกระจาย SAR



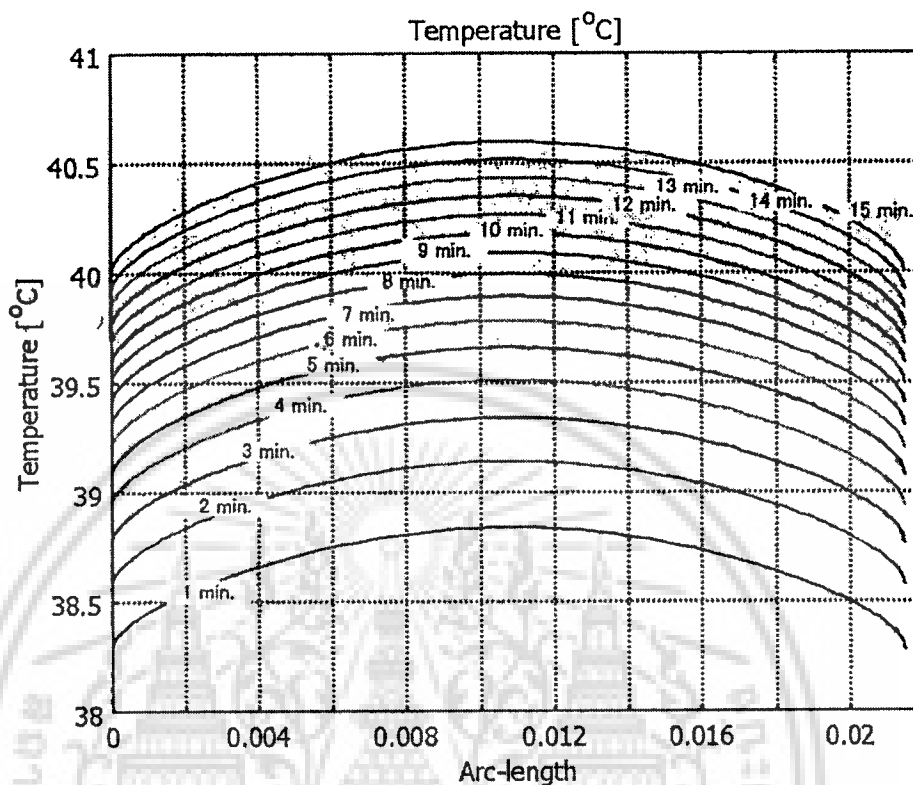
รูปที่ 4.8 การกระจายตัวของอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 การกระจายอุณหภูมิภายในบอลลูนที่ 1 นาที, 2 นาที, 10 นาที และ 15 นาที

ในรูปที่ 4.5 แสดงการกระจายของสนามไฟฟ้าจากสายอากาศไมโครเวฟสล็อตชนิดเห็นได้ชัดมองเห็นได้รอบตำแหน่งช่องสล็อตมีความเข้มไฟฟ้านี้จะสูง แล้วจะมีการกระจายสนามไฟฟ้าไปยังพื้นที่ข้างเคียงและทั่วบอลลูน การกระจายตัวของ SAR ตามพารามิเตอร์แสดงในรูปที่ 4.6 นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นถึงรูปแบบการกระจายเช่นเดียวกับการแสดงในรูปที่ 4.7 ซึ่งจะมีการกระจายตัวเป็นอย่างมากที่ตำแหน่งช่องสล็อต รูปแบบการกระจายความร้อนของของเหลวน้ำเกลือในบอลลูนที่แสดงในรูปที่ 4.8 ซึ่งจะสูงสุดที่ตำแหน่งช่องสล็อต รูปที่ 4.9 แสดงการกระจายอุณหภูมิที่พื้นผิวบอลลูนกับพื้นที่ข้างเคียง ที่เวลา 1 นาที 5 นาที 10 นาที และ 15 นาที ในการศึกษาเบื้องต้นเราพบว่าเมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้นความร้อนจะกระจายทั่วทั้งบอลลูนและออกไปด้านนอกพื้นผิวของบอลลูน



