

# แบบจำลองไฟไนต์อีลีเมนต์สำหรับอิเล็กทรอนิกส์อะคูสติกทรานส์ดีวเซอร์

A FINITE ELEMENT MODEL  
FOR AN ELECTROMANETIC ACOUSTIC TRANSDUCER

ขวัญชัย เรืองบุญคุ้มสุข  
KWANCHAI RUANGBUNKUMSUK

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาค้นคว้าหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2551

KMITL.-2008-EN-M-040-354

แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์สำหรับอิเล็กทรอนิกส์อะคูสติกทรานสดิวเซอร์

A FINITE ELEMENT MODEL  
FOR AN ELECTROMANETIC ACOUSTIC TRANSDUCER



ขวัญชัย เรืองบุญคุ้มสุข

KWANCHAI RUANGBUNKUMSUK

อพ.  
22622  
2551

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน...82740  
วัน,เดือน,ปี...22 ก.ค. 2551

b. 11951524  
i. ....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2551

KMITL-2008-EN-M-354

**A FINITE ELEMENT MODEL  
FOR AN ELECTROMANETIC ACOUSTIC TRANSDUCER**

**KWANCHAI RUANGBUNKUMSUK**

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

**2008**

**KMITL-2008-EN-M-354**

**COPYRIGHT 2008**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**



|                             |   |
|-----------------------------|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์           | แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์สำหรับอิเล็กทรอนิกส์ทรานส์ดิวเซอร์ |
| นักศึกษา                    | นาย ขวัญชัย เรืองบุญคุ้มสุข                               |
| รหัสประจำตัว                | 48060408  |
| ปริญญา                      | วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต                                    |
| สาขาวิชา                    | วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์                                    |
| พ.ศ.                        | 2551  |
| อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ | ดร.ศิริเดช บุญแสง   |

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ของEMAT (Electromagnetic acoustic transducer) สำหรับการวัดคลื่นเสียงความถี่สูง(Ultrasonic) โดยไม่สัมผัส เช่นเซอร์ซันดี้ตอบสนองต่อคลื่นอัลตราโซนิกที่ความยาวคลื่นในหน่วยพิโกเมตร โดยใช้โปรแกรม COMSOL Multiphysics 3.3 ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้วิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์ การคำนวณตามแบบจำลองนี้ประกอบด้วย 2 กระบวนการ กระบวนการแรกคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของอนุภาค ( $v$ ) ที่เกิดจากคลื่นอัลตราโซนิกและความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก( $B$ ) ที่เกิดจากแม่เหล็กถาวรของ EMAT ทำให้เกิดกระแสวน( $J$ ) ซึ่งเป็นไปตามสมการ Lorentz force กระบวนการที่สองจะใช้ประโยชน์ของกระแสวนที่ได้จากกระบวนการแรกมาสร้างแบบจำลองเพื่อทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก สนามแม่เหล็กนี้ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำและมีผลทำให้เกิดค่าความต่างศักย์ขึ้นที่ขดลวด EMAT โดยจะทำการวิเคราะห์ถึงปัจจัยต่างๆที่มีผลตอบสนองต่อการรับสัญญาณ และผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองจะมีผลคล้ายคลึงกับผลที่ได้จากการวัดจริง

|                       |  |
|-----------------------|--|
| <b>Thesis Title</b>   | A FINITE ELEMENT MODEL FOR AN ELECTROMAGNETIC<br>ACOUSTIC TRANSDUCER |
| <b>Student</b>        | Mr. Kwanchai Ruangbunkumsuk  |
| <b>Student ID.</b>    | 48060408   |
| <b>Degree</b>         | M.Eng  |
| <b>Programme</b>      | Electronics Engineering  |
| <b>Year</b>           | 2008   |
| <b>Thesis Advisor</b> | Dr.Siridech Boonsang   |

### **ABSTRACT**

This thesis concerns about a finite element model of electromagnetic acoustic transducer (EMAT) for non-contact ultrasonic measurements. An EMAT was previously described as a sensitive sensor for picometer-scale ultrasonic measurements. The model presented here has two numerical procedures. The first procedure involves the calculation of the interaction of particle velocities as results from ultrasonic waves and the magnetic flux density from EMAT permanent magnets. A resulting eddy current distribution within the sample can be calculated according to Lorentz force mechanism. The second procedure utilizes the calculated eddy current distribution as an input for the modeling of its radiated electromagnetic field. An induced voltage in an EMAT pickup coil is then calculated from the magnetic fields linking within the coil. The simulation results show good agreement with experimental results.

## กิตติกรรมประกาศ

จากการที่วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีนั้น ข้าพเจ้าต้องขอขอบพระคุณบุคคลต่างๆ ที่ได้มีส่วนร่วมในงานวิจัย ดังต่อไปนี้

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อคุณแม่ ที่ได้ให้กำเนิด อบรมสั่งสอน เลี้ยงดูข้าพเจ้าจนเติบโตใหญ่และให้โอกาสในการศึกษาดังเช่นที่ข้าพเจ้าตั้งใจ รวมไปถึงกำลังใจที่ท่านได้มอบให้ตลอดเวลา

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.ศิริเดช บุญแสง ที่ให้ความรู้คำแนะนำ ตักเตือนในการทำงานวิจัยในทุกๆด้าน ตลอดช่วงเวลาที่ข้าพเจ้าศึกษาอยู่

ขอขอบพระคุณอาจารย์มีชัย โลหะการ ผู้สนับสนุนการทำงานต่างๆในทุกด้าน ให้คำแนะนำที่ดีต่างๆ ตลอดจนมอบประสบการณ์แก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณรุ่นน้องในห้องทดลองของข้าพเจ้าเป็นเพื่อนคู่คิดซึ่งให้คำปรึกษาคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ตลอดเวลาที่ข้าพเจ้าศึกษาอยู่ พิน ฝ่าย เกด ชิด ผู้ให้การช่วยเหลือเกื้อกูลกันตลอดเวลา

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกๆ ท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ขวัญชัย เรืองบุญคุ้มสุข

# สารบัญ

|  | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....   | I    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....  | II   |
| กิตติกรรมประกาศ.....   | III  |
| สารบัญ.....  | IV   |
| สารบัญตาราง.....   | VIII |
| สารบัญรูป.....   | IX   |
| บทที่ 1 บทนำ.....  | 1    |
| 1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย.....   | 1    |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....   | 1    |
| 1.3 สมมติฐานในการศึกษา.....  | 1    |
| 1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย.....                             | 2    |
| 1.5 ขอบเขตของงานวิจัย.....   | 3    |
| 1.6 โครงสร้างวิทยานิพนธ์.....  | 3    |
| บทที่ 2 ทฤษฎี.....   | 4    |
| 2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับคลื่นอัลตราโซนิก.....                          | 4    |
| 2.2 อัลตราโซนิกทรานส์ดิวเซอร์.....                                       | 4    |
| 2.2.1 อัลตราโซนิกทรานส์ดิวเซอร์ชนิดที่ใช้ปรากฏการณ์เปียโซอิเล็กทริก..... | 4    |
| 2.2.2 อัลตราโซนิกทรานส์ดิวเซอร์แบบแมกนีโตรสทริกทีฟ.....                  | 5    |
| 2.2.3 อิเล็กโทรแมกเนติกอะคูสติกทรานส์ดิวเซอร์(EMAT).....                 | 9    |
| 2.3 ทบทวนงานประพันธ์ที่ผ่านมา.....                                       | 10   |
| 2.4 คุณสมบัติของอิเล็กโทรแมกเนติกอะคูสติกทรานส์ดิวเซอร์(EMAT).....       | 11   |
| 2.5 การออกแบบ EMAT.....  | 12   |
| 2.5.1 การออกแบบ EMAT; สารที่ไม่ใช่แม่เหล็ก(Nonmagnetic).....             | 14   |
| 2.5.2 คลื่นตามยาว (L-wave); สารที่ไม่ใช่แม่เหล็ก(Nonmagnetic).....       | 15   |
| 2.5.3 คลื่นตามขวาง (SH wave); สารที่ไม่ใช่แม่เหล็ก(Nonmagnetic).....     | 18   |
| 2.5.4 มุมล้าคลื่นเสียง EMAT, L and SV Waves; สารไม่ใช่แม่เหล็ก.....      | 20   |
| 2.5.5 มุมล้าคลื่นคลื่นตามขวางแนวนอน EMAT.....                            | 22   |
| 2.5.6 EMAT สำหรับคลื่นงานและคลื่น; สารไม่ใช่แม่เหล็ก.....                | 23   |

## สารบัญ(ต่อ)

|  | หน้า |
|--|------|
| 2.5.7 ลำคลื่นโพกัส EMAT; สารไม่ใช่แม่เหล็ก.....                            | 24   |
| 2.5.8 การออกแบบ EMAT ; สารแม่เหล็ก (Magnetic).....                         | 24   |
| 2.5.9 คลื่นตามยาว(L-wave); สารแม่เหล็ก (Magnetic).....                     | 25   |
| 2.5.10 คลื่นตามขวางแนวนอน (SH-wave); สารแม่เหล็ก (Magnetic).....           | 25   |
| 2.5.11 มุมลำคลื่น EMAT, คลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางแนวตั้ง; สารแม่เหล็ก.... | 25   |
| 2.5.12 มุมลำคลื่น EMAT, คลื่นตามขวางแนวนอน; สารแม่เหล็ก.....               | 26   |
| 2.5.13 EMAT สำหรับคลื่นงานและคลื่น; สารแม่เหล็ก.....                       | 26   |
| 2.5.14 คลื่นผิว EMAT; สารแม่เหล็ก (Magnetic).....                          | 26   |
| 2.5.15 ลำคลื่นเสียง EMAT ซึ่งถูกโพกัส; สารแม่เหล็ก (Magnetic).....         | 26   |
| 2.6 การออกแบบส่วนของแม่เหล็ก.....  | 26   |
| 2.6.1 วัสดุแม่เหล็ก.....   | 27   |
| 2.6.1.1 สารไดอะแมกเนติก.....   | 27   |
| 2.6.1.2 พาราแมกเนติก.....  | 27   |
| 2.6.1.3 เฟอร์โรแมกเนติก.....   | 28   |
| 2.6.1.4 แอนติเฟอร์โรแมกเนติก.....  | 28   |
| 2.6.1.5 เฟอร์ริแมกเนติก.....   | 28   |
| 2.6.1.6 ซุปเปอร์พาราแมกเนติก.....  | 29   |
| 2.6.2 เมกเนโตเซชัน และเฟอร์เมียลบลิตี.....                                 | 30   |
| 2.6.3 แม่เหล็กไฟฟ้า(Electromagnets).....                                   | 32   |
| 2.6.4 แม่เหล็กถาวร (Permanent Magnets).....                                | 34   |
| 2.6.5 พัลส์สนามแม่เหล็ก (Pulsed-Field Magnets).....                        | 36   |
| 2.6.6 การนำไฟฟ้าได้ดีของแม่เหล็ก.....                                      | 36   |
| 2.7 การคำนวณค่าทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์.....                                  | 37   |
| 2.7.1 สนามที่ตั้งฉากสำหรับคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวาง.....                  | 38   |
| 2.7.2 เส้นวงเวียนขดลวด EMAT.....   | 39   |
| 2.7.3 แม่เหล็กถาวร EMAT.....   | 40   |
| 2.8 การพิจารณาลำคลื่นเสียงกระจาย.....                                      | 40   |
| 2.9 การพิจารณาระยะเลื่อนอกของแม่เหล็กและขดลวด.....                         | 41   |
| 2.10 จุดโพกัส.....   | 42   |

# สารบัญ(ต่อ)

|  | หน้า |
|--|------|
| 2.11 Apodization.....  | 43   |
| 2.12 วงจรอิเล็กทรอนิกส์สำหรับ EMAT.....  | 43   |
| 2.12.1 ตัวขับ EMAT.....  | 44   |
| 2.12.2 ตัวรับ EMAT: Broadband and Tuned.....                                       | 45   |
| 2.12.3 สัญญาณรบกวนใน EMAT .....  | 45   |
| 2.12.4 EMAT Impedance-Matching Transformers.....                                   | 46   |
| 2.13 การคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด EMAT.....                                  | 46   |
| 2.14 การสร้างคลื่นโดยใช้สมการคลื่น.....  | 47   |
| 2.15 การออกแบบ EMAT ในส่วนการทดลองและการจำลอง.....                                 | 48   |
| 2.16 การใช้งานของ EMAT ในด้านต่างๆ.....  | 50   |
| 2.16.1 การวัดความหนาด้วยอัลตราโซนิก.....   | 50   |
| 2.16.1.1 วัตถุที่สามารถวัดได้.....   | 50   |
| 2.16.1.2 คลื่นอัลตราโซนิกสามารถวัดความหนาได้อย่างไร.....                           | 50   |
| 2.16.1.3 ชนิดของทรานส์ดิวเซอร์.....  | 52   |
| 2.16.1.4 สิ่งที่พิจารณา.....   | 53   |
| 2.16.2 การหารอยแตกร้าวโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิก.....                                  | 54   |
| 2.16.2.1 ทฤษฎีพื้นฐาน.....   | 54   |
| 2.16.2.2 อัลตราโซนิกทรานส์ดิวเซอร์.....  | 57   |
| 2.16.3 เครื่องอัลตราโซนิกในการวิเคราะห์วัสดุ.....                                  | 58   |
| บทที่ 3 การทดลองและผลการทดลอง.....   | 61   |
| 3.1 การกำหนดการเคลื่อนที่ของคลื่นแบบเชิงเส้นตามแนว(Linear Solver).....             | 63   |
| 3.2 การกำหนดการเคลื่อนที่ของคลื่นแบบเปลี่ยนแปลงตามเวลา<br>และรูปแบบคลื่นเสียง..... | 69   |
| 3.3 การจำลองรูปแบบของคลื่น โดยใช้สมการคลื่น.....                                   | 74   |
| 3.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการตอบสนองสัญญาณของ EMAT.....                                  | 85   |
| 3.4.1 ค่าเมกเนไตซ์เซชัน(Magnetization).....  | 85   |
| 3.4.2 พื้นที่ในการรับสัญญาณ.....   | 87   |

## สารบัญ(ต่อ)

|  | หน้า |
|--|------|
| 3.4.3 ผลการตอบสนองเชิงความถี่.....                       | 89   |
| 3.4.3.1 สัมพันธ์กับความถี่.....                          | 89   |
| 3.4.3.2 สัมพันธ์กับระยะห่างหัววัดEMAT กับอลูมิเนียม..... | 90   |
| 3.5 การทดลองจริง โดยเปรียบเทียบผลที่ได้กับการจำลอง.....  | 91   |
| <br>   |      |
| บทที่ 4 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....                         | 99   |
| 4.1 บทสรุป.....  | 99   |
| 4.2 ข้อเสนอแนะ.....                                      | 100  |
| <br>   |      |
| บรรณานุกรม.....  | 101  |
| <br>   |      |
| ภาคผนวก.....   | 106  |
| <br>   |      |
| การเผยแพร่ผลงานวิทยานิพนธ์หรือการศึกษาอิสระ.....         | 117  |
| <br>   |      |
| ประวัติผู้เขียน.....                                     | 118  |

# สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า  |
|----------|---|
| 2.1      | คุณสมบัติของเหล็กถาวรสำหรับวัสดุแบบต่างๆ.....17   |
| 2.2      | แสดงชนิดของเนื้อสารต่อค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ทำให้สารแม่เหล็กอิ่มตัว.....30          |
| 2.3      | ผู้ผลิตวัสดุแม่เหล็กถาวรพลังงานสูง.....36   |
| 3.1      | ค่าแมกเนไตร์เซชันที่มีผลต่อสัญญาณ EMF.....86  |
| 3.2      | พื้นที่รับสัญญาณขดลวดกับสัญญาณ EMF.....88   |
| 3.3      | ค่าแอมพลิจูดสูงสุดของคลื่นอัลตราโซนิกที่วัดได้กับ<br>ระยะห่างอคูมิเนี่ยมกับ EMAT.....95 |

# สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า  |
|--------|---|
| 1.1    | โปรแกรม COMSOL Multi physics ใช้งานได้หลากหลายสาขาทางวิศวกรรม.....3   |
| 2.1    | ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก.....5  |
| 2.2    | การยืดหยุ่นวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเพื่อใช้งาน โดยทั่วไป..... 5  |
| 2.3    | โครงสร้างของทรานส์ดิวเซอร์ชนิดที่ใช้หลักการโค้งงอของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก..... 6  |
| 2.4    | ลักษณะการยืดทรานส์ดิวเซอร์ชนิดที่ใช้หลักการโค้งงอของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก..... 6  |
| 2.5    | ปรากฏการณ์เมกนีโตรสตริกชัน.....7  |
| 2.6    | ความสัมพันธ์ของระยะทางที่เปลี่ยนแปลงไปต่อความเข้ม<br>ของสนามแม่เหล็กในสารเฟอร์โรแมกเนติกแต่ละชนิด..... 8                        |
| 2.7    | โครงสร้างทั่วไปของทรานส์ดิวเซอร์แบบเมกนีโตรสตริกทีฟ..... 8  |
| 2.8    | รูปแบบการรับส่งสัญญาณอัลตราโซนิคของ Piezoelectric กับ EMAT.....12   |
| 2.9    | แม่เหล็กรูปตัว C ที่สร้างสนามแม่เหล็กที่ขนานกับผิวโดยปราศจากสิ่งกีดขวาง.....16  |
| 2.10   | สองขดลวดที่ใช้สร้าง S และ L wave ในโลหะ ความกว้าง<br>หรือระยะขดลวด (R หรือ W) และระยะการเลี้ยวเบนแหล่งกำเนิด (R หรือ L)..... 17 |
| 2.11   | แม่เหล็กถาวรขนาดเล็กเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว (2.5 cm) สูง 1.5 นิ้ว (3.8 cm)..... 19   |
| 2.12   | เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการคำนวณกับการวัดที่ตอบสนองต่อขดลวด.....20   |
| 2.13   | ขดลวดวงเวียน EMATที่ใช้ในการจับสนามแม่เหล็กที่ขนานและตั้งฉากกับพื้นผิว.....20   |
| 2.14   | ประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์สำหรับการเกิดมุมล้าคลื่น SV และ L wave.....21  |
| 2.15   | แม่เหล็กถาวรและขดลวด RF EMAT ในรูปแบบที่ทำให้การรับสัญญาณได้ดี.....23   |
| 2.16   | โพกัสล้าคลื่น(คลื่นผิว) ที่สร้างจาก EMATs.....24  |
| 2.17   | ลักษณะการกระจายของสนามแม่เหล็กจากแม่เหล็กรูปตัว C ที่วางใกล้วัสดุ.....25  |
| 2.18   | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Magnetization (M)<br>กับค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก (H) ของวัสดุต่างๆ.....29                      |
| 2.19   | ทิศทางของตัวแปรในการคำนวณเมกเนโตเซชัน.....31  |
| 2.20   | เส้นกราฟสำหรับวัสดุแม่เหล็กถาวร rhenium-cobalt พลังงานสูง.....35  |
| 2.21   | เส้นกราฟสำหรับวัสดุแม่เหล็กถาวร neodymium-ferrite พลังงานสูง.....35   |
| 2.22   | การออกแบบโครงสร้าง EMAT.....49  |
| 2.23   | รูปแบบสำหรับการทดลอง EMAT.....50  |
| 2.24   | วิธีการวัดขนาดของวัตถุ.....52   |
| 2.25   | การใช้งานในการหารอยแตกร้าว.....54   |

## สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่ | หน้า   |
|--------|--|
| 2.26   | แสดงมุมตกกระทบ, มุมสะท้อน และมุมหักเหของลำคลื่น.....57                         |
| 2.27   | ภาพตัดขวางการเชื่อมต่อทรานส์คิวเซอร์.....57                                    |
| 2.28   | การหารอยแตกร้าวของวัสดุ โดยวิธีการสะท้อนกลับของสัญญาณ.....58                   |
| 2.29   | การประยุกต์ใช้ EMAT ในอุตสาหกรรมต่างๆ.....60                                   |
| 3.1    | ส่วนประกอบของโมเดล EMAT.....61   |
| 3.2    | รูปแบบโมเดล EMAT แสดงสนามแม่เหล็กที่เกิดจากแม่เหล็กถาวรสองชิ้น.....62          |
| 3.3    | ส่วนที่กำหนดความเร็วอนุภาคและเป็นอสมิเนียม.....64                              |
| 3.4    | การกำหนดความเร็วอนุภาคอสมิเนียมที่ Subdomain Settings.....64                   |
| 3.5    | กำหนดค่าคงที่.....65   |
| 3.6    | กำหนดรูปแบบการแสดงผล.....65  |
| 3.7    | คลื่นไซน์ ความถี่ 5 MHz.....66   |
| 3.8    | แบบจำลองการเคลื่อนที่ของคลื่นตามเส้นทางที่กำหนด.....67                         |
| 3.9    | ค่ากระแสที่เกิดขึ้นที่อสมิเนียมและทิศทางเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้น.....67      |
| 3.10   | สัญญาณ Magnetic flux density, norm (B).....68                                  |
| 3.11   | กำหนดการแสดงผลค่าความเร็วอัลตราโซนิคในแนวแกน y.....70                          |
| 3.12   | คลื่นไซน์จากการจำลองและแปรผันตามเวลา.....70                                    |
| 3.13   | คลื่นอัลตราโซนิคที่ได้จากการจำลองรูปแบบคลื่นเสียงความถี่ 5 MHz.....72          |
| 3.14   | คลื่นอัลตราโซนิคที่ได้จำลองรูปแบบคลื่นเสียงที่ความถี่ 5 MHz.....72             |
| 3.15   | กระแสในอสมิเนียมที่เกิดจากสัญญาณอัลตราโซนิคกับสนามแม่เหล็ก.....73              |
| 3.16   | กระแสที่ผิวอสมิเนียม แสดงผลแบบ Cross-Section.....73                            |
| 3.17   | สัญญาณคลื่นอัลตราโซนิคที่ได้จากการคำนวณในขดลวด.....74                          |
| 3.18   | กำหนดค่า Subdomain Settings ในอสมิเนียม.....76                                 |
| 3.19   | กำหนดค่า Boundary Settings.....77  |
| 3.20   | เส้นขอบเขตเงื่อนไขที่กำหนด.....77  |
| 3.21   | การกำหนดรูปแบบการแสดงผลค่าการเคลื่อนที่ของอนุภาค(u) แบบระดับสี(Surface).....78 |
| 3.22   | คลื่นที่ได้จากการสมการคลื่นที่ความถี่ 5 MHz.....78                             |
| 3.23   | สัญญาณคลื่นอัลตราโซนิคที่ได้จากสมการคลื่นความถี่ 5 MHz.....79                  |
| 3.24   | ค่าสัมบูรณ์การเคลื่อนที่ของอนุภาค ( $ u $ ) ที่ความถี่ 1 MHz.....79            |
| 3.25   | ค่าสัมบูรณ์การเคลื่อนที่ของอนุภาค ( $ u $ ) ที่ความถี่ 2 MHz.....80            |

## สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่ | หน้า  |
|--------|---|
| 3.26   | ค่าสัมบูรณ์การเคลื่อนที่ของอนุภาค ( $ u $ ) ที่ความถี่ 3 MHz.....80               |
| 3.27   | ค่าสัมบูรณ์การเคลื่อนที่ของอนุภาค ( $ u $ ) ที่ความถี่ 4 MHz.....81               |
| 3.28   | ค่าสัมบูรณ์การเคลื่อนที่ของอนุภาค ( $ u $ ) ที่ความถี่ 5 MHz.....81               |
| 3.29   | ค่าสัมบูรณ์การเคลื่อนที่ของอนุภาค ( $ u $ ) ที่ความถี่ 6 MHz.....82               |
| 3.30   | ค่าสัมบูรณ์การเคลื่อนที่ของอนุภาค ( $ u $ ) ที่ความถี่ 7 MHz.....82               |
| 3.31   | ค่าสัมบูรณ์การเคลื่อนที่ของอนุภาค ( $ u $ ) ที่ความถี่ 8 MHz.....83               |
| 3.32   | ค่าสัมบูรณ์การเคลื่อนที่ของอนุภาค ( $ u $ ) ที่ความถี่ 9 MHz.....83               |
| 3.33   | ค่าสัมบูรณ์การเคลื่อนที่ของอนุภาค ( $ u $ ) ที่ความถี่ 10 MHz.....84              |
| 3.34   | กระแสที่เกิดจากคลื่นอัลตราโซนิคและสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแส.....84              |
| 3.35   | กำหนดค่าเมกเนไดร์เซชันที่ Subdomain Settings.....85                               |
| 3.36   | กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง EMF กับ Magnetization.....86                              |
| 3.37   | การกำหนดความกว้างของขดลวดที่ขนาดต่างๆ.....87                                      |
| 3.38   | กราฟสัญญาณ EMF กับพื้นที่รับสัญญาณของขดลวด.....88                                 |
| 3.39   | ค่าสัมบูรณ์แอมพลิจูดของคลื่นอัลตราโซนิคกับความถี่ในฟิวอลูมิเนียม.....89           |
| 3.40   | สัญญาณ EMF กับความถี่ในขดลวดเหนี่ยวนำ.....90                                      |
| 3.41   | การเปลี่ยนแปลงความถี่และระยะห่างที่มีผลต่อการตอบสนองสัญญาณ.....91                 |
| 3.42   | หัวโพรบ EMAT.....92   |
| 3.43   | รูปแบบกระบวนการทดลอง.....92   |
| 3.44   | เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....93   |
| 3.45   | อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....94  |
| 3.46   | สัญญาณที่วัดได้โดยผ่านคอมพิวเตอร์.....94  |
| 3.47   | ค่าสัญญาณ EMF ที่วัดได้ที่ระยะห่างของ EMAT กับอลูมิเนียมตั้งแต่ 0.0-0.5 mm.....95 |
| 3.48   | ค่าแอมพลิจูดของสัญญาณ EMF ของการจำลองและการทดลองจริง.....96                       |
| 3.49   | กราฟของสัญญาณ EMF ที่ได้จากการจำลองกับความถี่ ในหน่วย Voltage.....97              |
| 3.50   | กราฟของสัญญาณ EMF ที่ได้จากการทดลองจริงกับความถี่ ในหน่วย dB.....98               |

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

คลื่นอัลตราโซนิค (Ultrasonic) นั้น เป็นคลื่นที่มีคุณสมบัติของคลื่นเสียงหากแต่มีความถี่สูงเกินกว่าระดับการได้ยินของมนุษย์ มีพลังงานอยู่ในรูปของพลังงานทางกล สามารถใช้ประโยชน์ในงานด้านต่างๆ ได้มากมาย ทั้งทางด้านการบินเรือ ด้านอุตสาหกรรม เครื่องมือวัดต่างๆ โดยใช้หลักการทางคลื่นเสียง เช่น การวัดรอยแตกร้าวในท่อส่งก๊าซ การวัดขนาดของโลหะ รวมไปถึงทางด้าน การตรวจวินิจฉัยทางการแพทย์ ซึ่งปัจจุบันใช้อัลตราโซนิคทรานส์ดิวเซอร์ (Piezoelectric Transducer) ในการตรวจวัดสัญญาณอัลตราโซนิค ซึ่งจำเป็นต้องใช้ตัวกลางในการรับส่งสัญญาณ เช่น เจล, น้ำ เป็นต้น งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยถึงการตรวจวัดคลื่นอัลตราโซนิค โดยใช้ทฤษฎีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเรียกอุปกรณ์นี้ว่า EMAT (Electromagnetic Acoustic Transducer) เนื่องจากคุณสมบัติเด่นคือไม่จำเป็นต้องสัมผัสกับตัวอย่างที่ใช้ในการวัด และเซนเซอร์ชนิดนี้ตอบสนองคลื่นอัลตราโซนิคในหน่วยพิโคเมตร [1]

### 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาการตรวจวัดสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิค โดยใช้หลักการของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า
2. เพื่อศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อการตรวจวัดคลื่นอัลตราโซนิค
3. เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองจริงกับผลที่ได้จากการจำลอง (Simulation) เพื่อความแม่นยำความเป็นไปได้ในการตรวจวัดสัญญาณ และปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพเหมาะสม
4. เพื่อประยุกต์ผลจากการทดลองเพื่อนำไปประยุกต์ในการใช้งานจริง

### 1.3 สมมุติฐานในการศึกษา

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการรับสัญญาณอัลตราโซนิคในโลหะ โดยใช้อิเล็กทรอนิกส์ทรานส์ดิวเซอร์ โดยตัวส่งสัญญาณอัลตราโซนิคนั้นใช้เครื่อง Pulse generator และใช้อัลตราโซนิคทรานส์ดิวเซอร์แบบเปียโซอิเล็กทริก (5 MHz) ในส่วนของการจำลอง (Simulation) จะทำการออกแบบ EMAT มีผลในการตอบสนองสัญญาณที่ดี ซึ่งปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อสัญญาณ จะเป็นไปตามทฤษฎีทางแม่เหล็กไฟฟ้า, สมการลอเรนซ์ โดยส่วนของคลื่นอัลตราโซนิคที่อยู่ในโลหะจากการจำลองสร้างโดยใช้สมการคลื่น

## 1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย

สำหรับตัววัดคลื่นอัลตราโซนิก(Ultrasonic) โดยใช้ EMAT จะใช้ทฤษฎีทางแม่เหล็กไฟฟ้า และคุณสมบัติของคลื่นกล โดยอาศัยสมการแรงของลอเรนซ์(Lorentz force) ด้วยวิธีส่งสนามแม่เหล็กโดยที่ไม่ต้องสัมผัสกับวัตถุที่นำมาใช้ในการทดสอบ โดยวัตถุที่นำมาใช้ในการทดสอบนั้นจะได้รับค่าสนามแม่เหล็กจากแม่เหล็กถาวรซึ่งอยู่ในอุปกรณ์วัด โดยจะมีขดลวดใช้สำหรับเป็นตัวเหนี่ยวนำสัญญาณ โดยค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก( $\vec{B}$ )ที่เกิดจากแม่เหล็กใน EMAT จะทำปฏิกิริยากับความเร็วอนุภาคซึ่งเกิดจากคลื่นอัลตราโซนิกในวัตถุด้วยความเร็ว( $\vec{v}$ ) โดยจะทำให้เกิดค่าของความหนาแน่นของกระแส( $\vec{J}$ ) เกิดขึ้นที่วัตถุตามสมการแรงของลอเรนซ์ (Lorentz force)

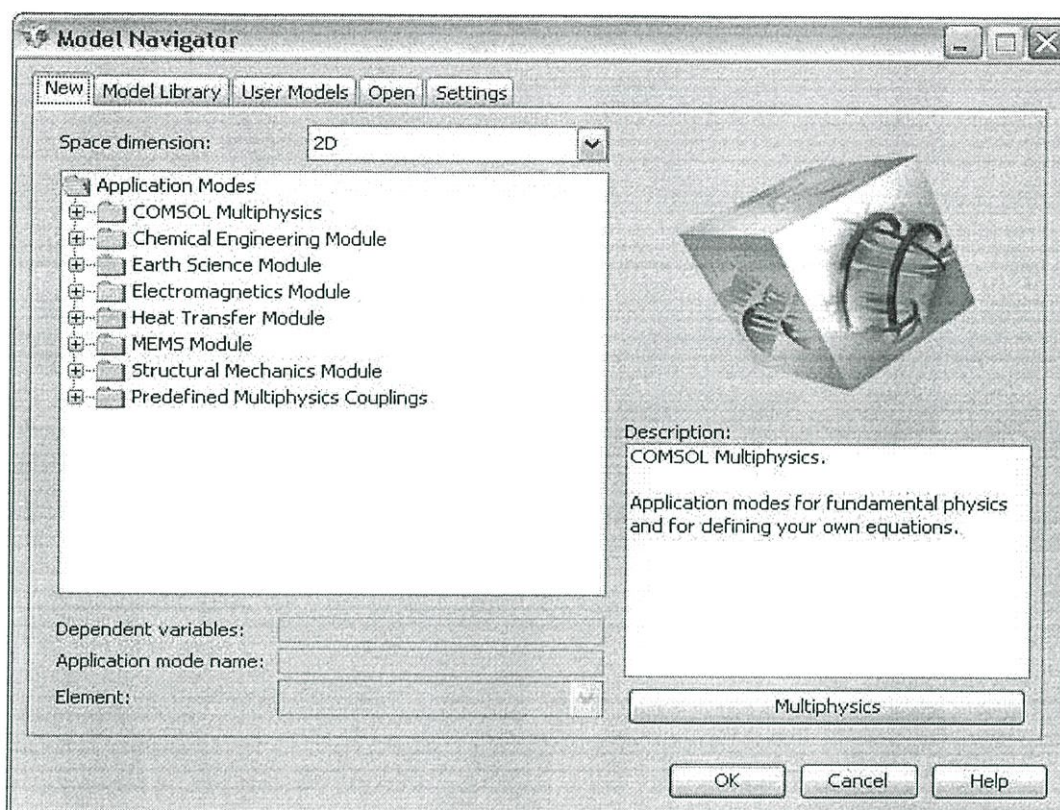
$$\vec{J} = \sigma(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (1.1)$$

โดยที่  $\sigma$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำไฟฟ้าของวัตถุ และเมื่อมีค่าความหนาแน่นของกระแส( $\vec{J}$ ) ก็จะทำให้เกิดค่าของสนามแม่เหล็กขึ้นด้วยจากกฎของแอมแปร์ โดยทฤษฎีของอิลเล็กโตรแมกเนติกอะคูสติกทรานส์ดิวเซอร์นั้น จะกล่าวโดยละเอียดในบทที่ 2

เนื่องจากการทดลองโดยใช้อุปกรณ์สำหรับการทดลองมีขั้นตอนการทดลองที่ยุ่งยาก ต้องใช้งบประมาณทางด้านทรัพยากร อุปกรณ์ต่างๆ รวมทั้งเวลา ดังนั้นการทดลองโดยใช้โปรแกรมจะเป็นประโยชน์มาก ในการศึกษาผลลัพธ์ที่เกิดขึ้น ซึ่งสามารถที่จะออกแบบรูปแบบตัววัด และกำหนดค่าคุณสมบัติของวัสดุและปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการวัดสัญญาณอัลตราโซนิก ซึ่งโปรแกรมที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้คือ โปรแกรม COMSOL Multi physics

โปรแกรม COMSOL Multi physics เป็น โปรแกรมที่พัฒนามาจาก โปรแกรม FEM Lab ซึ่งอาศัยหลักการวิเคราะห์เชิงเลข โดยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite Element Method) ซึ่งโปรแกรมมีระบบคำนวณทางด้านแม่เหล็กไฟฟ้าและคลื่น การจำกัดขอบเขตโดยใช้หลักการของวัสดุศาสตร์ ซึ่งสามารถที่จะจำลองวัตถุต่างๆขึ้นมา และกำหนดค่าของตัววัสดุนั้นให้เป็นค่าดังที่เราต้องการ และทำการวิเคราะห์หาค่าตัวแปรของสมการโมเดลที่ต้องการได้

โปรแกรม COMSOL Multi physics การใช้งานโดยขึ้นอยู่กับผู้ใช้งานว่าต้องการใช้ในด้านใด สาขาใดเพื่อจำลองชิ้นงานให้เสมือนจริง โดยเรื่องที่ COMSOL Multi physics ถูกใช้งานจะจำแนกไว้ ให้ผู้ใช้งานเลือกลักษณะการทำงานที่เหมาะสมตามชิ้นงานที่ต้องการจำลอง



รูปที่ 1.1 โปรแกรม COMSOL Multi physics ใช้งานได้หลากหลายสาขาทางวิศวกรรม

## 1.5 ขอบเขตของงานวิจัย

1. สร้างแบบจำลองไฟไนต์อิลิเมนต์ เพื่อศึกษาการรับสัญญาณอัลตราโซนิกด้วย EMAT
2. ศึกษาถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการวัดของสัญญาณอัลตราโซนิก
3. เปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองจริงกับผลที่ได้จากการจำลองการทดลอง ดูแนวโน้มของการตรวจจับสัญญาณ

## 1.6 โครงสร้างวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 4 บท อันประกอบไปด้วย

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ สมมติฐาน ทฤษฎีที่ใช้ ขอบเขตของการวิจัย และขั้นตอนการศึกษา

บทที่ 2 เป็นการนำเสนอทฤษฎีของ EMAT ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับคลื่นอัลตราโซนิก ทั้งทางด้านความหมาย ความสำคัญ ประเภททรานส์ดิวเซอร์ วิธีการให้กำเนิดคลื่น ทฤษฎีทางด้านแม่เหล็ก การออกแบบ รวมไปถึงการใช้ประโยชน์จากในด้านต่างๆ

บทที่ 3 การทดลอง ผลการทดลอง และวิเคราะห์ผล

บทที่ 4 บทสรุปและข้อเสนอแนะ

ภาคผนวก อธิบายถึงการใช้งานโปรแกรม COMSOL Multiphysics

## บทที่ 2

### ทฤษฎี

#### 2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับคลื่นอัลตราโซนิก

คลื่นอัลตราโซนิกนั้น หมายถึงคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงเกินกว่าขอบเขตการได้ยินของมนุษย์ ซึ่งจากการที่คลื่นนี้มีความถี่สูง จึงทำให้มีความยาวคลื่นสั้น เป็นผลทำให้สามารถกำหนดทิศทาง การเคลื่อนที่ของคลื่นได้อย่างแม่นยำ เนื่องจากไม่ได้รับผลกระทบจากการเลี้ยวเบนเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านช่องเปิดที่มีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่น จากคุณสมบัติที่สามารถควบคุมทิศทางของคลื่นได้แม่นยำนี้เอง จึงทำให้คลื่นอัลตราโซนิกถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวาง ทั้งทางด้าน การแพทย์ เช่น เครื่องอัลตราซาวด์ซึ่งใช้ในการตรวจสอบอวัยวะภายในร่างกาย ทางด้าน อุตสาหกรรม เช่น การทำความสะอาดพื้นผิวด้วยคลื่นอัลตราโซนิก, การเชื่อมต่อวัสดุ, การ ตรวจสอบพื้นผิว ฯลฯ ทางด้านเครื่องมือวัดต่างๆ เช่น การวัดระยะทาง, การวัดความลึกของ มหาสมุทร, การตรวจจับสิ่งกีดขวาง, การหาความหนาของวัตถุ ฯลฯ นอกเหนือจากนี้ยังมีการใช้ งานคลื่นอัลตราโซนิกในงานด้านอื่นๆอีกมากมาย

สำหรับเนื้อหาในบทนี้จะนำเสนอความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับคลื่นอัลตราโซนิก ทฤษฎีทาง แม่เหล็กที่เกี่ยวข้องกับ EMAT ทฤษฎี EMAT การออกแบบ EMAT รวมไปถึงหลักการใช้ ประโยชน์จากคลื่นอัลตราโซนิกในงานด้านต่างๆ ที่ได้ถูกพัฒนาจนเป็นเครื่องมือเชิงพาณิชย์ซึ่ง สามารถพบได้โดยทั่วไป

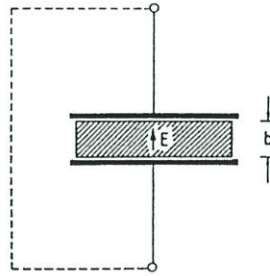
#### 2.2 อัลตราโซนิกทรานส์ดิวเซอร์

คลื่นอัลตราโซนิกนั้นเป็นคลื่นที่มีลักษณะพลังงานเป็นพลังงานทางกล ดังนั้นการที่จะ สามารถสร้างคลื่นอัลตราโซนิกนี้ได้ ก็คือต้องใช้อุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนแปลงพลังงานรูปแบบ อื่นๆ ให้อยู่ในรูปแบบพลังงานทางกลที่มีความถี่ในย่านของคลื่นอัลตราโซนิกนั่นเอง ซึ่งเราเรียก อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แปลงระหว่างพลังงานรูปแบบต่างๆกับคลื่นอัลตราโซนิกนี้ว่า อัลตราโซนิก ทรานส์ดิวเซอร์ (Ultrasonic Transducer) โดยอัลตราโซนิกทรานส์ดิวเซอร์นี้มีอยู่หลายชนิด ซึ่งมี หลักการกำเนิดคลื่นอัลตราโซนิกที่แตกต่างกันไป สำหรับชนิดที่พบเห็นได้โดยทั่วไปนั้นมี ดังต่อไปนี้

##### 2.2.1 อัลตราโซนิกทรานส์ดิวเซอร์ชนิดที่ใช้ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก

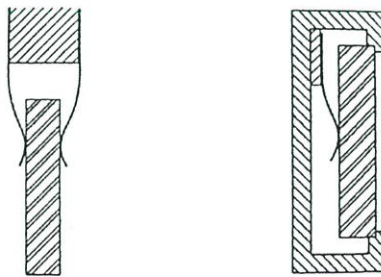
อัลตราโซนิกทรานส์ดิวเซอร์ชนิดนี้นั้น ถือได้ว่าเป็นทรานส์ดิวเซอร์ที่นิยมแพร่หลายมาก ที่สุด ซึ่งถูกนำมาใช้ในการสร้างคลื่นอัลตราโซนิกที่มีความถี่สูงปานกลาง โดยมีหลักการกำเนิด

คลื่นจากการใช้ประโยชน์จากปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Effect) นั่นคือเมื่อวัสดุที่มีคุณสมบัติเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Material) เช่นผลึกควออร์ตซ์ (Quartz Crystal) มีค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วทั้งสองต่างกันจะทำให้ผลึกเกิดการเปลี่ยนรูป ซึ่งเมื่อการเปลี่ยนรูปของผลึกนี้เกิดขึ้นด้วยความถี่ในระดับของคลื่นอัลตราโซนิกก็จะเป็นการกำเนิดคลื่นอัลตราโซนิกออกมา



รูปที่ 2.1 ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก

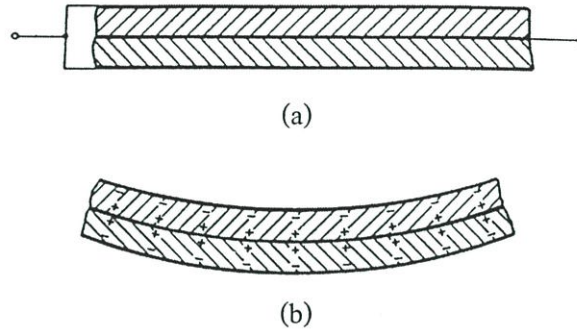
เมื่อพิจารณารูปที่ 2.1 ชิ้นสารที่มีคุณสมบัติเพียโซอิเล็กทริกที่มีความหนา  $b$  ซึ่งถูกตัดออกมาด้วยวิธีการที่เหมาะสม (รูปแบบการเปลี่ยนรูปของชิ้นสารเมื่อได้รับพลังงานไฟฟ้านั้น ขึ้นอยู่กับทิศทางของการตัดชิ้นผลึก) โดยขนาดของชิ้นสารนั้นใหญ่มากเมื่อเปรียบเทียบกับความหนาของชิ้นสารเอง เมื่อชิ้นสารนี้ได้รับพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายผ่านขั้วอิเล็กโทรดจะเกิดสนามไฟฟ้าขึ้นภายในชิ้นสาร ซึ่งการเปลี่ยนรูปของผลึกก็เกิดจากการสะสมของพลังงานภายในชิ้นสารนี้เอง โดยปริมาณของพลังงานไฟฟ้าที่สะสมภายในนั้น มีผลโดยตรงต่อความถี่ตอบสนอง (Resonance Frequency) ของแต่ละชิ้นสาร ซึ่งปริมาณของสนามไฟฟ้านี้ขึ้นอยู่กับความหนาของชิ้นสาร จึงกล่าวได้ว่าความถี่ตอบสนองของแต่ละชิ้นสารนี้ขึ้นอยู่กับความหนาของแต่ละชิ้นสารนั่นเอง สำหรับการยึดชิ้นสารเพื่อใช้งานเป็นทรานส์ดิวเซอร์โดยทั่วไปนั้นแสดงดังรูปที่ 2.2



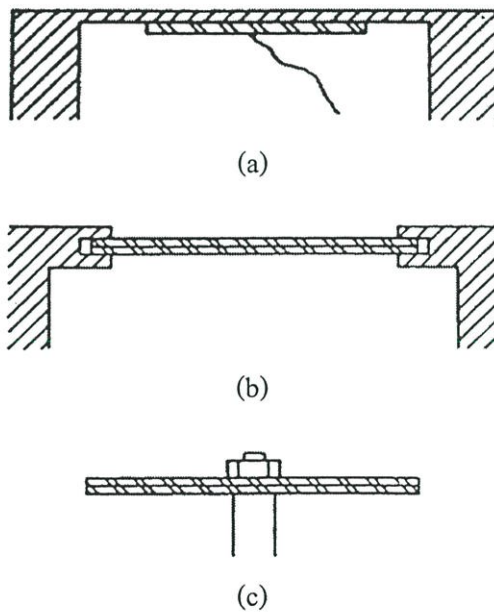
รูปที่ 2.2 การยึดชิ้นวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเพื่อใช้งานโดยทั่วไป

ทรานส์ดิวเซอร์ที่ใช้หลักการนี้นั้นเรียกได้ว่าเป็นเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ดิวเซอร์ที่พิจารณาทางด้านความหนาของชิ้นสารเป็นหลัก (Thickness Mode) ซึ่งทรานส์ดิวเซอร์ชนิดนี้ให้กำเนิดคลื่นได้ไม่แรงนัก จึงทำให้สามารถใช้งานได้เพียงในกรณีของการกำเนิดคลื่นเพื่อเดินทางในของแข็ง

เท่านั้น ซึ่งไม่เหมาะสมอย่างยิ่งที่จะนำไปใช้ในการกำเนิดคลื่นสำหรับเดินทางในอากาศหรือก๊าซใดๆ ซึ่งได้มีการคิดค้นเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ดิวเซอร์ที่ใช้หลักการโค้งงอของชิ้นสารเพื่อแก้ไขจุดบกพร่องดังกล่าว ซึ่งเราเรียกทรานส์ดิวเซอร์ชนิดนี้ว่า ทรานส์ดิวเซอร์แบบที่ใช้หลักการโค้งงอของสารเปียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Bending Transducer) ซึ่งให้ความแรงของคลื่นสูงกว่ามาก จึงเหมาะสมอย่างยิ่งที่จะนำไปใช้กำเนิดคลื่นในของเหลว รวมไปถึงแก๊สต่างๆ



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของทรานส์ดิวเซอร์ชนิดที่ใช้หลักการโค้งงอของวัสดุเปียโซอิเล็กทริก  
(a) ขณะอยู่ในสภาวะสมดุล (b) ขณะได้รับพลังงาน



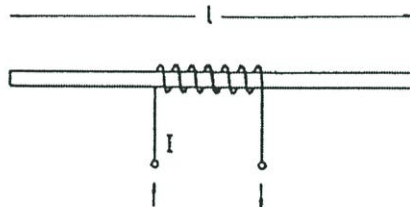
รูปที่ 2.4 ลักษณะการยึดทรานส์ดิวเซอร์ชนิดที่ใช้หลักการโค้งงอของวัสดุเปียโซอิเล็กทริก  
(a) การยึดวัสดุเปียโซอิเล็กทริกเข้ากับฟิล์มโลหะ  
(b) การยึดวัสดุเปียโซอิเล็กทริกที่บริเวณขอบ  
(c) การยึดวัสดุเปียโซอิเล็กทริกที่บริเวณกลางชิ้นวัสดุ

รูปที่ 2.3 นั้นแสดง โครงสร้างของทรานส์ดิวเซอร์ดังกล่าว โดยเมื่อชิ้นสารได้รับพลังงานผ่านขั้วอิเล็กโทรดชิ้นสารจะเกิดการโค้งงอ ซึ่งทิศทางของการโค้งงอนี้ขึ้นอยู่กับทิศทางของสนามไฟฟ้าที่ชิ้นสารได้รับ การใช้งานวัสดุเพียโซอิเล็กทริกแบบนี้จะพบว่าความถี่ตอบสนองของชิ้นสารลดลงอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้งานชิ้นสารขนาดเดียวกันในรูปแบบ Thickness ซึ่งเป็นข้อด้อยที่ทำให้ไม่สามารถสร้างทรานส์ดิวเซอร์ที่มีความถี่ตอบสนองสูงๆ ด้วยวิธีการนี้ได้

จากการที่ทรานส์ดิวเซอร์นี้กำเนิดคลื่นจากชิ้นวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่มีความเปราะ และมีความบางจึงทำให้ในการนำไปใช้งานต้องมีการยึด และป้องกันการกระทบโดยตรงจากวัตถุภายนอก เพื่อไม่ให้เกิดการเสียหายกับชิ้นสารขึ้น โดยรูปที่ 2.4 นั้นแสดงการนำทรานส์ดิวเซอร์ชนิดนี้ไปใช้งานที่อาจพบเห็นได้ทั่วไป

### 2.2.2 อัลตราโซนิคทรานส์ดิวเซอร์แบบเมกนีโตรสทริกทีฟ

ทรานส์ดิวเซอร์แบบเมกนีโตรสทริกทีฟ(Magnetostrictive Transducer) นั้นเหมาะสมควรสำหรับการสร้างคลื่นอัลตราโซนิคที่มีความแรงสูงแต่มีความถี่ต่ำ (ในช่วง 20-40 kHz) ซึ่งยุคสมัยที่เปลี่ยนไปทำให้ทรานส์ดิวเซอร์ชนิดนี้ ถูกแทนที่ด้วยทรานส์ดิวเซอร์แบบเพียโซอิเล็กทริก แต่ถึงอย่างไรก็ตามคุณสมบัติเด่นที่ทำให้ทรานส์ดิวเซอร์ชนิดนี้ยังถูกนำมาใช้งานคือ การที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อนสามารถสร้างได้โดยง่าย มีความคงทนทั้งทางด้านโครงสร้าง และทางด้านความทนทานต่อสัญญาณไฟฟ้า

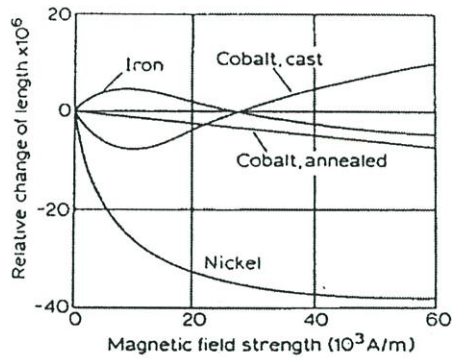


รูปที่ 2.5 ปรัชญาการแม่เหล็กทรานส์ดิวเซอร์

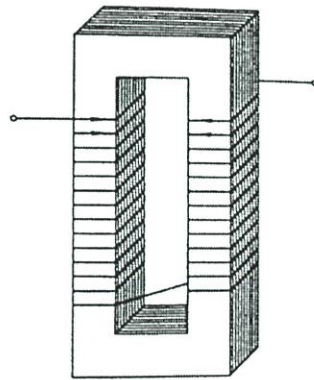
รูปที่ 2.5 นั้นแสดงปรากฏการณ์แม่เหล็กทรานส์ดิวเซอร์ (Magnetostriction Effect) โดยแกนที่นำมาใช้งานนั้นจะเป็นแกนที่สร้างจากสารประเภทเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic Material) ซึ่งเป็นแกนเหล็กที่มีคุณสมบัติของแม่เหล็ก โดยแกนเหล็กนี้จะถูกพันด้วยขดลวด เมื่อทำการจ่ายกระแสเข้าสู่ขดลวด ขดลวดนี้จะสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้น ซึ่งสนามแม่เหล็กไฟฟ้านี้จะกระทำกับสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากแกนเหล็ก ทำให้แกนเหล็กซึ่งไม่ได้มีการยึดไว้มันเกิดการเคลื่อนตัวไปจากเดิม ซึ่งทิศทางการเคลื่อนที่และระยะทางที่เคลื่อนที่ไปนั้นขึ้นอยู่กับทิศทาง และปริมาณกระแสที่ไหลผ่านขดลวดนั่นเอง

สำหรับรูปที่ 2.6 นั้นเป็นกราฟแสดงระยะทางที่เปลี่ยนแปลงไป ต่อความเข้มของสนามแม่เหล็กที่มากกระทำของสารแต่ละชนิด ซึ่งทำให้เห็นว่าสารที่เหมาะสมในการนำมาสร้าง

ทรานส์ดิวเซอร์ชนิดนี้คือนิเกิล (Nickel) ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงของระยะทางต่อสนามแม่เหล็กสูงซึ่งทำให้ได้คลื่นที่มีความแรงอีกทั้งมีเสถียรภาพของทิศทางเคลื่อนที่ ซึ่งแตกต่างกับสารชนิดอื่นอย่างชัดเจน



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ของระยะทางที่เปลี่ยนแปลงไปต่อความเข้มของสนามแม่เหล็กในสารเฟอร์โรแมกเนติกแต่ละชนิด



รูปที่ 2.7 โครงสร้างทั่วไปของทรานส์ดิวเซอร์แบบแมกนีโตสทริกทิฟ

โครงสร้างของทรานส์ดิวเซอร์ชนิดนี้ที่พบเห็นได้ทั่วไปแสดงดังรูปที่ 2.7 โดยจะเห็นได้ว่ามีแรงกระทำของสนามแม่เหล็กจากขดลวดต่อแกนเหล็กถึงสองชุด ซึ่งในความเป็นจริงอาจมีจำนวนมากกว่านี้ สำหรับแกนของทรานส์ดิวเซอร์นี้ถูกสร้างขึ้นจากแผ่นนิเกิลที่ถูกนำมาเรียงซ้อนกัน โดยอาจมีการเคลือบด้วยสารชนิดอื่นอีกด้วย ทั้งนี้เพื่อเป็นการป้องกันการเกิดกระแสไหลวน ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของการสูญเสียพลังงาน และทำให้เกิดความร้อนขึ้น

การใช้งานคลื่นอัลตราโซนิกที่ได้กล่าวมานี้ นั้น เป็นการใช้งานคลื่นอัลตราโซนิกที่ถูกพัฒนาจนเป็นเครื่องมือเชิงพาณิชย์แล้วทั้งสิ้น นอกเหนือจากนี้ยังมีการใช้ประโยชน์จากคลื่นอัลตราโซนิกทางด้านอื่นๆอีกมากมาย และด้วยคุณสมบัติเด่นต่างๆของคลื่นอัลตราโซนิก จึงทำให้ยังคงมีการวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง

### 2.2.3 อิเล็กโทรแมกเนติกอะคูสติกทรานส์ดิวเซอร์(EMAT)

อิเล็กโทรแมกเนติกอะคูสติกทรานส์ดิวเซอร์(EMAT) เป็นทรานส์ดิวเซอร์ชนิดหนึ่งที่ใช้ งานได้กว้างขวางในการตรวจสอบวัตถุตัวนำหรืออื่นๆ โดยการเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็น คลื่นอัลตราซาวด์ (คลื่นกล)[1-4] โดยทั่วไปคลื่นอัลตราซาวด์จะแทรกในชั้นผิวมีความลึกประมาณ 0.05 – 0.5 mm (0.002-0.020 in.) ที่อุณหภูมิห้องและความถี่ระดับเมกะเฮิรต์ คุณสมบัติแม่เหล็กไฟฟ้าเช่น ค่าความนำไฟฟ้าและค่าซึมซาบแม่เหล็ก (conductivity and permeability) ไม่ส่งผลกระทบต่อ การส่งที่ต่อเมื่อความยาวคลื่นมากกว่าความลึกชั้นผิววัตถุ (ความยาวคลื่นอย่างน้อยประมาณ 3 เท่าความ ลึกของชั้นผิว) เพราะว่าการส่งสัญญาณในผิวโลหะไม่จำเป็นต้องสัมผัส (ความลึกของชั้นผิวใน โลหะเป็นองค์ประกอบหนึ่งในการส่งคลื่นอัลตราซาวด์และสามารถเชื่อมต่อในโลหะได้) การ ตอบสนองสัญญาณขึ้นอยู่กับระยะของ EMAT กับผิวโลหะเพราะว่าความเข้มสนามแม่เหล็กและ กระแสอยู่ในบริเวณพื้นผิว โดยทั่วไปสนามแม่เหล็กจะลดลงเมื่อขดลวด EMAT ห่างจากผิว เพราะฉะนั้นระยะห่างจะมีความสำคัญมาก โดยในบางกรณีสามารถทำงานได้ในระยะห่าง 3 mm หรือมากกว่านั้น

การเกิดคลื่นอัลตราซาวด์ใน EMAT จากแรงแม่เหล็กสำหรับวัตถุที่ไม่ใช่สารแม่เหล็ก เป็นผล จากกระแสเหนี่ยวนำจากขดลวดเหนี่ยวนำ หลักการพื้นฐานของการเหนี่ยวนำโดยใช้กระแสวน แม้ว่าจะขดลวดที่ใช้จะมีความแตกต่างบ้างก็ตาม โดยแรงขับและประสิทธิภาพการส่งจะขึ้นกับ ลักษณะของขดลวดและรูปร่างสนามแม่เหล็กอย่างมาก

เมื่อวัตถุที่เป็นสารแม่เหล็ก แรงแมกนีโตสทริกทีฟ(Magnetostrictive force) จะรวมกับ แรงลอเรนซ์ (Lorentz force) เพื่อสร้างแรงขับสุทธิ (net elastic driving force) มากกว่าวัตถุทั่วไป ค่า แมกนีโตสทริกทีฟจะลดลงเมื่อสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้น (ไม่เสมอไป) คุณสมบัติของแรงลอเรนซ์จะ เพิ่มขึ้นอย่างไม่จำกัดในสนามแม่เหล็กขนาดใหญ่ ในทางปฏิบัติจะไม่สามารถเพิ่มขนาด สนามแม่เหล็กให้มีความมากขึ้นได้ (เป็นสิ่งที่ยากในการปฏิบัติในวัตถุจริง) โดยแรงทั้งสองสามารถวัด ค่าได้จากการปฏิบัติจริง

การเปลี่ยนแปลงรูปแบบของอัลตราซาวด์โหมดจากการใช้ EMAT โดยจะเป็นวิธีการแบบไม่ ทำลาย (nondestructive testing: NDT) ซึ่งมีวิธีต่างๆ ดังนี้

- คลื่นตามยาว(longitudinal wave(L)) มีทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิว
- คลื่นตามขวางแนวอน(shear horizontal wave(SH)) มีทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิว
- มุมลำคลื่นคลื่นตามยาว (angle-beam L wave) (บางมุม)
- มุมลำคลื่นคลื่นตามขวางแนวตั้ง(angle-beam shear vertical wave(SV))(บางมุม)
- มุมลำคลื่นคลื่นตามขวางแนวอน(angle-beam SH wave) (ทุกมุม)
- คลื่นผิวเช่น Rayleigh wave

- คลื่นจาน(plate) เช่น Lamb และ SH โหมด
- คลื่นท่อเกลียว(torsional tube wave)

