สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การพัฒนาโพรบนำคลื่นไมโครเวฟเพื่อการทำลายเนื้อเยื่อสำหรับอวัยวะที่มีการเคลื่อนที่

Development microwave probe for destruction moving Tissue

ดร.ภัทรพงษ์ ผาสุขกิจ

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2555
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

RCH
TK
7878.6
ภ366ก

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 131165
วัน,เดือน,ปี 22 พค. 2557

b.1260234b
i.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ II

กิตติกรรมประกาศ III

สารบัญ IV

สารบัญตาราง V

สารบัญภาพ ..... V I

บทที่/1 หลักการและเหตุผล 1

1.1 มะเร็งคืออะไร 1

1.2 ปัจจัยเสี่ยงของการเกิดมะเร็งปอด ส่วนใหญ่พบร่วมกับการสูบบุหรี่ 1

1.3 อาการของมะเร็งปอด อาการที่พบบ่อย 1

1.4 การวินิจฉัย 2

1.5 มะเร็งปอดมีกี่ชนิด 3

1.6 การประยุกต์ใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามาทำลายเซลล์มะเร็งที่ปอด 4

1.7 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย 7

1.8. ขอบเขตของโครงการวิจัย 7

1.9 วัตถุประสงค์ 7

บทที่/2 หลักการและทฤษฎีพื้นฐานทางคณิตศาสตร์ 8

2.1 บทนำ 8

2.2 การวิเคราะห์ทางด้านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า 8

2.3 โหมดสำหรับการเดินทางของคลื่น (Wave Propagation Mode) 19

2.4 สนามไฟฟ้าในช่องว่างวัสดุ (Electric Fields in Material Space) 22

2.5 สายส่งไมโครเวฟและท่อนำคลื่น (Microwave Transmission Line and Wave Guides) 34

2.6 สมการความร้อนในทางชีววิทยา (The Bio-heat Equation) 36

2.7 พื้นฐานการกระจายความร้อนภายในเนื้อเยื่อ 37

2.8 หลักการของเงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการจำลอง 38

บทที่/3 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 41

3.1 บทนำ 41

3.2 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) 41

3.3 กระบวนการแก้ปัญหาด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ 43

3.4 พื้นฐานสมการทางด้านสนามแม่เหล็กไฟฟ้า 46

3.5 วิเคราะห์สนามแม่เหล็กที่ความถี่สูง 48

3.6 สมการความสัมพันธ์ระหว่างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและอุณหภูมิ 48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

3.7 การประยุกต์ใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์.....50
บทที่/4 ผลการทดลอง.....51
4.1 แบบจำลองสายอากาศในเนื้อเยื่อปอด.....51
บทที่/5 สรุปผลการทดลอง.....56
บรรณานุกรม/เอกสารอ้างอิง.....57
ภาคผนวก.....
ภาคผนวก ก.....
ภาคผนวก ข.....
ประวัตินักวิจัย.....

หมายเหตุ

1. ชื่อหัวข้อและจำนวนบทสามารถปรับให้สอดคล้องกับงานวิจัยได้ตามความเหมาะสมของงานวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์/ด้านสังคมศาสตร์
2. เครื่องหมาย / หมายถึง การเว้นวรรค 1 ระยะตัวอักษร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่ หน้า

1.1 แพทย์กำลังส่องกล้อง....2
1.2 เครื่องมือในการวินิจฉัย....2
1.3 รูปแบบการรักษาด้วยโพรบนำคลื่น....5
1.4. สายอากาศและตัวเครื่องระบบไมโครเวฟ....6
1.5 ภาพการรักษาโดยการสอดสายอากาศนำคลื่นไมโครเวฟเข้าสู่ร่างกายเพื่อทำลายมะเร็ง....6
2.1 (ก) การเคลื่อนที่ของคลื่นในโหมดสนามแม่เหล็กตัดขวาง(TM mode)....20
2.1 (ข) การเคลื่อนที่ของคลื่นในโหมดสนามไฟฟ้าตัดขวาง (TE mode)....21
2.1 (ค) การเคลื่อนที่ของคลื่นในโหมดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าตัดขวาง(TEM mode)....21
2.2 ภาคตัดขวางของตัวกลางไดอิเล็กตริกโพลาไรซ์....23
2.3 (ก) ขอบเขตระหว่างไดอิเล็กตริกกับไดอิเล็กตริก....26
2.3 (ข) ขอบเขตระหว่างไดอิเล็กตริกกับไดอิเล็กตริก....26
2.4 ขอบร่วมระหว่างสองตัวกลาง....27
2.5 การหักเหของ $\vec{E}$ หรือ $\vec{D}$ ที่ขอบเขตระหว่างไดอิเล็กตริกกับไดอิเล็กตริก....30
2.6 (ก) ขอบเขตระหว่างตัวนำไฟฟ้ากับไดอิเล็กตริก....31
2.6 (ข) ขอบเขตระหว่างตัวนำไฟฟ้ากับไดอิเล็กตริก....31
2.7 การกลั่นกรองไฟฟ้าสถิต....32
2.8 ขอบเขตระหว่างตัวนำไฟฟ้ากับอากาศว่าง....33
2.9 (ก) สายส่งสัญญาณโหมด TEM (TEM transmission lines)....34
2.9 (ข) สายส่งสัญญาณโหมด (Multi-mode transmission lines)....34
2.10 ท่อนำคลื่นแบบต่างๆ....36
2.11 กราฟแสดงผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์มะเร็ง....38
2.12 แสดงลักษณะของสายอากาศแบบโคแอกเชียลในเนื้อเยื่อทดสอบ....38
2.13 แสดงโครงสร้างของสายอากาศแบบสล็อตโคแอกเชียล....39
2.14 แสดงจุดจ่ายกำลังงานคลื่นไมโครเวฟให้กับสายอากาศ....39
2.15 แสดงบริเวณที่เป็นขอบเขตต่อเนื่อง....40
3.1 แสดงแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ถูกแบ่งออกเป็นเอลิเมนต์และโหนด....42
3.2 ขั้นตอนในการวิเคราะห์ปัญหาด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์....44
3.3 รูปแบบจำลองชิ้นงานและรูปแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์....44
3.4 รูปแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของกระดูก....50
4.1 แบบจำลองสายอากาศที่สอดในเนื้อเยื่อปอดโดยสายอากาศที่เลือกใช้ในการจำลองเป็นแบบสล๊อต....51
4.2 แสดงแบบจำลองสายอากาศที่สอดในเนื้อเยื่อปอดโดยการแบ่งแบบจำลองออกเป็นเอลิเมนย่อยๆ....51
4.3 (ก) แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิ 50 $^{\circ}$C ภายในเนื้อเยื่อปอดขณะหายใจเข้า....52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

4.3 (ข) แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิ 50 °C ภายในเนื้อเยื่อปอดขณะหายใจออก.....52
4.4 (ก) กราฟการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเนื้อเยื่อปอดขณะหายใจเข้า.....52
4.4 (ข) กราฟการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเนื้อเยื่อปอดขณะหายใจออก.....52
4.5 (ก) แบบจำลองการกระจายตัวความเข้มของแม่เหล็กไฟฟ้าที่เข้าสู้เนื้อเยื่อปอดขณะหายใจเข้า.....53
4.5 (ข) แบบจำลองการกระจายตัวความเข้มของแม่เหล็กไฟฟ้าที่เข้าสู้เนื้อเยื่อปอดขณะหายใจออก.....53
4.6 (ก) กราฟการกระจายตัวความเข้มของแม่เหล็กไฟฟ้าที่เข้าสู้เนื้อเยื่อปอดขณะหายใจเข้า.....53
4.6 (ข) กราฟการกระจายตัวความเข้มของแม่เหล็กไฟฟ้าที่เข้าสู้เนื้อเยื่อปอดขณะหายใจออก.....53
4.7 (ก) แสดงปริมาตรการทำลายเซลล์มะเร็งที่อุณหภูมิภาย 50 °C ในเนื้อเยื่อปอดขณะหายใจเข้า.....54
4.7 (ข) แสดงปริมาตรการทำลายเซลล์มะเร็งที่อุณหภูมิภาย 50 °C ในเนื้อเยื่อปอดขณะหายใจออก.....54
4.8 (ก) กราฟแสดงปริมาตรการทำลายเซลล์มะเร็งที่อุณหภูมิ 50 °C เทียบกับเวลา ขณะหายใจเข้า.....54
4.8 (ข) กราฟแสดงปริมาตรการทำลายเซลล์มะเร็งที่อุณหภูมิ 50 °C เทียบกับเวลา ขณะหายใจออก.....54
4.9 (ก) แบบจำลองแสดงทิศทางการถ่ายเทความร้อนที่ออกจากสายอากาศแบบสล๊อตเข้าสู่เนื้อเยื่อปอดขณะหายใจเข้า.....54
4.9 (ข) แบบจำลองแสดงทิศทางการถ่ายเทความร้อนที่ออกจากสายอากาศแบบสล๊อตเข้าสู่เนื้อเยื่อปอดขณะหายใจออกใ.....54
4.10 (ก) แบบจำลองแสดงทิศทางการถ่ายเทความร้อนภายในเนื้อเยื่อปอดขณะหายใจเข้า.....55
4.10 (ข) แบบจำลองแสดงทิศทางการถ่ายเทความร้อนภายในเนื้อเยื่อปอดขณะหายใจออกใ.....55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การพัฒนาโพรบนำคลื่นไมโครเวฟเพื่อการทำลายเนื้อเยื่อสำหรับอวัยวะที่มีการเคลื่อนที่

แหล่งเงิน เงินรายได้

ประจำปีงบประมาณ 2555 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 75,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2554 ถึง 30 กันยายน 2555

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัย พร้อมระบุ หน่วยงานต้นสังกัด

ดร.ภัทรพงษ์ ผาสุขกิจ

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

จากการจำลองการทำงานพบว่าคลื่นความถี่ไมโครเวฟ สามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อนำมาทำลายเซลล์มะเร็งที่เกิดขึ้นกับอวัยวะปอดได้ โดยจากผลการจกลิงการทำงานด้านไฟไนต์เอลิเมนต์ จะสามารถทราบแพทเทิร์นรูปแบบการทำลายของเนื้อเยื่อปอดในรูปแบบ 3 มิติ ได้ โดยในสถานะของปอด มี 2 สถานะที่ถือว่าเป็นความยุ่งยากของการจำลองการทำงานคือสถานะ หายใจเข้ากับหายใจออก ซึ่งพารามิเตอร์ของการจำลองด้านไดอิเล็กตริค จะมีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ฉะนั้นถือว่าปอด เป็นอวัยวะที่มีการทำงานที่ซับซ้อนเป็นอย่างมาก และแนวทางในการพัฒนาต่อไป อาจจะต้องคำนึงถึงการเคลื่อนที่ ที่จำเป็นต้องมีการยึดเกาะ อวัยวะด้วยวัสดุจับยึด โดยที่ไม่ส่งผลต่อการแพร่กระจายคลื่นแต่อย่างใด จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจในการพัฒนาต่อไป

คำสำคัญ : Lung cancer, ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ,Microwave ablation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Research Title: Experiments of Microwave Tissue Ablation Using Medical Device
Researcher: DR.PATTARAPONG PHASUKKIT
Faculty: Engineering **Department:** Electronic Engineering

ABSTRACT

In this research we develop microwave antenna for Lung cancer by used finite element analysis for analysis and design microwave antenna for proper with lung cancer, the result from finite element can represent about temperature distribution of destroy of cancer at lung tissue and the result present in term 3D Simulation. The complexity of this system about mechanical of lung had 2 stage that very complexity . In future can develop antenna that proper about moving tissue that not have affect with microwave radiation.

Keywords : Lung cancer, Finite Element Analysis , Microwave Ablation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่งทุนวิจัยเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ 2555 ทางทีมผู้วิจัย ขอขอบพระคุณ ผู้บริหารทุกท่าน ที่ให้การสนับสนุนในการพัฒางานวิจัย และทางสาขาวิชาที่อำนวยความสะดวก ต่อผู้วิจัยในเรื่องของสถานที่ที่ทำการวิจัย และนักศึกษา ระดับปริญญาโทที่ คอยสนับสนุนด้านการวิจัยในทุกๆ ด้าน

หัวหน้าโครงการวิจัย ดร.ภัทรพงษ์ ผาสุขกิจ
สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
หลักการและเหตุผล

โรคมะเร็งปอดเป็นโรคที่เกิดจากเซลล์ของปอด เช่น เนื้อปอด หลอดลมกลายเป็นเซลล์มะเร็ง โรคมะเร็งปอดเป็นมะเร็งที่พบบ่อย หากตรวจพบเร็วสามารถรักษาให้หายขาดได้

1.1 มะเร็งคืออะไร

ร่างกายประกอบด้วยเซลล์เป็นจำนวนมาก ปกติเซลล์จะแบ่งตัวตามความต้องการของร่างกาย เช่น มีการผลิตเม็ดเลือดแดงเพิ่มเมื่อมีการเสียเลือด มีการผลิตเม็ดเลือดข้าวเพิ่มเมื่อมีการติดเชื้อ เป็นต้น แต่มีเซลล์ที่แบ่งตัวโดยที่ร่างกายไม่สามารถควบคุมได้ทำให้เกิดเป็นเนื้องอก ซึ่งแบ่งเป็น Benign และ Malignant

Benign tumor คือเนื้องอกที่ไม่ใช่มะเร็งสามารถตัดออกและไม่กลับเป็นใหม่ และที่สำคัญไม่สามารถแพร่กระจายไปยังอวัยวะอื่น

Malignant tumor เซลล์จะแบ่งตัวทำลายเนื้อเยื่อและอวัยวะใกล้เคียง ที่สำคัญสามารถแพร่กระจายไปยังอวัยวะอื่นที่อยู่ไกลโดยไปตามกระแสเลือด และน้ำเหลืองเรียกว่า Metastasis

1.2 ปัจจัยเสี่ยงของการเกิดมะเร็งปอด ส่วนใหญ่พบร่วมกับการสูบบุหรี่

สูบบุหรี่ จำนวนปีที่สูบ อายุที่เริ่มสูบ จำนวนบุหรี่ที่สูบ สูบแต่ละครั้งลึกแค่ไหน ทั้งหมดเป็นปัจจัยที่จะทำให้มีโอกาสเกิดมะเร็งปอด สูบ cigars และ pipes ผู้ที่อยู่ในสิ่งแวดล้อมของผู้สูบบุหรี่ สัมผัสสาร Randon เป็นแก๊สที่ไม่มีกลิ่น ซึ่งพบได้ตามดินและหิน ผู้ป่วยที่ทำงานเหมืองจะมีโอกาสเสี่ยง ใยหิน Asbestos ผู้ที่ทำงานเกี่ยวกับเหมืองใยหินมีโอกาสเสี่ยงต่อมะเร็งปอด ควันจากการเผาไหม้น้ำมัน และถ่านหิน

- โรคปอด โดยเฉพาะวัณโรคมะเร็งจะเกิดบริเวณที่เป็นแผลเป็นวัณโรค<

ผู้เคยเป็นมะเร็งปอดจะมีโอกาสเป็นมะเร็งปอดสูงกว่าคนปกติ

1.3 อาการของมะเร็งปอด อาการที่พบบ่อยมีดังนี้

- ไอเป็นมากขึ้นเรื่อย
- เจ็บแน่นหน้าอก
- ไอเสมหะมีเลือดปน
- หายใจเหนื่อย เสียงแหบ
- เป็นปอดบวมหรือปอดอักเสบบ่อย
- หน้าและคอบวม
- อ่อนเพลีย เบื่ออาหาร น้ำหนักลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 การวินิจฉัย

รูปที่ 1.1แพทย์กำลังส่องกล้อง

เมื่อแพทย์สงสัยแพทย์จะซักประวัติครอบครัว ปัจจัยเสี่ยงต่างๆและส่ง x-ray ปอด ส่งเสมหะตรวจหาเซลล์มะเร็งการวินิจฉัยที่แม่นยำที่สุดคือการได้ชิ้นเนื้อไปตรวจทางพยาธิโดยพยาธิแพทย์วิธีการได้ชิ้นเนื้อมีหลายวิธีดังนี้

- Brochoscopy คือการส่องกล้องเข้าทางปาก ลงหลอดลม และเข้าปอดเพื่อตัดชิ้นเนื้อ<
- Needle aspiration คือใช้เข็มเจาะผ่านผนังทรวงอกเข้าปอด และเข้าเนื้อร้ายแล้วดูดเอาชิ้นเนื้อส่งตรวจ<
- Thoracenthesis คือใช้เข็มเจาะน้ำในช่องเยื่อหุ้มปอดส่งตรวจหาเซลล์มะเร็ง
- Thoracotomy คือผ่าเข้าในทรวงอกและตัดเนื้อร้ายออก

รูปที่ 1.2 เครื่องมือในการวินิจฉัย

หลังจากทราบว่าเป็นมะเร็งแพทย์จะทำการตรวจเพิ่มเพื่อจะทราบว่ามะเร็งแพร่กระจายหรือยังโดยการตรวจดังนี้

- CAT [Computed tomography] เป็นการ x-ray computer เพื่อดูว่ามะเร็งแพร่กระจายหรือยัง
- MRI [magnetic resonance imaging] ใช้คลื่นแม่เหล็กตรวจ

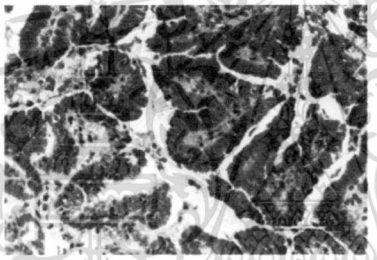
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Scan โดยใช้สารอาบรังสีฉีดเข้ากระแสเลือดและวัดรังสีที่อวัยวะนั้น เช่น ตับ กระดูก
- Mediastinoscopy เป็นการส่องเข้าในช่องอกเพื่อดูว่ามะเร็งแพร่กระจายไปต่อมน้ำเหลืองหรือยัง
- การรักษา
- การผ่าตัด แพทย์จะผ่าเอาเนื้อร้ายออกบางครั้งอาจต้องตัดปอดออกบางกลีบ lobectomy หรือตัดทั้งปอด pneumectomy
- เคมีบำบัด การให้สารเคมีเพื่อฆ่าเซลล์มะเร็ง แม้ว่าจะได้รับการผ่าตัดไปแล้วอาจมีมะเร็งบางส่วนหลงเหลือจึงให้เคมีบำบัดเพื่อทำลายส่วนที่เหลือ
- รังสีรักษา อาจให้ก่อนผ่าตัดเพื่อลดขนาดของมะเร็ง แพทย์อาจให้เคมีบำบัดร่วมกับรังสีรักษา
- Photodynamic therapy โดยการฉีดสารเคมีเข้าเส้นเลือด สารนั้นจะอยู่ที่เซลล์มะเร็งแล้วใช้ laser เพื่อฆ่าเซลล์มะเร็ง

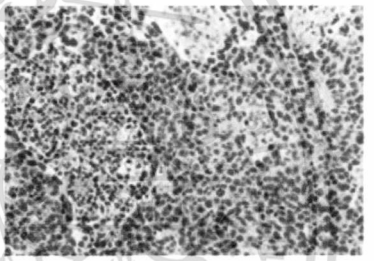
1.5 มะเร็งปอดมีกี่ชนิด เราแบ่งเป็นชนิดใหญ่ๆ 2 ชนิด

1. non-small cell lung cancer พบบ่อย โตช้ามี 3 ชนิด

squamous cell carcinoma



adenocarcinoma



large cell carcinoma

2. Small cell carcinoma หรือที่เรียก oat cell cancer พบน้อยแต่แพร่กระจายเร็ว การรักษา non-small cell lung cancer

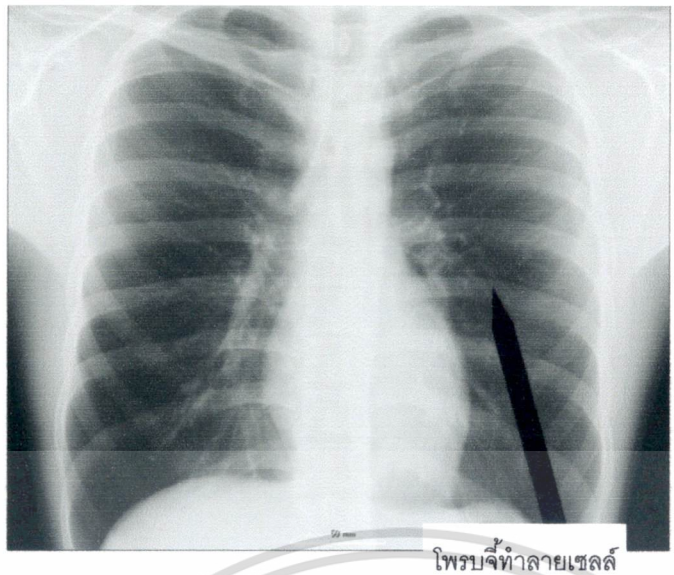
แพทย์จะเลือกการผ่าตัดและให้รังสีร่วมกับเคมีบำบัดเพื่อหยุดการเจริญเติบโตของเซลล์มะเร็ง การรักษา small cell lung cancer แพทย์จะเลือกให้เคมีรักษาร่วมกับการผ่าตัด และอาจให้รังสีรักษาแม้ว่าจะตรวจไม่พบว่ามีการแพร่กระจาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

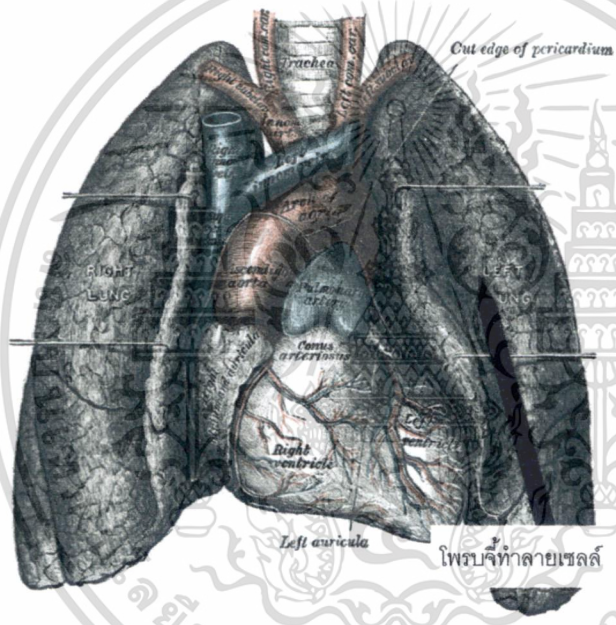
1.6 การประยุกต์ใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามาทำลายเซลล์มะเร็งที่ปอด

ทางทีมผู้วิจัย ได้นำเอาหลักการด้านคลื่นความถี่ เข้ามาทำลายเซลล์มะเร็งที่อวัยวะปอด ในลักษณะแบบเฉพาะที่ โดยจะอาศัยคลื่นความถี่ ย่านความถี่วิทยุ ขนาด 500 KHz หรือความถี่ไมโครเวฟขนาด 2.45 GHz เข้าไปทำปฏิกิริยาด้านความต้านทานความร้อนกับเนื้อเยื่อโดยในการออกแบบ ทางผู้วิจัยสนใจนำเอาความถี่ย่านไมโครเวฟขนาด 2.45 GHz ซึ่งเป็นย่านความถี่ที่สูง และมีคุณลักษณะเด่นคือไม่ต้องการ กราวด์เพลต ในการอาศัยให้คลื่นทำการเคลื่อนที่ โดย คลื่นไมโครเวฟสามารถเดินทางไปในอวัยวะที่มีโครงสร้างที่มีส่วนประกอบคล้ายๆ กับ ฟองน้ำ ที่บรรจุด้วยมวลอากาศขนาดเล็กได้ ซึ่งมีความแตกต่างกับคลื่นความถี่วิทยุที่ คลื่นไม่สามารถทำการเคลื่อนที่ในตัวกลางดังกล่าวได้ เนื่องจาก ค่าอิมพีแดนซ์ระหว่าง อิเลคโตรดกับ กราวด์ มีค่าที่สูง ฉะนั้น สายอากาศย่านความถี่ไมโครเวฟ จึงมีความเหมาะสมเป็นอย่างมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