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงอุณหภูมิบริเวณพื้นผิวของบอลลูน

รูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นกราฟความร้อนที่กระจายออกจากพื้นผิวของบอลลูน เมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้นอุณหภูมิก็มักขึ้นตามเวลา ในการออกแบบสายอากาศชนิดบอลลูนโดยใช้ที่มีการกระจายความร้อนเฉพาะพื้นที่ เมื่อไหร่ก็ตามที่มีความส่งความร้อนผ่านของเหลวและกำลังคลื่นไมโครเวฟที่เวลา 1 นาทีจะมีอุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส อุณหภูมิจะมีการเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงที่เวลา 15 นาที อุณหภูมิจะอยู่ที่ 40 องศาเซลเซียส ความร้อนจะมีการกระจายตัวทั่วทั้งบอลลูน

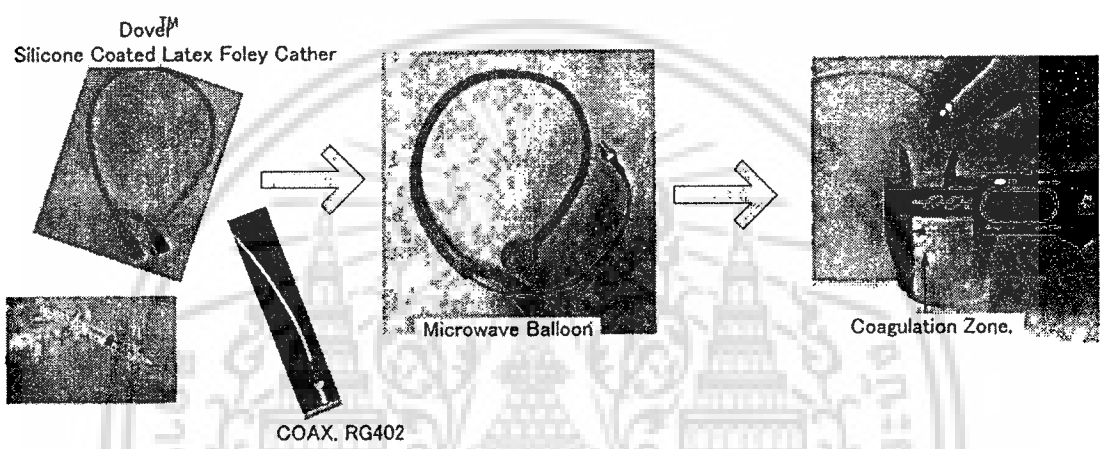
## 4.2 ผลการทดลอง

ในส่วนการทดลอง เป็นการทดลองแบบ in vitro โดยใช้เนื้อเยื่อต่อมลูกหมากของหมู โดยออกแบบการทดลองเป็น 3 การทดลอง ได้แก่ การทดลองที่ 1 การกระจายตัวของอุณหภูมิในไขขาว การทดลองที่ 2 ศึกษาคุณสมบัติของสารละลายในการกักเก็บความร้อนในสายอากาศชนิดบอลลูน และการทดลองที่ 3 ศึกษาประสิทธิภาพการทำลายของเนื้อเยื่อต่อมลูกหมาก