### 2.3 ทบทวนงานประพันธ์ที่ผ่านมา

หัวข้อนี้นำเสนอความรู้เกี่ยวกับอัลตราโซนิกทรานส์ดิวเซอร์ ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมา มีมานานกว่า 20 ปี โดยการตรวจวัดสัญญาณอัลตราโซนิกโดยไม่ต้องสัมผัส(EMAT)[5-9] EMAT สามารถสร้างและตรวจจับคลื่นอัลตราโซนิกที่อาศัยหลักการของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยไม่ต้องสัมผัสวัตถุ การออกแบบพื้นฐานของ EMAT ประกอบไปด้วยแม่เหล็กถาวรใช้ในการผลิตสนามแม่เหล็กและขดลวดที่ใช้ในการเหนี่ยวนำสัญญาณ สำหรับโหมดการสร้างอัลตราโซนิกนั้น สามารถทำได้โดยการปล่อยกระแสไฟฟ้ากระแสสลับ( $\vec{J}$ ) ให้กับขดลวดและไปทำปฏิกิริยากับค่าสนามแม่เหล็ก ( $\vec{B}$ ) จากแม่เหล็กถาวร ทำให้เกิดแรงขึ้นในวัตถุ ( $\vec{F}$ ) เป็นไปตามกฎของ Lorentz forces [10]

$$\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B} \quad (2.1)$$

สืบเนื่องมาจากแรงซึ่งทำให้เกิดคลื่นอัลตราโซนิกในวัตถุตัวอย่าง กระบวนการนี้จะเกิดขึ้นในชั้นผิวลึก 0.05-0.5 mm ที่อุณหภูมิห้องและในช่วงความถี่อัลตราโซนิกในระดับ MHz ดังในหลายๆตัวอย่างได้ถูกนำเสนอเช่น Ludwig and Dai(1991)[11]; Ludwig et al.(1993)[12]; Kawashima et al.(1994)[13]; Kaltenbacher et al. (1999)[14]; Mirkhani et al.(2004)[15] อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของ EMAT ยังต่ำอยู่เพราะเกิดจากการเหนี่ยวนำแม่เหล็กที่ต่ำ (Frost(1975)[16]; Mirkhani et al.(2004)[15])

วัสดุที่นำมาทำเป็นแม่เหล็กเป็นกลไกที่ยากต่อการเข้าใจ เกิดจากสองกลไกคือ Magnetization และ Magneto restriction ซึ่งมีผลต่อการสร้างอัลตราโซนิก (Ogi(1997)[17]; Ogi et al.(2003)[18]) อย่างไรก็ตามสำหรับวิทยานิพนธ์นี้ จะเน้นความสนใจไปที่วัตถุตัวอย่างที่ไม่ใช่สารแม่เหล็กในงานวิจัยนี้ก็คืออลูมิเนียม

ในทางตรงกันข้ามสำหรับการใช้ EMAT ในการรับสัญญาณ เป็นผลมาจากการทำปฏิกิริยากันของความเร็วอนุภาคซึ่งเป็นผลจากคลื่นอัลตราโซนิกในโลหะกับค่าของความเข้มสนามแม่เหล็กที่ EMAT ซึ่งทำให้เกิดกระแสขึ้นที่วัสดุตัวอย่าง เป็นผลมาจากแรง Lorentz [10]

$$J = \sigma_c (v \times B), \quad (2.2)$$

$\sigma_c$  คือค่าความนำไฟฟ้าในอลูมิเนียม ซึ่งค่าของกระแสนี้ทำให้เกิดการแผ่ของสนามแม่เหล็กในผิวตัวนำและรอบๆ สามารถรับค่าของสนามแม่เหล็กนี้ได้การเหนี่ยวนำโดยใช้ขดลวดของ EMAT และการเหนี่ยวนำนี้เป็นผลมาจากค่าสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งตัดกับพื้นผิวที่รับสัญญาณ

สำหรับการออกแบบ EMAT ทั้งในโหมดการสร้างและการรับสัญญาณอัลตราโซนิก [10,22,23] มีผู้แนะนำมากมายเช่น Thompson (1979)[5]; Maxfield and Fortunko (1983)[7]; Maxifield et al. (1987)[8]; Hutchins et al. (1986)[19]; Dixon et al. (1999)[20]; Dewhurst et al. (2003)[21] ซึ่งเป้าหมายก็คือ การสร้างสนามแม่เหล็กโดยใช้แม่เหล็กถาวร และรูปแบบในการพันขดลวด ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญ ในการกำหนดรูปแบบของอัลตราโซนิก เพื่อให้มีผลต่อการตอบสนองต่อสัญญาณที่ดีในการออกแบบในงานวิจัยจะอยู่ช่วงท้ายบท

คลื่นอัลตราโซนิกที่สร้างจาก EMAT ยังมีประสิทธิภาพไม่เพียงพอในระดับเมกะเฮิรต์ (MHz) ต้องมีการเพิ่มกระแสขึ้น (หลายร้อยแอมแปร์) สำหรับโหมดการสร้างคลื่นต้องมีขดลวดที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งในระบบการทำงานของ EMAT จะมีข้อจำกัดเชิงความถี่ และสภาพอากาศ แต่ปัญหาเหล่านี้สามารถที่จะแก้ไขได้โดยระบบเลเซอร์รวม กับ EMAT ซึ่งได้มีการนำมาใช้เป็นทางเลือกมาแล้วกว่า 10 ปี [24,25]

ในส่วนการตอบสนองต่อความไวของสัญญาณและการเคลื่อนที่ของอนุภาคใน EMAT ได้อธิบายโดย Dewhurst et al. (2005)[26] ได้นำเสนอศึกษาเปรียบเทียบ The EMAT sensitivity with various ultrasonic detection systems. โดยมีผลการตอบสนองความไวสัญญาณประมาณ  $174 \text{ mV} \cdot \text{pm}^{-1}$  สำหรับการเคลื่อนที่ที่มีขนาดน้อยที่สุดที่  $17 \text{ pm}$  ที่ช่วงความถี่  $1 \text{ MHz}$  จะมีค่าเท่ากับ  $1.7 \times 10^{-14} \text{ m} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ ,

โดยสรุปแล้ว EMAT เป็นสิ่งที่น่าสนใจสำหรับการสร้างและการวัดสัญญาณอัลตราโซนิก โดยไม่สัมผัส EMAT สามารถใช้ประโยชน์มากมาย ซึ่งมีข้อดีคือ มีความไวต่อการตอบสนองรวมทั้งมีผลจากระยะการวัด ซึ่งจะมีผลต่อสัญญาณ อย่างไรก็ตามการตอบสนองสัญญาณได้ดีเมื่อระยะการวัดห่างน้อยกว่า  $1.5 \text{ mm}$  รวมทั้งมีราคาถูก ช่วงการตอบสนองเชิงความถี่ที่กว้าง (สามารถพัฒนาได้เมื่อเปลี่ยนแปลงตัวเก็บประจุ) ซึ่งงานวิจัยนี้จะเป็นการทดลองคุณสมบัติของ EMAT โดยการจำลอง (Simulation) และเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง สำหรับการออกแบบจะอยู่ช่วงท้ายบทนี้

## 2.4 คุณสมบัติของอิเล็กโทรแมกเนติกอะคูสติกทรานส์ดีวเซอร์(EMAT)

EMAT คืออุปกรณ์ที่ใช้สำหรับตรวจสอบสัญญาณทางด้านอัลตราโซนิก ซึ่งใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรม, การแพทย์ และอีกหลายด้าน เช่น การวัดความหนาของโลหะ, ตรวจสอบรอยร้าวของท่อโลหะ EMAT สามารถตรวจสอบสัญญาณโดยลดข้อจำกัดในการวัดของเทคโนโลยีแบบเก่า ซึ่ง EMAT สามารถทำการวัดสัญญาณได้ง่ายกว่า และเหตุผลสำคัญคือ EMAT ไม่ต้องสัมผัสกับพื้นผิว

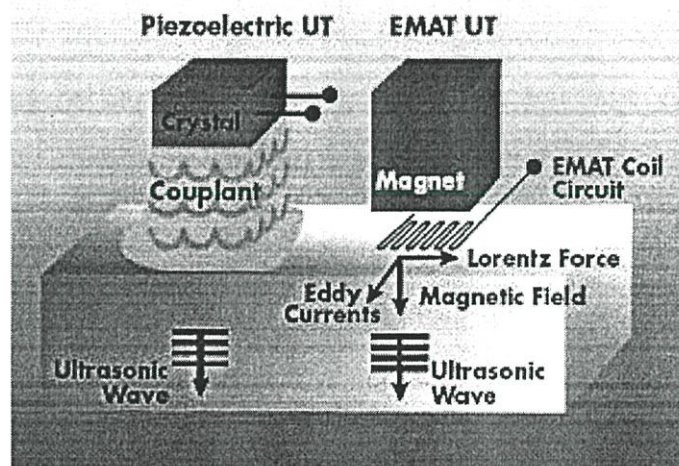
เทคโนโลยีของ EMAT ในการตรวจสอบสัญญาณอัลตราโซนิกแตกต่างจากวิธีเปียโซอิเล็กทริก ซึ่งเป็นวิธีแบบเดิมในการกำเนิดเสียงโดยใช้ผลึกเปียโซอิเล็กทริก โดยเป็นการเปลี่ยน

พลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลโดยทำให้เกิดการสั่นของผลึก ซึ่งการสั่นนี้จะต้องใช้ตัวกลางในการทดสอบชิ้นงาน เช่นของเหลวหรือน้ำ โดย EMAT นั้นไม่จำเป็นต้องใช้ตัวกลางในการเชื่อมต่อ แสดงดังรูปที่ 2.8

ส่วนประกอบของ EMAT จะประกอบไปด้วย แม่เหล็กและขดลวด ซึ่งใช้ในการส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อสร้างและรับสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิกในวัสดุตัวนำไฟฟ้า ซึ่งขดลวดถูกขับเคลื่อนด้วยสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ ตามความถี่ที่เราต้องการทำให้เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ขดลวดจะวางอยู่ใกล้ๆผิวสัมผัสทำให้เกิดกระแสวนขึ้นในวัตถุโดยการเหนี่ยวนำของแม่เหล็กไฟฟ้าทำให้เกิดการสั่นของอนุภาคในวัตถุตัวนำทำให้เกิดคลื่นอัลตราโซนิก โดยในการตรวจสอบวัตถุนั้นไม่ต้องใช้ตัวกลางในการส่งผ่านสัญญาณ โดยใช้ทฤษฎีของแรงลอเรนซ์ คือ  $\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B}$

EMAT ที่ใช้สมการ Lorentz Forces นี้จะทำให้เกิดปฏิกิริยาหลายอย่าง สามารถทำให้เกิดเป็นแหล่งกำเนิดอัลตราโซนิก ซึ่ง EMAT นี้มีอยู่ด้วยกัน 2 ประเภท ซึ่งสามารถเป็นทั้งอุปกรณ์รับหรือกำเนิดสัญญาณอัลตราโซนิกได้ โดยหัวส่ง EMAT ไม่จำเป็นต้องสัมผัสกับวัสดุตัวนำไฟฟ้า

EMAT สามารถปรับปรุงหรือเปลี่ยนแปลงค่าของสัญญาณที่เกิดขึ้นได้หลายแบบ โดยมีปัจจัยที่ส่งผลต่อสัญญาณเช่น ทิศทาง, ความเข้มของแม่เหล็ก และการกระจายของมุม จำนวนรอบของขดลวด รูปทรงของขดลวด การปรับเปลี่ยนค่าความถี่และเวลาหน่วงของระบบ โดยทิศทางต่างๆของกระแส แรงสนามแม่เหล็กและทิศทางของคลื่นแตกต่างจาก อัลตราโซนิกทรานส์ดิวเซอร์แบบ Piezoelectric แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 รูปแบบการรับส่งสัญญาณอัลตราโซนิกของ Piezoelectric กับ EMAT

EMAT สามารถที่ใช้ในการตรวจสอบทางด้านอัลตราโซนิกได้หลายรูปแบบโดยข้อเด่นหนึ่งก็คือสามารถใช้งานในระบบอัตโนมัติในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่ง EMAT จะมีโครงสร้างที่ไม่

ซับซ้อนสามารถใช้งานร่วมกับวงจรถืออิเล็กทรอนิกส์และซอฟต์แวร์เป็นระบบในสายการผลิตซึ่งใช้ในการตรวจสอบที่มีความถูกต้องแม่นยำ โดยไม่ต้องตรวจสอบซ้ำ

ข้อดีของ EMAT ทางด้านเทคนิคการวัด

- ตรวจสอบปริมาตรของวัตถุ
- ง่ายต่อการเข้าถึงในพื้นที่ที่จำกัด
- ปลอดภัยและได้มาตรฐาน
- การตรวจสอบได้โดยไม่ต้องใช้ตัวกลาง
- ง่ายต่อการใช้งานในระบบอัตโนมัติ
- ความเร็วในการตรวจสอบสูง(มากกว่า 1 m/s)
- ใช้งานได้ในอุณหภูมิสูงได้
- ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณจากตัวส่งถึงตัวรับสัญญาณ
- มีความแม่นยำและตรวจสอบซ้ำได้
- ไม่มีตัวกลางที่จะทำให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อน(Error)
- สามารถตรวจสอบได้แม้ผิวสัมผัสที่ขรุขระ, สกปรก (น้ำมัน) หรือสนิม
- เมื่อวัสดุที่วัดมีความโค้งจะมีผลต่อสัญญาณที่หัวส่งน้อยมาก

## 2.5 การออกแบบ EMAT

แม้ว่ามีบางปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบ EMAT และ เปียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์ จะมีความแตกต่างกัน แต่ขั้นตอนการออกแบบโดยทั่วไปจะมีความคล้ายกันมาก จุดประสงค์สำหรับการทดสอบแบบไม่ทำลาย(Non Destructive Testing: NDT) มีความจำเป็นต้องเลือกวัสดุที่เหมาะสมเพื่อให้ผลตอบสนองที่ดีที่สุด วัสดุที่ผิดปกติในการกระจายลำคลื่นเสียงเช่น วัสดุที่มีความเครียด, มีโครงสร้างเป็นรูพรุน การพิจารณาเฉพาะจะรวมถึงโหมดของคลื่นออสซิลเลชันของลำคลื่น แบนด์วิดท์ของเสียงและการเลี้ยวเบนของแหล่งกำเนิดจำเป็นในการวัดค่า (ในบางกรณีเป็นไปได้ที่จะหาค่าพลังงานออสซิลเลชันจาก EMAT จะกล่าวภายหลัง) การพิจารณาวัสดุที่เป็นสารแม่เหล็กและไม่ใช้สารแม่เหล็กมีผลต่อการออกแบบแม่เหล็ก วัสดุตั้งต้นจะมีผลต่อการตอบสนอง (IL) และความถี่สูงสุด (ผ่านตัวแปร  $\beta_M$  แสดงในสมการที่ 2.48-2.49) อุณหภูมิและความเร็วการสแกนและระยะห่างการวัดมีความสำคัญมากในการปฏิบัติงานจริง มีหลายวิธีในการคำนวณทางไฟฟ้าของ EMAT ที่มีผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงระยะห่างของ EMAT กับวัตถุ การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะไม่ใช่แหล่งของสัญญาณรบกวนที่สำคัญ

พิจารณาสัญญาณเสียงและสัญญาณรบกวนที่เกิดที่ทรานสดิวเซอร์ ถ้าโลหะใดๆอยู่ใกล้แม่เหล็กและขดลวด EMAT จะมีกระแสเหนี่ยวนำในตัวเอง แรงที่เกิดจากกระแสนี้จะสร้างคลื่น

อิลาสติกในโลหะ สำหรับการพิจารณาทางเวลา การแพร่ของคลื่นอิลาสติกสามารถสร้างสัญญาณในตัวรับที่สัมพันธ์กัน (มีเวลาที่ไม่จำกัดและมีเฟสที่สัมพันธ์กัน) ทักษะความรู้และประสบการณ์จำเป็นในการออกแบบ EMAT เพื่อลดทอนหรือกำจัดสิ่งแปลกปลอมที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของ EMAT ในทางปฏิบัติค่าเหล่านี้สามารถกำจัดได้ด้วยการใช้โลหะให้น้อยที่สุดรอบๆขดลวด เพื่อป้องกันการรบกวนกระแสวนจากการเหนี่ยวนำของแม่เหล็ก ในทางการค้า EMAT จะใช้วัสดุที่เหมาะสม, โครงสร้าง, การประกอบ, ขั้นตอนการเชื่อมต่อ เพื่อลดปัญหาของสัญญาณรบกวน ซึ่งสัญญาณรบกวนเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญในการออกแบบ EMAT ประเภทต่างๆในปัจจุบัน โดยเฉพาะโพรบที่ใช้ในโหมดสะท้อนกลับ (pulse-echo mode)

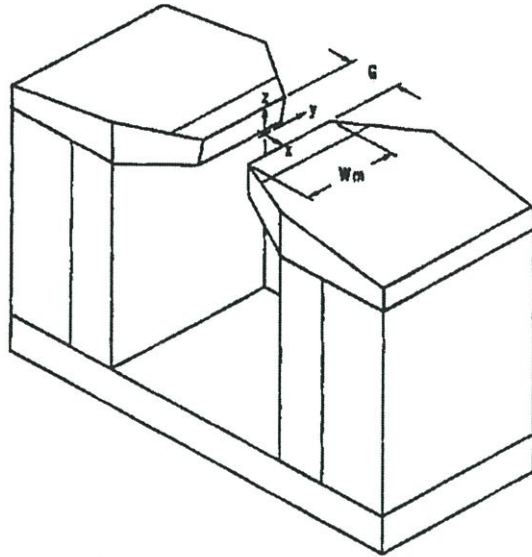
ผิวสัมผัสเป็นอีกปัญหาหนึ่งของ EMAT การออกแบบที่มีผลต่อความไวการตอบสนองสัญญาณที่ดีคือวัสดุเส้นลวดที่ดี, รูปร่างของขดลวดซึ่งรูปแบบ pancake-shape หรือรูปแบบ meander-line จะวัดสัญญาณได้ดีที่สุด[20,22,23,27,28], จำนวนรอบการพันขดลวด และความเป็นแม่เหล็กถาวร (permanent magnet) รวมไปถึงวงจรขยายสัญญาณที่มีอัตราขยายสัญญาณเหมาะสมกับขนาดสัญญาณที่วัดได้[11,14,29] องค์ประกอบของ EMAT เป็นสาเหตุหลักในการทำให้ขดลวดเหนี่ยวนำเสียหาย เช่น สกรู, หรือเครื่องมือแม่เหล็กอื่นๆ สามารถป้องกันได้ด้วยการหุ้มขดลวดด้วยเซรามิกบางๆ แต่บางครั้งการปะทะกันของอุปกรณ์หลายๆครั้งทำให้เกิดการแตกหักได้

การใช้งานในที่อุณหภูมิสูงต้องมีวิธีการเชื่อมต่อสัญญาณด้วยวัสดุแบบพิเศษ ปัจจุบันนี้สามารถทำได้โดยการใช้ฉนวนหรือใช้แรงดันอากาศในการระบายความร้อน การออกแบบ EMAT ส่วนใหญ่สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงถึง  $540\text{ }^{\circ}\text{C}$  ถ้าใช้ที่อุณหภูมิ  $1,200\text{ }^{\circ}\text{C}$  สามารถใช้กับ EMAT ที่มีการออกแบบระบบระบายความร้อนด้วยน้ำอย่างต่อเนื่อง (ผลกระทบจากระยะวัดเล็กน้อย) ข้อเสียของการใช้งานนี้จะทำให้แรงดันของสัญญาณรบกวนเพิ่มขึ้น เพราะว่าคุณสมบัติต้านทานของขดลวดเพิ่มขึ้นในอุณหภูมิที่สูงขึ้น การลดลงของค่า SNR (Signal-to-noise ratio) จะต้องสม่าเสมอตรงข้ามกับการเพิ่มขึ้นของสัญญาณที่ได้จากขดลวดที่มีขนาดเล็กกว่า

### 2.5.1 การออกแบบ EMAT; สารที่ไม่ใช่แม่เหล็ก (Nonmagnetic)

ในหัวข้อนี้จะพูดถึงโครงสร้าง EMAT เป็น 4 แบบ การเปลี่ยนแปลงแบบต่างๆ ที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของคลื่นอิลาสติก กรณีนี้ไม่เอาวัสดุที่เป็นแม่เหล็กมาพิจารณา เพราะว่าวัสดุที่เป็นแม่เหล็กเป็นประเภทของวัสดุที่มีความสำคัญมาก ปัจจัยที่สำคัญในการออกแบบ EMAT คือ คำนึงถึงการรับสัญญาณ

การตอบสนองสัญญาณ EMAT จะอยู่ในรูปแบบของทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์ (transfer impedance)  $Z = V / I$ ,  $V$  คือความต่างศักย์ขาออกของขดลวดตัวรับ เมื่อตรวจจับสัญญาณคลื่นที่เกิดขึ้นบางครั้งจะใช้กระแสในขดลวดตัวส่ง (ขดลวดตัวเดียวกันสามารถเป็นได้ทั้งตัวรับและตัวส่ง) ทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์ ( $Z$ ) ประกอบไปด้วยปัจจัยที่ขัดขวางการตอบสนองของคลื่นอิลาสติกจาก



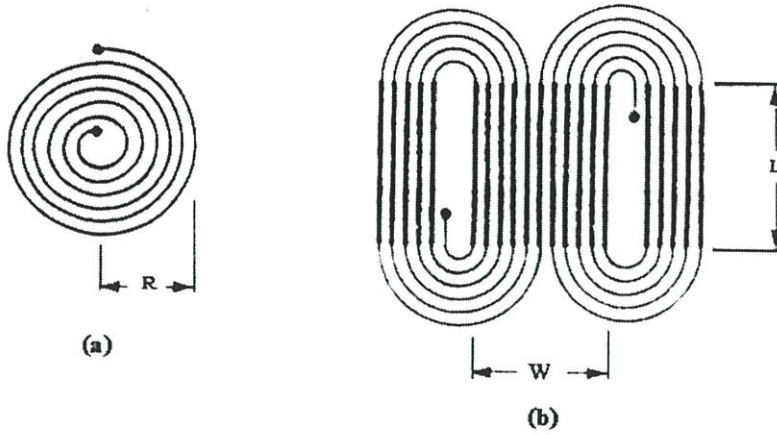
รูปที่ 2.9 แม่เหล็กรูปตัว C ที่สร้างสนามแม่เหล็กที่ขนานกับผิวโดยปราศจากสิ่งกีดขวาง

การรับส่ง L-wave, ปัจจัยระยะห่างของขดลวด  $F(CL : coil\ liftoff)$ , อธิบายถึงการลดลงของเศษส่วนในกระแสเหนี่ยวนำที่ผิวเช่นเดียวกับแม่เหล็กและการประกอบของขดลวด EMAT ได้ถูกเคลื่อนออกจากผิวโลหะดังสมการนี้

$$F(CL) = A(CL) \exp(-4\pi h / W) \quad (2.5)$$

เมื่อ  $h$  คือระยะห่างระหว่างผิวหน้าขดลวด EMAT กับผิวโลหะ รวมกับค่าความแก้ไข  $\Delta$  (correction factor,  $\Delta$  ค่านี้ปกติจะมีขนาดเป็นเศษส่วนพินนิ้ว), ซึ่งมีความสำคัญเพราะว่ามีการแผ่สัญญาณที่จำกัดของกระแส RF ที่ไปยังขดลวดและผิวโลหะ  $W$  คือความกว้างของขดลวด (รูปที่ 2.10) พื้นที่ขดลวดที่มีประสิทธิภาพจะมีค่าใกล้กับ  $LW$ , ซึ่ง  $L$  คือ ความยาวแสดง ดังรูปที่ 2.10 (โดยสมมติว่า  $W \leq L$ )  $A(CL)$  เป็นค่าปัจจัยที่มีค่าน้อยกว่าหนึ่งเสมอ; รวมไปถึงระดับสัญญาณที่ขึ้นกับรูปร่างของขดลวด  $A(CL)$  ยังรวมไปถึงการเปลี่ยนแปลงในพื้นที่ของแหล่งกำเนิดด้วยระยะห่าง (เป็นค่าเล็กๆที่ปกติจะนำไปคำนวณก็ต่อเมื่อต้องการปรับแต่ง EMAT)

ข้อจำกัดพื้นฐานของแบนด์วิดท์คลื่นคือ เมื่อความยาวคลื่นเสียงสามารถเปรียบเทียบกับความลึกผิวของแม่เหล็กไฟฟ้า (มากกว่า 3 dB) โดยความถี่ตั้งฉากกับคลื่น ซึ่งค่าสำหรับโลหะที่ต่างกันแสดงในตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.10 สองขดลวดที่ใช้สร้าง S และ L wave ในโลหะ ความกว้างหรือระยะขดลวด (R หรือ W) และระยะการเลี้ยวเบนแหล่งกำเนิด (R หรือ L)

ปัจจัยต่างๆมีส่วนในการคำนวณแบนด์วิดท์ที่แท้จริงของระบบ ค่าแรงดันขาออกของ EMAT ขึ้นกับกระแสที่ไหลผ่านขดลวด กระแสกระตุ้น(แรงขับอิลาสติก) [27] จะลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นจนกระทั่งค่าแรงดันที่ขดลวดตกลงก็จะทำให้ความถี่เพิ่มขึ้นนี้คือข้อจำกัดโดยการจ่ายแรงดันให้ EMAT ซึ่ง SNR (Signal-to-noise ratio) ในระบบ EMAT สามารถลดลงอย่างรวดเร็วตามค่าแบนด์วิดท์ที่กว้าง การปรับแต่งขดลวด EMAT เพื่อสร้างหรือตรวจจับคลื่นสามารถทำได้ดีสำหรับแบนด์วิดท์ที่กว้างกว่า 70% ของความถี่กลาง ถ้าไม่มีการปรับแต่งกระแสที่ขับผ่านขดลวดตัวส่งแรงดันคร่อมขดลวดตัวรับจะลดลง การเข้ากันของอิมพีแดนซ์บอร์ดแบน(broadband) เวลากลับคืนเร็ว (fast recovery time) จะยากกว่าอิมพีแดนซ์เนโรแบน(narrowband)

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของเหล็กถาวรสำหรับวัสดุแบบต่างๆ

| Metal     | $\rho_M$<br>( $gm/cm^3$ ) | $\rho$<br>( $\mu\Omega - m$ ) | $V_S$ (trans)<br>mm/ $\mu sec$ | $V_L$ (long)<br>mm/ $\mu sec$ | $\delta_c(1.0MHz)$<br>(mm) | $\lambda_s(1.0MHz)$<br>(mm) | $f_L(-3dB)$<br>(MHz) | $f_S(-3dB)$<br>(MHz) | $Z_{AS}$ |
|-----------|---------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------|----------------------|----------|
| Al (2024) | 2.7                       | 0.028                         | 3.1                            | 6.4                           | 0.084                      | 3.1                         | 293                  | 69                   | 8.4      |
| Brass     | 8.6                       | 0.070                         | 2.0                            | 4.3                           | 0.13                       | 2.1                         | 53                   | 11                   | 17       |
| Cu        | 8.9                       | 0.017                         | 2.3                            | 4.3                           | 0.066                      | 2.3                         | 218                  | 62                   | 20       |
| Pb        | 11.0                      | 0.22                          | 0.7                            | 2.2                           | 0.24                       | 0.7                         | 4.4                  | 0.45                 | 7.7      |
| W         | 19.0                      | 0.056                         | 2.9                            | 5.2                           | 0.12                       | 2.9                         | 97                   | 30                   | 55       |

เมื่อ  $\rho_M$  คือความหนาแน่นโลหะ,  $\rho$  คือค่าความนำไฟฟ้า,  $V_S$  คือความเร็วคลื่นตามขวาง,  $V_L$  คือความเร็วคลื่นตามยาว,  $\lambda_s$  คือความยาวคลื่นตามขวาง ซึ่งความยาวคลื่นตามยาวจะใหญ่กว่าสองเท่า,  $Z_{AS}$  คืออิมพีแดนซ์อิมพีแดนซ์ของคลื่นตามขวาง

### 2.5.3 คลื่นตามขวาง (SH wave); สารที่ไม่ใช่แม่เหล็ก (Nonmagnetic)

รูปที่ 2.11 แสดงโครงสร้างของ EMAT ที่ออกแบบทำให้เกิดคลื่นตามขวาง (SH-wave) โดยให้ ทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์เท่ากับ

$$Z_i(S) = B^2 N^2 \bar{A} / Z_{AS} \quad (2.6)$$

เมื่อ  $Z_{AS}$  คือ อะคูสติกอิมพีแดนซ์ของคลื่นตามขวาง (Shear-wave acoustic impedance),  $B$  คือ สนามแม่เหล็กที่ตั้งฉากกับผิว,  $N$  คือ จำนวนรอบของขดลวดรับ-ส่ง,  $\bar{A}$  คือ พื้นที่รับสัญญาณของ EMAT การพิจารณาโดยทั่วไปจะเหมือน L-wave แต่ความสัมพันธ์ของตัวแปรจะใช้ฟังก์ชันที่แตกต่างกัน

เมื่อค่าตัวแปร magnet liftoff factor เปลี่ยนแปลงเป็นไปตามสมการ

$$F(MS) = (1 - 2g / D_M) \quad (2.7)$$

เมื่อ  $D_M$  คือ ความกว้างหรือเส้นผ่านศูนย์กลางของขั้วแม่เหล็ก ตัวอย่างนี้แสดงในรูปที่ 2.11 เมื่อแม่เหล็กถาวรหรือแม่เหล็กไฟฟ้าทำงานทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กไปยังวงจรมแม่เหล็ก สิ่งนี้มีความสำคัญมากในการลดเพิ่มสนามแม่เหล็ก

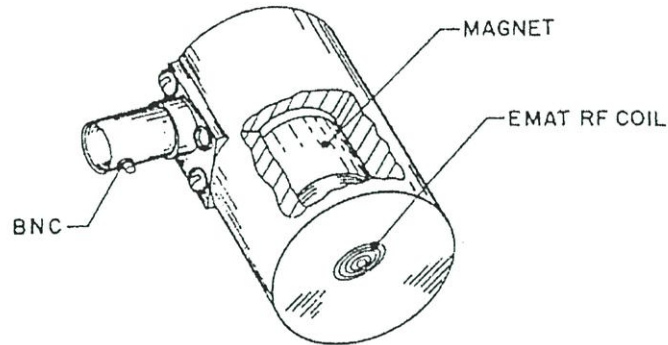
สำหรับขดลวด (EMAT RF coil) แสดงในรูปที่ 2.10 เมื่อเลื่อนระยะของขดลวดจะมีปัจจัยเหมือนกันกับ L-wave ที่ได้อธิบายก่อนหน้านี้ ในกรณีนี้ ขดลวดจะสร้าง (the coil generates a linearly polarize: CLP) คลื่น S-wave ทำให้อนุภาคของโลหะเคลื่อนที่ตั้งฉากกับขดลวด (ตั้งฉากกับกระแสเหนี่ยวนำ) สมการคลื่น S-wave มีปัจจัยการเลื่อนระยะขดลวดจะเป็นดังนี้

$$F(CLP) = A(CLP) \exp(-4\pi h / W) \quad (2.8)$$

$h$  คือ ระยะห่างระหว่างผิวหน้าขดลวด EMAT กับผิวโลหะ,  $W$  คือ ความกว้างของขดลวด รูปร่างของขดลวดที่สร้างคลื่น S-wave แสดงดังรูปที่ 2.10 มีขั้วในทิศทางรัศมีซึ่งมีประสิทธิภาพมากในสร้างคลื่นตามขวาง อุปสรรคหลักของขดลวดรูปแบบนี้คือจะมีคลื่นตามยาวเกิดขึ้นมาด้วยอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้จากสองแหล่งกำเนิด: (1) ส่วนประกอบของสนามแม่เหล็กที่มีทิศทางขนานกับผิวโดยเฉพาะบริเวณปลายขั้วแม่เหล็ก (2) เกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางกระแสเหนี่ยวนำที่บริเวณใกล้ศูนย์กลางขดลวด สิ่งที่ได้มาสิ่งแรกจากการสังเกตสัญญาณ โดยให้ขดลวดรัศมี ( $R$ ) เปรียบเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางแม่เหล็ก ( $D_M$ ) อัตราส่วนของคลื่นตามยาวต่อคลื่นตามขวาง ( $e$ ) เป็นดังนี้

$$e = 0.5(R / D_M)^2 \quad (2.9)$$

สิ่งที่ได้มาสิ่งที่สอง คือถ้าใช้ขดลวดเดียวกันในการส่งและการรับ ถ้าการหักเหของลำคลื่นมีค่าไม่มาก กระแสที่ผิวตัวรับจะสะท้อนให้เห็นถึงค่าการกระจายของกระแสที่ทำให้เกิด L-wave บริเวณใกล้ศูนย์กลางสนามแม่เหล็กจะขนานกับพื้นผิวแม่เหล็ก เพื่อตรวจวัดคลื่น L-wave ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทิศทางการกระแสนี้ยวนำ



รูปที่ 2.11 แม่เหล็กถาวรขนาดเล็กเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว (2.5 cm) สูง 1.5 นิ้ว (3.8 cm)

ขดลวดขดเกลียวมีข้อเสียที่สำคัญสองอย่าง เมื่อถูกใช้ในงานทดสอบแบบไม่ทำลาย(NDT) ประการแรก เมื่อ L-wave ถูกสะท้อนมาจากจุดบกพร่อง (defect point) จะแสดงตำแหน่งจุดบกพร่องนั้น ที่ไม่ชัดเจน ประการที่สอง จากรูปแบบการเคลื่อนที่ของขดลวดทั้งสองทิศทางในแนวรัศมี ดังแสดงดังรูปที่ 2.12 เมื่อใช้ขดลวดสแกนผ่านจุดบกพร่องจะได้สัญญาณที่มีลักษณะเป็นสองยอดตามรูป ทำให้สัญญาณที่ตรวจจับได้มีความยุ่งยากในทางปฏิบัติ อย่างไรก็ตามขดลวดเกลียวนี้มีประโยชน์ ในการหาความหนาของวัตถุ(thickness gaging) ในการหาสัมประสิทธิ์การสะท้อนระหว่างผิวหน้า (interfacial reflection coefficients) และการวัดความเร็ว S-wave และ L-wave

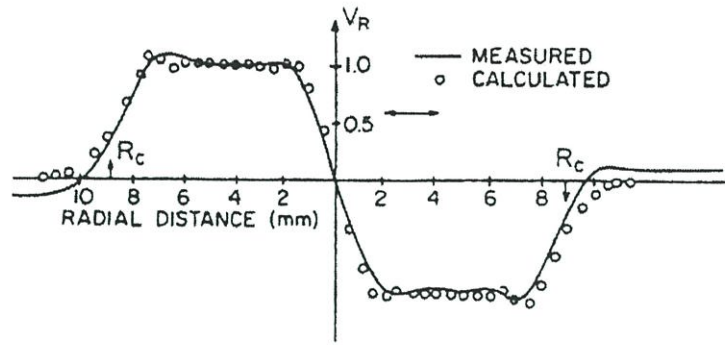
ปัจจัยการเลื่อนระยะห่าง(liftoff factor) ของขดลวดเกลียวรัศมี  $R$  โดย

$$F'(CSP) = A'(SP) \exp(-2\pi h / R) \quad (2.10)$$

ก่อนหน้านี้ใช้ขดลวดเป็นทั้งตัวส่งและตัวรับเมื่อเลื่อนระยะห่างโดย

$$F(CSP) = A(SP) \exp(-4\pi h / R) \quad (2.11)$$

EMAT แบบ S-wave นี้เป็นหลักการเบื้องต้น ในทางปฏิบัติจะมีแบนด์วิดธ์ของเสียงที่จำกัด ซึ่งอธิบายแล้วในส่วน L-wave

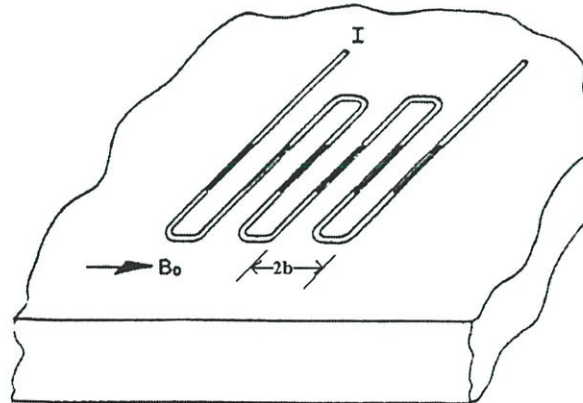


รูปที่ 2.12 เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการคำนวณ (วงกลม) กับการวัด (เส้นทึบ) ที่ตอบสนองต่อขดลวด กั้นหอยกว้าง 19 mm (รัศมี  $R_C = 9.5$  mm) กับสัญญาณรับที่ด้านตรงข้ามของแผ่นอลูมิเนียม โดยพื้นที่รับสัญญาณของขดลวดเป็นสี่เหลี่ยม  $2 \times 2$  mm โดยอยู่ห่างจากผิวโลหะ 0.005 in. (0.13 mm) จะเห็นว่าค่าความต่างศักย์จะมีการเปลี่ยนแปลงจากบวกเป็นลบจากการสแกนข้ามศูนย์กลาง

#### 2.5.4 มุมลำคลื่นเสียง (Angle-Beam) EMAT, L and SV Waves; สารแม่เหล็ก

(Nonmagnetic)

EMAT ที่ใช้สร้างคลื่น ทำให้เกิดจากแรงขับเคลื่อนที่ผิวที่มีลักษณะเป็นคาบได้มีการประยุกต์ใช้งานที่หลากหลาย [16,30,31] ขดลวด EMAT จะแปรผันกับการเกิดมุมของลำคลื่นเสียง L-wave และ SV-wave ขดลวด EMAT แสดงดังรูปที่ 2.13 เมื่อทำการขั้วกระแสสลับทำให้ได้สนามแม่เหล็กค่าคงที่สนามแม่เหล็กนี้จะมีลักษณะเป็นเส้นขนานหรือตั้งฉากกับผิว ถ้าตั้งฉากกับผิว จะสร้าง S-wave ถ้าขนานกับผิวจะให้สร้าง L-wave ดังที่ได้อธิบายก่อนหน้านี้แล้ว



รูปที่ 2.13 ขดลวดวงเวียน EMAT (meander-line) ที่ใช้ในการขั้วสนามแม่เหล็กที่ขนานและตั้งฉากกับพื้นผิว แรงดันขั้วสนามแม่เหล็กที่เกิดจากแม่เหล็กถาวรหรือแม่เหล็กไฟฟ้า (PMs or EMs) ซึ่งมีคาบการพัน (winding periodicity) เท่ากับ  $2b$

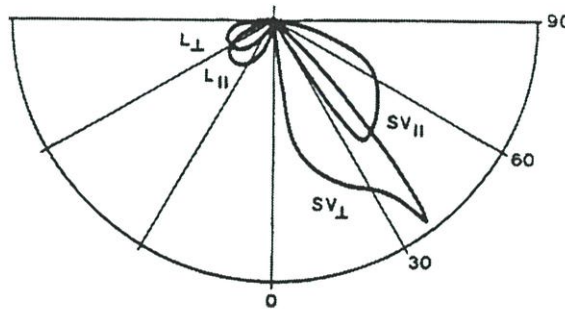
มุมการกระจาย  $\theta$  สำหรับ L-wave และ SV-wave จะขึ้นกับค่าความเป็นรายคาบ (spatial periodicity,  $2b$ ) และความถี่การขับ (driving frequency,  $f$ ) ค่า  $\theta$  สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$\sin \theta = \frac{\lambda}{2b} = \frac{V}{2bf} \text{ or } \theta = \sin^{-1} \frac{\lambda}{2b} \quad (2.12)$$

เมื่อ  $\theta$  คือมุมของทิศทางการกระจายคลื่นกับพื้นผิวปกติ,  $\lambda$  คือความยาวคลื่นอิลาสติก และ  $V$  คือความเร็วของ L-wave หรือ SV-wave สำหรับหลายคลื่นความถี่ของกระแสกระตุ้นและรอบของแรงขับ L-wave และ SV-wave ได้สร้างอย่างต่อเนื่อง ความสัมพันธ์ของแอมพลิจูดของ L-wave และ SV-wave จะขึ้นกับทิศทางของสนามแม่เหล็ก โดยใช้ Polar diagram เพื่อแสดงค่าแอมพลิจูดซึ่งเปลี่ยนแปลงตามมุมของสนามแม่เหล็กสองทิศทาง (ทิศทางใดๆสามารถอธิบายได้จากผลรวมเชิงเส้นของสองทิศทาง) รูปที่ 2.14 แสดงความสัมพันธ์และประสิทธิภาพการเกิดมุลำคลื่นเสียง SV และ L wave

ปัจจัยระยะห่างของขดลวดวงเวียน (meander-line coil: CML) สามารถคำนวณจากจำนวนรายคาบขดลวด (coil periodicity) โดยประมาณดังสมการ [16]

$$F'(CML) = A'(CML) \exp(-2\pi h / b) \quad (2.13)$$



รูปที่ 2.14 ประสิทธิภาพเชิงสัมพันธ์สำหรับการเกิดมุลำคลื่น SV และ L wave สำหรับแรงขับสนามแม่เหล็กที่ตั้งฉาก ( $B_{\perp}$ ) และขนาน ( $B_{\parallel}$ ) กับผิววัสดุที่ไม่ใช่แม่เหล็ก

ค่าทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์สำหรับขดลวดวงเวียน EMAT (meander-line EMAT) ที่ใช้เพื่อสร้างมุลำคลื่นจะไม่นำมาคำนวณด้วย ไม่ต่างจากกรณีของคลื่นดีเลย์ การคูณด้วยตัวแปรที่ขึ้นกับมุม (angle dependence factors) ดังในรูปที่ 2.15 โดยเฉพาะ  $Z_r$  เพิ่มขึ้นเป็นกำลังสองเท่าของความยาวคลื่น ผลคูณจำนวนรอบ  $N_R$  และ  $N_T$  และผลคูณของสนามแม่เหล็ก  $B_R, B_T$  ในสมการที่ 2.54 ( $R$  และ  $T$  หมายถึงการรับและการส่ง) แบนด์วิดธ์ของเสียงจะขึ้นกับคาบและมีค่าโดยประมาณเท่ากับ  $f/K$  เมื่อ  $f$  คือความถี่ที่ใช้งาน การใช้งานจะสามารถทำได้ที่แบนด์วิดธ์เดียวกัน

ฟังก์ชันทิศทางของลำคลื่น (directivity function) โดยตรง [32] คือ

$$D(\theta) = \sin[2\pi \sin(\theta - \pi)] \{2 \sin[\pi \sin(\theta - \pi)]\}^{-1} \times \sin[K\pi \sin \theta] \{K \sin[\pi \sin \theta]\}^{-1} \quad (2.14)$$

การเบี่ยงเบนจากเงื่อนไขแบนด์วิดธ์  $f/K$  เมื่อ  $K = L/2b$  สำหรับการกระตุ้นผิวคลื่น หรือ Rayleigh wave [16,30] สำหรับขดลวดวงเวียน EMAT,  $s/b = 0.5$ , เมื่อ  $s$  คือความหนาในการพันลวด(winding depth) [30] โดยค่าดังกล่าวจะถูกใช้เสมอเพราะว่าเป็นค่าการกระตุ้นที่ต่ำที่สุดของฮาร์มอนิกที่สาม (ฮาร์มอนิกคู่ไม่ต้องถูกกระตุ้น) ค่านี้เป็นค่าต่ำสุดที่ใช้สร้างอิลาสติกโหมคมีข้อพิสูจน์ว่าถ้าคลื่นผิวบอร์คแบนด์ [16] ได้รับการกระตุ้น เมื่อเลือก  $s/b = 1$ , (หรือใกล้เคียงหนึ่งก็สามารถใช้ได้) จำนวนของมุมลำคลื่นจะกำเนิดขึ้นเช่นกัน

### 2.5.5 มุมลำคลื่นคลื่นตามขวางแนวอน EMAT (Angle-Beam SH-wave EMAT)

EMAT ที่ใช้แม่เหล็กถาวรที่มีลักษณะเป็นคาบ (PPM; periodic permanent magnet) แสดงดังรูปที่ 2.15 ใช้การแบ่งกระแสเหนี่ยวนำและรอบของสนามแม่เหล็กคงที่เพื่อสร้างรอบของแรงจับ [33,34] ในกรณีนี้การเคลื่อนที่ของอนุภาคจะขนานกับผิวเสมอ ดังนั้นทำให้ SH เป็นขั้ว ที่ความถี่ผิว  $f(skim) = V_s / 2D$ , (surface-skimming bulk wave) ที่ความถี่ต่างๆ SH-wave จะเกิดที่มุมหนึ่งจากผิว ปกติจะสามารถคำนวณจากความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$\sin \theta = V_s / 2Df \quad (2.15)$$

เมื่อ  $V_s$  คือความเร็วของ S-wave  $D$  ระยะความหนาของแม่เหล็ก, โดยการประมาณ(bulk shear velocity) ทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์สำหรับคลื่น มุมลำคลื่นที่เกิดจาก PPM EMAT จะไม่ได้คำนวณอย่างถูกต้องนัก  $Z_i$  เพิ่มขึ้นตาม  $D^2$ ,  $N_R N_T, M_R M_T$  และ  $B_R B_T$  ตรงข้ามกับ  $Z_{AS}$  ดังสมการที่ 2.60

ระยะห่างขดลวดจะเป็นเช่นเดียวกันกับ LP-wave, S-wave และ L-wave สำหรับโครงสร้างแบบ pitch-catch แสดงดังรูปที่ 2.16 มีสัมประสิทธิ์ระยะห่าง(coil liftoff coefficient) ดังต่อไปนี้

$$F(CPPM) = A(CPPM) \exp(-4\pi h / W) \quad (2.16)$$

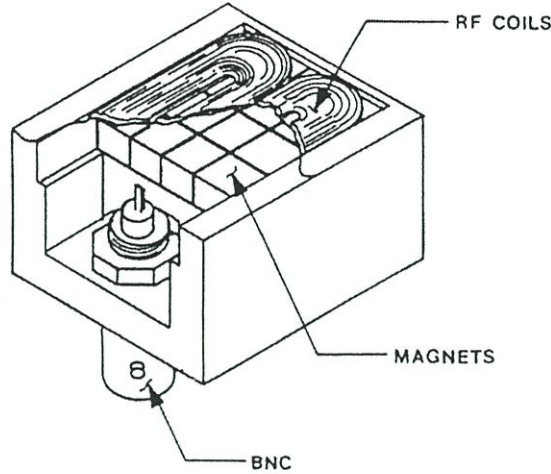
การลดทอนของสัญญาณจากปัจจัยการเลื่อนระยะโครงสร้างแม่เหล็ก(magnet liftoff factor) ซึ่งมีระยะห่างทางเดียวดังสมการนี้

$$F(MPPM) = A(MPPM) \exp(-\pi g / D) \quad (2.17)$$

ข้อมูลของลำคลื่นเกี่ยวกับทิศทางของการกระจายในแนวตั้งของเสาอากาศ [7] ดังสมการต่อไปนี้

$$D(\alpha) = \left\{ \frac{\pi \sin \alpha}{2\alpha} \right\} \exp\left(-j \frac{\pi M_T}{4}\right) \times \frac{\sin\left[\frac{M_T}{2}(\alpha - \pi)\right]}{\sin\left[\frac{1}{2}(\alpha - \pi)\right]} \quad (2.18)$$

เมื่อ  $\alpha = (2\pi D / \lambda) \sin \theta$  และ  $M_T$  คือจำนวนแม่เหล็ก



รูปที่ 2.15 แม่เหล็กถาวรและขดลวด RF EMAT ในรูปแบบที่ทำให้การรับสัญญาณได้ดี

### 2.5.6 EMAT สำหรับคลื่นจานและคลื่นเกลียว (EMATs for Plate and Torsional Waves); สารไม่ใช่แม่เหล็ก (Nonmagnetic)

EMAT แสดงดังรูปที่ 2.13 และ 2.15 ที่ใช้สร้าง Lamb และ SH plate waves ค่าทรานส์เฟอร์ อิมพีแดนซ์สำหรับ Lamb wave สำหรับสนามแม่เหล็กที่ขนานกับผิวมีสมการดังนี้

$$Z_i = 2\omega^2 B_R B_T N_R N_T K_R K_T W \frac{\exp(-2j\phi)}{Y_{MZ}} \quad (2.19)$$

สำหรับสนามแม่เหล็กที่ตั้งฉากกับผิวมีสมการดังนี้

$$Z_i = 2\omega^2 B_R B_T N_R N_T K_R K_T W \frac{1}{Y_{MX}} \quad (2.20)$$

เมื่อค่า  $Y_{MZ}$  และ  $Y_{MX}$  คือค่าความนำไฟฟ้าในแนวแกน z และ x (เป็นฟังก์ชันเชิงซ้อนของความถี่, คาบของแรงขับ, ความหนาของวัตถุ, และคุณสมบัติของวัตถุ) และ  $\phi$  คือมุมของการเคลื่อนที่ส่วนประกอบของแรงขับที่ผิวระหว่าง  $\sigma_{xz}$  และ  $\sigma_{zz}$  ค่าตัวแปรอื่นๆ ได้อธิบายก่อนหน้านี้แล้ว ซึ่งใช้ Lamb wave ที่สร้างจาก EMAT ในการตรวจรอยแตกร้าวท่อส่งก๊าซ[35,36] ปัจจัยระยะห่างของขดลวดมีความสัมพันธ์กับขดลวดวงเวียน (meander-line coil) [9,15,21,37,38] ดังสมการที่ 2.13 ปัจจัยระยะห่างแม่เหล็ก(magnet liftoff factor) แสดงดังสมการที่ 2.7 ค่าทรานส์เฟอร์ อิมพีแดนซ์ของ SH plate wave คือ

$$Z_i = \frac{2\omega D^2 B_R B_T N_R N_T M_R M_T}{\pi^2 Z_{AS} W V_S \beta t F(n)} \quad (2.21)$$

เมื่อ  $\beta$  คือ ฟังก์ชันการวิเคราะห์ความหนาวัตถุ(simple analytic function of thickness) แม่เหล็กถาวรที่ใช้ในการสร้าง SH plate wave, ปัจจัยระยะห่างแม่เหล็ก(magnet liftoff factor) แสดงในสมการที่ 2.17 และระยะห่างขดลวด(coil liftoff factor)แสดงดังสมการที่ 2.16

### 2.5.7 ลำคลื่นโฟกัส EMAT (Focused-Beam); สารไม่ใช่แม่เหล็ก (Nonmagnetic)

EMAT สามารถโฟกัสในหลายๆทาง สำหรับคลื่นที่จำเป็นต้องใช้เฟสอะเรย์ (Phase array)[32,39] ทิศทางของกระแสมีความจำเป็นต่อการพัฒนา EMAT

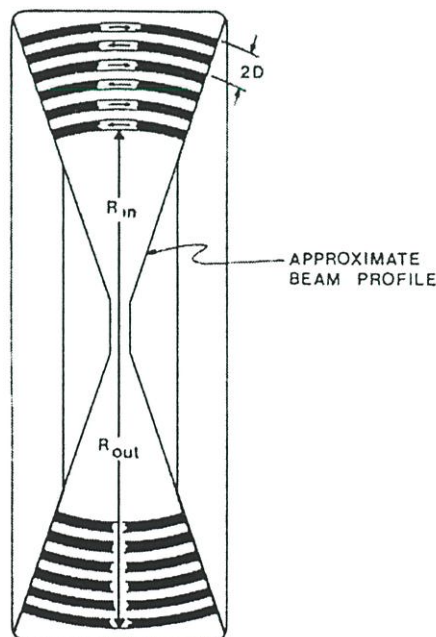
ผิวคลื่นและงานคลื่นสามารถพิจารณาได้ง่ายกว่าการโฟกัส Lamb-wave ดังแสดงดังรูปที่ 2.17 แรงขับที่ตั้งฉากกับกระแส ดังนั้นคลื่นถูกส่งโดยตรงไปยังศูนย์กลางของส่วนโค้ง แหล่งกำเนิดที่กระจายจะทำให้การโฟกัสไม่สมบูรณ์ ในทางปฏิบัติการโฟกัสแบบง่ายนี้สามารถเพิ่มความละเอียดสำหรับข้อบกพร่องเล็กน้อยและมีผลที่ต่ำกว่าสัญญาณส่งหลาย dB

การทำงานของโฟกัส EMAT ในโหมดการสะท้อนกลับมีความซับซ้อนกว่าโหมดแบบเดี่ยว เพราะโหมดสะท้อนกลับจะมีการสะท้อนกลับของสัญญาณจากการกระจายทำให้เกิดความแตกต่างในการรับสัญญาณ

พื้นฐานสำหรับการโฟกัส SH-wave คล้ายกับ Lamb-wave ดังรูปที่ 2.16 แต่ SH-wave มีโครงสร้างแม่เหล็กโค้งเป็นรูปวง ซึ่งมีความยากที่จะสร้างแบบนี้ ในทางปฏิบัติจะใช้แม่เหล็กที่เรียงเป็นวงกลม เมื่อมีผลกระทบจากการกระจายในการคำนวณจะมีเกณฑ์น้อยมากถ้าใช้แม่เหล็กมากกว่า 4-5 ชั้น

### 2.5.8 การออกแบบ EMAT ; สารแม่เหล็ก (Magnetic)

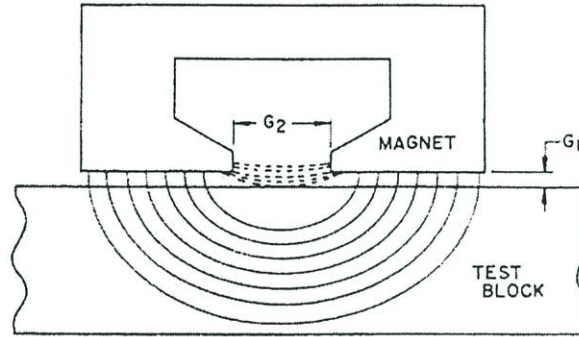
ข้อแตกต่างระหว่าง EMAT ของวัสดุที่ไม่ใช่แม่เหล็กกับวัสดุที่เป็นแม่เหล็กนั้นคือการออกแบบแรงขับสนามแม่เหล็ก ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญสำหรับแม่เหล็กรูปทรงเรขาคณิต การเปลี่ยนระยะเลื่อนแม่เหล็กเล็กน้อยสามารถเปลี่ยนขนาดของสนามแม่เหล็กที่ทำให้เกิดความหนาแน่นของกระแสได้ เป็นสิ่งที่จำเป็นในการเปลี่ยนตำแหน่ง EMAT ในระยะใกล้วัตถุแม่เหล็ก



รูปที่ 2.16 โฟกัสลำคลื่น(คลื่นผิว) ที่สร้างจาก EMATs

### 2.5.9 คลื่นตามยาว(L-wave); สารแม่เหล็ก (Magnetic)

คลื่นตามยาวแพร่ตั้งฉากกับผิวสามารถสร้างแรงลอเรนซ์ (Lorentz force) ผ่านวัสดุแม่เหล็ก ซึ่งเหมือนกันกับวัสดุที่ไม่ใช่แม่เหล็ก สนามแม่เหล็กจะเกิดขึ้นที่บริเวณช่องว่างระหว่างแม่เหล็กกับผิววัตถุ ดังรูปที่ 2.17 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากแม่เหล็กรูปตัว C กับวัสดุสารแม่เหล็กจะเห็นได้ว่าเส้นแรงแม่เหล็กสามารถผ่านเข้าไปในวัตถุ แต่ระดับเส้นแรงแอ่อนลงเรื่อยๆเมื่อมีระยะห่างออกไป



รูปที่ 2.17 ลักษณะการกระจายของสนามแม่เหล็กจากแม่เหล็กรูปตัว C ที่วางใกล้ผิววัสดุ

### 2.5.10 คลื่นตามขวางแนวนอน (SH-wave); สารแม่เหล็ก (Magnetic)

คลื่นตามขวางเคลื่อนที่ตั้งฉากกับผิวของวัตถุแม่เหล็กนิยมนำมาใช้งานกับ EMAT ในกรณีนี้เหมือนกับกรณีของสารที่ไม่ใช่แม่เหล็กสำหรับ โหมคการสร้างและการรับ แม้ว่าขนาดสนามแม่เหล็กจะขึ้นกับระยะห่างกับผิว มีผลต่อการสร้างสัญญาณ ถ้าสนามแม่เหล็กในผิวมีระดับต่ำ เส้นแรงแม่เหล็กจะทำให้เกิดมุมใหญ่ (large angle) กับผิว (เส้นแรงแม่เหล็กที่ผ่านวัตถุที่มีค่าซึมซาบแม่เหล็กสูง) คุณสมบัติของแม่เหล็กถาวรที่ใช้ในทางปฏิบัติจะมีระดับสนามแม่เหล็กที่ช่องว่าง 1.2-1.8 T แม่เหล็กไฟฟ้าสามารถใช้ที่ระดับ 2.5 T ใช้ขดลวดเก็บสัญญาณสนามรอบข้าง 1 T EMAT สามารถทำงานได้ดีที่สุดเมื่อเป็นแม่เหล็กจากเหล็กกล้า ในกรณีนี้ต้องการสนามแม่เหล็ก 1.5 T

### 2.5.11 มุมลำคลื่น EMAT, คลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางแนวตั้ง (Angle-Beam EMATs, L and SV waves); สารแม่เหล็ก (Magnetic)

สนาม L-wave และ SV-wave ที่ตั้งฉาก, มุมลำคลื่น EMAT การทำงานของวัตถุแม่เหล็กใกล้เคียงกับวัตถุที่ไม่ใช่แม่เหล็กที่อธิบายก่อนหน้านี้ (หัวข้อก่อนหน้านี้กล่าวถึงสนามที่ผิวขึ้นกับระยะห่างผิว) สิ่งที่ต้องสนใจคือสนามแม่เหล็กที่ขานานซึ่งต้องขานานอย่างแท้จริง ปกติจะวิจัยวัตถุที่ใกล้อิมิตัว

### 2.5.12 มุมลำคลื่น EMAT, คลื่นตามขวางแนวอน (Angle-Beam EMATs, SH-waves) ; สารแม่เหล็ก (Magnetic)

การสร้าง SH-wave จะทำงานได้ดีที่วัตถุแม่เหล็กที่นิ่ง[40] แม้ว่าจะใช้แรงขับจากสนามแม่เหล็กสูง สัญญาณรบกวน Barkhausen เกิดจากการเคลื่อนที่ของแม่เหล็กมีผลต่อสัญญาณของ EMAT สัญญาณ EMAT ที่นิ่ง(stationary)จะมีประสิทธิภาพดีเพราะว่าแรงขับจะดีจากแม่เหล็ก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อชิดกับผิววัตถุ ค่าสนามแม่เหล็กและสัญญาณรบกวน Barkhause จะมีผลกับการทำงานของ SH EMAT ทั้งแบบวัตถุที่เป็นแม่เหล็กและไม่เป็นแม่เหล็ก (สนามแม่เหล็กที่ผิวมากกว่า 1 T)