โพรบจี้ทำลายเซลล์



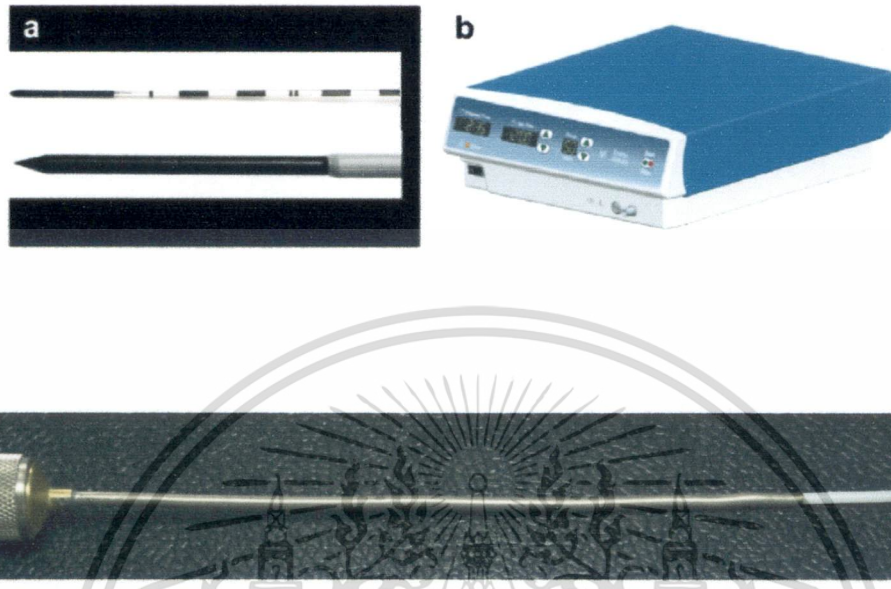
โพรบจี้ทำลายเซลล์

รูปที่ 1.3 รูปแบบการรักษาด้วยโพรบนำคลื่น

รูปแบบของการรักษาด้วยไมโครเวฟ มีวิธีการคล้ายกับในระบบ RFA เพียงแต่มีความแตกต่างกันในเรื่องของความถี่ใช้งาน และรูปแบบการใช้งาน โดยในระบบทำลายมะเร็งด้วยไมโครเวฟ มีการใช้งานที่ ความถี่ 915 MHz และ 2.45 GHz ซึ่งเป็นความถี่ที่ถูกระบุไว้ในย่านความถี่ที่เป็น ISM Band โดยถูกกำหนดให้ใช้งานในระบบ ทางการแพทย์ วิทยาศาสตร์ และอุตสาหกรรม ในการใช้งานนั้นเริ่มมีความสนใจนำมาใช้เนื่องจาก ในระบบไมโครเวฟ มีการทำลายมะเร็งที่ได้ขนาดการทำลายที่ใหญ่กว่า RFA โดยมีขนาดของการทำลายมากกว่า 3 เซนติเมตร และมีความหลากหลายโดย ได้มีการนำเสนอสายอากาศไมโครเวฟ แบบต่างๆ ที่มีรูปแบบของการแพร่กระจายคลื่นที่หลากหลายกว่าระบบ RFA

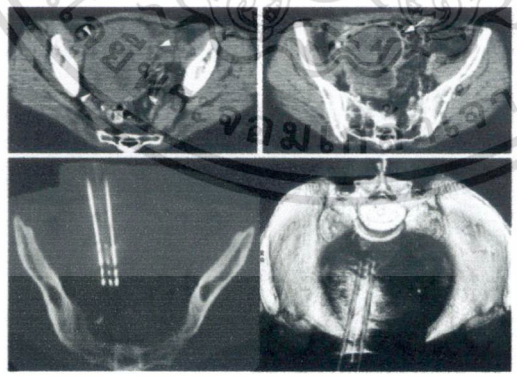
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้มีงานวิจัยที่นำเสนอการเปรียบเทียบการทำลายมะเร็งที่เกิดขึ้นกับอวัยวะตับ พบว่า ขนาดของการทำลายในระบบไมโครเวฟ มีขนาดที่ใหญ่กว่า และ มีอุณหภูมิที่สูงกว่าในระบบ RFA



รูปที่ 1.4. สายอากาศและตัวเครื่องระบบไมโครเวฟ

ในระบบนี้มีข้อดีเรื่องการใช้งานแตกต่างจากระบบ RFA โดยที่ ในระบบจะไม่ใช้แผ่นสายดิน คลื่นไมโครเวฟมีรูปแบบการเคลื่อนที่ในตัวกลางแตกต่างจากระบบ RFA ทำให้ลดปัญหาในการเกิดรอยไหม้ขึ้นบริเวณตำแหน่งแผ่นสายดินได้ดี



รูปที่ 1.5. ภาพการรักษาโดยการสอดสายอากาศนำคลื่นไมโครเวฟเข้าสู่ร่างกายเพื่อทำลายมะเร็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นได้ว่าประโยชน์ของการรักษาผู้ป่วยด้วยคลื่นความถี่สูง เป็นประโยชน์อย่างมาก โดยจะมีการรักษากับผู้ป่วยที่หลากหลาย ทั้งผู้ป่วยที่เป็นโรคมะเร็ง และผู้ป่วยที่มีปัญหาเกี่ยวกับข้อบกพร่องของเส้นเลือด โดยในการวิจัยเป็นการวิจัยในรูปแบบของบูรณาการกันระหว่างแพทย์กับ งานด้านวิศวกรรม โดยมีการพัฒนางานวิจัยที่สามารถใช้งานได้จริง

1.7 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- สร้างหัวข้อการวิจัยที่เหมาะสมกับการตีพิมพ์โดยเน้น การออกแบบที่เหมาะสมกับอวัยวะใช้งานและเป็นโพรบนำคลื่นรูปแบบใหม่ เพื่อสามารถตีพิมพ์ในวารสารนานาชาติที่มี impact factor.

1.8. ขอบเขตของโครงการวิจัย

ออกแบบและสร้างโพรบสำหรับนำคลื่นไมโครเวฟด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และสร้างชิ้นงาน ทดลอง และเขียนบทความเพื่อตีพิมพ์ในวารสารนานาชาติที่มี impact factor.

1.9 วัตถุประสงค์

1. สร้างงานวิจัยตามทิศทางการวิจัยของสถาบันฯ
   ทิศทางที่ 1. การวิจัยด้านเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร(ICT) และอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งหมายถึง การวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาองค์ความรู้ด้านเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร โดยอาศัยหลักของวิทยาการคอมพิวเตอร์ วิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ วิศวกรรมชีวการแพทย์ หรือเทคโนโลยีใหม่ๆ โดยกลุ่มวิจัยประกอบด้วยนักวิจัยจากอิเล็กทรอนิกส์ชีวการแพทย์ และทางด้านโทรคมนาคม ได้นำเอาหลักการทางด้านวิศวกรรม โดยผสมผสานเพื่อให้เกิดงานวิจัยเพื่อสร้างนวัตกรรมที่มีคุณค่าต่อประเทศ ตามทิศทางการวิจัยของสถาบันฯ
2. เพื่อให้เกิดความร่วมมือในการทำงานของกลุ่มวิจัยภายในสถาบัน และ กับหน่วยงานภายนอก เพื่อพัฒนางานวิจัยให้มีประสิทธิภาพ มีความหลากหลาย
3. สร้างนักวิจัยที่มีประสิทธิภาพในการทำงานวิจัยที่มีคุณค่า ตอบแทนประเทศชาติ
4. เพื่อให้เกิดกลุ่มวิจัยที่มีการนำเสนอผลงานผลงานอย่างต่อเนื่องในวารสารนานาชาติ และสอดคล้องกับการเป็นมหาวิทยาลัยด้านการวิจัย ของสถาบันฯ
5. เพื่อสร้างและผลิตงานวิจัยให้สอดคล้องกับเป้าหมายการวิจัยของสถาบันฯ
   -ผลิตงานวิจัยและนวัตกรรมเพื่อความเป็นเลิศทางวิชาการ
   -ผลิตงานวิจัยที่สามารถนำไปใช้หรือต่อยอดในเชิงพาณิชย์
   -ผลิตงานวิจัยที่สามารถนำไปแก้ไขปัญหาด้านเศรษฐกิจและสังคม
   -ผลิตงานวิจัยที่รับการจดอนุสิทธิบัตรหรือสิทธิบัตรระดับชาติหรือนานาชา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่2

หลักการและทฤษฎีพื้นฐานทางคณิตศาสตร์

2.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงพื้นฐานคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหา โดยกล่าวถึงสมการแมกซ์เวลล์ [13] การเดินทางของคลื่นในตัวกลางชนิดต่างๆ พื้นฐานการกระจายความร้อนในเนื้อเยื่อ การหาค่าดูดซับความร้อน และสมการความร้อนทางชีววิทยา (Bio- heat Equation)

2.2 การวิเคราะห์ทางด้านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

สนามแม่เหล็กไฟฟ้าในรูปทั่วไปแล้วจะเป็นคลื่นซึ่งเป็นสัญญาณที่มีฮาร์โมนิก (Time – Harmonic Field) หรืออีกนัยหนึ่งคือ เป็นสัญญาณที่มีคาบการแกว่งที่แน่นอน ซึ่งโดยทั่วไปแล้วมักจะแทนด้วยผลรวมของสัญญาณรูปไซน์ที่สามารถใช้ฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ เขียนได้ทั้งฟังก์ชันโคซายน์ ฟังก์ชันซายน์ หรือฟังก์ชันเอ็กโปแนนเชียลเชิงซ้อน ถ้าพิจารณาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นสัญญาณโคซายน์ก็จะได้ $\frac{\partial E}{\partial t} = j\omega E$ ในกรณีที่สนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นสัญญาณรูปซายน์นั้น สามารถวิเคราะห์ผลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีต่อตัวกลางได้ง่ายโดยพิจารณาการตอบสนองของช่วงเวลาที่สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีต่อตัวกลางโดยพิจารณาการตอบสนองของช่วงเวลาที่สนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นสัญญาณซายน์คงตัว (Steady State) ซึ่งสามารถอนุมานอัตราการเปลี่ยนแปลงกับเวลา $\frac{\partial}{\partial t}$ คือ การเฉลี่ยด้วยค่า $j\omega$ ทำให้ได้สมการแมกซ์เวลล์ตามหัวข้อ 2.2.1 ซึ่งเป็นการเขียนในลักษณะเฟสเซอร์

2.2.1 สมการแมกซ์เวลล์ (Maxwell's Equations)

$$\nabla x H = -\omega\varepsilon \mathrm{E} + \sigma \mathrm{E} \tag{2.1}$$

$$\nabla \bullet D = \rho \tag{2.2}$$

$$\nabla \bullet B = 0 \tag{2.3}$$

$$D = \varepsilon E \tag{2.4}$$

$$B = \mu H \tag{2.5}$$

เมื่อ $E =$ สนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

D = ฟลั๊กของสนามไฟฟ้า

H = ความเข้มสนามแม่เหล็ก

ρ = ความหนาแน่นของประจุเชิงบวก

B = สนามแม่เหล็ก

ε = ค่าความยินยอมทางไฟฟ้า

μ = ค่าความซึมซาบแม่เหล็ก

2.2.2. สมการคลื่นสำหรับตัวกลางที่เป็นตัวนำ

เมื่อพิจารณาตัวกลางที่เป็นตัวนำ ในตัวกลางนี้ค่าสภาพนำไฟฟ้าจะเป็นเป็นศูนย์ และมีกระแสการนำเกิดขึ้นซึ่งจากสมการของแมกซ์เวลล์

$$\nabla xE = -\mu\frac{\partial H}{\partial t} \tag{2.6}$$

$$\nabla xE = -\mu\frac{\partial H}{\partial t} + j \tag{2.7}$$

ถ้า σ เป็นสภาพการนำของตัวกลาง จากกฎของโอห์มจะได้ความหนาแน่นกระแสการนำมีค่าดังสมการที่(2.8)

$$j = \sigma E \tag{2.8}$$

ดังนั้น จากสมการ (2.1) และ (2.2) จะได้

$$\nabla xH = \varepsilon\frac{\partial E}{\partial t} + \sigma E \tag{2.9}$$

หาเคิร์ลของสมการ (2.1) จะได้

$$\nabla x(\nabla xE) = -\mu\nabla x\frac{\partial H}{\partial t} = -\mu\frac{\partial}{\partial t}\nabla xH$$

แทนค่า ∇xH จากสมการ (2.9) จะได้

$$\nabla x\nabla xE = \mu\varepsilon\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = -\mu\sigma\frac{\partial E}{\partial t}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ $$\nabla x \nabla x E = \nabla(\nabla \bullet E) - \nabla^2 E$$

ดังนั้น $$\nabla(\nabla \bullet E) - \nabla^2 E = \mu\varepsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} - \sigma \frac{\partial E}{\partial t}$$

$$\nabla^2 E - \mu\varepsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} - \mu\sigma \frac{\partial E}{\partial t} = \nabla(\nabla \bullet E) \qquad (2.10)$$

สำหรับตัวกลางที่มีค่า ε มีค่าคงที่

$$\nabla \bullet E = \frac{1}{\varepsilon} \nabla \bullet D$$

แต่ $\nabla \bullet D = \rho$ เนื่องจากประจุสุทธิของตัวนำอยู่ที่ผิว ภายในตัวนำไม่มีประจุ σ จึงเท่ากับศูนย์

ดังนั้น

$$\nabla \bullet E = \frac{1}{\varepsilon} \nabla \bullet D = \frac{1}{\varepsilon} \rho = 0$$

จากสมการ (2.10) จะได้

$$\nabla^2 E - \mu\varepsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} - \mu\sigma \frac{\partial E}{\partial t} = 0 \qquad (2.11)$$

สมการที่ (2.11) คือ สมการคลื่นสำหรับ E ในทำนองเดียวกัน สามารถหาสมการคลื่นสำหรับ H ได้โดยหาเคิร์ลของสมการ (2.9) จะได้

$$\nabla x \nabla x H = \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} = 0$$

สมการ(2.12) คือ สมการคลื่นสำหรับ H

2.2.3 สมการของแมกซ์เวลล์ที่แปรเปลี่ยนตามเวลา

ในการปฏิบัติแหล่งกำเนิดส่วนมากจะทำให้ความแตกต่างและกระแสไฟฟ้ารวมทั้งสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กแปรเปลี่ยนตามเวลาเป็นเส้นโค้งรูปซายน์ ตัวอย่างเช่น

$$E = E_0 \cos\omega t = E_0 \cos 2\pi f t$$

หรือ $$E = E_0 \sin\omega t = E_0 \sin 2\pi f t \qquad (2.13)$$

เมื่อเป็นความถี่ของการแปรเปลี่ยนจากสมการ (2.13) แสดงว่าแฟกเตอร์ (Factor) เวลาที่เป็นเส้นโค้งรูปซายน์ปรากฏในทุกพจน์ในสมการใดๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อกำหนดให้ $E(r,t)$ เป็นสนามไฟฟ้าที่แปรเปลี่ยนตามเวลา

$E(r)$ เป็นสนามไฟฟ้าที่จุดๆ หนึ่งในปริภูมิ (space)

จะได้สนามไฟฟ้าที่แปรเปลี่ยนตามเวลามีรูปแบบดังนี้

$$E(r,t) = \mathrm{Re}[E(r)e^{j\omega t}] \tag{2.14}$$

เมื่อ $E(r)$ เป็นจำนวนเชิงซ้อน(complex number) ในทำนองเดียวกัน จะได้การขจัดไฟฟ้าความเข้มของสนามแม่เหล็กและสนามแม่เหล็กที่แปรเปลี่ยนตามเวลาดังนี้

$$D(r,t) = \mathrm{Re}[D(r)e^{j\omega t}] \tag{2.15}$$

$$H(r,t) = \mathrm{Re}[H(r)e^{j\omega t}] \tag{2.16}$$

$$B(r,t) = \mathrm{Re}[E(r)e^{j\omega t}] \tag{2.17}$$

เมื่อ $D(r), H(r), B(r)$ และเป็นจำนวนเชิงซ้อน

พิจารณาจากสมาการแมกซ์เวลล์ เคิร์ลของสนามแม่เหล็ก เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา

$$\nabla x H = \frac{\partial D}{\partial t} + j \tag{2.18}$$

แทนค่า $D(r,t)$ และ $H(r,t)$ จากสมการ (2.15) และ (2.16) ในสมการ (2.18) จะได้

$$\nabla x[\mathrm{Re}\,H(r)e^{j\omega t}] = \frac{\partial}{\partial t}[\mathrm{Re}\,D(r)e^{j\omega t}] + \mathrm{Re}[J(r)e^{j\omega t}]$$

$$\mathrm{Re}[\nabla x H(r)] = \mathrm{Re}[\,j\omega D(r) + J(r)]$$

ถ้าความสัมพันธ์นี้เป็นจริงทุกค่าของ t จะได้

$$\nabla x H = j\omega D + J \tag{2.19}$$

ในทำนองเดียวกัน จากสมการของแมกซ์เวลล์ เคิร์ลของสนามไฟฟ้าที่แปรเปลี่ยนตามเวลาจะได้

$$\nabla x E = -\frac{\partial B}{\partial t} \tag{2.20}$$

แทนค่า $E(r,t)$ และ $B(r,t)$ จากสมการ (2.15) และ (2.16) ในสมการ (2.20) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\nabla x[\mathrm{Re}\,E(r)e^{j\omega t}] = \frac{\partial}{\partial t}[\mathrm{Re}\,B(r)e^{j\omega t}]$$

$$\mathrm{Re}[\nabla xE(r)] = -\mathrm{Re}[j\omega B(r)]$$

$$\nabla xE = -j\omega B \qquad (2.21)$$

ดังนั้น สมการของแมกซ์เวลล์ที่แปรเปลี่ยนตามเวลาเป็นเส้นโค้งรูปซายน์ จึงมีรูปแบบดังสมการทั้งสี่ (2.22) ข้างล่าง โดยจัดในรูปแบบอนุพันธ์

$$\nabla \bullet D = \sigma$$

$$\nabla \bullet B = 0$$

$$\nabla xE = -j\omega B$$

$$\nabla xH = j\omega D + J \qquad (2.22)$$

2.2.4 การเดินทางของคลื่นในตัวกลางที่ไม่มีการสูญเสีย

สำหรับสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่แปรเปลี่ยนตามเวลาเป็นเส้นโค้งรูปซายน์ สมการคลื่นสำหรับสนามไฟฟ้าในตัวกลางที่ไม่มีการสูญเสียพลังงานมีรูปดังนี้

$$\nabla^2 E = \mu\varepsilon\frac{\partial^2 E}{\partial t^2}$$

แทนค่า $E(r,t) = \mathrm{Re}[E(r)e^{j\omega t}]$ จะได้

$$\nabla x[\mathrm{Re}\,E(r)e^{j\omega t}] = \mu\varepsilon\frac{\partial^2}{\partial t}[\mathrm{Re}\,B(r)e^{j\omega t}]$$

$$\mathrm{Re}\nabla^2 E(r) = \mu\varepsilon\,\mathrm{Re}(j\omega)^2 E(r)$$

$$\nabla^2 E = -\omega^2\mu\varepsilon E \qquad (2.23)$$

เรียกสมการ (2.23) ว่าสมการของเฮล์มโฮลซ์ ดังนั้นในตัวกลางที่เป็นตัวนำ ถ้าสนามไฟฟ้าแปรเปลี่ยนตามเวลา สมการคลื่น (2.11) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\nabla^2 E + \omega^2\mu\varepsilon E - j\mu\sigma E = 0$$

$$\nabla^2 E + (\omega^2\mu\varepsilon E - j\mu\sigma)E = 0 \qquad (2.24)$$

เมื่อ $\frac{\partial E}{\partial t} = j\omega E$ และ $\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = -\omega^2 E$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทำนองเดียวกัน สมการคลื่นสำหรับสนามแม่เหล็ก H (2.12) สามารถเขียนได้ในรูปแบบเดียวกัน ดังนี้

$$\nabla^2 E + (\omega^2 \mu\varepsilon - j\omega\mu\sigma)H = 0 \qquad (2.25)$$

เมื่อ $\frac{\partial E}{\partial t} = j\omega E$ และ $\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = -\omega^2 H$

สำหรับคลื่นระนาบสม่ำเสมอที่ไม่แปรเปลี่ยนตาม x และ y สมการคลื่นมีรูปแบบดังนี้

$$\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = -\omega^2 \mu\varepsilon E$$

หรือ
$$\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = -\beta^2 E \qquad (2.26)$$

เมื่อ
$$\beta = \omega\sqrt{\mu\varepsilon}$$

พิจารณาองค์ประกอบ $E_x(z)$ ผลเฉลยของสมการ (2.26) อาจเขียนอยู่ในรูปแบบดังนี้

$$E_x(z) = C_1 e^{-j\beta z} + C_2 e^{-j\beta z} \qquad (2.27)$$

เมื่อ C_1 และ C_2 เป็นค่าคงตัวเชิงซ้อน (Complex constant) สนามที่แปรเปลี่ยนตามเวลาคือ

$$E_x(z,t) = \mathrm{Re}[E_x(z)e^{j\omega t}]$$

แทนค่า $E_x(z)$ จากสมการ (2.27) จะได้

$$E_x(z,t) = \mathrm{Re}[C_1 e^{j(\omega t - \beta z)} + C_2 e^{j(\omega t + \beta z)}] \qquad (2.28)$$

ถ้าใช้ส่วนจริง (real part) ในสมการ (2.28) ผลเฉลยจะอยู่ในรูปแบบเส้นโค้งซายน์ ตัวอย่างเช่น เมื่อ C_1 และ C_2 เป็นค่าจริง สมการ (2.28) จะกลายเป็น

$$E_x(z,t) = C_1 \cos(\omega t - \beta z) + C_2 \cos(\omega t - \beta z) \qquad (2.29)$$

จะเห็นได้ว่าตัวกลางที่เป็นเนื้อเยื่อเดียวกันและไม่สูญเสียพลังงาน ถ้าสมมุติว่าการแปรเปลี่ยนตามเวลาเป็นเส้นโค้งรูปซายน์ จะทำให้การแปรเปลี่ยนของปริภูมิ หรือพิกัดเป็นเส้นโค้งรูปซายน์ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการ (2.28) และ (2.29) แทนสนามไฟฟ้าที่เป็นผลบวกของคลื่น 2 ขบวนที่เคลื่อนที่ในทิศตรงข้าม ถ้า $C_1 = C_2$ คลื่นเดินหน้า (traveling wave) ทั้ง 2 ขบวนจะรวมกันเป็นคลื่นนิ่ง (standing wave) โดยความเร็วคลื่นหรือความเร็วเฟส (phase velocity) มีค่าดังนี้

$$V = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}} = \frac{\omega}{\beta}$$

ถ้า f เป็นความถี่ของคลื่น

λ เป็นความยาวของคลื่น

จะได้ $$V = f\lambda = \frac{\omega}{\beta}$$

แต่ $$\omega = 2\pi f$$

ดังนั้น $$V = f\lambda = \frac{2\pi f}{\beta}$$

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \qquad (2.30)$$

เรียก β ว่า ค่าคงที่ทางเฟส (phase constant) ของคลื่น

2.2.5 การเดินทางของคลื่นในตัวกลางที่เป็นตัวนำ

สำหรับสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่แปรเปลี่ยนตามเวลาเป็นเส้นโค้งรูปซายน์ สามารถหาผลเฉลยของสมการคลื่นในตัวกลางที่เป็นตัวนำได้ สมการคลื่น (2.24) สามารถเขียนในรูปแบบสมการของเฮล์ม โฮลซ์ ได้ดังนี้

$$\nabla^2 E - \gamma^2 E = 0 \qquad (2.31)$$

เมื่อ $$\gamma^2 = j\omega\mu\sigma - \omega^2\mu\varepsilon = j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon) \qquad (2.32)$$