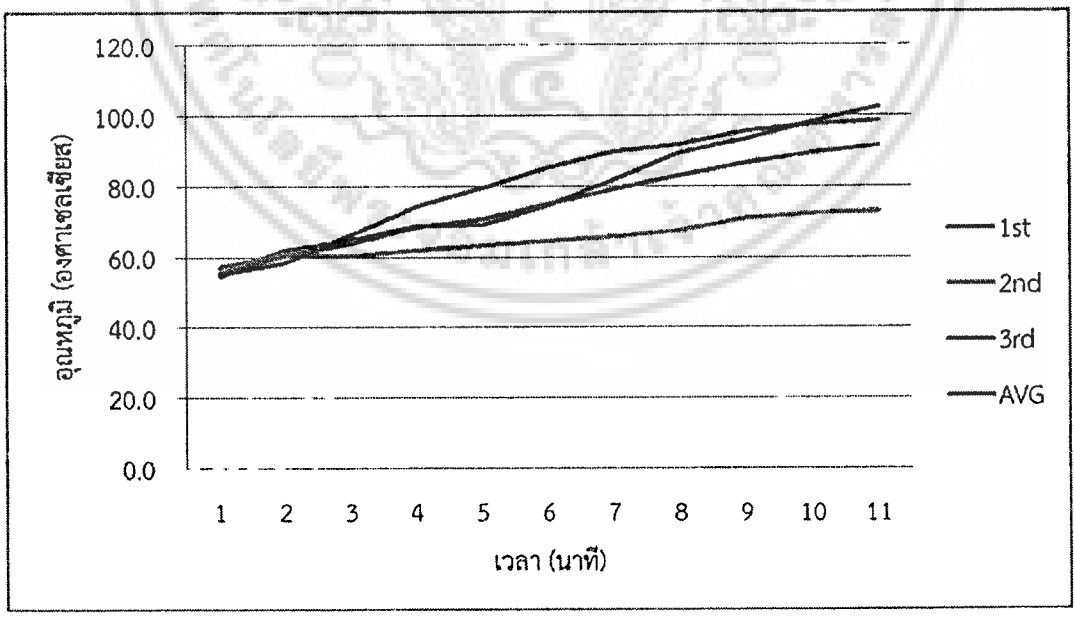
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1 การทดลองที่ 1

การทดลองปล่อยคลื่นไมโครเวฟผ่านสายอากาศที่มีสารละลาย (normal saline) เมื่อไข่ขาวได้รับความร้อนจะเกิดการแข็งตัว ทำให้เห็นเป็นลักษณะรูปร่างได้อย่างชัดเจนและแสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิตัวของอุณหภูมิตัว



รูปที่ 4.11 การทดลองการกระจายความร้อนในไข่ขาวของสายอากาศชนิดบอลลูน



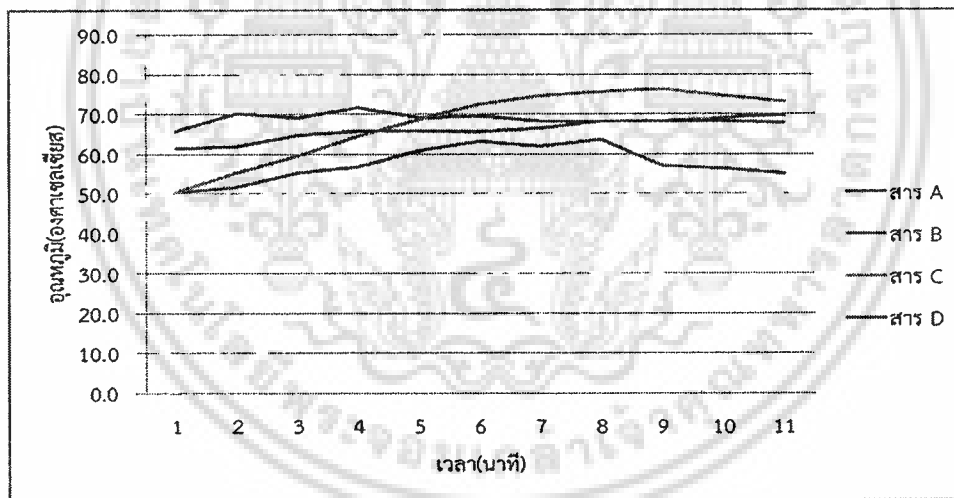
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงผลการทดลองอุณหภูมิภายในบอลลูนสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.12 เป็นผลกราฟแสดงผลการทดลองจริงวัดการกระจายตัวอุณหภูมิภายในบอลลูนที่ เวลา 2-10 นาที อุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 71.5 องศาเซลเซียส