### 2.5.13 EMAT สำหรับคลื่นงานและคลื่นเกลียว (Plate and Torsional Waves); สารแม่เหล็ก (Magnetic)

เป็นเรื่องที่ยากในการปฏิบัติจริงที่จะใช้สนามแม่เหล็กที่ขนานกับผิวสำหรับวัตถุแม่เหล็ก,  $\theta' = 90^\circ$  ที่ใช้ทั่วไปเมื่อคำนวณทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์บริสุทธิ (intrinsic transfer impedance) ยกเว้นสนามแม่เหล็กที่ทำให้เกิดคลื่นงานและคลื่นเกลียวจะเหมือนกันในสารที่เป็นแม่เหล็กและไม่เป็นแม่เหล็ก

### 2.5.14 คลื่นผิว EMAT (Surface-Wave EMATs); สารแม่เหล็ก (Magnetic)

การสร้างและการรับคลื่นผิวโดย EMAT ในวัตถุที่เป็นแม่เหล็กจะมีข้อแตกต่างเล็กน้อยจากกรณีสารที่ไม่ใช่แม่เหล็กที่กล่าวก่อนหน้านี้ คือสนามแม่เหล็กขนานยากต่อการใช้ โดยจะกล่าวในหัวข้อ มุมลำคลื่นเสียง, คลื่นตามขวางแนวอน EMAT

### 2.5.15 ลำคลื่นเสียง EMAT ซึ่งถูกโฟกัส (Focused-Beam); สารแม่เหล็ก (Magnetic)

สำหรับ Lamb wave, ในกรณีของวัตถุแม่เหล็กจะไม่แตกต่างจากกรณีของวัตถุที่ไม่ใช่สารแม่เหล็ก ทั้งเงื่อนไขและการใช้งาน

## 2.6 การออกแบบส่วนของแม่เหล็ก

การสูญเสียพลังงานจากทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์ (transfer impedance) ของ EMAT ขึ้นอยู่กับสมการระดับแรงขับสนามแม่เหล็ก ดังนั้นการเพิ่มขนาดของสัญญาณจะมีผลต่อค่า SNR โดยเฉพาะอย่างยิ่งวัตถุแม่เหล็กใช้งานที่ต่ำกว่า 1.5 T

ความสัมพันธ์ของแม่เหล็ก โดยเหตุผลหลักคือ กฎของ thumb เพื่อให้เข้าใจมากขึ้นเกี่ยวกับทฤษฎีของแม่เหล็กที่ใช้ใน EMAT และประสิทธิภาพของ EMAT บนวัสดุแม่เหล็ก

### 2.6.1 วัสดุแม่เหล็ก

การเขียนสมการของการเกิดพลังงานสูญเสีย (loss) สำหรับ EMAT ที่ใช้วัสดุแม่เหล็กเป็นเรื่องยากมาก เนื่องจากสนามแม่เหล็กมีขนาดใหญ่ (ใกล้อิ่มตัว) สัมประสิทธิ์การเลื่อนออก (lift-off coefficient) ของขดลวดจะคล้ายกันและไม่จำเป็นต้องสนใจผลกระทบของขอบเขตความลึกผิว เมื่อค่าความซึมซับแม่เหล็ก (permeability) มีค่ามาก

ผลกระทบจากการเลื่อนออกของแม่เหล็กมีผลแตกต่างกันมาก ระยะห่างของสนามแม่เหล็กจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อมีระยะห่างออกไป ค่าสัมประสิทธิ์การเลื่อนออกของแม่เหล็กสามารถคำนวณโดยใช้ไฟไนต์อิลิเมนต์ หรือวัดได้จากค่าจริง การทดลองได้แสดงว่าสัญญาณ S-wave ที่ดีสามารถได้จากวัสดุที่เป็นแม่เหล็กอย่างเดียว เมื่อช่องว่างของสนามมีค่าเท่ากับ 2 หรือเวลาค่าที่เป็นแม่เหล็กอิ่มตัว เหล็กส่วนใหญ่ต้องการช่องว่างของสนามประมาณ 1.4 T หรือมากกว่าจะได้สัญญาณที่ดี แต่ว่าเหล็กบางประเภทจะให้สัญญาณดีที่ 1.0 T

ในโมเดลของสารจะมีนิวเคลียสที่จุดศูนย์กลาง มีศักย์เป็นบวก มีอิเล็กตรอนวงโคจรอยู่รอบนิวเคลียสในวงโคจรต่างๆ ทั้งนิวเคลียสและอิเล็กตรอน ก็มีการหมุนรอบตัวเองด้วย การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในวงโคจรทำให้เกิดมีกระแสซึ่งไหลวนอยู่รอบพื้นที่เล็กๆ ซึ่งจะเกิดแรงบิดกระทำเมื่อมันอยู่ในสนามแม่เหล็ก แรงบิดนี้จะพยายามทำให้สนามแม่เหล็กที่เกิดจากอิเล็กตรอนเบนเข้าหาสนามแม่เหล็กภายนอก ซึ่งอาจสรุปได้ว่า วงโคจรของอิเล็กตรอนทุกตัวในเนื้อของสารจะเบนทิศทางในลักษณะที่เพิ่มสนามแม่เหล็กที่เกิดจากอิเล็กตรอนรวมกับสนามแม่เหล็กภายนอก เป็นผลให้สนามแม่เหล็กผลลัพธ์ที่จุดใดๆ ในเนื้อสารนั้นมีค่ามากกว่าสนามแม่เหล็กภายนอก

นอกจากนี้อิเล็กตรอนที่หมุนรอบตัวเอง หรือนิวเคลียสที่หมุนรอบตัวเอง ถือว่ามีการเคลื่อนที่ของประจุ เมื่อมีการเคลื่อนที่ของประจุก็จะมีกระแสเกิดขึ้น หรือมีโมเมนต์แม่เหล็กหมุน แต่โมเมนต์แม่เหล็กนี้มีค่าน้อยมาก

เราสามารถแยกประเภทของสารแม่เหล็กออกได้เป็น 6 ชนิด คือ

#### 2.6.1.1 สารไดอะแมกเนติก

สนามแม่เหล็กรวมที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในแต่ละวงโคจรมีค่าเกือบเป็นศูนย์ นอกจากนี้โมเมนต์สนามแม่เหล็กที่เกิดก็มีค่าน้อยมากเช่นเดียวกัน เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกผ่านเข้ามา ก็อาจจะไม่ทำให้เกิดกำลังบิดของแต่ละอะตอมได้ ดังนั้นวัสดุจำพวกนี้จึงเป็นแม่เหล็กได้ยาก ตัวอย่างวัสดุจำพวกนี้ได้แก่ บิสมัท ไฮโดรเจน ฮีเลียม พวกก๊าซเฉื่อยทั้งหลายนอกจากนี้ก็มีวัสดุอื่นๆ คือ ทองแดง ซิลิกอน เฮอร์มานียม แกรไฟต์ และกำมะถัน

#### 2.6.1.2 พาราแมกเนติก

สนามแม่เหล็กซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของอะตอมมีค่ามากกว่าศูนย์ไม่มากนัก อย่างไรก็ตามถ้ามีสนามแม่เหล็กจากภายนอกผ่านเข้ามา อาจทำให้เกิดกำลังบิด เกิดสนามแม่เหล็กรวมเพิ่มขึ้น นั่น

คือจะมีโมเมนต์สนามแม่เหล็ก ดังนั้นมันจึงสามารถเป็นแม่เหล็กได้ วัสดุจำพวกพาราแมกเนติก ได้แก่ โปแทสเซียม ทั้งสเดน แมงกานีส โครเมียม นอกจากนี้ก็มีพวกวัสดุที่หายาก (Rare earth) เช่น เออร์เบียมคลอไรด์ นีโอดีเนียมออกไซด์ ฯลฯ เป็นต้น วัสดุอีกสี่ประเภทที่จะกล่าวต่อไปนี้เป็นวัสดุที่มีสนามแม่เหล็กที่เกิดจากอะตอมและยังสูง เกิดโมเมนต์สนามแม่เหล็กสูงอีกด้วย

### 2.6.1.3 เฟอร์โรแมกเนติก

เป็นวัสดุที่มีจำนวนอะตอมหนาแน่น แต่ละอะตอม ทำให้เกิดโมเมนต์สนามแม่เหล็กสูง นอกจากนี้สนามแม่เหล็กอันเกิดจาก อะตอมของมันก็มีทิศคล้ายตามกันเป็นส่วนใหญ่ เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกเข้ามาจึงช่วยเสริมให้สนามแม่เหล็กทั้งหลายไปในทางเดียวกันมากขึ้น ถึงแม้ว่าจะเอาสนามแม่เหล็กภายนอกออกไปแล้ว ส่วนใหญ่ยังมีสนามแม่เหล็กที่ไปทางเดียวกันหลงเหลืออยู่ จึงทำให้วัสดุพวกนี้เป็นแม่เหล็กถาวรได้ วัสดุจำพวกเฟอร์โรแมกเนติก ได้แก่ เหล็ก โคบอลต์ นิกเกิล พวกโลหะผสม เช่น อัลนิโก เป็นส่วนผสมของ อลูมิเนียม + นิกเกิล + โคบอลต์ + ทองแดงเล็กน้อย เป็นต้น นอกจากนี้ก็มีวัสดุที่หายาก ซึ่งสามารถเป็นวัสดุพวกเฟอร์โรแมกเนติกที่อุณหภูมิต่ำ อาทิ กาโคลิเนียม ไคสโรปรเซียม

### 2.6.1.4 แอนติเฟอร์โรแมกเนติก

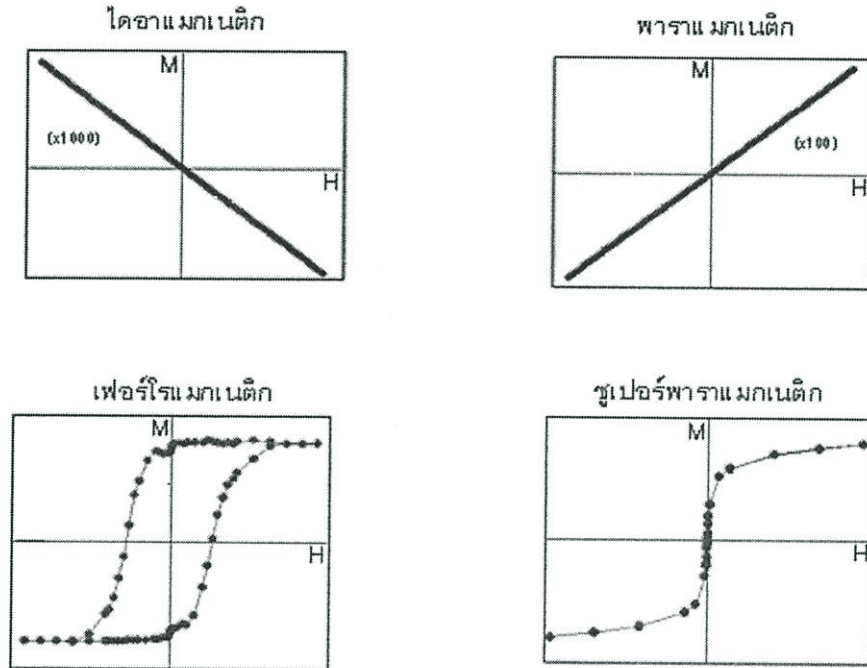
เนื่องจากว่าแรงที่เกิดจากอะตอมหนึ่งไปหักล้างแรงที่เกิดจากอะตอมหนึ่ง ทำให้สนามแม่เหล็กที่เกิดจากอะตอมทั้งหลายถูกหักล้างกันเป็นศูนย์ ดังนั้นโมเมนต์สนามแม่เหล็กจึงเป็นศูนย์ไปด้วย ถึงแม้จะมีสนามแม่เหล็กภายนอกเข้ามา ก็ยากที่จะบังคับให้สนามแม่เหล็กของอะตอมเหล่านั้นไปในทางเดียวกันได้ ดังนั้นวัสดุจำพวกแอนติเฟอร์โรแมกเนติก ได้แก่ สารออกไซด์ต่างๆ เช่น นิกเกิลออกไซด์ พวกซัลไฟด์ คือ เฟอร์รัสซัลไฟด์ เป็นต้น นอกจากนี้ก็มีพวกคลอไรด์บางชนิด เช่น โคบอลต์คลอไรด์

### 2.6.1.5 เฟอร์ริแมกเนติก

เป็นวัสดุที่มีจำนวนอะตอมหนาแน่น แต่ไดโพลโมเมนต์ที่เกิดจากอะตอมทั้งหลายมีทิศทางไม่ไปในทางเดียวกันหมด นอกจากนี้ผลรวมสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสนามแม่เหล็กของแต่ละอะตอมที่เคลื่อนไหว ยังต่ำกว่าสนามแม่เหล็กของวัสดุจำพวกเฟอร์โรแมกเนติกดังกล่าวมาแล้ว อย่างไรก็ตาม เมื่อมีสนามภายนอกเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้ทิศทางของสนามแม่เหล็กส่วนใหญ่ไปในทิศทางเดียวกันมากขึ้น นั่นก็หมายความว่ามันสามารถเป็นแม่เหล็กได้ง่ายเหมือนกัน วัสดุจำพวกเฟอร์ริแมกเนติก เป็นวัสดุประเภทเฟอร์ไรต์ ที่มีความนำไฟฟ้า (Conductivity) ต่ำกว่าวัสดุจำพวกเฟอร์โรแมกเนติก ดังนั้นวัสดุเฟอร์ริแมกเนติกทั้งหลายจึงมีความต้านทางสูงกว่า ด้วยเหตุนี้จึงนิยมใช้วัสดุจำพวกเฟอร์ริแมกเนติกเคลือบแกนหม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อลดกระแสเอ็ดดี้ ตัวอย่างวัสดุจำพวกเฟอร์ริแมกเนติก ได้แก่ เหล็กออกไซด์ นิกเกิลซิงค์เฟอร์ไรต์ และนิกเกิลเฟอร์ไรต์ เป็นต้น

### 2.6.1.6 ซูเปอร์พาราแมกเนติก

วัสดุที่ประกอบด้วยอนุภาคของเฟอร์โรแมกเนติก เกาะติดบนตัวขั้วโคอีเล็กทริก แต่ต้องไม่มีการแลกเปลี่ยนแรงระหว่างอนุภาคที่ติดกัน วัสดุประกอบดังกล่าวนี้อาจมีลักษณะเป็นอนุภาคของเฟอร์โรแมกเนติก เกาะติดบนแถบพลาสติกบาง เพื่อให้สามารถเปลี่ยนสถานะความเป็นแม่เหล็กได้ทันทีด้วยระยะทางสั้นๆ เพื่อสามารถเก็บข้อมูลบนแถบพลาสติกได้มากๆ แถบพลาสติกดังกล่าวถูกใช้อย่างกว้างขวางในเครื่องเสียง เครื่องวีดิทัศน์ ตลอดจนระบบบันทึกข้อมูลต่างๆ



รูปที่ 2.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Magnetization (M) กับค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก (H) ของวัสดุต่างๆ

แม่เหล็กนาโนเชิงโมเลกุล (molecular nanomagnets) หรือ แม่เหล็กแบบโมเลกุลเดี่ยว (single-molecular magnets, SMMs) เมื่ออยู่ภายใต้สภาวะที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤติ โมเลกุลแม่เหล็กเหล่านี้สามารถแสดงสมบัติลูอิสเทอร์ซิสม (hysteresis loop) ซึ่งเป็นสมบัติที่ชี้บ่งชี้สภาพความเป็นแม่เหล็กของวัสดุขนาดใหญ่ และยังสามารถแสดงพฤติกรรมควอนตัมทัวเนลลิงของการอัคฟลักซ์แม่เหล็ก (quantum tunneling of magnetization, QTM) และการแทรกสอดของสถานะควอนตัม (quantum phase interference) ซึ่งเป็นสมบัติของแม่เหล็กที่สามารถพบได้ในระดับนาโนเท่านั้น โดยสมบัติเชิงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในระดับนาโนเหล่านี้ไปใช้ประโยชน์ได้อย่างมากมาย

ตารางที่ 2.2 แสดงชนิดของเนื้อสารต่อค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ทำให้สารแม่เหล็กอิ่มตัว

| ชนิดเนื้อสาร                             | เออสเตด ( Orstedes) | kA/m          |
|--|---------------------|---------------|
| Alnico 5 , 6 , 8 and 9                   | 3,000 – 7,000       | 239 - 557     |
| Ceramic ( Hard Ferrite )                 | 10,000 – 50,000     | 796 - 955     |
| Neodymium-iron-boron , motor grade       | 35,000 – 50,000     | 2,786 – 3,980 |
| Neodymium-iron-boron , high energy grade | 30,000 – 40,000     | 2,388 – 3,184 |
| Neodymium-iron-boron , most bonded       | 30,000 – 40,000     | 2,388 – 3,184 |
| Neodymium-iron-boron , high temp bonded  | 35,000 – 60,000     | 2,786 – 4,776 |
| SmCo 1-5                                 | 30,000 – 40,000     | 2,388 – 3,184 |
| SmCo 2-17                                | 35,000 – 50,000     | 2,786 – 3,980 |
| SmCo low Hci bonded grade                | 20,000 – 30,000     | 1,592 – 2,388 |
| SmCo high temperature grade              | 35,000 – 50,000     | 2,786 – 3,980 |

### 2.6.2 เมกเนไทเซชัน และเพอร์เมียลบิลิตี

โดยทั่วไปแล้วกระแสเกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระ ดังกฎวงจรของแอมแปร์

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \quad (2.22)$$

แต่อย่างไรก็ตาม กระแสอาจเกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของประจุผูกพัน (Bound charge) เช่น การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเป็นวงรอบนิวเคลียส การหมุนรอบตัวเองของอิเล็กตรอน และการหมุนรอบตัวเองของนิวเคลียส กระแสที่เกิดจากประจุผูกพัน เรียกว่า กระแสผูกพัน (Bound current) หรือ Amperian current สนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสผูกพันนี้เรียกว่า เมกเนไทเซชัน (magnetization:  $\vec{M}$ )

จากคำจำกัดความของไดโพลโมเมนต์ " $dm$ " ถ้าให้  $I$  เป็นกระแสที่ไหลวนรอบพื้นที่เล็ก ๆ  $d\vec{S}$  เราจะได้

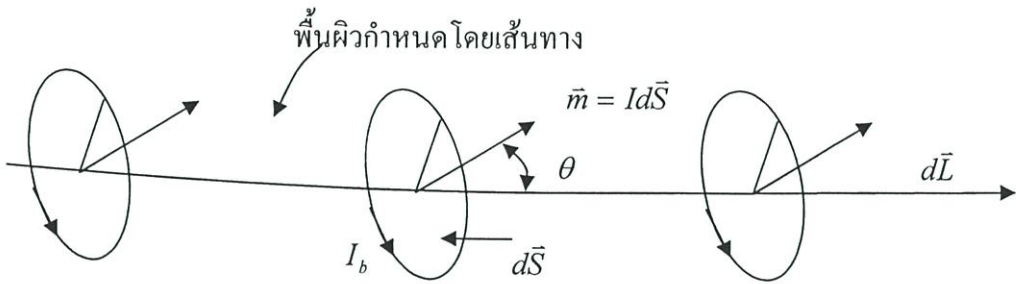
$$d\vec{m} = I d\vec{S} \quad (2.23)$$

ถ้ามีไดโพล  $n$  ตัวต่อหน่วยปริมาตร ดังนั้น

$$\vec{M} = n I d\vec{S} \quad (2.24)$$

ถ้าไดโพลแต่ละตัวมีค่าแตกต่างกัน สูตรทั่วไปเขียนเป็น

$$\vec{M} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta V} \sum_{i=1}^{n\Delta V} I_i d\vec{S}_i \quad (2.25)$$



รูปที่ 2.19 ทิศทางของตัวแปรในการคำนวณเมกเนไตเซชัน

ตามรูปไดโพล โมเมนต์  $\vec{m}$  ทำมุม  $\theta$  กับ  $d\vec{L}$  เมื่อพิจารณา ปริมาตรรูปทรงกระบอก ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดล้อมรอบไดโพลได้พอดี และมีความยาว  $dL$

$$\text{พื้นที่ที่ตั้งฉากกับ } d\vec{L} = dS \cos \theta$$

$$\text{ปริมาตรตลอดความยาว } dL = (dS \cos \theta)(dL) = dS \cdot dL$$

ถ้ามี  $n$  ไดโพลต่อหน่วยปริมาตร ดังนั้นกระแสผูกพัน ที่ถูกล้อมโดยเส้นทางปิดในช่วง  $dL$  คือ

$$dI_b = (\text{กระแส } I \text{ ของไดโพลแต่ละตัว})(\text{จำนวนไดโพลในปริมาตร})$$

$$dI_b = (I)(ndS \cdot dL) = nIdS \cdot dL$$

$$dI_b = \vec{M} \cdot d\vec{L}$$

เมื่อคิดตลอด Contour ปิดทั้งหมด

$$I_b = \oint \vec{M} \cdot d\vec{L} \quad (2.26)$$

สมการ (2.26) อาจเขียนในเทอมของความหนาแน่นกระแสผูกพันได้

$$I_b = \oint \vec{M} \cdot d\vec{L} = \int \vec{J}_b \cdot d\vec{S} \quad (2.27)$$

ใช้ทฤษฎีของ Stroke

$$\int (\nabla \times \vec{M}) \cdot d\vec{S} = \int \vec{J}_b \cdot d\vec{S} \quad (2.28)$$

เนื่องจากสมการนี้เป็นจริงสำหรับพื้นผิว  $dS$  ใดๆ ดังนั้น

$$\nabla \times \vec{M} = \vec{J}_b \quad (2.29)$$

เพราะฉะนั้นประจุผูกพัน จึงเป็นตัวสร้างสนามเมกเนไตเซชัน  $\vec{M}$  เหมือนกับการเคลื่อนที่ของประจุอิสระที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก  $\vec{H}$  ขึ้นในสุญญากาศ

จากผลอันนี้ ความสัมพันธ์ของ  $\vec{B}$ ,  $\vec{H}$  และ  $\vec{M}$  แสดงไว้ดังนี้

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_f \quad (\text{Free Space})$$

ซึ่ง  $\vec{J}_f$  ในที่นี้คือแหล่งจ่ายความหนาแน่นกระแสทั้งหมด (Current density source) ซึ่งเกิดจาก ประจุอิสระ และ ประจุผูกพัน

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_f + \vec{J}_b \quad (\text{Free Space})$$

ในเทอมของ  $\vec{B}$  เขียนได้เป็น

$$\begin{aligned}\nabla \times \frac{\vec{B}}{\mu_0} &= \vec{J}_f + \vec{J}_b \\ \nabla \times \frac{\vec{B}}{\mu_0} &= \vec{J}_f + (\nabla \times \vec{M}) \\ \nabla \times \left( \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M} \right) &= \vec{J}_f \\ \text{หรือ} \quad \nabla \times \vec{H} &= \vec{J}_f\end{aligned}\tag{2.30}$$

ซึ่งในที่นี้  $\vec{H}$  ต้องหมายถึง  $\left( \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M} \right)$  หรือ

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M})\tag{2.31}$$

ดังนั้นสมการ (2.30) จึงเป็นสมการของแมกซ์เวลล์ ที่ใช้สำหรับสนามแม่เหล็กสถิต เมื่อมีสารแม่เหล็กอยู่ด้วย

ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\vec{M}$  และ  $\vec{H}$  เขียนได้ดังนี้

$$\vec{M} = \chi_m \vec{H}\tag{2.32}$$

ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กในตัวกลางใดๆ หาได้โดย

$$\vec{B} = \mu \vec{H} = \mu_0 \mu_r \vec{H}\tag{2.33}$$

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (\text{ใน free space})$$

เมื่อ  $\vec{B}$  ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กมีหน่วยเป็น  $\frac{Wb}{m^2}$  หรือเทสลา(T) ในระบบหน่วย SI

$\mu_0$  ค่าซึมซาบแม่เหล็กในสุญญากาศ (Permeability of free space) มีค่าเท่ากับ  $4\pi \times 10^{-7}$  H/m

$\vec{H}$  ความเข้มสนามแม่เหล็กมีหน่วยเป็น A/m

ฟลักซ์แม่เหล็ก  $\phi$  ที่ผ่านพื้นที่ใดๆ ที่กำหนดคือ

$$\phi = \oint \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad \text{Wb}\tag{2.34}$$

### 2.6.3 แม่เหล็กไฟฟ้า(Electromagnets)

ความหมายทั่วไปของการสร้างสนามแม่เหล็กขนาดใหญ่ด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า โดยออกแบบแม่เหล็กไฟฟ้าได้สองแบบคือแบบคาดเดา(educated guess) และแบบคำนวณ(tedious calculation) สำหรับการหาค่าประสิทธิภาพที่ดีที่สุดอาจจะหาจากค่าตัวแปรแม่เหล็กที่สำคัญจำนวนหนึ่ง เช่น น้ำหนัก, การใช้พลังงาน, รูปแบบหรือความเข้มสนามแม่เหล็ก

วิธีการคำนวณเชิงตัวเลข (Finite-difference or finite-element methods) ที่กำลังใช้ใน ปัจจุบัน[41] ซึ่งไม่มีความซับซ้อนในการคำนวณค่าประสิทธิภาพแม่เหล็ก ด้วยการ ใช้ fast two-dimensional (2D) code

พิจารณาตัวอย่างรายละเอียดการออกแบบของแม่เหล็กรูป C สำหรับกรณีที่ทำงานใกล้กับโลหะที่ไม่เป็นแม่เหล็กดังรูปที่ 2.8 เมื่อ  $W_M$  คือค่าความกว้างของแม่เหล็กซึ่งกว้างกว่าช่องว่าง  $G$  อย่างน้อย 4 เท่า การคำนวณแบบสองมิติ(2D) จะแสดงให้เห็นประสิทธิภาพแม่เหล็ก เป็นอีกวิธีการหนึ่งในการประมวลผลการคำนวณแบบสองมิติ ที่ให้วัดค่าจริงในส่วนที่สนใจ

พฤติกรรมการณ์เคลื่อนออกของแม่เหล็กจะคำนวณ โดยให้  $z$  เป็นอิสระจากค่าของ  $x$  สนามแม่เหล็กจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อห่างจากช่องว่าง ในความเป็นจริงในการออกแบบแม่เหล็กคือกำหนดในค่าเกรเดียนของสนามแม่เหล็กภายนอกให้น้อยที่สุด ค่าสนามแม่เหล็กหาได้จาก  $B = \mu H$  โดย

$$\oint H \cdot dl = N_M I \quad (2.35)$$

เมื่อ  $N_M$  คือจำนวนรอบในขดลวดแม่เหล็ก และ  $I$  คือกระแสอนุกรมที่ไหลผ่านขดลวด การใช้งานสนามความเข้มต่ำ  $H$  ในแม่เหล็กไฟฟ้า (มีกระแสเล็กน้อยในขดลวดแม่เหล็ก) แม่เหล็กที่เป็นเหล็กอ่อน จะมีความสัมพันธ์พื้นฐานระหว่างของสนามแม่เหล็กในช่องว่าง  $B_G$  และจำนวนของกระแสต่อรอบ  $N_M I$  ในแม่เหล็ก (เฉพาะในช่องว่างที่มีค่าสามารถประมาณได้จากสนาม  $H$ )

$$B_G = \frac{\mu_0 N_M I}{G} \quad (2.36)$$

เมื่อ  $I$  คือกระแสมีหน่วยเป็นแอมแปร์ และ  $G$  คือระยะห่างระหว่างขั้วแม่เหล็กมีหน่วยเป็นเมตร  $B_G$  คือสนามแม่เหล็กระหว่างขั้วแม่เหล็กมีหน่วยเป็นเทสลา

เมื่อกระแสเพิ่มขึ้นค่าซิปซาบแม่เหล็กในส่วนต่างๆของแม่เหล็กจะลดลง เนื่องจากบริเวณนี้ จะทำให้เกิดผลรวมของสนามแม่เหล็กดังสมการนี้

$$\frac{\mu_0}{G} \int_{ron} H \cdot dl + B_G = \frac{\mu_0 N_M I}{G} \quad (2.37)$$

เมื่อค่าความซิปซาบแม่เหล็กลดลง สนามแม่เหล็กที่ช่องว่างและกระแสเพิ่มขึ้น หมายความว่าเส้นแรงแม่เหล็กเร็วและกระแสแม่เหล็กเพิ่มขึ้น โดยทั่วไปแล้วมีความยุ่งยากที่จะทำให้สนามแม่เหล็กมากกว่า 1.4 T สำหรับการกำเนิดคลื่น L-wave ถ้าปัญหาไม่ได้เกิดจากน้ำหนักสามารถเพิ่มแผ่นเหล็กเข้าไปในแม่เหล็กเพื่อลดค่าสนามเร็วไหลถ้าหากต้องการให้ทำงานต่อเนื่องแบบเชิงเส้น จะต้องให้ระบบหล่อเย็นด้วยน้ำแก่แม่เหล็ก

แม่เหล็กทรงเรขาคณิตอื่นๆ ที่ใกล้เหล็กมีคุณสมบัติทั่วไปเหมือนกับแม่เหล็กรูปตัว C ที่ได้แสดงในสมการที่ 2.36 และ 2.37 เมื่อ  $G$  คือระยะห่างระหว่างขั้วแม่เหล็กกับจานแม่เหล็ก ถ้าตรงกลางของขั้วและเส้นทางกลับเป็นรูปทรงกระบอกจะมีรูปร่างแกนเหมือนกัน เมื่อการคำนวณในระนาบสองมิติ(2D) ให้ผลเหมือนกันและถ้าขั้วแม่เหล็กมีทิศทางตามความยาว  $y$  ทำให้การคำนวณ

ง่ายขึ้น และหากใช้วัสดุประเภท vanadium permendur ซึ่งจะมีจุดอิ่มตัวของสนามที่สูงมาก จะทำให้ได้สนามที่ช่องว่างมากกว่า 2.5 T แต่ค่า 1.8 T คือค่าจำกัดสูงสุดในทางปฏิบัติ

แม้ว่ารูปร่างแม่เหล็กที่ใช้ในการสร้าง S-wave ได้ในโลหะที่ไม่ใช่สารแม่เหล็กให้ค่าความไวมากกว่าการใช้แม่เหล็กถาวร(หัวข้อถัดไป) การใช้งานของแม่เหล็กไฟฟ้ากับโลหะที่ไม่เป็นสารแม่เหล็กเมื่อต้องการปิดสนามแม่เหล็ก โดยการสอดโพรมผ่านสนามแม่เหล็กเพื่อทำการวิเคราะห์โครงสร้างภายใน แม่เหล็กที่มีรูป C เมื่อใช้กับโลหะที่ไม่ใช่สารแม่เหล็กจะแสดงเหมือนกับวงจรเปิดแม่เหล็ก ในสนามความเข้มต่ำ เส้นแรงแม่เหล็กเกิดการรั่วไหลบนพื้นผิวทรงกระบอกของแกนแม่เหล็ก ภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็กตั้งฉากกับขั้วแม่เหล็กจะมีค่าไม่เกิน 0.5 เท่าของสนามภายในสูงสุดในเหล็กอ่อน ที่สนามแม่เหล็กสูง (ทำงานได้ดีที่จุดอิ่มตัวค่าแม่เหล็ก) สำหรับแม่เหล็กไฟฟ้ารูปร่างแบบต่างๆ ปกติจะมีค่าใกล้เคียงกับ 0.2-0.3 เท่าของค่าสนามแม่เหล็กสูงสุด จากค่ารั่วไหลของสนามแม่เหล็กในวงจรแม่เหล็ก ดังนั้นจะได้ค่าแม่เหล็ก 0.5 T ที่ขั้วแม่เหล็กสามารถให้ค่าสนามภายในสูงสุด 1.5-2.5 T ค่านี้แสดงจุดอิ่มตัวของแกนแม่เหล็ก ขั้วแม่เหล็กจะไม่ให้ค่าเส้นแม่เหล็กหนาแน่นเมื่อมีค่า reluctance ต่ำ (ค่าความต้านทานแม่เหล็กต่ำ) ทิศทางแม่เหล็กจะเป็นไปตามเส้นแรงแม่เหล็ก เพราะว่าผิวของสนามแม่เหล็ก 0.5 T จะทำได้ง่ายในแม่เหล็กถาวรแม่เหล็กไฟฟ้าจะไม่เลือกสำหรับการสร้าง S-wave ในโลหะไม่ใช่แม่เหล็ก

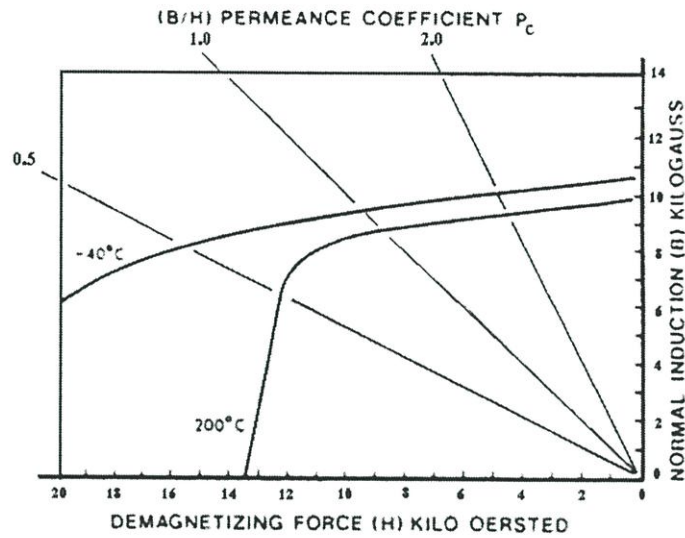
#### 2.6.4 แม่เหล็กถาวร (Permanent Magnets)

วัสดุแม่เหล็กที่ใช้ในการทำแม่เหล็กถาวรส่วนใหญ่จะเป็น rare earth-cobalt (ReCo) และ neodymium-iron-boron (NdFeB หรือ NdFe) ซึ่งเส้นโค้งความเป็นแม่เหล็กสำหรับวัสดุแม่เหล็กนี้แสดงในรูปที่ 2.20 และ 2.21 ผู้ผลิตวัสดุแม่เหล็กต่างๆ แสดงในตารางที่ 2.3 คุณสมบัติการใช้แม่เหล็กถาวรโดยได้พลังงานจากผลคูณ  $H_d B_d$  การใช้งานสนามแม่เหล็กเป็นเพิ่มการทำงานของ EMAT คือรากที่สองของผลคูณพลังงาน (square root of the energy product) ซึ่งในปัจจุบัน EMAT สามารถมีค่ารากที่สองของผลคูณพลังงานที่ 15-35 MGO (megagauss-oersted) และใช้ได้ถึง 60-75 MGO

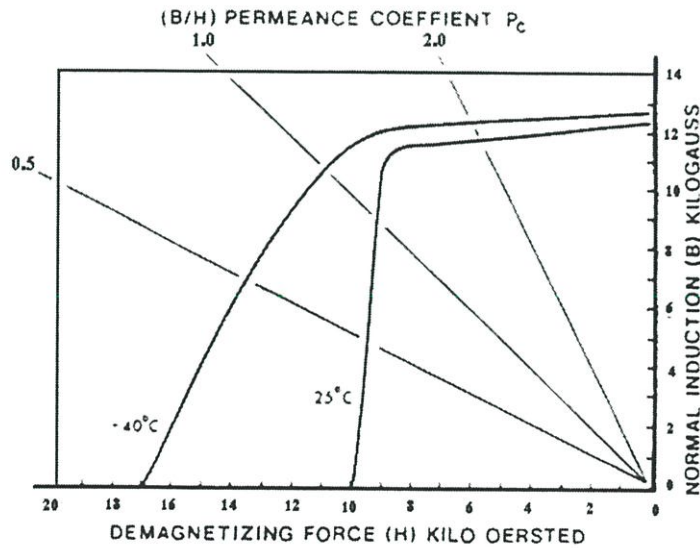
จากรูปที่ 2.20 และ 2.21 สนามแม่เหล็กที่ได้จากแม่เหล็กถาวรเป็นไปตามวงจรทางไฟฟ้าขึ้นอยู่กับอัตราความกว้างต่อความยาว (W:L) สำหรับแม่เหล็กทรงกระบอก จะใช้ความกว้างของเส้นผ่านศูนย์กลาง ซึ่งสารแม่เหล็ก ReCo ต้องการอัตราความกว้างต่อความยาวประมาณ 1.0 สาร NdFe ต้องการประมาณ 2.0 หรือมากกว่า

ค่าแม่เหล็กที่มากจะสร้างจาก NdFe ทำให้ประหยัดกว่า ReCo (ขนาดมากพอในการนำไปใช้งาน) มีรูปทรงที่เล็กกว่า

วิธีการคำนวณเชิงเลขในการออกแบบแม่เหล็กถาวร EMAT สามารถคำนวณจากกระแสที่บริเวณผิวแม่เหล็ก ถ้าทิศทางค่าสนามแม่เหล็กขนานกับแกนของแม่เหล็กทำให้กระแสมีความเสถียรหรือไม่เท่ากับศูนย์ โดยลักษณะอื่นสามารถอธิบายจากพฤติกรรมของแม่เหล็กถาวร



รูปที่ 2.20 เส้นกราฟสำหรับวัสดุแม่เหล็กถาวร rhenium-cobalt พลังงานสูงสัมประสิทธิ์การซึบซาบ ( $P_c$ ) คืออัตราส่วนความยาวต่อความกว้างของแม่เหล็ก



รูปที่ 2.21 เส้นกราฟสำหรับวัสดุแม่เหล็กถาวร neodymium-ferrite พลังงานสูง

ตารางที่ 2.3 ผู้ผลิตวัสดุแม่เหล็กถาวรพลังงานสูง

| องค์กร                              | วัสดุ |
|-------------------------------------|-------|
| Arnold Engineering Company          | NdFe  |
| Division of Allegheny International | ReCo  |
| Colt Industries                     | ReCo  |
|                                     | NdFe  |
| General Motors                      | NdFe  |
| Hitachi                             | ReCo  |
| IG Technology, Inc.                 | NdFe  |

### 2.6.5 พัลส์สนามแม่เหล็ก (Pulsed-Field Magnets)

พัลส์ของสนามแม่เหล็กเกิดจากการพันขดลวดกับแกนอากาศหรือแกนแม่เหล็กทำให้ได้ค่ากระแสวงที่ ดังนั้นกระแสวงจะมีขนาดไม่จำกัดเมื่อเพิ่มหรือลดสนามแม่เหล็ก ขนาดของแม่เหล็กที่ใช้งานที่ในชั้นวัสดุที่บางจะจำกัดมาก ดังนั้นในการออกแบบในการเกิดพัลส์แม่เหล็กไฟฟ้า (Pulsed electromagnets, PEMs) กับแกนเหล็ก ขนาดตัวนำไฟฟ้าเป็นส่วนองค่าแม่เหล็กกระแสวงที่ เพราะว่าวัสดุแม่เหล็กนั้นเป็นตัวกำหนดของ rise time, fall time ของสนามแม่เหล็ก ในการพิจารณาแม่เหล็กถาวรสำหรับการใช้งาน Power-supply เป็นส่วนสำคัญในการออกแบบพัลส์แม่เหล็ก

พัลส์สนามแม่เหล็กใช้งานมากใน EMAT ในการใช้งานเมื่อขนาดของสัญญาณที่แสดงผลในมอร์นิตอร์ไม่สามารถใช้งานได้ (ที่อุณหภูมิสูง) ใช้เทคนิคหลายอย่างในการพัฒนาเช่น การเพิ่มขนาดของความต่างศักย์เพื่อใช้ในการขับสนามแม่เหล็กและเหนี่ยวนำในขดลวดตัวรับ ในกรณีเหนี่ยวนำกระแสที่ผิวสามารถทำงานได้กับวัสดุที่ไม่ใช่แม่เหล็ก

### 2.6.6 การนำไฟฟ้าได้ดีของแม่เหล็ก

หลายปีที่ผ่านมา การนำไฟฟ้าของแม่เหล็กไม่ได้ถูกพิจารณาในทางปฏิบัติ แต่ในปัจจุบันนี้สามารถทำให้สนามแม่เหล็กสูง, โดยการนำไฟฟ้ากระแสสูงซึ่งต้องใช้ไนโตรเจนเหลว (Liquid nitrogen) ในการทำให้เย็น ทำให้สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิห้องในการปฏิบัติจริง การนำไฟฟ้าของแม่เหล็กเป็นสิ่งที่ง่าย จึงใช้ทำเป็นสวิตช์อุณหภูมิ(thermally activated superconducting switches)

## 2.7 การคำนวณค่าทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์

สำหรับสารที่ไม่ใช่แม่เหล็กกลไกของการส่งและการรับสัญญาณคลื่นอัลตราซาวด์ด้วย EMAT ที่เป็นแบบเชิงเส้นและมีความสัมพันธ์ตามมาตรฐาน[42] การคำนวณค่าทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์ของ EMAT เริ่มจากวัตถุที่ไม่ใช่แม่เหล็กโดยใช้แรงลอเรนซ์ (Lorentz force) ซึ่งกระแสนี้ยวนำจากขดลวดส่งไปยังผิวของวัตถุทำให้เกิดแรงที่ทำให้เกิดคลื่น อธิบายด้วยค่าคงที่อัลตราซาวด์ ( $C$ ) และความหนาแน่นมวล  $\rho_M$  ดังสมการนี้[43,44]คือ

$$\rho_M \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = C \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + F(z) \quad (2.38)$$

เมื่อ  $F(z)$  คือแรงลอเรนซ์ต่อปริมาตรมีค่าเท่ากับ

$$F(z) = J \times B \quad (2.39)$$

เมื่อ  $J$  คือ กระแสนี้ยวนำ ซึ่งแก้จากสมการของแมกเวลล์ โดยใช้ค่า  $j = \sqrt{-1}$ , คือ

$$J(z) = \frac{(1-j)n \times h_0}{\delta_c} \exp\left(\frac{-z(1-j)}{\delta_c}\right) \quad (2.40)$$

และผลจากสนามแม่เหล็ก  $h_0$  จากขดลวด EMAT บริเวณผิว,  $\delta_c = (2\rho / \mu_0 \omega)^{1/2}$ ,  $\rho$  คือค่าความนำไฟฟ้าของวัตถุ,  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} H/m$ , และ  $\omega$  คือความถี่เชิงมุม สมการที่ 2.38 สามารถคำนวณสำหรับเงื่อนไขขอบเขตแบบผิวอิสระหรือผิวที่แน่นอน (free-surface or fixed-surface) ในการสร้างคลื่น สมการนี้สามารถคำนวณสำหรับการเคลื่อนที่ของคลื่นอัลตราซาวด์แบบต่างๆ ได้ [30,33,36]

เมื่อคลื่นอัลตราซาวด์สะท้อนกลับจากผิวของโลหะจะเกิดความหนาแน่นกระแสและสนามไฟฟ้าในผิวโลหะและสนามแม่เหล็กรอบๆผิว สนามแม่เหล็กนี้ใช้ขดลวดรับสัญญาณ สนามไฟฟ้าที่ผิวสามารถหาได้โดย  $V \times B$ , เมื่อ  $V$  คือความเร็วอนุภาคของคลื่นหรือ  $V = \omega u$ ,  $u$  คือการเคลื่อนที่ของอนุภาค(displacement) ดังนั้นเอาพหุคูณความต่างศักย์ที่ขดลวดตัวรับคือ

$$V = \int \omega u \times B \cdot dl \quad (2.41)$$

เมื่อคำนวณค่าความยาวทั้งหมดของขดลวด เฉพาะความยาวที่อยู่ในขอบเขตประสิทธิภาพการรับส่งคลื่น

ส่วนนี้อธิบายกระแสที่เกิดจากการส่งโดยขดลวดเป็นผลทำให้เกิดการคลื่นอัลตราซาวด์หลังจากเคลื่อนที่ไปที่ผิวจะเกิดสนามแม่เหล็กทำให้เกิดค่าความต่างศักย์ในขดลวดตัวรับ อัตราส่วน  $V/I$  เรียกว่าทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์ ซึ่งส่วนต่อไปจะแสดงการเคลื่อนที่ของคลื่นอัลตราซาวด์และทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์สำหรับ EMAT แบบต่างๆ

### 2.7.1 สนามที่ตั้งฉากสำหรับคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวาง

เมื่อสนามแม่เหล็กตั้งฉากกับผิว สมการการเคลื่อนที่ของคลื่นตามขวาง ( $U_{FS}$ ) [43,45] คือ

$$U_{FS} = \frac{Bh_0}{\omega Z_{AS}} \left[ \frac{j}{1 - j\beta_M} \right] \quad (2.42)$$

สมการการเคลื่อนที่สำหรับเงื่อนไขขอบเขตผิวอิสระ ( $U_{RS}$ )

$$U_{RS} = \frac{Bh_0}{\omega Z_{AS}} \left[ \frac{j\sqrt{j\beta_M}}{1 - j\beta_M} \right] \quad (2.43)$$

สำหรับเงื่อนไขขอบเขตผิวคงที่ ซึ่งจำกัดสัญญาณ  $\beta_M$  ทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์สำหรับขอบเขตเงื่อนไขขอบเขตผิวอิสระคือ

$$Z_i(S) = \frac{B_R B_T N_R N_T (\bar{A}_R \bar{A}_T)^{1/2}}{Z_{AS}} \quad (2.44)$$

เมื่อ  $\bar{A}$  คือ พื้นที่ของขดลวด

สนามแม่เหล็กขนานกับผิว สมการการเคลื่อนที่ของคลื่นตามยาว ( $U_{FL}$ ) คือ

$$U_{FL} = \frac{Bh_0}{\omega Z_{AL}} \left[ \frac{j}{1 - j\beta_M} \right] \quad (2.45)$$

สมการการเคลื่อนที่สำหรับเงื่อนไขขอบเขตผิวอิสระ ( $U_{RL}$ )

$$U_{RL} = \frac{Bh_0}{\omega Z_{AL}} \left[ \frac{j\sqrt{j\beta_M}}{1 - j\beta_M} \right] \quad (2.46)$$

สำหรับเงื่อนไขขอบเขตผิวคงที่ ซึ่งจำกัดสัญญาณ  $\beta_M$  ทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์สำหรับขอบเขตเงื่อนไขขอบเขตผิวอิสระคือ

$$Z_i(S) = \frac{B_R B_T N_R N_T (\bar{A}_R \bar{A}_T)^{1/2}}{Z_{AL}} \quad (2.47)$$

หาค่าตัวแปร  $\beta_M$  จาก

$$\beta_M = \frac{2\pi\rho}{\mu_0 V^2} \quad (2.48)$$

และ

$$\beta_M = \frac{5f\rho}{V^2} \quad (2.49)$$

เมื่อ  $f$  คือความถี่มีหน่วย  $MHz$ ,  $\rho$  คือค่าความนำไฟฟ้ามีหน่วย  $\mu\Omega - m$ ,  $V$  คือความเร็วที่เหมาะสม (คลื่นตามยาวหรือคลื่นตามขวาง) มีหน่วย  $km/s$  (or  $mm/\mu s$ ) ค่า  $\beta_M$  หาได้จาก

$$\beta_M = 0.7 \left( \frac{2\pi\delta_c}{\lambda} \right) \quad (2.50)$$

เมื่อ  $2\pi\delta_c$  จะเป็นค่าที่เปรียบเทียบได้กับค่าความยาวคลื่นอัลตราซาวด์ที่ถูกสร้างขึ้น แรงขับ (driving force) จะไม่นำมาพิจารณาด้วย[43] ค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆรวมทั้ง  $\beta_M$  ที่อยู่ในสมการที่ 2.42-2.46 อธิบายถึงแรงขับอัลตราซาวด์สูงสุดที่ถูกควบคุมจากแรงขับธรรมชาติ(nature of the driving force) ค่า  $\beta_M$  ที่ถูกต้องจะเหมือนกันสำหรับการเกิด L-wave และ S-wave อธิบายคล้ายกับการเกิดคลื่นอัลตราซาวด์โดย EMAT

โดยอ้างอิงจากความถี่ที่  $-3dB$  ที่มีค่า  $\beta_M$  เท่ากับ 1 จะลดค่าผิวอิสระและถูกแทนที่โดย  $3dB$  จากความถี่ต่ำอิสระ  $1/\omega$  ความถี่ดังกล่าว  $f(-3dB)$  ได้ถูกกำหนดไว้แต่ละโหมด โดย

$$f(-3dB) = \frac{V^2}{5\rho} \quad (2.51)$$

ซึ่งตัวแปรทั้งหมดได้กำหนดไว้ในสมการที่ 2.48-2.49

### 2.7.2 เส้นวงเวียนขดลวด EMAT

สนามแม่เหล็กคงที่จะทำให้มุม  $\theta'$  [30] ที่เกี่ยวข้องกับพื้นผิวหน้า  $z = 0$  (ระนาบ xy) ส่วนประกอบสนามแม่เหล็กขนาน ( $B \cos \theta'$ ) จะสร้างแรงตั้งฉากกับพื้นผิวหน้าหรือในทิศทางของ  $z$  ส่วนประกอบที่ตั้งฉากนี้จะสร้างแรงในทิศทาง  $x$  สำหรับเส้นวงเวียนขดลวดที่มีจำนวนรอบ  $N_T$  รอบ มีความยาวเท่ากับ  $K_T$  ของความยาวคลื่น ความกว้าง  $W$  ตามรูปที่ 2.13 จะนำกระแส  $I$  และผลจากแรงลอเรนซ์จะถูกสร้างแทนที่

$$U_x(M) = \frac{\omega I \beta_T N_T K_T}{[Y_x(M)]^{1/2}} \left| \frac{\sin \theta'}{[Y_x(M)]^{1/2}} - e^{+j\phi} \frac{\cos \theta'}{[Y_z(M)]^{1/2}} \right| \quad (2.52)$$

และ

$$U_z(M) = \frac{\omega I \beta_T N_T K_T}{[Y_z(M)]^{1/2}} \left| \frac{\sin \theta'}{[Y_x(M)]^{1/2}} - e^{+j\phi} \frac{\cos \theta'}{[Y_z(M)]^{1/2}} \right| \quad (2.53)$$

เมื่อ  $\phi$  เป็นมุมเฟสระหว่าง  $U_z(M)$  และ  $U_x(M)$  และ  $M$  คือโหมดที่กำลังพิจารณา  $Y_x$  และ  $Y_z$  คือค่าความนำคลื่น ต้องคำนวณจากวัสดุแต่ละประเภท[36] ค่าทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์สำหรับเส้นวงเวียนขดลวด EMAT เป็นไปตามสมการต่อไปนี้

$$Z_i = 2B_R B_T N_R N_T K_R K_T \omega^2 W \left| \frac{\sin \theta'}{Y_x(M)^{1/2}} - e^{+j\phi} \frac{\cos \theta'}{Y_z(M)^{1/2}} \right| \quad (2.54)$$

เมื่อจำนวนรอบและความยาวมีผลต่อสนามแม่เหล็กในการรับและส่งคลื่น EMAT

### 2.7.3 แม่เหล็กถาวร EMAT

เหมือนกันกับขดลวด EMAT ที่แม่เหล็กถาวรจะสร้างแรงขับเป็นคาบที่ผิว จำเป็นต้องมีเฟสตรงกันกับโหนดคลื่นตามขวางแนวนอน (SH-wave) ดังแสดงในรูปที่ 2.15 แรงขับที่อยู่ในทิศทางของ  $y$  สำหรับการกระจายคลื่นไปตามทิศทาง  $x$  ทำให้ค่าความนำคลื่น  $Y_y$  สำหรับ SH-wave[36] ดังนี้

$$Y_y = \omega Z_{AS} V_S \beta t F(n) \quad (2.55)$$

เมื่อ  $F(n) = 1$  สำหรับ  $n = 0$  และ  $0.5$  สำหรับ  $n = 1, 2, 3, etc.$ , และ

$$\beta = \left[ k_s^2 - \left( \frac{n\pi}{t} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.56)$$

เมื่อ  $k_s = \omega / V_s$  สำหรับความหนาต่อ  $t$  และ

$$\beta = \left[ k_s^2 - \left( \frac{n\pi}{t} \right)^2 - \left( \frac{2m\pi}{c} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.57)$$

สำหรับความหนาต่อ  $t$  และเส้นรอบวง  $c$  ซึ่ง  $n = 0, 1, 2, etc.$  บอกถึงโหนดเส้นรอบวงสำหรับท่อและจาน ทำให้ค่าความถี่คutoff เพิ่มขึ้น สำหรับแบบจานมีสมการดังนี้

$$f_c(n) = nV_s / t \quad (2.58)$$

สมการการเคลื่อนที่คือ

$$U_y = \frac{F(n) I B_T N_T}{2 W V_S Z_{AS} t} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{\beta_n} \cos\left(\frac{n\pi z}{t}\right) e^{-j\beta_n |x|} \quad (2.59)$$

ทรานส์เฟอริมพีแดนซ์คือ

$$Z_i = \frac{2\omega D^2 B_R B_T M_R M_T N_R N_T}{\pi^2 Z_{AS} W V_S \beta t F(n)} \quad (2.60)$$

## 2.8 การพิจารณาลำคลื่นเสียงกระจาย

รูปแบบของพลังงานอิลาสติกที่แพร่กระจายจากแหล่งกำเนิด จะมีทั้งแบบลู่ออกและลู่ออก [46] ในพื้นที่ขนาดเล็ก แหล่งกำเนิดความถี่ต่ำจะลู่ออก เฉพาะสัญญาณสะท้อนกลับหรือสัญญาณส่งจะลดลงอย่างรวดเร็วตามระยะทาง แม้ว่าจะไม่การลดทอนหรือกระจายจากแหล่งอื่นๆ ความจำเป็นที่ต้องใช้ค่าที่สามารถวัดได้ทั้งหมดเพื่อเพิ่มระดับสัญญาณในระบบ EMAT การลดขนาดลำคลื่นกระจายหรือการสูญเสียจากแหล่งเลี้ยวเบนคือค่าสัมประสิทธิ์หนึ่งๆที่ผู้ออกแบบจะต้องกำหนดได้

รูปแบบของแรงขับต่อพื้นที่รูปสี่เหลี่ยมมุมฉากที่เกิดจากพื้นที่รับสัญญาณของขดลวดในรูปที่ 2.9(b) ค่าเลี้ยวเบนสามารถประมาณโดยสมการต่อไปนี้

$$\sin \theta_B = \frac{\lambda}{W} \quad (2.61)$$

เมื่อ  $\lambda$  คือความยาวคลื่นอิลาสติกที่แพร่กระจายและค่า  $W \leq L$  การเลี้ยวเบนของแหล่ง EMAT ถูกคำนวณโดย Budenkov[47] ถ้าแหล่งกำเนิดเป็น apodiz (หัวข้อ 2.11) จะใช้สมการที่ 2.61 ไม่ได้ ในบริเวณใกล้เคียงกับแหล่งกำเนิดสามารถหาได้จาก

$$z_F < \frac{4R_S^2 - \lambda^2}{4\lambda} \quad (2.62)$$

เฟสที่แปรผันตามหน้าคลื่น, สำหรับ  $Z > Z_F$  เฟสเกือบจะคงที่ตามหน้าคลื่น แม้มอมพลิจูดเปลี่ยนแปลงตามตำแหน่งในระนาบ xy ค่าสูญเสียจากการเลี้ยวเบนจะน้อยสำหรับระยะการกระจาย  $Z < Z_F$  (บริเวณใกล้เคียง) และพลังงานลู่ออกมากสำหรับ  $Z > Z_F$  (บริเวณที่ไกลออกไป) สำหรับ  $Z > 3Z_F$  ค่าสูญเสียจากการเลี้ยวเบนสามารถประมาณค่าได้จากสมการต่อไปนี้

$$A(DL) = 0.36(Z/Z_F)^2 \quad (2.63)$$

โดยปกติค่าที่มากกว่า  $5Z_F$  จากแหล่งกำเนิด ไม่สามารถใช้ได้ในทางปฏิบัติ ความหนาจะเป็นปัญหาเมื่อระยะของการกระจายระหว่างตัวรับและตัวส่งมากกว่า  $10Z_F$

## 2.9 การพิจารณาระยะเลื่อนอกของแม่เหล็กและขดลวด

EMAT ทุกประเภทและทรานส์ดิวเซอร์แบบไม่สัมผัสส่วนมากมีผลกระทบจากการเลื่อนอก ระยะเวลาออก ถ้า  $W$  คือความกว้างของแผ่นผิวกระแสเหนี่ยวนำทิศทางเดียว จากนั้นสัมประสิทธิ์การเลื่อนอกทิศทางเดียวสำหรับขดลวด จะอธิบายการลดลงของกระแสเหนี่ยวนำสามารถประมาณได้ดังนี้

$$F(CL) = A'(CL) \exp(-2\pi h/W) \quad (2.64)$$

เมื่อ  $h$  คือระยะการเลื่อนอก,  $A'(CL)$  คือประกอบด้วยค่าขดลวด apodization และผลกระทบอื่นๆ ถ้าสมมติว่า  $W \leq L$  ซึ่ง  $L$  คือความกว้างของบริเวณกระแสเหนี่ยวนำทิศทางเดียว (เพราะว่าการลู่ออกของกระแสเท่ากับศูนย์ กระแสในสายทั้งหมดต้องปิด  $WL$  เป็นพื้นที่ของแผ่นกระแสเหนี่ยวนำซึ่งประมาณว่ามีทิศทางเดียว) ปัจจัยที่เหมือนกันนี้สามารถใช้ได้กับขดลวดตัวรับและตัวส่ง  $W$  คือค่าประมาณรัศมีของขดลวด

การเลื่อนอกของขดลวดหลายรอบ ความลึกของเส้นลวดมีผล[16] สำหรับ EMAT 1 รอบต่อระยะการพัน  $2b$  แสดงดังรูปที่ 2.13 สัมประสิทธิ์การเคลื่อนอก(liftoff coefficient)มีดังนี้

$$F'(CML) = A'(CML) \exp(-\pi h/b) \quad (2.65)$$

โครงสร้างแม่เหล็กถาวรช่วงกว้าง  $2D$  (period  $2D$ ) สัมประสิทธิ์การเลื่อนออกประมาณค่าดังนี้

$$F'(MPPM) = A'(MPPM) \exp(-\pi h / D). \quad (2.66)$$

สำหรับในส่วนการรับและการส่ง EMAT

แม่เหล็กที่มีขนาดใหญ่, ขั้วแม่เหล็กผลิตสนามแม่เหล็กโดยจะมีค่าลดลงเป็นเชิงเส้นเมื่อมีระยะห่างจากขั้ว (ระยะเล็กน้อย) ที่ระยะ  $z$  จากผิวของแม่เหล็กถาวรทรงกระบอกที่รัศมี  $R_M = D_M / 2$  ค่าสนามแม่เหล็กประมาณได้ดังสมการนี้

$$B(z) \leq B(0)(1 - z / R_M) \quad (2.67)$$

ในเมื่อ  $z \leq 0.2R_M$  ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การเลื่อนแม่เหล็ก

$$F'(MS) \leq (1 - 2g / D_M) \quad (2.68)$$

เมื่อ  $g$  คือระยะที่แม่เหล็กเลื่อนออก แม่เหล็กสี่เหลี่ยมมีพฤติกรรมการเลื่อนออกคล้ายกัน  $D_M$  แทนความกว้างแม่เหล็ก