เรียก γ ว่าค่าคงตัวการแผ่ (Propagation constant) โดย γ เป็นจำนวนเชิงซ้อน ซึ่งมีส่วนจริง (real) คือ α โดยมีหน่วยเป็น Neper/m เป็นส่วนจินตภาพ (imaginary part) มีหน่วยเป็น radian/m คือ β

$$\gamma = \alpha + j\beta$$

เมื่อ $$\alpha = \mathrm{Re}\sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ $$\beta = \mathrm{Im}\sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon)}$$

เรียก α ว่า ค่าคงที่ของการลดทอน (Attenuation constant) ตามความเป็นจริงแล้ว รากที่สองของ γ^2 มี 2 ค่า คือ ค่าที่เป็น บวกค่าที่เป็นลบ แต่เพื่อความสะดวกจะต้องใช้ค่าที่เป็นบวก เมื่อพิจาณาคลื่นระนาบสม่ำเสมอที่เคลื่อนที่ในทิศ z สนามไฟฟ้าต้องสอดคล้องกับเงื่อนไขดังนี้

$$\frac{\partial E}{\partial z^2} = \gamma^2 E \tag{2.33}$$

ผลเฉลี่ยที่เป็นไปได้คือ

$$E(z) = E_0 e^{-\gamma z} \tag{2.34}$$

ในรูปแบบการแปรเปลี่ยนตามเวลา จะได้

$$E(z,t) = \mathrm{Re}[E_0 e^{j(\omega t - \beta z)}] \tag{2.35}$$

สมการ (2.35) คือ ผลเฉลยของสมการของคลื่นที่ในทิศ z และมีสนามไฟฟ้าลดลง โดยแฟกเตอร์ $e^{-\alpha z}$ ตามระยะทางที่เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกันกรณีของตัวกลางที่ไม่มีการสูญเสียพลังงานค่าคงตัวของการเลื่อนเฟส และความเร็วเฟสของคลื่นมีค่าดังนี้

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \text{ และ } V = f\lambda = \frac{\omega}{\beta}$$

นอกจากนี้ยังสามารถเขียน α และ β เป็นพจน์ของ α, μ และ ε ดังนี้

$$\alpha = \mathrm{Re}\sqrt{(j\omega\mu)(\sigma + j\omega\varepsilon)}$$

$$\alpha = \omega\sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2}}\left[\sqrt{\left(1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2\varepsilon^2}\right)} - 1\right] \tag{2.36}$$

$$\beta = \mathrm{Im}\sqrt{(j\omega\mu)(\sigma + j\omega\varepsilon)}$$

$$\beta = \omega\sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2}}\left[\sqrt{\left(1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2\varepsilon^2}\right)} + 1\right] \tag{2.37}$$

2.2.6 ตัวนำและไดอิเล็กตริก

ในทางแม่เหล็กไฟฟ้า วัสดุถูกแบ่งออกเป็น 2 พวก คือตัวนำ และไดอิเล็กตริกหรือฉนวน (Insulator) เส้นแบ่งระหว่าง 2 พวกนี้ไม่ชัดเจน ตัวอย่างเช่นโลก ในช่วงของความถี่วิทยุจัดเป็นตัวนำแต่ช่วยอื่นจัดเป็นไดอิเล็กตริก พิจารณาสมการของแมกซ์เวลล์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$VxH = JxjwD$$

แทนค่า $J = \sigma E$ และ $D = \varepsilon E$ จะได้

$$VxH = \sigma E + j\omega\varepsilon E$$

พจน์แรกทางขวาของสมการ คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Conduction current density) และพจน์ที่สอง คือ ความหนาแน่นกระแสการขจัด (Displacement current density) อัตราส่วน $\frac{j}{\omega D} = \frac{\sigma}{\omega\varepsilon}$ คือ อัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นกระแสการนำ และความหนาแน่นกระแสการกระจัดในตัวกลางเรียกอัตราส่วนนี้ว่า แฟกเตอร์การกระจาย (dissipation factor) ดังนั้น $\frac{\sigma}{\omega\varepsilon} = 1$ คือ เส้นที่แบ่งระหว่างตัวนำและไดอิเล็กติก สำหรับตัวนำ $\frac{\sigma}{\omega\varepsilon} > 1$ ส่วนไดอิเล็กตริก $\frac{\sigma}{\omega\varepsilon} < 1$

สำหรับตัวนำที่ดี เช่น โลหะ ในช่วงสเปกตรัมความถี่วิทยุ $\frac{\sigma}{\omega\varepsilon} >> 1$ จากสมการ (2.36) และ (2.37) จะได้

$$\alpha = \beta = \omega\sqrt{\frac{\mu\sigma}{2\omega}} = \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}}$$

ตัวอย่างเช่น ถ้าพิจารณาทองแดง ที่มีค่าความถี่สูงถึง 30,000 เมกกะเฮิรตซ์ $\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}$ มีค่าประมาณ 3.5×10^8

สำหรับไดอิเล็กตริกหรือฉนวนที่ดี ในช่วงความถี่ $\frac{\sigma}{\omega\varepsilon} << 1$ ตัวอย่างเช่น ไมกาในช่วงความถี่วิทยุที่คนได้ยิน $\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}$ อยู่ในระดับ 0.0002

สำหรับตัวนำที่ดี σ และ ε เกือบจะไม่ขึ้นกับความถี่ แต่สำหรับไดอิเล็กตริก σ และ ε เป็นฟังก์ชันของความถี่ แต่อัตราส่วน $\sigma/\omega\varepsilon$ เป็นค่าคงที่ในช่วงความถี่ที่พิจารณา ด้วยเหตุผลนี้สมบัติของไดอิเล็กตริกถูกกำหนดด้วยพจน์ของค่าคงตัวไดอิเล็กตริก σ และอัตราส่วน $\sigma/\omega\varepsilon$

2.2.7 การเดินทางของคลื่นในไดอิเล็กตริกที่ดี

กรณีของไดอิเล็กตริกที่ดี $\sigma/\omega\varepsilon << 1$ ดังนั้นจากการใช้ทฤษฎีบทไบโนเมียล (binomial theorem)

$$\sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2\varepsilon^2}} = 1 + \frac{\sigma^2}{2\omega^2\varepsilon^2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ซึ่งมีเพียงสองพจน์แรกของการขยายไบโนเมียลเท่านั้น จากสมการ (2.36) จะได้ α มีค่าดังนี้

$$\alpha = \omega\sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2}}[(1+\frac{\sigma^2}{2\omega^2\varepsilon^2})-1]$$

$$\alpha = \frac{\sigma}{2}\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \qquad (2.38)$$

ในทำนองเดียวกัน จากการใช้ทฤษฎีบทไบโนเมียล พจน์สำหรับ β จากสมการ (2.37) มีค่าดังนี้

$$\beta = \omega\sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2}}[(1+\frac{\sigma^2}{2\omega^2\varepsilon^2})+1]$$

$$\beta = \omega\sqrt{\omega\varepsilon}\sqrt{1+\frac{\sigma^2}{4\omega^2\varepsilon^2}}$$

จากการใช้ทฤษฎีบทไบโนเมียลอีกครั้งจะได้

$$\beta = \omega\sqrt{\mu\varepsilon[1+\frac{\sigma^2}{8\omega^2\varepsilon^2}]} \qquad (2.39)$$

$\omega\sqrt{\mu\varepsilon}$ คือ แฟกเตอร์การเลื่อนเฟส (phase factor) สำหรับไดอิเล็กตริกสมบูรณ์ (perfect dielectric) ถ้า v เป็นความเร็วคลื่นในไดอิเล็กตริก v มีค่าดังนี้

$$v = \frac{\omega}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon[1+\frac{\sigma^2}{8\omega^2\varepsilon^2}}} = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}}[1+\frac{\sigma^2}{8\omega^2\varepsilon^2}]$$

$$v = v_0[1-\frac{\sigma^2}{8\omega^2\varepsilon^2}] \qquad (2.40)$$

เมื่อ $V_0 = 1/\sqrt{\mu\varepsilon}$ เป็นความเร็วของคลื่นในไดอิเล็กตริกเมื่อสภาพนำไฟฟ้าเป็นศูนย์ ผลของการสูญเสียพลังงานเพียงเล็กน้อย ทำให้ความเร็วของการแผ่คลื่นลดลง

สำหรับความต้านทานเชิงซ้อนในตัว หรือความต้านทานเชิงซ้อนเฉพาะ z ของตัวกลางที่เป็นตัวนำบางส่วน ซึ่งมีค่าสภาพนำคงที่ และสนามแปรเปลี่ยนตามเวลา นิพจน์ทั่วไปของ z มีค่าดังนี้

$$Z = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\varepsilon}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
131165

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}\left[\frac{1}{1+\frac{\sigma}{j\omega\varepsilon}}\right] \tag{2.41}$$

จะเห็นได้ว่าในตัวนำที่ดี (Good conductor) σ มีค่ามากกว่า $\omega\varepsilon$ มากๆ ซึ่งหมายความว่า α, β และ γ มีค่ามากด้วย แสดงว่าคลื่นจะลดลงมากเมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวนำ และการเลื่อนเฟสต่อหนึ่งหน่วยความยาวมีค่ามาก ความเร็วของคลื่นซึ่งเป็นปฏิภาคผกผันกับ β จะมีค่าน้อยในตัวนำที่ดี ส่วนความต้านทานเชิงซ้อนเฉพาะมีค่าน้อย มุมของความต้านทานเชิงซ้อนมีค่า 45° เสมอสำหรับตัวนำที่ดี

$$z = \sqrt{\frac{\omega\mu}{\sigma}}\angle 45^\circ = \sqrt{\frac{\omega\mu}{\sigma}}e^{j\pi/4} \tag{2.42}$$

สำหรับฉนวนสมบูรณ์ $\sigma = 0$ จากสมการ (2.41) จะได้

$$z = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \tag{2.43}$$

สำหรับสุญากาศ $Z = Z_0$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = 120\pi \tag{2.44}$$

2.2.8 การเดินทางของคลื่นในตัวกลางกึ่งไดอิเล็กตริกกึ่งตัวนำ

สารกึ่งไดอิเล็กตริกกึ่งตัวนำ คือสารไดอิเล็กตริกที่มีสภาพการนำไฟฟ้าสูงพอประมาณ โดยมีค่า α อยู่ระหว่าง 0.01≈ 100 เท่าของ ε ค่าคงที่ของการเคลื่อนที่ γ (α กับ β) และค่าอิมพีแดนซ์ของสาร z จะได้ค่าสุดท้ายเป็นจำนวนเชิงซ้อนค่าหนึ่ง ซึ่งสามารถจะนำมาหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน α ค่าคงที่ทางเฟส β ตามลำดับดังนี้

$$\alpha = \mathrm{Re}\sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\mu\varepsilon)} \tag{2.45}$$

$$\beta = IM\sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\mu\varepsilon)} \tag{2.46}$$

และอิมพีแดนซ์ของเนื้อสาร Z

$$Z = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\varepsilon}} \tag{2.47}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.9 การเดินทางของคลื่นในตัวกลางที่เป็นเนื้อเยื่อ

เนื้อเยื่อปอดจัดเป็นตัวกลางที่มีค่าคงที่ประจำตัวกลาง เป็นตัวกลางชนิดกึ่งไดอิเล็กตริกกึ่งตัวนำ จากสมการของเฮล์โฮลตซ์ (Helmholtz) ในฟรีสเปซความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้าจะได้ดังสมการที่ (2.48)

$$\nabla^2 E + \omega^2 \mu \varepsilon E = 0 \tag{2.48}$$

ในกรณีที่ตัวกลางมีสภาพนำไฟฟ้าจำกัดที่ค่าๆ หนึ่ง เช่น คลื่นเดินทางผ่านตัวกลางที่เป็นเนื้อเยื่อจะได้ความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้าดังสมการที่ (2.49)

$$\nabla^2 E + \omega^2 \mu \varepsilon (1 + j\frac{\sigma}{\omega\varepsilon})E = 0 \tag{2.49}$$

และสมการหาสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเมื่อให้คลื่นเดินทางในทิศทาง+z

$$E = E_0 e^{-j\gamma_1 z} \tag{2.50}$$

เมื่อกำหนดให้ γ มีค่าดังสมการที่ (2.51)

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon)} = \omega\sqrt{\mu\varepsilon}\sqrt{(j\frac{\sigma}{\omega\varepsilon} - 1)} \tag{2.51}$$

โดยที่ γ เป็นค่าคงที่ในการเดินทางของคลื่น

$\alpha = \mathrm{Re}(\gamma)$ สัมประสิทธิ์ในการลดทอนของคลื่น

$\beta = IM(\gamma)$ ค่าคงที่ทางเฟส

สามารถหาสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นได้ดังสมการที่ (2.52)

$$H = \frac{\gamma}{j\omega\mu}(E_0 e^{-j\gamma_z Z}) \tag{2.52}$$

2.3 โหมดสำหรับการเดินทางของคลื่น (Wave Propagation Mode)

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ในสายส่งใดๆ นั้นจะมีลักษณะโหมดการเคลื่อนที่หรือลักษณะการเคลื่อนที่ภายในสายส่งนั้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะการพุ่งเข้าของคลื่นและรูปทรงภาคตัดขวางของสายส่งสัญญาณไฟฟ้านั้น โดยแต่ละโหมดจะมีรูปแบบของสนามไฟฟ้าที่มีรูปร่างลักษณะที่สอดคล้องกับภาคตัดขวางภายในของสายนั้นๆ ซึ่งในทางคณิตศาสตร์แล้วจะเปรียบเหมือนรูปทรงภาคตัดขวางว่าเป็นเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ภายในสายส่งสัญญาณไฟฟ้านั้นๆ สนามแม่เหล็กภาคตัดขวาง (Transverse fields) ที่เกิดขึ้นมานี้จะมีรูปแบบของสนามเฉพาะตัวที่เรียกว่า

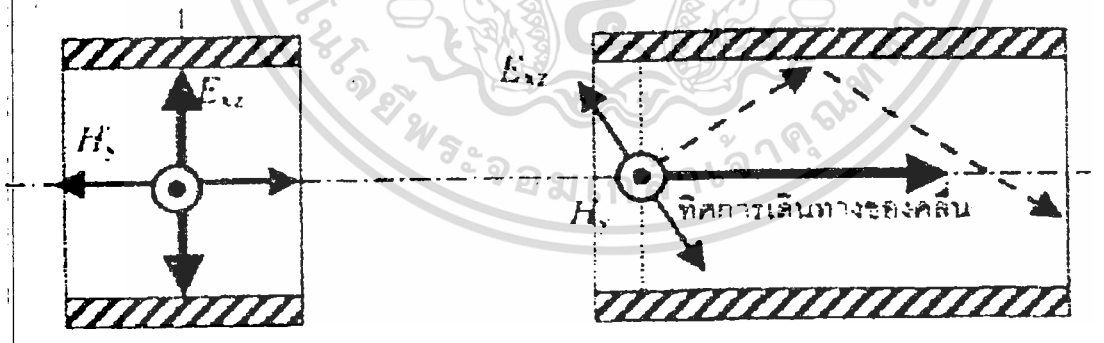
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โหมดภาคตัดขวาง (transverse mode) โดยทั่วไปแล้วสายส่งสัญญาณได้จำแนกตามประเภทของโหมดการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยจำแนกออกเป็นโหมดพื้นฐานได้สามแบบ คือ

ก) โหมดสนามแม่เหล็กตัดขวาง (Transverse Magnetic Mode :TM Mode) เป็นโหมดที่คลื่นเคลื่อนที่ไปตามตัวกลางโดยมีส่วนประกอบของสนามแม่เหล็กเท่านั้นที่มีการตั้งฉากกับทิศทางการเดินทางของคลื่นในสายส่งนั้นหรืออีกนัยหนึ่ง คือคลื่นจะเคลื่อนที่ไปตามตัวกลางโดยไม่มีสนามแม่เหล็กในทิศทางของคลื่นในสายส่ง ดูรูปประกอบการอธิบายได้ในรูปที่ 2.1(ก)

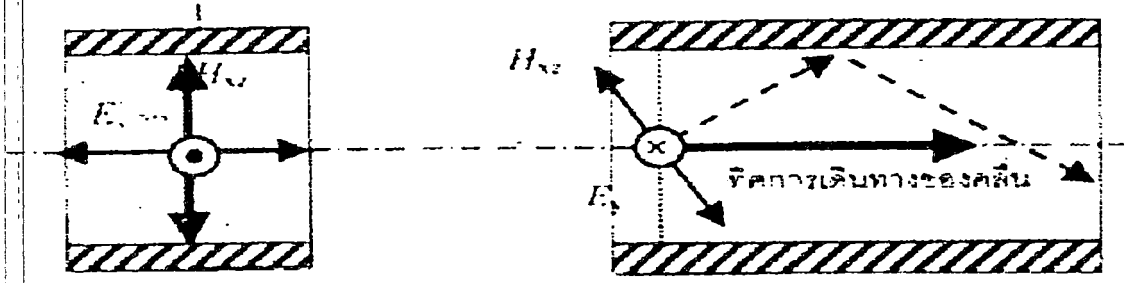
ข)โหมดสนามไฟฟ้าตัดขวาง (Transverse Electric Mode :TE mode) เป็นโหมดที่คลื่นเคลื่อนที่ไปตามตัวกลางโดยมีส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าเท่านั้นที่ตั้งฉากกับทิศทางการเดินทางของคลื่นในสายส่งนั้นหรืออีกนัยหนึ่งคือคลื่นจะเคลื่อนที่ไปตามตัวกลางโดยไม่มีสนามแม่เหล็กในทิศการเดินทางของคลื่นในสายส่ง ดูรูปประกอบการอธิบายได้ในรูปที่ 2.1(ข)

ค)โหมดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าตัดขวาง (Transverse Electromagnetic Mode :TEM mode) เป็นโหมดที่คลื่นเคลื่อนที่ไปตามตัวกลาง โดยมีส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางการเดินของคลื่นในสายส่งนั้น หรืออีกนัยหนึ่งคือคลื่นจะเคลื่อนที่ออกไปตามตัวกลางโดยไม่มีสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในทิศทางการเดินทางของคลื่นในสายส่งเลย ดูรูปประกอบการอธิบายได้ในรูปที่ 2.1(ค) โดยทั่วไปแล้วการเคลื่อนที่ในโหมดนี้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะต้องมีความสมมาตรกันหมด ดังเช่น คลื่นเคลื่อนที่ในอวกาศ ในสายโคแอกเชียล (Coaxial) และสายส่งอื่นๆในรูปที่ 2.1(ก) แต่อาจมีโอกาสที่สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีความสมมาตรไม่สมบูรณ์หมดดังเช่นคลื่นที่เคลื่อนที่ในสายส่งแบบไมโครสตริป (Microstrip) ในรูปที่ 2.1(ก) จึงเรียกโหมดย่อยนี้ว่า โหมดกึ่งสนามแม่เหล็กไฟฟ้าตัดขวาง (Quasi-TEM)

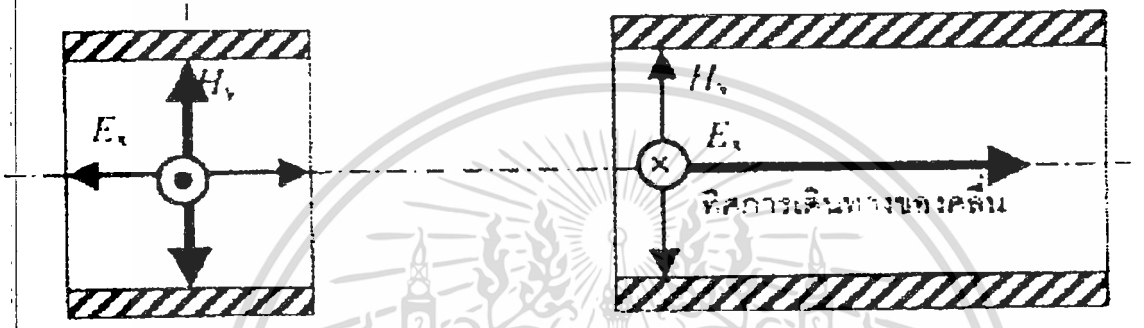


(ก) การเคลื่อนที่ของคลื่นในโหมดสนามแม่เหล็กตัดขวาง(TM mode)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) การเคลื่อนที่ของคลื่นในโหมดสนามไฟฟ้าตัดขวาง (TE mode)



(ค) การเคลื่อนที่ของคลื่นในโหมดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าตัดขวาง(TEM mode)

รูปที่ 2.1 สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กกับทิศการเดินของคลื่นในโหมดการเคลื่อนที่แบบต่างๆ

ตัวอย่างของโหมดการเคลื่อนที่ทั้งสามแบบของคลื่นที่เคลื่อนที่ในแผ่นตัวนำคลื่นรูปเหลี่ยมนี้ (Slab Waveguide) ได้แสดงดังในรูปที่ 2.1

ในการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสายส่งนั้น โดยทั่วไปแล้วจะต้องหาสมการคำตอบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กบนแกนต่างๆ ในที่ว่างอิสระทั้งหมดหกสนามด้วยกัน คือ E_x, E_y, E_z, H_x, H_y และ H_z แต่เมื่อมาทำการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของคลื่นในสายส่งสัญญาณแล้วสามารถที่จะกำหนดรูปแบบโหมดการเคลื่อนที่เพื่อที่จะลดจำนวนองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่จะคำนวณลงไปได้ เช่น ในกรณีที่คลื่นเคลื่อนที่ไปในทิศ z ในโหมด TM สามารถไม่นำ H_z (โดยมี H_z =0) มาพิจาณาจึงเหลือส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าและแม่เหล็กทั้งหมดห้าสนามด้วยกัน คือ E_x, E_z, H_x, H_y และ H_z ในทำนองเดียวกันในการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของคลื่นในโหมด TE จะเหลือส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กทั้งหมดห้าสนามด้วยกันคือ E_x, E_z, H_x, H_y และ H_z (โดยมี E_z =0) สำหรับการเคลื่อนที่ของคลื่นในโหมดสุดท้ายหรือโหมดTEM จะไม่มีสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทิศทางเคลื่อนที่หรือมีสนาม E_z กับ H_z = 0 จึงเหลือสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเพียงแค่สี่สนามคือ E_x, E_z, H_x และ H_y เท่านั้น

นอกจากนี้แล้วการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของโหมดต่างๆ สามารถทำให้ง่ายมากยิ่งขึ้นมาก ถ้าสมมุติการวิเคราะห์คลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้านั้นมีสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้าสนามใดสนามหนึ่งอยู่บนหลักต่างๆ นั่นคือ แกน x หรือ แกน y แล้วจะทำให้สามารถลดจำนวนสนามลงบนระนาบ xy สี่สนาม E_x, E_y, H_x และ H_y ลงมาเหลือเป็น E_x กับ H_y หรือ E_y กับ H_x เพียงแค่สองสนามเท่านั้น ดังนั้นสำหรับในกรณีที่คลื่นเคลื่อนที่ไปในทิศ z ในโหมด TM จะมีส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กทั้งหมดที่ต้องพิจารณาเหลือเพียงสามสนามด้วยกัน คือ E_x กับ E_z, E_y เพียง H_x กับ E_z เช่นเดียวกันสำหรับในกรณีที่คลื่นเคลื่อนที่ไปในทิศ z ในโหมด TE จะมีส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กทั้งหมดที่ต้องพิจารณาเหลือเพียงสามสนามด้วยกัน คือ E_x, H_y กับ E_z, E_y เพียง H_x กับ E_z เช่นเดียวกันสำหรับในกรณีที่คลื่นเคลื่อนที่ไปในทิศ z ในโหมด TE จะมีส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กทั้งหมดที่ต้องพิจารณาเหลือเพียงสามสนามด้วยกัน คือ E_x, H_y กับ H_z หรือ E_y, H_x กับ E_z ในทำนองเดียวกันการวิเคราะห์ของคลื่นในสายส่งเป็นคลื่นที่อยู่ในรูปของโหมด TEM สามารถทำการวิเคราะห์ได้ง่ายที่สุดโดยมีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเพียงแค่ E_x กับ H_y หรือ E_y กับ H_x เพียงแค่คู่สนามเดียวเท่านั้น เราจึงมักเริ่มทำการวิเคราะห์หาสมการของคลื่นที่โหมด TEM ก่อนเสมอ เนื่องจากเป็นโหมดที่ง่ายที่สุด