### 4.2.2 การทดลองที่ 2

การทดลองปล่อยคลื่นไมโครเวฟผ่านสายอากาศชนิดบอลลูนที่มีสารละลาย (normal saline) ผสมกับสารละลายที่มีคุณสมบัติต่างๆ เพื่อให้ได้สารละลายที่มีคุณสมบัติในการกักเก็บความร้อนการการบันทึกการเปลี่ยนแปลงภายในสายอากาศชนิดบอลลูนที่มีสารละลายภายในที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน

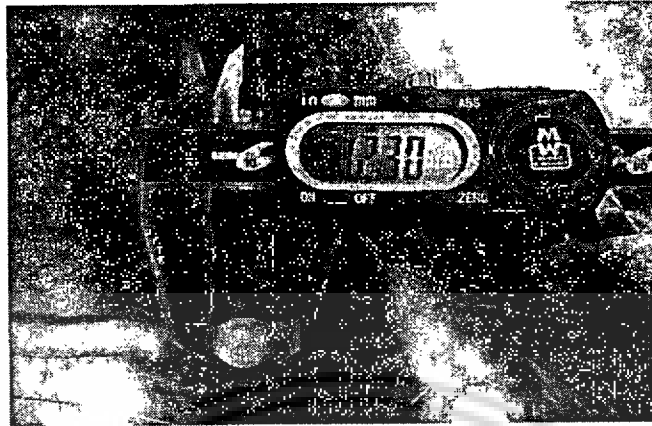


รูปที่ 4.13 กราฟแสดงคุณสมบัติของสารละลาย

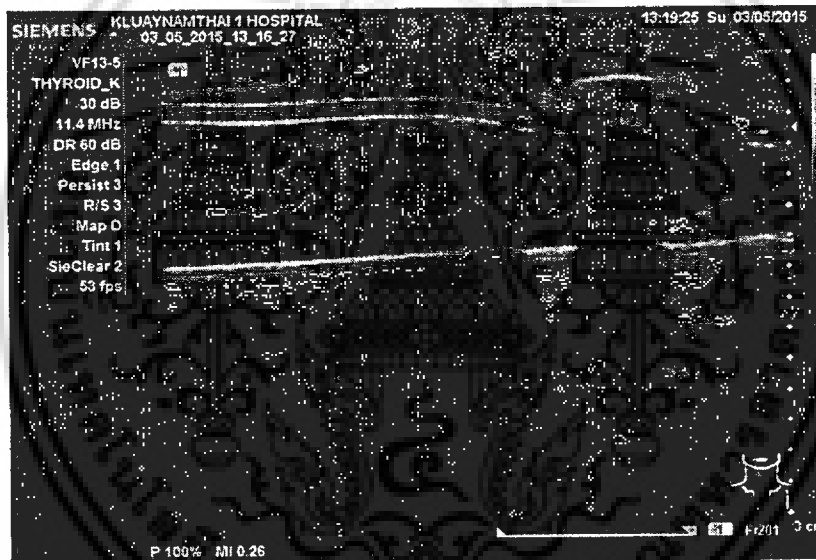
จากรูปที่ 4.13 เป็นการทดสอบคุณสมบัติของสารละลายที่มีคุณสมบัติในการกักเก็บความร้อนที่ดี