สนามแม่เหล็กลาด(field gradient)นี้ยากต่อการคำนวณ สำหรับแม่เหล็กรูปตัว C แต่สามารถคำนวณและวัดซึ่งประมาณได้ว่า  $B(z) = B(0)(1 - 2g / D_M)$  ดังนั้น

$$F'(ML) = (1 - 2g / G) \quad (2.69)$$

นี่คือประเภทของผลกระทบจากการเลื่อนออกที่มีผลต่อขอบเขตความลึกผิว โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าความนำไฟฟ้าของวัสดุเช่น สแตนเลสและไทเทเนียม ซึ่งอธิบายได้โดยแรงขับออสติกที่แพร่ไปยังความลึกผิว สำหรับการสร้างคลื่นใน EMAT อิทธิพลของขอบเขตความลึกผิวถูกนำมาพิจารณาโดยรวมค่าตัวแปร  $\beta_M$  ซึ่งหาได้จากสมการ 2.48-2.49 ถ้าสนามแม่เหล็กแปรผันกับค่าความลึกพื้นผิวจำเป็นต้องใช้ค่าเฉลี่ย  $B(z)$  ของความลึกผิว โดยเฉพาะแม่เหล็กถาวรและขดลวดวงเวียน EMAT และระยะเลื่อนออกจะมีผลต่อความลึกพื้นผิว สำหรับระยะเลื่อนออกจากผิวของวัตถุกับขดลวดในการเหนี่ยวนำกระแส นั้นสามารถเลื่อนได้ประมาณครึ่งหนึ่งความลึกในผิว

## 2.10 จุดโฟกัส

รายละเอียดในการอธิบายเฟสอะเรย์ (phased array) และจุดโฟกัสของ EMAT ในการทดลองพื้นฐาน EMAT สามารถสร้างจากรูปร่างของขดลวดและตำแหน่งของแท่งแม่เหล็กเพื่อรวมพลังงานออสติกในบางตำแหน่งที่อยู่ตรงข้ามกับ EMAT วิธีดังกล่าวนี้ จะใช้พื้นผิวเดียวกันและในเพลทโหมดดังแสดงในรูปที่ 2.16 การส่งผ่านแบบสะท้อนกลับ (pulse-echo) และแบบส่งผ่าน

สามารถใช้ได้ ค่าดังกล่าวสามารถหาได้จาก EMAT ที่มีค่า  $K = L/2b$  และค่า  $W = W_c$  (ดังแสดงในรูปที่ 2.16)

การประมาณค่าการกระจายของแอมพลิจูดด้วยค่าสะท้อนกลับเรขาคณิตมีความสำคัญในการคำนวณหาค่าความหนาแน่นของพลังงานอีลาสติกซึ่งจะขึ้นกับระยะห่างระหว่างตัวสะท้อนกับ EMAT (เป็นการคำนวณค่าการกระจายพลังงานในระยะไกลของทรานส์ดิวเซอร์ใดๆ ยกเว้นค่าความหนาแน่นพลังงานสูงสุดที่ตำแหน่งตรงกันข้าม EMAT)

## 2.11 Apodization

Apodization คือรูปร่างของฟังก์ชันแรง(forcing function)ที่สร้างโดยทรานส์ดิวเซอร์ใดๆ เพื่อที่จะสร้างรูปร่างของลำคลื่นตามที่ต้องการ ตัวอย่างเช่น การลดทอนการเกิด side-lobe จำนวนรอบและรูปร่างของขดลวด สำหรับเส้นวงเวียน EMAT คาบของสัญญาณจะเปลี่ยนแปลงง่ายที่สุด [48] และการเลือนออกจะเป็นอีกรูปแบบหนึ่งของ Apodization การเพิ่มของระยะเลือนออกจะลดทอนความแรงของกำลังขับตั้งแต่ค่าสูงสุดไปเป็นศูนย์ ในสถานการณ์แบบนี้การประมาณค่ารูปร่างลำคลื่นแบบ Gaussian สามารถใช้ได้จริงในรูปแบบการกระจายนี้

## 2.12 วงจรอิเล็กทรอนิกส์สำหรับ EMAT

การเริ่มทำ EMAT เป็นเรื่องยากที่จะทำให้ได้สัญญาณที่แรงพอ โดยการสร้างตัวส่งและตัวรับที่มีคุณลักษณะพิเศษ คือต้องคำนวณค่าทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์ตามที่ได้อธิบายมาแล้ว ซึ่งจะทำได้กระแสเหนี่ยวนำนั้นมาก EMAT ต้องมีความไวสูง ดังนั้นต้องมีจำนวนรอบขดลวดมากพอในการขับกระแส

แรงขับในกระแสเหนี่ยวนำจะเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบกำลังสอง ( $N_T$ ) ดังนั้นแรงดันขับต้องการรักษาค่ากระแสขับคงที่โดยทำการเพิ่มจากกำลังสองของจำนวนรอบขดลวด ค่าแรงดันขาเดรนสูงสุด ( $V_{max}$ ) โดยใช้ขั้วอุปกรณ์ประเภท metal oxide semiconductor (MOS) ได้ประมาณ 1000 V แรงดันเอาพุทที่นำมาใช้ (ค่ากระแสพัลส์จะลดลงในอุปกรณ์ที่แรงดันสูง) แรงดันขาออกมีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของแรงดันขาเดรนสูงสุด เพื่อป้องกันค่าแรงดันสไปค์ (voltage spikes) ในกรณีที่ใช้โหลดเป็นขดลวดกระแสขับสูงสุดจะมีค่าตรงกับค่า  $V_{max} \cdot N_T^{-2}$  เมื่อ  $N_T$  ถูกเลือกเพื่อให้ตรงกับคุณสมบัติของกระแสพัลส์สูงสุดของอุปกรณ์ MOS (หรืออุปกรณ์อื่นๆที่ต่อขนานกับ MOS)

ค่ากระแสพัลส์มีการเพิ่มขึ้นเมื่อ  $V_{max}$  ลดลง ดังนั้นค่าความไวไม่จำเป็นต้องลดลงด้วยการลดค่า  $N_T$  โดยกระแสสามารถเพิ่มขึ้น ในทางปฏิบัติกระแสสูงสุดประมาณ 50-100 A. และแรงดันตกคร่อมที่สายเคเบิลก็มีความสำคัญเหมือนกัน สำหรับกรณีทั่วไปที่ใช้สำหรับการส่ง EMAT ต้องออกแบบให้ดีที่สุด มีค่าระหว่าง 0.4-4 รอบต่อมิลลิเมตร (นั่นคือค่าเหนี่ยวนำ) ซึ่งอนุญาตให้กระแส

ไหลผ่านขดลวด 20-100 A. ถ้าคลื่นแยกต้องพิจารณาการคำนวณพื้นที่ของขดลวดในการใช้งาน หม้อแปลงที่ความต้านทานเข้ากัน (impedance-matching transformer) สามารถใช้เพื่อคำนวณการส่งผ่านกระแสจากตัวขับไปยัง EMAT (จะมีการสูญเสียจำนวนหนึ่งที่หม้อแปลง และอาจจะมีเสียงเกิดขึ้นที่ตัวหม้อแปลง)

การปรับแต่งการใช้งาน EMAT จะมีหลายวิธี โดยการออกแบบเฉพาะ วงจรขนาดเล็ก หลายๆ ส่วน (microcircuit chips) ซึ่งมีความสามารถที่จะสร้างวงจรส่วนขาที่มีขนาดเล็กมาก ประกอบเข้ากับตัว EMAT เพื่อป้องกันการสูญเสียจากสายเคเบิล ทำให้สามารถใช้ได้กับค่ากระแสที่สูง ค่าความจุของขาเกตกำลังต่ำที่ใช้ในเทคโนโลยี MOS (MOS) อาจจะใช้ได้กับกระแสพัลส์ ความเร็วสูงถึงหลายพันแอมป์ที่ขับผ่านขดลวด EMAT ที่ออกแบบมาพิเศษ ซึ่งวงจรควบคุมจะอยู่ห่างจากหัว EMAT

ตัวรับ EMAT ที่ออกแบบเฉพาะเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด

$$\oint E \cdot dl - \int \omega u \times B \cdot dl \quad (2.70)$$

ขดลวดตัวรับหัวข้อหลักในการออกแบบ EMAT คือ วิธีการออกแบบขดลวดมี ประสิทธิภาพมากที่สุดหรือวิธีการรวมประสิทธิภาพของการพัน 2 ขดลวดในด้านการรับการพัน ขดลวดมากยิ่งขึ้น (ถ้าบริเวณพื้นที่ขดลวดไม่ได้เกินจากบริเวณพื้นผิวที่ครอบคลุมโดยคลื่นออสติค) ซึ่งเกี่ยวกับข้อจำกัดของค่าความต้านทานและค่าความเก็บประจุ ค่าความต้านทานจะเพิ่มสัญญาณรบกวน การจำกัดค่าแบนด์วิดธ์สามารถแก้ไขปัญหานี้โดยการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าได้

ขดลวดตัวส่งสามารถปรับแต่งเพื่อลดค่าความต้านทานการส่ง ในช่วงความถี่ที่เฉพาะ (หรือขดลวดตัวรับสามารถปรับแต่งเพื่อเพิ่มค่าแรงดันขาออกไปยังวงจรเปิดในช่วงความถี่เฉพาะ) สำหรับการใช้งานในช่วงความถี่ที่แคบการปรับแต่งจะใช้บ่อย แต่โดยทั่วไปแล้ว EMAT แบบช่วงความถี่กว้าง เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้งานทั่วไป มีความจำเป็นเมื่อมีความต้องการปรับแต่งช่วงความถี่ให้ถูกต้อง การใช้งานบางอย่างของขดลวดวงเวียนและข้อดีของแม่เหล็กถาวร EMAT จากวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบนด์แคบ (narrowband) เมื่อมีความยาวคลื่นยาวหลายขนาด ปกติจะมีอยู่ในอุปกรณ์อะคูสติกแบนด์แคบ EMAT ความถี่กว้าง (broadband) สามารถมีฟังก์ชันคล้ายแบนด์แคบแบบพื้นฐาน โดยการปรับแต่งตัวขยายเพื่อจำกัดแบนด์วิดธ์ของระบบ

### 2.12.1 ตัวขับ EMAT

แหล่งกำเนิดกำลังชนิดความต้านทานขาออกต่ำใดๆ สามารถใช้ขับ EMAT สำหรับ EMAT แบนด์กว้าง ครึ่งหรือเต็มคาบของสัญญาณแรงดันสี่เหลี่ยม โดยให้ประสิทธิภาพดีที่สุด สำหรับแบนด์ที่แคบกว่าและมีหลายคาบ EMAT จะมีข้อจำกัดของตัวขับน้อยกว่า เพราะว่าจะใช้การปรับแต่งความต้านทานให้เข้ากัน (impedance-matching) ที่หม้อแปลง จากการทดลองกับขดลวด

EMAT RF จะให้การส่งผ่านกำลังที่ดีที่สุด (กระแสและแรงดัน) จากตัวขับและหลีกเลี่ยงความต้านทานกำลังสูง อุปกรณ์กำลังแบบมอสมีความเหมาะสมสำหรับขับทั้ง EMAT แรงดันต่ำและสูง สำหรับ EMAT เฉพาะการเพิ่มกำลังขาออกจากตัวขับด้วยการเพิ่มสัญญาณ การออกแบบที่ถูกต้องของ EMAT ตัวขับจะให้ค่าประสิทธิภาพที่ดีที่สุด

### 2.12.2 ตัวรับ EMAT: Broadband and Tuned

ตัวรับ EMAT ควรใช้สายทำสัญญาณสั้นที่สุด เพราะว่าจะเกิดค่าความเก็บประจุโดยจะไปจำกัดขนาดของสัญญาณ ซึ่งสามารถใช้สายที่มีขนาด ตัวรับ EMAT ส่วนใหญ่ความยาวของสายเป็นค่าที่สำคัญมาก เช่น ความยาวของสายจะจำกัดจำนวนของแรงดันขาขึ้น (step-up) (การเข้ากันของความต้านทานตัวรับ EMAT ) ที่สามารถใช้ระหว่างขดลวด EMAT และตัวขยายในระบบ EMAT แบบกว้าง สำหรับเหตุผลนี้การปฏิบัติทั่วไปจะวางตัวรับและตัวขยายใกล้กับ EMAT มากที่สุดหรือสร้างตัวขยายร่วมกับการประกอบตัว EMAT การใช้งาน EMAT จะกว้างมากขนาดของวงจรรวมจะมีขนาดของตัวขยายเล็กมากๆ ในการประกอบเข้ากับตัว EMAT

ในส่วนของการรับ EMAT ได้ใช้ขนาดของเส้นลวดที่มีขนาดเล็กที่สุดในความต้านทานหม้อแปลงเพื่อขยายแรงดันและรักษาค่าแบนด์วิดท์ให้คงที่

### 2.12.3 สัญญาณรบกวนใน EMAT

การรวมกันระหว่างสัญญาณรบกวนอิเล็กทรอนิกส์กับสัญญาณรบกวนอะคูสติกจะจำกัดประสิทธิภาพของ EMAT สัญญาณรบกวนอิเล็กทรอนิกส์แบบสุ่มจะแทนในรูปของค่าแรงดันของสัญญาณรบกวนเฉลี่ยกำลังสอง  $\bar{V}_n^2$  มีสมการคือ

$$\bar{V}_n^2 = 4kTR_e \Delta f \quad (2.71)$$

เมื่อ  $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ,  $T = 300\text{K}$ ,  $\Delta f$  คือแบนด์วิดท์สัญญาณรบกวนของระบบอิเล็กทรอนิกส์ และ  $R_e$  คือค่าสมมูลของความต้านทานสัญญาณรบกวนด้านวงจรรวมเข้า เช่น ตัวอย่าง แบนด์วิดท์ที่ใช้ 1 MHz มีค่าความต้านทานของขดลวดตัวรับเท่ากับ 50  $\Omega$  (จะเป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับขดลวด EMAT ที่มีค่าใกล้เคียงกับแม่เหล็กถาวรและฟิวโรโหะ) ตัวขยายที่มีสัญญาณรบกวนต่ำจะมีค่าความต้านทานสัญญาณรบกวนประมาณ 70  $\Omega$  สมมติว่าหม้อแปลงมีอัตราส่วนของความต้านทานเป็น 4:1 สามารถใช้เป็นขดลวดตัวรับ ตัวขยายจะเพิ่มค่าความต้านทานสัญญาณรบกวนทางด้านขาเข้าอีก 18  $\Omega$  ดังนั้นค่าผลรวมของความต้านทานสัญญาณรบกวนด้านขาเข้า  $R = 68 \Omega$  จากการรวมของสองค่าดังกล่าวจะทำให้แรงดันของสัญญาณรบกวน  $v = (\bar{V}_n^2)^{1/2}$  เมื่อ

$$\begin{aligned} v &= 0.13[\Delta f(\text{MHz}) \cdot R(\Omega)]^{1/2} \mu V \text{ rms} \\ &= 1.1 \mu V \text{ rms} = 3.0 \mu V_{p-p} \end{aligned} \quad (2.72)$$

ในทางปฏิบัติการลดสัญญาณรบกวนทำได้ยากในวงจรตัวรับ จะมีค่าต่ำกว่า 2-4  $\mu V_{p-p}$  ถึงแม้ว่าจะมีการป้องกันด้วยการหุ้ม(shielding) และต่อกราวด์(grounding) แม้ว่าโดยทั่วไปจะสามารถรักษาค่าสัญญาณรบกวนทางด้านขาเข้าในน้อยกว่า 10  $\mu V_{p-p}$  (เมื่ออ้างอิงถึงสัญญาณขาเข้า); 3-5  $\mu V_{p-p}$  บางครั้งก็สามารถใช้ได้ ในแบนด์กว้างในการใช้งานจริง (ระดับสัญญาณรบกวนที่ต่ำกว่าสามารถใช้ได้ในสภาพแวดล้อมในห้องทดลองหรือการใช้ในแบนด์วิดท์ที่แคบกว่า) สัญญาณรบกวนทางด้านขาเข้าควรระวังได้ด้วยระบบที่พร้อมทำงานแต่ไม่มีกระแสในขดลวดขับ สำหรับในกรณีอื่นอาจได้รับค่าที่ผิดพลาดเล็กน้อย

สัญญาณรบกวนอะคูสติกประมาณค่าได้ยากกว่ามาก หากระบบมีสองแหล่ง (1) แบบมีเม็ดกระจาย (grain scattering) หรือมีการสะท้อนกลับหลายครั้งในวัตถุที่ทำการวัดอยู่ (2) การเกิดคลื่นอิลาสติกใน EMAT โดยกระแสตัวส่ง, ในเวลาต่อมาจะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันในขดลวดตัวรับ การออกแบบ EMAT ที่เหมาะสมจะทำให้เกิดสัญญาณรบกวนที่มีขนาดเล็กที่สุด คือแหล่งของสัญญาณรบกวนที่จำกัดค่า SNR ในระบบ EMAT เพราะว่าสัญญาณรบกวนอิเล็กทรอนิกส์แบบสุ่มสามารถลดลงได้จากค่าเฉลี่ยเชิงเวลา (temporal averaging)

#### 2.12.4 EMAT Impedance-Matching Transformers

สำหรับงานทางด้าน RF ใช้หม้อแปลง ซึ่งเรียกว่า Baluns หรือหม้อแปลงของสายส่ง ซึ่งจะพันป็นวงด้วยสายเคเบิล (ขนาดของสายมีค่าความต้านทานที่ทำให้มีแรงดันตกคร่อมที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับแรงดันที่ตกคร่อมขดลวด EMAT ถ้าหากว่าหม้อแปลงถูกใช้เป็นตัวขับ) โดยมีประเภทของหม้อแปลง balanced-to-unbalanced, unbalanced-to-unbalanced และ balanced-to-balanced บางครั้งหม้อแปลงสามารถต่อแบบ cascade เพื่อจำกัดค่าความจุจากขดลวดหม้อแปลง หรืออาจต่อแบบ shunt เพื่อจำกัดค่าเหนี่ยวนำของขดลวดและค่าความจุทางด้านขาเข้าขาออก

### 2.13 การคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด EMAT

การประมาณค่าเหนี่ยวนำของขดลวด EMAT มีความจำเป็นมาก เพื่อให้รู้ค่าที่เหมาะสมในการทำ impedance-matching วิธีหนึ่งคือการวัดหาค่าเหนี่ยวนำของขดลวด EMAT นั่นคือค่าเหนี่ยวนำใน free-space ซึ่งเป็นค่าเหนี่ยวนำของขดลวดเปล่าโดยปราศจากโลหะหรือวัสดุแม่เหล็ก สำหรับขดลวดที่เป็นแบบ spiral, planar spiral หรือขดลวดในสองมิติแบบอื่นๆ จะใช้กฎของ thumb ดังสมการต่อไปนี้

$$L = 0.3N^2(A_c)^{1/2} \mu H \quad (2.73)$$

เมื่อ  $A_c$  คือพื้นที่รับสัญญาณของขดลวดมีหน่วยเป็นตารางเมตร และ  $N$  เป็นจำนวนรอบ

เมื่อวางไว้ใกล้วัสดุแม่เหล็กค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวด EMAT จะมีค่าประมาณเท่ากับ free-space หรือมากกว่าประมาณ 30% ซึ่งจะขึ้นกับระยะการห่างถ้าหากวางใกล้โลหะที่ไม่เป็นแม่เหล็ก ค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวด EMAT จะลดลงด้วยค่าสัมประสิทธิ์ในช่วง 1.5-3 ขึ้นกับระยะห่างด้วย ที่ระยะการเลือนน้อยๆ ค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดจะประมาณเท่ากับครึ่งหนึ่งของค่าความต้านทาน และครึ่งหนึ่งของค่าความเหนี่ยวนำ

## 2.14 การสร้างคลื่นโดยใช้สมการคลื่น

ในหัวข้อนี้นำเสนอ การสร้างคลื่นโดยใช้สมการคลื่น เนื่องจากคลื่นอัลตราโซนิคนั้นถือเป็นแหล่งกำเนิดประเภทหนึ่งที่มีผลกระทบจากการเลี้ยวเบนของคลื่นเมื่อคลื่นเดินทางผ่านรอยต่อใดๆ ระหว่างตัวกลาง เนื่องจากเสมือนเป็นการประมาณการเดินทางของคลื่นอัลตราโซนิคว่าเป็นเส้นตรง ซึ่งต่างจากความเป็นจริงที่เกิดผลการเลี้ยวเบนกับคลื่นอัลตราโซนิค

### สมการคลื่น (Wave Equation)

คลื่นต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นคลื่นเสียง หรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านั้นสามารถที่จะเขียนแทนได้ด้วยสมการที่ 2.74

$$\nabla^2 u(\vec{r}, t) - \frac{1}{c^2} \frac{\nabla^2}{dt^2} u(\vec{r}, t) = 0 \quad (2.74)$$

โดยที่  $u(\vec{r}, t)$  แทนค่าขนาดของสนามคลื่นที่ตำแหน่ง  $\vec{r}$  ณ เวลา  $t$  ใดๆ  $c$  แทนค่าของความเร็วในการเคลื่อนที่ของคลื่น ซึ่งจากสมการที่ 2.74 นั้นจะพบว่ามีความซับซ้อนเกินกว่าที่จำเป็นเนื่องจากโดยส่วนมากแล้วนั้น เราจะพิจารณาความถี่มูลฐานค่าใดค่าหนึ่งจากการทำการแปลงฟูเรียร์ ณ. ช่วงเวลาใดเวลาหนึ่ง ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการแทนสนาม  $u(\vec{r}, t)$  ที่ความถี่  $\omega$  ค่าใดค่าหนึ่งได้เป็น

$$[\nabla^2 + k^2(\vec{r})]u(\vec{r}, t) = 0 \quad (2.75)$$

เมื่อค่า  $k(\vec{r})$  นั้นแทน หมายเลขคลื่น (Wave number) ของคลื่นที่กำลังพิจารณา ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$k(\vec{r}) = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{c} \quad (2.76)$$

โดยค่า  $\lambda$  คือค่าความยาวคลื่น ซึ่งในการพิจารณานั้นจะพิจารณาที่ความถี่ค่าใดค่าหนึ่ง ทำให้อาจกล่าวได้ว่าเป็นส่วนจริง (Real Part) ของ  $u(\vec{r})e^{-j\omega t}$  โดยจะเห็นได้ว่าสนามคลื่นนั้นแปรตามเวลา ดังนั้นที่เวลาใดเวลาหนึ่งจะสามารถเขียนสมการที่ 2.75 ใหม่ได้เป็น

$$(\nabla^2 + k^2(\vec{r}))u(\vec{r}) = 0 \quad (2.77)$$

ค่าของ  $u(\vec{r})$  สามารถแทนได้ด้วยค่าของความดันคลื่นที่ตำแหน่ง  $\vec{r}$  และสำหรับค่าความยาวคลื่นซึ่งเป็นค่าคงที่นั้นหากเขียนให้อยู่ในรูปที่ง่ายขึ้น ( $k(\vec{r}) = k_0$ ) จะทำให้สมการที่ 2.77 กลายเป็น

$$(\nabla^2 + k_0^2)u(\vec{r}) = 0 \quad (2.78)$$

เมื่อแทนค่าของตัวกระทำเกรเดียน ( $\nabla$ ; Gradient operator) ลงในสมการที่ 2.78 ซึ่งเรียกสมการนี้ว่า สมการ Helmholtz จะจัดรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$\frac{\partial^2 u(\vec{r})}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u(\vec{r})}{\partial y^2} + k_0^2 u(\vec{r}) = 0 \quad (2.79)$$

โดยที่

$$u(\vec{r}) = e^{j\vec{k} \cdot \vec{r}} \quad (2.80)$$

## 2.15 การออกแบบ EMAT ในส่วนการทดลองและการจำลอง

สำหรับการออกแบบ Electromagnetic Acoustic Transducer (EMAT) ซึ่งใช้หลักการของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ในการจำลอง (Simulation) เราใช้โปรแกรม COMSOL Multi physics ในการออกแบบและทดลองผลที่ได้ ซึ่งจะประกอบไปด้วยส่วนต่างๆดังนี้

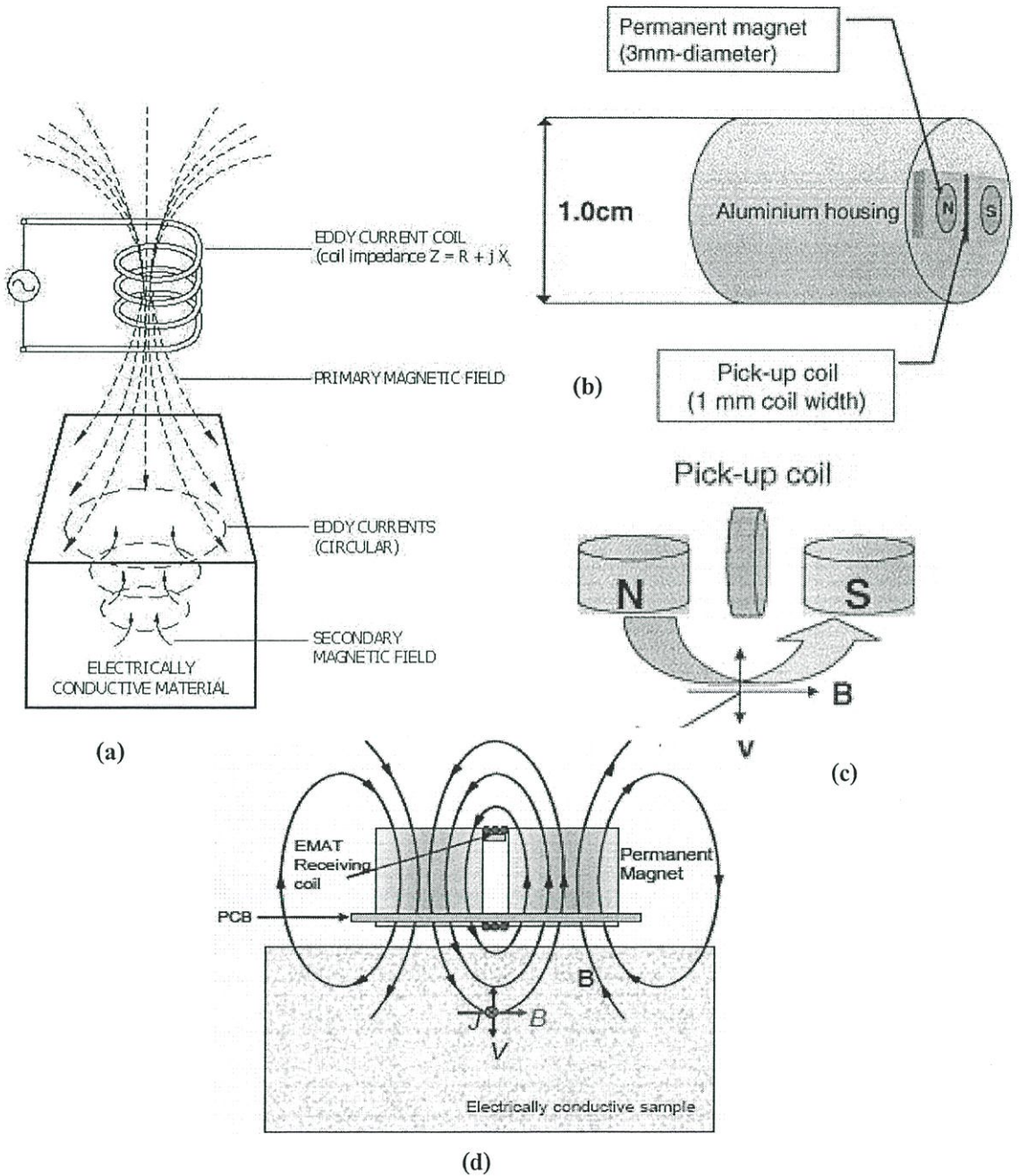
- 1) แม่เหล็กถาวรสองชิ้น มีไว้เพื่อใช้สำหรับสร้างสนามแม่เหล็กออกมา และสามารถกำหนดค่าเมกเนโตเซชันของตัวแม่เหล็กได้ โดยสนามแม่เหล็กจะปล่อยค่าเป็นลักษณะเป็นวงโคจรรอบ
- 2) ขดลวดที่ใช้ในการเหนี่ยวนำค่าของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากค่ากระแสเหนี่ยวนำอยู่ระหว่างแม่เหล็ก
- 3) สสารที่ใช้เป็นตัวกลางในการส่งผ่านสัญญาณอัลตราโซนิก ซึ่งในการวิจัยนี้เราใช้เป็นอลูมิเนียม

ในส่วนของการละเอียดขั้นตอนของการทดลองและรูปขนาดของโครงสร้าง EMAT ที่ทำการจำลองแล้วนั้นอยู่ในบทที่ 3

โดยในการทดลองจะแบ่งเป็นสองส่วน ดังนี้

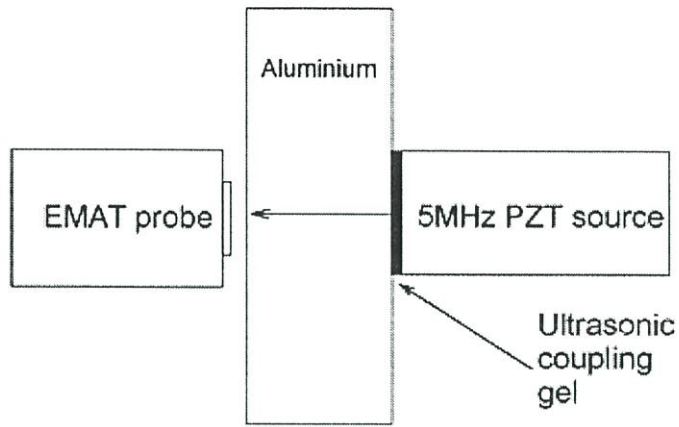
ในส่วนแรกจะเป็นการศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อการตอบสนองสัญญาณที่ดี และได้ตั้งสมมติฐานปัจจัยต่างๆที่ส่งผลต่อสัญญาณอัลตราโซนิก ดังต่อไปนี้ 1) ความแรงของสนามแม่เหล็กซึ่งเกิดจากแม่เหล็ก 2) จำนวนรอบของขดลวด ซึ่งในการจำลองการทดลองนี้เรากำหนดขนาดของพื้นที่รับสัญญาณของขดลวด 3) ระยะห่างระหว่างตัวรับสัญญาณกับอลูมิเนียม และผลการตอบสนองเชิงความถี่

ส่วนที่สองจะทำการสร้างในส่วนของฮาร์ดแวร์และทำการวัดสัญญาณอัลตราโซนิก โดยวัดที่ระยะห่างระหว่างตัวรับสัญญาณ (EMAT) กับอลูมิเนียม นำผลมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลอง (Simulation)



รูปที่ 2.22 การออกแบบ โครงสร้าง EMAT

- (a) โหมดการสร้างสัญญาณอัลตราโซนิก
- (b) โพรบ EMAT ที่ออกแบบ
- (c) ทิศทางสนามแม่เหล็ก ความเร็ว และกระแสที่พิจารณา
- (d) โหมดการรับสัญญาณอัลตราโซนิกที่ใช้ในการจำลอง Finite element



รูปที่ 2.23 รูปแบบสำหรับการทดลอง EMAT

## 2.16 การใช้งานของ EMAT ในด้านต่างๆ

### 2.16.1 การวัดความหนาด้วยอัลตราโซนิก

การวัดความหนาด้วยอัลตราโซนิกแบบระบบไม่ทำลาย(nondestructive) เป็นที่ใช้งานกันอย่างกว้างขวาง สำหรับการวัดวัตถุจากข้างหนึ่ง ซึ่งต้นกำเนิดมาจากหลักการของเครื่องโซนาร์ ในช่วงปี ค.ศ.1940 โดยเครื่องมือที่ใช้งานนั้นเป็นเครื่องมือที่มีขนาดเล็กใช้งานสะดวกหลากหลาย และเริ่มเป็นที่นิยมในปี ค.ศ. 1970 หลังจากเทคโนโลยีไมโครโปรเซสเซอร์ซึ่งเป็นเครื่องมือขนาดเล็กซึ่งง่ายต่อการใช้งาน

#### 2.16.1.1 วัตถุที่สามารถวัดได้

วัตถุทางด้านวิศวกรรมสามารถวัดความหนาได้โดยอัลตราโซนิก เช่น โลหะ, พลาสติก, สารประกอบ, ไฟเบอร์กลาส, กระเบื้องเซรามิกและแก้ว ไม่ว่าจะเป็นการวัดพลาสติกที่เป็นระดับชั้นหรือม้วนโลหะ การวัดระดับชั้นของเหลวหรือวัสดุทางด้านชีวภาพก็สามารถทำการวัดได้ ซึ่งเป็นมาตรฐานของการวัดและเป็นระบบไม่ทำลายอย่างสมบูรณ์ คือไม่มีการตัดการแบ่งวัสดุ วัสดุที่ไม่เหมาะสมสำหรับการวัดนั้นได้แก่ ไม้, กระดาษ, คอนกรีตและสิ่งที่เป็นโฟม

#### 2.16.1.2 คลื่นอัลตราโซนิกสามารถวัดความหนาได้อย่างไร

พลังงานเสียงสามารถเกิดสเปกตรัมความถี่กว้าง ซึ่งเสียงที่สามารถได้ยินได้อยู่ในช่วงที่ความถี่ต่ำกว่า 20 กิโลเฮิร์ต อัลตราโซนิกเป็นคลื่นเสียงความถี่สูงเกินกว่าระดับที่มนุษย์จะได้ยิน โดยคลื่นอัลตราโซนิกที่ใช้สำหรับการทดสอบนั้นอยู่ในช่วงความถี่ระหว่าง 500 กิโลเฮิร์ตถึง 20 เมกกะเฮิร์ต ผู้เชี่ยวชาญการใช้งานสามารถลดความถี่ได้ถึง 50 กิโลเฮิร์ตหรือต่ำกว่าหรือมากกว่า 225 เมกกะเฮิร์ต ไม่ว่าจะเป็ความถี่อะไรก็ตาม พลังงานเสียงจะต้องมีการสั้นโดยอาศัยตัวกลาง เช่น อากาศ, น้ำหรือโลหะ ซึ่งเป็นไปตามกฎของฟิสิกส์คลื่น สำหรับการวัดขนาดโดยใช้คลื่น

อัลตราโซนิกนั้นจะมีค่าที่แม่นยำมากเมื่อวัดที่ใกล้ ซึ่งเกิดจากคลื่นเสียงที่เกิดจากอัลตราโซนิกทรานส์ดีวเซอร์เดินทางไปยังวัตถุที่ทดสอบ และคลื่นเสียงเกิดการสะท้อนกลับจากขอบเขตของวัตถุที่ต่างชนิดกันโดยใช้โหมดการสะท้อนกลับของพัลส์ จากเวลาในการสะท้อนกลับของคลื่นเสียงจากผนังข้างหลังของวัตถุที่ทดสอบ

หลักการของทรานส์ดีวเซอร์แบบเปียโซอิเล็กทริกจะใช้การกระตุ้นจากพัลส์สัญญาณขนาดเล็กทำให้เกิดคลื่นอัลตราโซนิก คลื่นเสียงที่ใช้ในการทดสอบวัตถุจะส่งคลื่นไปยังขอบเขตแล้วสะท้อนกลับมายังทรานส์ดีวเซอร์เวลาในการสะท้อนกลับนั้นมีหน่วยเป็นไมโครวินาที โดยเปลี่ยนจากพลังงานเสียงเป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งขนาดความกว้างของวัตถุสามารถใช้โปรแกรมในการคำนวณได้โดยดูจากความเร็วเสียงในวัตถุนั้นๆ

$$T = (V) \times (t/2) \quad (2.81)$$

เมื่อ  $T$  คือ ความหนาของวัตถุ  
 $V$  คือ ความเร็วเสียงในวัตถุ  
 $t$  คือ เวลาที่คลื่นเดินทางไป-กลับ

ตัวแปรสำคัญในการคำนวณค่าความหนาวัตถุคือความเร็วเสียงในวัตถุ ความเร็วเสียงเป็นค่าเฉพาะในวัตถุแต่ละชนิดคือเมื่อวัตถุมีความแข็งมากความเร็วเสียงก็จะมากขึ้น ในทางตรงข้ามวัตถุที่มีความอ่อนนุ่มมากความเร็วเสียงก็จะน้อยลง และอุณหภูมิก็มีผลกับความเร็วเสียงด้วย ดังนั้นการวัดค่าความหนาของวัตถุโดยใช้อัลตราโซนิกจำเป็นต้องรู้ความเร็วของเสียงในวัตถุก่อนที่จะทำการวัดเพื่อความถูกต้องแม่นยำ

คลื่นเสียงที่มีความถี่มากกว่า 1 เมกะเฮิรตซ์จะไม่สามารถเดินทางในอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นจึงต้องใช้ของเหลวในการเชื่อมต่อสัญญาณระหว่างทรานส์ดีวเซอร์กับวัตถุ เช่น กลีเซอริน, น้ำ, น้ำมันและเจล โดยใช้ปริมาณเล็กน้อยในการเติมช่องว่างอากาศ

มีสามวิธีพื้นฐานในการวัดค่าความหนาโดยดูระยะระหว่างเวลาของคลื่นเสียงที่ส่งผ่านวัตถุ ดังรูปที่ 2.25 มีดังนี้

- วิธีที่ 1 เป็นวิธีที่สามัญมากที่สุดคือวัดพัลส์ระยะห่างของเวลาระหว่างคลื่นเสียงกำเนิดกับคลื่นที่สะท้อนกลับลูกแรก และมีผลต่างของระยะห่างเล็กน้อยจากค่าความผิดพลาดของเครื่องมือ
- วิธีที่ 2 การวัดช่วงเวลาเสียงสะท้อนกลับจากพื้นผิวแรกของวัตถุกับพื้นผิวหลัง
- วิธีที่ 3 การวัดช่วงเวลาระหว่างเสียงสะท้อนสองลำดับหลัง

### 2.16.1.3 ชนิดของทรานส์ดิวเซอร์

การเชื่อมต่อทรานส์ดิวเซอร์: การเชื่อมต่อทรานส์ดิวเซอร์สามารถเชื่อมต่อโดยตรงกับวัตถุที่ทำทดสอบ ซึ่งทำได้โดยง่าย ๆ และเป็นทางเลือกลำดับแรกๆ ในการวัดขนาดความหนาของวัตถุทั่วไปหรือวัตถุที่เป็นสนิม

เวลาหน่วงทรานส์ดิวเซอร์: เวลาหน่วงทรานส์ดิวเซอร์ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายๆอย่าง ซึ่งมีผลอย่างมากต่อการวัดวัตถุที่มีลักษณะบาง สำคัญต่อการดูแลคลื่นสะท้อนกลับ และสามารถใช้ได้กับฉนวนอุณหภูมิสูง ป้องกันความร้อนจากการสัมผัสโดยตรง เวลาหน่วงสามารถทำให้เห็นรูปร่างหรือโครงสร้างช่องว่างได้อย่างชัดเจน

การใช้ทรานส์ดิวเซอร์ในน้ำ: ทรานส์ดิวเซอร์ส่งพลังงานเสียงผ่านน้ำในการวัดวัตถุสามารถใช้วัดเมื่อวัตถุเคลื่อนที่ โดยการสแกนวัตถุที่ลักษณะกลม, เป็นร่องหรือเป็นช่อง

ทรานส์ดิวเซอร์คู่: ทรานส์ดิวเซอร์คู่ใช้ในการวัดสิ่งที่มีรูขระแบบดั้งเดิม ซึ่งเป็นการส่งและรับคนละฝั่งทำให้ใช้พลังงานในการส่งน้อย ความแม่นยำของการใช้ทรานส์ดิวเซอร์คู่ขึ้นอยู่กับประเภทของทรานส์ดิวเซอร์ และใช้งานได้ดีเมื่อวัดวัตถุที่เป็นสนิม

| Precision Ultrasonic Gauging Techniques Classified by the Echoes Used to Make the Time Interval Measurement |          |                             |  |                                   |
|---|----------|-----------------------------|--|-----------------------------------|
| Mode  | Waveform | Applicable Transducer Types | Applicable Range of Thickness Measurement (Steel)* | Approximate Accuracy Limits       |
| 1   |          | Direct Contact              | 0.3 mm to 2.5 M<br>0.012 in to 100 in              | $\pm 0.01$ mm<br>$\pm 0.001$ in   |
| 2   |          | Delay Line Immersion        | 0.5 mm to 10 cm<br>0.02 in to 4 in                 | $\pm 0.002$ mm<br>$\pm 0.0001$ in |
| 3   |          | Delay Line Immersion        | 0.1mm to 4 cm<br>0.004 in to 1.5 in                | $\pm 0.002$ mm<br>$\pm 0.0001$ in |

รูปที่ 2.24 วิธีการวัดขนาดของวัตถุ

#### 2.16.1.4 สิ่งพิจารณา

ในการใช้อัลตราโซนิกในการหาขนาดวัตถุ จะขึ้นอยู่กับชนิดวัตถุที่ใช้วัด ขอบเขตความหนา, รูปทรงเรขาคณิต, อุณหภูมิ, ความถูกต้องแม่นยำ และเงื่อนไขอื่นๆ ที่เป็นปัจจัยหลักนำเสนออยู่ด้านล่าง

ชนิดวัตถุที่ต้องการวัด : ชนิดของวัตถุและความหนาที่จะทำการวัดเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุด โดยส่วนมากเป็นวัตถุทางด้านวิศวกรรมสามัญส่วนใหญ่เป็น โลหะ, เซรามิก, แก้ว ซึ่งคลื่นอัลตราโซนิกส่งผ่านได้อย่างมีประสิทธิภาพและง่ายต่อการวัดความหนา พลาสติกส่วนมากสามารถดูดซึมพลังงานอัลตราโซนิกได้รวดเร็วในขอบเขตความหนาที่จำกัด การใช้งานที่ง่ายนี้เองทำให้โรงงานส่วนมากนิยมใช้งาน ยาง, ไฟเบอร์กลาส และสารประกอบมากมายที่มีความหนาแน่นน้อยสามารถวัดขนาดได้ดีเมื่อความถี่ต่ำ

ความหนาของวัตถุ: ขอบเขตความหนาวัตถุสามารถบอกขนาดและประเภทของทรานส์ดิวเซอร์ที่เลือก โดยทั่วไปวัตถุที่บางจะต้องวัดด้วยความถี่สูงและวัตถุที่หนาต้องวัดด้วยความถี่ต่ำ ระยะเวลาจะใช้กับวัตถุที่บางเสมอ แม้ว่าเวลาหน่วง (จุ่มในน้ำ) ทรานส์ดิวเซอร์จะถูกยับยั้งในการวัดความหนาเนื่องจากเสียงสะท้อนหลายเสียงจากหลากหลายวัตถุ

รูปทรงเรขาคณิต: เมื่อวัตถุมีความโค้งมากๆ ประสิทธิภาพการเชื่อมต่อวัตถุกับทรานส์ดิวเซอร์จะลดลง เมื่อรัศมีความโค้งมากขึ้นขนาดทรานส์ดิวเซอร์ควรลดลง หรือการวัดวัตถุที่มีรัศมีความโค้งอาจไม่ต้องสัมผัสกับวัตถุโดยใช้การจุ่มลงน้ำซึ่งเป็นการเชื่อมต่อเสียง หรือวัดวัตถุที่เป็นร่องหรือโพรงช่องได้ด้วย

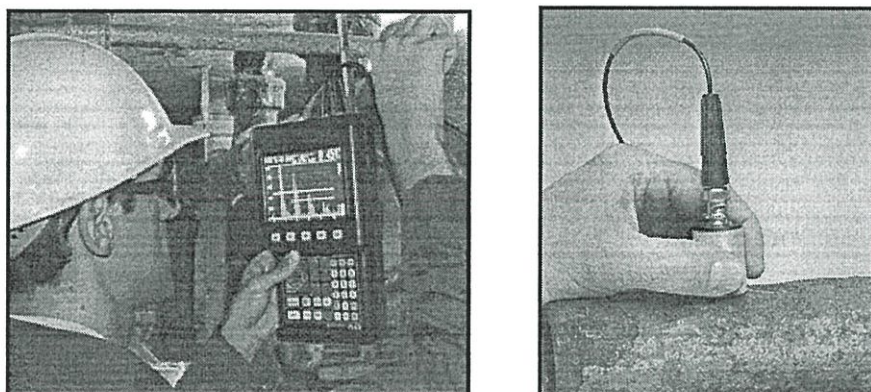
อุณหภูมิ: การสัมผัสกับวัตถุที่วัดโดยทรานส์ดิวเซอร์สามารถวัดที่อุณหภูมิประมาณ  $125^{\circ}F$  หรือ  $50^{\circ}C$  การสัมผัสกับวัตถุที่ร้อนกว่าอาจทำให้เกิดความเสียหาย ซึ่งในกรณีนี้อาจวัดโดยใช้การจุ่มน้ำ

เฟสตรงข้าม: ในกรณีที่วัตถุมีความต้านทานทางเสียงต่ำ (มีหลายความหนาแน่น) ติดกับวัตถุที่มีความต้านทานทางเสียงสูง ตัวอย่างเช่น พลาสติก, ยางลบและแก้วติดอยู่กับเหล็กกล้า หรือ โลหะโพลีเมอร์ติดกับไฟเบอร์กลาส ในกรณีนี้เสียงสะท้อนจากผิวระหว่างสองวัตถุจะเกิดการกลับเฟสซึ่งเกิดจากขอบเขตของอากาศ เงื่อนไขนี้สามารถทำให้เหมาะสมได้โดยการเปลี่ยนแปลงตั้งค่าของเครื่องมือ ถ้าไม่ปรับค่าการอ่านอาจไม่เที่ยงตรง

ความถูกต้องแม่นยำ: มีปัจจัยมากมายที่ส่งผลกระทบต่อความถูกต้องแม่นยำในการวัด เช่น เครื่องวัดต้องมีความถูกต้อง, ความบริสุทธิ์ของวัตถุที่วัด, ค่าการกระจายและการลดทอนของเสียง, ผิวสัมผัสวัตถุที่วัดหยาบ, ความโค้งผิวซึ่งยากต่อการเชื่อมต่อ รวมทั้งพื้นหลังที่ไม่ขนาน ทั้งหมดเป็นปัจจัยที่ควรพิจารณา ระบบการวัดที่ถูกต้องควรมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 0.001 นิ้ว หรือ 0.01 มิลลิเมตร ความแม่นยำในการวัดจะถูกอ้างอิงจากมาตรฐานการวัด โดยทั่วไป การหาขนาดโดยใช้การจุ่มน้ำในวิธีที่ 3 สามารถหาขนาดความหนาได้ถูกต้องแม่นยำที่สุด

### 2.16.2 การหารอยแตกร้าวโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิก

การใช้งานของอัลตราโซนิกทดสอบรอยแตกร้าวในอุตสาหกรรม เริ่มตั้งแต่ปี 1940 โดยใช้หลักการแพร่ของคลื่นเสียงในวัตถุซึ่งเป็นกฎทางฟิสิกส์ ทำให้พบรอยแตกร้าวที่มองไม่เห็น, ช่องว่าง, รุพ-run, ความไม่สม่ำเสมอภายในโลหะ, สารประกอบ, พลาสติกและเซรามิก คลื่นอัลตราโซนิกจะสะท้อนกลับจากรอยร้าวภายในทำให้สามารถรู้ตำแหน่งได้ ลักษณะเด่นของเสียงสะท้อนสามารถแสดงและบันทึกจากเครื่องมือพกพา เป็นการทดสอบอัลตราโซนิกแบบไม่ทำลาย (nondestructive) และปลอดภัยโดยสมบูรณ์ เป็นวิธีทดสอบที่มีการยอมรับมากมายในอุตสาหกรรม การผลิต อุตสาหกรรมบริการ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้งานในอุตสาหกรรมการเชื่อมและโครงสร้างโลหะ ในหัวข้อนี้จะแสดงทฤษฎีสั้นๆและวิธีการหารอยร้าวโดยอัลตราโซนิก



รูปที่ 2.25 การใช้งานในการหารอยแตกร้าว

#### 2.16.2.1 ทฤษฎีพื้นฐาน

คลื่นเสียงเกิดจากระบบการสั่นอนุภาคทางกลผ่านตัวกลาง เช่น ของแข็ง, น้ำ, อากาศ โดยจะมีความเร็วและทิศทางที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อไรที่เจอขอบเขตที่แตกต่างของตัวกลางจะถูกสะท้อนกลับและส่งผ่านซึ่งเป็นกฎทางฟิสิกส์ที่ใช้ในการหารอยแตกร้าว

ความถี่: คลื่นเสียงทั้งหมดมีความถี่จำเพาะหรือการสั่นเป็นรอบต่อวินาทีซึ่งอยู่ในระดับเสียงที่ได้ยิน ซึ่งมนุษย์สามารถได้ยินเสียงที่ระดับความถี่มากที่สุดที่ 20 KHz ความถี่ของคลื่นอัลตราโซนิกที่ใช้ในการหารอยร้าวจะอยู่ในช่วงความถี่ 0.5 MHz ถึง 10 MHz ซึ่งความถี่ระดับเมกะเฮิรต์นี้ไม่สามารถเดินทางผ่านอากาศหรือก๊าซต่างๆได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่มันสามารถเดินทางผ่านของเหลวหรือวัตถุทางด้านวิศวกรรมพื้นฐานได้

ความเร็ว: ความเร็วของคลื่นเสียงสามารถเปลี่ยนแปลงตามลักษณะของตัวกลางที่เดินทางผ่าน ซึ่งเป็นผลกระทบจากความหนาแน่นและความยืดหยุ่นของตัวกลาง ผลความแตกต่างตัวกลางนี้เอง ทำให้ความเร็วเสียงแตกต่างกัน

ความยาวคลื่น: ประเภทต่างๆของคลื่นขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นซึ่งก็ระยะห่างระหว่างจุดสองจุดที่เหมือนกัน(ต้นคลื่นถึงต้นคลื่น, ท้องคลื่นถึงท้องคลื่น) เคลื่อนที่ครบรอบ ความยาวคลื่นสัมพันธ์กับความถี่และความเร็วคลื่นตามสมการอย่างง่ายคือ

$$\lambda = c / f \quad (2.82)$$

เมื่อ  $\lambda$  คือ ความยาวคลื่น  
 $c$  คือ ความเร็วคลื่น  
 $f$  คือ ความถี่

ความยาวคลื่นเป็นปัจจัยที่จำกัดซึ่งสามารถควบคุมได้ ทั้งหมดเป็นผลจากคุณสมบัติของคลื่น ในการหารอยรั่วโดยอัลตราโซนิกจะมีการตอบสนองที่สำหรับรอยรั่วที่มีขนาดเล็กกว่าครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นซึ่งก็ไม่สามารถเห็นได้ด้วยตาเปล่า ในการหาขนาดความหนาโดยอัลตราโซนิกตามทฤษฎีคือมีความหนาน้อยที่สุดที่ 1 ความยาวคลื่น

วิธีการแพร่: คลื่นเสียงในของแข็งมีวิธีที่หลากหลายในการแพร่ซึ่งเป็นประเภทของการเคลื่อนที่ คลื่นตามยาว (Longitudinal waves) และคลื่นตามขวาง (Shear waves) เป็นวิธีการเคลื่อนที่ของคลื่นพื้นฐานที่ใช้ในการหารอยรั่ว คลื่นผิว (Surface waves) หรือคลื่นจาน (Plate waves) จะถูกนำมาใช้ด้วย

- คลื่นตามยาวหรือคลื่นบีบอัดคือ การที่อนุภาคเคลื่อนที่ตามการเคลื่อนที่ของคลื่นจากแหล่งกำเนิด เช่น เสียงที่ได้ยินเป็นคลื่นตามยาว
- คลื่นตามขวางคือ การที่อนุภาคเคลื่อนที่ตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของคลื่น
- คลื่นผิวหรือรังสีคลื่น มีการเคลื่อนไหวของอนุภาคเป็นวงรี เคลื่อนที่ข้ามผิวของวัตถุมีระดับประมาณ 1 ความยาวคลื่น
- คลื่นจานเป็นคลื่นที่มีการสั่นซับซ้อนมีขนาดเล็กใช้ในการหาความหนา

คลื่นเสียงอาจเปลี่ยนจากรูปแบบหนึ่งเป็นรูปแบบอื่น โดยทั่วไป คลื่นตามขวางจะเกิดในวัตถุทดสอบโดยเลือกมุมของคลื่นตามยาว ซึ่งจะอธิบายเรื่องมุมรังสีทดสอบในหัวข้อที่ 4

การส่งคลื่นเสียงซึ่งจำกัดตัวแปร: ระยะทางการเคลื่อนที่ของคลื่นขึ้นอยู่กับความถี่และระดับพลังงานซึ่งแปรตามวัตถุที่ทำการส่ง เป็นไปตามกฎโดยทั่วไป คือวัตถุที่แข็งความหนาแน่นมากมีความสม่ำเสมอจะมีประสิทธิภาพในการส่งดีกว่าวัตถุที่มีความอ่อนมีความหนาแน่นน้อยหรือไม่เป็นอันหนึ่งเดียวกัน มีสามปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการระยะทางของเสียงผ่านตัวกลาง คือ การแผ่รังสี (beam spreading), ค่าการลดทอน (attenuation), การแพร่กระจาย (scattering) การเดินทางของลำคลื่น, ความกว้างของขอบ พลังงานคลื่นเกี่ยวเนื่องกับคลื่นที่มีการแพร่กระจายพลังงานพื้นที่กว้าง การลดทอนจะทำให้พลังงานของคลื่นที่ผ่านตัวกลางลดน้อยลง โดยเฉพาะระดับพลังงานของ

คลื่นที่อยู่หน้า การกระจายทำให้เกิดการสะท้อนของพลังงานจากขอบของเม็ด (grain boundaries) หรือโครงสร้างขนาดเล็ก ความถี่ที่มากขึ้นการแผ่มากขึ้นจะทำให้ผลกระทบต่อการลดทอนและการกระจายน้อยลง สำหรับการใช้งาน ควรเลือกความถี่ของทรานส์ดิวเซอร์ให้เหมาะสมกับตัวแปรเหล่านี้

การสะท้อนที่ขอบเขต: เมื่อพลังงานเสียงเดินทางผ่านขอบเขตของวัตถุหลายๆประเภท พลังงานส่วนหนึ่งจะถูกสะท้อนกลับและอีกส่วนหนึ่งจะถูกส่งผ่าน จำนวนพลังงานสะท้อนกลับหรือสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับจะสัมพันธ์กับอิมพีแดนซ์เชิงเสียง (acoustic impedance) ของวัตถุทั้งสอง ความต้านทานทางเสียงขึ้นกับคุณสมบัติของวัตถุหาโดยเอาความหนาแน่นคูณกับความเร็วเสียงในวัตถุนั้น สำหรับวัตถุสองชนิด สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับจะขึ้นกับเปอร์เซ็นต์ของความดันคำนวณโดยผ่านสูตร

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (2.83)$$

เมื่อ  $R$  คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (เปอร์เซ็นต์ของพลังงานสะท้อนกลับ)

$Z_1$  คือ ความต้านทานทางเสียงของวัตถุที่ 1

$Z_2$  คือ ความต้านทานทางเสียงของวัตถุที่ 2

สำหรับขอบเขตของโลหะกับอากาศจะถูกใช้ในการหารอยแตกร้าว ซึ่งมีสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับประมาณ 100% โดยแท้จริงพลังงานเสียงทั้งหมดจะสะท้อนจากรอยแตกร้าวหรือวัตถุที่ไม่ต่อเนื่องตามเส้นทางผ่านของคลื่น ซึ่งเป็นทฤษฎีพื้นฐานในการหารอยแตกร้าวในอัลตราโซนิก

มุมของการสะท้อนกลับและการหักเห: พลังงานเสียงที่เกิดจากอัลตราโซนิกที่มีความถี่สูงและทิศทางเที่ยงตรงใช้ในการหารอยแตกร้าวได้เป็นอย่างดี ในสถานการณ์ที่เสียงตกกระทบนอกขอบเขต มุมสะท้อนเท่ากับมุมตกกระทบคือลำคลื่นชนกับพื้นผิวที่ตั้งฉากจะสะท้อนกลับตรงๆ มุมของลำแสงที่ชนจะสะท้อนกลับเท่ามุมเดิม พลังงานเสียงที่ถูกส่งจากวัตถุหนึ่งไปอีวัตถุหนึ่งจะมีการหักเหเป็นไปตามกฎของ Snell นอกจากนี้ ลำคลื่นที่เดินทางตรงก็จะมีทิศทางตรงด้วยแต่เมื่อลำคลื่นมีการชนขอบเขตที่มุมต่างๆจะหักเหไปตามสูตร:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{V_1}{V_2} \quad (2.84)$$

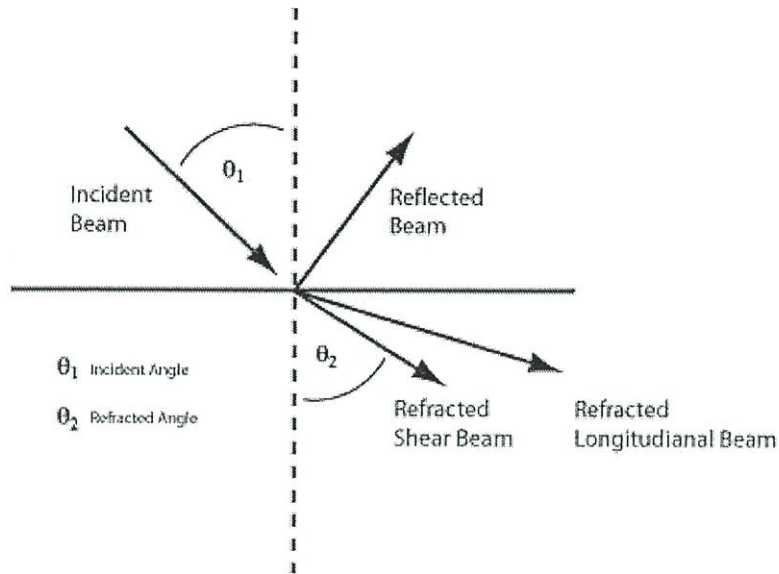
เมื่อ  $\theta_1$  คือ มุมที่เกิดจากวัตถุที่ 1

$\theta_2$  คือ มุมที่เกิดจากวัตถุที่ 2

$V_1$  คือ ความเร็วเสียงในวัตถุที่ 1

$V_2$  คือ ความเร็วเสียงในวัตถุที่ 2

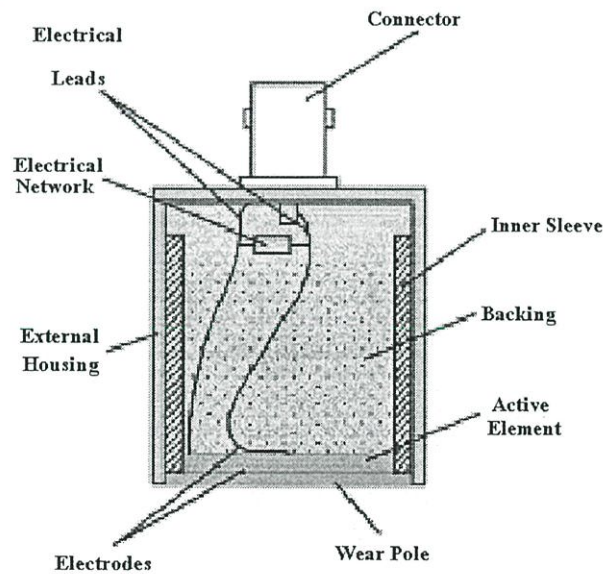
นี่คือความสัมพันธ์ปัจจัยที่สำคัญในการหามุมลำคลื่นทดสอบ ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อที่ 4