2.4 สนามไฟฟ้าในช่องว่างวัสดุ (Electric Fields in Material Space)

การพิจารณาถึงสนามไฟฟ้าสถิตในช่องว่างอวกาศว่าง (free space) หรือสุญากาศ (Vacuum) หรือบริเวณที่ไม่มีวัสดุอยู่ (no material) ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 4 ในบทนี้เราจะพัฒนาขึ้นไปอีก สนามไฟฟ้าสามารถเกิดขึ้นได้ในอวกาศว่าง มันอาจจะเกิดขึ้นได้ในตัวกลางวัสดุ (material media) เช่น ตัวกลางที่เป็นกระดาษ ฯลฯ ที่คั่นอยู่ระหว่างขั้วทั้งสองตัวเก็บประจุ เราจะเรียกว่าเป็นตัวกลางวัสดุ วัสดุอาจถูกจำแนกอย่างคร่าวๆ ตามคุณสมบัติของไฟฟ้าของมันได้ ดังเช่น ตัวนำไฟฟ้า(Conductor) และตัวไม่นำไฟฟ้า (nonconductor) ซึ่งไม่นำไฟฟ้าหรือวัสดุไม่นำไฟฟ้า (nonconducting material) โดยปกติจะเรียกว่า ตัวฉนวน(insulator) หรือไดอิเล็กตริก (Dielectric) และโดยทั่วๆ ไป การพิจารณาอย่างคร่าวๆ ถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุจะขึ้นอยู่กับพื้นฐานความเข้าถึงแนวความคิดเกี่ยวกับ การนำ (conduction), กระแสไฟฟ้า (Electric current) และการโพลาไรซ์ (polarization) และนอกจากนั้นก็จะต้องพิจารณาถึงคุณสมบัติของวัดสุไดอิเล็กตริก (dielectric meteril)

2.4.1 วัสดุตัวกลาง (Material Media) ในสนามไฟฟ้าสถิต (Static Electric Field)

เราได้พิจารณาถึงสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการกระจายของประจุอยู่กับที่ในอากาศหรืออวกาศว่างมาแล้ว และจากนี้ไปเราจะได้ศึกษาถึงพฤติกรรมของสนามในวัสดุตัวกลาง (material media) โดยทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราสามารถจำแนกวัสดุตามคุณสมบัติทางไฟฟ้าได้เป็นสามชนิด คือ ตัวนำ (conductor) สารกึ่งตัวนำ (semiconductor) และตัวฉนวน (insulator หรือ dielectric) ตามการพิจารณาข้างต้นเราได้ทราบแล้วว่าการที่วัสดุจะเป็นตัวนำสารกึ่งตัวนำ หรือตัวนำฉนวนนั้น จะขึ้นอยู่กับอิเล็กตรอนอิสระที่เคลื่อนที่จากอะตอมหนึ่งไปยังอีกอะตอมหนึ่ง

2.4.2 ตัวนำ (Conductors) ในสนามไฟฟ้าสถิต

โดยทั่วไปแล้วปัญหาแม่เหล็กไฟฟ้าจะเกี่ยวข้องกับตัวกลางที่มีคุณสมบัติทางฟิสิกส์หลายอย่างและยังต้องทราบถึงความสัมพันธ์ของปริมาณสนามที่ขอบร่วม (interface) ระหว่างสองตัวกลาง ดังเช่น เราอาจจะต้องการหาวิธีการที่ E และ D เปลี่ยนไปตรงขอบร่วม ซึ่งเราทราบมาแล้วว่าเงื่อนไขขอบจะต้องสอดคล้องที่ขอบร่วมระหว่างตัวนำกับอากาศว่าง และเงื่อนไขเหล่านี้ได้กำหนดไว้ในสมการที่ (2.53) และ (2.54)

$$\vec{E}_t = 0 \tag{2.53}$$

$$\vec{E}_n = \frac{\rho_s}{\varepsilon_0} \tag{2.54}$$

2.4.3 ไดอิเล็กตริก (Dielectrics) ในสนามไฟฟ้าสถิต

ตัวกลางวัสดุทุกชนิดจะประกอบไปด้วยอะตอมที่มีนิวเคลียสประจุบวกถูกล้อมรอบด้วยอิเล็กตรอนประจุลบ ถึงแม้ว่าโมเลกุลของไดอิเล็กตริกจะเป็นกลางแบบมาโครสโคปิก (macroscopically neutral) แต่การมีสนามไฟฟ้าอยู่ภายนอกจะเป็นเหตุทำให้เกิดแรงกระทำบนแต่ละอนุภาคประจุ และเป็นเหตุทำให้เกิดการเข้าแทนที่กันของประจุบวกและประจุลบในระยะสั้นๆ ในทิศทางตรงข้ามกัน ซึ่งประจุเหล่านี้คือประจุผูกพัน (bound charge) การเข้าแทนที่กันถึงแม้ว่าจะเป็นระยะสั้นๆ เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของอะตอม การเป็นขั้วหรือโพลาไรซ์ (polarize) ของวัสดุไดอิเล็กตริกจะเข้ามาเกี่ยวข้อง และไดโพลไฟฟ้า (electric dipole) จะเกิดขึ้นเสมอ ตำแหน่งในการเคลื่อนที่ดังกล่าวนี้ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งในขณะที่ไดโพลไฟฟ้าเกิดขึ้นนั้นศักย์ไฟฟ้า และความเข้มสนามไฟฟ้าจะต้องปรากฏขึ้นด้วย

รูปที่ 2.2 ภาคตัดขวางของตัวกลางไดอิเล็กตริกโพลาไรซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.4 เงื่อนไขขอบ (Boundary Condition) ของสนามไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Field)

จากนี้ไปเราจะพิจารณาถึงสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในตัวกลางไม่เอกพันธ์ (nonhomogeneous medium) ดังเช่นสนามที่เกิดขึ้นในบริเวณที่ประกอบด้วยสองตัวกลางที่ต่างกัน ทั้งนี้เงื่อนไขต่างๆ ที่สนามจะต้องสอดคล้องที่ขอบร่วมซึ่งแยกระหว่างตัวกลางทั้งสอง เรียกเงื่อนไขนี้ว่า เงื่อนไขขอบ (boundary condition) เงื่อนไขต่างๆ เหล่านี้จะเป็นประโยชน์ในการหาสนามบนด้านหนึ่งถ้ารู้สนามบนอีกด้านหนึ่งของขอบ เงื่อนไขจะช่วยให้เราจำแนกชนิดของวัสดุได้อย่างชัดเจนว่าเป็นตัวกลางอะไร เราจะพิจารณาเงื่อนไขขอบที่การแยกขอบร่วมระหว่าง

1. ไดอิเล็กตริก E_{r1} และไดอิเล็กตริก E_{r2}

2. ตัวนำไฟฟ้า และไดอิเล็กตริก

3. ตัวนำไฟฟ้า และอากาศว่าง

ซึ่งก่อนที่จะพิจารณาขอบร่วมทั้งสามข้างต้น ในการกำหนดเงื่อนไขขอบ เราต้องใช้สมการของแมกซ์เวลล์สำหรับสนามไฟฟ้าสถิตคือ

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0 \tag{2.55}$$

สมการที่ (2.54) เป็นสมการสนามไฟฟ้าสถิต E ของแมกซ์เวลล์ ซึ่ง $\oint_L$ เป็นการอินทิเกรตวิถีปิด (close path) และ

$$\oint \vec{D} \cdot d\vec{s} = Q_{enc} \tag{2.56}$$

สมการที่ (2.55) เป็นสมการสนามไฟฟ้าสถิต $\vec{D}$ ของแมกซ์เวลล์ซึ่ง $\oint_L$ เป็นการอินทิเกรตพื้นผิวปิด (close surface) และในเวลาเดียวกันเราจะต้องแยกความเข้มสนามไฟฟ้า ออกเป็นสองส่วนประกอบตั้งฉาก (orthogonal component) คือ

$$\vec{E} = \vec{E}_t + \vec{E}_n \tag{2.57}$$

เมื่อ E_t คือส่วนประกอบแนวสัมผัส (tangential component) กับขอบร่วมและ E_t คือส่วนประกอบแนวตั้งฉาก (normal component) กับขอบร่วม และในลักษณะเดียวกันนี้เราสามารถแยกความหนาแน่น ฟลักซ์ไฟฟ้า D ออกเป็นสองส่วนประกอบด้วย

2.4.5 เงื่อนไขขอบระหว่างไดอิเล็กตริกกับไดอิเล็กตริก (Dielectric-Dielectric Boundary Condition)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาสนาม E ที่เกิดขึ้นในบริเวณที่ประกอบด้วยไดอิเล็กตริกสองชนิด ซึ่งกำหนดคุณลักษณะของไดอิเล็กตริกที่ 1 ด้วย $\varepsilon_1 = \varepsilon_0 \varepsilon_{r1}$ และคุณลักษณะของไดอิเล็กตริกที่ 2 กำหนดด้วย $\varepsilon_2 = \varepsilon_0 \varepsilon_{r2}$ ดังแสดงในรูปที่ 2.3(ก) $\vec{E}_1$ และ $\vec{E}_2$ เป็นสนามไฟฟ้าในตัวกลางที่ 1 และตัวกลางที่ 2 เราสามารถแยกสนามไฟฟ้าได้คือ

$$\vec{E}_1 = \vec{E}_{1t} + \vec{E}_{1n} \tag{2.58}$$

$$\vec{E}_2 = \vec{E}_{1n} + \vec{E}_{2n} \tag{2.59}$$

ประยุกต์ใช้สมการที่ (2.57) กับวิถีปิด abcda ของรูปที่ 2.3(ก) โดยสมมุติให้วิถีมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของ E จะได้

$$0 = \vec{E}_{1t}\Delta w - \vec{E}_{1n}(\frac{\Delta h}{2}) - \vec{E}_{2n}(\frac{\Delta h}{2}) - \vec{E}_{2t}\Delta w + \vec{E}_{2n}(\frac{\Delta h}{2}) + \vec{E}_{1n}(\frac{\Delta h}{2})$$

(2.60)

เมื่อ $\vec{E}_t = |E_t|$ และ $\vec{E}_n = |E_n|$ ในขณะที่ Δh เข้าสู่ 0 (วิถีขนาดเล็กมาก) สมการที่ (2.60) จะเปลี่ยนเป็น

$$\vec{E}_{1t} = \vec{E}_{2t} \tag{2.61}$$

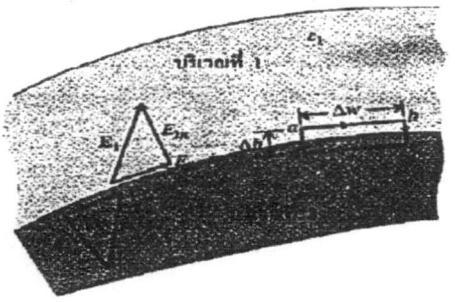
ส่วนประกอบแนวสัมผัสในตัวกลางที่ $(\vec{E}_{1t})$ เหมือนกับ

ส่วนประกอบแนวสัมผัสในตัวกลางที่ 2 $(\vec{E}_{2t})$

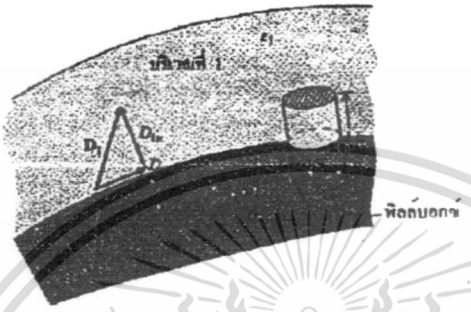
ดังนั้นส่วนประกอบแนวสัมผัสของ E บนด้านทั้งสองของขอบจะเหมือนกัน $(\vec{E}_{1t} = \vec{E}_{2t})$ หรืออาจหมายถึงว่า E_t จะไม่เปลี่ยนแปลงบนขอบและจะกล่าวได้ว่า $\vec{E}_t$ ต่อเนื่อง (continuous) ตรงบริเวณขอบ เนื่องจาก $\vec{D} = \varepsilon\vec{E} = \varepsilon\vec{E}_1 + \varepsilon\vec{E}_n = \vec{E}_t + \vec{E}_n$ ดังนั้นจากสมการที่ (2.62) จะกำหนดได้ว่า

$$\frac{\vec{D}_{1t}}{\varepsilon_1} = \vec{E}_{1t} = \vec{E}_{2t} = \frac{\vec{D}_{2t}}{\varepsilon_2} \tag{2.62}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.3 ขอบเขตระหว่างไดอิเล็กตริกกับไดอิเล็กตริก

หรือ
$$\frac{\vec{D}_{1t}}{\varepsilon_1} = \frac{\vec{D}_{2t}}{\varepsilon_2} \qquad (2.63)$$

นั่นคือ $\vec{D}_1$ จะเปลี่ยนแปลงตรงขอบร่วม $\vec{D}_t$ ดังนั้น กล่าวได้ว่า ไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous) ตรงขอบร่วม

ในทำนองเดียวกันนี้ เมื่อประยุกต์ใช้สมการที่ (2.57) กับพิลบอกซ์ (pillbox) หรือ พื้นผิวแบบเกาส์ (Gaussian surface) ในรูปที่ 2.3 (ข) โดยให้ Δh เข้าสู่ศูนย์จะได้ว่า

$$\Delta q = \rho_s \Delta s = \vec{D}_s \Delta S - \vec{D}_s \Delta S \qquad (2.64)$$

หรือ
$$\vec{D}_{1n} - \vec{D}_{2n} = \rho s \qquad (2.65)$$

ความแตกต่างระหว่างส่วนประกอบแนวตั้งฉากของความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้าในบริเวณที่ 1 และบริเวณที่ 2 เท่ากับความหนาแน่นประจุพื้นผิว ρ_s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ ρ_s เป็นความหนาแน่นประจุอิสระที่อยู่อย่างมั่นคงที่ขอบ สมการที่ (2.65) จะขึ้นอยู่กับพื้นฐานของการสมมุติว่า $\vec{D}$ มีทิศทางจากบริเวณที่ 2 ไปยังบริเวณที่ 1 และสมการที่ (2.65) จะต้องถูกนำมาประยุกต์ใช้ตามนี้ด้วยถ้าไม่มีประจุอิสระเกิดขึ้นที่ขอบร่วม ρ_s และสมการที่ 2.65 จะกลายเป็น

$$\vec{D}_{1t} = \vec{D}_{2t} \qquad (2.66)$$

ตรงบริเวณขอบร่วมไม่มีประจุพื้นผิว ρ_s

ดังนั้นส่วนประกอบแนวตั้งฉากของ $\vec{D}_n$ จึงต่อเนื่องตรงขอบร่วมนั่นคือ $\vec{D}_n$ จะไม่เปลี่ยนแปลงที่ขอบ เนื่องจาก $\vec{D} = \varepsilon\vec{E}$ สมการที่ (2.66) จึงสามารถกำหนดได้ว่า

$$\varepsilon_1 \vec{E}_{1n} = \varepsilon_2 \vec{E}_{2n} \qquad (2.67)$$

สมการที่ (2.67) แสดงให้เห็นว่า ส่วนประกอบแนวตั้งฉากของ $\vec{E}$ ไม่ต่อเนื่องที่ขอบ สมการที่ (2.63) และ (2.65) หรือ (2.66) จะกล่าวได้อย่างถูกต้องว่าเป็นเงื่อนไขขอบ (boundary conditions) ซึ่งสมการเหล่านี้ต้องสอดคล้องตามสนามไฟฟ้าที่ขอบที่ถูกแยกด้วยไดอิเล็กตริกที่ต่างกันทั้งสอง

รูปที่ 2.4 ขอบร่วมระหว่างสองตัวกลาง

การพิจารณาความเข้มสนามไฟฟ้า $\vec{E}$ และความหนาแน่นสนามไฟฟ้า $\vec{D}$ ข้างต้นอาจจะพิจารณาได้จากการอินทิเกรตวิถีปิด (close path) เราลองมาพิจารณาขอบร่วมระหว่างสองตัวกลางทั่วไปในรูปที่ 2.4 ซึ่งถ้าเรามากำหนดวิถีขนาดเล็ก (small path) abcda ซึ่งประกอบด้วยด้าน ab ในบริเวณที่ 1 และด้าน cd ในบริเวณที่ 2 โดยทั้งนี้ด้านทั้งสองจะขนานกับขอบร่วมและยาวเท่ากับ Δw เราจะประยุกต์ใช้สมการที่ (2.56) กับเส้นทางเดิน (วิถี) ขนาดเล็กนี้ ถ้ากำหนดให้ $bc = da = \Delta h$ มีค่าเข้าสู่ศูนย์ ดังนั้นอินทิกรัลตามเส้นทางทั้งสองนี้สามารถตัดทิ้งได้ เพราะฉะนั้นอินทิกรัลตามเส้นบนทางเดิน (วิถี) abcda คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\oint_{abcda} \vec{E} \bullet dl = \vec{E}_1 \bullet \Delta w + \vec{E}_1 \bullet \Delta w$$

$$= \vec{E}_{1t} \bullet \Delta w + \vec{E}_{2t} \bullet \Delta w$$

$$= 0$$

เพราะฉะนั้น

$$\vec{E}_{1t} = \vec{E}_{2t} V/m \tag{2.68}$$

เงื่อนไขขอบของส่วนประกอบแนวสัมผัสของ E

(Boundary condition for tangential component of E)

ในสมการที่ (2.68) แสดงให้ทราบว่า ส่วนประกอบแนวสัมผัสของสนาม $\vec{E}$ ต่อเนื่องตรงบริเวณขอบร่วม (tangential component of an E field is continuous across an interface) เมื่อบริเวณที่ 1 มีสภาพยอมเป็น ε_1 และบริเวณที่ 2 มีสภาพยอมได้ทางไฟฟ้าเป็น ε_2 ดังนั้นสามารถกำหนดได้ว่า

$$\frac{\vec{D}_{1t}}{\varepsilon_1} = \frac{\vec{D}_{1n}}{\varepsilon_1} \tag{2.69}$$

เพื่อที่จะหาความสัมพันธ์ระหว่างส่วนประกอบแนวฉากของสนามที่ขอบ เราจะต้องสร้างพิลล์บอกซ์ขนาดเล็ก (pillbox) ที่มีผิวด้านบนอยู่ในบริเวณที่และมีผิวด้านล่างอยู่ในบริเวณที่ *2* ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ถ้าผิวมีพื้นที่ ΔS และความสูงของพิลล์บอกซ์ขนาดเล็กคือ Δh เมื่อประยุกต์ใช้กฎของเกาส์ ในสมการที่ (2.55) กับพิลล์บอกซ์ขนาดเล็กนี้จะได้รับ

$$\oint_L \vec{D} \bullet ds = (\vec{D}_1 \bullet a_{n1} + \vec{D}_2 a_{n1}) \Delta S$$

$$= a_{n2} \bullet (\vec{D}_1 - \vec{D}_2) \Delta S$$

$$= \rho_s \Delta S \tag{2.70}$$

ในสมการข้างต้นเราได้ใช้ความสัมพันธ์ $an_2 = -an_1$ โดยที่เวกเตอร์ an_1 และ an_2 เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยตั้งฉากชี้ออกจากบริเวณที่ 1 และบริเวณที่ 2 ตามลำดับ ซึ่งจากสมการที่ (2.70) เราจะได้ว่า

$$a_{n2} \bullet (\vec{D}_1 - \vec{D}_2) = \rho_s \tag{2.71}$$

หรือ

$$\vec{D}_1 - \vec{D}_2 = \rho s \quad C/m^2 \tag{2.72}$$

สมการที่ (2.71) แสดงให้เห็นว่า ส่วนประกอบแนวฉาก (ตั้งฉาก) ของสนามจะไม่ต่อเนื่องตรงบริเวณขอบร่วมที่ซึ่งมีประจุตามพื้นผิวเกิดขึ้น ซึ่งจำนวนที่ไม่ต่อเนื่องจะเท่ากับความหนาแน่นประจุตามพื้นผิว ถ้าบริเวณที่ 2 เป็นตัวนำ $\vec{D}_2 = 0$ สมการที่ (2.71) จะกลายเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{D}_{1n} = \varepsilon_2 \bar{E}_{2n} = \rho_s \tag{2.73}$$

ซึ่งเพื่อให้ง่ายเข้า สมการที่ (2.72) จะกลายเป็น $\bar{E}_n = \rho_s / \varepsilon_0$ เมื่อบริเวณที่ 1 เป็นอากาศว่าง

เมื่อเรานำเอาไดอิเล็กตริกสองอันมาประกบกันโดยไม่มีประจุอิสระที่ขอบร่วมระหว่างไดอิเล็กตริกทั้งสอง ρ_s ดังนั้น

$$\bar{D}_{1n} = \bar{D}_{2n} \tag{2.74}$$

หรือ

$$\varepsilon_1 \bar{E}_{1n} = \varepsilon_2 \bar{E}_{2n} \tag{2.75}$$

ตามที่ได้กล่าวข้างต้นเราพอจะสรุปเงื่อนไขขอบที่จะต้องสอดคล้องในกรณีของสนามไฟฟ้าสถิตได้ดังนี้คือ

ส่วนประกอบแนวสัมผัส $\bar{E}_{1t} = \bar{E}_{2t}$ (2.76)

ส่วนประกอบแนวตั้งฉาก $a_{n2} \bullet (\bar{D}_1 - \bar{D}_2) = \rho_s$ (2.77)

เงื่อนไขขอบของสนามไฟฟ้าสถิต

(Boundary conditions for electrostatic fields)

ดังที่ได้กล่าวไปแล้วว่า โดยปกติเงื่อนไขขอบจะประยุกต์ใช้หาสนามไฟฟ้าบนด้านหนึ่งเมื่อทราบสนามไฟฟ้าบนอีกด้านหนึ่งของขอบ และนอกจากนี้เรายังสามารถใช้เงื่อนไขขอบเพื่อกำหนดการหักเห (refraction) ของสนามไฟฟ้าตรงของร่วม ซึ่งตามการพิจารณา $\bar{D}_1$ หรือ $\bar{E}_1$ และ $\bar{D}_2$ หรือ $\bar{E}_2$ จะเห็นว่ามันทำมุมกับเส้นปกติ เส้นแนวฉาก เป็นมุม θ_1 และ θ_2 ดังแสดงในรูปที่ 2.5 และโดยอาศัยสมการที่ (2.60) จะได้ว่า

$$\bar{E}_1 \sin\theta_1 = \bar{E}_{1t} = \bar{E}_{2t} = \bar{E}_2 \sin\theta_2 \tag{2.78}$$

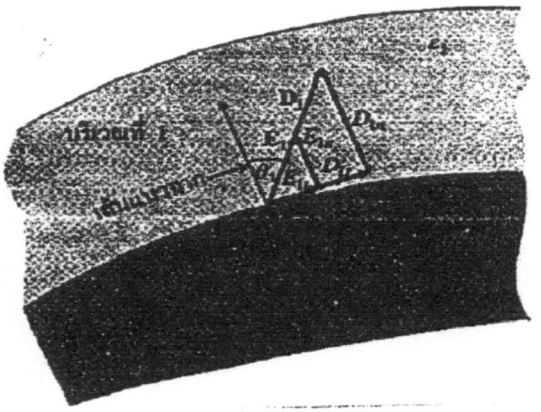
หรือ

$$\bar{E}_1 \sin\theta_1 = \bar{E}_2 \sin\theta_2 \tag{2.79}$$

ในลักษณะเดียวกันนี้ เมื่อประยุกต์ใช้สมการที่ (2.66) หรือ (2.67) จะได้รับ

$$\varepsilon_1 \bar{E}_1 \cos\theta_1 = \bar{D}_{1n} = \bar{D}_{2n} = \varepsilon_2 \bar{E}_2 \cos\theta_2 \tag{2.80}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 การหักเหของ $\bar{E}$ หรือ $\bar{D}$ ที่ขอบเขตระหว่างไดอิเล็กตริกกับไดอิเล็กตริก

หรือ
$$\varepsilon_1 \bar{E}_1 \cos\theta_1 = \varepsilon_2 \bar{E}_2 \cos\theta_2 \tag{2.81}$$

หารสมการที่ (2.80) ด้วยสมการที่ (2.81) จะได้

$$\frac{\tan\theta_1}{\varepsilon_1} = \frac{\tan\theta_2}{\varepsilon_2} \tag{2.82}$$

เนื่องจาก $\varepsilon_1 = \varepsilon_0 \varepsilon_{r1}$ และ $\varepsilon_2 = \varepsilon_0 \varepsilon_{r2}$ ด้วยสมการที่ (2.82) จะได้

$$\frac{\tan\theta_1}{\tan\theta_2} = \frac{\varepsilon_{r1}}{\varepsilon_{r2}} \tag{2.83}$$

กฎการหักเหของสนามไฟฟ้าที่ขอบซึ่งปราศจากประจุ

สมการที่ (2.83) เป็นกฎการหักเหของสนามไฟฟ้าที่ขอบซึ่งปราศจากประจุ (เนื่องจากสมมุติให้ $\rho_s = 0$ ที่ขอบร่วม) ดังนั้นโดยทั่วไปที่ขอบร่วมระหว่างสองไดอิเล็กตริกที่แตกต่างกันจะทำให้เกิดการโค้งตัวของเส้นฟลักซ์ ตามผลลัพธ์ของประจุการโพลาไรซ์ที่ไม่เท่ากัน ซึ่งจะสะสมเพิ่มพูนขึ้นบนด้านทั้งสองของขอบร่วม

2.4.6 เงื่อนไขขอบระหว่างตัวนำไฟฟ้ากับไดอิเล็กตริก (Conductor-Dielectric Condition)

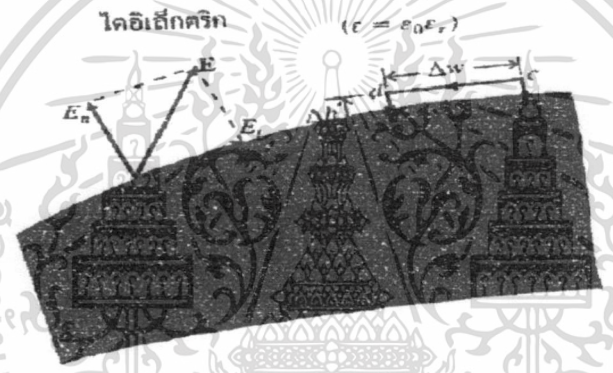
เงื่อนไขขอบระหว่างตัวนำไฟฟ้ากับไดอิเล็กตริกจะพิจารณาได้จากรูปที่ 2.6 ซึ่งสมมุติให้ตัวนำไฟฟ้าเป็นตัวนำที่สมบูรณ์ (คือมี $\sigma \to \infty$ หรือ $\rho \to 0$) ทั้งนี้ถึงแม้ว่าในทางปฏิบัติจะไม่มีตัวนำชนิดนี้ก็ตาม แต่เราอาจจะพิจารณาให้ตัวนำไฟฟ้า อย่างเช่น ทองแดง และเงิน เป็นตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์ จากกฎของโอห์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

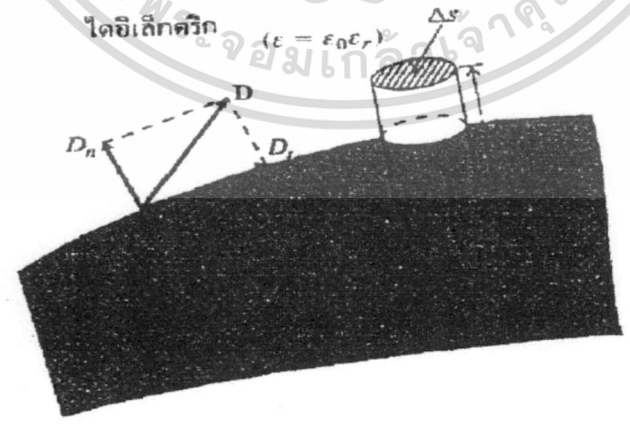
$\vec{j} = \sigma E$ จะยังคงรักษาความหนาแน่นกระแสจำนวนไว้ในตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์ ในขณะที่สนามไฟฟ้าภายในตัวนำจะไม่เกิดขึ้น หรือในอีกความหมายหนึ่งนั้น $E \to 0$ เนื่องจากว่า $\sigma \to \infty (E = j/\sigma)$ ในตัวนำไฟฟ้าซึ่งถ้ามีประจุอยู่ภายในตัวนำไฟฟ้าข้างต้น ประจุจะเคลื่อนย้ายไปยังพื้นผิวตัวนำไฟฟ้า และจะกระจายอีกครั้งหนึ่งในลักษณะที่สนามภายในตัวนำไฟฟ้าไม่ปรากฏขึ้น (ไม่มีสนาม) ตามกฎของเกาส์ถ้า $E = 0$ ความหนาแน่นประจุ ρ_v จะต้องเป็นศูนย์ ดังนั้นเราสามารถสรุปได้ว่าตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์ไม่สามารถรวบรวมสนามไฟฟ้าสถิตไว้ภายในตัวมันได้

เพื่อที่จะกำหนดเงื่อนไขขอบของขอบร่วมระหว่างตัวนำไฟฟ้ากับไดอิเล็กตริก เราจะดำเนินการตามขั้นตอนที่ใช้พิจารณาขอบร่วมระหว่างไดอิเล็กตริกกับไดอิเล็กตริก ซึ่งเรากำหนดตามความจริงได้ว่าภายในตัวนำไฟฟ้า และเมื่อประยุกต์ใช้สมการ กับวิถีปิด (วิถี abcda) ของรูปที่ 2.6(ก) จะได้ว่า

$$0 = 0 \cdot \Delta w + 0(\frac{\Delta h}{2}) + \bar{E}_n(\frac{\Delta h}{2}) - \bar{E}_t(\frac{\Delta h}{2}) - 0(\frac{\Delta h}{2}) \qquad (2.84)$$



(ก)



(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.6 ขอบเขตระหว่างตัวนำไฟฟ้ากับไดอิเล็กตริก

ในทำนองเดียวกัน เมื่อประยุกต์ใช้สมการที่ (2.56) กับพิลล์บอกซ์ของรูปที่ 2.6(ข) และกำหนดให้ $\Delta h \to 0$ จะได้

$$\Delta Q = D_n S - 0 \cdot \Delta S \tag{2.85}$$

เพราะว่า $\vec{D} = \varepsilon \vec{E}$ ภายในตัวนำไฟฟ้า สมการที่ (2.85) จะเขียนได้ว่า

$$\vec{D}_n = \frac{\Delta Q}{\Delta S} = \rho_s \tag{2.86}$$

หรือ $$\vec{D}_n = \rho_s \tag{2.87}$$

ดังนั้นภายใต้เงื่อนไขสถิตที่เกี่ยวข้องกับตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์ พอจะสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. ไม่มีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นภายในตัวนำไฟฟ้า นั่นคือ

$$\rho_v = 0 \text{ และ } \vec{E} = 0 \tag{2.88}$$

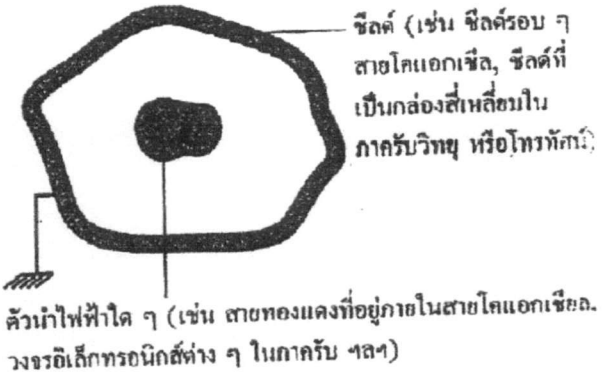
2. เนื่องจาก $E = -V = 0$ ดังนั้นจึงไม่มีความต่างศักย์ ระหว่างจุดสองจุดใดๆ ในตัวนำไฟฟ้า นั่นคือ ตัวนำไฟฟ้าเป็นวัตถุศักย์เท่า (equipotential body)

3. สนามไฟฟ้า E จะอยู่ภายนอกตัวนำไฟฟ้าเท่านั้น และจะตั้งฉากกับพื้นผิวของตัวนำไฟฟ้า คือ

$$\vec{D}_t = \varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{E}_t = 0, \vec{D}_n = \varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{E}_t = 0 \tag{2.89}$$

การประยุกต์ใช้ที่สำคัญจริงๆ ที่ว่า E=0 ภายในตัวนำไฟฟ้าอยู่ในการกลั่นกรองไฟฟ้าสถิต (electrostatic screening หรือ electrostatic shielding: การชิลด์ไฟฟ้าสถิต) ดังตัวอย่าง ชิลด์ที่อยู่รอบๆ สายโคแอคเชียล (coaxial cable : สายเคเบิลร่วม) ดังรูปที่ 2.7 ซึ่งภาคตัดขวางของสาย (หรืออุปกรณ์)ใดๆ ที่ต้องการชิลด์ประกอบด้วย A ซึ่งทำหน้าที่กลั่นกรอง (screen หรือ shield) ทางไฟฟ้าเพื่อทำให้ศักย์รอบๆ ตัวนำไฟฟ้า B ซึ่งเกิดขึ้นจากระบบไฟฟ้าอื่นๆ เป็นศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 การกลั่นกรองไฟฟ้าสถิต

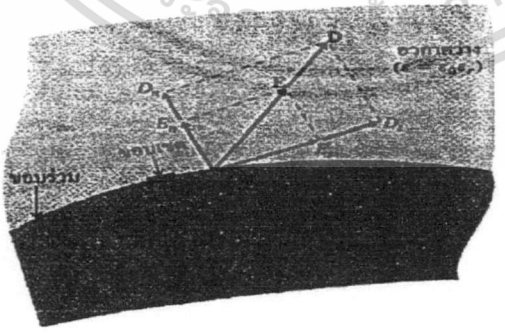
2.4.7 เงื่อนไขขอบระหว่างตัวนำไฟฟ้ากับอากาศว่าง (Conductor-Free-Space Boundary Conditions)

เงื่อนไขนี้เป็นกรณีพิเศษของเงื่อนไขขอบระหว่างตัวนำไฟฟ้ากับไดอิเล็กตริก ในรูปที่ 2.7 จะแสดงถึงเงื่อนไขขอบระหว่างตัวนำไฟฟ้ากับอากาศว่าง (ไดอิเล็กตริก) ซึ่งเงื่อนไขขอบในกรณีพิเศษนี้จะได้รับจากสมการที่ (2.89) โดยแทน ε_r ด้วย 1 (เพราะว่าอากาศว่างจะคำนึงว่าเป็นไดอิเล็กตริกพิเศษ ซึ่งมี $\varepsilon_r = 1$) เนื่องจากสนามไฟฟ้า $\bar{E}$ อยู่ภายนอกตัวนำและตั้งฉากกับพื้นผิวของมัน ดังนั้นเงื่อนไขขอบคือ

$$\bar{D}_t = \varepsilon_0 \bar{E}_t = 0, \bar{D}_n = \varepsilon_0 \bar{E}_n = \rho_s \tag{2.90}$$

ความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้าแนวสัมผัส กับขอบเป็นศูนย์ ความหนาแน่นฟลักไฟฟ้าแนวตั้งฉาก กับขอบจะเกิดความหนาแน่นประจุพื้นผิว

สมการที่ (2.90) แสดงให้ทราบว่า สนามไฟฟ้า $\bar{E}$ จะต้องเข้าสู่พื้นผิวในแนวตั้งฉาก

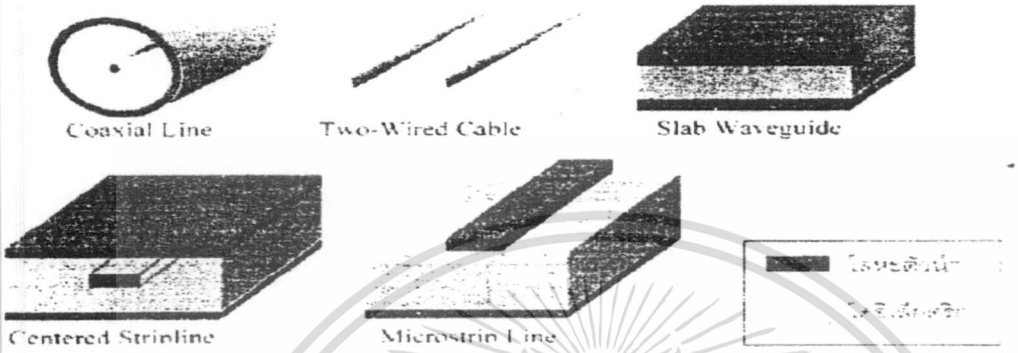


รูปที่ 2.8 ขอบเขตระหว่างตัวนำไฟฟ้ากับอากาศว่าง

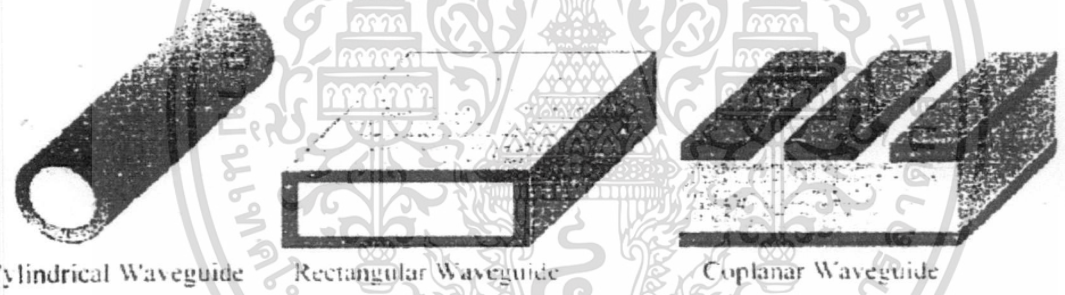
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 สายส่งไมโครเวฟและท่อนำคลื่น (Microwave Transmission Line and Wave Guides)

ในการส่งสัญญาณไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไปยังโหลดหรือแหล่งที่ใช้พลังงานทางไฟฟ้านั้นจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องพึ่งตัวกลางส่งผ่านสัญญาณหรือพลังงานทางไฟฟ้านั้น ซึ่งส่วนใหญ่แล้วสำหรับในทางไฟฟ้านั้นมักจะใช้สายตัวนำไฟฟ้าสองเส้นเป็นตัวกลางนำส่งสัญญาณหรือกระแสไฟฟ้านั้นๆ โดยทั่วไปคู่สายตัวนำที่ใช้ในการนำกระแสไฟฟ้านั้นเรียกว่า สายส่งสัญญาณไฟฟ้า (Transmission Lines)



ก) สายส่งสัญญาณโหมด TEM (TEM transmission lines)



ข) สายส่งสัญญาณโหมด (Multi-mode transmission lines)

รูปที่ 2.9 ตัวอย่างสายส่งสัญญาณแบบต่างๆ

สายส่งสัญญาณไฟฟ้านั้นมีอยู่ด้วยกันหลายประเภทขึ้นอยู่กับความถี่และลักษณะการเคลื่อนที่ของสัญญาณในสายส่งนั้นๆ โดยที่ความถี่ต่ำมักจะพิจารณาการเคลื่อนที่ของสัญญาณคล้ายกับการไหลของกระแสน้ำตามท่อน้ำทั่วไป แต่สำหรับที่ความถี่สูงแล้วมักจะพิจารณาการเคลื่อนที่ของสัญญาณคล้ายกับการเคลื่อนที่ของคลื่นสัญญาณที่ประกอบด้วยสนามไฟฟ้ากับสนามแม่เหล็กหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านั่นเอง

เนื่องจากว่าสายสัญญาณความถี่สูงนั้นจะมีรูปแบบต่างๆ ที่ได้รับการวิเคราะห์มาแล้วมากมายตามลักษณะโครงสร้างของภาคตัดขวางต่างๆ ที่แน่นอน โดยทั่วไปแล้วในการวิเคราะห์สัญญาณไฟฟ้าในสายส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่างๆ นั้นมักจะสมมุติให้สายส่งเหล่านี้มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าตามแนวความยาวที่แน่นอนโดยกำหนดให้มีการกระจายค่าทางไฟฟ้าเหล่านั้นอย่างสม่ำเสมอกันตลอดทั้งเส้น

ดังนั้นจึงมักเรียกสายส่งเหล่านี้ว่าสายส่งสัญญาณไฟฟ้าแบบราบเรียบสม่ำเสมอ (Uniform transmission lines) โดยมีตัวอย่างของสายส่งประเภทนี้ดังรูปที่ 2.8

2.5.1 สายส่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้นำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง โดยสายส่งมีโครงสร้างที่ใช้กันทั่วไปสี่แบบคือ

1) สายตัวนำคู่ขนาน

2) สายโคแอกเชียล

3) ท่อนำคลื่นหรือเวฟไกด์ *(wave guide)*

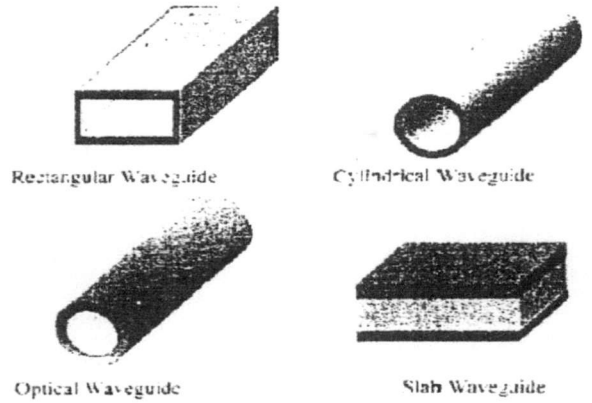
4) ไมโครสตริพ หรือสายสตริพ

สายตัวนำคู่ขนานมักใช้ในย่านความถี่ไมโครเวฟช่วงความถี่ต่ำเท่านั้น ข้อจำกัดหลักนี้ได้มาจากการสูญเสียในการกระจายคลื่น ซึ่งเป็นการสูญเสียเนื่องมาจากสารไดอิเล็กตริกและปรากฏการณ์ความลึกผิว (skin depth) ที่ย่านความถี่เหนือ 200 MHz สายโคแอกเชียลจะมีประสิทธิภาพดีกว่าที่ความถี่สูงกว่านี้

สายโคแอกเชียลมีการพัฒนาในเรื่องการลดการสูญเสียพลังงานในการเคลื่อนที่ของคลื่นจากโครงสร้างการชิลด์ของสายที่เป็นตัวนำทรงกระบอกหุ้มรอบแกนตัวนำด้านใน แต่ยังคงมีข้อจำกัดในเรื่องการสูญเสียพลังงานอันเนื่องมาจากฉนวนไดอิเล็กตริกภายในและปรากฏการณ์ความลึกผิวอยู่ดี

ท่อนำคลื่นหรือเวฟไกด์จัดเป็นสายส่งย่านความถี่ไมโครเวฟหรือเป็นท่อนำคลื่นในย่านความถี่สูงที่ดีที่สุดสำหรับโครงสร้างทั้งหมดที่ได้กล่าวมาแล้ว ท่อนำคลื่นที่ใช้งานได้มีการออกแบบโครงสร้างและส่วนประกอบที่แตกต่างกันไปตามความเหมาะสมกับย่านความถี่ที่ใช้งานโครงสร้างตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 2.3 แต่เนื่องจากคลื่นเดินทางท่อนำคลื่นทั่วไปนั้นไม่อาจจะเป็นเพียงแค่โหมดพื้นฐาน TEM บริสุทธิ์เท่านั้น แต่มีโหมดการเคลื่อนที่แบบอื่นๆ อีกที่สามารถเคลื่อนที่อยู่ในท่อนำคลื่นนั้นๆ ได้ ดังนั้นการวิเคราะห์คลื่นบนท่อนำคลื่นจะต้องคำนึงถึงโหมดการเดินทางของคลื่นโหมดอื่นๆ ที่สามารถจะเป็นไปได้ คือโหมด TM กับ TE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 ท่อนำคลื่นแบบต่างๆ

2.6 สมการความร้อนในทางชีววิทยา (The Bio-heat Equation)

ในการวิเคราะห์ด้วยความถี่ไมโครเวฟได้พิจารณาถึงสนามไฟฟ้า สนามแม่เหล็ก และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในเนื้อเยื่อปอด การดูดซับความร้อนที่เกิดขึ้นในเนื้อเยื่อปอด ซึ่งรูปแบบของสมการ หรือตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลต่อการกระจายความร้อนในปอดแสดงดังสมการที่ (2.91)

$$pc\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k \bullet \nabla T) - h_b C_b \omega_b (T_b - T) + Q_m + Q_{ext} \qquad (2.91)$$

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

ρ = ความหนาแน่นจำเพาะของเนื้อเยื่อ (kg/m^3)

c = ค่าความจุความร้อนจำเพาะของเนื้อเยื่อ (J/kg.K)

k = ค่าความนำความร้อนของเนื้อเยื่อ (W/m.K)

h_b = สัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากเลือดที่ไหลซึมอยู่ในเนื้อเยื่อ

ρ = ความหนาแน่นเลือด (kg/m^3)

C_b = ค่าความร้อนจำเพาะของเลือด (J/kg.K)

ω_b = อัตราฉีดเลือด (1/s)

T_b = ค่าอุณหภูมิเลือด (37°C)

Q_m = ค่าความร้อนจากกระบวนการเมตาโบลิซึมของเม็ดเลือด (W/m^3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

จากสมการ Bioheat (2.91) ที่นำมาใช้ในงานวิจัยฉบับนี้ ได้ละทิ้งค่าตัวแปรจำนวน 2 ตัว คือ สัมประสิทธิการพาความร้อนจากเลือดที่ไหลซึมอยู่ในเนื้อเยื่อ (h_b) และพลังงานที่สร้างขึ้นโดยกระบวนการเมตาโบลิซึมของเม็ดเลือด (Q_m) ซึ่งค่าตัวแปรทั้ง 2 นี้ จะถือว่ามีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับปริมาณ Q_{ext}

2.6.1 สมการการดูดซับความร้อน

พิจารณาจาก สนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก ที่มีการแพร่กระจายลงเนื้อเยื่อปอด จะเกิดการสูญเสียพลังงานในเนื้อเยื่อปอด ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของสมการ ดังสมการที่ (2.92)

$$SAR = \frac{1}{\rho} Q_{ext} = \frac{\sigma}{\rho} |E|^2 \qquad (2.92)$$

เมื่อ

SAR = Specific absorption rate (W/kg)

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

σ = สภาพความนำไฟฟ้าของเนื้อเยื่อ (S/m)

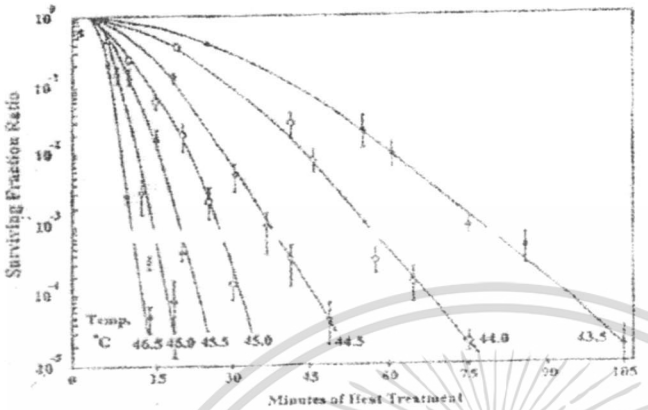
ρ = ความหนาแน่นจำเพาะ (kg/m^3)

2.7 พื้นฐานการกระจายความร้อนภายในเนื้อเยื่อ

การใช้ความร้อนในการรักษาโรค เป็นการรักษาที่ทำให้อุณหภูมิ ณ บริเวณนั้น สูงขึ้นอยู่ในช่วง 41-46 องศาเซลเซียส เซลล์ที่อยู่บริเวณนั้นๆ จะได้รับผลกระทบ และมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับอุณหภูมิ การใช้ความร้อนในการรักษาโรคมะเร็ง ได้มีการพัฒนาเทคนิค ที่เรียกว่า Hyperthermal cancer therapy ซึ่งมีการเริ่มใช้มาตั้งแต่ปี ค.ศ.1960 โดยการรักษาโรคมะเร็งโดยใช้ความร้อนเป็นรูปแบบการรักษาโรคมะเร็งแบบใหม่ ซึ่งมีพื้นฐาน และหลักการทางชีววิทยาที่สามารถพิสูจน์ ทดลอง และสามารถอธิบายได้ ซึ่งในปัจจุบันการรักษาโรคมะเร็งโดยใช้ความร้อนนี้สามารถรักษาโรคมะเร็งชนิดต่างๆ ได้ทั่วร่างกาย และได้ผลการรักษาที่น่าสนใจ การรักษาโรคมะเร็งด้วยความร้อน อาศัยหลักการให้ความร้อนกับเซลล์มะเร็งอยู่ในช่วง 41-46 องศาเซลเซียส และรักษาระดับของอุณหภูมิไว้ให้คงที่ พื้นฐานของปรากฏการณ์ทางชีววิทยาสำหรับการรักษาโรคมะเร็งด้วยความร้อน จะมีอยู่สองปริมาณที่มีความสำคัญในการรักษาคือ อุณหภูมิ และเวลาในการให้ความร้อน ซึ่งตามรูปที่ 2.1 จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลา ที่ส่งผลต่อปริมาณเซลล์มะเร็งที่รอดตายจากการให้ความร้อน รูปที่ 2.1 เมื่อให้อุณหภูมิสูงแก่เซลล์มะเร็งในช่วงเวลาเริ่มต้นเซลล์มะเร็งจะสูญเสียเป็นจำนวนมาก แต่เมื่อมีการลดอุณหภูมิที่ให้แก่เซลล์มะเร็งผลกระทบที่เกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

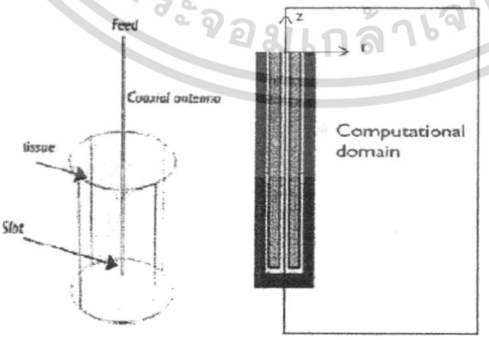
คือ ต้องใช้เวลามากขึ้นเพื่อทำให้เซลล์มะเร็งตาย ในการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงๆ แก่เซลล์ จำนวนเซลล์จะเกิดการสูญเสียมาก และจะทำให้เซลล์ปกติที่อยู่รอบๆ เซลล์มะเร็งได้รับความเสียหายได้เช่นกัน ดังนั้นในการเพิ่มอุณหภูมิให้เหมาะสมนั้นสามารถทำลายเซลล์มะเร็งได้จำนวนมาก และไม่เป็นอันตรายแก่เซลล์ปกติ



รูปที่ 2.11 กราฟแสดงผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์มะเร็ง

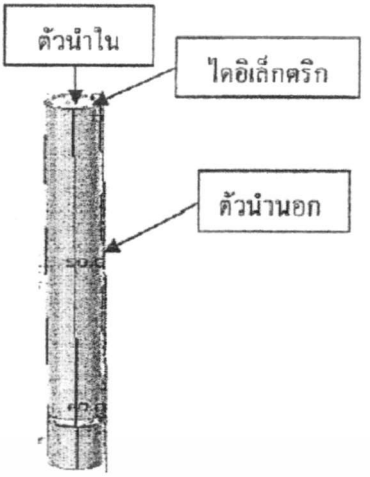
2.8 หลักการของเงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการจำลอง

จากรูปที่ 2.11 เป็นการแสดงให้เห็นถึงแบบจำลองของการรักษาด้วยคลื่นไมโครเวฟโดยใช้สายอากาศแบบโคแอกเชียลแบบสล็อต โดยทรงกระบอกกลมแทนเนื้อเยื่อทดสอบโดยสายอากาศโคแอกเชียลถูกแทงเข้าไปในเนื้อเยื่อทดสอบ และสายอากาศจะถูกจ่ายกำลังงานคลื่นไมโครเวฟที่จุดบนตรงส่วนของชั้นฉนวน (Feed) และคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะถูกปล่อยออกมาบริเวณสล็อต จากนั้นเนื้อเยื่อจะถูกทำให้เกิดความร้อนซึ่งเป็นไปตามสมการของชาร์ โดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเดินทางในสายโคแอกเชียลอยู่ในโหมดของ TEM โดยสมมุติว่าคลื่นเป็นคลื่นฮาโมนิกส์แบบเชิงซ้อน



รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะของสายอากาศแบบโคแอกเชียลในเนื้อเยื่อทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

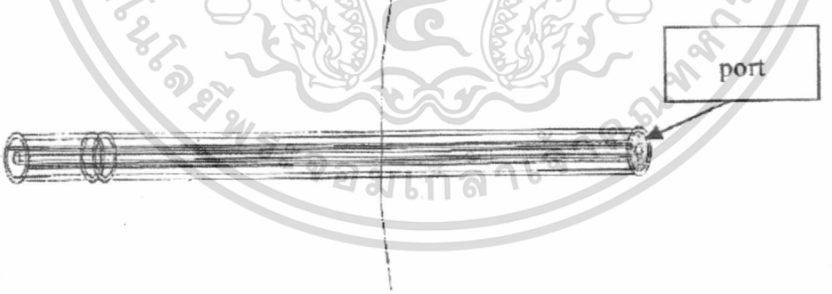


รูปที่ 2.13 แสดงโครงสร้างของสายอากาศแบบสล็อตโคแอกเชียล

สายอากาศโคแอกเชียลจะประกอบไปด้วยชั้นสามชั้นด้วยกันชั้นแรกเป็นชั้นของตัวนำใน ชั้นถัดมาเป็นชั้นของไดอิเล็กตริก และชั้นสุดท้ายเป็นชั้นของตัวนำนอกโดยเมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเดินทางผ่านสายโคแอกเชียลจะมีกระบวนการจะต้องมีการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตให้กับแบบจำลองโดยตัวอย่างต่อไปนี้จะเป็นการกำหนดเงื่อนไขขอบของสายอากาศแบบหนึ่งสล็อต

2.8.1 เงื่อนไขขอบเขตของพอร์ต (Port)

ใช้เงื่อนไขนี้สำหรับใส่ค่ากำลังของคลื่นไมโครเวฟที่จ่ายให้กับสายอากาศโดยกำหนดเป็นค่ากำลัง เช่น 5 W. โดยจะจ่ายให้กับชั้นไดอิเล็กตริกตามรูปเนื่องจากคลื่นจะเดินทางในชั้นนี้

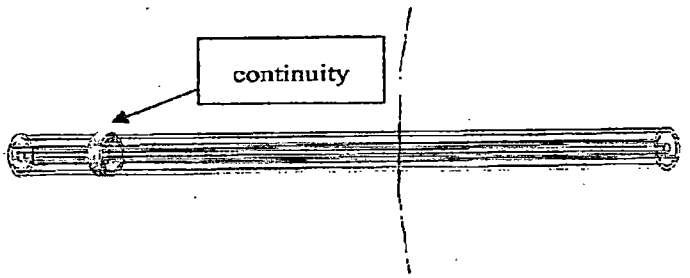


รูปที่ 2.14 แสดงจุดจ่ายกำลังงานคลื่นไมโครเวฟให้กับสายอากาศ

2.8.2 เงื่อนไขขอบเขตของความต่อเนื่อง (Continuity)

เงื่อนไขนี้เป็นเงื่อนไขที่เกิดขึ้น โดยธรรมชาติที่แสดงให้ถึงความต่อเนื่องขององค์ประกอบในแนวเส้นสัมผัสของสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 แสดงบริเวณที่เป็นขอบเขตต่อเนื่อง

จากรูปบริเวณที่เป็นความต่อเนื่อง (continuity) จะเป็นบริเวณที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านจากตัวกลางหนึ่งไปสู่อีกตัวกลางหนึ่ง

2.8.3 เงื่อนไขขอบเขตของตัวนำ (Perfect Electric Conductor)

เป็นกรณีของเงื่อนไขซึ่งกำหนดให้องค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในแนวขนานกับผิวตัวนำมีค่าเป็นศูนย์

$$nxE = 0 \tag{2.93}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

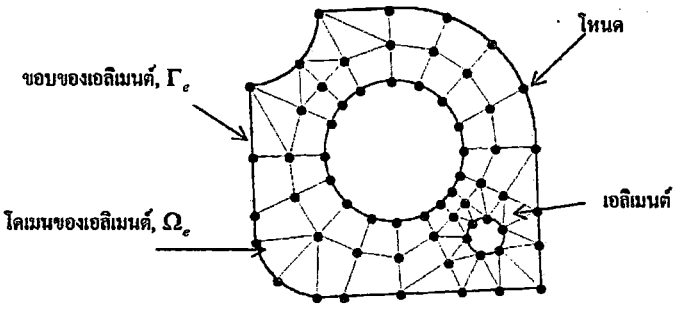
3.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ไฟต์เอลิเมนต์ในรูปเมตริกซ์สมการพื้นฐานทางด้านแม่เหล็กไฟฟ้า การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าที่ความถี่สูง และสมการความสัมพันธ์ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและอุณหภูมิ กระบวนการแก้ปัญหาวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ และการประยุกต์ใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์

3.2 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method)

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) หรือ FEM เป็นวิธีการคำนวณเชิง ตัวเลขชนิดหนึ่งสำหรับแก้สมการเชิงอนุพันธ์ ในการแก้ปัญหาหนึ่งๆ ด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ จะทำการแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นเนื้อที่หลายๆ ชิ้นที่เรียกว่าเอลิเมนต์ (Element) รูปแบบที่เที่ยงตรงดังรูปที่3.1 ในการแก้ปัญหาใดปัญหาหนึ่ง ปัญหานั้นจะต้องประกอบด้วย สมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมา การหาค่าผลเฉลี่ยแม่นตรง (Exact solution) จะประกอบด้วยค่าต่างๆ เป็นจำนวนอนันต์ ซึ่งเราไม่สามารถหาค่าผลเฉลี่ยได้ จึงต้องเปลี่ยนค่าทั้งหมดที่เป็นอนันต์ให้เป็นจำนวนที่นับได้(Finite)ทำการแทนรูปร่างลักษณะของปัญหาด้วยเอลิเมนต์ที่มีขนาดต่างๆกัน หลักการทางไฟไนต์เอลิเมนต์จะเริ่มจากการพิจารณา เอลิเมนต์ทีละเอลิเมนต์ ทำการสร้างสมการให้แต่ละเอลิเมนต์ที่สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหานั้นๆจากนั้นจึงนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นมาประกอบเข้าด้วยกัน รวมเป็นระบบสมการชุด ใหญ่ จากนั้น ทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต ที่ให้มาลงในสมการชุดใหญ่ แล้วจึงทำการแก้สมการ และจะเกิดผลเฉลยโดยประมาณที่ตำแหน่งต่างๆ ของปัญหานั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 แสดงแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ถูกแบ่งออกเป็นเอลิเมนต์และโหนด

กระบวนการวิเคราะห์ปัญหาใดๆโดยทั่วไปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จะประกอบไปด้วย 5 ขั้นตอนหลักๆ ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การแบ่งโดเมนของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ กระบวนการขั้นตอนแรกนี้ โดยปกติจะใช้เวลามากในทางปฏิบัติ เพราะจำเป็นต้องสร้างรูปร่างของปัญ)Geometry(อย่างถูกต้องขึ้นมาก่อน รูปร่างของปัญหาอาจประกอบด้วยส่วนเว้าส่วนโค้งที่มีความซับซ้อนในขั้นตอนนี้จึงจำเป็น ต้องอาศัยความรู้อันประกอบไปด้วยประสบการณ์เป็นอย่างมาก

ขั้นตอนที่ 2 การเลือกใช้ชนิดของเอลิเมนต์ เอลิเมนต์ย่อยที่แบ่งบนโดนเมนของปัญหานั้นอาจเป็นเอลิเมนต์ในรูปแบบของสามเหลี่ยมหรือสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่าก็ได้ หากแบ่งออกเป็นเอลิเมนต์สามเหลี่ยมตัวไม่รู้ค่า (Unknowns) จะอยู่ที่มุมทั้งสามของสามเหลี่ยมนั้น ซึ่งเรียกกันว่าจุดต่อ (Node) การเลือกใช้ชนิดของเอลิเมนต์จะสอดคล้องกับลักษณะการกระจายของตัวไม่รู้ค่าที่สมมติขึ้นบนเอลิเมนต์นั้นๆ เช่นหากเลือกใช้เอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบสามจุดต่อที่มุมทั้งสามแล้ว ลักษณะการกระจายของตัวไม่รู้ค่าบนเอลิเมนต์นั้นจะถูกสมมติให้อยู่ใน รูปแบบของแผ่นเรียบ เป็นต้น แต่หากเลือกใช้เอลิเมนต์แบบสี่เหลี่ยมแบบสี่จุดต่อที่มุมทั้งสี่ ลักษณะการกระจาย ของตัวไม่รู้ค่าบนเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมนี้อาจไม่เรียบแต่โค้งไปโค้งมาได้ ดังนั้นการเลือกใช้เอลิเมนต์ชนิดต่างๆกันจึงมีผลโดยตรงกับผลลัพธ์ที่จะคำนวณได้

ขั้นตอนที่ 3 การประดิษฐ์สมการไฟไนต์เอลิเมนต์ สมการเชิงอนุพันธ์ที่สอดคล้องกับปัญหาที่วิเคราะห์อยู่นั้นจะถูกเปลี่ยนไปเป็นสมการทางพีชคณิตที่เรียกกันว่า สมการไฟไนต์เอลิเมนต์สมการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่จะถูกสร้างขึ้นสำหรับแต่ละเอลิเมนต์เนื่องจากเอลิเมนต์ต่างมีขนาดไม่เท่ากัน กระบวนการประดิษฐ์สมการไฟไนต์ เอลิเมนต์จากสมการเชิงอนุพันธ์นี้นับเป็นหัวใจหลักของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพราะหากมีความเข้าใจในขั้นตอนนี้แล้วก็สามารถประยุกต์ใช้วิธีการ ทำนองเดียวกันนี้ในการแก้ปัญหาชนิดอื่นๆได้

ขั้นตอนที่ 4 การรวมสมการไฟไนต์เอลิเมนต์เข้าด้วยกันแล้วแก้ระบบสมการใหญ่ สมการไฟไนต์เอลิเมนต์อยู่ในรูปแบบของสมการทางพีชคณิตซึ่งได้ประดิษฐ์ขึ้นสำหรับแต่ละเอลิเมนต์ใน ขั้นตอนที่แล้วจำเป็

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นต้องนำมารวมกันอย่างถูกต้องและมีหลักการ การประกอบสมการไฟไนต์เอลิ เมนต์แต่ละสมการเข้าด้วยกัน จะก่อให้เกิดระบบสมการขนาดใหญ่ จากนั้นจึงประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตของปัญหานั้นๆก่อนแก้ระบบสมการขนาดใหญ่ชุดนั้นเพื่อหาผลลัพธ์ที่จุดต่อ ซึ่งผลลัพธ์ที่จุดต่อเหล่านี้อาจแทนค่าอุณหภูมิหากเป็นการวิเคราะห์ ปัญหาด้านการถ่ายเทความร้อน เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 5 การคำนวณหาค่าอื่นๆที่เหลือจากนั้นจึงเป็นการหาค่าอื่นๆที่ต้องการทราบเพื่อที่จะทำให้ปัญหานั้นได้รับการวิเคราะห์โดยสมบูรณ์ เช่น ในการแก้

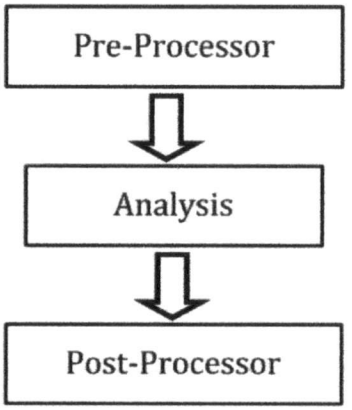
ปัญหาด้านความร้อนเมื่อทราบอุณหภูมิตามตำแหน่งต่างๆแล้วก็จะสามารถคำนวณหาปริมาณฟลักซ์ความร้อนที่ไหลผ่านได้

3.3 กระบวนการแก้ปัญหาด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์

การประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สิ่งแรกที่เริ่มเรียนรู้การใช้คอมพิวเตอร์โปรแกรม คือ ขั้นตอนหลัก 3 ขั้นตอนในการใช้คอมพิวเตอร์โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ได้แก่ ขั้นตอน Pre-Processor, Analysis, Post-Processor

1.Pre-Processor คือการจัดเตรียมข้อมูลเพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยเริ่มจากการสร้างรูปแบบจำลองของชิ้นงาน เพื่อจำลองรูปร่างของชิ้นงานที่ต้องการวิเคราะห์ลงในคอมพิวเตอร์โปรแกรม จากนั้นจึงสร้างรูปแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Model) โดยแบ่งย่อยรูปร่างของแบบจำลองขนาดใหญ่ให้เป็นเอลิเมนต์ (Element) เล็กๆ คล้ายกับการนำเอาแผ่นกระจกชิ้นเล็กๆ มาติดลงบนโครงสร้างขนาดใหญ่ เช่น รูปปั้นยักษ์ตามวัดสำคัญๆ ในประเทศไทย ซึ่งทำให้มองเห็นโดยภาพรวมได้ว่าเป็นยักษ์ แต่เมื่อเข้าไปมองใกล้ๆ จะเห็นว่าเป็นกระจกแผ่นเล็กๆ ที่เรียงต่อกันอย่างเป็นระเบียบ

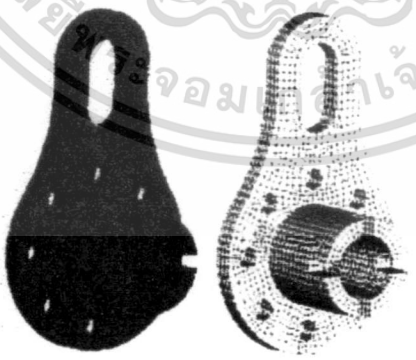
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนในการวิเคราะห์ปัญหาด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ระเบียบในลักษณะเดียวกันนี้เอง การวิเคราะห์ปัญหาด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ก็จะแทนรูปแบบจำลองชิ้นงานที่เราสร้างขึ้นด้วยเอลิเมนต์ขนาดต่างๆ ตามที่เรากำหนด โดยจุดมุมของแต่ละเอลิเมนต์เรียกว่า จุดต่อ (Node) จะเป็นจุดเชื่อมต่อแต่ละเอลิเมนต์เข้าด้วยกัน กลายเป็นรูปร่างตามแบบจำลองที่เราต้องการวิเคราะห์ นอกจากการเตรียมรูปแบบไฟไนต์เอลิเมนต์แล้วขั้นตอน Pre-Processor ยังรวมถึงการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของปัญหา (Boundary Conditions) เช่น การกำหนดขอบเขตของรูปแบบจำลองที่ไม่มีการเคลื่อนที่ แต่สามารถหมุนรอบตัวเองได้ในแกนใดๆ รวมถึงการกำหนดขนาดและทิศทางของแรงกระทำต่อชิ้นงานที่เราจะทำการวิเคราะห์ เป็นต้น สิ่งที่ควรจำคือ กำหนดลักษณะปัญหา และเขียนสิ่งที่ต้องทำอย่างคร่าวๆ ให้เรียบร้อยอยู่บนกระดาษเสมอก่อนจะทำในคอมพิวเตอร์ ซึ่งวิธีนี้ใช้ได้ผลดี เพราะทำให้รู้ว่าสิ่งที่เราต้องการคืออะไร เราต้องการทำอะไร และสามารถตรวจสอบได้ทุกขณะว่าตอนนี้เราทำงานถึงขั้นตอนไหน เป็นการป้องกันข้อผิดพลาดของคน (Human Error)

2. **Analysis** คือ การสั่งให้คอมพิวเตอร์โปรแกรมวิเคราะห์ปัญหาโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งในช่วงแรกผู้เขียนก็เพียงทำความเข้าใจว่าเป็นกระบวนการที่สั่งให้โปรแกรมคอมพิวเตอร์คำนวณเพื่อหาคำตอบที่เราต้องการ แต่สิ่งที่ผู้เขียนไม่ค่อยจะให้ความสนใจ คือรายละเอียดขั้นตอนการวิเคราะห์ปัญหา (ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดคำถามอีกมากมายในเวลาต่อมา)



รูปที่ 3.3 รูปแบบจำลองชิ้นงานและรูปแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. Post-Processor เป็นขั้นตอนการแสดงผลการวิเคราะห์ปัญหาที่ผ่านกระบวนการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ส่วนมากจะแสดงค่าที่เราสนใจด้วยแถบสีหลายระดับสี เช่น ถ้าเป็นปัญหาที่วิเคราะห์เกี่ยวกับโครงสร้าง สิ่งที่เราสนใจก็คือบริเวณที่เกิดความเค้นสูง ซึ่งบริเวณนั้นก็จะมีสีแดง และค่าความเค้นที่ต่ำลงมาด้วยการเรียงสีจากส้ม สีเหลือง ไปจนถึงสีชมพูที่แสดงค่าความเค้นที่น้อยที่สุด เป็นต้น

เราก็จะได้คำตอบของผลการวิเคราะห์ปัญหาในงานวิศวกรรมด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้คอมพิวเตอร์โปรแกรมเข้ามาช่วยในการคำนวณ เริ่มจากการสร้างรูปแบบจำลองของชิ้นงานที่จะวิเคราะห์แล้วนำรูปแบบจำลองนั้นมาเป็นต้นแบบในการสร้างรูปแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งการสร้างแบบจำลองมีผลต่อการสร้างรูปแบบไฟไนต์เอลิเมนต์อย่างเห็นได้ชัด ดังนั้นการสร้างรูปแบบจำลองให้ได้คุณภาพ เพื่อสามารถนำไปสร้างรูปแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ดีต่อไป เนื่องจากรูปร่างของแต่ละเอลิเมนต์มีผลต่อการคำนวณวิเคราะห์ปัญหาที่เราสนใจ ก็เหมือนกับการติดแผ่นกระจกลงบนตัวยักษ์ดังได้กล่าวไว้ข้างต้น หรือคล้ายกับการปูกระเบื้องบนพื้นในบริเวณต่างๆ ลักษณะการสร้างรูปแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ดีจึงไม่ใช่เพียงการกำหนดเอลิเมนต์ที่มีรูปร่างสี่เหลี่ยมด้านเท่าหรือสามเหลี่ยมด้านเท่าเท่านั้น แต่ยังคำนึงถึงการเรียงตัวของแต่ละเอลิมเมนต์ที่เป็นระเบียบอีกด้วย

3.3.1 องค์ความรู้ที่จะนำไปสู่ความเข้าใจ

ดังได้กล่าวมาแล้วนั้น องค์ประกอบความรู้ที่จำเป็นในการทำงานด้านการนำคอมพิวเตอร์มาช่วยในการคำนวณทางวิศวกรรม คือ

1.ความเข้าใจในคณิตศาสตร์ขั้นสูงทางวิศวกรรม

2.ความเข้าใจในระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

3.ความเข้าใจในระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

4.ความเข้าใจในขั้นตอนของการคำนวณของคอมพิวเตอร์โปรแกรม

5.ประสบการณ์การใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ และคอมพิวเตอร์โปรแกรม

องค์ความรู้เหล่านี้จะนำเราไปสู่คำตอบของคำถามที่มีมากมายในการเริ่มต้นการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณทางวิศวกรรม นอกจากจะทำให้สามารถนำองค์ความรู้ต่างๆ มาใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมได้แล้ว ยังช่วยเราทำนายพฤติกรรมของชิ้นงานที่เราสนใจได้จากหน้าจอคอมพิวเตอร์โดยตรง โดยลดความเสี่ยงและการเสียเวลาสร้างชิ้นงานจริงเพื่อทดสอบดังเช่นในอดีตที่ผ่านมา นอกจากนี้ยังส่งผลไปถึงการดัดแปลงรูปร่างของชิ้นงาน เพื่อให้ได้ซึ่งรูปทรงที่ประหยัดเนื้อวัสดุแต่ยังคงความแข็งแรงในการใช้งานได้เท่าเดิม ซึ่งจะประหยัดทั้งเวลาและค่าใช้จ่าย เมื่อเราได้เรียนรู้และเข้าใจองค์ความรู้ดังกล่าวแล้วสามารถใช้คอมพิวเตอร์โปรแกรมช่วยในการวิเคราะห์ทางวิศวกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จะเห็นได้ว่า วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถแสดงรายละเอียดต่างๆ ที่เราไม่สามารถมองเห็นด้วยตา หรือต้องใช้เครื่องวัดราคาแพง ซึ่งทำให้สามารถลดต้นทุนและค่าใช้จ่ายในการออกแบบ โครงสร้างที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหมาะสมกับปัญหาต่างๆ ที่ต้องการแก้ปัญหา แล้วแสดงผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ แต่ในการคำนวณจำเป็นต้องใช้ประสิทธิภาพของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่สูงมาก

3.4 พื้นฐานสมการทางด้านสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

$$\nabla \times \{H\} = \{J\} + \left\{\frac{\partial D}{\partial t}\right\} = \{Js\} + \{Je\} + \{Jv\} + \left\{\frac{\partial D}{\partial t}\right\} \tag{3.1}$$

$$\nabla \cdot \{E\} = -\left\{\frac{\partial B}{\partial t}\right\} \tag{3.2}$$

$$\nabla \cdot \{\mathbf{B}\} = 0 \tag{3.3}$$

$$\nabla \cdot \{D\} = \rho \tag{3.4}$$

เมื่อ $\nabla \times$ = ตัวปฏิบัติการเคิร์ล

$\nabla \cdot$ = ตัวปฏิบัติการไดเวอร์เจนซ์

$\{H\}$ = เวกเตอร์ความเข้มข้นของสนามแม่เหล็ก

$\{J\}$ = เวกเตอร์ความหนาแน่นของกระแสรวม

$\{Js\}$ = เวกเตอร์ความหนาแน่นของแหล่งกำเนิดกระแส

$\{Je\}$ = เวกเตอร์ความหนาแน่นของกระแสที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ

$\{Jv\}$ = เวกเตอร์ความหนาแน่นของความหนาแน่นของกระแส

$\{D\}$ = เวกเตอร์ความหนาแน่นของฟลั๊กซ์ไฟฟ้า

$\{E\}$ = เวกเตอร์ความเข้มของสนามไฟฟ้า

$\{B\}$ = เวกเตอร์ความหนาแน่นของฟลั๊กซ์แม่เหล็ก

ρ = ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้า

t = เวลา

สมการที่ (3.5) เป็นสมการแสดงหาค่าเวกเตอร์ความหนาแน่นฟลั๊กซ์แม่เหล็ก

$$\{B\} = [\mu]\{H\} \tag{3.5}$$

เมื่อ $[\mu]$ = ค่าความซึมซับแม่เหล็กในรูปแบบเมตริกซ์ (Magnetic Permeability)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อสมการที่ (3.5) แสดงค่าความซึมซับแม่เหล็กในรูปแบบของเมตริกซ์

$$\{\mu\} = \mu_0 \begin{bmatrix} \mu_{rx} & 0 & 0 \\ 0 & \mu_{ry} & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{rz} \end{bmatrix} \tag{3.6}$$

เมื่อ μ_0 = ค่าความซึมซับแม่เหล็กในสูญญากาศ

μ_{rx} = ค่าความซึมซับแม่เหล็กสัมพัทธ์ในแนวแกน x

สมการที่ (3.7) แสดงการหาเวกเตอร์ความหนาแน่นของกระแสรวม

$$\{D\} = [\sigma][\{E\} + \{V\} \times \{B\}] \tag{3.7}$$

สมการที่ (3.8) แสดงการหาเวกเตอร์ความหนาแน่นของกระแส

$$\{D\} = [\sigma][\{E\}] \tag{3.8}$$

เมื่อ

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{rz} \end{bmatrix}$$

$$[\varepsilon] = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{rz} \end{bmatrix}$$

$$\{V\} = \begin{Bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{Bmatrix}$$

σ_{xx} = สภาพการนำไฟฟ้าในแนวแกน x มีหน่วยเป็น S/m

ε_{xx} = สภาพยินยอมทางไฟฟ้าในแนวแกน x มีหน่วยเป็น F/m

3.5 วิเคราะห์สนามแม่เหล็กที่ความถี่สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (3.1) และสมการ (3.2) เป็นสมการแม็กเวลล์ถ้าพิจารณาในกรณีที่มีสัญญาณฮาร์โมนิก โดยเขียนในรูปของ $e^{j\omega t}$ จะได้เวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าในรูปสมการเฮล์มโฮลตซ์ ดังสมการที่ (3.9)

$$\nabla \times \left[\overline{\overline{\mu}}_r^{-1} \cdot (\nabla \times \vec{E})\right] - k_0^2 \overline{\overline{\varepsilon}}_r \cdot \vec{E} = -j\omega\mu_0 \vec{J}_s \tag{3.9}$$

เมื่อ $\vec{E}$ = เวกเตอร์สนามไฟฟ้า

$\overline{\overline{\varepsilon}}_r$ = ความยินยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์

μ_0 = ความซึมซับแม่เหล็กในฟรีสเปซ

$\overline{\overline{\mu}}_r$ = ความซึมซับแม่เหล็กในวัตถุ

k_0 = จำนวนคลื่น (Vacuum Wave Number)

ω = ค่าความถี่เชิงมุม

$\vec{J}_s$ = เวกเตอร์ความหนาแน่นของกระแสแหล่งกำเนิด

จากสมการ (3.9) สามารถหาค่าของสนามไฟฟ้าได้จากสมการที่ (3.10) และหาค่าของสนามแม่เหล็กได้จากสมการที่ (3.11)

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^{N} \vec{W}_i E_i \tag{3.10}$$

$$\vec{H} = \frac{j}{\omega\mu_0} \overline{\overline{\mu}}_r^{-1} \cdot \sum_{i=1}^{N} \vec{W}_i E_i \tag{3.11}$$

เมื่อ $\vec{E}$ = เวกเตอร์ความเข้มของสนามไฟฟ้า

$\vec{H}$ = เวกเตอร์ความเข้มของสนามแม่เหล็ก

E_i = สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในแต่ละเอลิเมนต์

$\vec{W}$ = รูปแบบฟังก์ชันเวกเตอร์ของเอลิเมนต์แต่ละแบบ

3.6 สมการความสัมพันธ์ระหว่างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและอุณหภูมิ

ความสัมพันธ์ระหว่างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับความร้อนที่ใช้ในวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ มีรูปแบบของสมการทางคณิตศาสตร์แบบเมตริกซ์ ซึ่งแสดงได้ดังสมการ (3.12)

$$\begin{bmatrix} [C] & [0] \\ [0] & [0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{T\} \\ \{0\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_c] & [0] \\ [0] & [K_r] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{T\} \\ \{0\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{Q\} \\ \{I\} \end{Bmatrix} \tag{3.12}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $\{Q\}=\{Q^{nd}\}+\{Q^{g}\}+\{Q^{j}\}+\{Q^{c}\}$

และ $[C]$ = เมตริกซ์ความร้อนจำเพาะ

$\{\dot{T}\}$ = เอลิเมนต์ของการนำความร้อน

$[K_c]$ = เวกเตอร์อัตราการไหลของความร้อนที่โนดนั้นๆ

$[K_v]$ = เวกเตอร์อัตราการเกิดความร้อนภายใน

$\{Q\}$ = ความร้อนรวม

$\{Q^{nd}\}$ = เวกเตอร์อัตราการไหลความร้อนที่โนดนั้นๆ

$\{Q^{g}\}$ = เวกเตอร์อัตราการเกิดความร้อนภายใน

$\{Q^{j}\}$ = เวกเตอร์อัตราการเกิดความร้อนจากสมการต้านทานไฟฟ้า

$\{Q^{c}\}$ = เวกเตอร์การพาความร้อนที่ผิว

$\{I\}$ = โหลดเวกเตอร์อันเนื่องมาจากการไหลของงกระแสที่โหลด

จากสมการที่ (3.12) เป็นสมการที่มีการใช้ลักษณะการคำนวณของเมตรกิซ์ที่มีความสัมพันธ์รูปแบบของอุณหภูมิและกระแสไฟฟ้า ฟลั๊กซ์แม่เหล็ก ในสมการค่าของพารามิเตอร์ Q^j เวกเตอร์อัตราการเกิดความร้อนจากสมการต้านทานไฟฟ้า ดังสมการที่ (3.13)

$$Q_i = \mathrm{Re}\left(\frac{1}{2n}\sum_{i=1}^{n}[\sigma]\{J_{ii}\}\cdot\{J_{ii}\}^{*}\right) \qquad (3.13)$$

เมื่อ Q^j = ต้านทานไฟฟ้าต่อหน่วยปริมาตร

n = จำนวนเอลิเมนต์ที่อินทิเกรต

$[\sigma]$ = เมตริกซ์ของสภาพความต้านทาน

Re = จำนวนขององค์ประกอบ

$\{J_{ii}\}$ = ความหนาแน่นของกระแสรวมในแต่ละเอลิเมนต์

$\{J_{ii}\}^{*}$ = คอนจูเกตของความหนาแน่นของกระแสรวมในแต่ละเอลิเมนต์

3.7 การประยุกต์ใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์

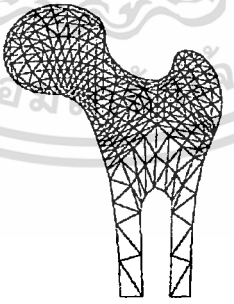
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในงานต่างๆ ทางด้านวิศวกรรมโดยปกติแล้วพบว่ามีความซับซ้อนมาก วิธีการไฟไนต์เอลิ-เมนต์จึงมีบทบาทเป็นอย่างมากในการช่วยแก้ปัญหาต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นปัญหาด้านการยืดหยุ่นของ ของแข็ง ปัญหาด้านการถ่ายเทความร้อน หรือจะเป็นปัญหาด้านการไหลของของไหล เป็นต้น และเมื่อศึกษาถึงภาพรวมและประสิทธิภาพของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์จะพบว่าวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถนำไปใช้ประยุกต์กับงานชนิดต่างๆได้ หากปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นกับงานชนิดนั้นๆ สามารถอธิบายได้ด้วยสมการเชิงอนุพันธ์จาก ประสิทธิภาพของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ควบคู่กันกับวิวัฒนาการทางด้านคอมพิวเตอร์จะทำให้เราสามารถคำนวณหาปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นได้โดยสะดวกและยังทำให้ลดค่าใช้จ่ายที่จำเป็นต้องใช้สำหรับการทดลองอีกด้วย

การแก้ปัญหาด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ในสมัยแรกๆเริ่มปรากฏให้เห็นในงานทางด้านกลศาสตร์ของแข็งและโครงสร้างเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถใช้แก้สมการเชิงอนุพันธ์สำหรับปัญหาที่มีรูปร่างซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้การประยุกต์ใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์นี้ขยายวงกว้างออกไปในงานที่นอกเหนือไปจากงานทางด้านวิศวกรรม เช่น ในงานทางด้านการแพทย์ เป็นต้น จากรูปที่ 3.4 แสดงรูปแบบจำลองของไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อใช้หาการกระจายของความเค้นในกระดูก นอกเหนือจากนั้นวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ยังถูกนำไป

ประยุกต์ใช้กับงานทางด้านการแพทย์ในรูปแบบอื่นๆ อาทิเช่น การคำนวณหาลักษณะการไหลของเลือดในเส้นเลือดและหัวใจ รวมทั้งความกดดันที่เกิดขึ้นตามตำแหน่งต่างๆ ในเส้นเลือด เป็นต้น

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์มีส่วนช่วยเป็นอย่างมากในการศึกษาและออกแบบงานด้านต่างๆไม่ว่าจะเป็นงานทางด้านวิศวกรรมต่างๆหรือแม้แต่งานทางด้านการแพทย์ดังที่กล่าวในข้างต้น ซึ่งวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์จะช่วยให้เราสามารถออกแบบงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นและยังรวมถึงช่วยลดค่าใช้จ่ายที่จะต้องใช้ในการทดลองอีกด้วย



รูปที่ 3.4 รูปแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของกระดูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

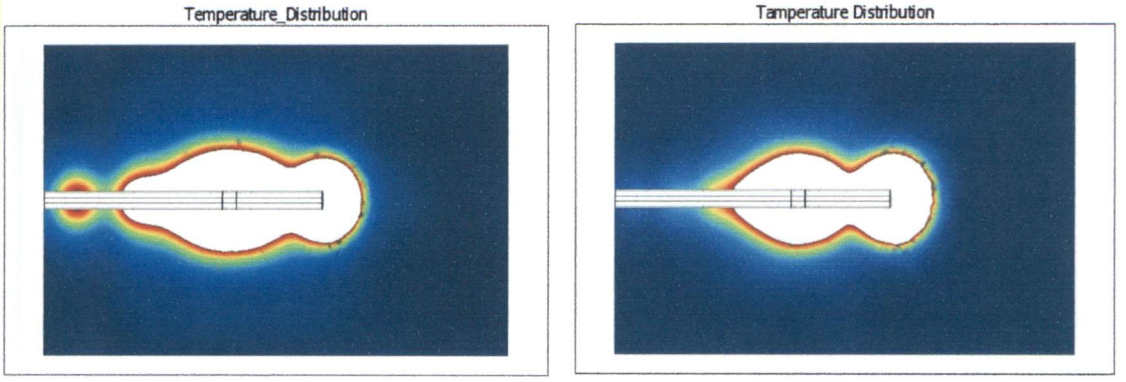
4.1 แบบจำลองสายอากาศในเนื้อเยื่อปอด

ในการจำลองการทำงานเราใช้การจำลองด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ โดยใช้โปรแกรม Comsol Multiphysic (version 3.5) ประกอบด้วย 2 โมดูล คือ Bioheat Equationc และ Electromagnetic Wave

รูปที่ 4.1 แบบจำลองสายอากาศที่สอดในเนื้อเยื่อปอด
โดยสายอากาศที่เลือกใช้ในการจำลองเป็นแบบสล๊อต

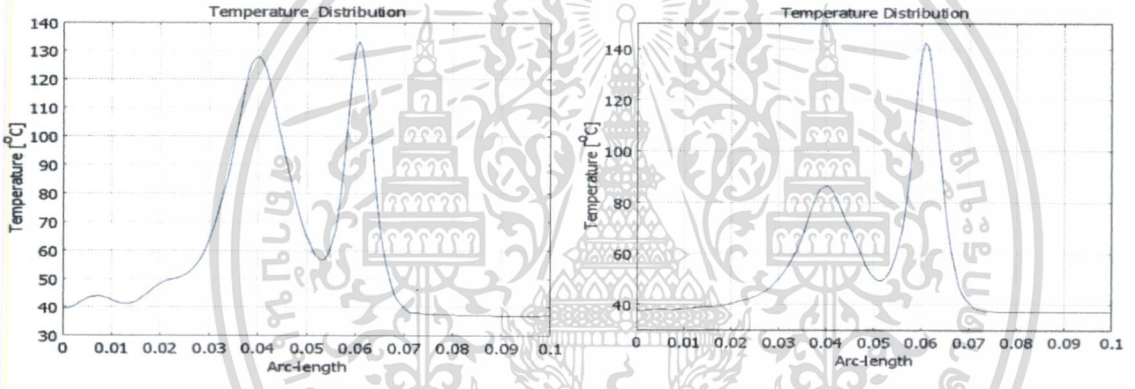
รูปที่ 4.2 แสดงแบบจำลองสายอากาศที่สอดในเนื้อเยื่อปอด
โดยการแบ่งแบบจำลองออกเป็นเอลิเมนย่อยๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) (ข)

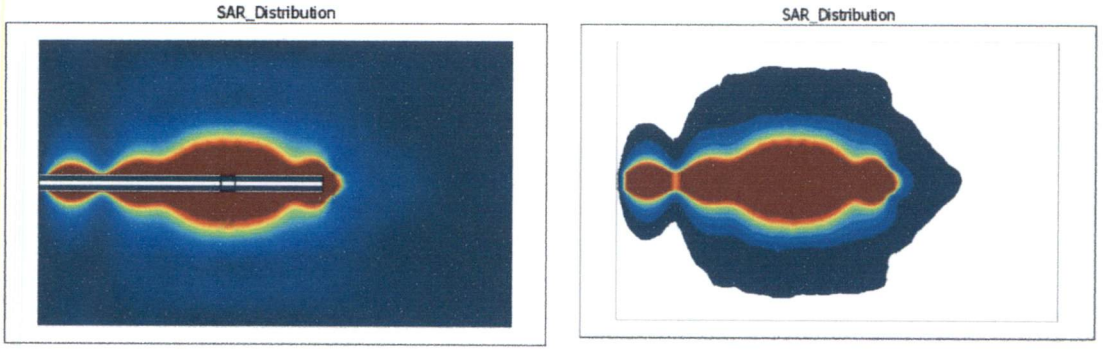
รูปที่ 4.3 (ก) แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิ 50 °C ภายในเนื้อเยื่อปอดขณะหายใจเข้า
(ข) แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิ 50 °C ภายในเนื้อเยื่อปอดขณะหายใจออก



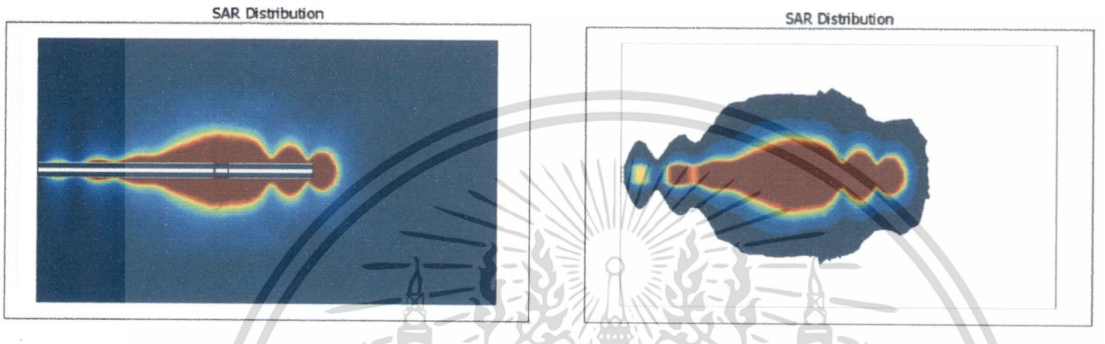
(ก) (ข)

รูปที่ 4.4 (ก) กราฟการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเนื้อเยื่อปอดขณะหายใจเข้า
(ข) กราฟการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเนื้อเยื่อปอดขณะหายใจออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

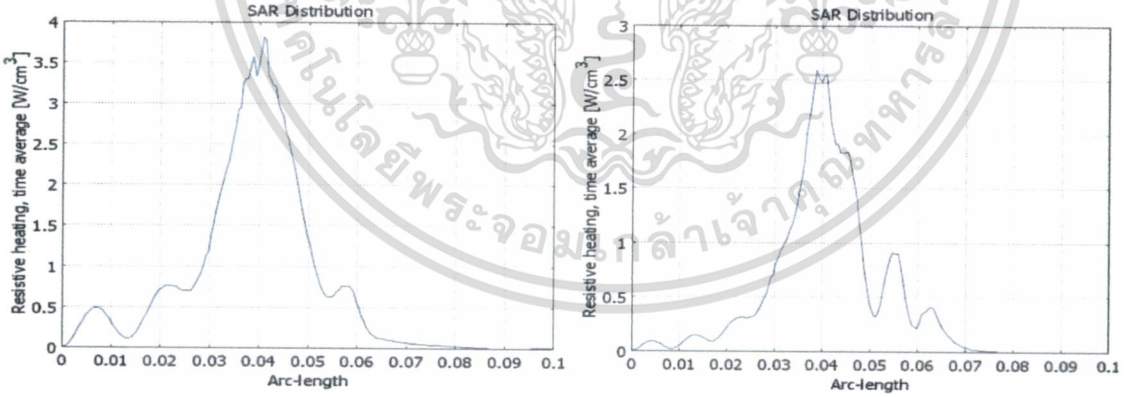


(ก)



(ข)

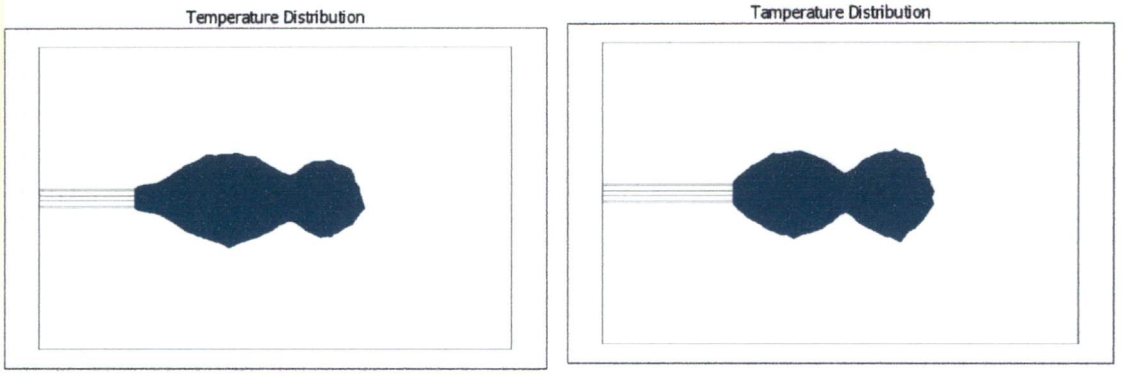
รูปที่ 4.5 (ก) แบบจำลองการกระจายตัวความเข้มของแม่เหล็กไฟฟ้าที่เข้าสู่เนื้อเยื่อปอดขณะหายใจเข้า
(ข) แบบจำลองการกระจายตัวความเข้มของแม่เหล็กไฟฟ้าที่เข้าสู่เนื้อเยื่อปอดขณะหายใจออก



(ก) (ข)

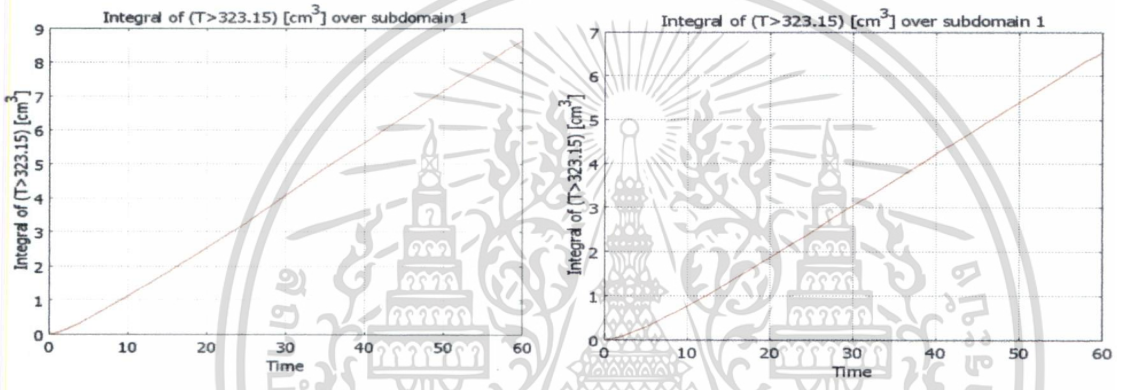
รูปที่ 4.6 (ก) กราฟการกระจายตัวความเข้มของแม่เหล็กไฟฟ้าที่เข้าสู่เนื้อเยื่อปอดขณะหายใจเข้า
(ข) กราฟการกระจายตัวความเข้มของแม่เหล็กไฟฟ้าที่เข้าสู่เนื้อเยื่อปอดขณะหายใจออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



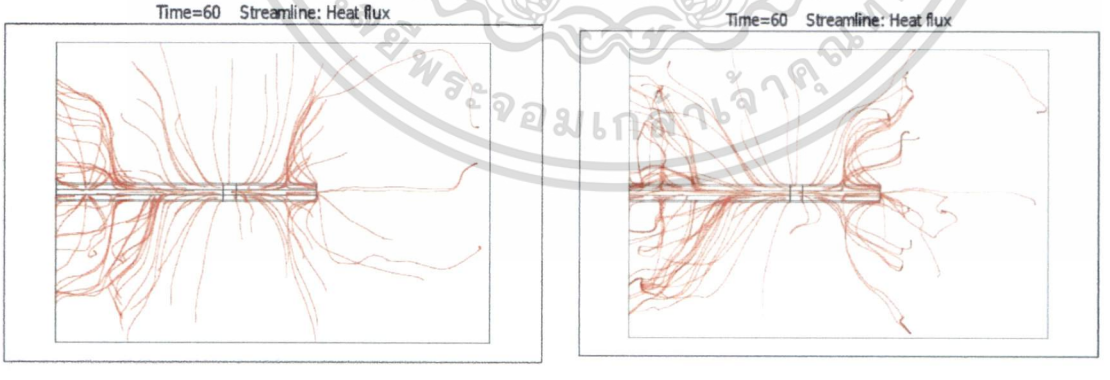
(ก) (ข)

รูปที่ 4.7 (ก) แสดงปริมาตรการทำลายเซลล์มะเร็งที่อุณหภูมิภาย 50 °C ในเนื้อเยื่อปอดขณะหายใจเข้า
(ข) แสดงปริมาตรการทำลายเซลล์มะเร็งที่อุณหภูมิภาย 50 °C ในเนื้อเยื่อปอดขณะหายใจออก



(ก) (ข)

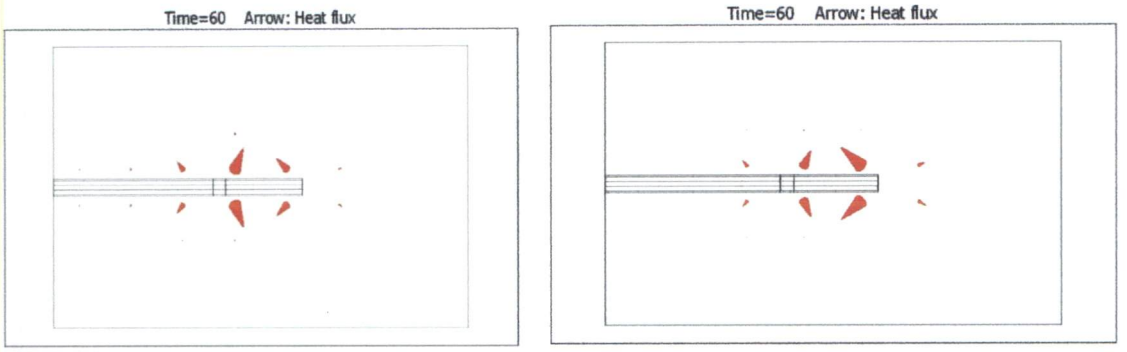
รูปที่ 4.8 (ก) กราฟแสดงปริมาตรการทำลายเซลล์มะเร็งที่อุณหภูมิ 50 °C เทียบกับเวลา ขณะหายใจเข้า
(ข) กราฟแสดงปริมาตรการทำลายเซลล์มะเร็งที่อุณหภูมิ 50 °C เทียบกับเวลา ขณะหายใจออก



(ก) (ข)

รูปที่ 4.9 (ก) แบบจำลองแสดงทิศทางการถ่ายเทความร้อนที่ออกจากสายอากาศแบบสล๊อตเข้าสู่เนื้อเยื่อปอดขณะหายใจเข้า
(ข) แบบจำลองแสดงทิศทางการถ่ายเทความร้อนที่ออกจากสายอากาศแบบสล๊อตเข้าสู่เนื้อเยื่อปอดขณะหายใจออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) (ข)

รูปที่ 4.10 (ก) แบบจำลองแสดงทิศทางการถ่ายเทความร้อนภายในเนื้อเยื่อปอดขณะหายใจเข้า
(ข) แบบจำลองแสดงทิศทางการถ่ายเทความร้อนภายในเนื้อเยื่อปอดขณะหายใจออก

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

จากการจำลองการทำงานพบว่าคลื่นความถี่ไมโครเวฟ สามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อนำมาทำลายเซลล์มะเร็งที่เกิดขึ้นกับอวัยวะปอดได้ โดยจากผลการจกลิงการทำงานด้านไฟไนต์เอลิเมนต์ จะสามารถทราบแพทเทิร์นรูปแบบการทำลายของเนื้อเยื่อปอดในรูปแบบ 3 มิติ ได้ โดยในสถานะของปอด มี 2 สถานะที่ถือว่าเป็นความยุ่งยากของการจำลองการทำงานคือสถานะ หายใจเข้ากับหายใจออก ซึ่งพารามิเตอร์ของการจำลองด้านไดอิเล็กตริค จะมีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ฉะนั้นถือว่าปอด เป็นอวัยวะที่มีการทำงานที่ซับซ้อนเป็นอย่างมาก และแนวทางในการพัฒนาต่อไป อาจจะต้องคำนึงถึงการเคลื่อนที่ ที่จำเป็นต้องมีการยึดเกาะ อวัยวะด้วยวัสดุจับยึด โดยที่ไม่ส่งผลต่อการแพร่กระจายคลื่นแต่อย่างใด จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจในการพัฒนาต่อไป

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3D Finite Element Analysis for Coronary Artery Disease Therapy by using Microwave Ablation

T. Chaiyun[1], P. Phasukkit[1*], C. Pintavirooj[1] and A. Sanpanich[2]
[1]Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok , THAILAND.
[2]Institute of Molecular Biosciences, Mahidol University, Nakhon Pathom, THAILAND.
*kppattar@kmitl.ac.th

***stract* — This paper presents three-dimensions finite ment analysis of 2.45 GHz microwave ablation for plagued onary artery treatment. Any narrowing or blockage of the onary arteries reduces blood supply to the heart tissue, lowing by reducing an amount of delivered oxygen and trients. This phenomenon inhibits a normal function of the art muscle. In this research, we propose an application of ite element method to analyze and simulate a microwave lation process on the blockage or plagued coronary artery. e investigation emphasizes on a reduction of plague or fat e that fixed around a coronary wall when heating by crowave thermal ablation. The simulation results of 3D lysis show the characteristic of temperature distribution in coronary artery and a destructive area of plaque. 10 Watts emission power at temperature 95 °C is used as a liminary value. The simulation found that 3.21 mm^3 of que size can be destroyed with 10 s. These obtained results fully guide us to develop and more investigate on a further tem in the future.**

Keyword; 3D Finite Element Analysis, Coronary Artery ease, Microwave Ablation.

I. INTRODUCTION

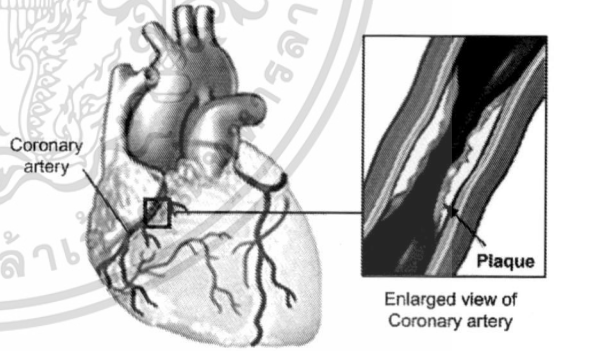
Coronary artery disease, which typically increase over cades, is the most common form of heart disease and is leading cause of death worldwide. In Thailand, every 15 nutes, a victim die from this coronary artery disease and out 25,000 - 30,000 people die every year which 3 times increasing in last 10 years [1]. A complete blockage can se a heart attack (also known as a myocardial infarction MI) when lack of oxygen-rich blood flow causes the rt muscle to die. This may occur as a result of plaque ture and blood clot formation at some site of a narrowed ery. Treatment of coronary artery disease can be done in ious ways such as medications, cardiac catheterization balloon percutaneous transluminal coronary angioplasty CA), the use of thermal ablation and coronary artery pass. The mentioned treatment should not be performed some patients. Therefore, there has been research on the rmal conductivity used in the treatment of coronary ery disease. The use of microwave balloon begin to be sted and widely used [2]. Liu is designed antenna in helical type [3]. Rappaport is experiment in-vitro heart [4]. Rosen is experiments put the antenna in contact with the heart muscle of a dog [5].

In this paper, we present a simulation of microwave ablation to melt a plaque around the coronary artery wall by using 3D finite element analysis. We designed microwave electrode intently generates a powerful pattern that will heat only the plaque not the healthy artery wall.

II. MODEL DESIGN

A. Plaqued Coronary Artery Model

In this research, plaque coronary artery model is designed ideally based on an anatomy of diseased heart as shown in Fig.1. Plague can be formed around artery wall. Figure 2 shows are designed plaque coronary artery in this simulation. The artery model composes of outer heart muscle, artery wall, plaque, blood and lumen. Table I presents a dimension of our vessel model.



a) Heart (anterior view) and plagued coronary artery

b) Cross section of plague coronary artery

Figure 1. Plaqued coronary artery.

8-1-4673-4892-8/12/$31.00 ©2012 IEEE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

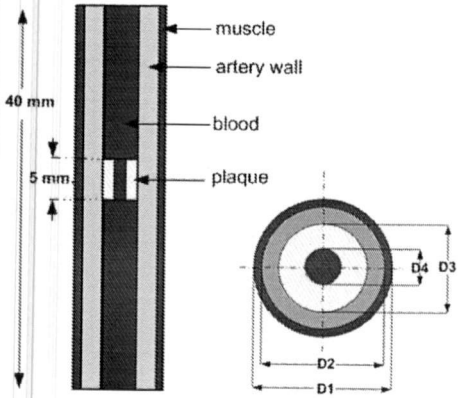


Figure 2. Structure of antenna.

TABLE I. DIMENSIONS AND THICKNESS OF MODEL

Tissue	Diameter (mm.)	Thickness (mm.)
Muscle (D1)	4.0	0.4
Artery Wall (D2)	3.6	1.2
Blood (D3)	2.4	-
Plaque (D3)	2.4	0.7
Lumen (D4)	1.0	-

Opened-tip Applicator Design

Coaxial opened-tip antenna type (COA) was selected as antenna in microwave ablation since it provides a metrical propagation pattern. A destructive area at the of the antenna tip in tissue volume is quite precisely dictable. This applicator also designed based on 0.5 imeter COA antenna as shown in Fig. 3. Figure 4 shows structure of our designed microwave antenna. ensions and materials of this antenna are also shown in le II.

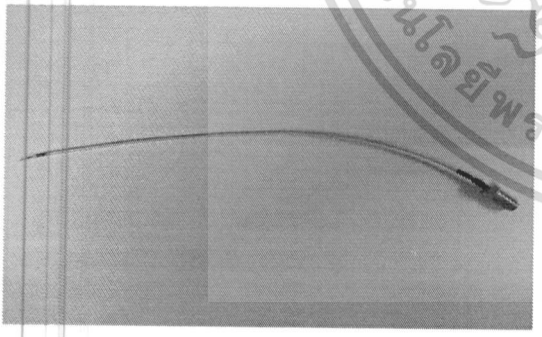


Figure 3. 0.5 mm. COA antenna.

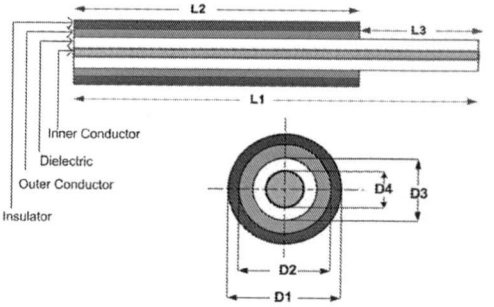


Figure 4. Structure of designing an antenna.

TABLE II. DIMENSIONS OF OPENED-TIP ANTENNA

Dimension	Size (mm.)
Diameter of insulator – D1	1.78
Diameter of outer conductor – D2	1.34
Diameter of dielectric – D3	0.85
Diameter of inner conductor – D4	0.32
Length of antenna (L1)	60.00
Length of outer (L2)	40.00
Length of opened-tip (L3)	20.00

C. Insertion of microwave antenna into plaques coronary artery

As a preliminary, COA applicator was assumed to be inserted into the plaque coronary artery as shown in Fig. 5. The opened-tip is placed at the center of plaque region. Heat from microwave ablation supposes to melt this surrounding plaque or any blockage.

III. IMPLEMENTATION OF FINITE ELEMENT ANALYSIS

The finite element method (FEM) involves dividing a complex geometry model into small elements for a system of partial differential equation, evaluated at node or edges.

In the microwave, the size of the antenna, the antenna corresponds to a wavelength of $\lambda_{eff}/4$ where λ_{eff} is effective wavelength which is equal (1).

$$\lambda_{eff} = \frac{c}{f\sqrt{\varepsilon_{r,tissue}}} \tag{1}$$

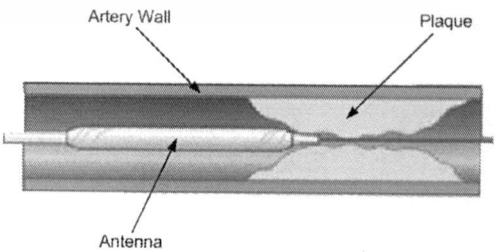


Figure 5. Antenna inserted into plaqued coronary artery.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Where

λ_{eff} = Wavelength in tissues [m]

c = Velocity of light is $3x10^8$ [m/s]

f = Frequency at 2.45 GHz

$\varepsilon_{r,tissue}$ = Electrical conductivity of tissue [s/m]

Bioheat Equation

The source of heat transfer in MW ablation is from ctromagnetic wave at 2.45 GHz transmitted into the sue. Joule heating arises when energy dissipated by an ctric current flowing through a conductor is converted into rmal energy. Tissue temperature changes over time can be dicted by the bio-heat equation [6].

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k.\nabla T) - \rho_b C_b \omega_b (T - T_b) + Q_{met} + Q_{ext} \quad (2)$$

Where

ρ = Density of tissue [kg/m^3]

C = Specific heat of tissue [$J/kg.K$]

k = Thermal conductivity of tissue [$W/m.K$]

T_b = Temperature of blood [$°C$]

ρ_b = Density of blood [kg/m^3]

C_b = Specific heat of blood [$J/kg.K$]

ω_b = Perfusion of blood [$1/s$]

Q_{met} = Energy generated by metabolic processe [W/m^3]

Since Q_{met} is negligible, we excluded it from our FE lels. We also omitted Q_{met} from our preliminary studies.

Specific Absorption Rate (SAR) Distribution

n order to evaluate the heating ability of the antenna, R distribution is widely used. The SAR shows the heat erated by the electric field in the tissue given by

$$SAR = \frac{\sigma}{\rho} E^2 \quad (3)$$

Where

σ = Conductivity of tissue [S/m]

ρ = Density of tissue [kg/m^3]

E = Electric field [V/m]

In this study, we calculate SAR distributions for all cases and compare the results to determine the potential heating pattern of the antenna. The thermal and electrical properties used are from [7-9]. Then, we can derive the volume of SAR according to (4) as below.

$$Q_{ext} = \rho \cdot SAR \quad (4)$$

C. FEM Simulation

In this research, we use COMSOL Multiphysics (version 3.5a) solver to implement FEM analysis. Simulation disease coronary artery model. Microwave frequency was present at 2.45 GHz according to an industrial, scientific and medical (ISM) radio bands criteria. The simulation was truly performed in full 3D model space on Intel Core-i7 2.5 GHz computer and 8 GB of RAM.

IV. Simulation Results

In this simulation, we applied power 10 W for an ablation time is 10 s, the solution time is 1,175.59 s. The simulation results of this study are shown in Fig. 7-9.

A. Meshing

The dividing a complex geometry model into small elements, this is tetrahedral mesh. The mesh used in our models was finer at areas surrounding the distal end of antennas and was coarser at locations further away from the tip of the antennas. The number mesh consists of 111,524 elements and the numbers of degrees of freedom were in the order of 758,198. Meshing refinement the simulation antenna inserted into a plaque coronary artery model shown in Fig. 6

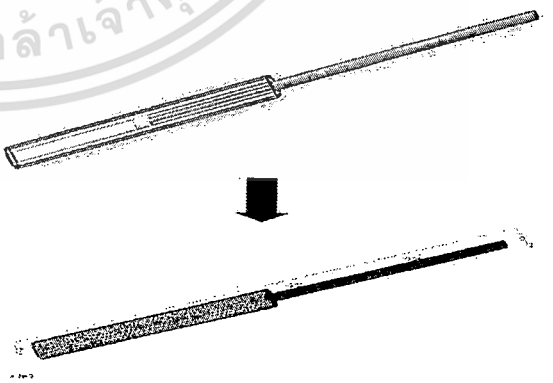


Figure 6. Meshing refinement of simulation model.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Temperature Distribution

Figure 7 shows temperature distributions in our mulation model. Regions with highest temperature were ocused along the perimeter of the opened-tip.

SAR Distribution

Figure 8 shows SAR distribution in which represent ergy absorbed by living tissue.

Desired ablation area

The ablation zone can be calculated by summing the olume of elements with temperature of 95 °C or higher. he ablated coagulation volume as shown in Fig. 9 is proximately 3.21 mm^3

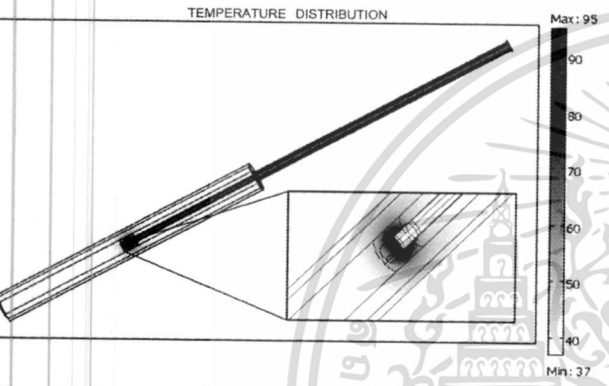


Figure 7. Temperature distribution in vessel and plaque (10 W, 10 s).

Figure 8. SAR distribution in simulation model.

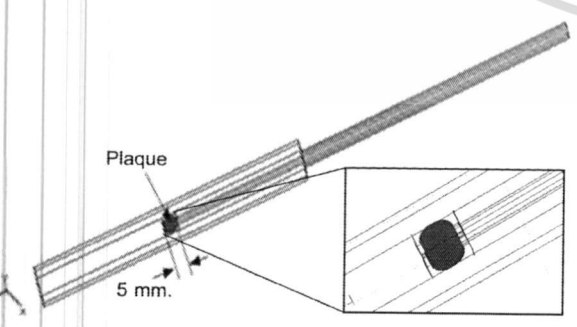


Figure 9. Ablated zone(red color) indicates a destructive volume.

E. Characteristic of the ablation

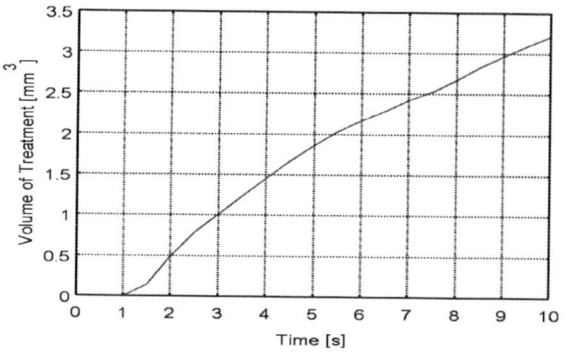


Figure 10. Relation between volume of treatment and ablation time.

As seen in Fig. 10, temperature obtained from microwave ablation increased dramatically.

V. Discussion and Conclusion

According to the simulation results, our system shows an increasing of ablation temperature is dramatically due to an energy obtained from microwave. Desired ablation area or melting area in plaque should be controlled precisely in order to prevent damage of artery wall.

We propose a simulation of microwave ablation for plaque coronary artery by using 3D FEM. Plague assumed to be melted at the ablation temperature higher than 95 °C. The estimated ablation area can be used to represent a melting plaque in coronary vessel. This investigation guide us to further simulate more complex models of coronary artery especially in term of deformation plaque. In future work, we will be validation with in-vitro or phantom for compare to simulation results.

References

[1] [Online]. Available: http://www.thaiheartclinic.com

[2] H. Rosen, A. Rosen, and P. Walinsky, "Microwave Balloon Systems in Medicine," IEEE PULSE, pp. 8-15, 2010.

[3] P. Liu and C. M. Rappaport, "A Helical Microwave Antenna for Welding Plaque During Balloon Angioplasty," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 44, no. 10, Oct. 1996.

[4] C. Rapaport, "Treating Cardiac Diseae with Cather-Based Tissue Heating," IEEE Microwave Mag., pp. 57-64, Mar. 2002.

[5] A. Rosen, A. J. Greenspon, and P. Walinsky, " Microwaves treat heart disease," *IEEE Microwave Mag.*, pp. 70 – 75, February 2007.

[6] P. Phasukkit, S.Tungjitkusolmun, and M. Sangworasil, "Finite Element Analysis and *in vitro* Experiments of Placement Configurations Using Triple Antennas in Microwave Hepatic Ablatio," IEEE Trans. Biomed. Eng., vol. 56, pp. 2564-2572, Nov. 2009.

[7] W. Jakawanchaisri, A. Sanpanich, P. Phasukkit, C. Pintavirooj, and S. Tungjitkusolmun, "FEM Analysis of Microwave Ablation for Snoring Therapy by Using Real Image," in Proc ICBET 2012.

[8] A. Sanpanich, P. Phasukkit, S. Pairoch, D. Sueaseenak, Y. Kajornpreedanon, K. Hamamoto, C. Pintavirooj, "A Basic Investigation of Cancerous Breast Microwave Ablation Using Opened-tip Applicator and *Ex Vivo* Experiment," in *Proc.* 31th JSST, Kobe, 2012.

[9] [Online]. Available: http://niremf.ifac.cnr.it/tissprop/.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้