### 4.2.3 การทดลองที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

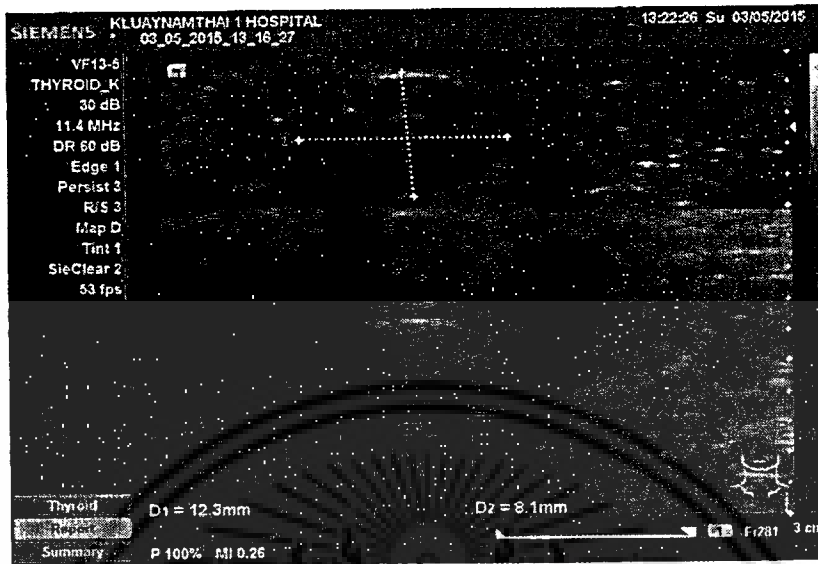


รูปที่ 4.14 แสดงสายอากาศบอลูนที่ใช้ในการทดลอง



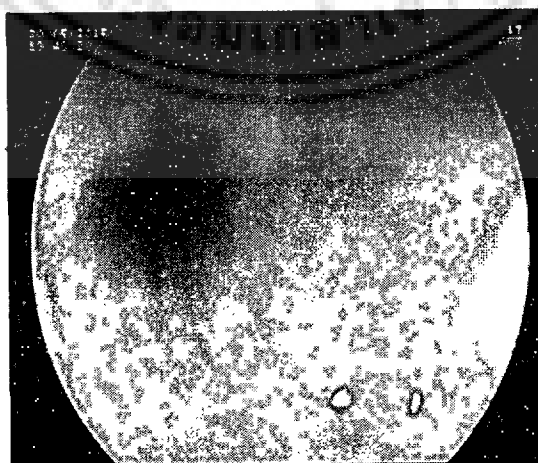
รูปที่ 4.15 แสดงภาพอัลตราซาวด์เมื่อบอลูนสายอากาศอยู่ในเนื้อเยื่อต่อมลูกหมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



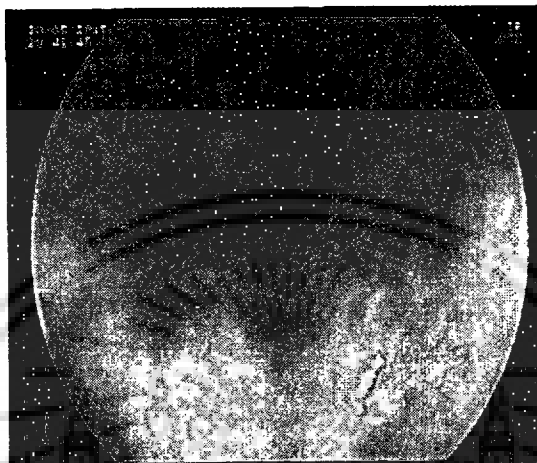
รูปที่ 4.16 แสดงขนาดของบอลลูนเมื่ออยู่ในเนื้อเยื่อ

การทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาการกระจายตัวของอนุภาคนิวเคลียร์ในต่อมลูกหมาก เตรียมการทดลองดังรูปที่ 3.14 ผู้วิจัยจะทำการปรับตั้งค่ากำลังไมโครเวฟ ที่ 50 วัตต์ จับเวลา บันทึกผล และดูผลการทดลองโดยใช้กล้องถ่ายภาพทางการแพทย์ดูบริเวณที่ได้รับความร้อน วัดขนาดการทำลาย ทำการตรวจเช็คสภาพของต่อมลูกหมากหลังการปล่อยคลื่นไมโครเวฟ ดังรูปที่ 4.17



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.17 เนื้อเยื่อก่อนการทดลอง



รูปที่ 4.18 ผลการทดลอง Burn เนื้อเยื่อด้วยสายอากาศแบบบอลลูนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