รูปที่ 2.26 แสดงมุมตกกระทบ, มุมสะท้อน และมุมหักเหของลำคลื่น

### 2.16.2.2 อัลตราโซนิกทรานส์ดิวเซอร์

ทรานส์ดิวเซอร์คือเครื่องมือที่เปลี่ยนพลังงานรูปแบบหนึ่งไปเป็นรูปแบบหนึ่ง อัลตราโซนิกทรานส์ดิวเซอร์เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานเสียงความถี่สูงหรือเปลี่ยนพลังงานเสียงความถี่สูงไปเป็นพลังงานไฟฟ้า



รูปที่ 2.27 ภาพตัดขวางการเชื่อมต่อทรานส์ดิวเซอร์

ประเภทของทรานส์ดิวเซอร์ในการหารอยแตกร้าวเช่น piezoelectric, composite หรือ polymer เมื่อไรที่สิ่งเหล่านี้ถูกกระตุ้นด้วยไฟฟ้าความต่างศักย์สูงจะเกิดการสั่นข้ามสเปกตรัมความถี่เฉพาะและเกิดเป็นคลื่นเสียง หรือเมื่อเกิดการสั่นจากเสียงก็จะทำให้เกิดไฟฟ้า ผิวหน้าวัสดุนั้นถูกหุ้มด้วยพลาสติกเพื่อป้องกันความเสียหายและผิวด้านหลังติดกับวัสดุที่เปื่อยเมื่อเกิดการสั่นจะทำให้เกิด

เสียงโดยสมบูรณ์ พลังงานเสียงที่เกิดจากความถี่อัลตราโซนิกไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านอากาศต้องใช้น้ำหรือเจลในการเชื่อมต่อวัตถุที่ทดสอบกับทรานส์ดิวเซอร์

มีห้ารูปแบบในการหารอยแตกร้าวของเครื่องอัลตราโซนิกทรานส์ดิวเซอร์

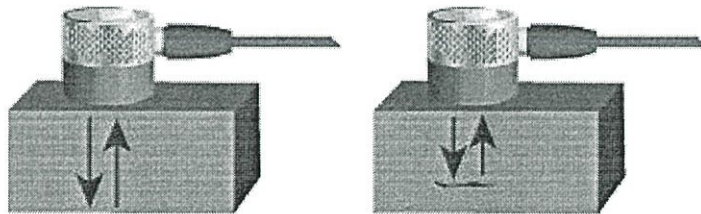
- การเชื่อมต่อทรานส์ดิวเซอร์(Contact Transducers): การเชื่อมต่อของทรานส์ดิวเซอร์กับวัตถุที่ทดสอบ โดยพลังงานเสียงจะตั้งฉากกับผิววัตถุ และใช้งานแบบต่างๆเช่น การหาช่องว่าง, รุพรุน และรอยแตกของชิ้นส่วน หรือหาความหนา

- มุมลำคลื่นทรานส์ดิวเซอร์(Angle Beam Transducers): มุมลำคลื่นของทรานส์ดิวเซอร์ถูกใช้ร่วมกันกับพลาสติก, epoxy จะใช้คลื่นตามขวางหรือคลื่นตามยาวในการทดสอบวัตถุ สามารถออกแบบมุมกับพื้นผิว สำหรับตรวจงานเชื่อมทั่วไป

- ระยะเวลาทรานส์ดิวเซอร์(Delay Line Transducers): ระยะเวลาทรานส์ดิวเซอร์เป็นองค์ประกอบสำคัญในการทดสอบวัตถุ ใช้แก้ปัญหาการวัดระยะใกล้หรือทดสอบวัตถุที่มีอุณหภูมิสูง ระยะเวลานี้ใช้ในการป้องกันความเสียหายจากอุณหภูมิ

- การจุ่มทรานส์ดิวเซอร์(Immersion Transducers): การจุ่มทรานส์ดิวเซอร์เป็นการเชื่อมต่อพลังงานเสียงกับวัตถุทดสอบโดยผ่านน้ำ ใช้การสแกนอัตโนมัติ

- ทรานส์ดิวเซอร์คู่(Dual Element Transducers): ทรานส์ดิวเซอร์คู่จะแบ่งเป็นการส่งและการรับ ใช้งานวัตถุที่มีผิวหยาบ ขรุขระ หลุม และใช้งานวัตถุที่มีอุณหภูมิสูงได้ดี



รูปที่ 2.28 การหารอยแตกร้าวของวัตถุโดยวิธีการสะท้อนกลับของสัญญาณ

### 2.16.3 เครื่องอัลตราโซนิกในการวิเคราะห์วัตถุ

การทดสอบอัลตราโซนิกแบบไม่ทำลาย(nondestructive) มีวิธีการใช้หลายอย่างเช่นการหาขนาดรวมทั้งการวิเคราะห์วัตถุ ซึ่งอัลตราโซนิกแบบไม่ทำลายจะดีกว่าสำหรับการใช้งานโดยทั่วไปเช่นการหาขนาดความหนา, รอยแตกร้าวและสภาพของเสียง คลื่นอัลตราโซนิกสามารถใช้แยกแยะปริมาณทางกล โครงสร้างและองค์ประกอบของคุณสมบัติของแข็งและของเหลว การวิเคราะห์วัตถุโดยใช้อัลตราโซนิกอาศัยพื้นฐานทางฟิสิกส์: การเคลื่อนที่ของคลื่นจะส่งผลกระทบต่อจากการเดินทางผ่านตัวกลาง ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงหนึ่งในสี่ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการวัด เช่น เวลาอัลตราโซนิกที่ใช้ในการผ่านวัตถุ(transit time), การลดทอน(attenuation), การแพร่กระจาย(scattering), และความถี่(frequency) ซึ่งมีความสัมพันธ์เปลี่ยนแปลงตามคุณสมบัติทางฟิสิกส์เช่น

ความแข็ง, สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น, ความหนาแน่น, สิ่งที่มีคุณสมบัติเป็นแบบเดียวกันและแบบมีสิ่งเจือปน (grain structure)

ทฤษฎี: อัลตราโซนิกแบบไม่ทำลายจะมีช่วงการใช้ระหว่าง 20 KHz ถึง 100 MHz ส่วนใหญ่จะใช้งานในช่วงความถี่ 500 KHz ถึง 20 MHz ซึ่งจะใช้โหมดการสั่นแบบคลื่นตามยาว (longitudinal wave) และคลื่นตามขวาง (shear wave) หรือในบางกรณีจะใช้ผิวหน้าคลื่น (surface wave) และคลื่นจาน (plate wave) ความยาวคลื่นที่สั้นกว่าจะตอบสนองได้ดีกว่าเมื่อผ่านตัวกลาง การวิเคราะห์วัตถุนั้นจะใช้ได้ดีเมื่ออัลตราโซนิกมีความถี่สูง อัลตราโซนิกที่สร้างและรับจากทรานส์ดีวเซอร์แบบ piezoelectric จะต้องเชื่อมต่อกับเสียงกับวัตถุที่ทดสอบ ในกรณีทรานส์ดีวเซอร์แบบเดี่ยวใช้การเชื่อมต่อกับวัตถุเพียงด้านเดียวซึ่งเป็นทั้งตัวรับและตัวส่ง (pulse/echo mode) หรือรับอย่างเดียวเมื่อใช้ทรานส์ดีวเซอร์อื่นส่ง สัญญาณที่รับเมื่อผ่านเครื่องขยายและทำการวิเคราะห์ให้ง่ายขึ้น

ประโยชน์สำคัญในการใช้อัลตราโซนิกในการวิเคราะห์วัตถุคือสามารถเชื่อมต่อได้ดี อัลตราโซนิกที่มีความถี่สูงสามารถส่งผ่านได้เสมอและเมื่อวัตถุเคลื่อนไหวยังสามารถเชื่อมต่ออัลตราโซนิกได้โดยการใช้เป็นตัวกลาง ระบบการวัดสามารถใช้ในสถานะปิดโดยเชื่อมต่อพลังงานเสียงผ่านผนัง เพราะคลื่นเสียงสามารถผ่านวัตถุทดสอบได้ โดยวัตถุที่ทำการวัดต้องถูกบรรจุเต็มพื้นผิว เมื่อเลือกจุดวัดก็ยังสามารถวิเคราะห์วัตถุที่มีลักษณะเป็นชั้นหรือเป็นวัตถุหลายๆชนิดรวมกันได้

ตัวแปรสำคัญในการวิเคราะห์อาจมีหนึ่งหรือหลายอย่างดังนี้

1. ความเร็วเสียง/เวลาผ่านของพัลส์ (Sound velocity/pulse transit time): ความเร็วเสียงเป็นปัจจัยอย่างง่ายในการวัด โดยความเร็วเสียงจะมีค่าเฉพาะแต่ละตัวกลาง ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นและค่าความหนาแน่น ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงค่าวัตถุก็จะมีผลต่อความเร็วเสียงด้วย

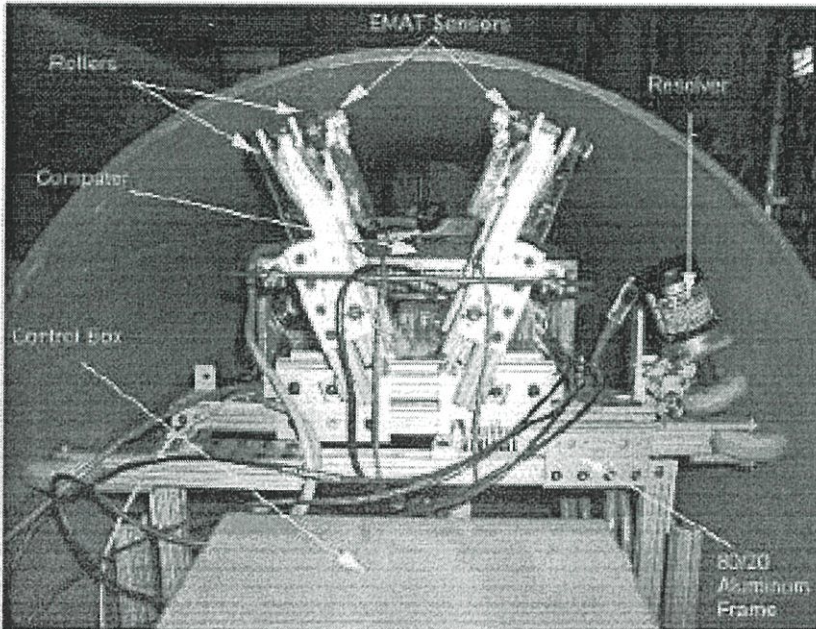
2. การลดทอน (Attenuation): พลังงานเสียงถูกลดทอนอัตราที่ต่างกันในตัวกลางที่แตกต่าง และมีความสลับซับซ้อน เช่น ผลกระทบจากความหนาแน่น, ความแข็ง, ความเหนียวและโครงสร้างของโมเลกุล รวมทั้งการลดทอนจะมากขึ้นเมื่อเพิ่มความถี่ในตัวกลางนั้น

3. การแพร่กระจาย (Scattering): คลื่นเสียงจะสะท้อนจากขอบเขตของวัตถุที่ไม่เหมือนกัน ซึ่งเกิดจากสิ่งแปลกปลอมในโครงสร้าง (grain structure), ทิศทางเส้นใย, ลักษณะเป็นรูพรุน, ความหนาแน่นของอนุภาค และสิ่งเจือปนอื่นๆ ซึ่งส่งผลกระทบต่อแอมพลิจูด, ทิศทางและความถี่ตามการกระจายของสัญญาณ ผลกระทบจากสิ่งที่ทำให้เกิดการกระจายสามารถสังเกตได้โดยดูจากการเปลี่ยนแปลงความกว้างของแอมพลิจูดของเสียงสะท้อนกลับหรือสัญญาณที่ส่งผ่าน

4. ความถี่ในวัตถุ (Frequency): วัตถุทั้งหมดจะกระทำตัวเป็นตัวกรองความถี่ต่ำ (low pass filter) จากการลดทอนหรือการกระจาย ถ้าความถี่สูงจะมีค่าความกว้าง (broadband) มากกว่าความถี่

ต่ำ ดังนั้นการวิเคราะห์โดยการเปลี่ยนแปลงความถี่ ควรเลือกความกว้างพัลส์ที่ผ่านวัตถุทดสอบที่สามารถรวมผลกระทบจากการลดทอนและการกระจายอย่างทื่อธิบายมา ในการใช้งานอัลตราโซนิก เช่นความเร็วเสียงสามารถคำนวณสมบัติด้านสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นได้โดยตรง

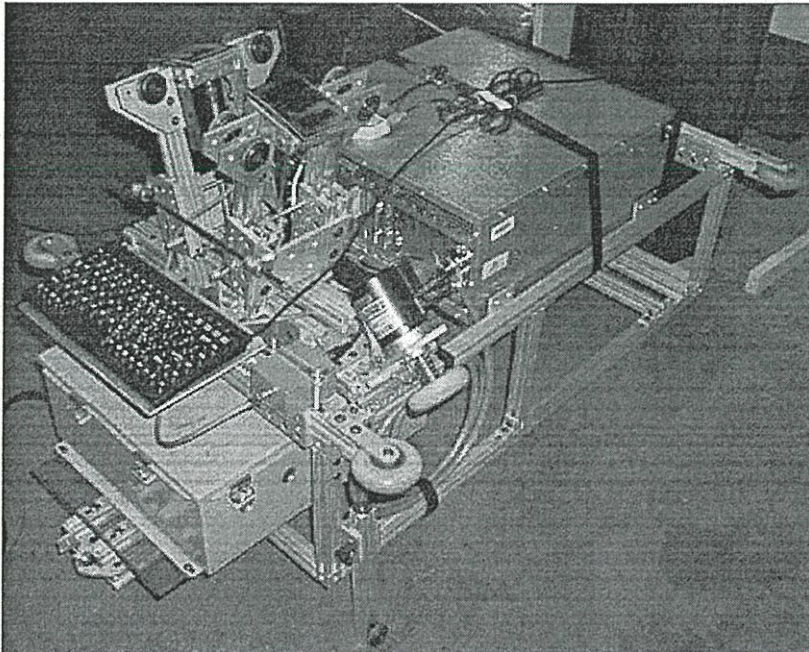
เครื่องมือ: ความหลากหลายของเครื่องมืออัลตราโซนิกที่สามารถใช้งานในการวิเคราะห์วัสดุ ความเร็วเสียงสามารถใช้เป็นเครื่องมือในการวัดแบบพกพาในการวัดความหนา ขณะที่ค่าความเร็ว, การลดทอนและการกระจายสามารถอ่านค่าได้จากเครื่องวัดดิจิทัล



a) การใช้งานจริงสำหรับการวัดขนาดและรอยแตกร้าวของท่อก๊าซ



c) หัวโพรบ EMAT



b) เครื่องสำหรับหารอยร้าวของท่อส่งก๊าซ



d) เครื่องวัดสัญญาณ  
อัลตราโซนิกแบบพกพา

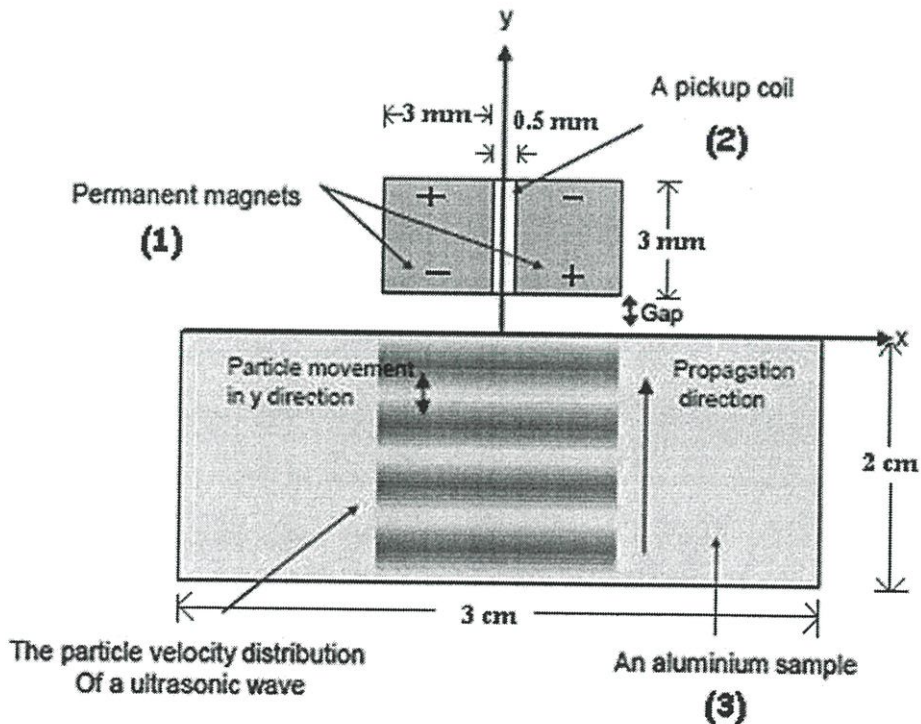
รูปที่ 2.29 การประยุกต์ใช้ EMAT ในอุตสาหกรรมต่างๆ

### บทที่ 3

## การทดลองและผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองเป็นสองส่วนใหญ่ๆ ในส่วนแรกศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อการวัดสัญญาณที่ดีโดยการจำลองรูปแบบของ EMAT และส่วนที่สองคือเก็บผลในส่วนของการทดลองจริงทางฮาร์ดแวร์เปรียบเทียบกับแนวโน้มที่ได้กับการจำลอง (Simulation)

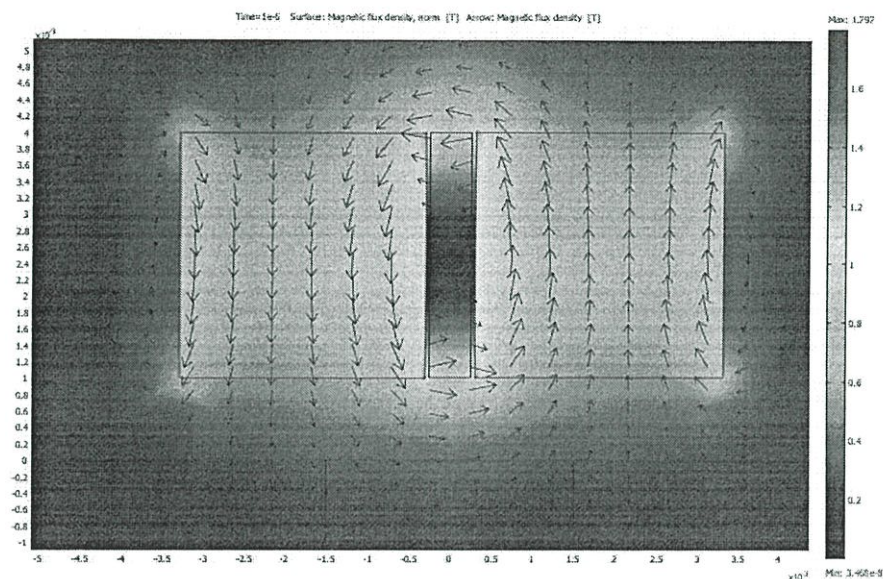
สำหรับการจำลองการทดลอง(Simulation) ตัววัดสัญญาณอัลตราโซนิก ใช้โปรแกรม COMSOL Multi physics เลือกรูปแบบเป็นแบบ Electromagnetic และเลือก Magnetostatics (ภาคผนวก) เริ่มต้นจากสร้างรูปสี่เหลี่ยมโดยกำหนดให้เป็นแม่เหล็กถาวรสองชิ้นให้มีขนาด  $3\text{mm} \times 3\text{mm}$  (1) โดยวางขั้วของแม่เหล็กทั้งสองในทิศตรงข้ามกัน กำหนดค่าเมกเนติกฟิลด์ที่ Physics ที่เมนูของโปรแกรม COMSOL และเลือก Subdomain Settings ของตัวแม่เหล็กไว้ที่  $995\text{kA/m}$  (ภาคผนวก) ซึ่งเป็นแม่เหล็กชนิด Neodymium Iron Boron Magnets (NdFeB) ประเภท N38SH จากนั้นสร้างพื้นที่สี่เหลี่ยมขนาดเริ่มต้นให้มีขนาด  $0.5\text{mm} \times 3\text{mm}$  (2) ขนาดของอลูมิเนียมให้มีขนาด  $2\text{cm} \times 3\text{cm}$  (3) ดังแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบของโมเดล EMAT

เมื่อทำการจำลองรูปแบบของ EMAT โดยใช้โปรแกรม COMSOL คำนวณค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก โดยแสดงผลแบบความแตกต่างสีที่พื้นผิว(Surface) และลูกศร(Arrow) แสดง

ทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็ก โดยกำหนด Plot Parameter เป็น Surface และ Arrow เลือก Magnetic flux density, norm (ภาคผนวก) แล้วทำการ Solve จากการทำการทดลองนี้จะเห็นได้ว่าความเข้มของสนามแม่เหล็กโดยจะมีค่ามากที่สุดบริเวณขอบมุมของแม่เหล็กแสดงผลแบบความแตกต่างของสีพื้นผิว(Surface) และทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กจะมีทิศทางตามลูกศร(Arrow) ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 รูปแบบโมเดล EMAT แสดงสนามแม่เหล็กที่เกิดจากแม่เหล็กถาวรสองชิ้น

สำหรับการทดลองการจำลองในงานวิจัยนี้มีรายละเอียดดังนี้

### 3.1 การกำหนดการเคลื่อนที่ของคลื่นแบบเชิงเส้นตามแนว(Linear Solver)

จุดประสงค์เพื่อดูกระบวนการรับสัญญาณอัลตราโซนิก เมื่อทำการกำหนดการเคลื่อนที่ของคลื่นเป็นรูปคลื่นไซน์ตามเส้นทางในลักษณะไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาและดูสัญญาณที่เกิดขึ้นว่าเป็นลักษณะอย่างไร

### 3.2 การกำหนดการเคลื่อนที่ของคลื่นแบบเปลี่ยนแปลงตามเวลาและรูปแบบพัลส์

จุดประสงค์เพื่อดูสัญญาณอัลตราโซนิกที่รับด้วย EMAT เมื่อสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาและสัญญาณที่ส่งผ่านอลูมิเนียมจะจำลองรูปแบบของคลื่นเสียงอัลตราโซนิก สังเกตสัญญาณรับที่เกิดขึ้น

### 3.3 การกำหนดการเคลื่อนที่ของคลื่นโดยใช้สมการคลื่น

จุดประสงค์เพื่อดูสัญญาณอัลตราโซนิก เมื่อกำหนดสัญญาณอัลตราโซนิกในอลูมิเนียมให้มีคุณสมบัติของคลื่นกล โดยสร้างคลื่นจากสมการคลื่น(Wave equation) และสัญญาณรับที่ได้

### 3.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการตอบสนองสัญญาณของ EMAT

#### 3.4.1 ค่าแมกเนไตรเซชัน(Magnetization)

- 3.4.2 พื้นที่ในการรับสัญญาณ(จำนวนรอบขดลวด)
- 3.4.3 ผลต่อการตอบสนองต่อความถี่
  - 3.4.3.1 สัญญาณกับความถี่
  - 3.4.3.2 สัญญาณกับระยะห่างระหว่าง EMAT กับอลูมิเนียม

### 3.5 การทดลองจริงโดยเปรียบเทียบผลที่ได้กับการจำลอง

จุดประสงค์เพื่อดูผลการทดลองในการวัดคลื่นอัลตราโซนิกที่ได้จากการจำลองกับการทดลองจริง โดยเปรียบเทียบลักษณะของสัญญาณอัลตราโซนิก การตอบสนองต่อความถี่ โดยดูความคลาดเคลื่อนจากการคำนวณค่าความผิดพลาด(Error) รวมทั้งผลลัพธ์ของสมการที่ได้จากการทดลอง

### 3.1 การกำหนดการเคลื่อนที่ของคลื่นแบบเชิงเส้นตามแนว(Linear Solver)

จุดประสงค์เพื่อดูกระบวนการรับสัญญาณอัลตราโซนิกเมื่อทำการกำหนดการเคลื่อนที่ของคลื่นเป็นรูปคลื่นไซน์(sine wave) ในลักษณะไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาและดูสัญญาณที่เกิดขึ้นว่าเป็นลักษณะอย่างไร

การกำหนดเส้นตามแนวที่กำหนดหมายถึงการกำหนดการเคลื่อนที่ของอนุภาคไปตามเส้นทางที่เรากำหนด โดยไม่มีการลักษณะเชิงกลของคลื่นเช่น การเลี้ยวเบน, การหักเห เป็นต้น

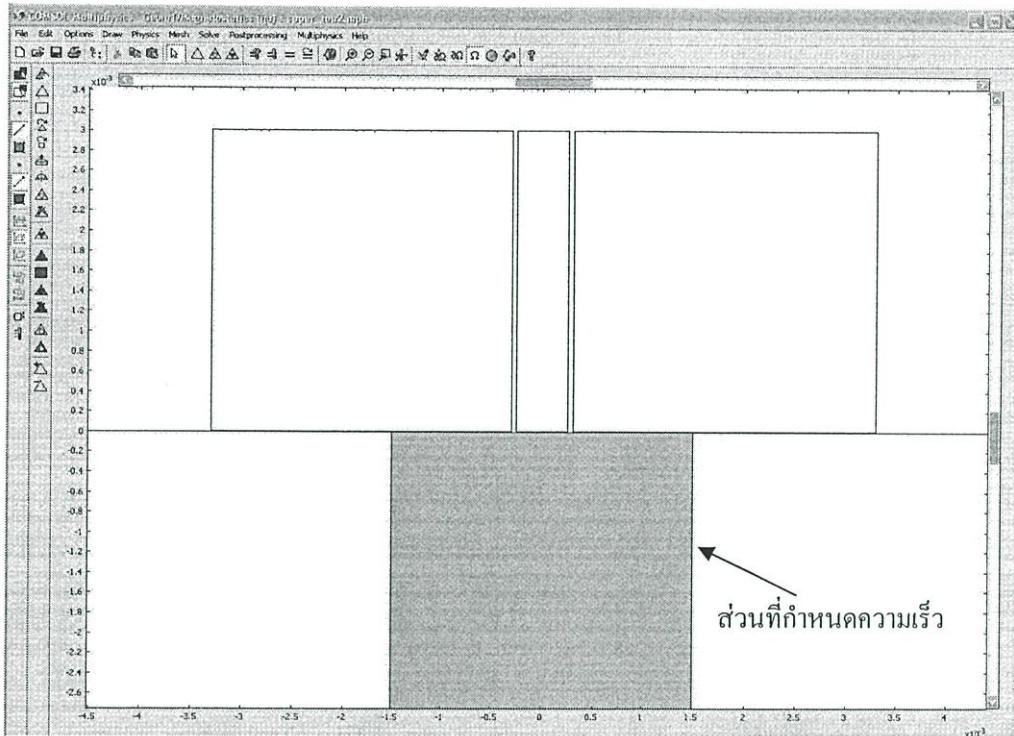
กำหนดสมการการเคลื่อนที่ตามแนวแกน  $y$  นี้มาจากการจำลองรูปแบบการเคลื่อนที่ของคลื่น Acoustic wave โดยให้การเคลื่อนที่ที่มีทิศทางไปทางแนวแกน  $y$  เท่านั้น และมีสมการการเคลื่อนที่เป็น

$$\vec{d}_y = A \sin(ky) \quad (3.1)$$

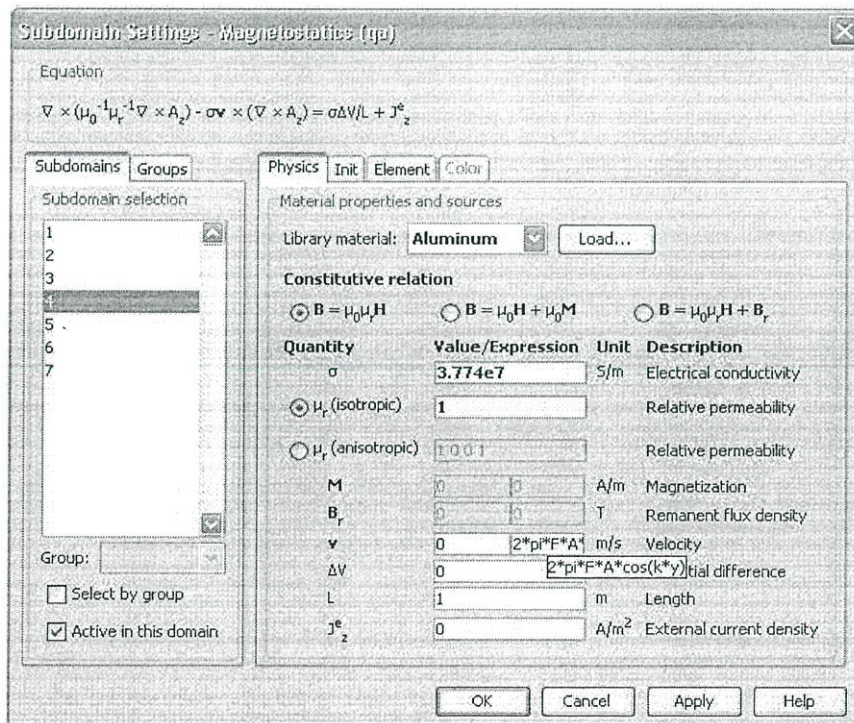
กำหนดความเร็วของอนุภาคในอลูมิเนียม ซึ่งเกิดจากการกำหนดคลื่นอัลตราโซนิกตามแนวแกน  $y$  เริ่มต้นจากลักษณะคลื่นเป็นรูปไซน์ ในพื้นที่ส่วนที่กำหนดรูปที่ 3.3 โดยกำหนดที่ Subdomain Settings (ภาคผนวก) ให้เป็นอลูมิเนียมและกำหนด Velocity ทางแกน  $y$  ( $\vec{v}_y$ ) เป็นค่าดังนี้ดังรูป 3.4

$$\vec{v}_y = 2\pi f A \cos(ky) \quad (3.2)$$

|     |     |                             |
|-----|-----|-----------------------------|
| โดย | $A$ | เป็นแอมพลิจูด (Amplitude)   |
|     | $f$ | เป็นความถี่คลื่น(Frequency) |
|     | $k$ | เป็นเลขคลื่น(Wave number)   |



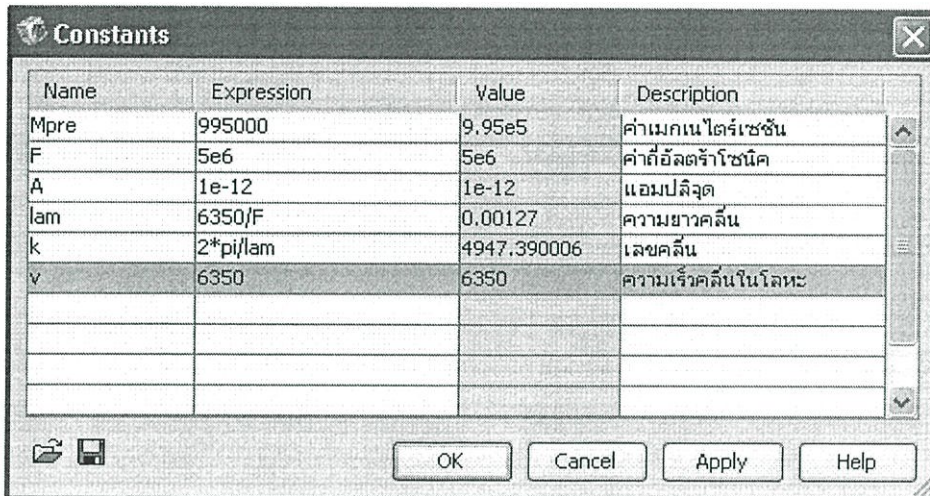
รูปที่ 3.3 ส่วนที่กำหนดความเร็วอนุภาคและเป็นอลูมิเนียม



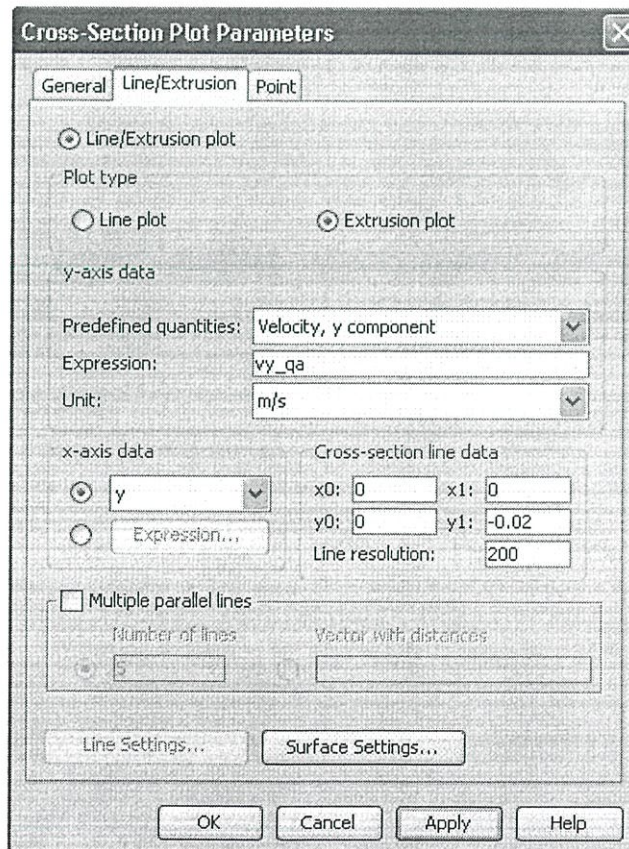
รูปที่ 3.4 การกำหนดความเร็วอนุภาคอลูมิเนียมที่ Subdomain Settings

ทำการกำหนดค่าต่างเป็นดังนี้ แอมพลิจูดมีค่าเท่ากับ 1 Pico-meter เนื่องจาก EMAT สามารถตรวจวัดสัญญาณในอลูมิเนียมที่มีขนาดเล็กได้, ความถี่มีค่าเท่ากับ 5 MHz เลขคลื่นมีค่า

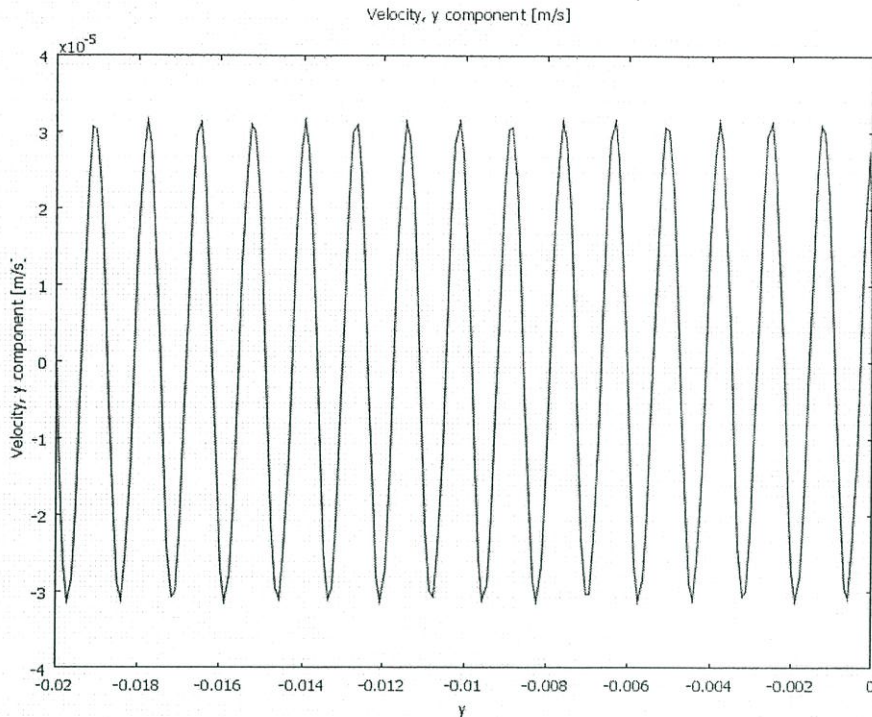
เท่ากับ  $\frac{2\pi}{\lambda}$  ซึ่ง  $\lambda$  เป็นความยาวคลื่นมีค่าเท่ากับความเร็วคลื่นในอลูมิเนียมหารด้วยความถี่ ( $\frac{v}{f}$ ) ให้ความเร็วคลื่นในอลูมิเนียมมีค่าเท่ากับ 6,350 m/s รูปที่ 3.5 แสดงค่าที่กำหนดใน Constants (ภาคผนวก) เมื่อทำการจำลองแล้วดูค่าความเร็วในโลหะโดยเลือกที่ Post processing  $\rightarrow$  Cross-Section Plot Parameters เลือก Velocity, y component ที่ตำแหน่ง(0,0) ถึง (0,-0.02) แนวแกน y ในอลูมิเนียม ในรูปที่ 3.6 ก็จะได้รูปคลื่นดังแสดงดังรูป 3.7



รูปที่ 3.5 กำหนดค่าคงที่



รูปที่ 3.6 กำหนดรูปแบบการแสดงผล



รูปที่ 3.7 คลื่นไซน์ ความถี่ 5 MHz

รูปแบบของการจำลอง โดยแสดงการเคลื่อนที่ของอนุภาคของคลื่นตามแนวทางที่กำหนด โดยลูกศร(Arrow) แสดงทิศทางของสนามแม่เหล็กซึ่งเกิดจากแม่เหล็กถาวรสองชิ้นที่วางกลับหัวกัน ความแตกต่างของสีผิว (Surface) แสดงความเร็วของอนุภาคอูมิเนียมตามแนวแกน y สีแดง หมายถึงความเร็ว (สันคลื่น) และสีน้ำเงินหมายถึงความเร็วในทิศตรงข้ามกับสีแดง (ท้องคลื่น) ดังรูปที่ 3.8

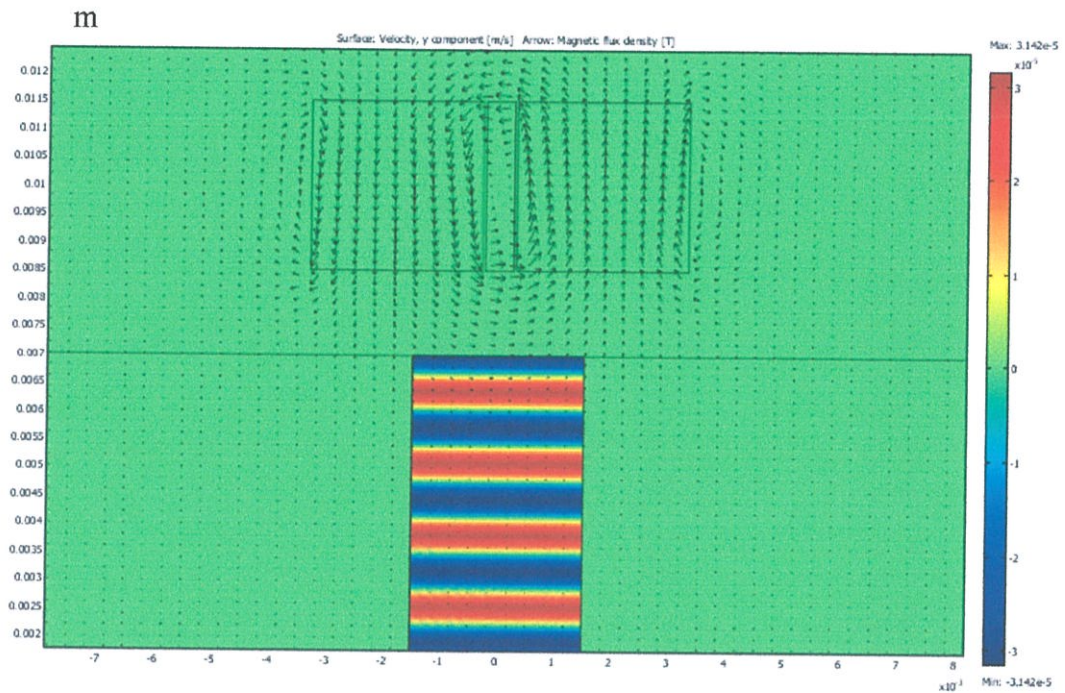
เมื่อแม่เหล็กสร้างสนามแม่เหล็กออกมาโดยรอบและมีความเร็วอัลตราโซนิคแล้ว จะทำให้ความหนาแน่นแม่เหล็กกระนาบ  $x$  ( $\vec{B}_x$ ) ซึ่งจะไปเหนี่ยวนำความเร็วกระนาบ  $y$  ในอูมิเนียม( $\vec{v}_y$ ) ให้เกิดความหนาแน่นกระแส( $\vec{J}_z$ )ขึ้นดังสมการ Lorentz

$$\vec{J}_z = \sigma(\vec{v}_y \times \vec{B}_x) \quad (3.3)$$

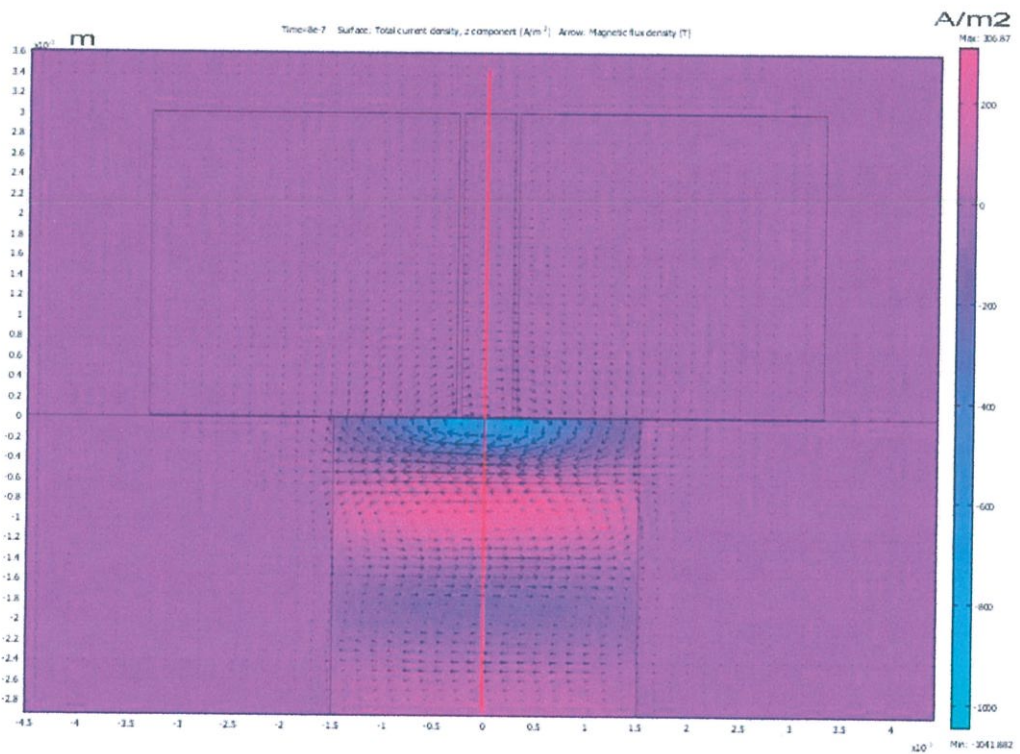
เมื่อ  $\sigma$  เป็นค่าความนำทางไฟฟ้า(Conductivity) ของวัสดุ ซึ่งกำหนดเป็นอูมิเนียมมีค่าเท่ากับ  $3.774 \times 10^7$  S/m ซึ่งสามารถเลือกได้จาก Library Material ใน Subdomain Settings เหมือนการทดลองที่แล้ว ดังรูปที่ 3.4

เมื่อได้ค่าความหนาแน่นกระแสขึ้นที่อูมิเนียม ค่ากระแสนี้จะทำให้เกิดค่าของสนามแม่เหล็กขึ้นตามกฎของ Ampere และทำการวัดค่าด้วย EMAT โดยใช้ขดลวดเหนี่ยวนำวัดสนามแม่เหล็กซึ่งเกิดจากความหนาแน่นกระแสในอูมิเนียมเท่านั้น(ไม่คิดสนามแม่เหล็กซึ่งเกิดจากแม่เหล็กถาวร เพราะแม่เหล็กถาวรที่อยู่ใน EMAT ใช้สำหรับสร้างสนามแม่เหล็กไปที่ผิวอูมิเนียมที่ทำให้เกิดค่ากระแส จึงคิดค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่กระแสนั้นอย่างเดียว) ลูกศร(Arrow)

แสดงทิศทางของสนามแม่เหล็กซึ่งเกิดจากกระแส ความแตกต่างของระดับสีผิว(Surface) แสดง กระแสที่อยู่ในผิวอลูมิเนียมซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างสนามแม่เหล็กซึ่งเกิดจากแม่เหล็ก ถาวรกับความเร็วของอนุภาคอลูมิเนียม ดังแสดงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.8 แบบจำลองการเคลื่อนที่ของคลื่นตามเส้นทางที่กำหนด

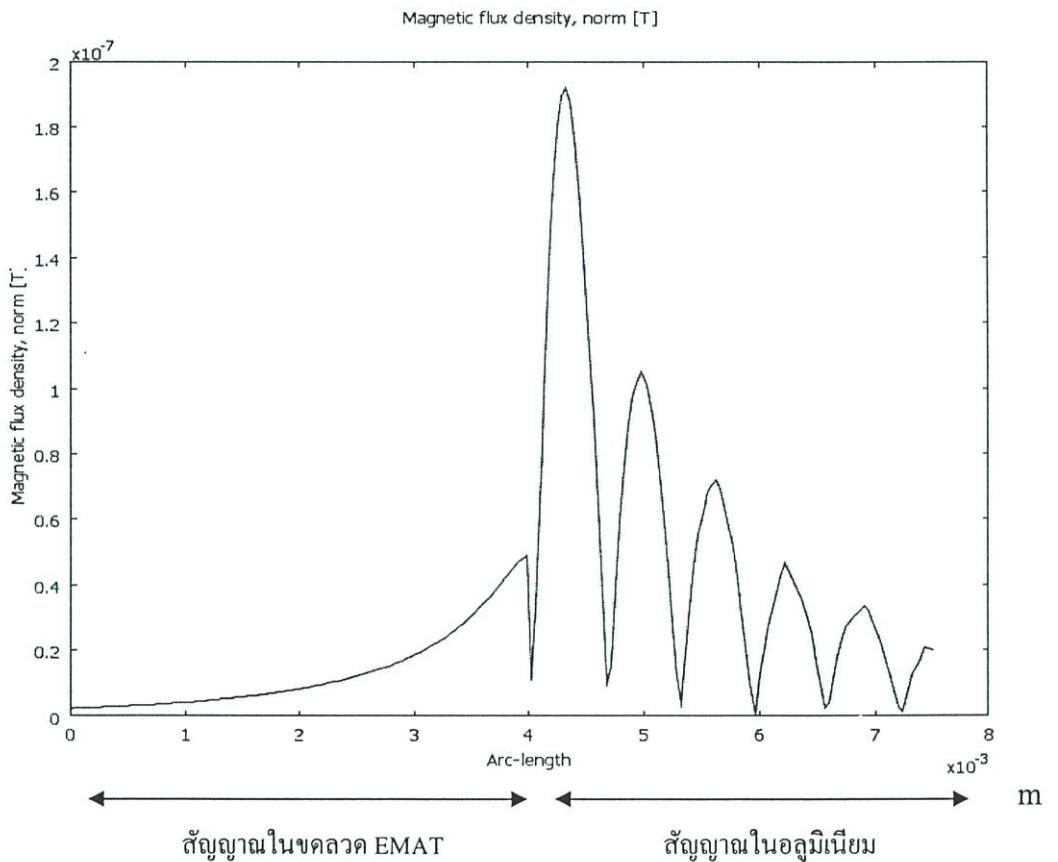


รูปที่ 3.9 ค่ากระแสที่เกิดขึ้นที่อลูมิเนียมและทิศทางเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้น

จากนั้นหาค่าของความต่างศักย์เหนี่ยวนำในขดลวด (Electromotive Force: EMF) ที่ได้จากค่าสนามแม่เหล็กซึ่งเกิดจากกระแสในอลูมิเนียมมาคำนวณหาค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้น เพื่อดูสัญญาณที่รับได้ว่าเป็นลักษณะของสัญญาณอย่างไร โดยดูค่าของ Magnetic flux density, norm (B) ที่เส้นตัดขวางไฮไลต์สีแดงที่เกิดขึ้นตามรูปที่ 3.9 แสดงผลดังรูปที่ 3.10

### วิเคราะห์ผลการทดลอง 3.1

ค่าของกระแสที่ผิวของอลูมิเนียมจะมีค่ามากเมื่ออยู่ใกล้กับหัวโพรบ EMAT เนื่องจากได้รับสนามแม่เหล็กที่เกิดแม่เหล็กมากกว่า และสัญญาณสนามแม่เหล็กในอลูมิเนียมโดยเกิดจากกระแสในอลูมิเนียมจะมีค่ามากและมีลักษณะของสัญญาณเป็นแบบไซน์ตามที่เรากำหนดและมีค่าลดลงไปเรื่อยๆ เมื่อห่างออกไปจาก หัว EMAT ส่วนสัญญาณสนามแม่เหล็กที่อยู่ใน EMAT ที่ขดลวดหรือเมื่อมีระยะห่างออกไปนั้นสัญญาณจะมีค่าลดลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 สัญญาณ Magnetic flux density, norm (B)

### 3.2 การกำหนดการเคลื่อนที่ของคลื่นแบบเปลี่ยนแปลงตามเวลาและรูปแบบคลื่นเสียง

จุดประสงค์เพื่อดูสัญญาณที่รับด้วย EMAT เมื่อสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่มีรูปแบบสัญญาณอัลตราโซนิกเป็นคลื่นไซน์และรูปแบบของสัญญาณอัลตราโซนิกที่ส่งผ่านอลูมิเนียมโดยจำลองแบบคลื่นเสียง

ในส่วนของประมวลผลเชิงเวลาหรือมีส่วนแกนของเวลาทำให้เห็นคลื่นเป็นลูกๆเคลื่อนที่เมื่อเวลาผ่านไป กำหนดความเร็วของอนุภาคตามแนวแกน  $y$  โดยเริ่มต้นจากลักษณะคลื่นเป็นรูปไซน์ (sine) เหมือนกัน กำหนด Subdomain Settings เหมือนการทดลองที่ผ่านมา โดยกำหนด Velocity ของอลูมิเนียม ทางแกน  $y$  และเป็นการประมวลผลเชิงเวลา(Time dependent) โดยเพิ่มในส่วนของ  $\omega t$  ซึ่งตั้งค่างนี้

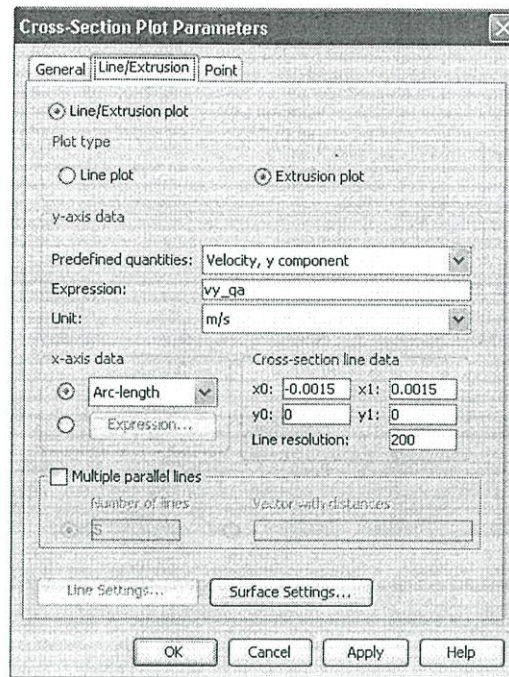
$$\vec{v}_y = 2\pi f A \cos(\omega t + ky) \quad (3.4)$$

|     |          |                                      |
|-----|----------|--------------------------------------|
| โดย | $A$      | เป็นแอมพลิจูด (Amplitude)            |
|     | $f$      | เป็นความถี่ของอัลตราโซนิก(Frequency) |
|     | $k$      | เป็นเลขคลื่น(Wave number)            |
|     | $\omega$ | เป็นความเร็วเชิงมุม                  |
|     | $t$      | เป็นเวลา(Time)                       |

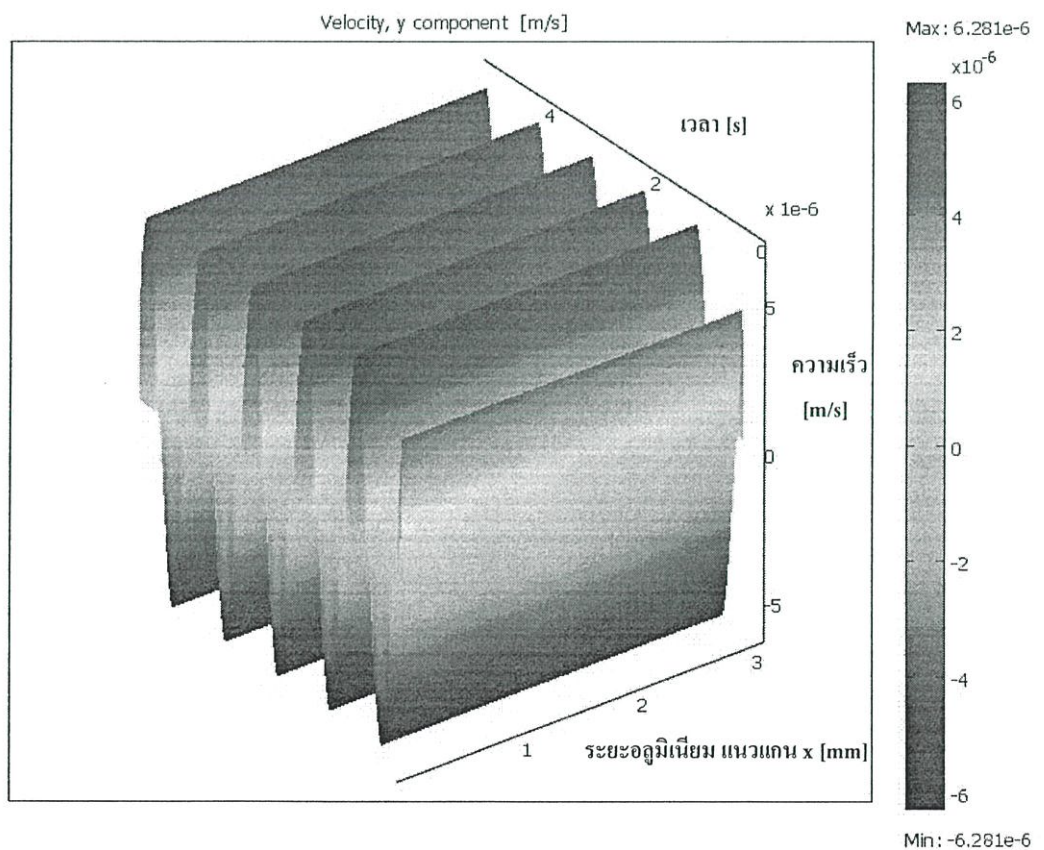
ซึ่งค่าของความเร็วประจุตามแนวแกน  $y$  นี้มาจาก การจำลองรูปแบบการเคลื่อนที่ของคลื่น Acoustic wave โดยให้มีทิศทางไปทางแนวแกน  $y$  เท่านั้น และมีสมการการเคลื่อนที่ที่เป็น

$$\vec{d}_y = A \sin(\omega t + ky) \quad (3.5)$$

ซึ่งเมื่อได้ทำการหาอนุพันธ์เทียบกับเวลา ก็จะได้ค่าสมการความเร็ว ทำการกำหนดค่าต่างๆ เป็นดังนี้ แอมพลิจูดมีค่าเท่ากับ 1 Pico-meter, ความถี่มีค่าเท่ากับ 5 MHz เลขคลื่นมีค่าเท่ากับ  $\frac{2\pi}{\lambda}$  ซึ่ง  $\lambda$  เป็นความยาวคลื่นมีค่าเท่ากับความเร็วคลื่นในอลูมิเนียมส่วนความถี่  $(\frac{v}{f})$  ให้ความเร็วคลื่นในอลูมิเนียมมีค่าเท่ากับ 6,350 m/s เมื่อทำการSolve และแสดงผลโดยเลือก Cross-Section Parameters เลือก Line/Extrusion เลือก Velocity, y component ตามรูปที่ 3.11 แล้วลากเส้นผ่านส่วนที่ต้องการอ่านค่าที่บริเวณผิวของอลูมิเนียมที่ตำแหน่ง (-0.0015,0) ถึง (0.0015,0) แล้วแสดงรูปสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิกดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.11 กำหนดการแสดงผลค่าความเร็วอัดรี้าโซนิคในแนวแกน y



รูปที่ 3.12 คลื่นไซน์จากการจำลองและแปรผันตามเวลา

ขั้นตอนต่อไปจะทำการจำลองการเคลื่อนที่ของคลื่นอัลตราโซนิค (Ultra sonic) และ ประมวลผลในเชิงเวลา (Time dependent) [49] ทำการจำลองรูปแบบของสมการโดยคำนวณผ่าน โปรแกรม MATLAB โดยมีสมการความเร็วคลื่นคือ

$$\bar{v}_y = 2\pi f A t^2 e^{(-t \times 10^7)} \cos(\omega t + ky) \quad (3.6)$$

จากสมการ 3.6 กำหนดให้ความถี่อัลตราโซนิคที่ 5 MHz คลื่นจะมีลักษณะดังรูปที่ 3.13 เมื่อแสดงสัญญาณอัลตราโซนิคแบบ Cross-Section ที่บริเวณผิวอลูมิเนียมที่ตำแหน่ง (-0.0015,0) ถึง (0.0015,0) แล้วแสดงรูปสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิคดังรูปที่ 3.14

เมื่อแม่เหล็กสร้างสนามแม่เหล็กออกมาโดยรอบแล้ว จะมีความหนาแน่นแม่เหล็กกระนาบ  $x$  ( $\bar{B}_x$ ) ซึ่งจะไปเหนี่ยวนำความเร็วอัลตราโซนิคกระนาบ  $y$  ในอลูมิเนียม ให้เกิดความหนาแน่น กระแสขึ้นดังสมการ Lorentz

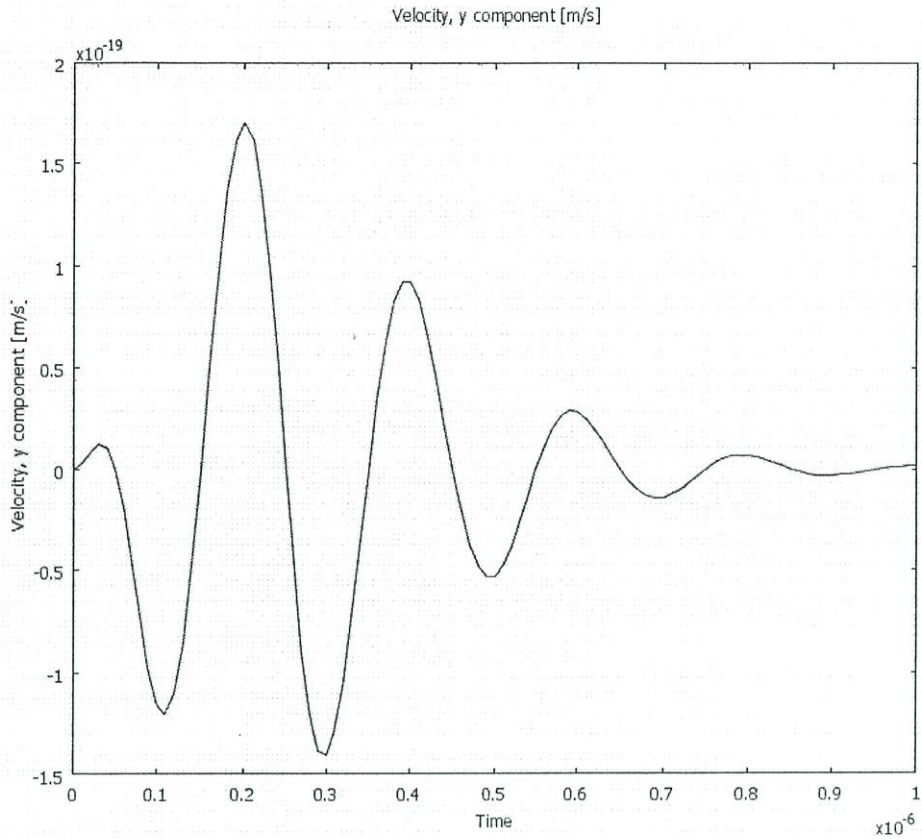
$$\bar{J}_z = \sigma(\bar{v}_y \times \bar{B}_x) \quad (3.7)$$

เมื่อ  $\sigma$  เป็นค่าความนำทางไฟฟ้า(Conductivity) ของวัสดุ ซึ่งกำหนดเป็นอลูมิเนียมมีค่า เท่ากับ  $3.774 \times 10^7$  S/m ซึ่งสามารถเลือกได้จาก Library Material ใน Subdomain Settings ให้เป็น อลูมิเนียมเหมือนการทดลองที่ผ่านมา การแสดงส่วนของกระแสที่เกิดจากสัญญาณอัลตราโซนิคกับ ค่าของสนามแม่เหล็กจากแม่เหล็กถาวรแสดงรูปสัญญาณกระแสดังรูปที่ 3.15 และแสดงสัญญาณ กระแสแบบ Cross-Section บริเวณตำแหน่งผิวอลูมิเนียมเช่นเดียวกันกับสัญญาณอัลตราโซนิคที่ ตำแหน่ง (-0.0015,0) ถึง (0.0015,0) แสดงดังรูปที่ 3.16

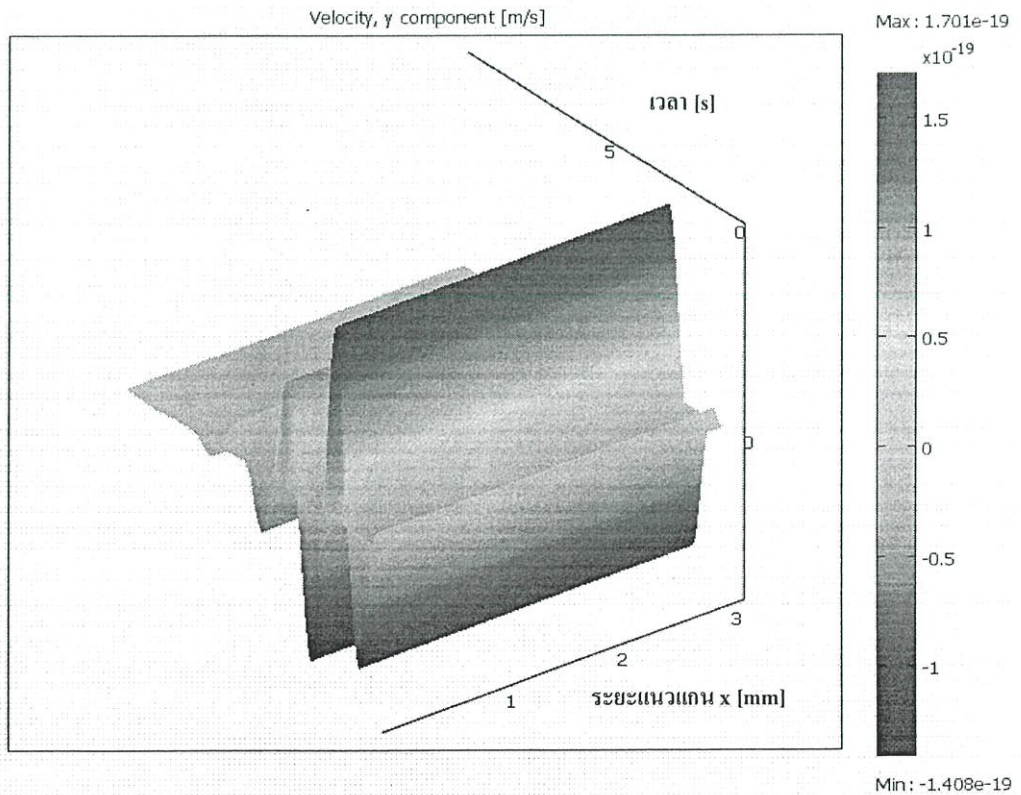
เมื่อได้ค่าความหนาแน่นกระแสขึ้นที่อลูมิเนียม ค่ากระแสนี้จะทำให้เกิดค่าของ สนามแม่เหล็กขึ้นรอบๆ ผิวและในผิวของอลูมิเนียม ทำการวัดค่าด้วย EMAT โดยใช้ขดลวด เหนี่ยวนำวัดสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น สำหรับการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าสัญญาณคลื่นที่มีการ แปรผันตามเวลา สัญญาณคลื่นที่ได้รับมานั้นก็มีการแปรผันตามเวลาด้วย โดยในการคิดสัญญาณ EMF(Electromotive Force) [12] จะมีการคิดดังนี้

$$EMF = -\frac{\partial}{\partial t} \iint B \cdot ds = -\frac{\partial}{\partial t} \iint (\nabla \times A) \cdot ds = -\int \frac{\partial A}{\partial t} \cdot dl \quad (3.8)$$

ซึ่งค่าสัญญาณที่ได้ก็จะมีลักษณะเหมือนกับคลื่นอัลตราโซนิคที่กำหนดขึ้นดังรูปที่ 3.17

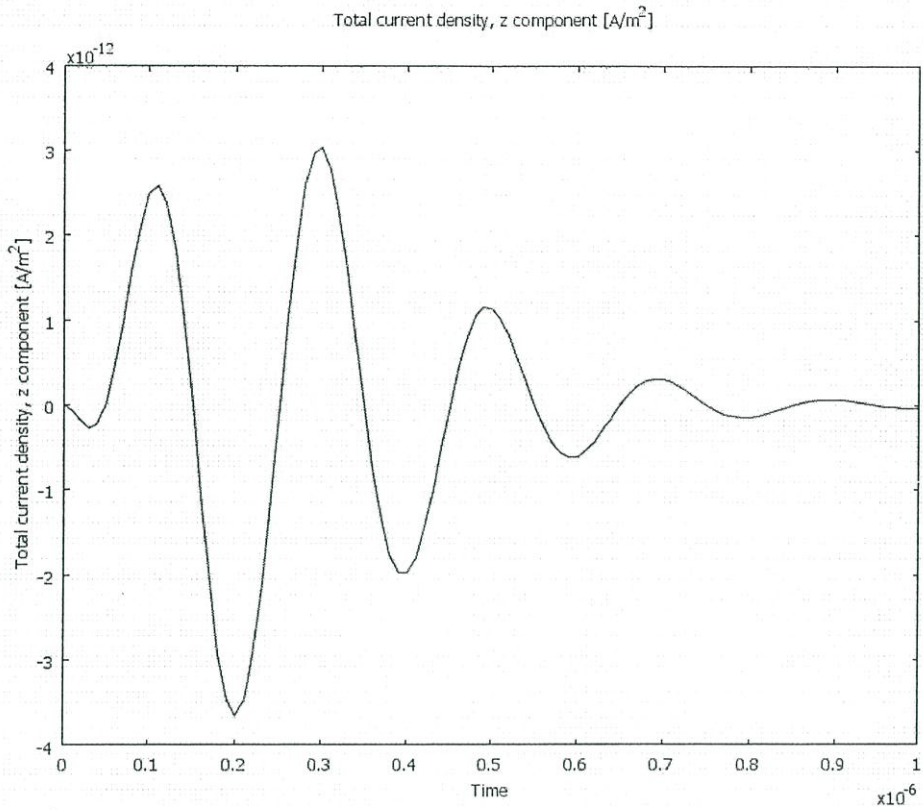


รูปที่ 3.13 คลื่นอัลตราโซนิกที่ได้จากการจำลองรูปแบบคลื่นเสียงความถี่ 5 MHz

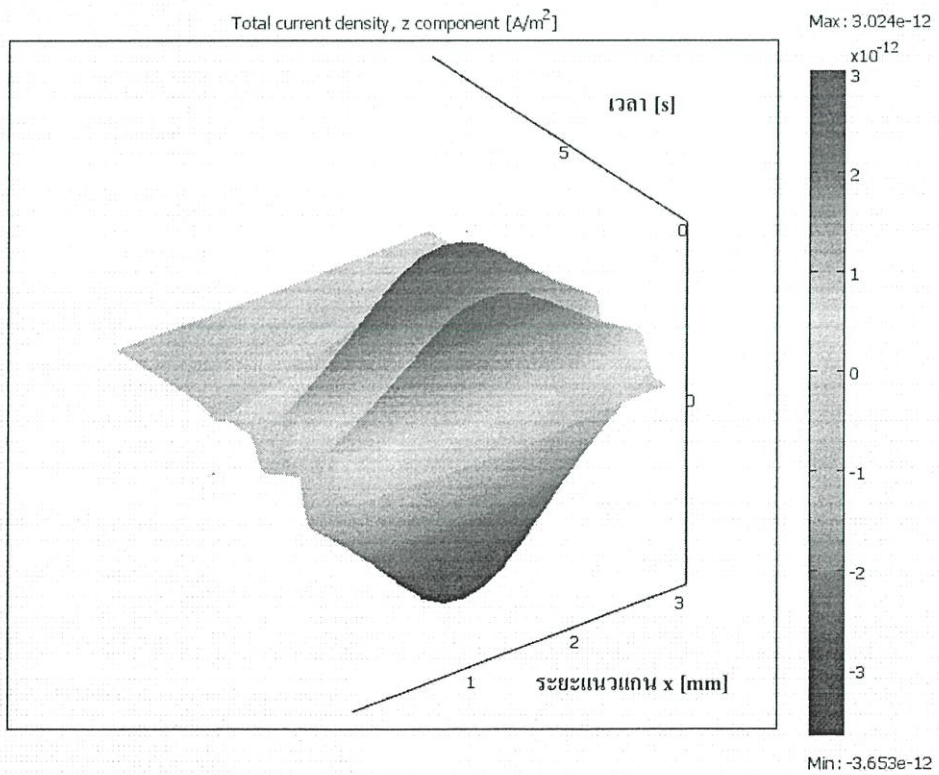


รูปที่ 3.14 คลื่นอัลตราโซนิกที่ได้จำลองรูปแบบคลื่นเสียงที่ความถี่ 5 MHz

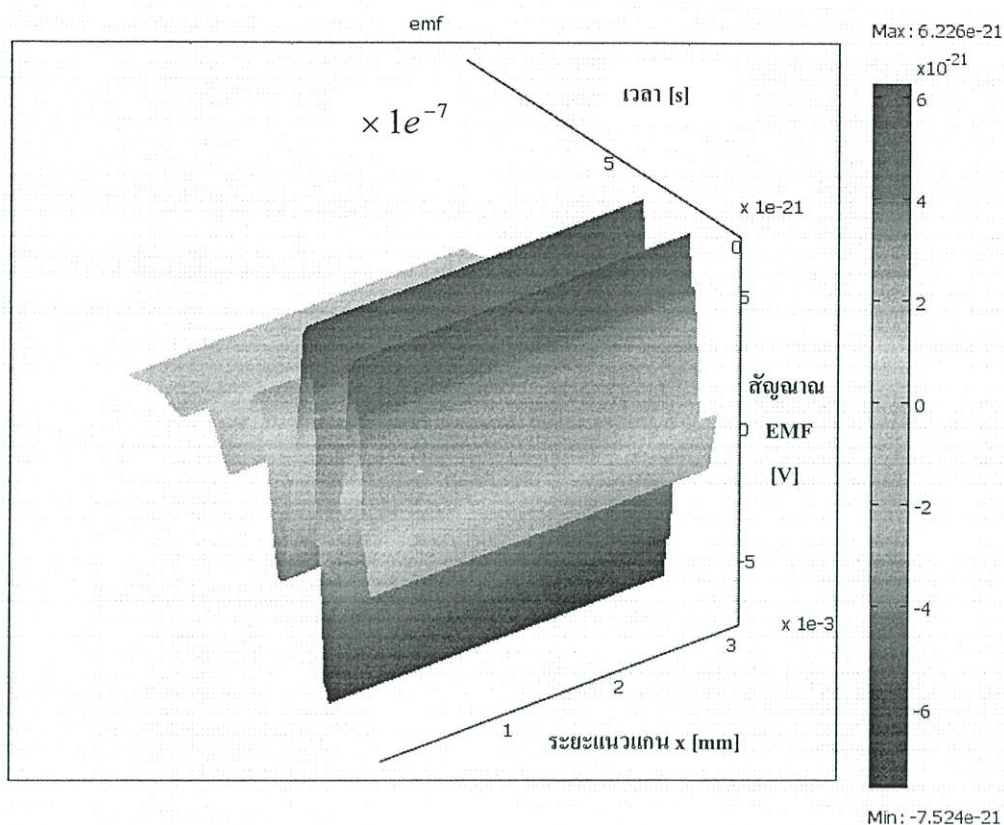
แสดงผลแบบ Cross-Section



รูปที่ 3.15 กระแสในอลูมิเนียมที่เกิดจากสัญญาณอัลตราโซนิกกับสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 3.16 กระแสที่ผิวอลูมิเนียม แสดงผลแบบ Cross-Section



รูปที่ 3.17 สัญญาณคลื่นอัลตราโซนิกที่ได้จากการคำนวณในขดลวด  
แสดงผลแบบ Cross-Section เปลี่ยนแปลงตามเวลา

### วิเคราะห์ผลการทดลองที่ 3.2

จากการทดลองสร้างคลื่นอัลตราโซนิกในรูปแบบคลื่นไซน์และในรูปแบบคลื่นเสียงโดยแปรผันตามเวลาจะเป็นไปตามสมการ 3.4 และ 3.6 โดยกระแสที่เกิดขึ้นก็จะมีรูปร่างของสัญญาณเหมือนกับสัญญาณอัลตราโซนิกแต่มีเฟสที่ตรงข้ามกัน ซึ่งค่าของกระแสจากสมการ Lorentz (สมการ 3.7) ซึ่งรูปแบบกระแสที่วัดแบบ Cross-Section (รูปที่ 3.16) จะเห็นได้ว่ามีค่ามากที่บริเวณศูนย์กลางเนื่องจากสนามแม่เหล็กมีทิศทางในแนวแกน  $x$  ซึ่งเมื่อคำนวณสัญญาณ EMF ที่วัดได้จากขดลวด EMAT ค่าจากสมการที่ 3.8 (รูปที่ 3.17) จะมีรูปร่างของสัญญาณที่เหมือนกันกับสัญญาณอัลตราโซนิกที่สร้างขึ้น (รูปที่ 3.14) แต่เฟสต่างกัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา

### 3.3 การจำลองรูปแบบของคลื่นโดยใช้สมการคลื่น

จากหัวข้อที่ผ่านมาได้ทำการทดลองการจำลองคลื่นอัลตราโซนิกโดยให้อนุภาคเคลื่อนที่ตามที่กำหนดตามสมการซึ่งจะไม่มีคุณสมบัติของคลื่นเชิงกลเช่น การเลี้ยวเบน เป็นต้นดังนั้นการทดลองในหัวข้อนี้จะทำการจำลองคลื่นอัลตราโซนิกโดยใช้สมการคลื่น

การใช้สมการคลื่นในการสร้างแบบจำลองนั้น รูปแบบการสร้างเป็นแบบ PDE Modes (Partial Differential Equations) ในโปรแกรม COMSOL ซึ่งสามารถสร้างโมเดลการทดลอง EMAT แบบเดียวกันกับตอนเริ่มต้น ซึ่งขั้นตอนของการสร้างคลื่นมีดังนี้ จากสมการคลื่น

$$\nabla^2 u(r,t) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u(r,t)}{\partial t^2} = 0 \quad (3.9)$$

กำหนดให้

$$u(r,t) = u(r)e^{j\omega t} \quad (3.10)$$

โดยที่  $u(r,t)$  แทนค่าการเคลื่อนที่ของอนุภาค (particle displacement) ที่ตำแหน่ง  $r$  ณ เวลา  $t$  ใดๆ

$u(r)$  แทนค่าการเคลื่อนที่ของคลื่นที่ตำแหน่ง  $r$

แทนค่า

$$\nabla^2 u(r)e^{j\omega t} + \frac{\omega^2}{c^2} u(r)e^{j\omega t} = 0 \quad (3.11)$$

ซึ่ง  $\omega = 2\pi f$  และ  $k = \frac{2\pi f}{c}$  จะได้

$$\nabla^2 u(r) + k^2 u(r) = 0 \quad (3.12)$$

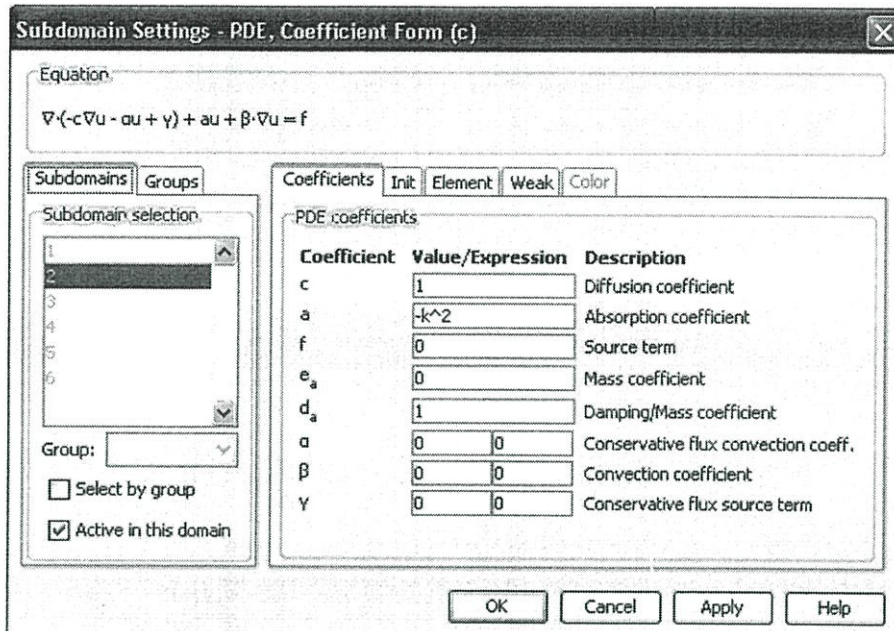
ซึ่งสมการ(3.12) คือสมการ Helmholtz สามารถเปลี่ยนรูปแบบ สำหรับการแพร่กระจายประสานทางเวลา (Time-harmonic propagation) ได้สมการคือ

$$-\nabla \cdot (\nabla u) - k^2 u = 0, \quad k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3.13)$$

สมการของระบบในรูปแบบ PDE (Partial Differential Equations) คือ

$$\nabla \cdot (-c\nabla u - au + Y) + au + \beta \cdot \nabla u = f \quad (3.14)$$

ในส่วนของ Subdomain Settings สามารถกำหนดค่าต่างๆ ในออลูมิเนียมดังรูปที่ 3.18 โดยกำหนดค่าของพื้นผิวของออลูมิเนียมที่ Subdomain Settings ให้ค่า Diffusion coefficient( $c$ ) เท่ากับ 0, Absorption coefficient( $a$ ) เท่ากับ  $-k^2$ , Source term( $f$ ) เท่ากับ 0, Mass coefficient เท่ากับ 0, Damping/Mass coefficient เท่ากับ 1, Conservative flux convection coefficient( $a$ ) เท่ากับ 0, Convection coefficient( $\beta$ ) เท่ากับ 0 และ Conservative flux source term( $Y$ ) เท่ากับ 0 เมื่อแทนค่าต่างในสมการที่ 3.14 ก็จะได้ดังสมการที่ 3.13



รูปที่ 3.18 กำหนดค่า Subdomain Settings ในอูมิเนียม

### การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต(Boundary Conditions)

ในการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต แสดงดังรูปที่ 3.20 โดยกำหนดรูปแบบทางเข้าของคลื่น (Inflow) ทางด้านหัวโพรบ (แสดงเส้นขอบเขตสีฟ้าอ่อน) และค่าออกของคลื่น (outflow) ที่ผิวรอบนอก (แสดงเส้นขอบเขตสีเขียว) ซึ่งเป็นสมการขอบเขตของการดูดกลืนคลื่น (absorbing boundary condition) ซึ่งสามารถกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ Boundary Settings (รูปที่ 3.19) มีสมการดังนี้

$$n.(c\nabla u + au - Y) + qu = g \quad (3.15)$$

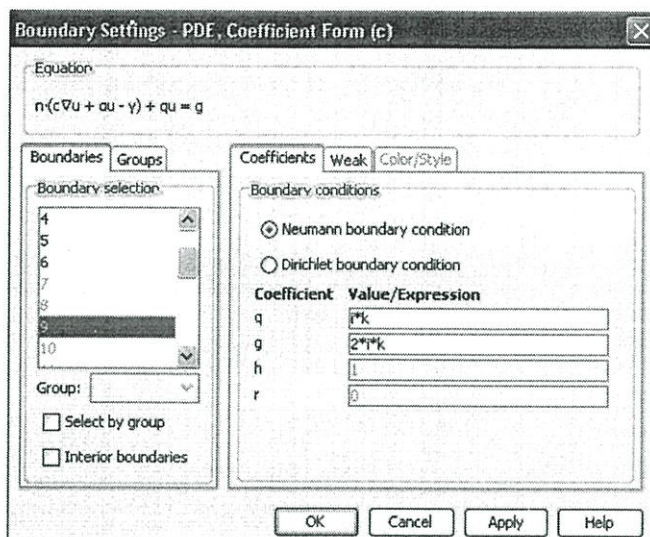
โดยขอบเขตเงื่อนไขเป็นแบบ Neumann (Neumann Boundary Condition) ซึ่งอยู่ในรูปแบบ  $\frac{\partial u}{\partial n} = A$ ; เมื่อ  $A$  คือค่าที่ทราบขนาด

กำหนดค่าขอบเขตของคลื่นขาเข้า(Inflow) โดยให้  $q = i*k$  และ  $g = 2*i*k$  เมื่อแทนค่าในสมการ 3.15 จะได้ผลดังสมการ 3.16 กำหนดค่าของคลื่นขาออก(Outflow) ที่ขอบรอบๆ โดยให้  $q = i*k$  และ  $g = 0$  เป็นกำหนด เพื่อไม่ให้คลื่นทะลุผ่านขอบเขตที่กำหนด เมื่อแทนค่าในสมการ 3.15 จะได้ผลดังสมการ 3.17 เมื่อ  $k$  คือ wave number,  $i$  คือ imaginary unit,  $n$  คือ outward unit ดังแสดงดังรูปที่ 3.19

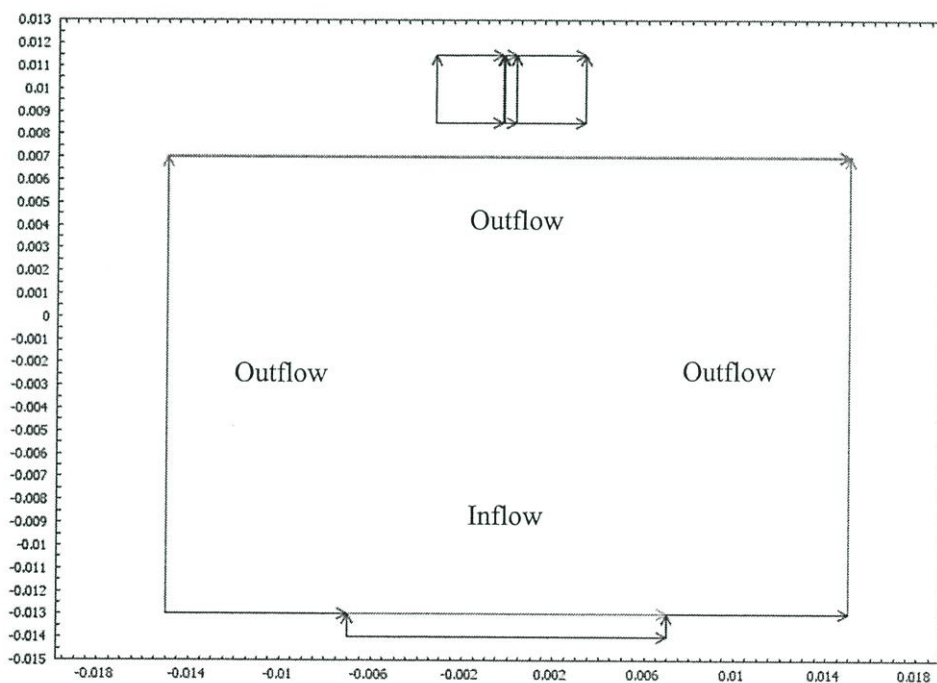
เมื่อทำการคำนวณจะได้ผลดังสมการ

$$n.(\nabla u) + iku = 2ik, \quad \text{Inflow} \quad (3.16)$$

$$n.(\nabla u) + iku = 0, \quad \text{Outflow} \quad (3.17)$$

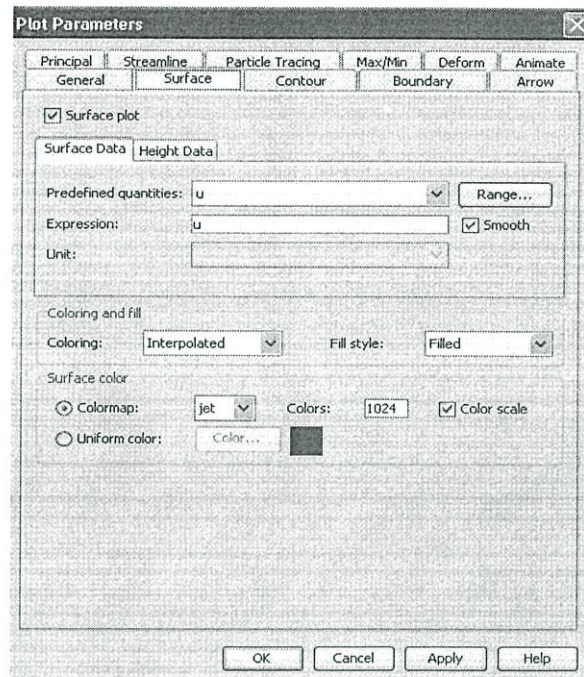


รูปที่ 3.19 กำหนดค่า Boundary Settings

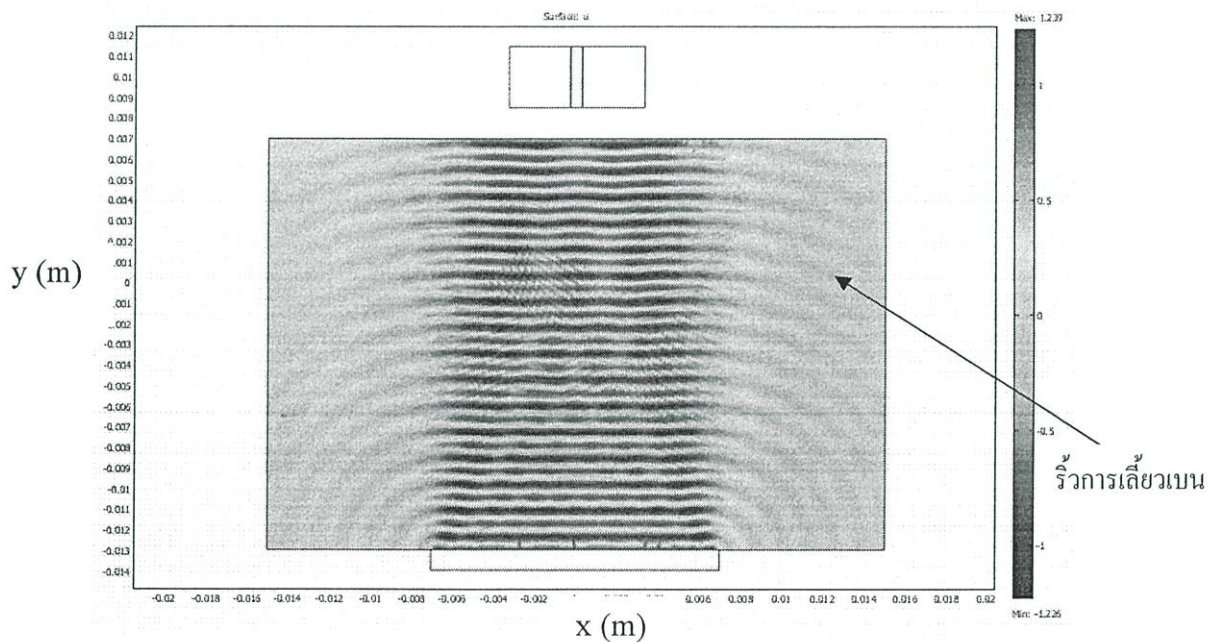


รูปที่ 3.20 เส้นขอบเขตเงื่อนไขที่กำหนด

เมื่อทำการกำหนดค่าต่างๆ ลงในแบบจำลองแล้ว กำหนดการแสดงความแตกต่างของสีผิว (Surface) เป็นค่าการเคลื่อนที่ (displacement) ของอนุภาค ( $u$ ) ทำการ Solve ก็จะได้รูปคลื่นออกมา ดังแสดงในรูปที่ 3.22 จะเห็นได้ว่ามีคลื่นอัลตราโซนิกเคลื่อนที่จากหัวโพรบที่กำหนด และมีเส้นรีวรอยต่างๆ คลื่นซึ่งแสดงการเลี้ยวเบนของคลื่น

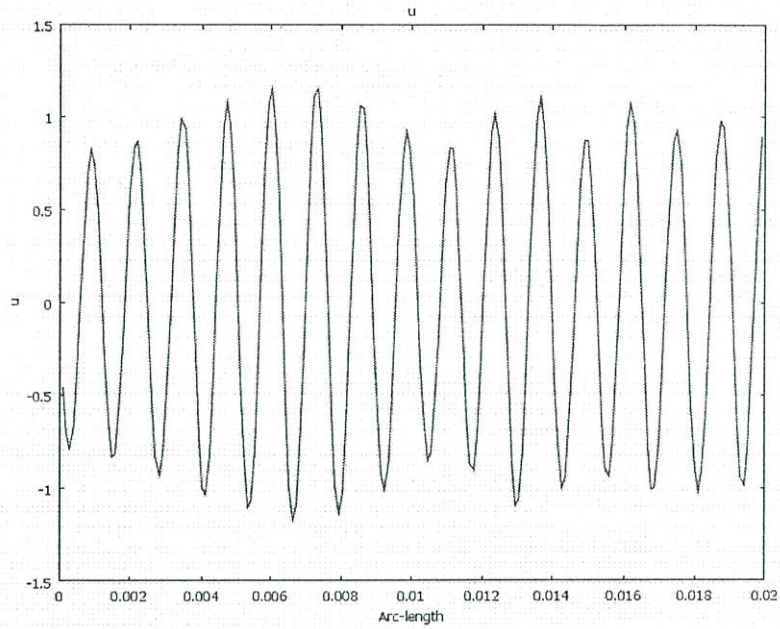


รูปที่ 3.21 การกำหนดรูปแบบการแสดงผลค่าการเคลื่อนที่ของอนุภาค ( $u$ ) แบบระดับสี (Surface)



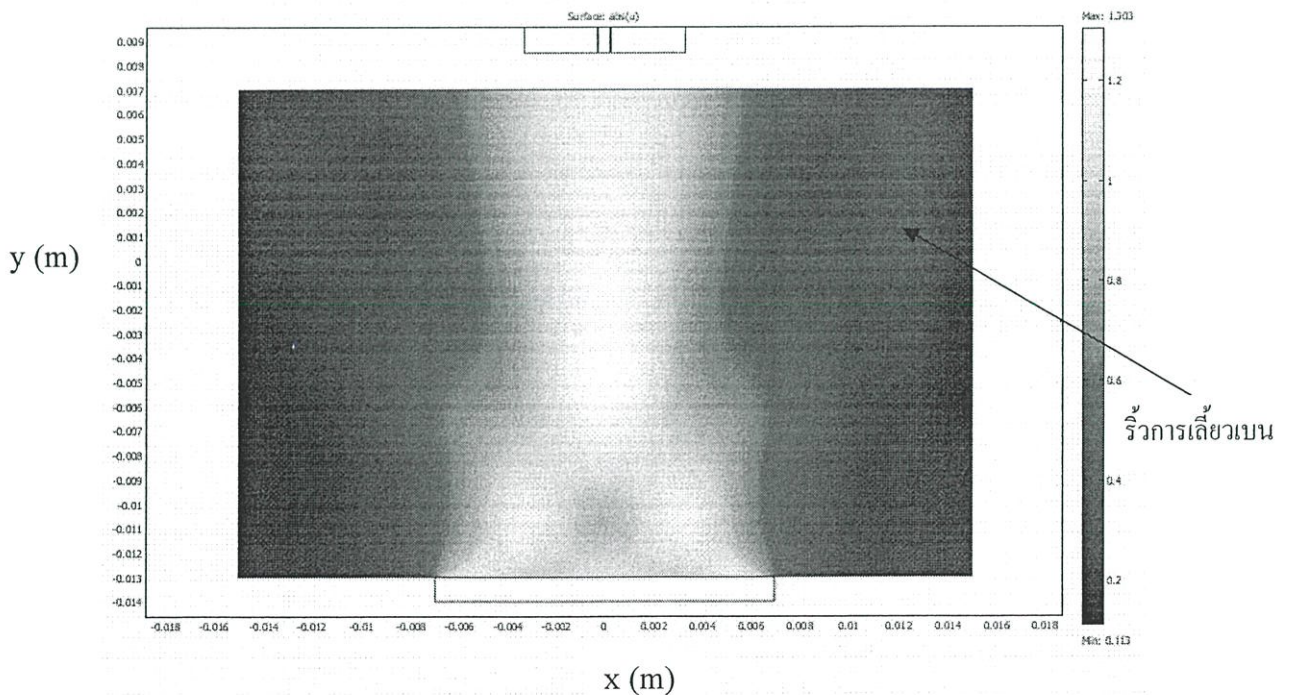
รูปที่ 3.22 คลื่นที่ได้จากการสมการคลื่นที่ความถี่ 5 MHz

รูปแบบสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิกที่สร้างจากสมการคลื่นจะเป็นคลื่นไซน์ดังแสดงในรูปที่ 3.23

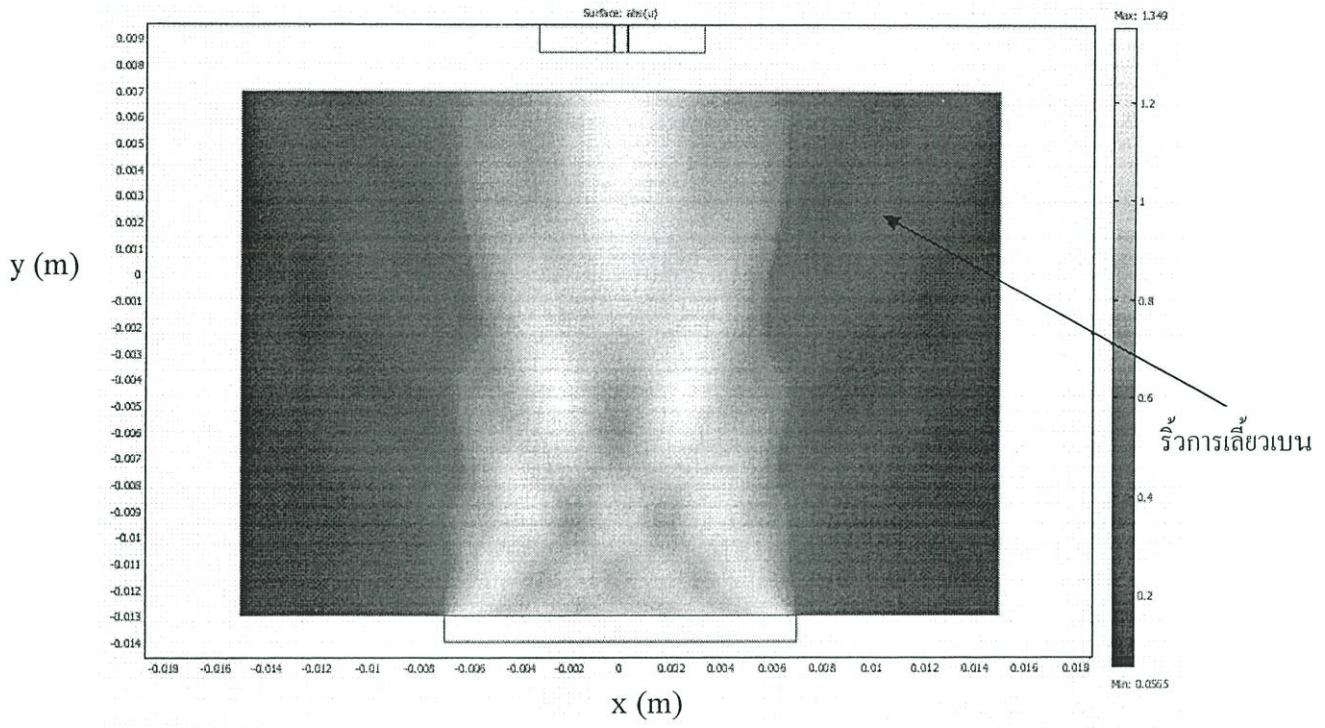


รูปที่ 3.23 สัญญาณคลื่นอัลตราโซนิกที่ได้จากสมการคลื่นความถี่ 5 MHz

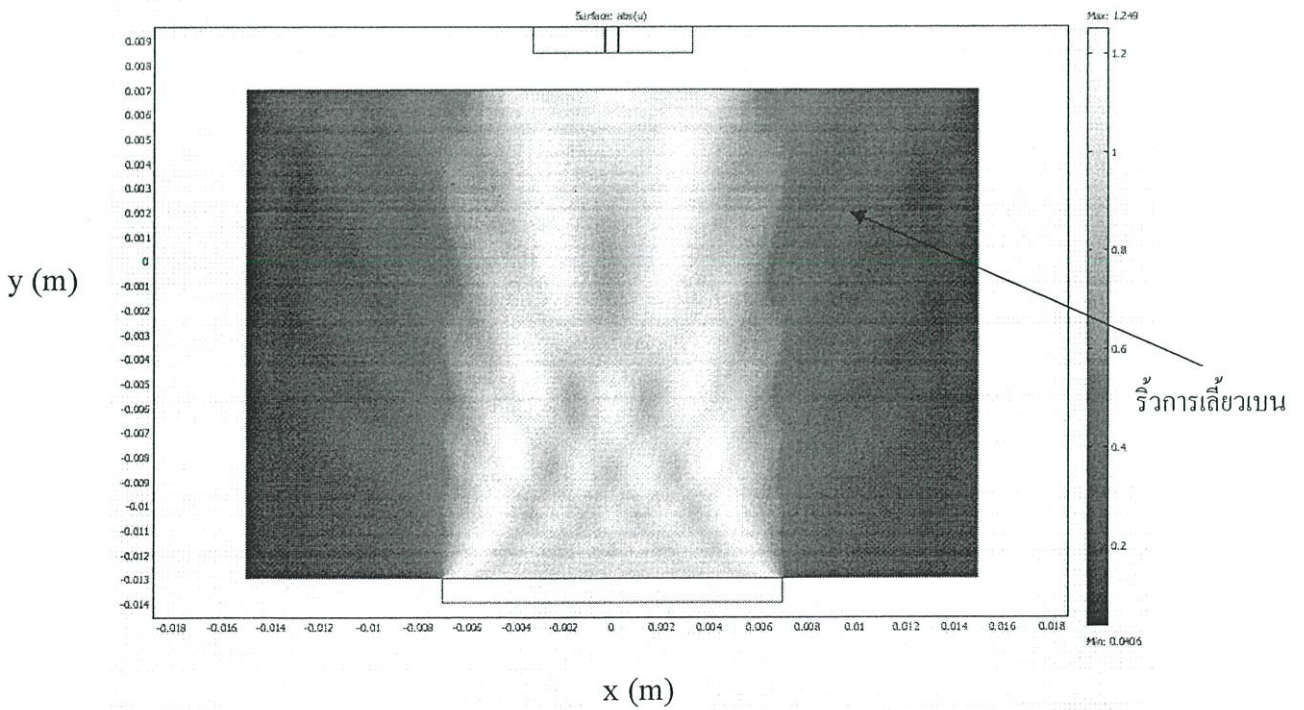
ทำการทดลองดูค่าสัญญาณคลื่นที่เกิดขึ้นที่ความถี่ต่างๆ โดยแสดงผลแบบค่าสัมบูรณ์การเคลื่อนที่ของอนุภาค ( $|u|$ ) เพื่อให้เห็นถึงริ้วรอยการเลี้ยวเบนของคลื่น ดังรูปที่ 3.18



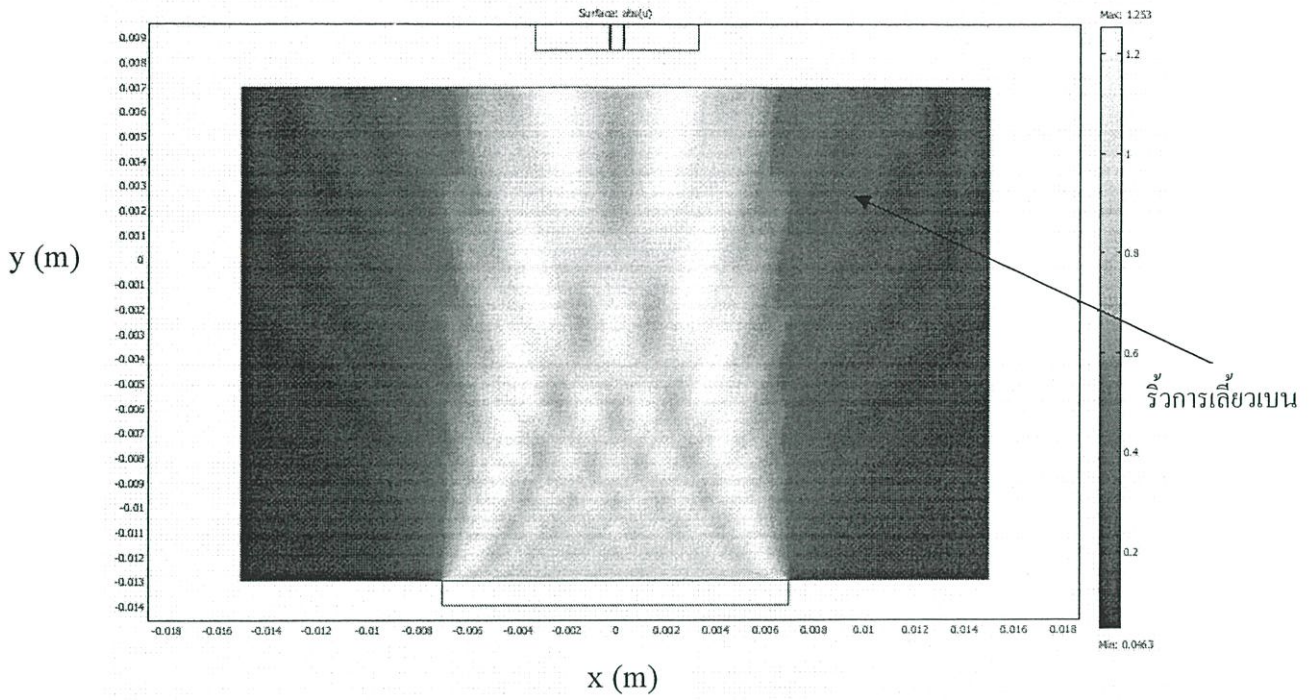
รูปที่ 3.24 ค่าสัมบูรณ์การเคลื่อนที่ของอนุภาค ( $|u|$ ) ที่ความถี่ 1 MHz



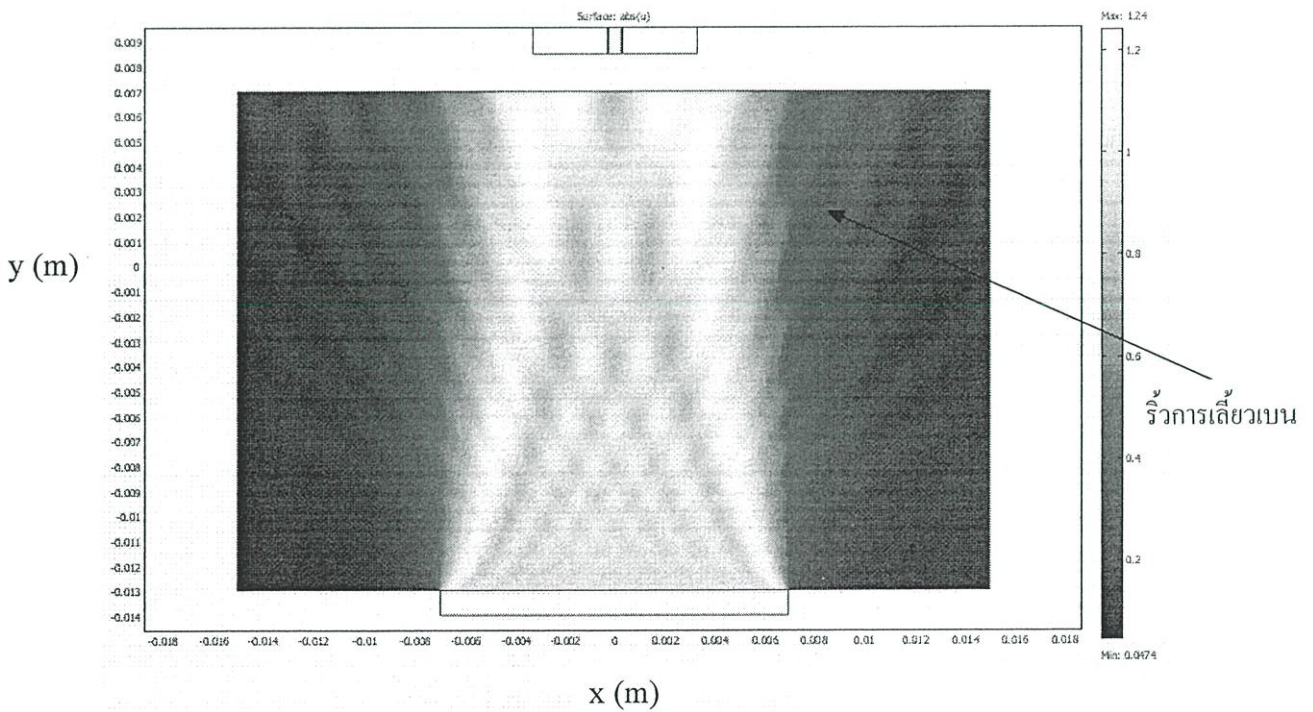
รูปที่ 3.25 ค่าสัมบูรณ์การเคลื่อนที่ของอนุภาค ( $|u|$ ) ที่ความถี่ 2 MHz



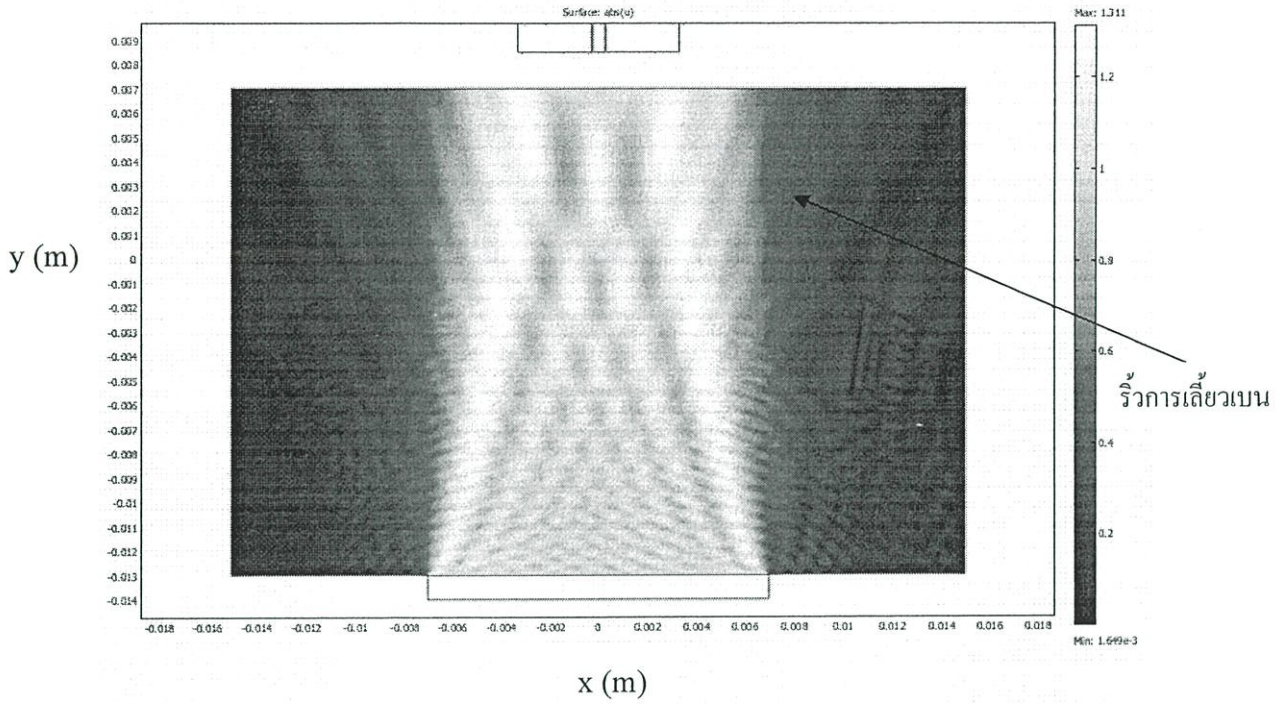
รูปที่ 3.26 ค่าสัมบูรณ์การเคลื่อนที่ของอนุภาค ( $|u|$ ) ที่ความถี่ 3 MHz



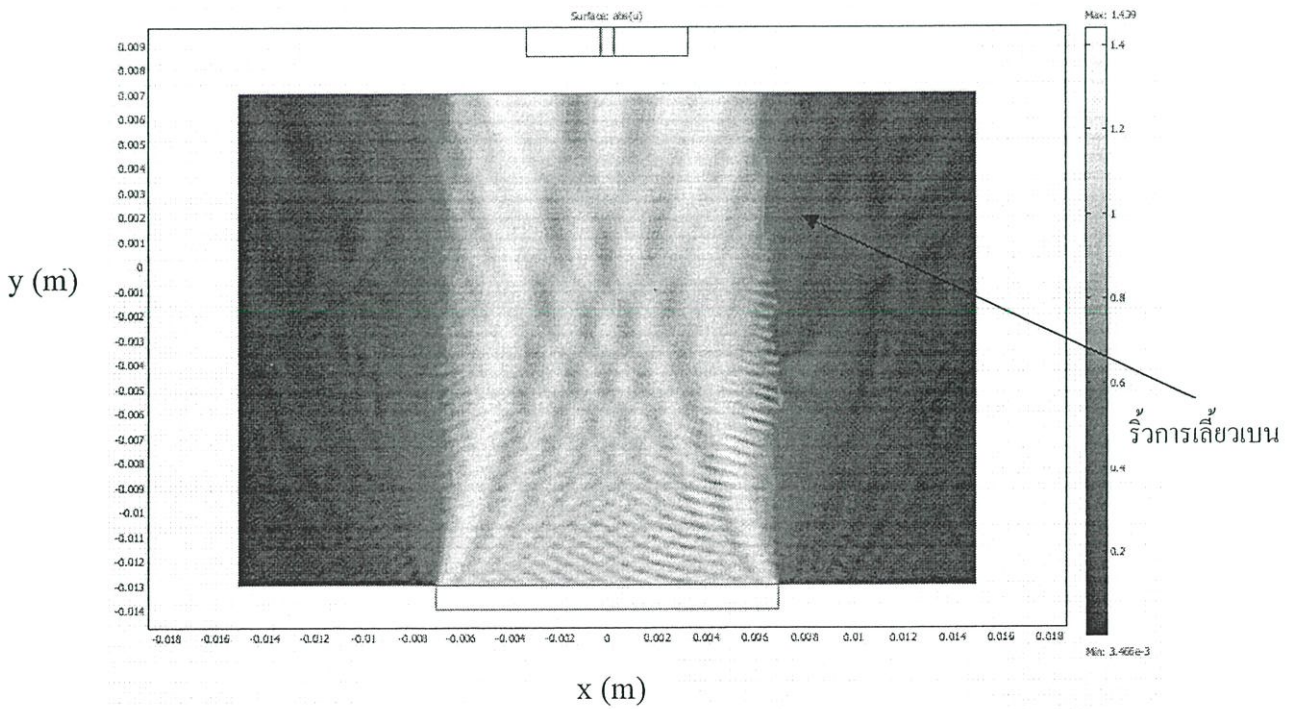
รูปที่ 3.27 ค่าสัมบูรณ์การเคลื่อนที่ของอนุภาค ( $|u|$ ) ที่ความถี่ 4 MHz



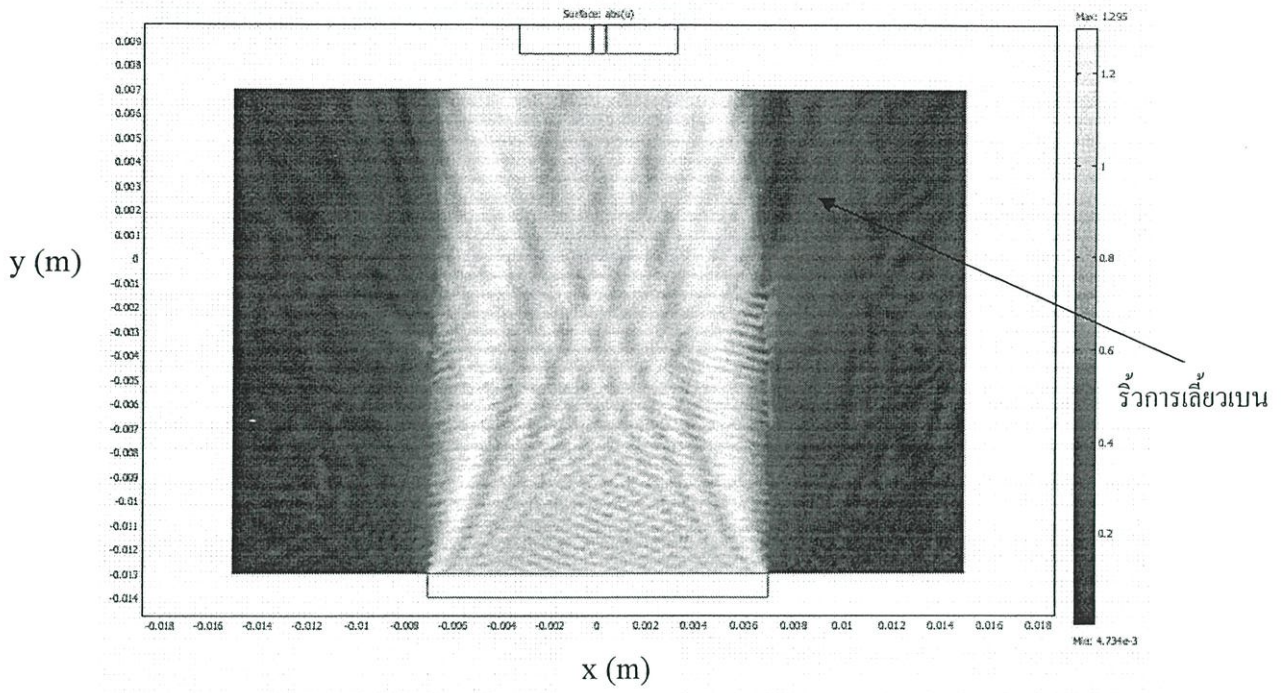
รูปที่ 3.28 ค่าสัมบูรณ์การเคลื่อนที่ของอนุภาค ( $|u|$ ) ที่ความถี่ 5 MHz



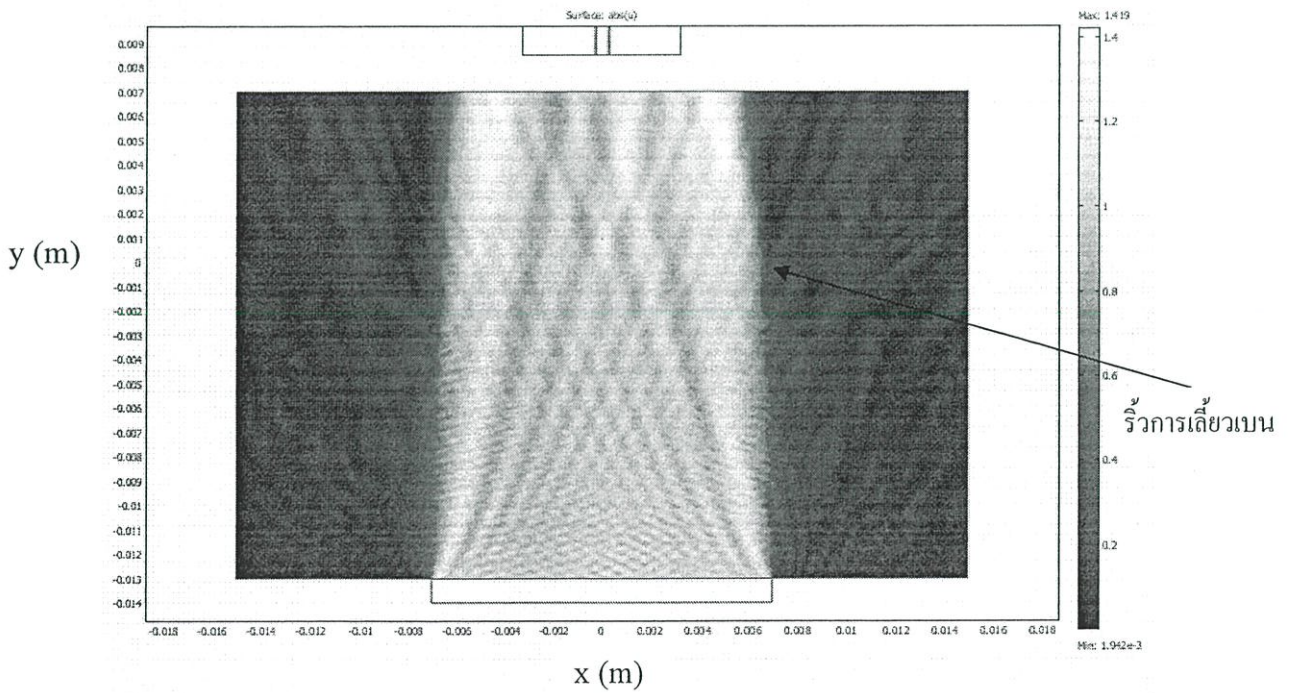
รูปที่ 3.29 ค่าสัมบูรณ์การเคลื่อนที่ของอนุภาค ( $|u|$ ) ที่ความถี่ 6 MHz