จากรูปที่ 4.17 และ 4.18 แสดงให้เห็นถึงผลการทดลองในเนื้อเยื่อต่อมลูกหมากหมูซึ่งเป็นการทดลองแบบ in vitro โดยใช้สายอากาศชนิดบอลลูนที่ออกแบบโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ เป็นการแสดงผลโดยใช้กล้องถ่ายภาพทางการแพทย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 แสดงผลประสิทธิภาพการทำลาย

จากรูปที่ 4.19 เมื่อผ้าทอปีสสาวะบริเวณต่อมลูกหมากทำให้เห็นถึงขอบเขตบริเวณการกระจายความร้อนของคลื่นไมโครเวฟที่เกิดขึ้นกับเนื้อเยื่อบริเวณต่อมลูกหมาก ดังนั้นการทดลองนี้ทำให้ทราบว่าเนื้อเยื่อบริเวณไม่มีการเผาไหม้และไม่ได้รับความเสียหายจากการสัมผัสโดยตรงกับสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาออกแบบสายอากาศแบบมีการทอหุ้มของเหลวสำหรับการบำบัดรักษาด้วยความร้อน โดยความร้อนจากพลังงานคลื่นไมโครเวฟจะนำไปทำการบำบัดรักษาในอวัยวะที่เป็นท่อหรือช่องลมและโรคต่อมลูกหมากโต โดยอาศัยเทคนิคการใช้เวลาน้อยที่สุดและมีการรุกรานน้อยที่สุด ทางผู้วิจัยได้ใช้สายอากาศไมโครเวฟขนาดเล็กและเติมน้ำเข้าไปในบอลลูนด้วยน้ำเกลือ การออกแบบสายอากาศโดยใช้ระเบียบวิธีการทางไฟไนเอลิเมนต์ (FEM) โดยสายอากาศที่นำเสนอจะทำการถ่ายโอนความร้อนจากสายอากาศของเหลวในซิลิโคนที่เป็นลักษณะของบอลลูน ลักษณะเด่นของเราคือ เนื้อเยื่อที่มีชีวิตไม่ถูกเผาไหม้อย่างรุนแรง เนื่องจากการติดต่อดโดยตรงกับสายอากาศไมโครเวฟ ในการจำลองนี้ได้ใช้ความถี่ไมโครเวฟ 2.45 จิกกะเฮิร์ต ใช้พลังงานที่ 30 วัตต์ ในเวลา 10 นาที โดยควบคุมจังหวะสัญญาณโดยใช้อัตราส่วน 01:10 ส่วนอุณหภูมิที่กระจายในบอลลูนของเราคือการแพร่กระจายอย่างต่อเนื่องที่ 60-70 องศาเซลเซียส ในระหว่างทำการบำบัดรักษา ซึ่งเป็นจุดที่โดดเด่นอย่างมีนัยสำคัญของการใช้ความร้อนจากบอลลูนแทนการใช้สายอากาศแบบธรรมดา จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าสายอากาศแบบบอลลูนในช่วงเวลา 10 นาที มีการกระจายอุณหภูมิเฉลี่ย 71.5 องศา และเมื่อวัดอุณหภูมิขณะปล่อยคลื่นไมโครเวฟจากผลการทดลอง พบว่าเกิดการสะสมอุณหภูมิความร้อนภายในบอลลูนเป็นไปตามผลการทดลองด้วยระเบียบวิธีการทางไฟไนเอลิเมนต์ (FEM) และจากผลการทดลองทำให้เห็นได้ว่าเนื้อเยื่อต่อมลูกหมากไม่ได้รับความเสียหายจากความร้อนของคลื่นไมโครเวฟที่เกิดจากการสัมผัสโดยตรงกับสายอากาศหลังจากการบำบัดรักษา เทคนิคนี้มีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้กับการรูปร่างหรือปรับโครงสร้างอวัยวะที่มีรูปร่างผิดปกติ ความร้อนที่ได้รับจากเทคนิคนี้เป็นค่าคงที่และยืดหยุ่น เทคนิคนี้สามารถลดการเผาไหม้อย่างรุนแรงหรือความเสียหายของเนื้อเยื่อจากการสัมผัสโดยตรงกับแหล่งความร้อน