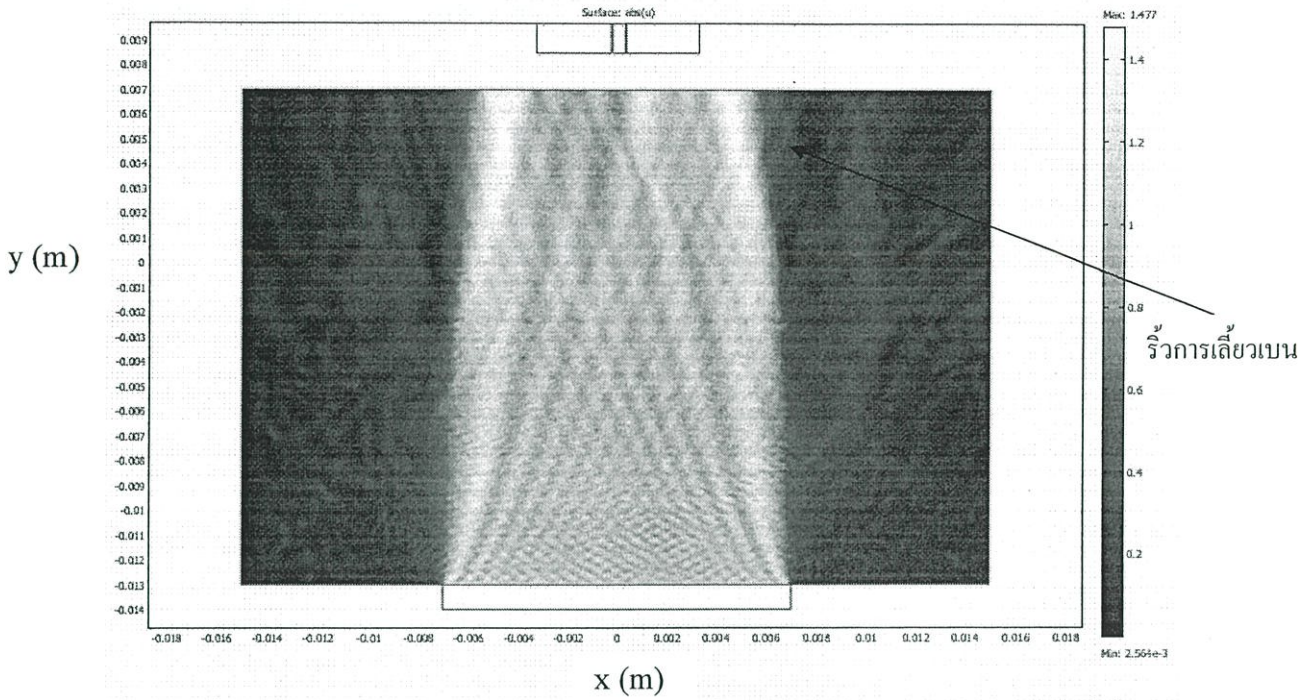
รูปที่ 3.30 ค่าสัมบูรณ์การเคลื่อนที่ของอนุภาค ( $|u|$ ) ที่ความถี่ 7 MHz



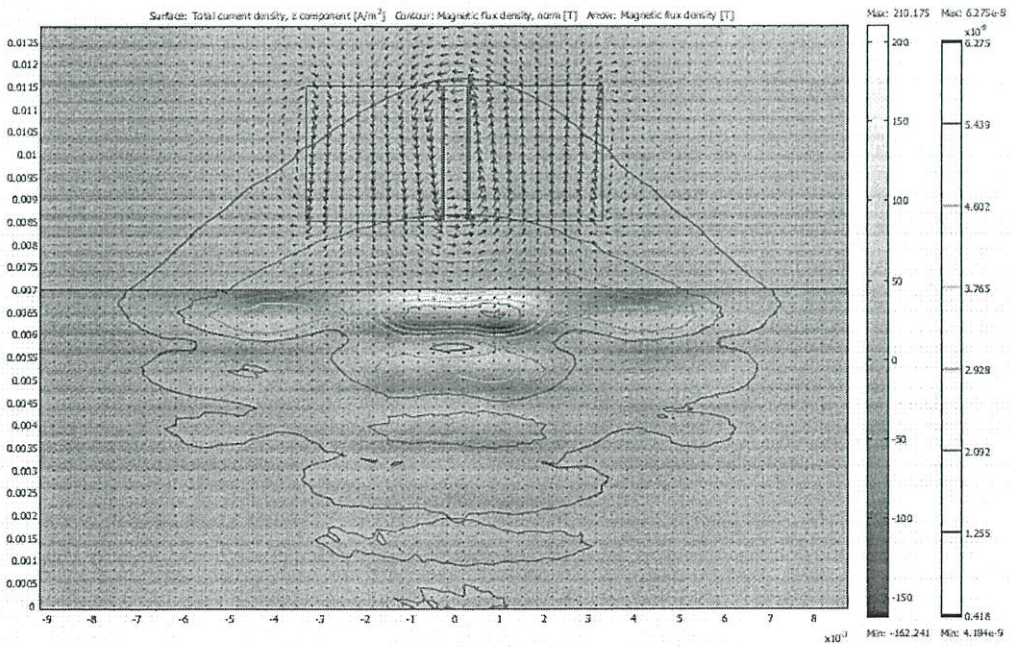
รูปที่ 3.31 ค่าสัมบูรณ์การเคลื่อนที่ของอนุภาค ( $|u|$ ) ที่ความถี่ 8 MHz



รูปที่ 3.32 ค่าสัมบูรณ์การเคลื่อนที่ของอนุภาค ( $|u|$ ) ที่ความถี่ 9 MHz



รูปที่ 3.33 ค่าสัมบูรณ์การเคลื่อนที่ของอนุภาค ( $|u|$ ) ที่ความถี่ 10 MHz



รูปที่ 3.34 กระแสที่เกิดจากคลื่นอัลตราโซนิกและสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแส

### วิเคราะห์ผลการทดลองที่ 3.3

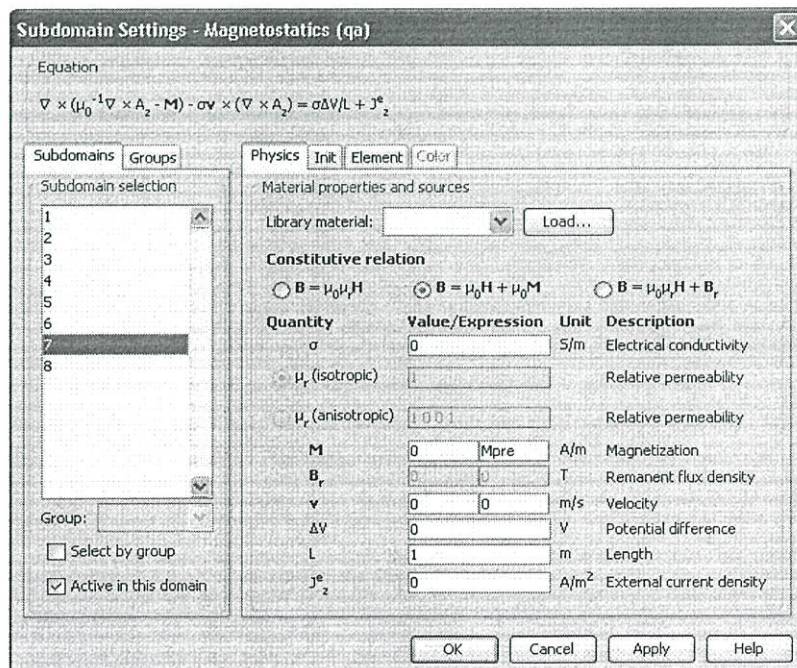
การจำลองคลื่นอัลตราโซนิกโดยสร้างจากสมการคลื่น มีรูปร่างของคลื่นเป็นแบบคลื่นไซน์แสดงดังรูปที่ 3.23 และแสดงผลในรูปแบบการเคลื่อนที่ของอนุภาค ( $u$ ) แสดงดังรูปที่ 3.22 แสดงระดับสีเป็นแอมพลิจูด และมีคุณสมบัติของคลื่นซึ่งเป็นคลื่นกล โดยคุณลักษณะของการเลี้ยวเบนของคลื่นจากค่าสัมบูรณ์การเคลื่อนที่ของอนุภาค  $|u|$  ซึ่งจะเห็นว่ามี การเลี้ยวเบนของคลื่นเกิดขึ้น และเมื่อทำการกำหนดคลื่นอัลตราโซนิกมีความถี่มากขึ้น (ตั้งแต่ 1-10 MHz) จะทำให้การเลี้ยวเบนของคลื่นน้อยลง (สังเกตการเลี้ยวเบนดังรูปที่ 3.24-3.33) เป็นไปตามคุณสมบัติของคลื่นกลนั่นเอง รูปที่ 3.34 แสดงกระแสที่เกิดจากคลื่นอัลตราโซนิกที่ได้จากสมการคลื่นและทำให้เกิดสนามแม่เหล็กกรอบ โดยสัญญาณ EMF ที่รับได้จากขดลวด EMAT ก็จะมีลักษณะเหมือนสัญญาณในรูปที่ 3.10 คือมีสัญญาณลดลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล

### 3.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการตอบสนองสัญญาณของ EMAT

ทำการทดลองถึงปัจจัยที่มีผลต่อการตอบสนองสัญญาณอัลตราโซนิก โดยใช้ EMAT ทำการทดลองโดยแยกปัจจัยต่างๆดังต่อไปนี้

#### 3.4.1 ค่าแม่เหล็กไนร์เซชัน (Magnetization)

ปัจจัยแรกคือค่าความแรงของแม่เหล็ก โดยการเปลี่ยนแปลงค่าแม่เหล็กไนร์เซชัน (Magnetization) โดยจะทำการกำหนดค่าที่ Subdomain Settings ของแม่เหล็กทำการเปลี่ยนเป็นค่าต่างๆ ที่ค่า Constant ตามตารางที่ 3.1 โดยกำหนดระยะห่างของหัววัดสัญญาณกับลูมิเนียมเป็นระยะ 1 mm ความถี่ที่ 5 MHz

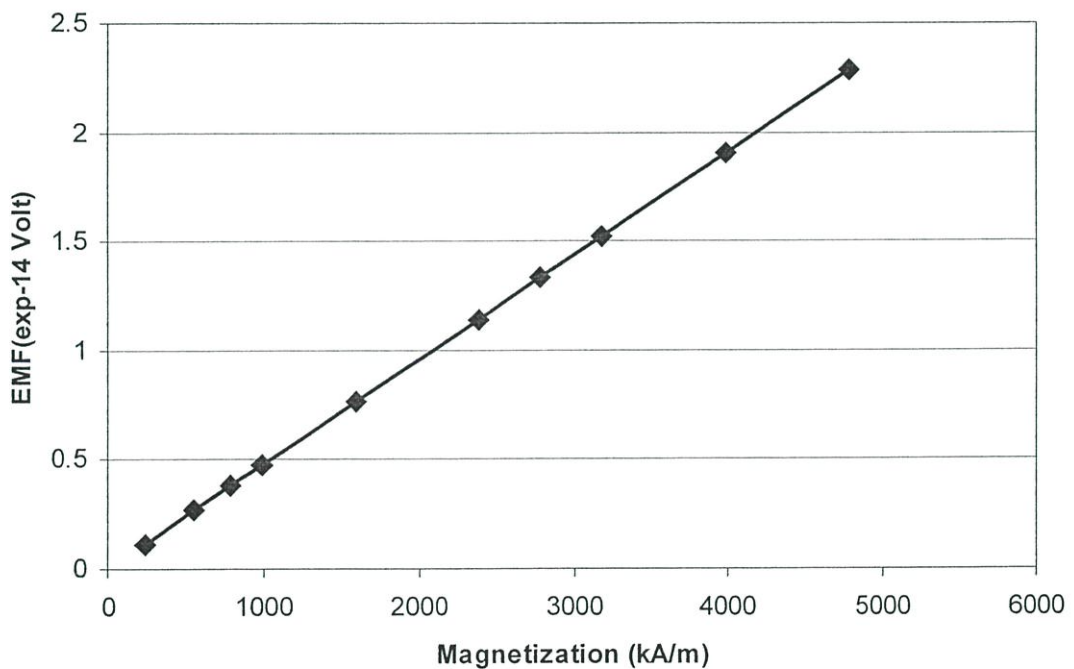


รูปที่ 3.35 กำหนดค่าแม่เหล็กไนร์เซชันที่ Subdomain Settings

ตารางที่ 3.1 ค่าแมกเนไตร์เซชันที่มีผลต่อสัญญาณ EMF

| Magnetization(kA/m) | EMF $\times 10^{-15}$ (V) |
|---------------------|---------------------------|
| 236                 | 1.12885                   |
| 557                 | 2.66428                   |
| 796                 | 3.80749                   |
| 995                 | 4.75936                   |
| 1592                | 7.61497                   |
| 2388                | 11.4225                   |
| 2786                | 13.3262                   |
| 3184                | 15.2299                   |
| 3980                | 19.0374                   |
| 4776                | 22.8449                   |

ผลของสัญญาณ EMF (V) ที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงค่าแมกเนไตร์เซชันนำมาพล็อตกราฟ ดังแสดงดังรูปที่ 3.36



รูปที่ 3.36 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง EMF กับ Magnetization

#### วิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลอง 3.4.1

เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าแมกเนไตร์เซชันตามค่ามาตรฐานตามตาราง ผลที่ได้จากการวัดสัญญาณเห็นได้ว่า เมื่อค่าแมกเนไตร์เซชันเพิ่มขึ้นค่า EMF ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเป็นแบบเส้นตรงจากสมการความสัมพันธ์ระหว่าง  $\vec{M}$  และ  $\vec{H}$  ได้สมการนี้  $\vec{M} = x_m \vec{H}$  เมื่อ  $x_m$  เป็นค่าความซึมซาบทางแม่เหล็ก (Magnetic Sceptibility)

ดังนั้น

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + x_m \vec{H})$$

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_R \vec{H}$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H}$$

$$\vec{B} = \frac{\mu}{x_m} \vec{M}$$

เมื่อ

$\mu$  คือค่าเพอร์เมียบิลิตี

$\mu_0$  คือค่าเพอร์เมียบิลิตีของFree Space มีค่าเท่ากับ  $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$

$\mu_R$  คือค่าเพอร์เมียบิลิตีเฉพาะวัสดุ เมื่อ  $\mu_R = 1 + x_m$

ซึ่ง EMF คำนวณจาก  $\vec{B}$  โดย

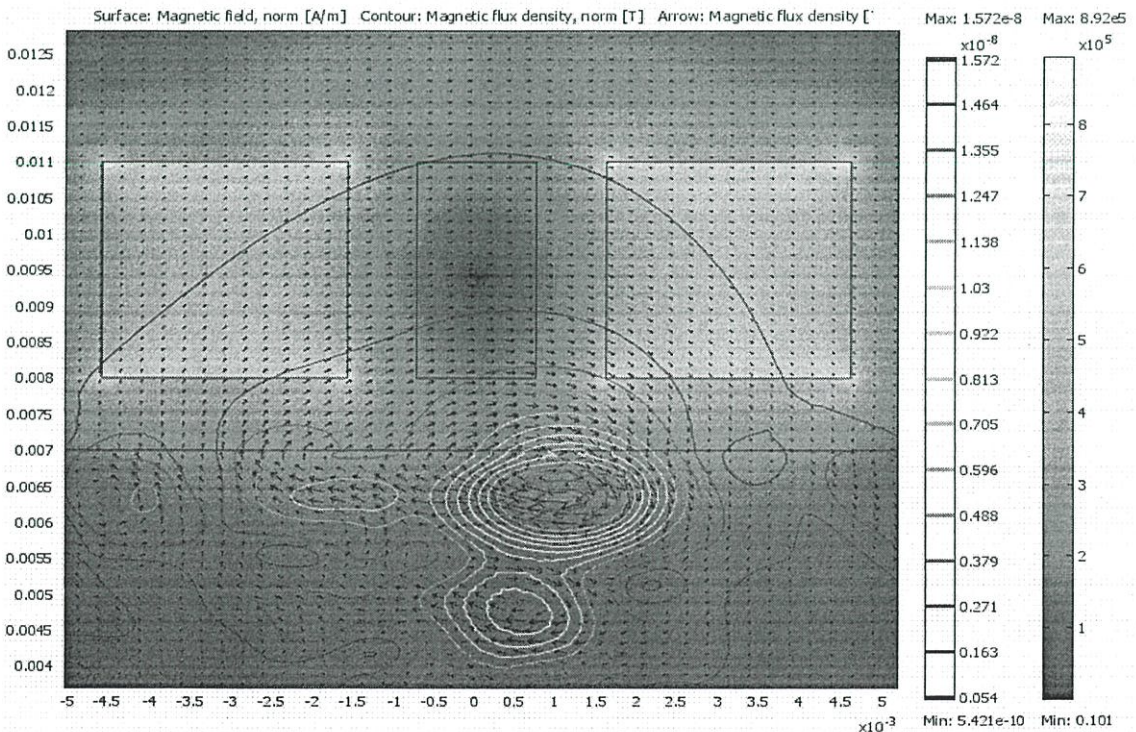
$$EMF = -\frac{\partial}{\partial t} \iint \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

ได้ค่าความสัมพันธ์แบบเส้นตรง

$$EMF = -\frac{\partial}{\partial t} \iint \frac{\mu}{x_m} \vec{M} \cdot d\vec{S}$$

### 3.4.2 พื้นที่ในการรับสัญญาณ

ปัจจัยสองคือพื้นที่รับสัญญาณซึ่งเปรียบเสมือนเป็นการเพิ่มจำนวนรอบของขดลวด คือเมื่อทำการเพิ่มจำนวนรอบของขดลวดพื้นที่การรับสัญญาณก็จะมีขนาดมากขึ้นด้วย โดยกำหนดพื้นที่ของขดลวดให้มีความสูงคงที่ที่ 3 mm และมีความกว้างเป็นค่าต่างๆดังแสดงในตารางที่ 3.2 และกำหนดค่าความแรงแม่เหล็ก(Magnetization)  $\vec{M}$  ที่ 995kA/m ระยะห่างระหว่างแม่เหล็กสองชิ้นห่าง 3 mm ระยะห่างของหัววัดสัญญาณกับลูมิเนียมเป็นระยะ 1 mm ความถี่ที่ 5 MHz ทำการหาค่าสัญญาณ EMF กับระยะความกว้างของขดลวด EMAT ดังตารางที่ 3.2

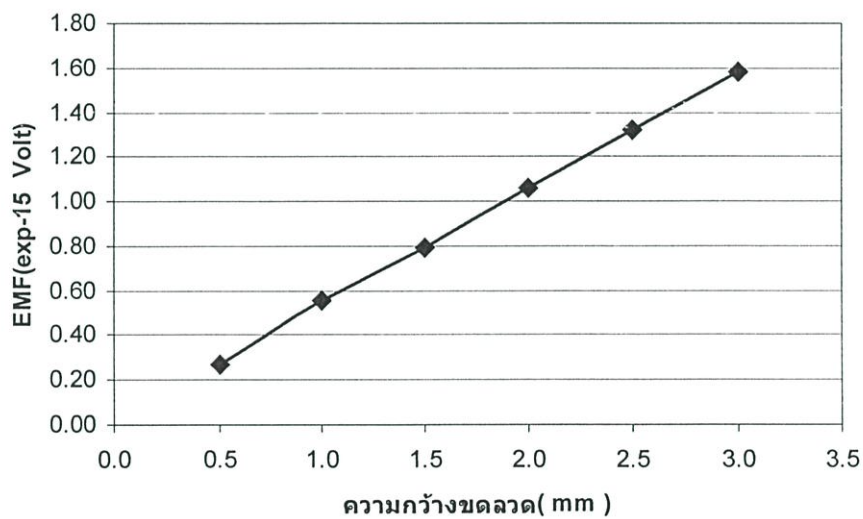


รูปที่ 3.37 การกำหนดความกว้างของขดลวดที่ขนาดต่างๆ และสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแส

ตารางที่ 3.2 พื้นที่รับสัญญาณขดลวดกับสัญญาณ EMF

| ความกว้างพื้นที่ขดลวด (mm) | EMF $\times 10^{-15}$ (V) |
|----------------------------|---------------------------|
| 0.5                        | 0.26564                   |
| 1.0                        | 0.53054                   |
| 1.5                        | 0.79421                   |
| 2.0                        | 1.05650                   |
| 2.5                        | 1.31772                   |
| 3.0                        | 1.57855                   |

นำผล EMF จากตารางที่ 3.2 มาพล็อตกราฟได้



รูปที่ 3.38 กราฟสัญญาณ EMF กับพื้นที่รับสัญญาณของขดลวด

วิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลอง 3.4.2

จากกราฟจะเห็นได้ว่าเป็นกราฟเส้นตรงและมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งก็คือเมื่อจำนวนขดลวดมีจำนวนมากก็จะทำให้สัญญาณมีค่ามากขึ้นด้วยซึ่งเป็นไปตามสมการ

$$\begin{aligned}
 emf &= -n \frac{d\phi}{dt} = -\frac{\partial}{\partial t} \iint B \cdot ds \\
 &= -\frac{\partial}{\partial t} \iint (\nabla \times A) \cdot ds = -\int_c \frac{\partial A}{\partial t} \cdot dl
 \end{aligned}$$

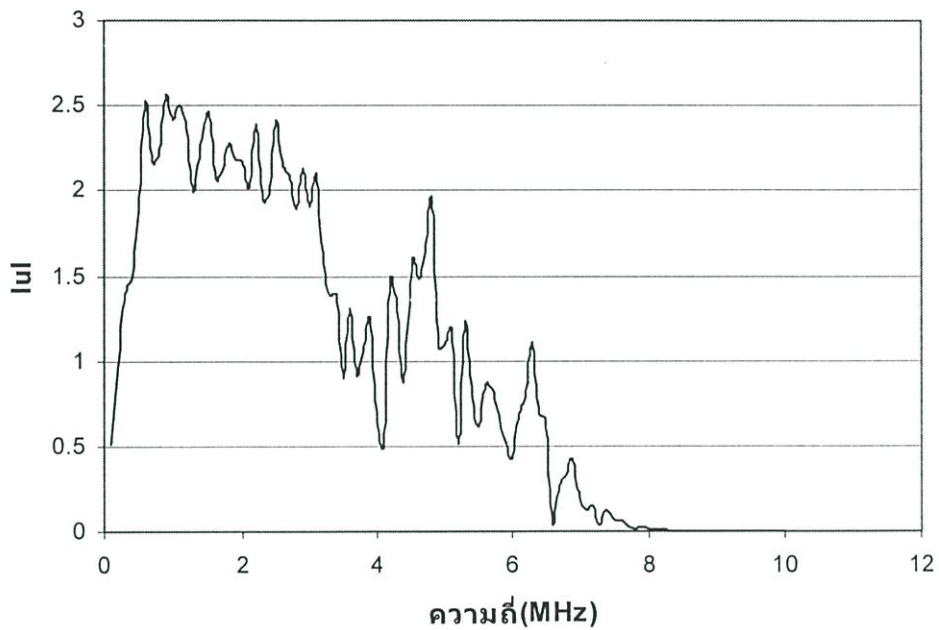
เมื่อ  $n$  คือ จำนวนรอบของขดลวด,  $\phi$  คือเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้า (flux linkage)

### 3.4.3 ผลการตอบสนองเชิงความถี่

#### 3.4.3.1 สัญญาณกับความถี่

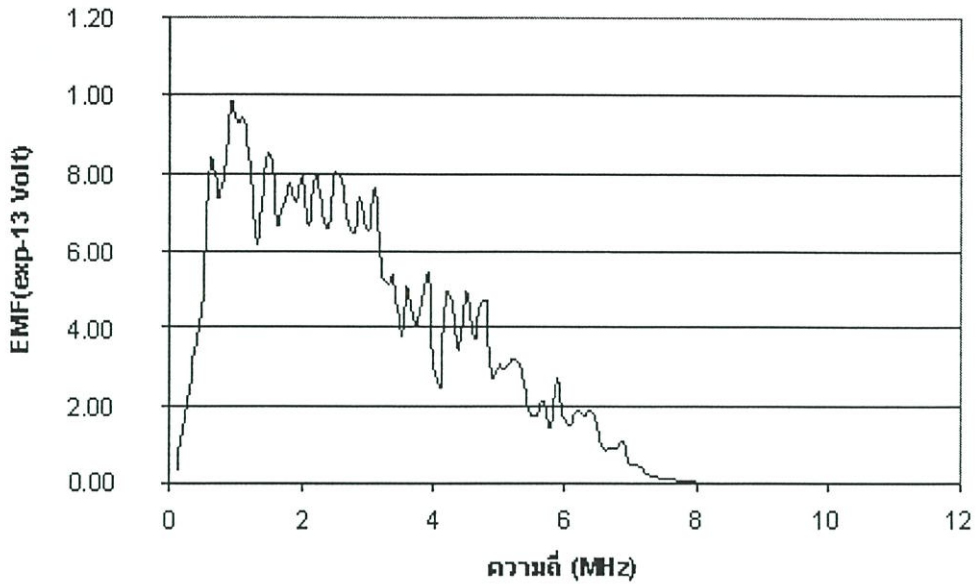
ปัจจัยที่สามคือจะดูผลการตอบสนองของสัญญาณเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าของความถี่ ตั้งแต่ 0.1-10 MHz ทำการเปลี่ยนแปลงทีละ 0.1 MHz โดยกำหนดค่าความแรงแม่เหล็ก (Magnetization) ไว้ที่  $995 \text{ kA/m}$  ระยะห่างของหัววัดสัญญาณกับอลูมิเนียมเป็นระยะ 0 mm

ทำการพอร์ตค่าของแอมพลิจูดของการเคลื่อนที่ ( $|\mu|$ ) ที่ความถี่ต่างๆ ที่บริเวณขอบบนของอลูมิเนียมที่จุดในจุดหนึ่งแสดงผลได้ดังกราฟ



รูปที่ 3.39 ค่าสัมบูรณ์แอมพลิจูดของคลื่นอัลตราโซนิกกับความถี่ในผิวอลูมิเนียม

ทำการวัดค่า EMF ของสัญญาณที่ได้จากขดลวดที่ระยะห่างจากผิวอลูมิเนียม 0 มิลลิเมตร ที่ความถี่ต่างๆ โดยทำการปรับค่าความถี่ทีละ 0.1 MHz ตั้งแต่ 0.1 MHz จนถึง 10 MHz แล้วนำมาวาดกราฟ จะได้



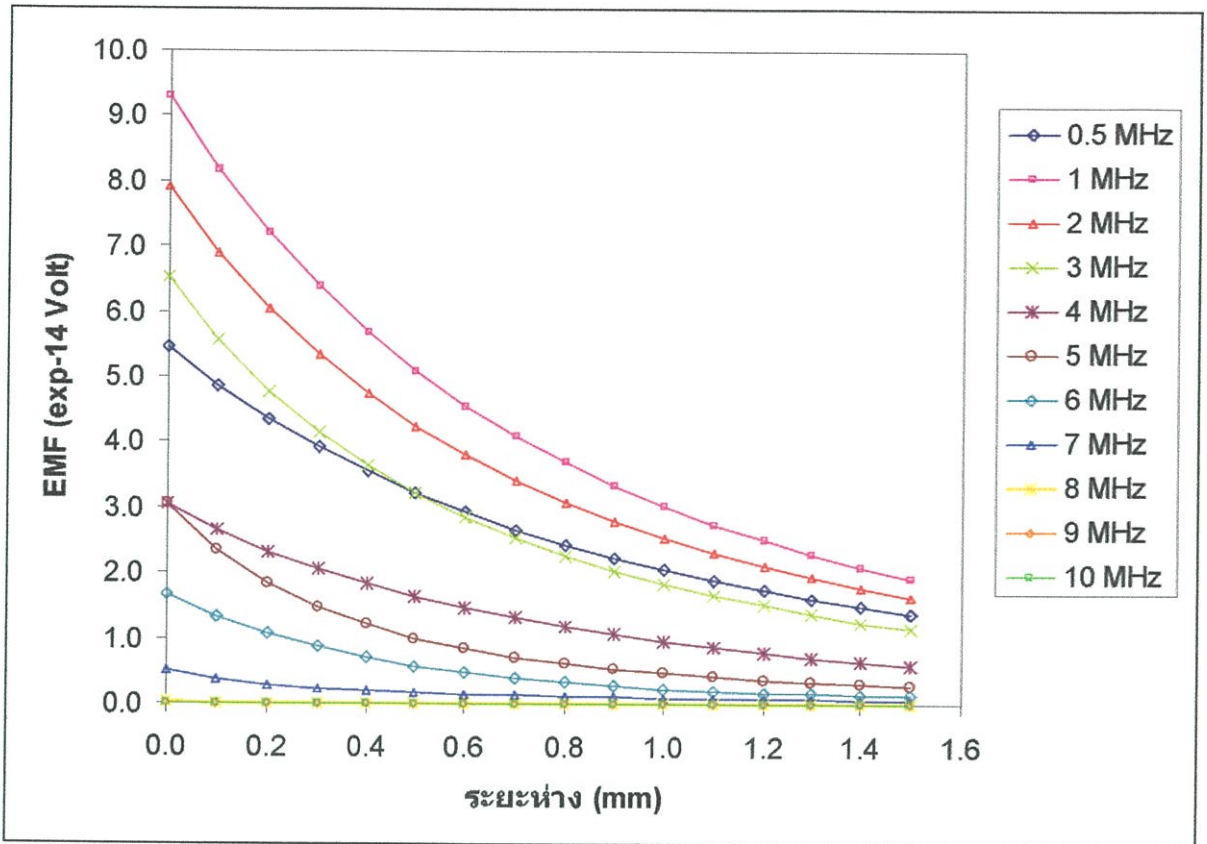
รูปที่ 3.40 สัญญาณ EMF กับความถี่ในขดลวดเหนี่ยวนำ

#### วิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลอง 3.4.3.1

จากการทดลองผลของค่าสัมบูรณ์การเคลื่อนที่  $|u|$  ที่จุดบนผิวของอลูมิเนียมจะเห็นได้ว่าในช่วงแรก(0-1MHz) มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จากนั้นในช่วงที่สอง(1-3MHz) มีการรักษาระดับของสัญญาณแต่ก็มีการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณเล็กน้อย ในช่วงที่สาม(3-8MHz) สัญญาณมีค่าลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งมีค่าน้อยมาก(8-10MHz) ซึ่งสัญญาณEMF ที่วัดได้จากขดลวดก็จะมีลักษณะของกราฟใกล้เคียงกับสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิก(u) ที่ได้สร้างขึ้นในผิวอลูมิเนียม ซึ่งการรับสัญญาณโดยการเปลี่ยนแปลงความถี่(แบนวิดท์) จะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น แบบโมเดลจำลอง, การสร้างพื้นที่ในการคำนวณ(mesh)

#### 3.4.3.2 สัญญาณกับระยะห่างหัววัดEMAT กับอลูมิเนียม

ปัจจัยที่สี่คือระยะห่างระหว่างหัววัดกับอลูมิเนียม โดยการทดลองจะกำหนดระยะห่างตั้งแต่ 0- 1.5 mm กำหนดค่าความแรงแม่เหล็ก(Magnetization) ไว้ที่  $995kA/m$  ความถี่กำหนดเป็นค่าตั้งแต่ 0.5-10 MHz นำผล EMF ที่ได้มาพล็อตกราฟจะได้



รูปที่ 3.41 การเปลี่ยนแปลงความถี่และระยะห่างที่มีผลต่อการตอบสนองสัญญาณ

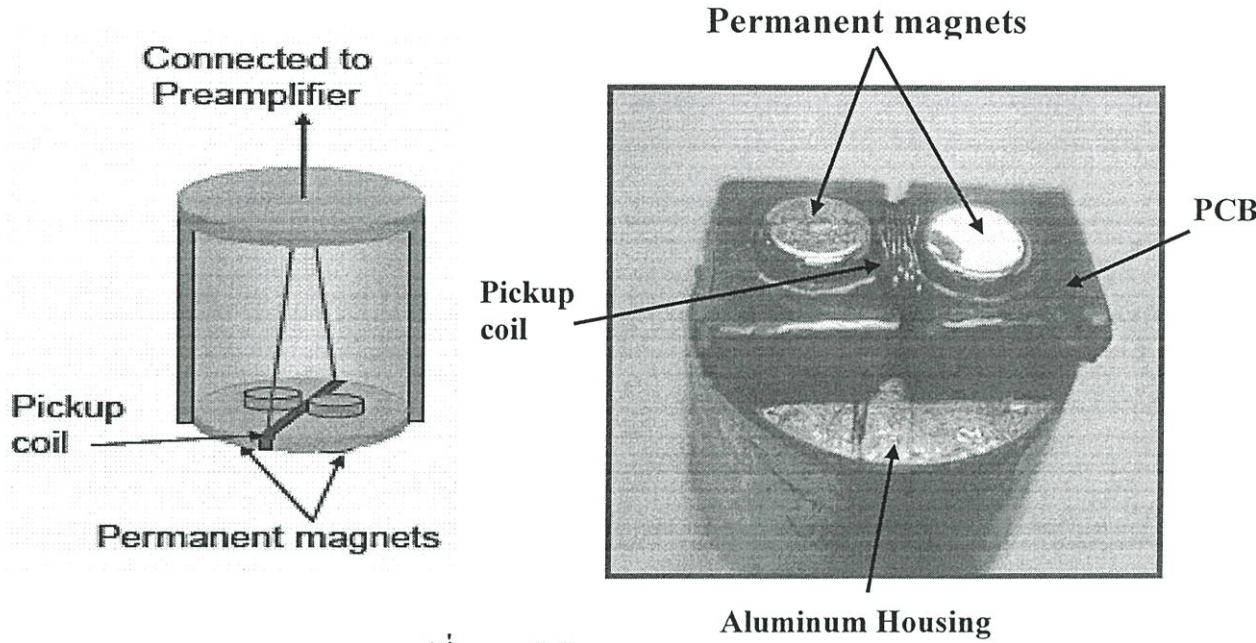
#### วิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลอง 3.4.3.2

จากผลการทดลองดังรูปที่ 3.41 จะเห็นได้ว่าเมื่อวัดค่า EMF ที่ค่าความถี่ต่างๆ แนวโน้มของสัญญาณเมื่อทำการเปลี่ยนระยะห่างระหว่างหัววัดกับอลูมิเนียม มีค่ามากที่สุดเมื่อมีระยะติดกับอลูมิเนียมจากนั้นจะมีแนวโน้มลดลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล เมื่อทำการหาค่าสมการของสัญญาณที่ความถี่ 5 MHz ก็จะได้สมการดังนี้ ซึ่งสามารถนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงทำยบท

$$y = 2 \times 10^{-14} e^{-1.5639x} \quad (3.18)$$

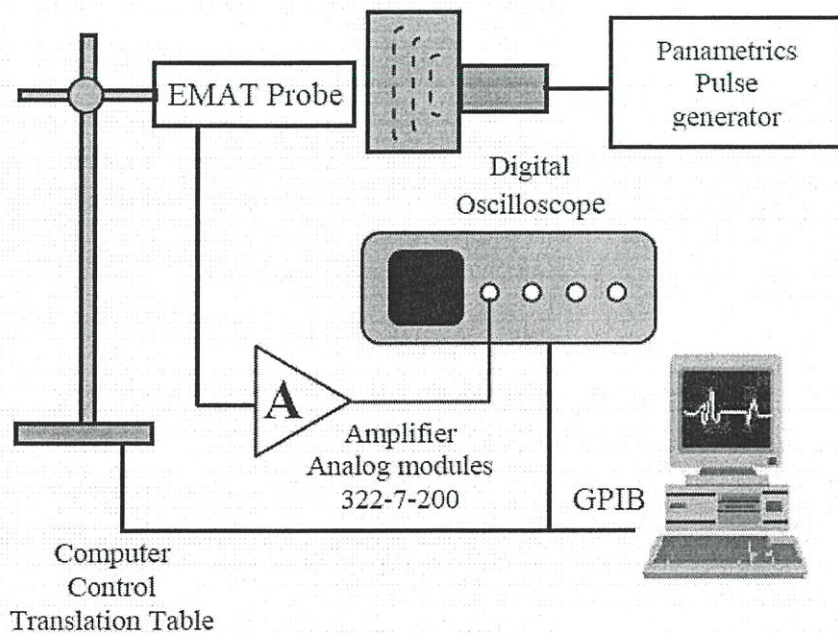
### 3.5 การทดลองจริงโดยเปรียบเทียบผลที่ได้กับการจำลอง

ต่อไปเป็นส่วนของการทดลองจริง(Hardware) แล้วนำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบกับที่ได้กับการจำลอง (Simulation) โดยดูแนวโน้มของสัญญาณ ทำการทดลองโดยกำหนดค่าต่างๆ ให้มีความใกล้เคียงกับหัวข้อของการจำลองดังนี้คือ ขนาดของแม่เหล็กสองขั้วทรงกระบอกมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 mm สูง 3 mm ฝังในแผ่น PCB ขดลวดที่ใช้เป็นเบอร์ 42 ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.1 mm จำนวนรอบการพัน 50 รอบ พื้นที่รับสัญญาณของขดลวดขนาด 0.5 mm×3 mm วางบนแท่งอลูมิเนียมทรงกระบอกเพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนซึ่งมากจากภายนอก แสดงดังรูป 3.42



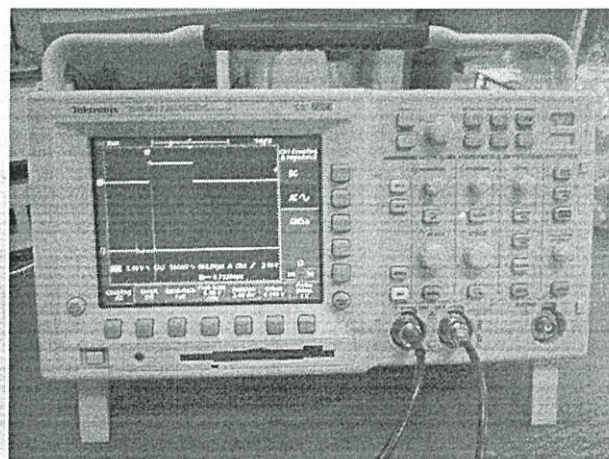
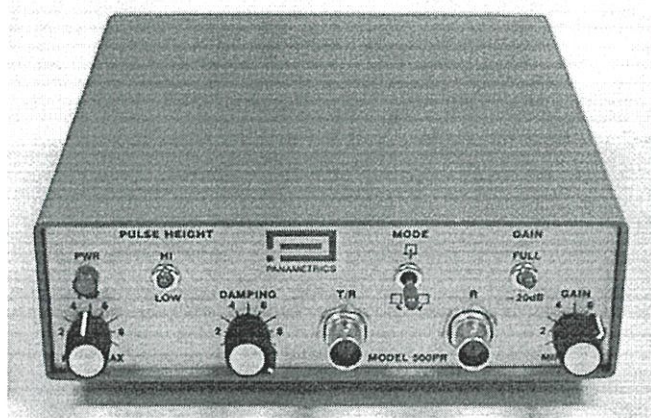
รูปที่ 3.42 หัวโพรบ EMAT

ทำการส่งสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิกโดยใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์(Pulse Generator) ความถี่ 5 MHz ต่อเข้ากับหัวโพรบ PZT (Piezoelectric Transducer) ปล่อยสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิกผ่านแท่งอลูมิเนียมทรงกระบอกมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 cm ยาว 4 cm ทำการวัดสัญญาณอัลตราโซนิกโดยใช้ EMAT วัดที่ระยะห่างระหว่าง EMAT กับอลูมิเนียมที่ระยะ 0.0-1.5 mm สัญญาณที่ได้จะนำมาแสดงผลผ่านทางออสซิลโลสโคป Tektronix TDS3012 ซึ่งมีแบนด์วิดธ์ 100 MHz และอัตราสุ่ม(Sample Rate) 1.25 GS/s จากนั้นนำมาประมวลผลผ่านทางคอมพิวเตอร์โดยผ่านทางระบบเชื่อมสัญญาณ GPIB ดังแสดงดังรูปที่ 3.43



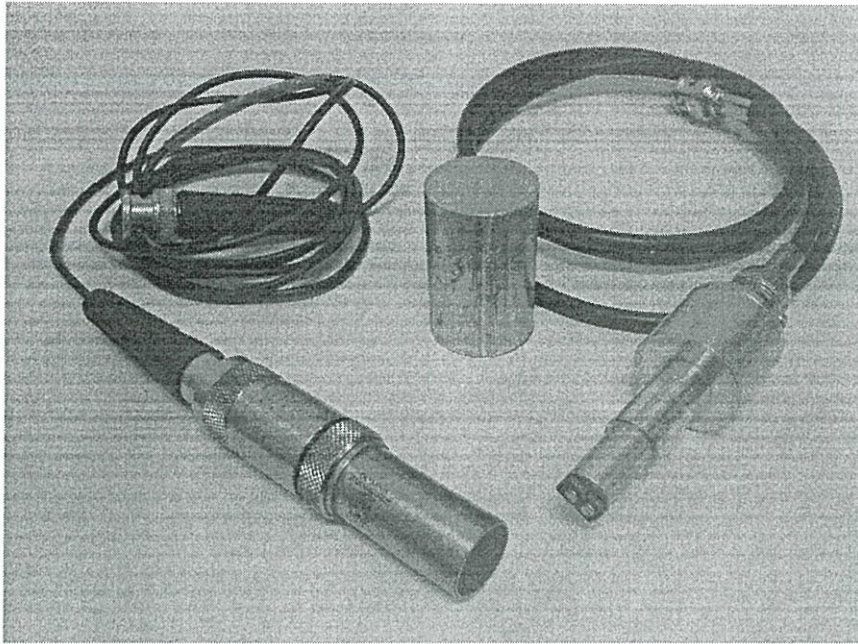
รูปที่ 3.43 รูปแบบกระบวนการทดลอง

รูปที่ 3.44-3.45 แสดงเครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง โดย Pulse Generator ใช้เป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิคซึ่งจะสร้างสัญญาณ Pulse เป็นลูกๆ ใช้ร่วมกับ Ultrasonic Transducer (PZT) ขนาด 5 MHz สามารถเลือกโหมดแบบส่งหรือรับส่งก็ได้ สำหรับการทดลองนี้ใช้โหมดส่งอย่างเดียว โดยส่งผ่านแท่งอลูมิเนียมใช้เป็นตัวกลางในการทดลอง ใช้ EMAT ในการรับสัญญาณและใช้ออสซิลโลสโคปในการแสดงผลสัญญาณ EMF ที่เกิดขึ้น โดยมีขั้นตอนการทดลองเริ่มจากเก็บค่าผลของสัญญาณ EMF ที่ได้จากออสซิลโลสโคป บันทึกภาพสัญญาณที่ได้ จากนั้นทำการบันทึกจุดของสัญญาณ EMF ตลอดช่วง ที่ระยะห่างของ EMAT กับอลูมิเนียมตั้งแต่ระยะ 0.0-1.5 mm. จากนั้นนำค่าแอมพลิจูดสูงสุดของ EMF (Volt peak-peak) มาทำกราฟเปรียบเทียบกับระยะห่างเพิ่มคูแวนวโน้มของสัญญาณที่วัดได้จริงกับสัญญาณที่ได้จากการจำลอง แล้วนำผลสัญญาณ EMF ที่ได้มาทำกราฟใน โดเมนของความถี่เปรียบเทียบกัน



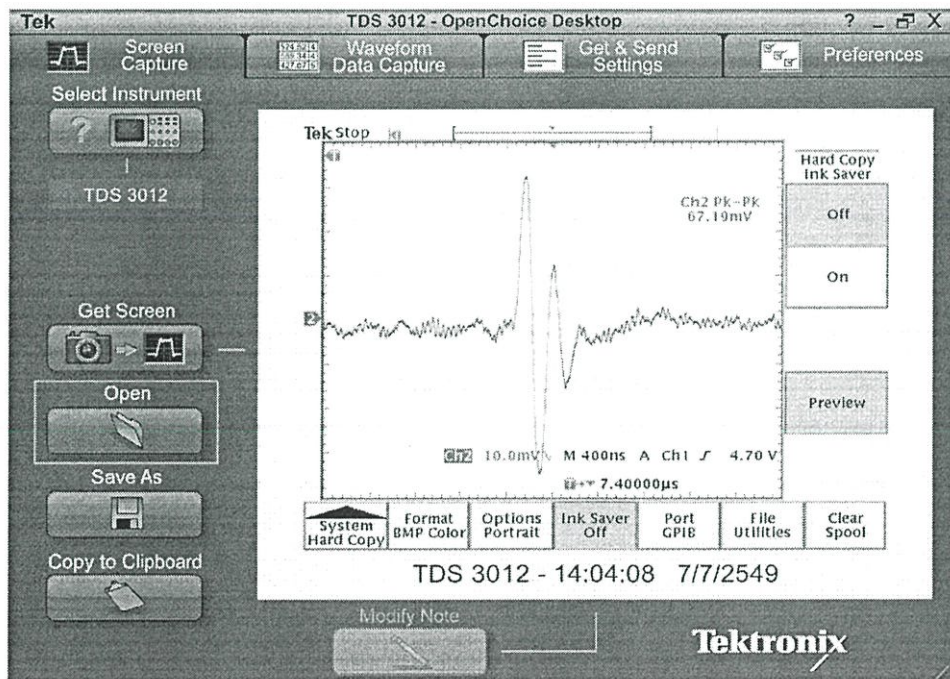
a) Pulse Generator (Panametrics 500 PR)    b) Oscilloscope (Tektronix TDS 3012)

รูปที่ 3.44 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง



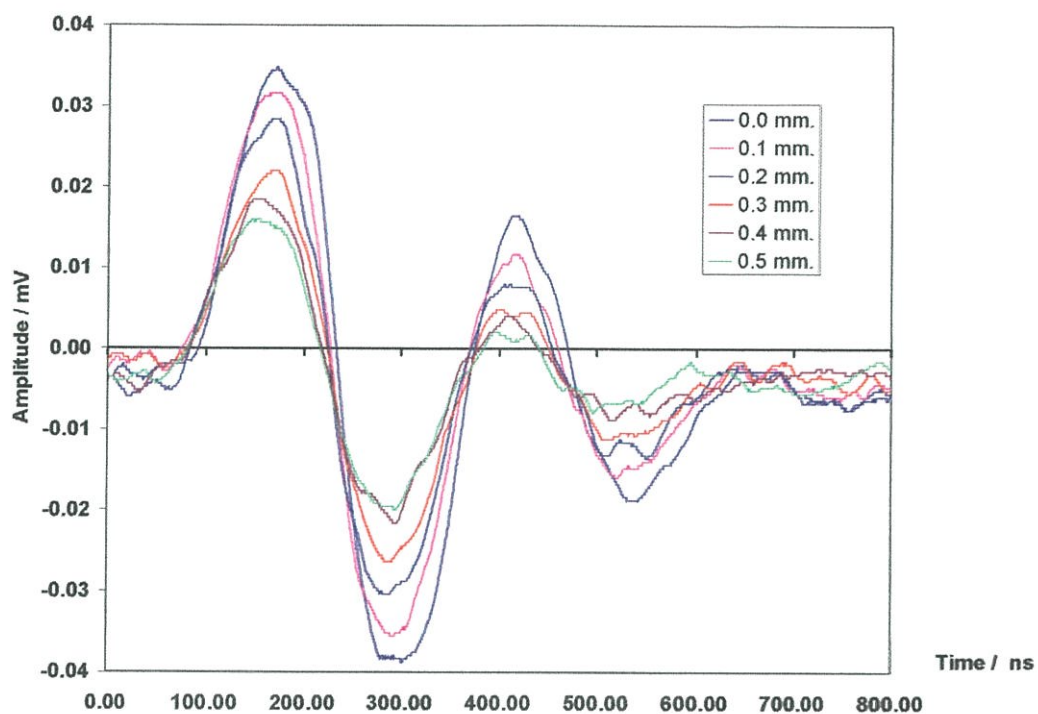
Ultrasonic Transducer, Cylinder aluminum, EMAT

รูปที่ 3.45 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 3.46 สัญญาณที่วัดได้โดยผ่านคอมพิวเตอร์

ใช้โปรแกรม Open choice ของ Tektronix ในการบันทึกภาพ และโปรแกรม Excel 2003 บันทึกสัญญาณ EMF ที่ได้จากการทดลองวัดที่ระยะห่างระหว่าง EMAT กับลวดนิยมนิ่งตั้งแต่ 0.0-1.5 mm โดยใช้แผ่นฟิล์มที่มีขนาดความหนา 0.1 mm ในการเปลี่ยนระยะการวัด สัญญาณที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.47

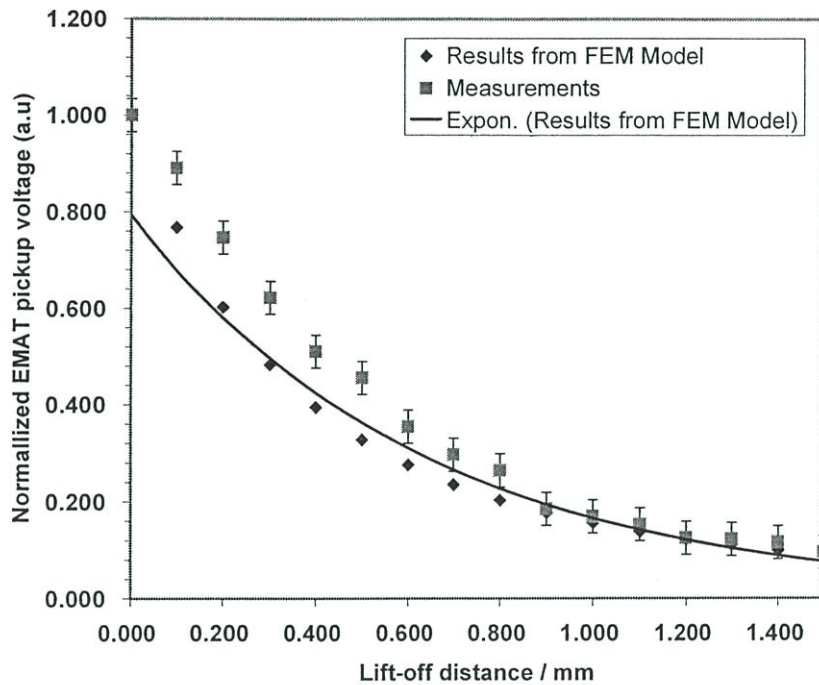


รูปที่ 3.47 ค่าสัญญาณ EMF ที่วัดได้ที่ระยะห่างของ EMAT กับอลูมิเนียมตั้งแต่ 0.0-0.5 มม

ตารางที่ 3.3 ค่าแอมพลิจูดสูงสุดของคลื่นอัลตราโซนิกที่วัดได้ กับระยะห่างอลูมิเนียมกับ EMAT

| ระยะห่างระหว่างหัววัดกับอลูมิเนียม(mm) | แอมพลิจูดสูงสุด(V) |
|--|--------------------|
| 0.0                                    | 0.069900           |
| 0.1                                    | 0.062250           |
| 0.2                                    | 0.052195           |
| 0.3                                    | 0.043475           |
| 0.4                                    | 0.035690           |
| 0.5                                    | 0.031845           |
| 0.6                                    | 0.024780           |
| 0.7                                    | 0.020725           |
| 0.8                                    | 0.018480           |
| 0.9                                    | 0.012935           |
| 1.0                                    | 0.011850           |
| 1.1                                    | 0.010690           |
| 1.2                                    | 0.008736           |
| 1.3                                    | 0.008551           |
| 1.4                                    | 0.008092           |
| 1.5                                    | 0.006650           |

นำค่าสัญญาณ(EMF) ที่ได้จากการทดลองโดยอุปกรณ์จริงและการจำลองมาพล็อตกราฟการแปรผันของค่าสัญญาณกับการเปลี่ยนแปลงระยะทางจะได้ผลดังรูปที่ 3.48



รูปที่ 3.48 ค่าแอมพลิจูดของสัญญาณ EMF ของการจำลองและการทดลองจริง

จากผลการทดลองที่ได้นำมาเขียนเป็นสมการฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียลจะได้สมการดังนี้ จากสมการที่ 3.18 ที่ได้จากการจำลองนำมา Normalize เทียบกับผลการทดลองจริงที่ความถี่ 5 MHz คือ

$$y = 0.7932 \exp - 1.5639x \quad (3.19)$$

สมการ Normalize ที่ได้จากการทดลองอุปกรณ์จริง คือ

$$y = 0.9839 \exp - 1.6412x \quad (3.20)$$

จะเห็นได้ว่าสมการทั้งสองรูปแบบมีค่าใกล้เคียงกัน

โดยมีค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (Mean Sum of Square Error: MSE) เท่ากับ  $6.25 \times 10^{-3}$  หรือ 0.625% ซึ่งได้จากสมการ

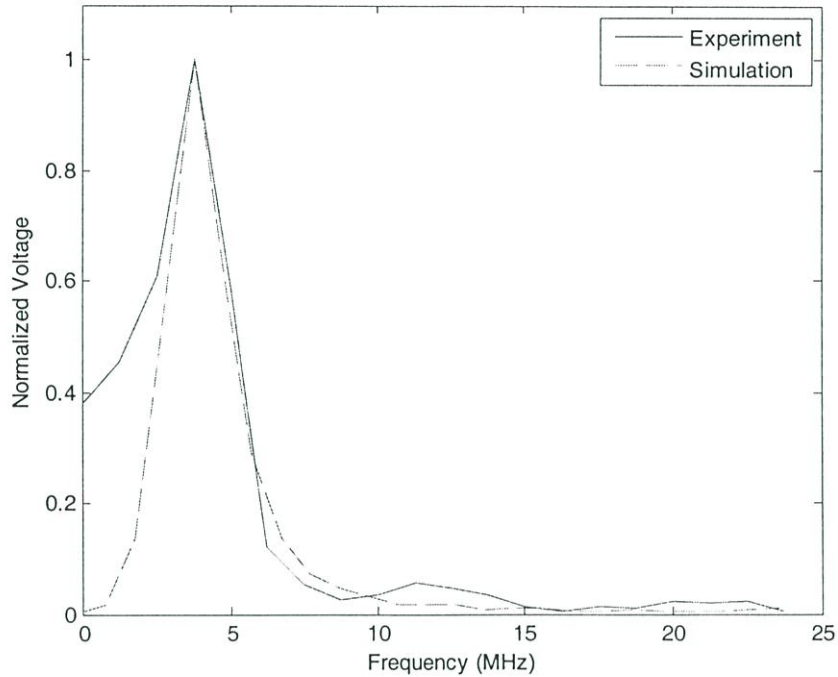
$$MSE = \sum_{t=1}^n \frac{(X_t - F_t)^2}{n} \quad (3.21)$$

เมื่อ  $X_t$  คือ ค่าที่ได้จากการทดลองจริง

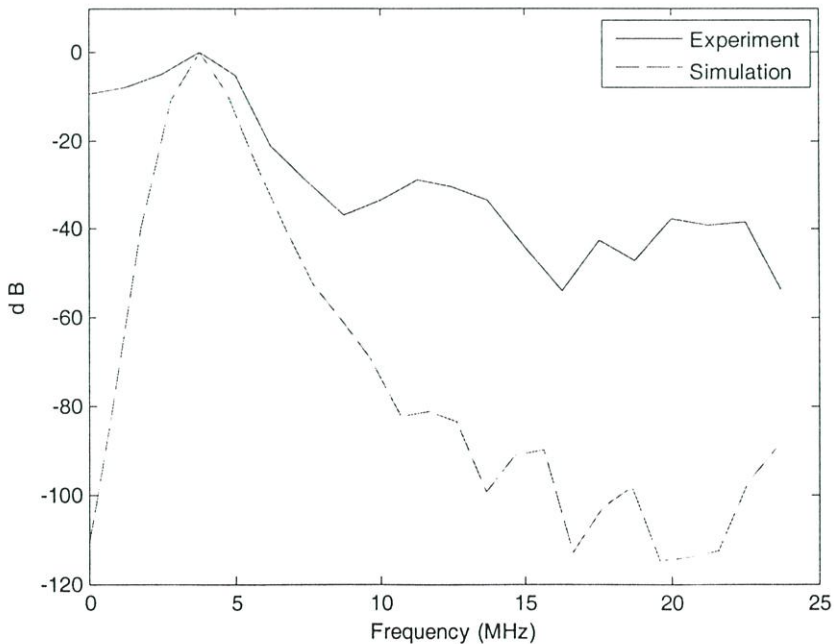
$F_t$  คือ ค่าที่ได้จากการจำลอง

$n$  คือ จำนวนข้อมูลที่ใช้เปรียบเทียบ

การทดลองต่อไปดูผลการตอบสนองสัญญาณ EMF เซึ่งความถี่ที่ได้จากการทดลองจริงกับการจำลอง โดยนำสัญญาณที่ได้จากการทดลองจริงมาวาดกราฟระหว่างแอมพลิจูดของสัญญาณอัลตราโซนิกกับความถี่จากรูปที่ 3.49 จะเห็นได้ว่ามีผลการตอบสนองสัญญาณสูงสุดที่ความถี่เท่ากับ 3.748 MHz กำหนดความถี่ของการจำลองให้เท่ากัน และนำผลมาเทียบดูขนาดความกว้างของแบนด์วิดท์