### 5.2 ข้อเสนอแนะในการพัฒนาต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อจำกัดของงานวิจัยฉบับนี้ คือ ซึ่งทางผู้วิจัยทำการทดลองกับเนื้อเยื่อแบบ in vitro การใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์มาวิเคราะห์และสร้างแบบจำลองก่อนสร้างระบบจริง เป็นวิธีการหนึ่งที่ช่วยลดขั้นตอนและระยะเวลาได้มากเมื่อเทียบกับการทำการทดลองโดยไม่มีแบบจำลอง และยังอาจทำให้เกิดข้อผิดพลาดได้สูงกว่า การใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ยังสามารถนำผลที่ได้จากการจำลองด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ไปใช้วางแผนในการทดลองจริงได้ ทำให้เกิดข้อผิดพลาดจากการลองผิดลองถูก และยังสามารถค่าใช้จ่ายในการทดลองจริงได้อีกด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] A. R. Gillams, "Liver ablation therapy," Br J Radiol, vol. 77, no. 921, pp. 713-723, Sep. 2004
- [2] R. Lencioni and L. Crocetti, "Radiofrequency Ablation of Liver Cancer," Tech Vasc Interv Radiol, vol. 10, no. 1, pp. 38-46, Mar. 2007.
- [3] P. Ruxsamong, P. Phasukkit, S. Tungjittkusolmun, S. Prasantamrongsiri, and A. Sanpanich, "Finite Element Analysis for Severe Asthma Therapy at the Airway Smooth Muscle by Radiofrequency Ablation" in Proc. of 5th BMEiCON, Ubon-Ratchathani, Thailand, Dec. 2012.
- [4] S. Prasantamrongsiri, P. Phasukkit, C. Pintavirooj, S. Tungjittkusolmun and A. Sanpanich, "3D Finite Element Analysis for Varicose Vein Therapy by Using Microwave Ablation" in Proc. of 5th BMEiCON, Ubon-Ratchathani, Thailand, Dec. 2012.
- [5] H. Rosen, A. Rosen, and P. Walinsky, "IEEE pulse, vol. 1, no. 3, pp. 8-15, Set-Oct, 2010. .
- [6] K. Saito, T. Taniguchi, H. Yoshimura, and K. Ito., "Clinical trial of interstitial microwave hyperthermia by use of coaxial-slot antenna with two slots," IEEE T Microw Theory, vol.52, no. 8, pp. 1987-1991, Aug. 2004.
- [7] ภัทรพงษ์ ผาสุกกิจ. "การออกแบบและวิเคราะห์สายอากาศสำหรับทำลายเซลล์มะเร็งด้วยเฉพาะจุดด้วยคลื่นไมโครเวฟโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์" วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2552.
- [8] งานรังสีและเครื่องมือแพทย์ ศูนย์วิทยาศาสตร์การแพทย์ที่ 1 เชียงใหม่. "รังสีจากไมโครเวฟ."

[Online]. Available : [http://rmds.awardspace.com/history\\_detail.php?id\\_his=3](http://rmds.awardspace.com/history_detail.php?id_his=3).  
2556.

[9] พญ.สุพัตรา แสงรุจ. “9 ข้อต้องรู้ของผู้ใช้ไมโครเวฟ.” [Online]. Available :  
<http://www.doctor.or.th/article/detail/3063>. .2556

[10] ปราโมทย์ เตชะอำไพ. ระเบียบวิธีเพื่อการคำนวณไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อการคำนวณพลศาสตร์  
ของไหล. กรุงเทพมหานคร : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2545.

[12] ปราโมทย์ เตชะอำไพ. ระเบียบวิธีเพื่อการคำนวณไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อการคำนวณพลศาสตร์  
ของไหล. กรุงเทพมหานคร : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2545.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้