รูปที่ 3.49 กราฟของสัญญาณ EMF ที่ได้จากการจำลองกับความถี่ ในหน่วย Voltage



รูปที่ 3.50 กราฟของสัญญาณ EMF ที่ได้จากการทดลองจริงกับความถี่ ในหน่วย dB

### วิเคราะห์ผลการทดลองที่ 3.5

จากการทดลองโดยนำผลการทดลองที่ได้จากการจำลอง(Simulate) รูปที่ 3.13 และผลที่ได้จากการทดลองใช้อุปกรณ์จริงรูปที่ 3.47 จะเห็นได้ว่ารูปร่างของสัญญาณอัลตราโซนิกมีรูปร่างที่ใกล้เคียงกันรวมทั้งเมื่อทำการทดลองวัดค่าแอมพลิจูดของสัญญาณ EMF ของการทดลองมาเปรียบเทียบกันจะเห็นได้ว่าสัญญาณ EMF ลดลงในแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล(Exponential) รูปที่ 3.48 ซึ่งเส้นทึบแสดงความโค้งของฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียลที่เหมาะสมตามการจำลอง แสดงว่าผลที่ได้จากการทดลองกับค่าการจำลองมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย(Mean Sum of Square Error: MSE) เท่ากับ 0.625% ซึ่งเป็นค่าความผิดพลาดที่ไม่มาก โดยการวัดค่าสัญญาณได้ดีที่สุดที่ระยะติดกับพื้นผิวที่ทำการวัดนั่นเอง(0 mm) และจะเห็นได้ว่าสัญญาณที่วัดได้จากการทดลองจริงจะมีค่าแบนด์วิดธ์ของความถี่สูงสุดลดลงเล็กน้อยคือ 3.748 MHz จากรูปที่ 3.49 เนื่องจากค่าของ Inductance ในขดลวด ค่าความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์การทดลองรวมถึงสภาพอากาศที่ทำการทดลอง แล้วผลที่ได้จากการพล็อตกราฟสัญญาณ EMF กับ โดเมนความถี่จะเห็นว่าผลที่ได้จากการจำลองและผลที่ได้จากการทดลองจริง(รูปที่ 3.49 และ 3.50) มีผลที่ได้ออกมาคล้ายคลึงกัน ซึ่งในส่วนของ การทดลองจริงนั้นจะมีแบนด์วิดธ์ความถี่ของคลื่นอัลตราโซนิกกว้างอยู่เล็กน้อย

## บทที่ 4

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยเรื่อง “แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์สำหรับอิเล็กทรอนิกส์โทรแมกเนติกอะคูสติกทรานส์ดิวเซอร์” ได้ดำเนินงานเสร็จตามวัตถุประสงค์ ซึ่งผู้วิจัยได้ดำเนินการตามขั้นตอนการทำวิจัย โดยเริ่มต้นจากการศึกษาทฤษฎีวรรณกรรมและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง การออกแบบการจำลองรูปแบบการวัดสัญญาณอัลตราโซนิก ตลอดจนการทดลองด้วยอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดสัญญาณอัลตราโซนิกได้จริง โดยผลการทดลองที่ได้จะนำมาวิเคราะห์ผล หาข้อสรุปและข้อเสนอแนะต่างๆ เพื่อใช้ในการพัฒนาต่อไป

#### 4.1 บทสรุป

การทดลองวิเคราะห์การวัดสัญญาณอัลตราโซนิกด้วย EMAT (Electromagnetic Acoustic transducer) โดยการจำลองการทดลองนั้นได้มีการปรับเปลี่ยนค่าของการทดลองได้หลายรูปแบบ ทั้งค่าความแรงของแม่เหล็ก (Magnetization) จำนวนรอบของขดลวดซึ่งปรับเปลี่ยนในรูปของพื้นที่หน้าตัดของพื้นที่รับสัญญาณ การดูแลการตอบสนองเชิงความถี่สัญญาณ และการวัดสัญญาณอัลตราโซนิก ที่ระยะห่างระหว่างหัว EMAT กับอลูมิเนียมที่ระยะต่าง เพื่อระยะที่เหมาะสมสำหรับการวัดสัญญาณ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการทดลองคุณสมบัติของ EMAT ทำให้สามารถพัฒนารูปแบบของการวัดค่าสัญญาณให้มีความถูกต้องและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

ในส่วนของปัจจัยแรกที่ทำให้การทดลองคือในส่วนของความแรงของแม่เหล็ก ซึ่งเมื่อทำการเพิ่มค่าความแรงของแม่เหล็กขึ้นหรือทำการเพิ่มขนาดของแม่เหล็กขึ้นก็จะทำให้ค่าของสนามแม่เหล็กที่อยู่รอบๆ สนามแม่เหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเป็นผลทำให้กระแสที่ได้จากการทำปฏิกิริยากันระหว่างสนามแม่เหล็กกับความเร็วการเคลื่อนที่ของอนุภาคในอลูมิเนียมในระนาบที่ต่างกันนั้นมีค่ามากยิ่งขึ้นเป็นไปตามกฎของ Lorentz คือ  $\vec{J}_z = \sigma(\vec{v}_y \times \vec{B}_x)$  ซึ่งกระแสจะทำให้เกิดค่าสนามแม่เหล็กตามกฎของแอมแปร์ ปัจจัยที่สองทำการทดลองเพิ่มพื้นที่ในการรับสัญญาณโดยเปรียบเสมือนการเพิ่มจำนวนรอบขดลวด การทดลองสรุปว่าเมื่อทำการเพิ่มพื้นที่ในการรับสัญญาณหรือจำนวนรอบขดลวดมากขึ้นทำให้ค่า EMF (Electromotive force) มีค่ามากขึ้นเป็นเส้นตรงตามสมการ  $emf = n \frac{d\phi}{dt}$ , เมื่อ  $n$  คือจำนวนรอบของขดลวด,  $\phi$  คือเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้า (flux linkage) ปัจจัยที่สามจะดูถึงผลการตอบสนองเชิงความถี่ จะเห็นได้ว่าช่วงการตอบสนองความถี่ของ EMAT จะอยู่ในช่วง 1-5 MHz ซึ่งจะมีค่าแอมพลิจูดของสัญญาณอยู่ในระดับที่ดี และทำการวัดสัญญาณอัลตราโซนิกที่ระยะห่างระหว่าง EMAT กับอลูมิเนียมต่างๆ กันจะเห็นได้ว่า ที่ระยะติดกันนั้นจะได้สัญญาณอัลตราโซนิกที่ดีที่สุดและจากนั้นสัญญาณก็จะลดลงแบบเอ็กซ์

โพแนนเซียล ซึ่งการวัดสัญญาณอัลตราโซนิกโดยใช้ EMAT นั้นไม่จำเป็นต้องใช้ตัวกลางในการเชื่อมต่อในการวัดสัญญาณเช่น เจล เหมือนกับอัลตราโซนิกทรานส์ดิวเซอร์แบบเปียโซอิเล็กทริก ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ดีของ EMAT

จากการทดลองที่ผ่านมาได้ทำการทดลองจำลองคลื่นอัลตราโซนิกแบบกำหนดการคลื่นที่แบบคลื่นไซน์ การทดลองคลื่นแบบรูปแบบคลื่นเสียงซึ่งเปลี่ยนแปลงตามเวลา และจำลองคลื่นโดยใช้สมการคลื่น ซึ่งผลการทดลองที่ได้จากรูปแบบการจำลองคลื่นอัลตราโซนิกเป็นแบบต่างๆ แล้ว มีผลที่ใกล้เคียงกันหรือมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันนั่นเอง และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับผลของการทดลองจริงก็มีลักษณะที่ใกล้เคียงกันด้วย ดังนั้นสำหรับการพัฒนา EMAT ในรูปแบบการจำลองด้วย วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์นี้จึงมีความถูกต้องแม่นยำสูง และสามารถพัฒนารูปแบบให้ดียิ่งขึ้นต่อไป

#### 4.2 ข้อเสนอแนะ

ในการวัดคลื่นอัลตราโซนิกให้มีประสิทธิภาพนั้นปัจจัยที่ลดทอนความถูกต้องแม่นยำของสัญญาณ เช่น ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด, สภาพของวัสดุที่วัด, สัญญาณรบกวนที่จะเกิดขึ้นจากปัจจัยภายนอก รวมถึงการขยายสัญญาณให้มีความแรงของสัญญาณเพียงพอทำให้การวัดนั้นมีประสิทธิภาพและมีความถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น

ส่วนการพัฒนาทางด้านการจำลองการทดลองนั้นประสิทธิภาพของโปรแกรมและคอมพิวเตอร์มีส่วนสำคัญที่จะทำให้ค่าของข้อมูลมีความถูกต้องด้วย เช่นในการทดลองโปรแกรมที่มีขนาดใหญ่ขึ้นมีการทำในรูปแบบสามมิติหรือเพิ่มในส่วนของเวลาก็จะทำให้โปรแกรมจำลองนั้นทำงานได้ช้า หรือทำงานไม่ได้จึงเป็นอุปสรรคอย่างหนึ่งสำหรับการทดลอง

ดังนั้นสำหรับงานวิจัยต่อไป การทำให้สัญญาณอัลตราโซนิกที่นำไปใช้นั้นมีประสิทธิภาพนั้น จึงเป็นสิ่งที่สำคัญและสามารถนำไปใช้งานจริงในอุตสาหกรรมต่างๆ ดังที่กล่าวไว้แล้วข้างต้น

## บรรณานุกรม

- [1] Wallace, W. D., "Electromagnetic Generation of Ultrasound in Metals," *International Journal of Nondestructive Testing*, Vol.2, 1971, pp 309-334.
- [2] Dobbs, E. R., "Electromagnetic Generation of Ultrasound," *Research Techniques in Nondestructive Testing*, Vol.2 1973, pp 419-441.
- [3] Pardee, W. J., and R. B. Thompson, "Half-Space Radiation by EMATs," *Journal of Nondestructive Evaluation*, Vol.1, No.3, 1980, pp 157-181.
- [4] Thompson, R. B., "The Relationship between Radiating Body Forces and Equivalent Surface Stresses: Analysis and Application to EMAT Design," *Journal of Nondestructive Evaluation*, Vol.1, No.2, 1980, pp 79-85.
- [5] R. B. Thompson, "New EMAT Configuration for Generating Sh-Waves in Ferromagnetic Materials," *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, vol. 26, pp. 149-149, 1979.
- [6] J. E. Bobbin, "(EMAT) - High-Temperature Probe Electromagnetic Acoustic Transducer," *Materials Evaluation*, vol. 37, pp. 28-28, 1979.
- [7] B. W. Maxfield and C. M. Fortunko, "The Design and Use of Electromagnetic Acoustic-Wave Transducers (EMATs)," *Materials Evaluation*, vol. 41, pp. 1399-1408, 1983.
- [8] B. W. Maxfield, A. Kuramoto, and J. K. Hulbert, "Evaluating EMAT designs for selected applications," *Materials Evaluation*, vol. 45, pp. 1166-1182, 1987.
- [9] P. R. Murray and R. J. Dewhurst, "A laser/EMAT system for thickness monitoring applications using shear and L-S mode-converted waves," *Measurement Science and Technology*, vol. 12, pp. 1651-1659, 2001.
- [10] V. M. Ristic, *Principles of acoustic devices*. Toronto: John wiley & sons, 1983.
- [11] R. Ludwig and X. W. Dai, "Numerical-Simulation of Electromagnetic Acoustic Transducer in the Time Domain," *Journal of Applied Physics*, vol. 69, pp. 89-98, 1991.
- [12] R. Ludwig, Z. You, R. Palanisamy, "Numerical Simulations of an Electromagnetic Acoustic Transducer-Receiver System for NDT Applications," *IEEE Transactions on Magnetics*. Vol.29 No.3 May 1993, pp 2081-2089.

- [13] Kawashima, K., O. B. Wright and T. Hyoguchi (1994). "High-Frequency Resonant Electromagnetic Generation and Detection of Ultrasonic-Waves." *Japanese Journal of Applied Physics Part 1-Regular Papers Short Notes & Review Papers* 33(5B), pp 2837-2845.
- [14] M. Kaltenbacher, K. Ettinger, R. Lerch, and B. Tittmann, "Finite element analysis of coupled electromagnetic acoustic systems," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 35, pp. 1610-1613, 1999.
- [15] K. Mirkhani, C. Chaggares, C. Masterson, "Optimal design of EMAT transmitters," *NDT&E International* 37, 2004 pp 181-193.
- [16] Frost, H. M. , T. L. Szabo, and J. C. Sethares, "The Flat Conductor Electromagnetic Saw Transducer: Theory and Experiment," 1975 *Ultrasonics Symposium Proceedings*, pp 601-603.
- [17] Hirao, M. and H. Ogi (1997). "Electromagnetic acoustic resonance and materials characterization." *Ultrasonics* 35(6), pp 413-421.
- [18] Ogi, H., E. Goda and M. Hirao (2003). "Increase of efficiency of magnetostriction SH-wave electromagnetic acoustic transducer by angled bias field: Piezomagnetic theory and measurement." *Japanese Journal of Applied Physics Part 1-Regular Papers Short Notes & Review Papers* 42(5B), pp 3020-3024.
- [19] D. Hutchins, J. Hu, and K. Lundgren, "A Comparison of Laser and EMAT Techniques for Noncontact Ultrasonics," *Materials Evaluation*, vol. 44, pp. 1244-1253, 1986.
- [20] S. Dixon, C. Edwards, and S. B. Palmer, "A laser-EMAT system for ultrasonic weld inspection," *Ultrasonics*, vol. 37, pp. 273-281, 1999.
- [21] R. J. Dewhurst, S. Boonsang, and P. R. Murray, "A laser-ultrasound/EMAT imaging system for near surface examination of defects," in *Nondestructive Characterization of Materials Xi*. Berlin: SPRINGER-VERLAG BERLIN, 2003, pp. 13-19.
- [22] S. Dixon, C. Edwards, and S. B. Palmer, "The Analysis of Adhesive Bonds Using Electromagnetic Acoustic Transducers," *Ultrasonics*, vol. 32, pp. 425-430, 1994.
- [23] M. Hirao and H. Ogi, "An SH-wave EMAT technique for gas pipeline inspection," *NDT & E International*, vol. 32, pp. 127-132, 1999.
- [24] Bushell, A. C., C. Edwards and S. B. Palmer (1991). "Laser-Generated Surface-Waves on Plates of Varying Thickness." *British Journal of Non-Destructive Testing* 33(4), pp 177-182.

- [25] Hutchins, D. A., M. D. C. Moles, G. S. Taylor and S. B. Palmer (1991). "Noncontact Ultrasonic Inspection of Diffusion Bonds in Titanium." *Ultrasonics* **29**(4), pp 294-301.
- [26] S. Boonsang and R. J. Dewhurst, "A sensitive electromagnetic acoustic transducer for picometer-range ultrasonic measurements," *Sensors and Actuators: Physical*, vol. Article in press, 2005.
- [27] P. D. Wilcox, "Omni-directional guided wave transducer arrays for the rapid inspection of large areas of plate structures," *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control*, vol. 50, pp. 699-709, 2003.
- [28] H. Ogi, M. Hirao, and T. Ohtani, "Line-focusing electromagnetic acoustic transducers for the detection of slit defects," *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control*, vol. 46, pp. 341-346, 1999.
- [29] R. Jafari-Shapoorabadi, A. Konrad, and A. N. Sinclair, "Improved finite element method for EMAT analysis and design," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 37, pp. 2821-2823, 2001.
- [30] Thompson, R. B., "A Model for the Electromagnetic Generation and Detection of Rayleigh and Lamb Waves," *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, Vol. SU-20, No.4, Oct.1973, pp 340-346.
- [31] Szabo, T. L., and J. C. Sethares, "Harmonic Operation of Saw Electromagnetic Transducers," 1977 *Ultrasonics Symposium Proceedings*, pp 94-97.
- [32] Replinger, W., and H. J. Salzburger, "A Broadband Electromagnetic UT System," 6<sup>th</sup> ASM International Conference on NDE in the Nuclear Industry, Zurich, Switzerland, 1983, pp 585-591.
- [33] Vasile, C. F., and R. B. Thompson, "Periodic Magnet Non-Contact Electromagnetic Acoustic Wave Transducer-Theory and Application," 1977 *Ultrasonics Symposium Proceedings*, pp 84-88.
- [34] King, R. B., and C. M. Fortunko, "Determination of In-Plane Residual Stress states in Plates Using Horizontally Polarized Shear Waves," *Journal of Applied Physics*, Vol.54, June 1983, pp 19-27.
- [35] Thompson, R. B., G. A. Alers, and M. A. Tennison, "Application of Direct Electromagnetic Lamb Wave Generation to Gas Pipelines Inspection," *Proceedings of the 1972 IEEE Symposium*, 1972, pp 187.

- [36] Vasile, C. F., and R. B. Thompson, "Evaluation of Electromagnetic Acoustic Concepts of Inspection of Steam Generator Tubing," EPRI NP-519 (Research Report 698-1), Aug. 1977.
- [37] P. R. Murray and R. J. Dewhurst, "Application of a laser/EMAT system for using shear and LS mode converted waves," *Ultrasonics*, vol. 40, pp. 771-776, 2002.
- [38] S. Boonsang and R. J. Dewhurst, "Enhancement of laser-ultrasound/electromagnetic-acoustic transducer signals from Rayleigh wave interaction at surface features," *Applied Physics Letters*, vol. 82, pp. 3348-3350, 2003.
- [39] Gebhardt, W., H. P. Schwarz, F. Bonitz, and H. Woll, "Application of Phased Arrays in Basic and In-Service Inspection," 6<sup>th</sup> ASM International Conference on NDE in the Nuclear Industry, Zurich, Switzerland, 1983, pp 717-723.
- [40] Fortunko, C. M., and R. B. King, "Nondestructive Evaluation of Planer Defects in Plates Using Low-Frequency Shear Horizontal Waves," *Journal of Applied Physics*, Vol.53, May 1982, pp 3450-3458.
- [41] Hwang, J. H., and W. Lord, "Finite Element Analysis of the Magnetic Field Distribution inside a Rotating Ferromagnetic Bar," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. MAG-10, Dec. 1974, pp 1113-1118.
- [42] Foldy, L. L., and H. Primakoff, "A General Theory of Passive Linear Electroacoustic Transducers and the Electroacoustic Reciprocity Theorem," *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 17, No.2, Oct.1945.
- [43] Gaertner, M. R., W. D. Wallace, and B. W. Maxfield, "Experiments Relating to the Theory of Magnetic Direct Generation of Ultrasound in Metals," reprinted for *Physical Review*, Vol.184, 1969, pp 702-704.
- [44] Kawashima, K., "Quantitative Calculation and Measurement of Longitudinal and Transverse Ultrasonic Wave Pulses in Solids," *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, Vol. SU-31 No. 2, 1984 p83
- [45] Mazfield, B. W., and J. K. Hulber, "Electromagnetic Acoustic Wave Transducers (EMATs): Their Operation and Mode Patteres," *Proceedings of the 10<sup>th</sup> Symposium on NDE*, Sun Antonio, TX Apr. 1975, pp 44-62.
- [46] Glukhov, N. A., "Directivity of an Electromagnetic Acoustic Transverse Oscillation Transducer," *Soviet Journal of Nondestructive Testing*, Jan. 1971, pp 8-13.

- [47] Budenkov, G. A., V. N. Kvyatkovskii, Y. V. Petrov, and N. V. Sidel'noipva, "Directional Pattern of an Eletromagnetoacoustic Transmitter," *Soviet Journal of Nondestructive Testing*, May 1972, pp 437-440.
- [48] Szabo, T. L., "Acoustic Beamshaping and Diffraction from Tapered Amplitude Distribution," 1975 *Ultrasonics Sysmposium Proceedings*, pp 116-119.
- [49] M. Parrila, J. J. Anaya, C. Fritsch, "Digital signal processing techniques for high accuracy ultrasonic range measurements," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 40 No.4 August 1991, pp 759-763.

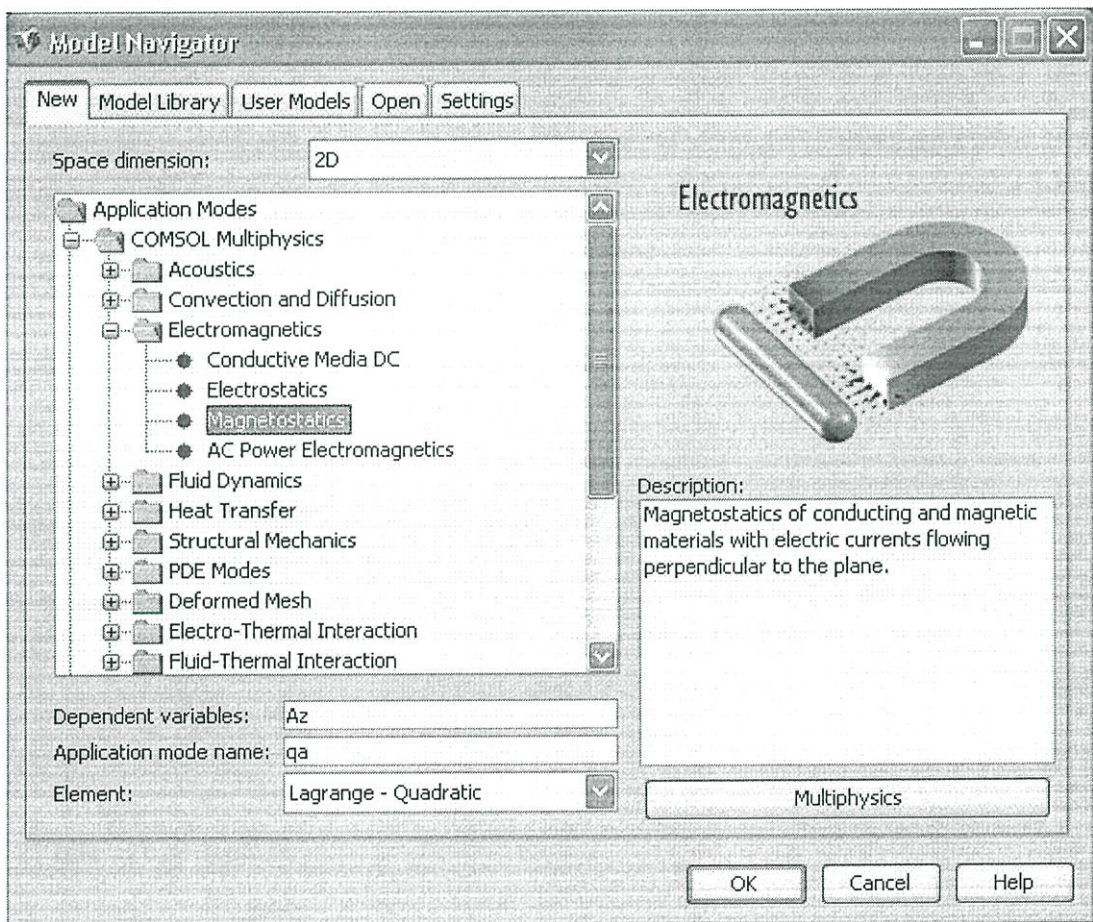
ภาคผนวก

## การใช้งานโปรแกรม COMSOL Multi physics

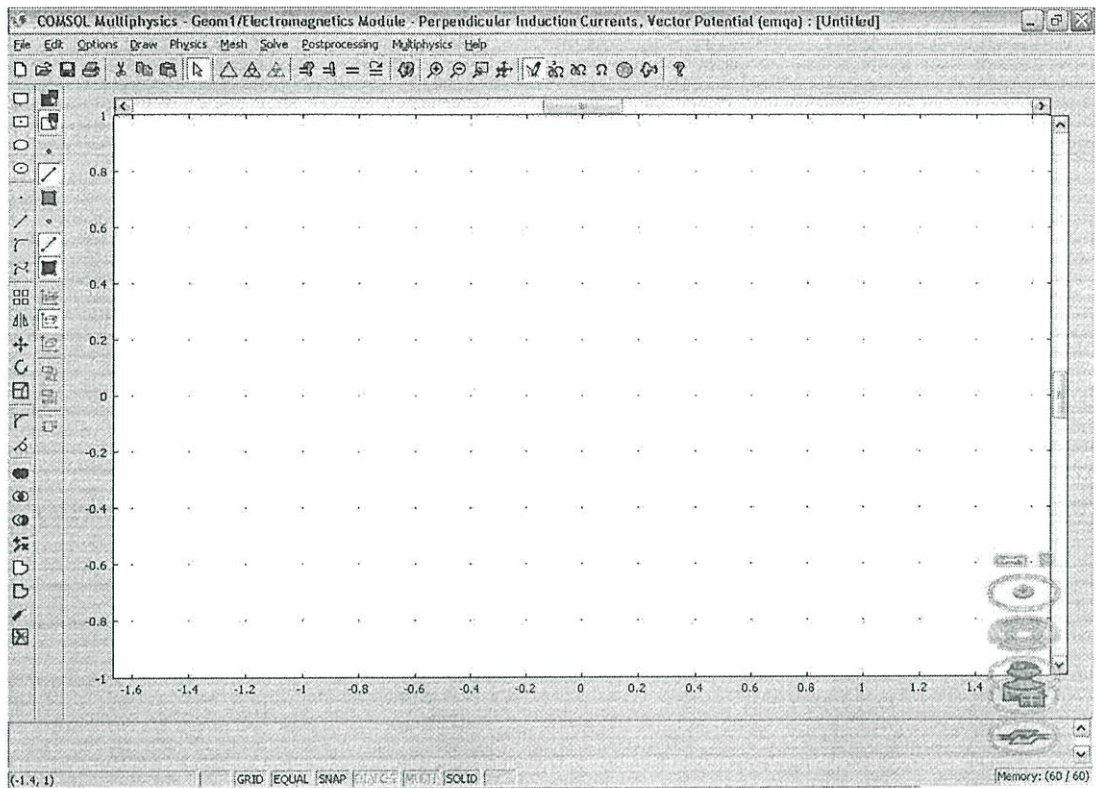
โปรแกรม COMSOL Multi physics เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองรูปแบบ (Simulation) ด้วยหลักการของวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite Element Method) จำกัดขอบเขตของส่วนที่จะทดลองให้เป็น Element ย่อยๆ เพื่อใช้วิเคราะห์ ตามคุณสมบัติที่เราตั้งค่าไว้ของวัสดุอุปกรณ์ตัวนั้นๆ

### การกำหนดโหมดสำหรับการใช้งาน

เริ่มแรกต้องเลือกโหมดประเภทของโมเดลที่จะทำการจำลองรูปแบบซึ่งมีมากมายหลายรูปแบบ เช่น Acoustics, Convection and Diffusion, Electromagnetics, Fluid Dynamics, Heat Transfer เป็นต้น สำหรับการทดลองวิจัยนี้ใช้โมเดล Electromagnetics แบบ Magnetostatics กับ PDE Coefficient Form(c)



รูปภาคผนวก 1 รูปแบบการเลือกโมเดลของโปรแกรม COMSOL



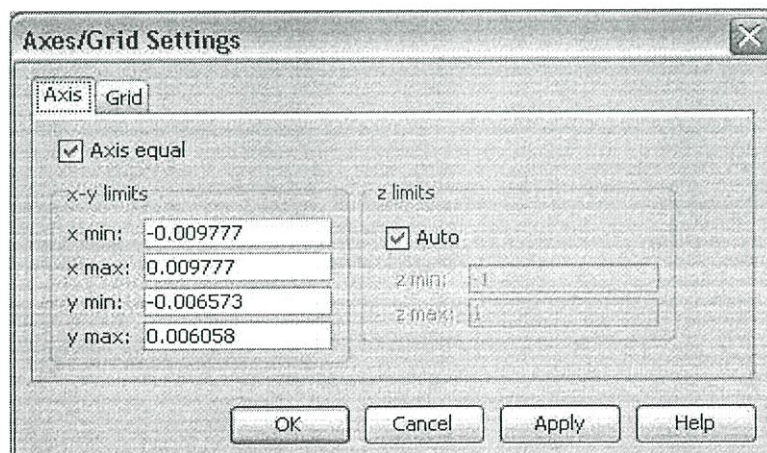
รูปภาพผนวก2 หน้าจอเริ่มต้นก่อนทำการจำลอง โมเดล โดยแสดงฟังก์ชันการทำงานต่างๆ

### ฟังก์ชันการใช้งาน

ฟังก์ชันการทำงานมีที่ใช้กัน โดยทั่วไปหลักๆ ดังนี้

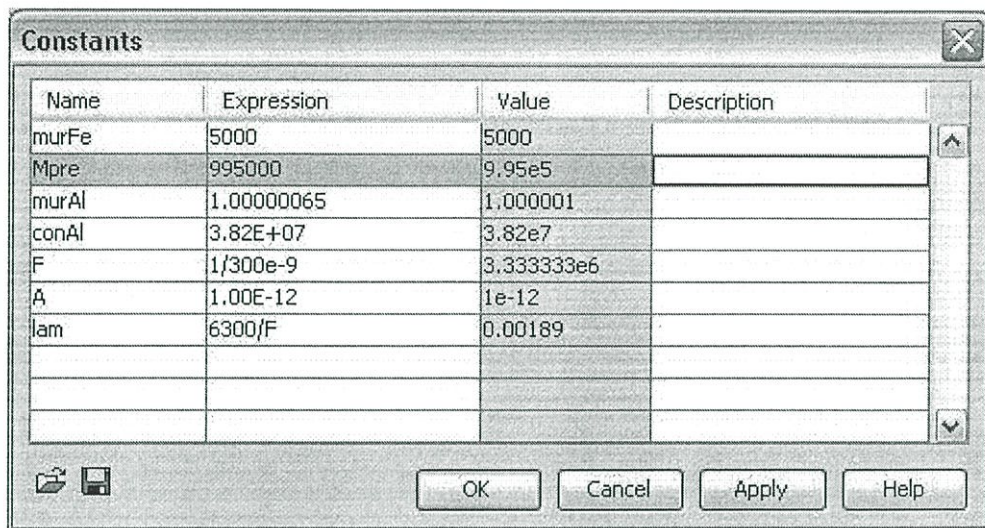
ในส่วนของ Options จะมีที่ใช้งานกันอยู่หลักก็คือ

Axis/Grid จะใช้สำหรับการตั้งค่าการแสดงผลที่จอภาพ เพื่อให้มีขนาดที่ให้เห็นอุปกรณ์ที่จะวาดลงไปได้นั่น และใช้กำหนดสเกลของความห่างจุด



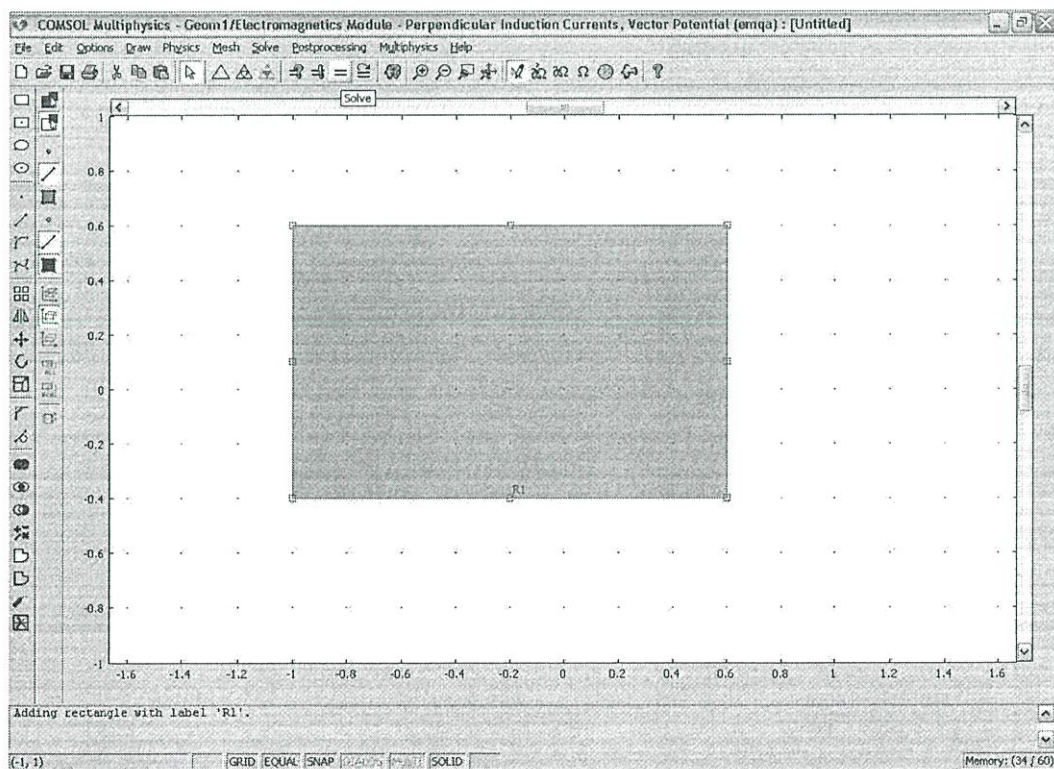
รูปภาพผนวก3 หน้าจอสำหรับการกำหนดสเกลของโมเดล

Constants ใช้สำหรับกำหนดค่าคงที่ต่างโดยใช้ตัวแปร และใส่ค่าของตัวแปรนั้นเป็นจำนวนตัวเลขที่ต้องการ



รูปภาคผนวก4 หน้าจอสำหรับการกำหนดค่าคงที่ของตัวแปร

ในส่วนของ Draw จะมีเครื่องมือให้เลือกใช้มากมาย ไว้สำหรับการวาดตัวอุปกรณ์ที่จะทดลองนั้นๆ ลงไป

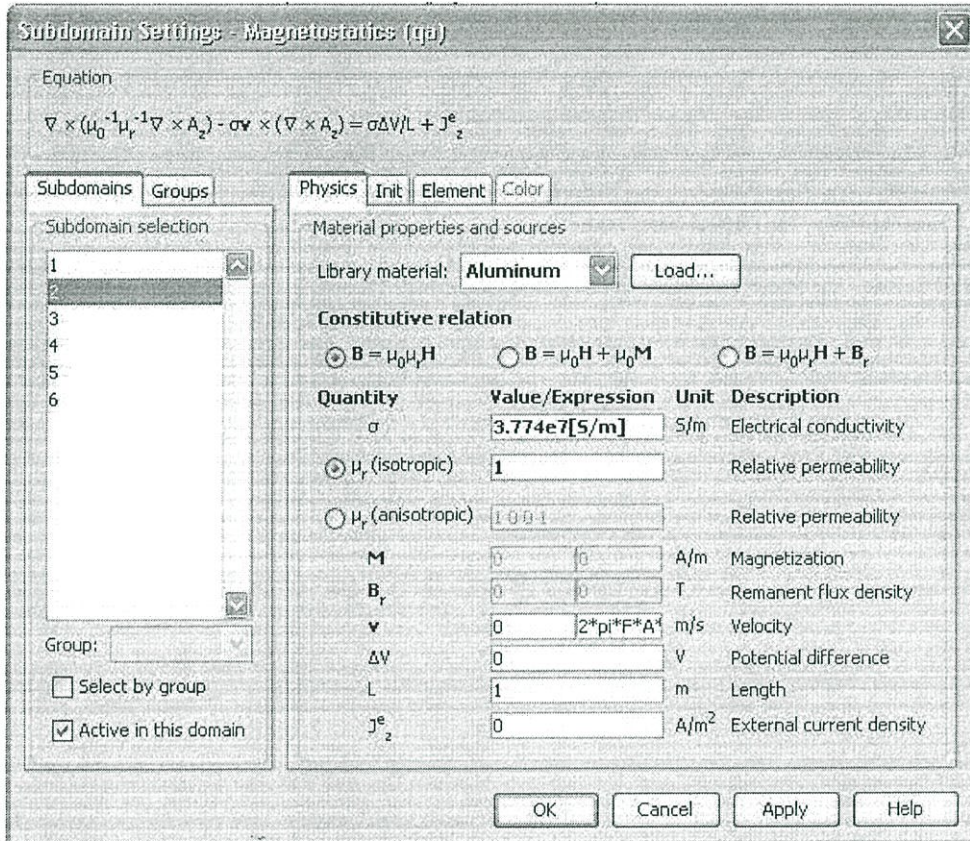


รูปภาคผนวก5 หน้าจอเมื่อเริ่มทำการวาดภาพสี่เหลี่ยม

## การกำหนดคุณสมบัติในแบบจำลอง

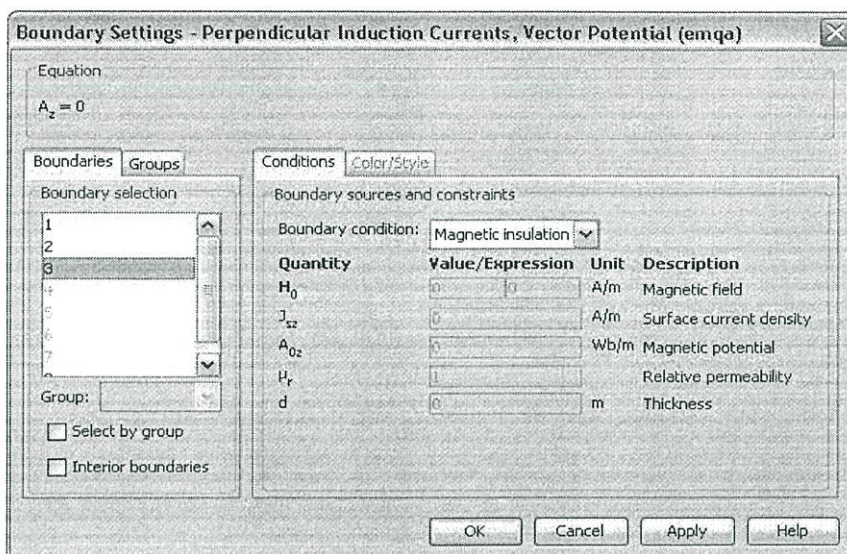
ส่วนต่อไปเป็นส่วนของPhysics ใ้ใช้สำหรับกำหนดตั้งค่าต่างๆของตัวอุปกรณ์ที่จะทดลองจะมีที่ใช้งานบ่อยๆอยู่ 2 ตัวคือ

Subdomain Setting มีไว้สำหรับตั้งค่าของวัสดุชิ้นนั้นๆ



รูปภาพผนวก6 Subdomain Setting

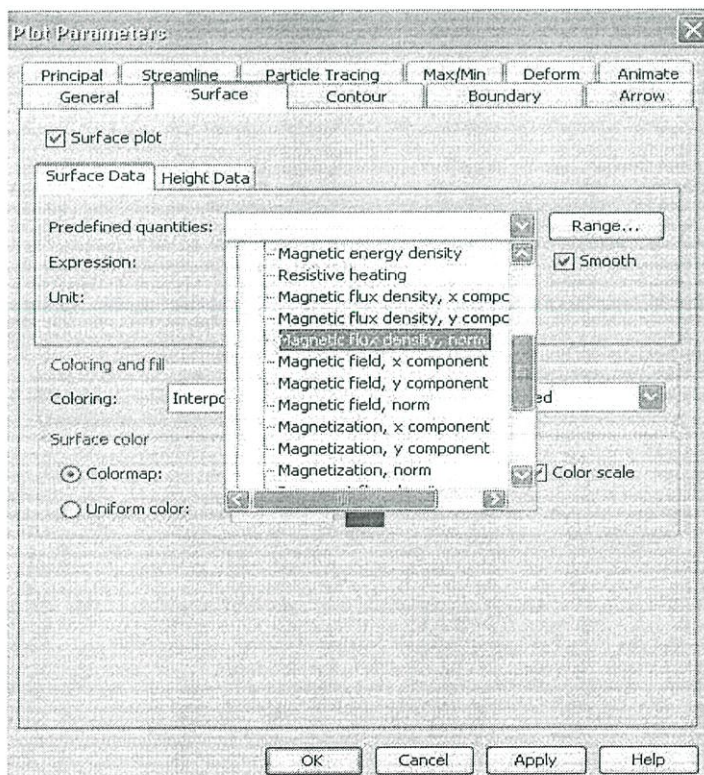
Boundary Setting มีไว้สำหรับตั้งค่าของส่วนย่อยของวัสดุชิ้นนั้นๆกล่าวคือ หากเป็น 2 มิติ จะเป็นการกำหนดค่าที่เห็นแค่เป็นเส้นของระนาบ Subdomain และหากเป็น 3 มิติจะเป็นด้านๆหนึ่งของรูปทรง Subdomain



รูปภาคผนวก7 Boundary Setting

### การกำหนดรูปแบบการแสดงผล

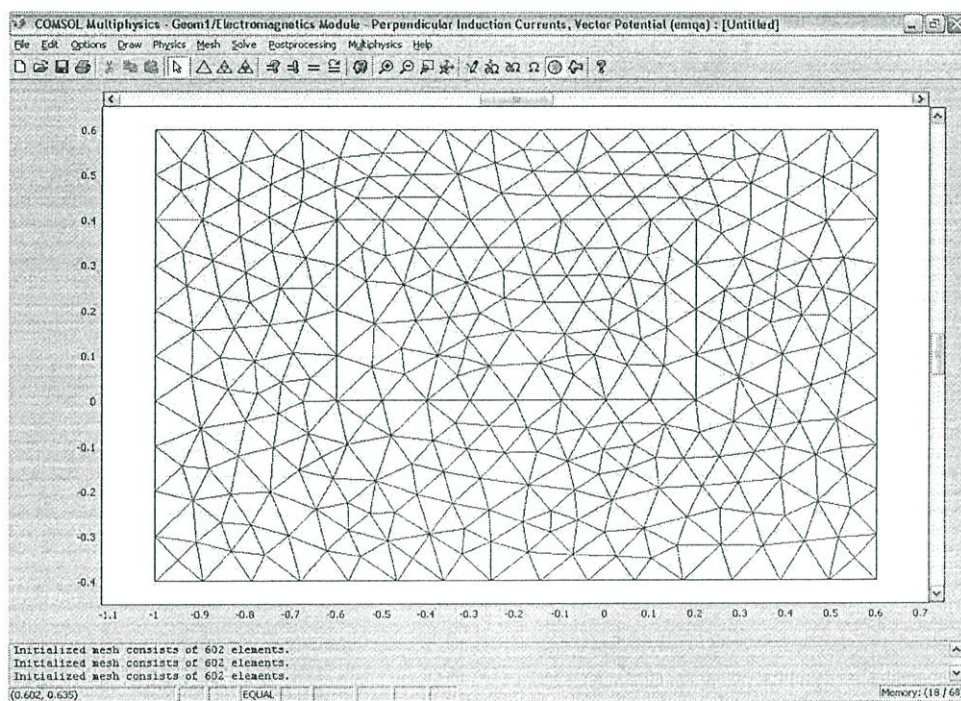
ในส่วนของการแสดงผลสามารถแสดงผลตามค่าพารามิเตอร์ของโมเดลต่างๆ ได้โดยเลือกที่ฟังก์ชัน Postprocessing แล้วเลือก Plot Parameters และเลือกรูปแบบการแสดงผลภาพแบบต่างๆเช่น ความแตกต่างของสีผิว (Surface), ลูกศร (Arrow) เป็นต้น



รูปภาคผนวก8 Plot Parameters

## การแบ่งส่วนการคำนวณ(Mesh)

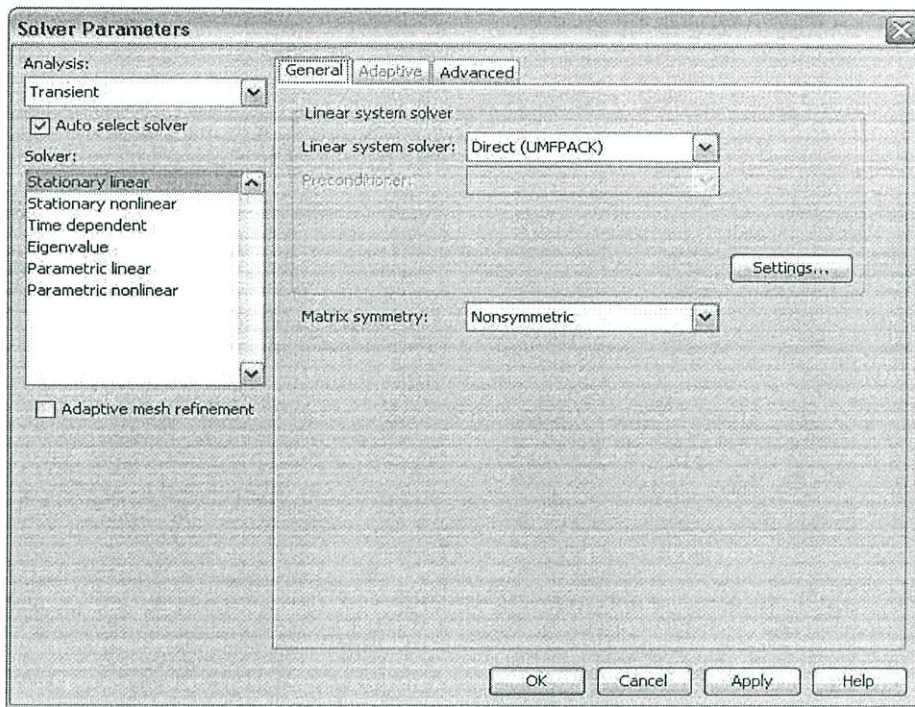
ส่วนต่อมาก็คือส่วนของ Mesh ไว้สำหรับเปลี่ยนรูปร่างของอุปกรณ์ให้เป็นElement ช่อยๆ โดยกด Initialize Mesh เพื่อให้รูปร่างที่ตั้งแล้วเปลี่ยนเป็น Element หากต้องการให้ช่อยลงไปอีกเพื่อความละเอียดที่มากขึ้นให้กด Refine Mesh จะทำให้จำนวน Element เพิ่มขึ้น ซึ่งจะมีผลต่อการคำนวณทางคณิตศาสตร์



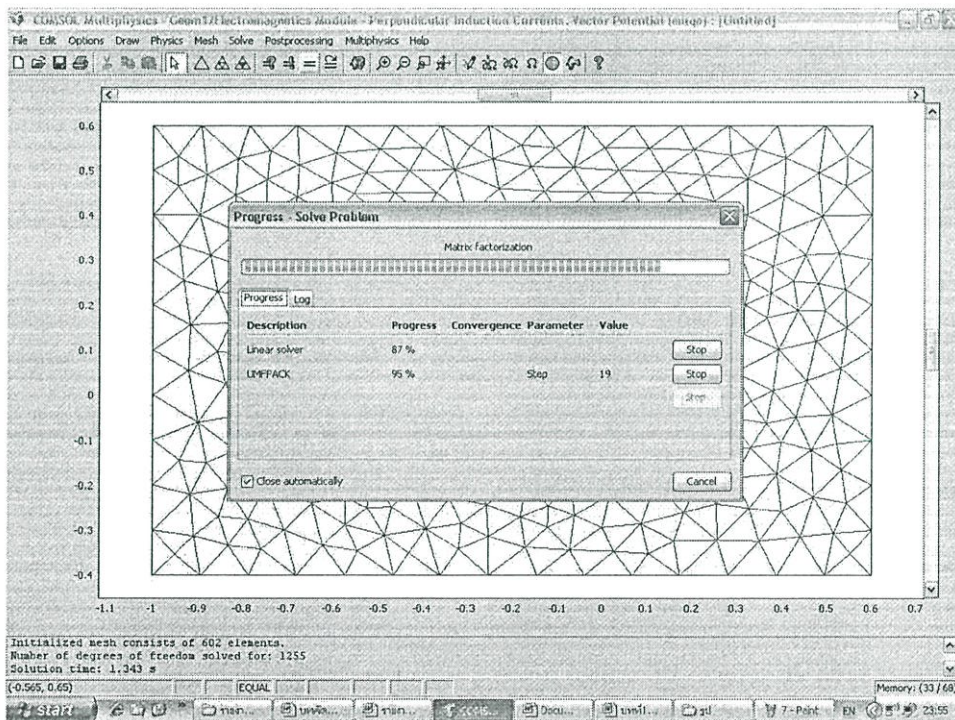
รูปภาพผนวก9 Mesh

## การคำนวณโปรแกรม (Solve)

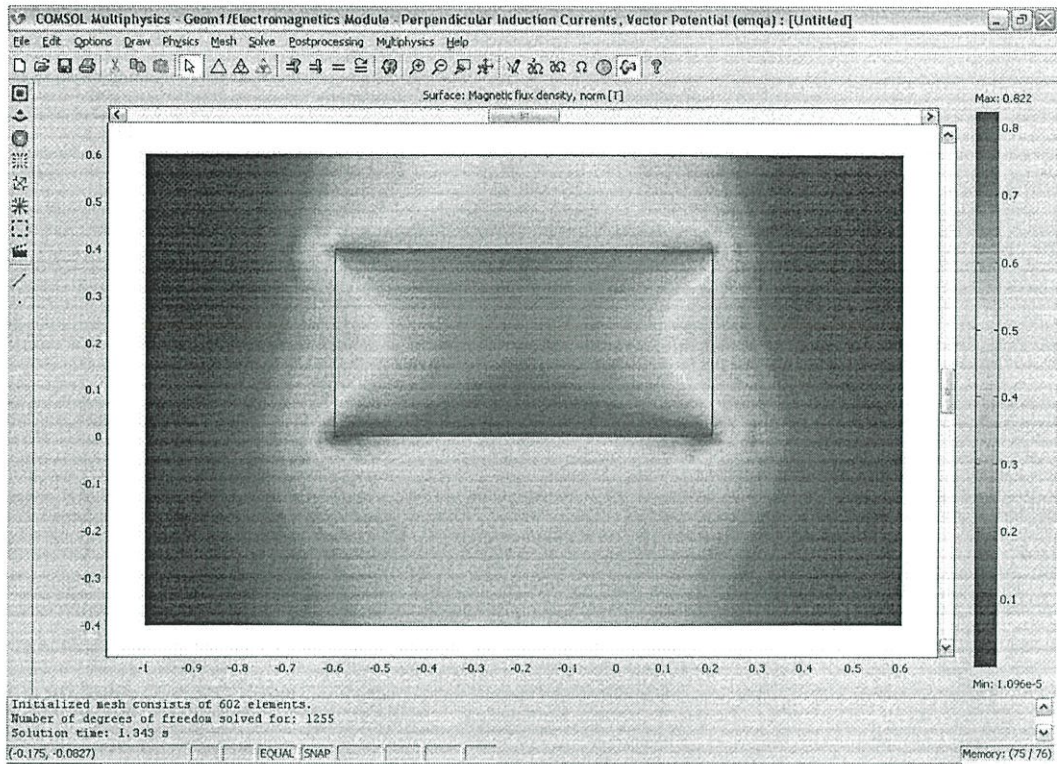
ในส่วนของการ Solve เป็นการทำให้อุปกรณ์นั้นเป็นไปตามค่าที่เรากำหนดไว้จะทำให้กระบวนการเป็นตามที่เรากำหนดค่าให้ แล้วจะได้ผลลัพธ์ของค่าที่เรากำหนดทำได้โดยการเลือก Solve Problem และหากจะต้องการทำการ Solve ในรูปแบบอื่นให้เข้าไปตั้งค่า ที่ Solve Parameters



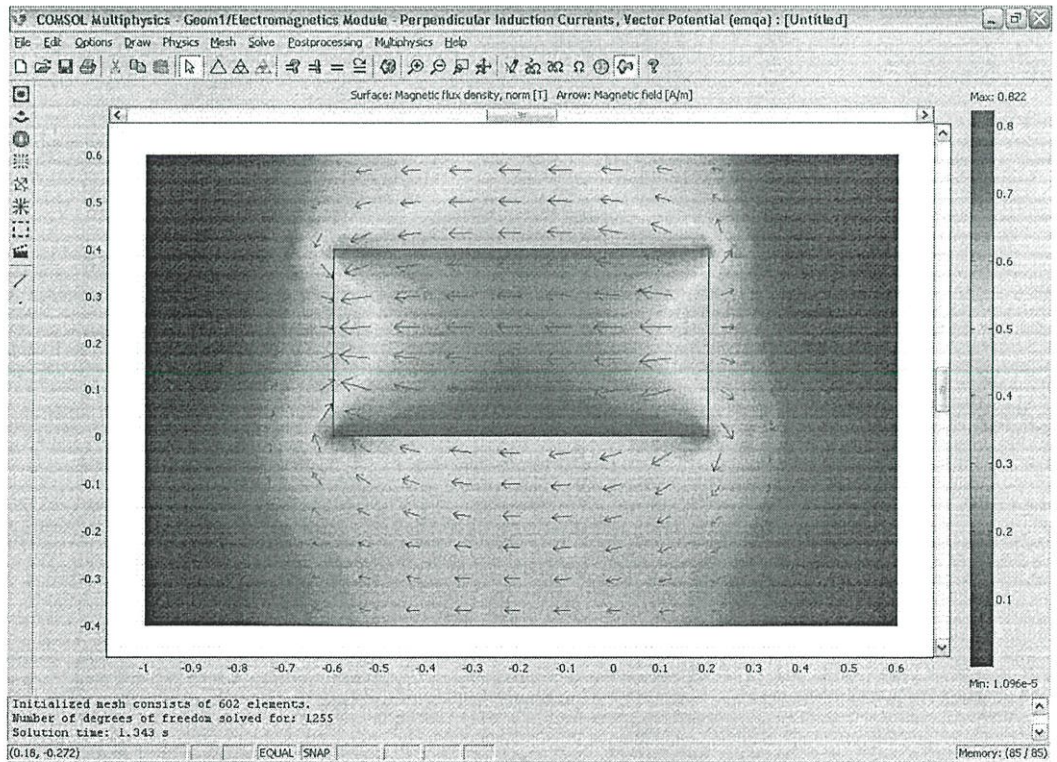
รูปภาคผนวก10 Solve Parameters



รูปภาคผนวก11 ขณะทำการ Solve Problem

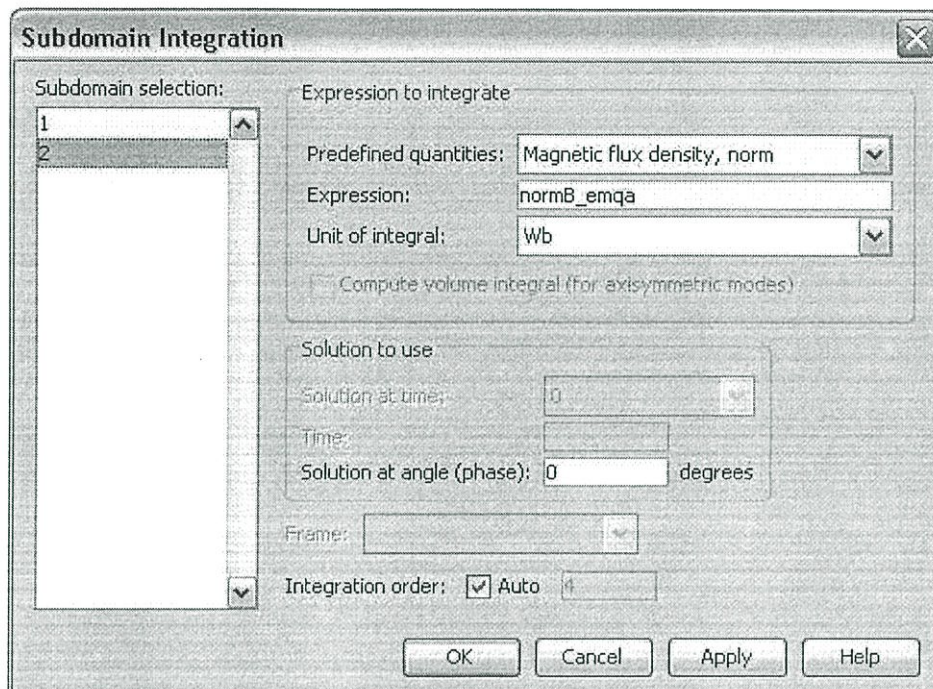


รูปภาคผนวก12 ความต่างของสีผิว (Surface) แสดงความเข้มของค่า Magnetic flux density



รูปภาคผนวก13 ความต่างของสีผิว(Surface) แสดงค่า Magnetic flux density ลูกศร (Arrow) แสดง Magnetic field

Integration ทั้ง Boundary และ Subdomain ต่างก็เป็นการ Integrate เพื่อเอาค่าที่ได้จากส่วน  
ที่เลือก และพารามิเตอร์ที่ต้องการ



รูปภาคผนวก14 Integration ค่าใน Subdomain ที่ต้องการ

## โปรแกรม MATLAB ใช้ในการเขียนกราฟของกราฟของสัญญาณ EMF ที่ได้จากการจำลองกับ ความถี่

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Simulation %%%%%%%%%%%
simEMAT;
%%%% x axis = point%%
%figure;plot(1:101,p,'k--');

%%%% x axis = time %%%
%figure;plot((1:101)*4e-10,p,'k--');

%%%% x axis = freq %%%
fs=1/(1e-8);
y=abs(fft(p,101));
y=y/max(y);
f = ((0:100)/101)*fs/1e6;
%figure;plot(f(1:20),y(1:20),'k--'); xlabel('MHz');
dby=20*log(y);
%figure;plot(f(1:20),dby(1:20),'k--'); xlabel('MHz');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Experiment %%%%%%%%%%%

dataEMAT;
%%%% x axis = point%%
%figure;plot(1:2001,p,'k');

%%%% x axis = time %%%
pp=p/max(p);
%figure;plot((1:2001)*4e-10,pp,'k');

%%%% x axis = freq %%%
fss=1/(4e-10);
yy=abs(fft(p,2000));
yy=yy/max(yy);
ff = ((0:2000)/2001)*fss/1e6;
figure;hold on;plot(ff(1:20),yy(1:20),'b');
xlabel('MHz');ylabel('Voltage');
plot(f(1:25),y(1:25),'r--');legend('Experiment','Simulation');hold
off;

dbyy=10*log(yy);
figure;hold on;plot(ff(1:20),dbyy(1:20),'b'); xlabel('MHz');ylabel('dB');
plot(f(1:25),dby(1:25),'r--');legend('Experiment','Simulation'); hold
off;

```

## การเผยแพร่ผลงานวิทยานิพนธ์หรือการศึกษาอิสระ

การเผยแพร่ผลงานวิทยานิพนธ์หรือการศึกษาอิสระของผู้วิจัยมีดังต่อไปนี้ คือ

1. S. Boonsang, K. Ruangbunkumsuk, P. Sinwattanakul and M. Lohakan  
**Finite Element Analysis of an EMAT Transducer for Picometer-scale Ultrasonic Displacement Measurements.** (2006,May 10-13)  
 Proceedings of the 2006 Electrical Engineering/ Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI) International Conference. P.299-302.
2. ขวัญชัย เรืองบุญคุ้มสุข, ปฏิพล สีนวัฒนกุล, มีชัย โลหะการ, ศิริเดช บุญแสง  
**การวิเคราะห์การวัดสัญญาณอัลตราโซนิกในหน่วยพิโคเมตรของ EMAT ด้วยวิธี Finite Element** (2549, 19-20 พฤษภาคม)  
 การประชุมวิชาการระดับชาติด้านคอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ ครั้งที่ 2 (หน้า 80-83)  
 National Conference on Computing and Information Technology (NCCIT)
3. ขวัญชัย เรืองบุญคุ้มสุข, ปฏิพล สีนวัฒนกุล, มีชัย โลหะการ, ศิริเดช บุญแสง  
**การวิเคราะห์การวัดสัญญาณอัลตราโซนิกในโลหะด้วย EMAT โดยวิธีไฟต์อีลิเมนต์**  
 (2549, 9-10 พฤศจิกายน)  
 การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 29 (หน้า 1105-1108)  
 Electrical Engineering Conference (EECON)

## ประวัติผู้เขียน

|                  |  |
|------------------|--|
| ชื่อ-นามสกุล     | นายขวัญชัย เรืองบุญคุ้มสุข   |
| วัน เดือน ปีเกิด | วันที่ 16 มกราคม พ.ศ.2525 ที่นครราชสีมา  |
| ที่อยู่          | 727/12 หมู่บ้านบึงทะเล ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา<br>10200 โทร.044-257185  |
| ประวัติการศึกษา  | 2546 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์<br>สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง<br>ปัจจุบันกำลังศึกษาอยู่วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์<br>สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |