

การประเมินสภาพการกีดกันของพื้นที่บรรจุโดยการทดสอบการปล่อยอะคูสติค



นายฤทธิรงค์ นิยมโชค

## ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชามาตรวิทยา

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CORROSION EVALUATION OF STORAGE TANK FLOOR BY ACOUSTIC EMISSION TESTING

Mr. Rittirong Niyomchoke

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science Program in Metrological Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การประเมินสภาพการกักกรองของพื้นด้งบรรจุโดยการทดสอบการปล่อยอะคูสติค

โดย

นายฤทธิรงค์ นิยมโชค

สาขาวิชา

มาตรวิทยา

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก


ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ต้นพงศ์ แก้วคงคา

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

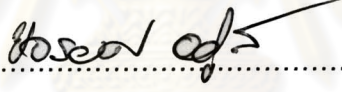
รองศาสตราจารย์ ศิริพร ดาวพิเศษ


ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิรพงศ์ ลิ้ม

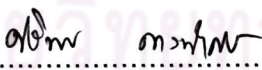
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้ฉันวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


  
..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ นารหนองบัว)


คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ขจรยศ อยุธยา)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ต้นพงศ์ แก้วคงคา)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(รองศาสตราจารย์ ศิริพร ดาวพิเศษ)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิรพงศ์ ลิ้ม)

  
..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมฤกษ์ จันทระอัมพร)

ฤทธิ์รงค์ นิยมโชค : การประเมินสภาพการกัดกร่อนของพื้นถังบรรจุโดยการทดสอบการปล่อยอะคูสติก. (CORROSION EVALUATION OF STORAGE TANK FLOOR BY ACOUSTIC EMISSION TESTING) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร.ต้นพงศ์ แก้วคงคา, อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : รศ.ศิริพร ดาวพิเศษ, ผศ.ดร.จิรพงศ์ ลิ้ม, 95 หน้า.

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการตรวจจับสนิทการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ด้วยวิธีการปล่อยคลื่นอะคูสติกในการทดสอบมีการปรับค่าความเข้มข้นของสารละลาย ได้แก่ 0.05, 0.10, และ 0.20 โมลาร์ เพื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของตัวแปรของสัญญาณอะคูสติกกับอัตราการกัดกร่อน โดยอัตราการกัดกร่อนหาได้จากการทดสอบด้วยวิธีโพเทนชิโอสแตติก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาวงจรโพเทนชิโอสแตตขึ้นมาเพื่อใช้ทดสอบ โดยวงจรที่พัฒนามาขึ้นจะมีขนาดกะทัดรัดและราคาถูกลงกว่าเครื่องมือทดสอบในเชิงพาณิชย์ จากผลการทดลองพบว่าสามารถตรวจจับสนิทการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนในสารละลายกรดได้ โดยตัวแปรที่สัมพันธ์ที่มีแนวโน้มสัมพันธ์กับการกัดกร่อน ได้แก่ ช่วงเวลาขาขึ้นสัญญาณ (Rise time), เคานท์ (Count), พลังงาน (Energy), ช่วงเวลาของสัญญาณ (Duration) แต่เมื่อพิจารณาจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวแปรที่ได้จากการทดสอบพบว่ามีความเบี่ยงเบนสูงเนื่องจากพื้นผิวชิ้นงานที่ใช้ทดสอบมีการเกิดรอยบกร่องตามบริเวณขอบ (Crevice) ผิวของชิ้นงาน งานวิจัยนี้ได้พัฒนาระบบประมวลผลสัญญาณเพื่อระบุตำแหน่งของการกัดกร่อนโดยทำการทดสอบการหาแหล่งกำเนิดของสัญญาณอะคูสติกจากตัวรับรู้สัญญาณ 4 ตัว ในการทดลองใช้แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเบอร์ 304 โดยจำลองการเกิดสัญญาณอะคูสติกจากอุปกรณ์กำเนิดสัญญาณอะคูสติก ในตำแหน่งต่างๆ กัน 5 ตำแหน่งๆ ละ 100 ครั้ง ผลการทดสอบพบว่าระบบที่พัฒนามาขึ้นมีความถูกต้องอยู่ที่ 91 เปอร์เซ็นต์และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 1 เซนติเมตร

สาขาวิชา.....มาตริวิทยา.....

ปีการศึกษา.....2552.....

ลายมือชื่อ นิสิต.....ฤทธิ์รงค์ นิยมโชค.....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

# #4972461423 : MAJOR METROLOGICAL SCIENCE

KEYWORDS : ACOUSTIC EMISSION / CORROSION / LOCALIZATION

RITTIRONG NIYOMCHOKE : CORROSION EVALUATION OF STORAGE TANK FLOOR BY ACOUSTIC EMISSION TESTING. THESIS ADVISOR : ASST.PROF.TONPHONG KAEWKONGKA, Ph.D., THESIS CO-ADVISOR : ASSOC.PROF.SIRIPORN DAOPISSET, ASST.PROF.JIRAPONG LIM, Ph.D., 95 pp.

In this research, acoustic emission (AE) technique is used for corrosion detection on carbon steel in hydrochloric acid solution. The test is performed by varying the concentrations of hydrochloric acid solution which are of 0.05, 0.10, 0.20 molar. Then the relation between AE parameters and corrosion rate is observed. The corrosion rate is measured by potentiodynamic technique, thus potentiostat circuit is designed and assembled for using in this research. The advantage of the constructed circuit is portable and affordable, compared to commercial potentiostat instrument. The results show that AE signal can be used for indication of the presence of corrosion. From the experiments, the AE parameters which are related to the corrosion rate are risetime, count, energy, duration. However, its standard deviation values are relatively high because of microscopic crevice at the surface of the working electrode. Moreover, a system for acoustic emission source localization was developed by using 4 acoustic emission sensors. The AE artificial source was generated using AE pulser. The experiments were performed on stainless steel 304 as the material used for storage tank floor. The tests were done on 5 different positions for 100 times per each position. The results is promising with the recognition rate at 91% accuracy with standard deviation of 1 centimetre.

Field of Study : Metrological Science

Academic Year : 2009

Student's Signature *Rittirong Niyomchoke*

Advisor's Signature *Tongke Kankake*

Co-Advisor's Signature *S. Daopisset*

Co-Advisor's Signature *Jirapong Lim*

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ซึ่งได้รับคำแนะนำและความรู้ รวมทั้งความคิดเห็นต่างๆ แนวคิดในการทำวิจัย รวมถึงการวิเคราะห์ผลการทดลองและการตรวจทานเล่มวิทยานิพนธ์ จาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร .ต้นพงศ์ แก้วคงคา ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ รองศาสตราจารย์ ศิริพร ดาวพิเศษ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร .จิรพงศ์ ลิ้ม ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์พงษ์ ทรงพงษ์ คณาจารย์หลักสูตรมาตรวิทยา และพิสิทธ์ทุกุทาน ที่เคยได้ให้คำแนะนำในส่วนของทฤษฎีและปฏิบัติต่างๆ ซึ่งเป็นส่วนเสริมทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

สุดท้ายผู้เขียนขอขอบพระคุณผู้ให้การสนับสนุนทางด้านทุนการศึกษาสำหรับการทำวิจัย ได้แก่บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และที่สำคัญขอขอบพระคุณสมาชิกทุกคนในครอบครัว ตลอดจนเพื่อนๆทุกคนที่เป็นแรงผลักดันและกำลังใจในการศึกษาครั้งนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	4
1.4 ขั้นตอนการวิจัย.....	4
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 ทฤษฎีการปล่อยคลื่นอะคูสติก.....	5
2.2 ทฤษฎีการกีดกร่อน.....	9
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	15
<b>บทที่ 3 การออกแบบเครื่องมือสำหรับหาอัตราการกีดกร่อน</b>	
3.1 การหาค่าศักย์กีดกร่อน.....	18
3.2 การหาค่าศักย์เทียบกับความเข้มข้นกระแส.....	19
3.3 การออกแบบวงจร.....	20
3.4 อัลกอริทึมในการเขียนโปรแกรม.....	21
3.5 การหาอัตราการกีดกร่อน.....	22

<b>บทที่ 4 การพัฒนาระบบสำหรับการหาตำแหน่งคลื่นอะคูสติก</b>	
4.1 การจัดเก็บสัญญาณ.....	23
4.2 การปรับแต่งสัญญาณ.....	25
4.3 การประมวลผลสัญญาณ.....	27
<b>บทที่ 5 วิธีการทดลอง</b>	
5.1 การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆของสัญญาณอะคูสติกเทียบกับ อัตราการกีดก่อน	
5.1.1 อุปกรณ์การทดสอบ.....	35
5.1.2 การทดสอบ.....	35
5.2 การทดสอบการหาตำแหน่งการกีดก่อนของระบบที่สร้างขึ้น	
5.2.1 อุปกรณ์การทดสอบ.....	39
5.2.2 การทดสอบ.....	39
<b>บทที่ 6 ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล</b>	
6.1 การทดสอบหาความสัมพันธ์ของตัวแปรของสัญญาณอะคูสติกกับอัตราการกีดก่อน	
6.1.1 ผลการทดสอบ.....	42
6.1.2 วิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	46
6.2 การทดสอบการหาตำแหน่งของสัญญาณอะคูสติก	
6.2.1 ผลการทดสอบ.....	52
6.2.2 วิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	61
<b>บทที่ 7 สรุปผลการทดสอบ</b>	
7.1 สรุปและวิเคราะห์ผล.....	63
7.2 การนำไปประยุกต์ใช้งาน.....	64



รายการอ้างอิง.....	65
ภาคผนวก.....	68
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	95



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
6.1	เปรียบเทียบผลการทดสอบการวัดสัญญาณอะคูสติก ที่เกิดขึ้นจากเหล็กกล้าคาร์บอนในสารละลายความเข้มข้นต่างๆ.....	45
6.2	ผลลัพธ์ของการทดสอบโปรแกรมเพื่อหาตำแหน่ง.....	53
6.3	ค่าเปอร์เซ็นต์ของความถูกต้องในการหาตำแหน่งและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน.....	62



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	ลักษณะของการกักตกร่อนทั้ง 8 ประเภท.....	5
2.2	ลักษณะการเกิดสัญญาณอะคูสติก.....	6
2.3	แผนผังวงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจวัดสัญญาณอะคูสติก.....	6
2.4	ตัวแปรต่างๆของคลื่นสัญญาณอะคูสติก.....	7
2.5	การเกิดปฏิกิริยาของเหล็กกล้าในสารละลายกรด.....	10
2.6	ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า.....	11
2.7	เส้นโค้งโพลาริเซชัน.....	13
3.1	เซลล์เคมีไฟฟ้าและวงจรไฟฟ้า.....	19
3.2	กราฟความต่างศักย์เทียบกับเวลา.....	19
3.3	กราฟโพลาริเซชันของเหล็กกล้า.....	20
3.4	วงจรที่ใช้ทดสอบ.....	20
3.5	แสดงการเขียนโปรแกรม แบบโฟลวชาร์ท.....	21
4.1	สัญญาณที่มีแรงดันคงที่ (DC).....	24
4.2	สัญญาณที่มีลักษณะรูปคลื่น.....	24
4.3	การชักตัวอย่าง (Sampling).....	25
4.4	ผลลัพธ์บริเวณจุดตัดความถี่ที่ได้จากกระบวนการกรองแต่ละประเภท.....	26
4.5	แสดงสัญญาณที่มีค่าออฟเซต.....	26
4.6	การติดตั้งตัวรับรู้สัญญาณอะคูสติก 3 ตัวเพื่อหาตำแหน่ง.....	28
4.7	พื้นฐานการหาตำแหน่งของคลื่นอะคูสติกด้วยตัวรับรู้ 3 ตัว.....	28
4.8	แสดงนิยามของค่าความต่างของเวลา.....	29
4.9	แสดงความครอบคลุมของพื้นที่เมื่อเพิ่มจำนวนตัวรับรู้.....	30
4.10	การวางตำแหน่งของตัวรับรู้สี่ตัว ในแนวของสี่เหลี่ยมจัตุรัส.....	30
4.11	แผนผังการทำงานของโปรแกรม.....	33
4.12	หน้าจอแสดงผลของโปรแกรมในการรับสัญญาณ.....	34
4.13	หน้าจอแสดงผลของโปรแกรมประมวลผลสัญญาณในการหาตำแหน่ง.....	34

ภาพที่		หน้า
5.1	ชุดทดสอบโพเทนชิโอดีนามิกส์เพื่อหาอัตราการกัดกร่อน.....	35
5.2	แสดงกระบอกบรรจุสารเคมีสำหรับทดสอบการกัดกร่อน.....	36
5.3	ชุดทดสอบวัดสัญญาณอะคูสติก.....	36
5.4	แผนผังการจัดอุปกรณ์ทดสอบ.....	37
5.5	อุปกรณ์สำหรับการทดสอบโพเทนชิโอดีนามิกส์.....	37
5.6	การประกอบหัววัดสัญญาณเข้ากับกระบอกทดสอบ.....	38
5.7	ต่อชุดทดสอบโพเทนชิโอดีนามิกส์เข้ากับชุดการกัดกร่อน.....	38
5.8	ระบบการประมวลผลสัญญาณการปล่อยคลื่นอะคูสติกเพื่อหาตำแหน่ง.....	40
5.9	แผ่นโลหะที่ใช้ทดสอบและการติดตั้งตัวรับรู้เพื่อหาตำแหน่ง.....	40
5.10	การติดตั้งตัวกำเนิดสัญญาณอะคูสติก.....	41
5.11	ตัวกำเนิดสัญญาณอะคูสติก.....	41
6.1	แสดงจำนวนการเกิดคลื่นอะคูสติกเทียบกับเวลา.....	42
6.2	แสดงกราฟโพลาริเซชัน (อัตราการกัดกร่อนเท่ากับ 0.002 มม.ต่อปี).....	42
6.3	แสดงจำนวนการเกิดคลื่นอะคูสติกเทียบกับเวลา.....	43
6.4	แสดงกราฟโพลาริเซชัน (อัตราการกัดกร่อนเท่ากับ 0.006 มม.ต่อปี).....	43
6.5	แสดงจำนวนการเกิดคลื่นอะคูสติกเทียบกับเวลา.....	44
6.6	แสดงกราฟโพลาริเซชัน (อัตราการกัดกร่อนเท่ากับ 0.057 มม.ต่อปี).....	44
6.7	พื้นผิวชิ้นงานก่อนและหลังการทดสอบ.....	45
6.8	ลักษณะสัญญาณอะคูสติกในช่วงการหาค่ากัดกร่อน.....	45
6.9	ลักษณะสัญญาณอะคูสติกในช่วงกระแสแคโทดิก.....	46
6.10	ลักษณะสัญญาณอะคูสติกในช่วงกระแสแอโนดิก.....	46
6.11	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนสัญญาณกับอัตราการกัดกร่อน.....	48
6.12	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาขาขึ้นของสัญญาณกับอัตราการกัดกร่อน..	48
6.13	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเคาท์กับอัตราการกัดกร่อน.....	49
6.14	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกับอัตราการกัดกร่อน.....	49
6.15	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาของสัญญาณกับอัตราการกัดกร่อน.....	50
6.16	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอมพลิจูดกับอัตราการกัดกร่อน.....	50
6.17	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยรากที่สองกับอัตราการกัดกร่อน.....	51
6.18	แสดงจุดพิกัดที่ทำการทดสอบทั้ง 5 จุด.....	52

ภาพที่		หน้า
6.19	ผลลัพธ์ในการหาดำแหน่งคลื่นอะคูสติคที่ตำแหน่ง 30,30 ซม.....	59
6.20	ผลลัพธ์ในการหาดำแหน่งคลื่นอะคูสติคที่ตำแหน่ง 30,70 ซม.....	59
6.21	ผลลัพธ์ในการหาดำแหน่งคลื่นอะคูสติคที่ตำแหน่ง 50,50 ซม.....	60
6.22	ผลลัพธ์ในการหาดำแหน่งคลื่นอะคูสติคที่ตำแหน่ง 70,30 ซม.....	60
6.23	ผลลัพธ์ในการหาดำแหน่งคลื่นอะคูสติคที่ตำแหน่ง 70,70 ซม.....	61
7.1	การนำไปประยุกต์ใช้งานกับพื้นถึงบรรจุจริง.....	64



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการประเมินสภาพการกัดกร่อนของวัสดุมีอยู่ 2 ประเภทหลัก ได้แก่ การทดสอบแบบทำลาย (Destructive testing) และการทดสอบแบบไม่ทำลาย (Non-destructive testing) โดยการทดสอบทั้งสองประเภทนั้นมีความแตกต่างกันดังนี้

การทดสอบแบบทำลาย คือการทดสอบที่ทำให้วัสดุเสียสภาพในการใช้งานไป ปกติจะเป็นการสุ่มตรวจโดยนำวัสดุที่ต้องการประเมินสภาพมาผ่าพิสูจน์เพื่อดูความต่อเนื่องภายใน หรือการทดสอบการชนของรถยนต์ เป็นต้น

การทดสอบแบบไม่ทำลาย (Non-Destructive Testing, NDT) คือการทดสอบโดยไม่ทำลายวัสดุที่ต้องการทดสอบ โดยการทดสอบด้วยวิธีการดังกล่าวนี้มีความสำคัญในการดูแลรักษาส่วนประกอบและโครงสร้างของระบบ เพื่อหาความผิดปกติที่อาจเกิดขึ้นได้ เช่น การแตกร้าว หรือการกัดกร่อนจากสารเคมี เป็นต้น การทดสอบดังกล่าวนี้มีหลายวิธีด้วยกัน เช่น

- การทดสอบโดยการตรวจพินิจ (Visual testing)
- การทดสอบโดยการซึมของของเหลว (Penetrant testing)
- การทดสอบโดยใช้ผงแม่เหล็ก (Magnetic particle testing)
- การทดสอบโดยกระแสไหลวน (Electromagnetic หรือ Eddy current testing)
- การทดสอบโดยใช้รังสี (Radiography)
- การทดสอบโดยใช้คลื่นเสียง (Ultrasonic testing)
- การทดสอบการตรวจจับคลื่นอคูสติกอีมิสชัน (Acoustic emission testing)
- การทดสอบการรั่วซึม (Leak testing)

สำหรับการทดสอบเพื่อประเมินสภาพของวัสดุโดยอาศัยหลักการปล่อย คลื่นอคูสติกอีมิสชัน (Acoustic emission testing) ได้กลายเป็นส่วนสำคัญส่วนหนึ่งในการทดสอบแบบไม่ทำลาย [1] โดยการทดสอบด้วยวิธีนี้ นิยมนำมาใช้ในขั้นตอนการตรวจสอบคุณภาพโครงสร้างของวัสดุต่างๆ ในโรงงานที่เกี่ยวข้องกับแรงดันภายในอันเนื่องมาจากก๊าซหรือของเหลว โดยการทดสอบดังกล่าวสามารถกระทำและแสดงผลแบบต่อเนื่องได้ในขณะที่กระบวนการผลิตของโรงงาน ยังคงดำเนินอยู่

ในภาคอุตสาหกรรม รอยบัพหรือรอยร้าวในโครงสร้างของวัสดุจำพวกถังบรรจุหรือท่อนำสารเคมีต่างๆ มักจะเป็นรอยบัพหรือรอยร้าวที่มีลักษณะเป็นรูฟองอากาศขนาดเล็กๆ อยู่ภายใน, รอยบัพหรือรอยร้าวจากการถูกกัดกร่อน, หรืออาจเป็นรอยของความไม่ต่อเนื่องภายในวัสดุอันเนื่องมาจากความบกพร่องในการผลิต อย่างใดอย่างหนึ่ง ซึ่งรอยบัพหรือรอยร้าวเหล่านี้จะขยายวงกว้างจนเป็นรอยร้าวขนาดใหญ่ขึ้นได้เมื่อวัสดุได้รับแรงดันจากของเหลวหรือก๊าซที่บรรจุอยู่ภายใน และเป็นเหตุทำให้เกิดปรากฏการณ์การปล่อยคลื่นอคูสติกอีมิสชัน ดังนั้นปรากฏการณ์การปล่อย คลื่นอคูสติกอีมิสชันจึงสามารถนำมาใช้เป็นปัจจัยในการสังเกตการณ์การขยายตัวของรอยร้าวได้ เพื่อเฝ้าระวังการเกิดความเสียหายขั้นรุนแรง ซึ่งโดยทั่วไปถึงบรรจุและท่อนำสารเคมีต่างๆ ในอุตสาหกรรมทั้งที่มีสภาพเก่าและใหม่ ล้วนจำเป็นที่จะต้องมีการประเมินสภาพอยู่อย่างสม่ำเสมอ เพื่อประเมินความต่อเนื่องภายในโครงสร้างของวัสดุ นอกจากนั้นกระบวนการประเมินสภาพดังกล่าวนี้จะถูกนำมารายงานผลเป็นข้อมูลสนับสนุนของกระบวนการผลิต อาทิเช่นการพบรอยบัพหรือรอยร้าวในวัสดุและตำแหน่งของการเกิดรอยบัพหรือรอยร้าว เป็นต้น

เมื่อเปรียบเทียบการประเมินการเกิดรอยบัพหรือรอยร้าวโดยใช้ สัญญาณอคูสติกอีมิสชัน กับการทดสอบแบบไม่ทำลายประเภทอื่นๆ [1] พบว่ามีข้อดีคือสามารถทำการทดสอบได้โดยไม่รบกวนระบบของกระบวนการผลิต และสามารถดูผลการประเมินได้ตามเวลาจริง ในขณะที่การทดสอบแบบไม่ทำลายประเภทอื่นๆ พบว่าต้องใช้เวลาในการทดสอบค่อนข้างนาน หรือไม่สามารรถดำเนินการทดสอบขณะที่ระบบยังทำงานอยู่

ถังบรรจุที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรมต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นปิโตรเคมีหรือสารเคมีชนิดต่างๆ มักเป็นถังบรรจุที่มีขนาดใหญ่และมีสารเคมีที่บรรจุอยู่ภายในซึ่งอาจมีอันตรายต่อชีวิตและสิ่งแวดล้อม หากถังบรรจุดังกล่าวไม่ได้รับการดูแลรักษาที่เหมาะสมก็อาจทำให้สารเคมีอันตรายเกิดการรั่วไหลไปปนเปื้อนพื้นดิน และส่งผลกระทบต่อธรรมชาติหรือสิ่งแวดล้อมบริเวณใกล้เคียง หรือหากเป็นถังบรรจุก๊าซก็อาจทำให้สภาวะอากาศเป็นพิษ ส่งผลเสียต่อระบบหายใจของสิ่งมีชีวิต ต่างๆ ไม่ว่าจะเป็น

เป็นมนุษย์หรือสัตว์ นอกจากนั้น หากถังบรรจุที่มีความเสียหายเล็กน้อยแต่ไม่ได้รับการเอาใจใส่ เป็นระยะเวลายาวนานจากผู้ควบคุมแล้ว ปัญหาดังกล่าวก็อาจขยายตัวลุกลามทำให้เกิดความเสียหายขั้นรุนแรง จนทำให้เสียชีวิตและทรัพย์สิน ดังนั้นในช่วงอายุการใช้งานของถังบรรจุทั้งหลาย ไม่ว่าจะเป็นถังบรรจุก๊าซ หรือ ถังบรรจุของเหลวจำพวกสารเคมีต่างๆทั้งในภาคอุตสาหกรรมและการใช้งานทั่วไปในชีวิตประจำวัน ล้วนจำเป็นที่จะต้องมีการทดสอบเพื่อตรวจหาความผิดปกติขึ้นอย่างสม่ำเสมอ เพื่อให้สามารถพบความผิดปกติได้แต่เนิ่นๆ ซึ่งมีผลทำให้สามารถป้องกันการชำรุดเสียหายร้ายแรงที่อาจทำให้เกิดอุบัติเหตุถึงแก่ชีวิตได้

ปัญหาที่มักพบในถังบรรจุในอุตสาหกรรม [1] มักเกิดจากรอยบัพร่องในโครงสร้างของวัสดุ ซึ่งอาจเกิดจากกระบวนการผลิตถังบรรจุที่ไม่สมบูรณ์ ทำให้มีรูเล็กๆหรือรอยร้าวที่อยู่ภายในรอยบัพร่องดังกล่าวก็จะขยายตัวทำให้เกิดรอยร้าวของถังบรรจุได้ นอกจากนี้รอยบัพร่องที่มักพบบนพื้นผิวของวัสดุ มักจะเกิดขึ้นจากการถูกกัดกร่อนซึ่งมีสาเหตุมาจากสารเคมีที่บรรจุทำปฏิกิริยากับพื้นผิวโลหะด้านในของถังบรรจุ เป็นเหตุให้ผนังของถังบรรจุมีความหนาที่ลดลง จนในที่สุดไม่สามารถทนรับแรงดันของสิ่งที่บรรจุไว้ภายในได้อีกต่อไป

โดยในปัจจุบันระบบที่ใช้ในการประเมินสภาพของถังบรรจุโดยอาศัย การตรวจจับคลื่นอนุสติก อิมิสชัน ต้องอาศัยอุปกรณ์ และเครื่องมือ ที่ผลิตจากต่างประเทศ จึงทำให้มีราคาที่สูงมาก ดังนั้นจึงพัฒนาระบบที่ใช้ทดสอบขึ้นเองโดยอาศัยหลักการและทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้องเข้ามาประยุกต์ เพื่อให้ได้ระบบที่มีความเฉพาะในการตรวจวัด สามารถนำมาทดสอบเพื่อประเมินสภาพการกัดกร่อนของพื้นถังบรรจุได้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

สำหรับงานวิจัยนี้ จะเป็นการประเมินสภาพการกัดกร่อนของพื้นถังบรรจุ ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดการกัดกร่อนมากเนื่องจากเป็นพื้นที่ ที่ได้รับแรงดันมากกว่าพื้นผิวในบริเวณอื่นๆ [2] การตรวจจับ คลื่นอนุสติก อิมิสชัน การ ทดสอบแบ่งออกเป็นสองส่วน โดยส่วนแรกเป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรของสัญญาณ อนุสติกอิมิสชันเปรียบเทียบกับอัตราการกัดกร่อน และในส่วนที่สองเป็นการหาตำแหน่งที่เกิดสัญญาณอนุสติกอิมิสชัน



### 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- 1) วิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆของสัญญาณอคูสติกอีมิสชันเทียบกับอัตราการกัดกร่อน
- 2) วิเคราะห์ตำแหน่งของการกัดกร่อนบริเวณกันดั้งโดยใช้วิธีการประมวลผลสัญญาณ

### 1.4 ขั้นตอนการวิจัย

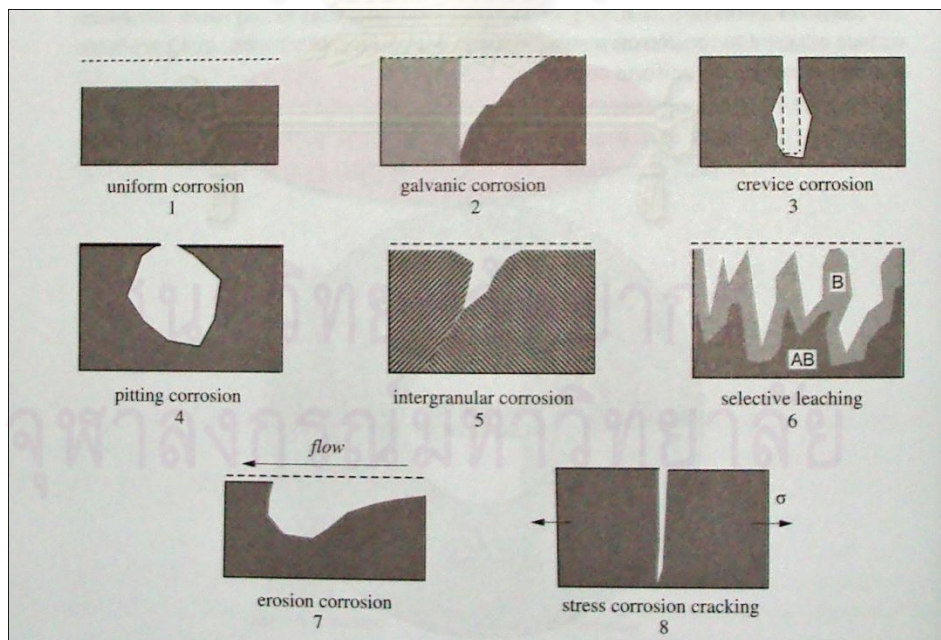
- 1) ค้นคว้าข้อมูลเรื่องการตรวจสอบการกัดกร่อนของพื้นดั้งโดยสัญญาณ อคูสติกอีมิสชัน และเรื่องที่เกี่ยวข้อง
- 2) ศึกษาทฤษฎีการปล่อยคลื่นอคูสติกอีมิสชัน
- 3) ศึกษาทฤษฎีการเกิดการกัดกร่อน และเทคนิคที่ใช้ในการหาค่าอัตราการกัดกร่อน
- 4) สร้างและจัดเตรียมระบบการหาค่าอัตราการกัดกร่อน
- 7) ทดสอบเพื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอคูสติกอีมิสชัน และอัตราการกัดกร่อน
- 8) พัฒนาระบบสำหรับการหาตำแหน่งคลื่นอคูสติกอีมิสชัน
- 9) ทดสอบระบบหาตำแหน่งที่สร้างขึ้น และสรุปผลการทดสอบ
- 12) ทบทวนเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และเขียนวิทยานิพนธ์

## บทที่ 2

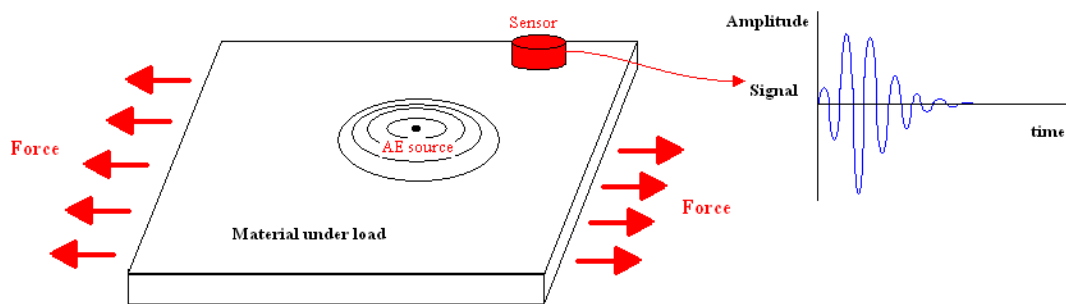
### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ทฤษฎีการปล่อยคลื่นอคูสติกอิมพัลส์

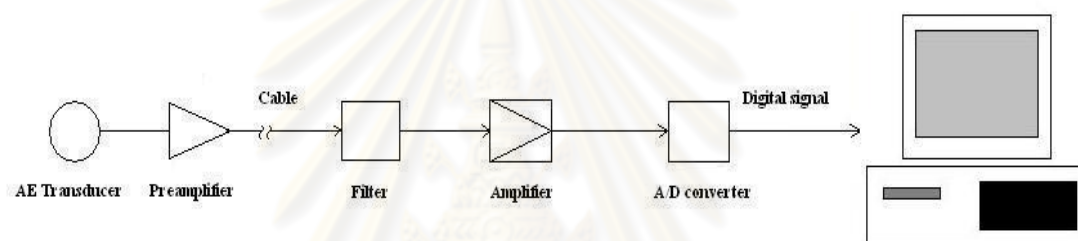
โดยทั่วไปวัสดุประเภทโลหะที่นำมาสร้างเป็น ถังบรรจุหรือท่อที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรม มักมีรอยบกพร่องอันเกิดมาจากความผิดพลาดของกระบวนการผลิตมาตั้งแต่แรกอยู่แล้ว เช่นการเกิดรูฟองอากาศขนาด เล็ก หรือรอยความไม่ต่อเนื่องที่อยู่ภายในเนื้อวัสดุ และนอกจากสาเหตุของความผิดพลาดจากกระบวนการผลิตแล้ว รอยบกพร่องยังสามารถเกิดได้จากปฏิกิริยาการกัดกร่อนระหว่างวัสดุของถังบรรจุหรือท่อ กับสารเคมีที่ บรรจุอยู่ภายใน ได้เช่นกัน โดยการกัดกร่อนก็มีด้วยกันอยู่หลายประเภท[3]ได้แก่ การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ (Uniform corrosion), การกัดกร่อนแบบกัลวานิก (Galvanic corrosion), การกัดกร่อนบริเวณรอยแยก (Crevice corrosion), การกัดกร่อนแบบหลุม (Pitting corrosion), การกัดกร่อนบริเวณขอบเกรน (Intergranular corrosion), การผุกร่อนแบบเลือก (Selective leaching), การกัดกร่อนร่วมกับการกัดเซาะ (Erosion corrosion), การแตกร้าวจากแรงดันและการกัดกร่อน (Stress corrosion cracking) โดยการกัดกร่อนทั้ง 8 ประเภทสามารถแสดงลักษณะได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ลักษณะของการกัดกร่อนทั้ง 8 ประเภท[4]



รูปที่ 2.2 ลักษณะการเกิดสัญญาณอะคูสติกอีมีสชัน



รูปที่ 2.3 แผนผังวงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจวัดสัญญาณอะคูสติกอีมีสชัน

เมื่อวัสดุที่มีรอยบกพร่องได้รับแรงกระทำในปริมาณหนึ่ง ก็จะเกิดความเค้น ความเครียดภายในขึ้น ความเค้นความเครียดดังกล่าวมีผลทำให้เกิดการขยายตัวของรอยบกพร่องและเปลี่ยนรูปพลังงานเป็นคลื่นแบบยืดหยุ่น (Elastic wave) คลื่นดังกล่าวจะมีความถี่สูงมากเกินจากขอบเขตที่มนุษย์จะสามารถได้ยินได้ ปฏิกิริยาดังที่อธิบายไปนี้เรียกว่าการปลดปล่อยสัญญาณอะคูสติกอีมีสชัน ดังแสดงในรูปที่ 2.2

สำหรับการวัดสัญญาณอะคูสติกที่เกิดขึ้น โดยพื้นฐานจะต้องอาศัยอุปกรณ์หลายตัวประกอบเข้าด้วยกัน เพื่อให้มีคุณสมบัติพื้นฐานในการทดสอบได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งอุปกรณ์ที่สำคัญหลักๆจะมีดังนี้

1. ตัวรับรู้สัญญาณอะคูสติก (AE transducer) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เป็นตัวรับรู้สัญญาณโดยทำหน้าที่แปลงสัญญาณเสียงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ซึ่งอุปกรณ์นี้จะติดไว้กับผิวของวัสดุที่ทำการทดสอบเพื่อรับสัญญาณความถี่สูง ส่วนผิวหน้าที่ใช้รับคลื่นจะมีขนาดประมาณ 8-20 มิลลิเมตร ซึ่งจะถูกติดให้แน่นเข้ากับพื้นผิวของวัสดุที่ทำการประเมินสภาพโดยการทาด้วยไขหรือกาว

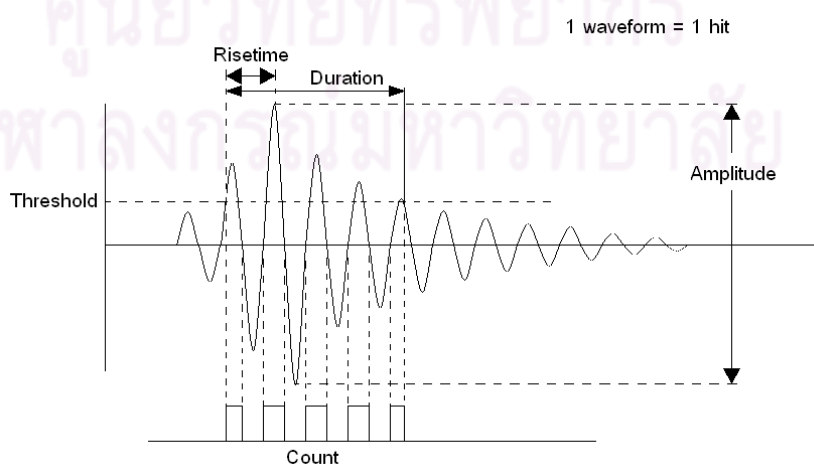
2. วงจรขยายสัญญาณขั้นปฐมภูมิ (Pre-amplifier) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ขยายสัญญาณในขั้นแรกสุด โดยปกติสัญญาณอะคูสติกจะมีระดับความแรงของสัญญาณ (Amplitude) อยู่ที่ 1 ไมโครโวลต์ ถึง 1 มิลลิโวลต์ สัญญาณดังกล่าวจะต้องถูกขยายโดยผ่านวงจรดังกล่าวให้เพิ่มขึ้นราว 1,000 ถึง 100,000 เท่า เพื่อให้ขนาดของ สัญญาณมีค่ามากเพียงพอที่จะส่งผ่านสายนำสัญญาณระยะไกลได้ ดังนั้นอุปกรณ์ขยายสัญญาณขั้นปฐมภูมิจึงมักจะถูกติดตั้งอยู่ภายในบริเวณของวัสดุที่ต้องการทำการประเมินสภาพ[4]

3. วงจรกรองสัญญาณ (Filter) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่กรองสัญญาณที่เข้ามารบกวนระหว่างสายนำสัญญาณระยะไกล ซึ่งสัญญาณรบกวนดังกล่าวอาจอยู่ในคลื่นความถี่ของคลื่นวิทยุ หรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เช่น โทรศัพท์เคลื่อนที่ หรือ อุปกรณ์หม้อแปลงไฟฟ้า เป็นต้น

4. วงจรขยายสัญญาณ (Amplifier) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ขยายระดับความแรงของสัญญาณให้อยู่ที่ประมาณ 1-2 โวลต์ ก่อนการนำไปแปลงสัญญาณเพื่อให้อยู่ในรูปแบบเชิงตัวเลข (Digital)

5. วงจรแปลงสัญญาณ (A/D converter) ทำหน้าที่แปลงสัญญาณอะคูสติกให้อยู่ในรูปแบบเชิงตัวเลข ซึ่งเป็นรูปแบบของข้อมูลที่คอมพิวเตอร์สามารถนำไปประมวลผลได้

ในการวัดการปล่อยสัญญาณอะคูสติก เมื่อนำสัญญาณที่วัดได้มาวิเคราะห์ จะได้ค่าของตัวแปรต่างๆที่ก่อให้เกิดรูปสัญญาณขึ้นมา ได้แก่ แอมพลิจูด, ช่วงเวลาของสัญญาณ (Duration time), ช่วงเวลาขาขึ้นของสัญญาณ (Risetime), พลังงาน (Energy), ค่าเฉลี่ยรากที่สอง (Root mean square หรือ rms) ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ตัวแปรต่างๆของคลื่นสัญญาณอะคูสติก

โดยตัวแปรต่างๆแต่ละตัวแปร ดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้น มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. แอมพลิจูด (Amplitude) คือ ค่าสูงสุด หรือต่ำสุดของระดับสัญญาณอะคูสติก มีหน่วยเป็นเดซิเบล (dB) โดยมีความสัมพันธ์อธิบายได้ดังสมการที่ 1 ดังนี้[6]

$$dB = 20 \log \left( \frac{V_{max}}{1 \mu volt} \right) - \text{Preamplifier gain (dB)} \quad (2.1)$$

โดยที่  $V_{max}$  คือค่าสูงสุดของระดับสัญญาณอะคูสติก

2. ช่วงเวลาของสัญญาณ (Duration time) คือ ระยะเวลาตั้งแต่จุดเริ่มต้นที่สัญญาณอะคูสติกมีแอมพลิจูดมากกว่าค่าขีดเริ่มเปลี่ยน (Threshold) จนถึงจุดสิ้นสุดที่สัญญาณมีแอมพลิจูดต่ำกว่าระดับขีดเริ่มเปลี่ยน (ดูรูปที่ 2.4 ประกอบ) มีหน่วยเป็นมิลลิวินาที

3. ช่วงเวลาขาขึ้นของสัญญาณ (Risetime) คือ ระยะเวลาตั้งแต่จุดเริ่มต้นที่สัญญาณอะคูสติกมีแอมพลิจูดมากกว่าค่าขีดเริ่มเปลี่ยน จนถึงจุดที่สัญญาณอะคูสติกมีแอมพลิจูดสูงสุด (ดูรูปที่ 2.4 ประกอบ) มีหน่วยเป็นมิลลิวินาที

4. พลังงาน (Energy) คือ ค่าอินทิกรัล (Integral) ของค่าสัมบูรณ์สัญญาณอะคูสติกเทียบกับช่วงเวลาของสัญญาณ มีหน่วยเป็นจูล (Joule) ดังสมการที่ 2

$$\text{Energy} = \frac{1}{R} \int_0^T A^2(t) dt \quad (2.2)$$

เมื่อ R คือ ความต้านทานไฟฟ้าภายในของเครื่องวัด

A คือ แอมพลิจูดของสัญญาณอะคูสติก ณ เวลาใดๆ

T คือ ช่วงเวลาของสัญญาณ

5. ค่าเฉลี่ยรากที่สอง (RMS) คือ ค่าเฉลี่ยทางแรงดันไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นรูปคลื่นดังรูปที่ 2.4 มีหน่วยเป็นโวลต์ (Volt) มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 3 ดังนี้

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} A^2(t) dt} \quad (2.3)$$

เมื่อ T คือ ช่วงเวลาของสัญญาณ

A คือ แอมพลิจูดของสัญญาณอะคูสติก ณ เวลาใดๆ

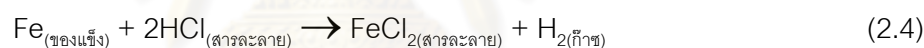
6. ค่าขีดเริ่มเปลี่ยน (Threshold) คือค่าที่กำหนดขึ้นเพื่อบอกถึงแอมพลิจูดที่ระบบจะทำการเริ่มเก็บสัญญาณ การตั้งค่าจะพิจารณาจากระดับของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในระบบทั้งหมด แล้วตั้งค่าที่สูงกว่าเล็กน้อยเพื่อตัดสัญญาณรบกวนเหล่านั้น

## 2.2 ทฤษฎีการกัดกร่อน

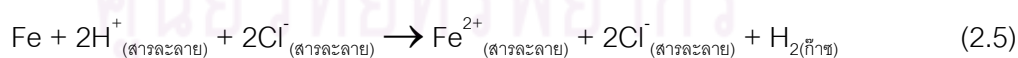
โดยทั่วไปปฏิกิริยาการกัดกร่อนของวัสดุจำพวกโลหะเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแล้วไม่สามารถย้อนกลับได้ ระหว่างโลหะกับตัวออกซิไดส์ (Oxidizing agent) ดังนี้[4]

โลหะ + ตัวออกซิไดส์  $\rightarrow$  โลหะที่ถูกออกซิไดส์ (Oxidized metal) + ตัวรีดิวซ์ (Reducing agent)

ตัวอย่างเช่น การกัดกร่อนของเหล็กกล้าในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก แสดงได้ตามสมการที่ 2.4 ดังนี้

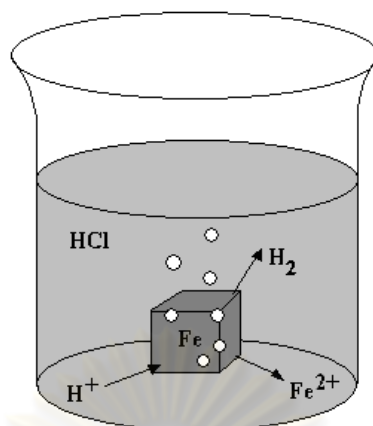


โดยในสารละลายไฮโดรคลอริกในสภาวะที่ปฏิกิริยาเกิดการกัดกร่อนของเหล็กกล้า เมื่อพิจารณาองค์ประกอบของสารละลายจะไม่ได้มีเพียงสารละลายไฮโดรคลอริกเพียงชนิดเดียว หากแต่จะประกอบด้วยสารละลายเฟอร์รัสคลอไรด์ (Ferrous chloride) ปรากฏอยู่ในรูปของไอออน (Ionic form) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวสามารถอธิบายดังในสมการที่ 2.5 ดังนี้



โดยจากสมการดังกล่าว มีตัวออกซิไดส์ของปฏิกิริยาในที่นี้คือ  $\text{H}^+$  (สารละลาย) ดังในสมการที่ 2.5 ด้านซ้าย ทำให้เกิดไอออนของโลหะคือ  $\text{Fe}^{2+}$  (สารละลาย) และฟองก๊าซไฮโดรเจน  $\text{H}_{2\text{(ก๊าซ)}}$  ซึ่งสมการที่ 2.5 นี้สามารถนำมาเขียนให้อยู่ในรูปแบบที่ง่ายกว่าได้ดังนี้

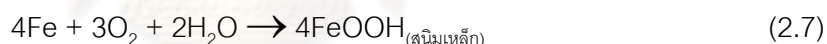




### The corrosion of iron in acidic solution

รูปที่ 2.5 การเกิดปฏิกิริยาของเหล็กกล้าในสารละลายกรด

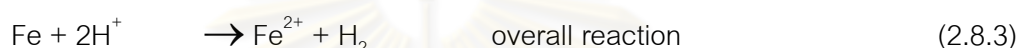
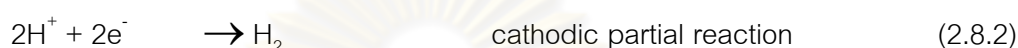
สำหรับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในสารละลายที่มีสภาพเป็นกลางหรือเป็นด่าง การกัดกร่อนของโลหะจะเกิดขึ้นได้จากปฏิกิริยาระหว่างโลหะกับออกซิเจน ตัวอย่างเช่นโลหะที่สัมผัสอากาศและมีความชื้น จะทำให้เกิดสนิมเหล็กขึ้น ดังสมการที่ 2.7



ในสถานะของสารละลายที่เป็นกรด โลหะสามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้เช่นกัน แต่ในสภาวะดังกล่าวนี้ ปริมาณของออกซิเจนในสารละลายจะมีน้อยกว่าปริมาณของโปรตอน (Proton) มากๆ ดังนั้นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นของโลหะกับออกซิเจนในสารละลายกรดจะไม่ถูกนำมาพิจารณาในปฏิกิริยา

การกัดกร่อนภายใต้สภาวะที่มีความชื้นและก๊าซออกซิเจนอาจกล่าวได้ว่าเป็นการกัดกร่อนแบบแห้ง (Dry corrosion) ซึ่งจะเกิดในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูงหลายร้อยองศาเซลเซียส ส่วนการกัดกร่อนภายใต้สารละลายที่เป็นกรดสามารถเกิดขึ้นในอุณหภูมิปกติ หรือที่อุณหภูมิต่ำ (ประมาณ 25 องศาเซลเซียส) ซึ่งอาจเรียกได้ว่าการกัดกร่อนแบบเปียก (Wet corrosion)[4]

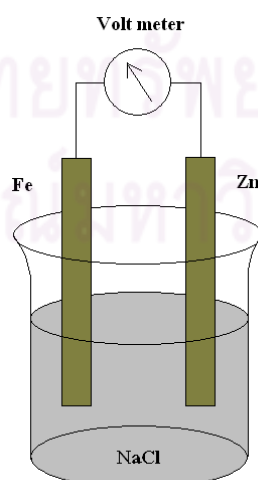
ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า (Redox) จะประกอบด้วยเกิดการเกิดปฏิกิริยา 2 ส่วนด้วยกัน หรือบางครั้งอาจเรียกว่าปฏิกิริยาไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half-cell reaction) ในส่วนที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะถูกเรียกว่าโนดิกพาเซียร์แอคชัน (Anodic partial reaction) และในส่วนที่เกิดปฏิกิริยารีดักชัน จะถูกเรียกว่าแคโทดิกพาเซียร์แอคชัน (Cathodic partial reaction) ดังแสดงในสมการที่ 2.8.1-2.8.3



ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าจะเกิดขึ้นได้จะประกอบด้วยองค์ประกอบ 4 ส่วนด้วยกัน ได้แก่ ขั้วแอโนด ขั้วแคโทด สารละลายนำไฟฟ้า และตัวนำไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.6

จากกฎของฟาราเดย์ [5] เมื่อกำหนด  $q_i$  คือจำนวนโมลของโลหะที่เกิดปฏิกิริยาตามสัดส่วนของประจุไฟฟ้า (ซึ่งแทนค่าด้วย  $Q$ ) ที่ไหลผ่านระหว่างขั้วไฟฟ้า (Electrode) กับอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) จะเขียนความสัมพันธ์ได้ว่า

$$Q = n \times F \times q_i \quad (2.9)$$



รูปที่ 2.6 ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า



จากสมการที่ 2.9  $F$  คือค่าคงที่ของฟาราเดย์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 96,485 คูลอมบ์ต่อโมล (C/mol) และ  $n$  คือเลขประจุ (ไม่มีหน่วย) ตัวอย่างเช่นในสมการที่ 8 ในส่วนที่อธิบายถึงปฏิกิริยาไฟฟ้าที่ขั้วแอโนด ซึ่งเป็นเหล็กกล้า ในที่นี้ค่า  $n$  คือ 2

เมื่อนำสมการที่ 9 มาหาค่าอนุพันธ์เทียบกับเวลา จะได้ว่า

$$I = nF \frac{dn_i}{dt} \quad (2.10)$$

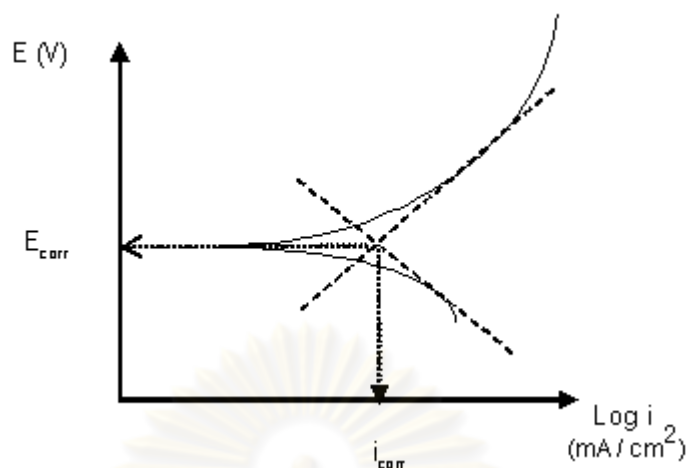
โดยที่กระแสไฟฟ้ามีหน่วยเป็นแอมแปร์ (Amperes) แทนค่าด้วย  $I$  ตามความสัมพันธ์ของ  $I = \frac{dQ}{dt}$

และ  $\frac{dn_i}{dt}$  จะแสดงถึงอัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นโมลต่อวินาที ดังนั้นกฎของฟาราเดย์จึงบ่งบอกว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยา จะมีค่าสัดส่วนแปรผันกับความเข้มของกระแสที่ไหลระหว่างขั้วไฟฟ้ากับอิเล็กโทรไลต์

สำหรับอัตราการเกิดการกัดกร่อนสามารถพิจารณาได้หลายวิธีด้วยกัน[4] ได้แก่

- การหามวลที่หายไป เทียบกับพื้นที่ผิวที่ถูกกัดกร่อน และเทียบกับเวลา
- การหาโมลที่ถูกเปลี่ยนรูป เทียบกับพื้นที่ผิวที่ถูกกัดกร่อน และเทียบกับเวลา
- การหาความลึกที่ถูกกัดกร่อนไป เทียบกับเวลา
- การหาโดยคำนวณจากความเข้มข้นของกระแส

วิธีการหาอัตราการกัดกร่อนด้วยวิธีโพลาริเซชัน มีจุดเด่นอยู่ที่ใช้เวลาในการทดสอบไม่มาก ในขณะที่ในการหาอัตราการกัดกร่อนโดยการหามวลที่หายไป (Weight loss) จำเป็นที่จะต้องทำการทดสอบหลายวันจึงจะได้ค่าที่ถูกต้อง สำหรับวิธีการโพลาริเซชันมีพื้นฐานมาจากกฎของฟาราเดย์ (สมการที่ 2.10) ซึ่งอธิบายว่าความเข้มกระแส ระหว่างขั้วไฟฟ้ากับอิเล็กโทรไลต์ มีสัดส่วนความสัมพันธ์กับอัตราของการเกิดปฏิกิริยา เมื่อนำมาประยุกต์เข้ากับทฤษฎีอื่นๆ [6] เพื่อนำมาใช้พิจารณาเส้นโค้งโพลาริเซชัน (รูปที่ 2.7) ซึ่งได้จากการทดสอบปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า โดยสามารถอธิบายได้ตามสมการที่ 2.11 ดังนี้



รูปที่ 2.7 เส้นโค้งโพลาริเซชัน

$$i_{app,c} = i_c - i_a \quad (2.11)$$

โดยที่  $i_c$  คือความเข้มข้นกระแสที่ขั้วแคโทด และ  $i_a$  คือความเข้มข้นกระแสที่ขั้วแอโนด ในขณะที่  $i_{app,c}$  คือกระแสที่จ่ายให้ปฏิกิริยาจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าภายนอกเข้าที่ขั้วแคโทด ในทางตรงกันข้าม หากจ่ายกระแสเข้าที่ขั้วแอโนด จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.12 ดังนี้

$$i_{app,a} = i_a - i_c \quad (2.12)$$

เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าศักย์โดยจ่ายศักย์ไฟฟ้าเข้าไปในปฏิกิริยา โดยเพิ่มขึ้นหรือลดลงจากค่าศักย์ไฟฟ้ากััดกร่อน ( $E_{corr}$ ) ซึ่งเป็นศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ในสภาวะสมดุลย์ จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ที่จ่ายให้ปฏิกิริยากับกระแสที่ไหลในวงจร ดังนี้

$$\varepsilon_c = \beta_c \cdot \log \frac{i_c}{i_{corr}}$$

และ 
$$\varepsilon_a = \beta_a \cdot \log \frac{i_a}{i_{corr}} \quad (2.13)$$

โดย  $\varepsilon_a$  และ  $\varepsilon_c$  คือค่าแคโทดิกโอเวอร์โวลเตจ (Cathodic overvoltage) และแอโนดิกโอเวอร์โวลเตจ (Anodic overvoltage) ตามลำดับ ส่วน  $\beta_c$  และ  $\beta_a$  คือค่าคงที่แคโทดิกทาเฟลและแอโนดิกทาเฟล (Cathodic และ Anodic tafel constant) ตามลำดับ ส่วนค่า  $i_{corr}$  คือความเข้มข้นกระแส

กัดกร่อน ซึ่งจะบอกถึงอัตราการกัดกร่อน จากสมการที่ 2.11 และ 2.13 เมื่อนำมาเขียนใหม่ จะได้ว่า[4]

$$i_{app,c} = i_{corr} \left( 10^{\frac{\varepsilon_c}{\beta_c}} - 10^{\frac{\varepsilon_a}{\beta_a}} \right) \quad (2.14)$$

และอาศัยกฎของโอห์ม จะทำให้หาค่าความต้านทานโพลาริเซชัน (Polarization resistance)

แทนค่าด้วย  $R_p$  ดังนี้[4]

$$\begin{aligned} R_p &= \left[ \frac{d\varepsilon}{di_{app}} \right]_{\varepsilon \rightarrow 0} \quad \text{หรือ} \quad \left[ \frac{\Delta\varepsilon}{\Delta i_{app}} \right]_{\varepsilon \rightarrow 0} \\ &= \frac{\beta_a \beta_c}{2.3 \cdot i_{corr} \cdot (\beta_a + \beta_c)} \end{aligned} \quad (2.15)$$

ดังนั้นเมื่อพิจารณาเส้น โค้งโพลาริเซชัน จะได้ว่าค่าความชันของเส้นโค้งที่จุด  $\varepsilon$  เข้าใกล้ 0 (ในบริเวณใกล้ๆกับศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน) คือค่าความต้านทานโพลาริเซชัน ( $R_p$ ) และเมื่อแทนค่า  $\beta_a$  และ  $\beta_c$  (แทนด้วยค่าบวก) ซึ่งเป็นค่าคงที่ปฏิกิริยา หาได้จากความชันของเส้นโค้งที่ปฏิกิริยาแอโนดิกและปฏิกิริยาแคโทดิก ตามลำดับ ทำให้วิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นกระแสกัดกร่อน ได้ดังนี้ (Stern-geary equation)[10]

$$i_{corr} = \frac{1}{R_p} \cdot \frac{\beta_a \beta_c}{\beta_a + \beta_c} \quad (2.16)$$

และในขั้นสุดท้าย หลังจากที่ได้วิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นของกระแสกัดกร่อน (มีหน่วยเป็นกระแสต่อพื้นที่, A/cm<sup>2</sup>) จากเส้นโค้งโพลาริเซชันแล้ว จะสามารถหาค่าอัตราการกัดกร่อนได้ [7] โดยมีหน่วยเป็นมิลลิเมตรต่อปี ดังนี้[10]

$$mmpy = \frac{i_{corr} \cdot 3.27 \cdot 10^3 \cdot a}{z \cdot D} \quad (2.17)$$

โดยที่อัตราการกัดกร่อนมีหน่วยเป็นมิลลิเมตรต่อปี แทนค่าด้วย mmpy, a คือค่าน้ำหนักอะตอม (Atomic weight), D คือความหนาแน่นของโลหะ ที่ต้องการหาอัตราการกัดกร่อน มีหน่วยเป็นกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร, และ z คือจำนวนอิเล็กตรอนที่ถ่ายโอนต่อโมล (Equivalent number,

eq/mole) ซึ่งวิธีการหาอัตราการกัดกร่อนด้วยวิธีนี้ มีความเหมาะสมต่อการทดลองเนื่องจาก สัญญาณอะคูสติกที่ได้ จะไม่มีสัญญาณที่เกิดจากปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำเข้ามารบกวน (ดูภาคผนวก ค.) และสำหรับเครื่องมือที่ใช้หาอัตราการกัดกร่อนด้วยวิธีนี้ ได้แก่ เครื่อง โปเทนชิโอสแตท (Potentiostat)

## 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ลารี เอ ดูซิงก์ และคณะ (Larry A.Duesing) [11] ได้ทำการศึกษาการปล่อยคลื่นอะคูสติก สำหรับการทดสอบแบบไม่ทำลายของวัสดุคอมโพสิต (Composite materials) โดยเหตุผลที่งานวิจัยนี้ได้เลือกการปล่อยสัญญาณ อคูสติก อิมิตชันเป็นวิธีในการทดสอบเนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย ไม่ซับซ้อน ต้นทุนต่ำเมื่อเทียบกับประสิทธิภาพในการทดสอบ อุปกรณ์พกพาสะดวก และไม่เกิดการรบกวนระบบจากเสียงในสภาพแวดล้อมเนื่องจากคลื่นอะคูสติกดังกล่าวอยู่ในช่วงความถี่สูง

เอช มาไซล์ และคณะ (H.Mazille) [12] ได้ศึกษาวิธีการปล่อยสัญญาณอะคูสติกเพื่อนำมาใช้ในการเฝ้าระวังการเกิดการกัดกร่อนแบบหลุม บนเหล็กกล้าไร้สนิม(AISI 316L)

เจมส์ ซี สปอล และคณะ (James C.Spall) [13] ได้ทำการพัฒนาการหาตำแหน่งที่มีการปล่อยสัญญาณอะคูสติก อิมิตชัน ด้วยวิธีโครงข่ายรับรู้ (Neural network) เพื่อใช้ในการทดสอบแบบไม่ทำลาย

เอฟ เฟอเรอร์ และคณะ (F.Ferrer) [14] ได้อาศัยการปล่อยคลื่นอะคูสติกเป็นวิธีในการศึกษาการกัดกร่อนอันเนื่องมาจากกา รัชัดดู(Abrasion-corrosion) โดยการยิงอนุภาคเข้าไปใส่วัสดุทดสอบและวัดค่าสัญญาณอะคูสติกที่เกิดขึ้น เพื่อหาพลังงานในการกระทบของอนุภาคกับวัสดุ

จีออง ร็อค ควอน และคณะ (Jeong-Rock Kwon) [15] ได้ทำการวิจัยการทดสอบโดยใช้วิธีการปล่อยสัญญาณอะคูสติกในการประเมินสภาพของถังบรรจุ และศึกษาเพื่อแยกแยะลักษณะของการเกิดสัญญาณอะคูสติกที่เกิดจากรอยบกร่อง ออกจากสัญญาณอะคูสติกที่เกิดจากปัจจัยที่เข้ามารบกวนอื่นๆ เช่นสัญญาณที่เกิดจากการเปิดหรือปิดวาล์วของถัง เป็นต้น ซึ่งการศึกษาดังกล่าวมีการใช้การทดสอบแบบไม่ทำลายด้วยวิธีการใช้รังสี (Radiography test) มาเป็นการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบ

แมนเนอร์ เจ ซันเดซาน และคณะ (Mannur J.Sundaresan) [16] ได้พัฒนาการหาตำแหน่งที่มีการปล่อยสัญญาณอะคูสติกด้วยตัวรับรู้เดี่ยวแบบแจกแจง (Single channel distributed sensor) ซึ่งเป็นตัวรับรู้สัญญาณอะคูสติกหลายๆตัว รวมกันไว้ภายในชิ้นเดียว ทำให้ประหยัดพื้นที่และต้นทุนของอุปกรณ์ ซึ่งตัวรับรู้ดังกล่าวถูกนำมาใช้ในงานการหาตำแหน่งของสัญญาณอะคูสติกที่เป็นแนวเส้นตรงหรือใน 1 มิติ

เค ดาโรวิกกี และคณะ (K.Darowicki) [17] ได้ทำการศึกษาการกักก่อนแบบหลุมของเหล็กกล้าไร้สนิม โดยค่าเฉลี่ยทางตัวแปรต่างๆของสัญญาณอะคูสติกและทดสอบร่วมกับวิธีการโพเทนซิโอดนามิกส์ (Potentiodynamic) จากงานวิจัยนี้ได้สรุปว่าการทดสอบโดยอาศัยการปล่อยคลื่นอะคูสติกนั้นไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในการประเมินสภาพการกักก่อนแบบหลุม และสาเหตุที่ทำให้เกิดการปล่อยคลื่นอะคูสติก มาจากการก่อตัวของฟองก๊าซไฮโดรเจนภายในหลุม (การกักก่อนในสารละลายกรด) มิได้เกิดจากการแตกตัวของแผ่นฟิล์มในขณะที่มีการสูญเสียมวลของโลหะ

แมททิว อิง และคณะ (Matthew Ing) [18] ได้ทำการศึกษาวิจัย ซึ่งงานวิจัยดังกล่าวเป็นการศึกษาคุณลักษณะที่มีความสัมพันธ์ระหว่างการปล่อยสัญญาณอะคูสติกกับการกักก่อน เพื่อนำมาใช้ในการประเมินสภาพของวัสดุที่เกิดรอยบกร่องตั้งแต่ในระยะเริ่มต้น

ยุน-โฮ ยู และคณะ (Yeun-Ho Yu) [19] ได้ศึกษาการตรวจจ็รอยบกร่องในวัสดุคอมโพสิตโดยอาศัยการปล่อยคลื่นอะคูสติก อิมิสชัน

วาย พี คิม และคณะ (Y.P.Kim) [20] ทำการศึกษาความสัมพันธ์ของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเจนรีดักชัน (Oxygen reduction) บนเหล็กกล้าไร้สนิม เปรียบเทียบกับสัญญาณ อะคูสติก อิมิสชันที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการกักก่อน โดยในงานวิจัยดังกล่าวสรุปว่าการเกิดการปล่อยคลื่นอะคูสติก อิมิสชันนั้นมาจากปฏิกิริยาการเกิดฟองก๊าซ

เฟรดเดอริก เฟอเรอร์ และคณะ (Frédéric Ferrer) [21] ได้ทำการศึกษาการเกิดฟิล์มเฟอร์รัสซัลเฟต ( $\text{FeSO}_4$ ) ของเหล็กกล้าคาร์บอนในสารละลายกรดซัลฟูริก โดยอาศัยการปล่อยคลื่น อะคูสติก อิมิสชัน ในงานวิจัยดังกล่าวเป็นการทดสอบการกักก่อนของท่อ อในสภาวะที่สารละลายกรดซัลฟูริกมีการไหล เปรียบเทียบกับหยุดนิ่ง โดยพบว่าเมื่อความเร็วในการไหลของสารละลายมีค่าต่ำกว่าค่าวิกฤติ สารละลายจะทำปฏิกิริยากับเหล็กกล้าคาร์บอนและจะมีแผ่นฟิล์มเฟอร์รัสซัลเฟตเกิดขึ้นที่พื้นผิว ทำให้ปกป้องการเกิดการกักก่อนขึ้น แต่เมื่อสารละลายที่อยู่ภายใน

มีความเร็วในการไหลมากขึ้นกว่าค่าวิกฤติ ชั้นของแผ่นฟิล์มดังกล่าวจะถูกทำลายทำให้เกิดการกัดกร่อนขึ้นได้อีกครั้ง โดยสภาวะการกัดกร่อนที่เกิดขึ้น จะอาศัยการปล่อยคลอรีน ออกซิเจน อิมิสซันเป็นตัวบ่งบอกและวัดปริมาณ นอกจากนี้งานวิจัยนี้กล่าวว่าการเกิดคลอรีน ออกซิเจน อิมิสซันมีสาเหตุมาจากการเกิดฟองก๊าซในปฏิกิริยา

ซี จอมเดชา และคณะ (C.Jomdecha) [22] ใช้วิธีการปลดปล่อยคลอรีน ออกซิเจน อิมิสซันในการศึกษาการกัดกร่อนแบบต่างๆ ได้แก่ การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ การกัดกร่อนแบบหลุม การกัดกร่อนแบบรอยแตก และการกัดกร่อนจากการร้าว

เครก เวบสเตอร์ และคณะ (Craig Webster) [23] ได้ทำการวิจัยเพื่อพัฒนาการทดสอบแบบไม่ทำลายบนถังบรรจุก๊าซธรรมชาติอัด(CNG) โดยอาศัยวิธีการปล่อยคลอรีน ออกซิเจน อิมิสซัน

เอส รามาดาน และคณะ (S.Ramadan) [24] ทำการวิจัยการทดสอบเพื่อตรวจหาการกัดกร่อนจากการร้าวบนเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง (High-strength steel) ที่ใช้ในโครงสร้างของคอนกรีตอัด(Prestressed concrete) ด้วยวิธีการปล่อยคลอรีน ออกซิเจน อิมิสซัน

เฮช ไชค์ และคณะ (H.Shaikh) [25] ได้ศึกษาการใช้วิธีการปล่อยสัญญาณ ออกซิเจน อิมิสซันในการประเมินสภาพการกัดกร่อนจากการร้าวบนเหล็กกล้าไร้สนิม(AISI type 316LN)

แมทธิว จีอออฟฟรี แบชเตอร์ และคณะ (Matthew Geoffrey Baxter) [26] ได้ทำการพัฒนาวิธีการหาตำแหน่งที่เกิดคลอรีน ออกซิเจน อิมิสซัน ด้วยวิธีการทำแผนที่ (Mapping) ซึ่งเหมาะที่จะนำไปใช้กับวัสดุที่มีรูปทรงซับซ้อน และมีความผิดพลาดในการระบุตำแหน่งที่น้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการคำนวณแบบเดิม

พีท เซทแลค และคณะ (Petr Sedlak) [27] ได้พัฒนาวิธีการหาตำแหน่งที่เกิดการปลดปล่อยสัญญาณออกซิเจน อิมิสซันขึ้นบนแผ่นโลหะ และพัฒนาระบบให้ทำงานโดยอัตโนมัติ

ซี ยู กรอส (C.U.Gross) [28] ได้พัฒนาระบบการหาตำแหน่ง ที่มีการปล่อยสัญญาณ ออกซิเจน อิมิสซันในโครงสร้างที่มีขนาดใหญ่

## บทที่ 3

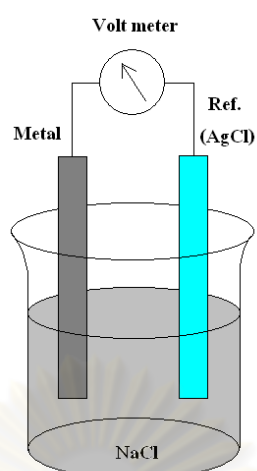
### การออกแบบเครื่องมือสำหรับหาอัตราการกัดกร่อน

การทดสอบด้วยวิธีโพเทนชิโอดีนามิกส์ เป็นการทดสอบการกัดกร่อนสำหรับโลหะแบบหนึ่งที่ใช้ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าเข้ามาเกี่ยวข้อง เพื่อใช้ศึกษาการเกิดแผ่นฟิล์มบนโลหะและการแตกของแผ่นฟิล์ม ระหว่างที่มีการเปลี่ยนแปลง ระดับความต่างศักย์บนโลหะที่ทำการทดสอบ การทดสอบดังกล่าวโดยปกติแล้ว จะต้องใช้เครื่องโพเทนชิโอสแตทในการทดสอบ เพื่อหาอัตราการกัดกร่อนของโลหะในสารละลายชนิดต่างๆ ซึ่งเครื่องมือดังกล่าวนี้มีน้ำหนักมากและราคาแพง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ออกแบบและสร้างเครื่องมือวัดนี้ ขึ้น เพื่อนำมาใช้ในการทดสอบการกัดกร่อนของโลหะด้วยวิธีโพเทนชิโอดีนามิกส์ โดยอาศัยเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลในการควบคุมการทดลองผ่านพอร์ต ขนาน โดยมีโปรแกรม ชุดคำสั่งเพื่อส่งค่าตัวแปรไปยังชุดวงจรอินเทอร์เฟซที่ถูกออกแบบและสร้างขึ้นมาสำหรับการจำลองการกัดกร่อนขอ งวัสดุที่ต้องการทดสอบด้วยปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีโดยผู้ใช้งานสามารถตั้งค่าตัวแปรต่างๆสำหรับการทดลองได้ เพื่อความสะดวกในการใช้งาน ซึ่งวงจรดังกล่าวนี้มีต้นทุนที่ต่ำและมีขนาดที่กระทัดรัดกว่ามาก

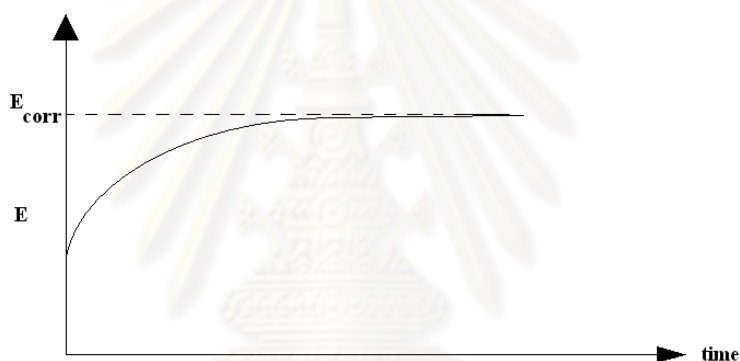
สำหรับการทดสอบการกัดกร่อนของโลหะด้วยวิธีโพเทนชิโอดีนามิกส์ จะมีขั้นตอนในการทดสอบดังต่อไปนี้

#### 3.1 การหาค่าศักย์การกัดกร่อน

ในเบื้องต้น การทดสอบจะเริ่มต้นจากการหาค่าศักย์การกัดกร่อนเทียบกับเวลา กล่าวคือเมื่อโลหะถูกจุ่มในสารละลายนำไฟฟ้าชนิดหนึ่ง ดังในรูปที่ 3.1 จะทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้นระหว่างโลหะเทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง เมื่อปล่อยให้ทิ้งไว้ จะพบว่าความต่างศักย์จะมีค่าเพิ่มขึ้น และคงที่ในที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งโลหะในแต่ละชนิดก็จะมีค่าเวลาที่ให้ศักย์มีค่าคงที่ ที่แตกต่างกันไป



รูปที่ 3.1 เซลเคมีไฟฟ้า และวงจรวัดไฟฟ้า



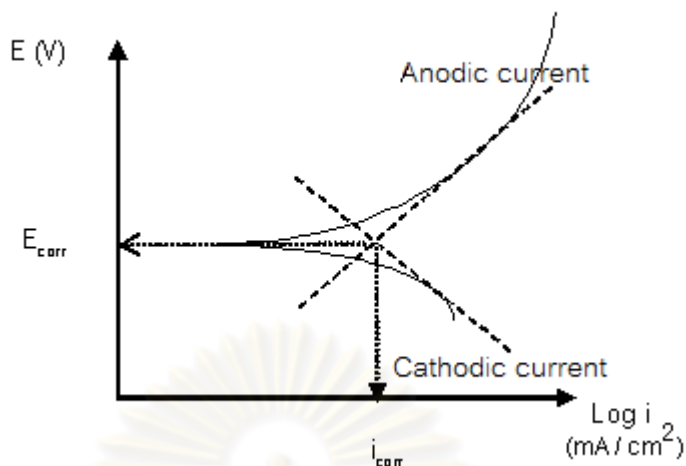
รูปที่ 3.2 กราฟความต่างศักย์เทียบกับเวลา ( $E_{\text{corr}}$  vs time)

### 3.2 การหาค่าศักย์เทียบกับความเข้มข้นกระแส

วิธีการทดสอบในขั้นถัดมา มีชื่อเรียกว่าเทคนิคโพเทนชิโอดินามิกส์ (Potentiodynamic technique) ซึ่งเป็นการทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าบนโลหะเทียบกับกระแสที่ไหลระหว่างขั้วแอโนดและแคโทด

โดยการทดสอบจะเริ่มป้อนค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้นที่ค่า  $E = E_{\text{corr}} - 250 \text{ mV}$  และสิ้นสุดที่ไม่เกิน  $1600 \text{ mV}$  และมีอัตราการเพิ่มในการป้อนศักย์ไฟฟ้าที่ประมาณ  $10 \text{ mV}$  ทุก  $10$  วินาที ผลที่ได้ เมื่อนำค่า  $E$  และ  $\log I$  มาพล็อตกราฟ จะได้ กราฟโพลาร์ไรเซชัน ดังในรูปที่ 3.3 จะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นกระแสและศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยา เพื่อหาค่าศักย์ไฟฟ้าและกระแสกัดกร่อนนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าอัตราการกัดกร่อนในลำดับถัดไป



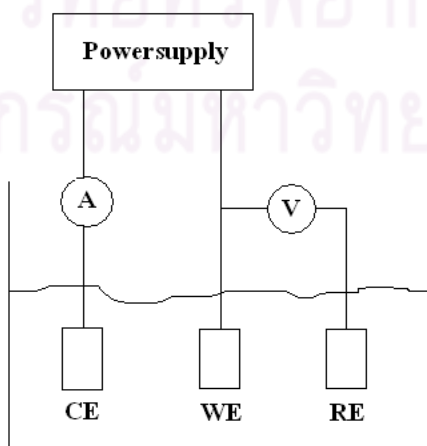


รูปที่ 3.3 กราฟโพลาริเซชันของเหล็กกล้า

### 3.3 การออกแบบวงจร

เซลล์เคมีไฟฟ้า มีอยู่หลายแบบด้วยกัน โดยมาตรฐานแล้ว จะประกอบด้วยขั้วต่างๆ 3 ชนิดด้วยกัน ได้แก่ ขั้วทำงานหรือขั้วโลหะที่ใช้ในการทดสอบ (Working electrode, WE), ขั้วเคาน์เตอร์ (Counter electrode, CE), และ ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode, RE)

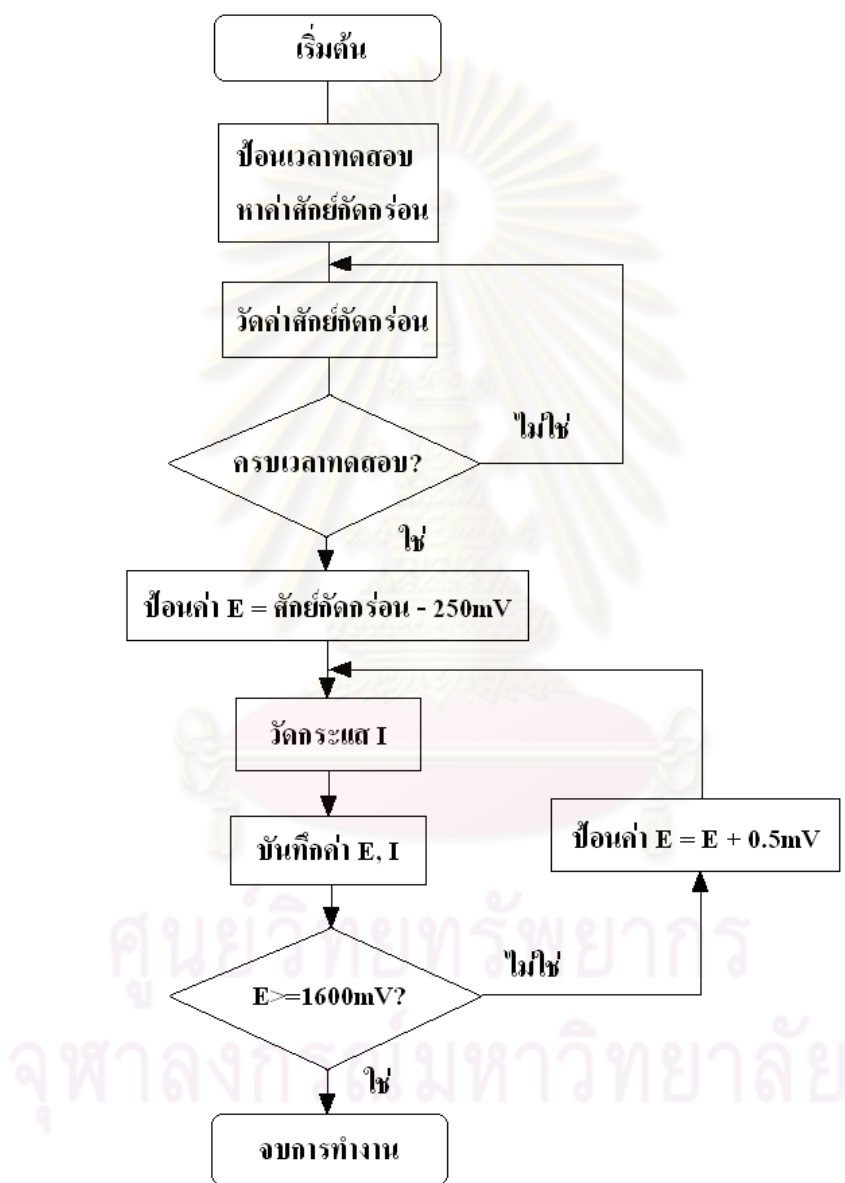
สำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด ในที่นี้เป็นภากรทดสอบโดยการใช้คอมพิวเตอร์ที่ประกอบอุปกรณ์การ์ด PCI-1742U Advantech 16-bit, 1MS/s Multifunction card และวงจรที่ใช้สำหรับในส่วนเซลล์เคมีไฟฟ้า จะมีรายละเอียดดังในรูปที่ 3.4 โดยอุปกรณ์ที่สำคัญในวงจรได้แก่ ออปแอมป์เบอร์ 741, สวิตช์รีเลย์, และไอซีเบอร์ ULN2003 (ดูภาคผนวก)



รูปที่ 3.4 วงจรที่ใช้ทดสอบ

### 3.4 อัลกอริทึมในการเขียนโปรแกรม

ในการเขียนโปรแกรม จะมีลำดับขั้นตอนต่างๆ แสดงเป็นผังงาน (Flowchart) ตามในรูปที่ 3.5 ได้ดังนี้



รูปที่ 3.5 แสดงลักษณะการเขียนโปรแกรม  
แบบโฟลวชาร์ท

### 3.5 การหาอัตราการกัดกร่อน

ในการวิเคราะห์ผลการทดสอบด้วยวิธีการ Tafel slope analysis เพื่อหาอัตราการกัดกร่อน จะนำผลการทดสอบซึ่งอยู่ในรูปแบบของกราฟโพลาร์ไรเซชันหรือความสัมพันธ์ระหว่างค่า E กับ I ที่ได้จากการทดสอบ เพื่อหาค่า  $I_{corr}$  ด้วยวิธี Tafel plot คือการหาจุดตัดระหว่างเส้น Anodic current กับ Cathodic current และนำมาคำนวณหาค่าอัตราการกัดกร่อนโดยใช้สมการที่ 3.1 ดังนี้[10]

$$CR = (I_{corr} * K * a) / (A * z * D) \quad (3.1)$$

โดยที่

- CR = อัตราการกัดกร่อน มีหน่วยขึ้นกับค่า K
- $I_{corr}$  = ค่าความเข้มกระแสกัดกร่อน ( $A/cm^2$ )
- K =  $3.27 \times 10^3$  สำหรับหน่วย mm/year
- a = atomic weight (g/mole)
- D = ความหนาแน่น (แทนด้วย  $7.87 \text{ g/cm}^3$ )
- z = equivalent no. (eq/mole)

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### การพัฒนาระบบสำหรับการหาตำแหน่งคลื่นอคูสติกอิมิสชัน

การทดสอบนี้ประกอบด้วยคอมพิวเตอร์อุตสาหกรรมสมรรถนะสูง ได้แก่ Advantech510 ภายในติดตั้งการ์ดรับสัญญาณแบบเอนกประสงค์ความถี่สูง รุ่น PCI-1714 ซึ่งสามารถรับสัญญาณได้พร้อมกัน 4 ช่องสัญญาณ

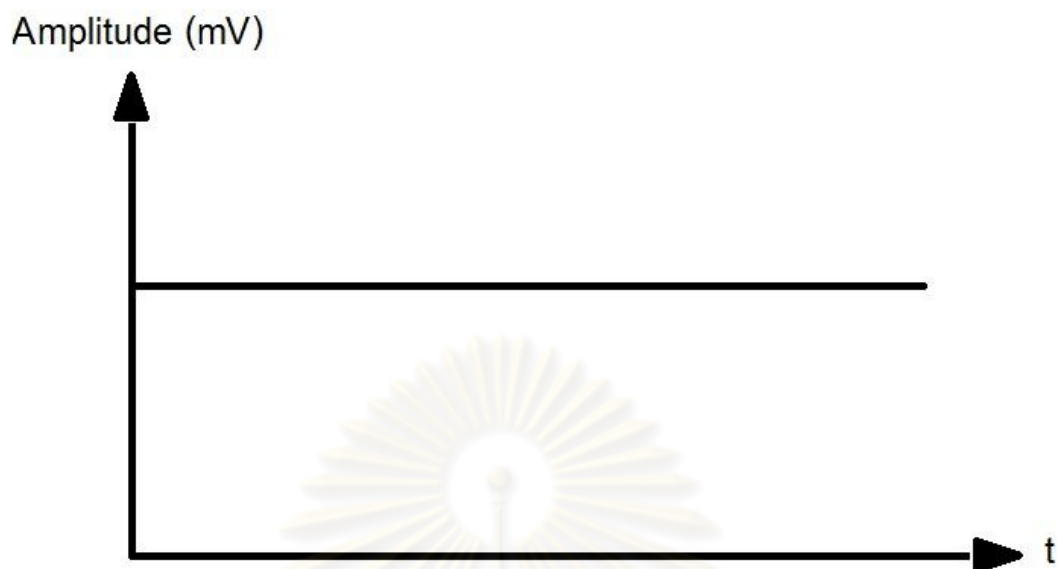
สำหรับอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่รับสัญญาณ อคูสติก อิมิสชัน ใช้อุปกรณ์ของ AE monitrend ได้แก่ ตัวรับรู้สัญญาณ รุ่น S140A, วงจรขยายสัญญาณปฐมภูมิ รุ่น ACS-2100/PA, และ วงจรขยายสัญญาณหลักรุ่น ACS AE-16ch โดยชุดอุปกรณ์ดังกล่าวนี้จะตอบสนององความถี่ของสัญญาณอะคูสติกได้ดีในย่าน 100 กิโลเฮิร์ต และในส่วนของซอฟต์แวร์ที่ใช้พัฒนาระบบในการรับสัญญาณและประมวลผล ได้แก่ Labview 7 การพัฒนาระบบซอฟต์แวร์เพื่อใช้ในการรับสัญญาณอะคูสติก อาศัยความรู้พื้นฐานอยู่ 3 ประการหลักด้วยกัน ดังนี้[8]

- การจัดเก็บสัญญาณ (Signal acquisition)
- การปรับแต่งสัญญาณ (Signal conditioning)
- การประมวลผลสัญญาณ (Signal processing)

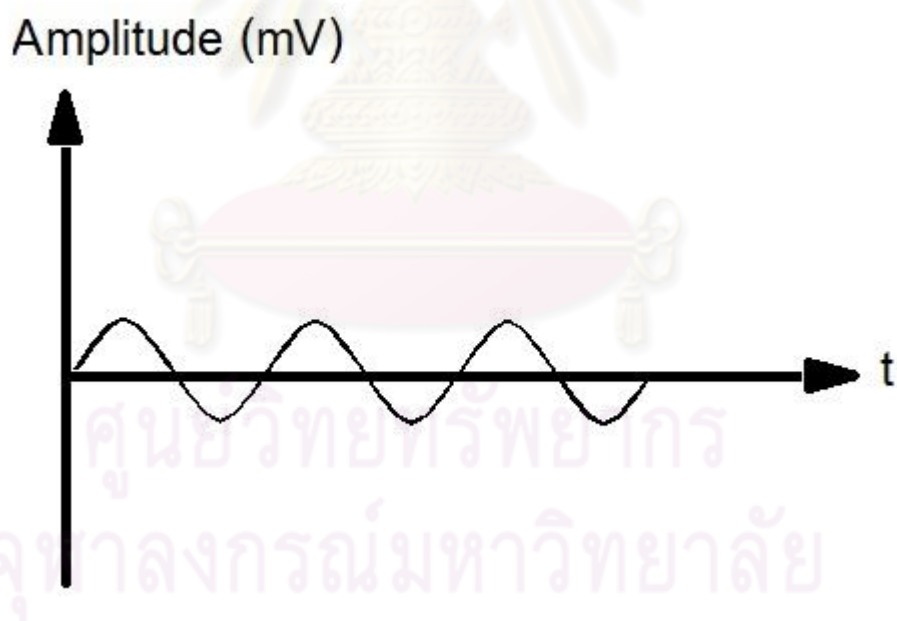
#### 4.1 การจัดเก็บสัญญาณ

โดยเบื้องต้นอุปกรณ์ที่ใช้รับสัญญาณอะคูสติกจะมีหน้าที่ในการแปลงสัญญาณอะคูสติกให้อยู่ในรูปแบบของสัญญาณทางไฟฟ้า จากนั้นการรับสัญญาณที่ติดตั้งอยู่ภายในคอมพิวเตอร์ จะทำหน้าที่รับสัญญาณทางไฟฟ้างดังกล่าว ไปเป็นข้อมูลดิจิทัลต่อไป

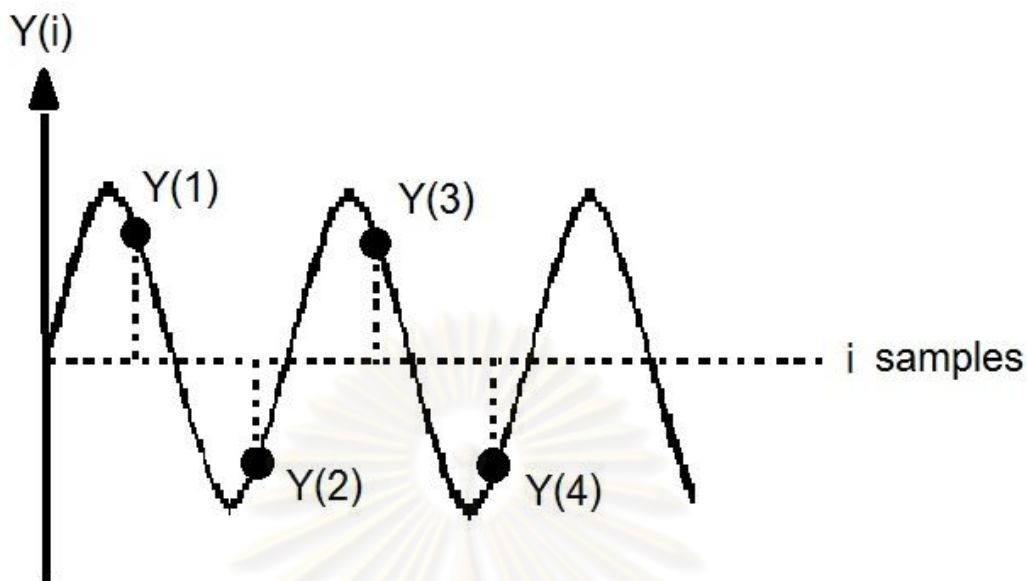
สัญญาณทางไฟฟ้ามีอยู่สองรูปแบบหลักด้วยกัน ได้แก่ สัญญาณที่มีแรงดันไฟฟ้าคงที่ (รูปที่ 4.1) โดยอุปกรณ์รับรู้สัญญาณที่ให้แรงดันไฟฟ้าคงที่ ยกตัวอย่างเช่น ตัวรับรู้อุณหภูมิ เป็นต้น และสัญญาณอีกรูปแบบหนึ่งคือ สัญญาณที่มีแรงดันไฟฟ้าแบบสลับ หรืออาจกล่าวได้ว่ามีลักษณะเป็นรูปคลื่น (รูปที่ 4.2) โดยอุปกรณ์รับรู้สัญญาณที่มีลักษณะดังกล่าวนี้ ได้แก่ ตัวรับรู้การสั่นสะเทือน หรือ ตัวรับรู้สัญญาณอะคูสติก เป็นต้น



รูปที่ 4.1 สัญญาณที่มีแรงดันคงที่ (DC)



รูปที่ 4.2 สัญญาณที่มีลักษณะรูปคลื่น



รูปที่ 4.3 การชักตัวอย่าง (Sampling)

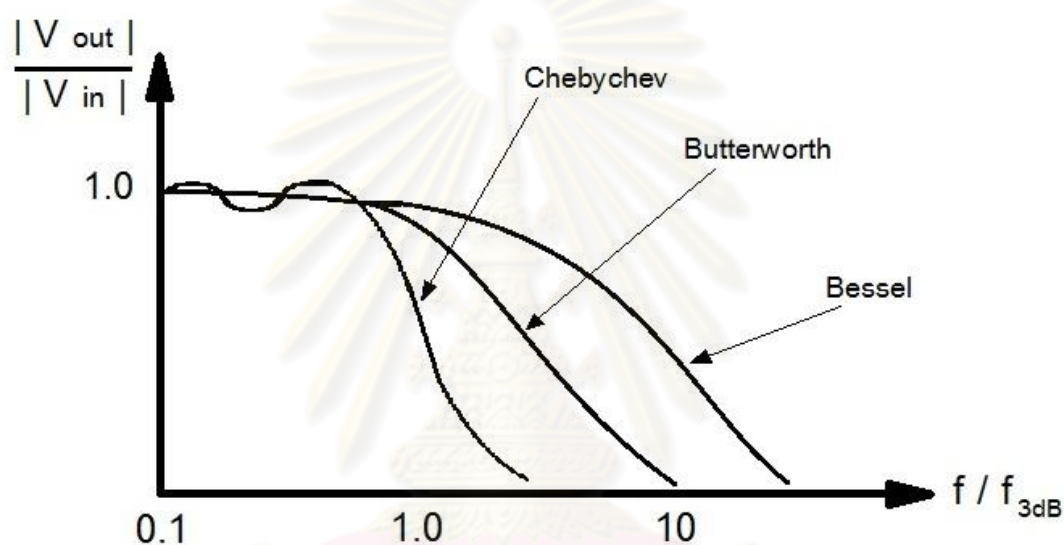
โดยทั่วไปการรับสัญญาณที่มีลักษณะเป็นรูปคลื่น (Waveform) จะเป็นการรับสัญญาณแบบต่อเนื่อง คอมพิวเตอร์จะทำหน้าที่แปลงสัญญาณที่ต่อเนื่องนี้ไปเป็นข้อมูลดิจิทัล โดยการชักตัวอย่าง (Sampling) โดยความถี่ของการชักตัวอย่างจะต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 2 เท่าของความถี่ที่เราต้องการ (Nyquist rate) ยกตัวอย่างเช่นสัญญาณอะคูสติกมีความถี่สูงสุดประมาณ 400,000 เฮิรตซ์ จะต้องใช้อัตราการชักตัวอย่างไม่ต่ำกว่า 800,000 ครั้งต่อวินาที เป็นต้น จากนั้นคอมพิวเตอร์จะทำการแปลงข้อมูลจากการชักตัวอย่างไปเป็นระบบเลขฐานสองแบบจุดต่อจุด (รูปที่ 4.3) จากนั้นจึงส่งต่อจากฮาร์ดแวร์ ไปสู่ซอฟต์แวร์เพื่อจัดการสัญญาณหรือประมวลผลสัญญาณในขั้นต่อไป

#### 4.2 การปรับแต่งสัญญาณ

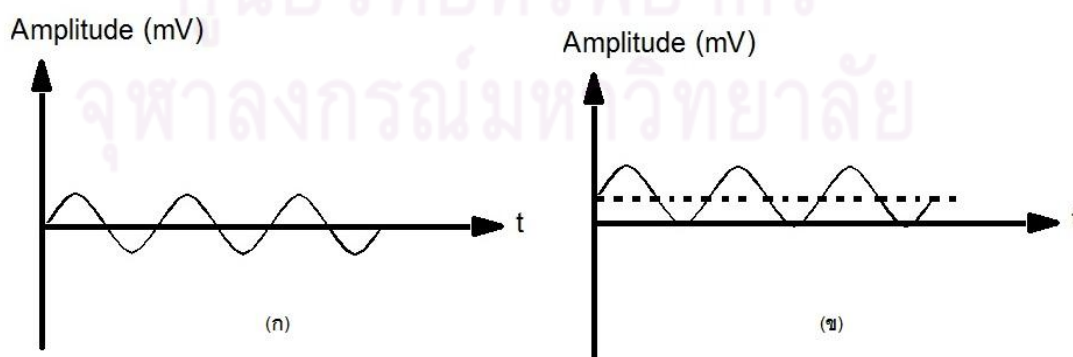
ในทางปฏิบัติ ปัญหาที่มักเกิดขึ้นอยู่เสมอได้แก่ปัญหาของสัญญาณรบกวนที่ปะปนแทรกเข้ามากับสัญญาณอะคูสติก โดยในระบบของอุปกรณ์รับสัญญาณเองก็จะมีวงจรที่ทำหน้าที่กรองสัญญาณที่มีความถี่นอกขอบเขตของสัญญาณอะคูสติก (100,000 - 400,000 เฮิรตซ์) อยู่แล้ว หากแต่อุปกรณ์ทางไฟฟ้าส่วนใหญ่ในสิ่งแวดล้อมปัจจุบัน มักมีการแผ่คลื่นวิทยุออกมาแทบทั้งสิ้น อุปกรณ์ทางไฟฟ้าเหล่านี้เองจะแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงออกมารบกวนผ่านเข้าทางสาย

ส่งสัญญาณอะคูสติก ซึ่งโดยปกติมักมีความยาวที่ค่อนข้างมาก ดังนั้นวงจรกรองของอุปกรณ์ดังกล่าวอาจไม่เพียงพอ จึงจำเป็นต้องมีการจัดการกรองสัญญาณด้วยซอฟต์แวร์อีกครั้งหนึ่ง

ในซอฟต์แวร์ Labview 7 จะมีฟังก์ชันสำเร็จรูปเพื่อใช้ทำหน้าที่กรองสัญญาณให้เลือกใช้หลายรูปแบบ โดยในแต่ละรูปแบบก็จะมีพื้นฐานของกระบวนการทำงานและให้ผลลัพธ์บริเวณจุดตัดความถี่ที่แตกต่างกัน รายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ผลลัพธ์บริเวณจุดตัดความถี่ที่ได้จากกระบวนการกรองแต่ละประเภท



รูปที่ 4.5 แสดงสัญญาณที่มีค่าออฟเซต

อีกปัญหาหนึ่งที่มักพบได้ในการรับสัญญาณ คือการที่สัญญาณมีค่าออฟเซต (Offset) ดังรูปที่ 4.5 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างรูปคลื่นในรูป ก ซึ่งเป็นรูปคลื่นในอุดมคติ (แกนสมมาตรอยู่ที่ค่าศูนย์) กับรูป ข จะเห็นว่ารูปคลื่น ข จะถูกยกขึ้น ทำให้แกนสมมาตรไม่อยู่ที่ค่าศูนย์ วิธีการจัดการสัญญาณดังรูป ข ให้กลับมามีแกนสมมาตรในรูปแบบอุดมคติ สามารถทำได้โดยอาศัยสมการที่ 4.1 ดังนี้

$$Y_{new}(i) = Y(i) - \text{mean } Y(i) \quad (4.1)$$

โดยที่

$Y_{new}(i)$  คือ รูปคลื่นที่ถูกจัดการสัญญาณแล้ว

$Y(i)$  คือ รูปคลื่นที่ต้องการจัดการสัญญาณ

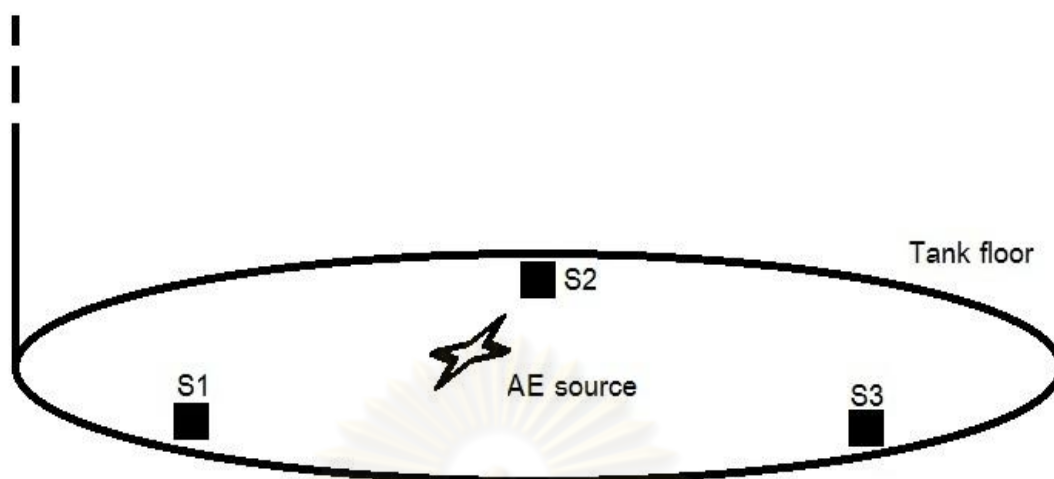
$\text{mean } Y(i)$  คือ ค่าเฉลี่ยของผลรวมข้อมูลแต่ละจุดข้อมูลในหนึ่งช่วงเวลา

### 4.3 การประมวลผลสัญญาณ

ระบบวัดสัญญาณอะคูสติคที่ได้กล่าวมาตั้งแต่ต้น เป็นการอธิบายถึงระบบการวัดสัญญาณขึ้นพื้นฐานโดยมีตัวรับรู้สัญญาณเพียงหนึ่งตัว สัญญาณที่ได้จากระบบที่มีตัวรับรู้เพียงหนึ่งตัวนั้น ในเบื้องต้นจะสามารถนำมาประมวลผลเพื่อหาค่าตัวแปรต่างๆ เช่น แอมพลิจูด , พลังงาน, ค่าเฉลี่ยรากที่สอง เป็นต้น

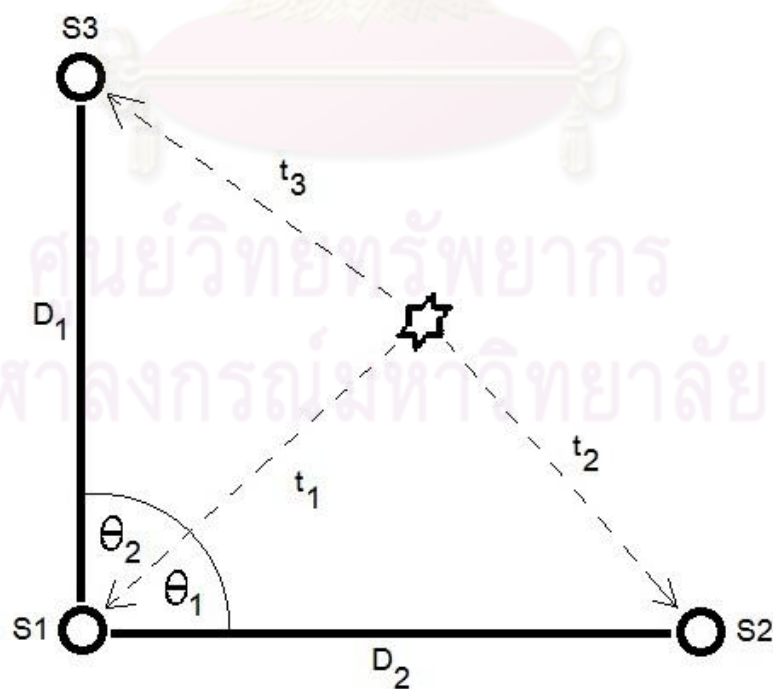
ในเชิงอุตสาหกรรม ไม่ว่าจะเป็นอุตสาหกรรมเคมี , ปิโตรเคมี ล้วนมีถังบรรจุขนาดใหญ่ สำหรับใช้งานเพื่อเก็บบรรจุสารเคมีเหล่านั้นก่อนที่จะนำแจกจ่ายต่อไป เนื่องจากถังบรรจุเหล่านี้มีขนาดใหญ่ ดังนั้นการประเมินสภาพของถังว่ามีความพร้อมในการ ใช้งานหรือไม่ จึงเป็นเรื่องที่ค่อนข้างยาก ดังนั้นวิธีการปล่อยคลื่นอะคูสติคจึงเป็นวิธีหนึ่งที่ได้ถูกนำมาใช้ในการประเมินสภาพของถังบรรจุดังกล่าวนี้ โดยพื้นที่ในส่วนของพื้นถังบรรจุจะเป็นบริเวณที่ให้ความสนใจในการประเมินสภาพมากที่สุด เนื่องจากเป็นบริเวณที่ได้รับแรงกดดันจากของเหลวที่บรรจุอยู่ภายในค่อนข้างสูง ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของวัสดุในบริเวณดังกล่าวมากที่สุด



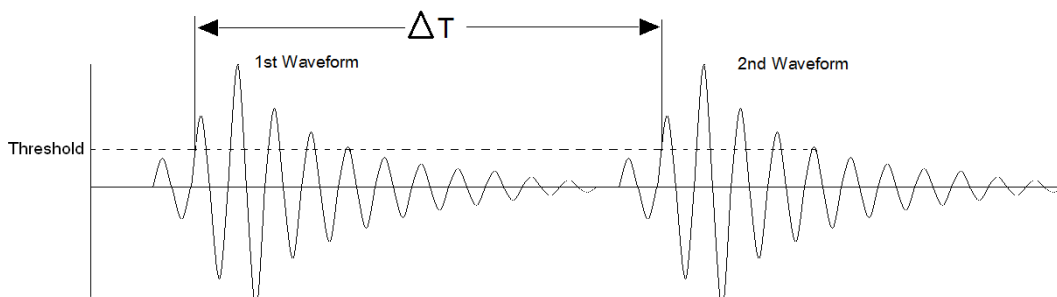


รูปที่ 4.6 การติดตั้งตัวรับรู้สัญญาณอะคูสติก 3 ตัวเพื่อหาตำแหน่ง

ในการประเมินสภาพพื้นถังบรรจุ การหาตำแหน่งของสัญญาณอะคูสติกเป็นเรื่องที่สำคัญ เนื่องจากทำให้ทราบถึงตำแหน่งของรอยบกพร่องที่เกิดขึ้นโดยนพื้นถังบรรจุ โดยพื้นฐานแล้ว วิธีการหาตำแหน่งด้วยระบบวัดสัญญาณอะคูสติก จะต้องมีตัวรับรู้อย่างน้อย 3 ตัวด้วยกัน ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.7 พื้นฐานการหาตำแหน่งของคลื่นอะคูสติกด้วยตัวรับรู้ 3 ตัว



รูปที่ 4.8 แสดงนิยามของค่า  $\Delta t$

จากรูปที่ 4.6 รอยบกพร่องในรูปจะเป็นเหตุที่ทำให้เกิดสัญญาณอะคูสติกขึ้น และสัญญาณอะคูสติกดังกล่าว ก็จะเดินทางไปสู่ตัวรับรู้ที่ติดไว้กับพื้นผิวของวัสดุ โดยระยะเวลาในการเดินทางมาถึงตัวรับรู้ในแต่ละตัว (ได้แก่ S1, S2, S3) ก็จะใช้เวลาไม่เท่ากัน ดังนั้นค่าความต่างของเวลาในการมาถึงตัวรับรู้แต่ละตัว จึงถูกนำมาเป็นตัวแปรในการหาตำแหน่งได้ ดังสมการดังต่อไปนี้ [6]

$$R = \frac{1}{2} \frac{D_1^2 - \Delta t_{12}^2 C_{AE}^2}{\Delta t_{12} C_{AE} + D_1 \cos \theta_1} \quad (4.2)$$

$$R = \frac{1}{2} \frac{D_2^2 - \Delta t_{13}^2 C_{AE}^2}{\Delta t_{13} C_{AE} + D_2 \cos \theta_2} \quad (4.3)$$

เมื่อ

$R$  คือ ระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดคลื่นอะคูสติกกับตัวรับรู้สัญญาณตัวที่ 1

$\theta_1$  คือ มุมของเส้นระหว่างตัวรับรู้ตัวที่ 1 กับ 2 เทียบกับเส้นที่ลากจากตัวรับรู้ตัวที่ 1 ไปยังจุดที่เกิดคลื่นอะคูสติก (ดูรูปที่ 4.7 ประกอบ)

$\theta_2$  คือ มุมของเส้นระหว่างตัวรับรู้ตัวที่ 1 กับ 3 เทียบกับเส้นที่ลากจากตัวรับรู้ตัวที่ 1 ไปยังจุดที่เกิดคลื่นอะคูสติก (ดูรูปที่ 4.7 ประกอบ)

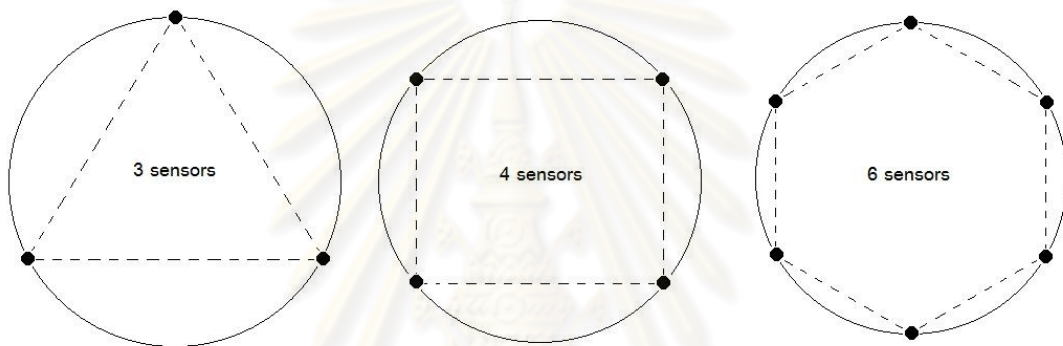
$\Delta t_{12}$  คือ ผลต่างของเวลาที่คลื่นอะคูสติกเดินทางมาถึงตัวรับรู้ตัวที่ 1 กับ 2 หรือจากรูปที่ 4.12 จะมีค่าเท่ากับ  $t_1 - t_2$

$\Delta t_{13}$  คือ ผลต่างของเวลาที่คลื่นอะคูสติกเดินทางมาถึงตัวรับรู้ตัวที่ 1 กับ 3 หรือจากรูปที่ 4.12 จะมีค่าเท่ากับ  $t_1 - t_3$

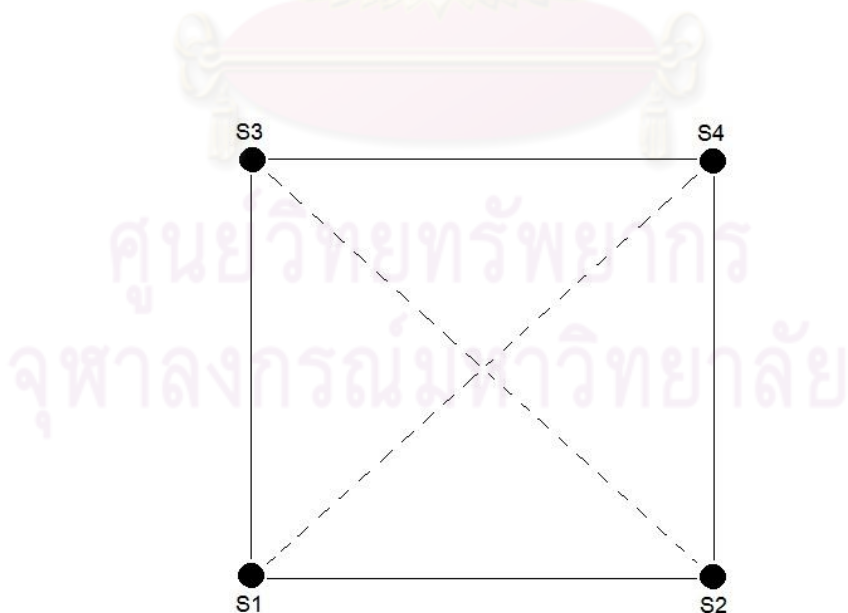
$D_1$  คือ ระยะห่างระหว่างตัวรับรู้ตัวที่ 1 กับ 2

$D_2$  คือ ระยะห่างระหว่างตัวรับรู้ตัวที่ 1 กับ 3

$C_{AE}$  คือ ความเร็วในการเดินทางของคลื่นอะคูสติกในวัสดุที่ทดสอบ



รูปที่ 4.9 แสดงความครอบคลุมของพื้นที่เมื่อเพิ่มจำนวนตัวรับรู้



รูปที่ 4.10 การวางตำแหน่งของตัวรับรู้สี่ตัว ในแนวของสี่เหลี่ยมจัตุรัส

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.9 พบว่าเมื่อเพิ่มจำนวนตัวรับรู้มากขึ้น พื้นที่ในการหาตำแหน่งก็จะครอบคลุมเพิ่มมากขึ้นด้วยเช่นกัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้เมื่อพิจารณาจากอุปกรณ์ที่มีอยู่อย่างจำกัด จึงได้พิจารณาสร้างระบบหาตำแหน่งโดยตัวรับรู้ 4 ตัวขึ้นมา ซึ่งโดยพื้นฐานแล้วก็จะใช้กระบวนการประมวลผลเช่นเดียวกันกับระบบหาตำแหน่งที่ใช้ตัวรับรู้ 3 ตัว โดยพิจารณาจากตัวรับรู้ 3 ตัวแรกที่ตรวจจับสัญญาณได้ก่อน ซึ่งจะสามารถแบ่งย่อยกรณีออกเป็น 4 กรณี ดังนี้ (โปรดพิจารณารูปที่ 4.10 ประกอบ)

1. ตัวรับรู้ตัวที่ 1 ตรวจจับสัญญาณได้ก่อน กรณีนี้จะใช้ตัวรับรู้ที่ 2, 3 มาร่วมในการหาตำแหน่ง
2. ตัวรับรู้ตัวที่ 2 ตรวจจับสัญญาณได้ก่อน กรณีนี้จะใช้ตัวรับรู้ที่ 1, 4 มาร่วมในการหาตำแหน่ง
3. ตัวรับรู้ตัวที่ 3 ตรวจจับสัญญาณได้ก่อน กรณีนี้จะใช้ตัวรับรู้ที่ 1, 4 มาร่วมในการหาตำแหน่ง
4. ตัวรับรู้ตัวที่ 4 ตรวจจับสัญญาณได้ก่อน กรณีนี้จะใช้ตัวรับรู้ที่ 2, 3 มาร่วมในการหาตำแหน่ง

ดังนั้นเมื่อจัดรูปแบบการวางตำแหน่งของตัวรับรู้ในแนวของสี่เหลี่ยมจัตุรัสดังแสดงในรูปที่ 4.10 สมการที่ 4.2 และ 4.3 จะนำมาเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$R_1 = \frac{1}{2} \frac{D^2 - \Delta t_{12}^2 C_{AE}^2}{\Delta t_{12} C_{AE} + D \cos \theta} \quad (4.4)$$

$$R_2 = \frac{1}{2} \frac{D^2 - \Delta t_{13}^2 C_{AE}^2}{\Delta t_{13} C_{AE} + D \cos(90 - \theta)} \quad (4.5)$$

เมื่อ  $R$  คือ ระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดคลื่นอะคูสติกกับตัวรับรู้สัญญาณตัวแรกที่ตรวจจับสัญญาณได้

$\theta$  คือ มุมของเส้นระหว่างตัวรับรู้ตัวแรกกับตัวที่สองที่ตรวจจับสัญญาณได้ก่อน เทียบกับเส้นที่ลากจากตัวรับรู้ตัวที่แรกที่ตรวจจับสัญญาณได้ก่อน ไปยังจุดที่เกิดคลื่นอะคูสติก

$\Delta t_{12}$  คือ ผลต่างของเวลาที่คลื่นอะคูสติกเดินทางมาถึงตัวรับรู้ตัวแรกกับตัวที่สองที่ตรวจจับสัญญาณได้ก่อน

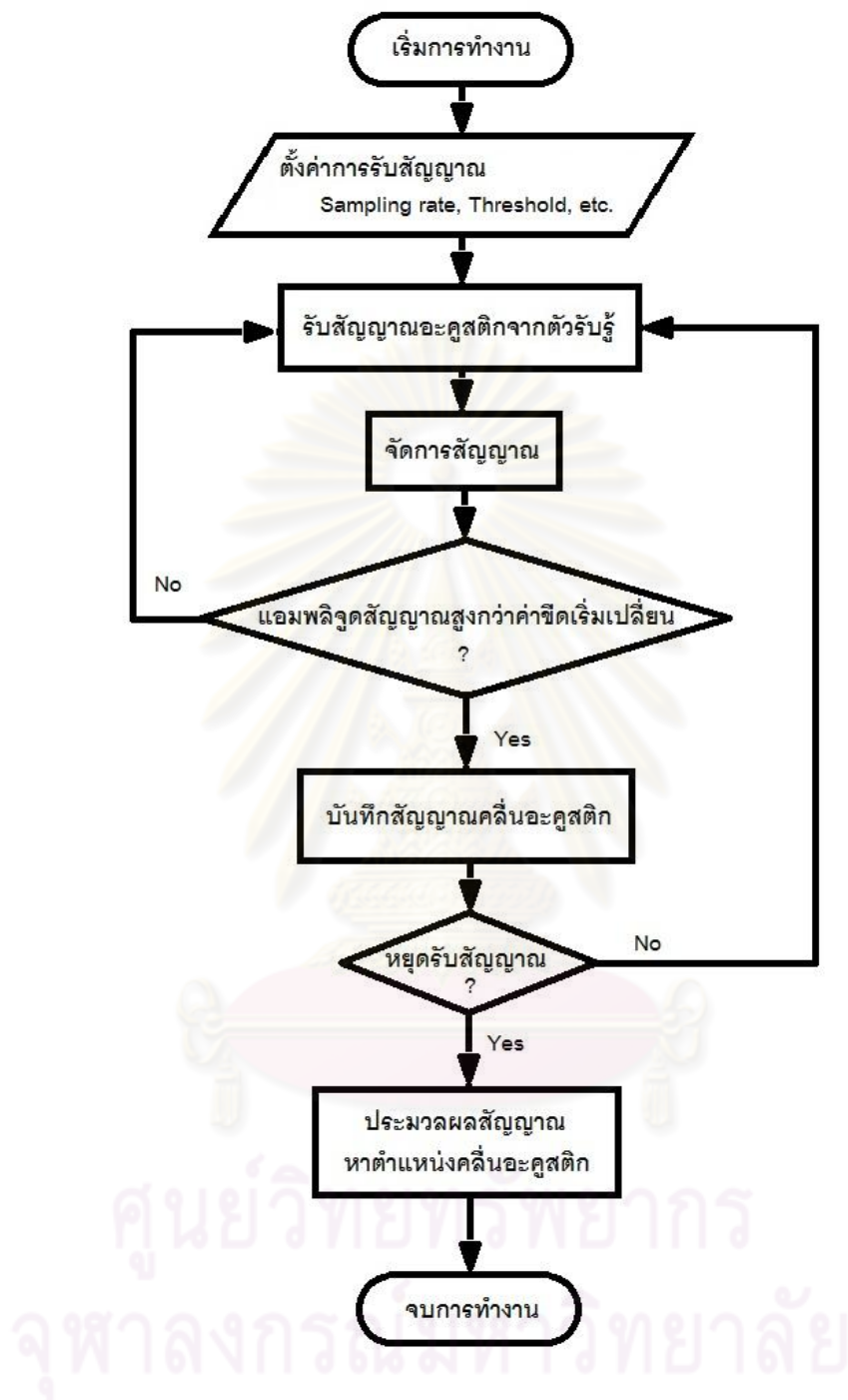
$\Delta t_{13}$  คือ ผลต่างของเวลาที่คลื่นอะคูสติกเดินทางมาถึงตัวรับรู้ตัวแรกกับตัวที่สามที่ตรวจจับสัญญาณได้ก่อน

$D$  คือ ความกว้างสี่เหลี่ยมจัตุรัส ซึ่งเป็นแนวการวางตำแหน่งตัวรับรู้

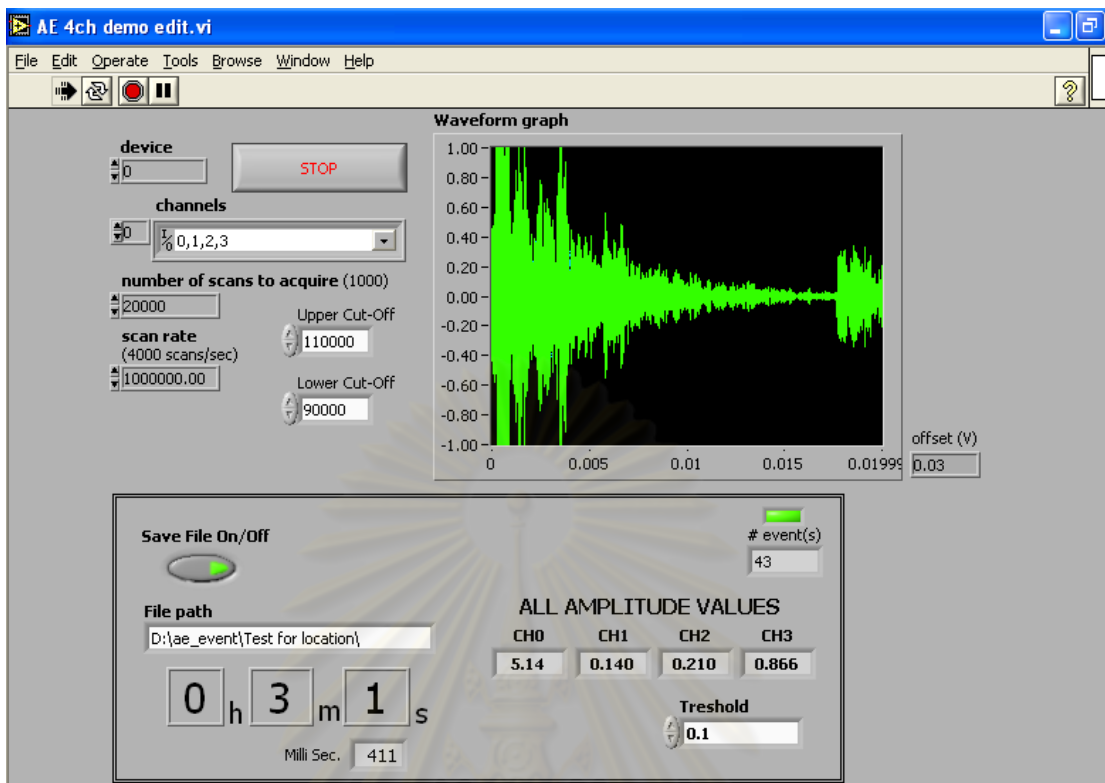
$C_{AE}$  คือ ความเร็วในการเดินทางของคลื่นอะคูสติกในวัสดุที่ทดสอบ

ซึ่งเมื่อแทนค่าคงที่ต่างๆ และค่า ความต่างของเวลาตามที่สมการกำหนด จะเหลือตัวแปร  $\theta$  ซึ่งเป็นมุมมีหน่วยเป็นองศา โปรแกรมจะทำการแทนค่าดังกล่าวลงไปทีละค่า ตั้งแต่ 0 ถึง 90 และบันทึกคำตอบไว้ ณ จุดที่ค่า R ในสมการที่ 4.4 และ 4.5 มีค่าใกล้เคียงกันที่สุด และแปลงให้อยู่ในรูปแบบพิกัด XY ต่อไป โดยจากที่กล่าวมาทั้งหมด สามารถนำมาเขียนแผนผังการทำงานได้ ดังรูปที่ 4.11 และตัวอย่างหน้าจอโปรแกรมที่ถูกพัฒนาขึ้น ดังรูปที่ 4.12 และ 4.13

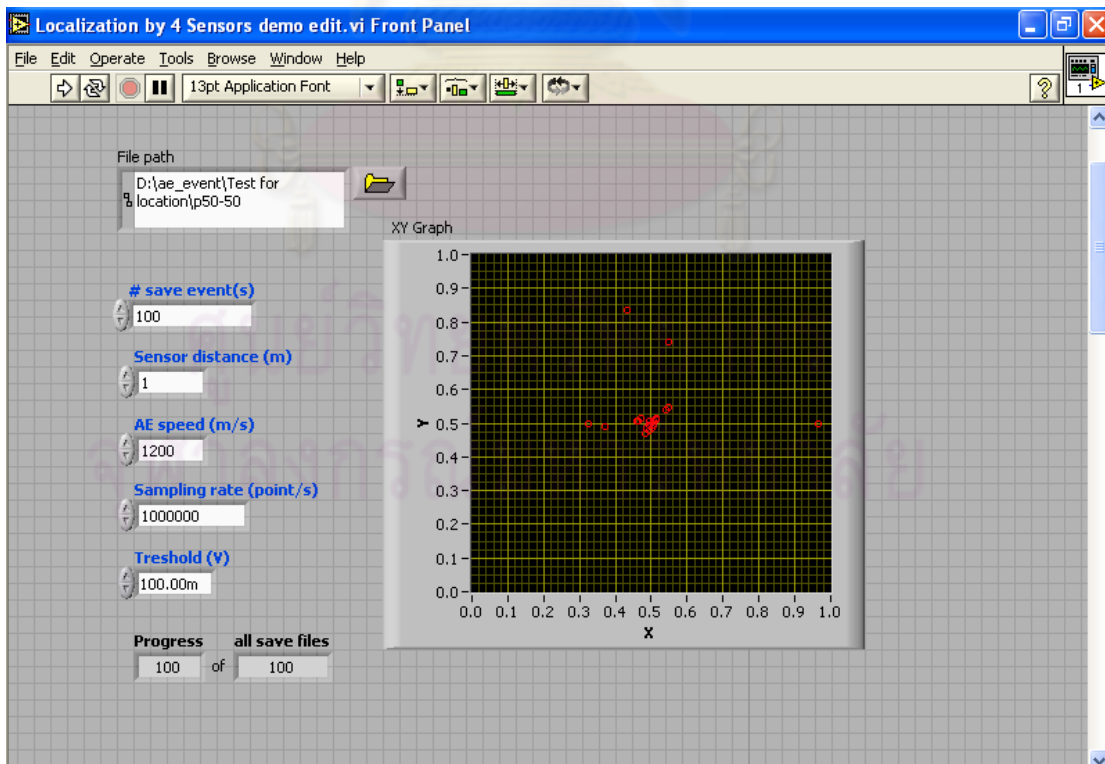
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.11 แผนผังการทำงานของโปรแกรม



รูปที่ 4.12 หน้าจอแสดงผลของโปรแกรมในการรับสัญญาณ



รูปที่ 4.13 หน้าจอแสดงผลของโปรแกรมประมวลผลสัญญาณในการหาตำแหน่ง

## บทที่ 5

### วิธีการทดลอง

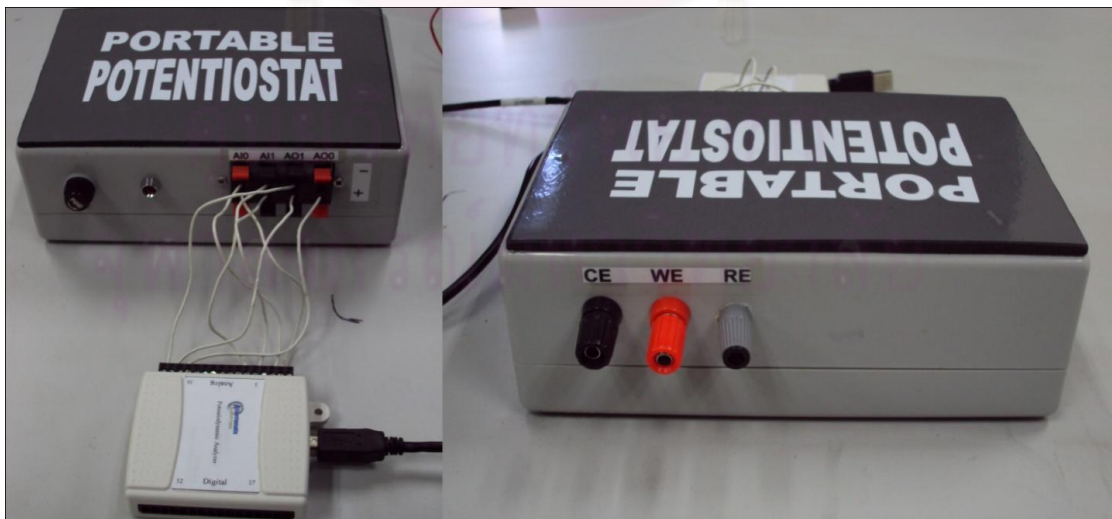
5.1 การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆของสัญญาณ อคูสติก เทียบกับ อัตราการกัดกร่อน

#### 5.1.1 อุปกรณ์การทดสอบ

1. ชุดทดสอบโพเทนชิโอดีนามิกส์ (วงจรโพเทนชิโอสแตท)
2. ชุดวัดสัญญาณการปลดปล่อยอคูสติก (Physical Acoustic Corporation, PAC)
3. เหล็กกล้าคาร์บอนชนิดผิวเรียบ
4. สารละลายไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.05, 0.10, 0.20 โมลาร์

#### 5.1.2 การทดสอบ

จะมีชุดทดสอบโพเทนชิโอดีนามิกส์ซึ่งประกอบด้วยวงจรควบคุมการจ่าย ศักย์และวัดกระแส (ดังในรูปที่ 5.1) และระบบอบบรรจุสารเคมีซึ่งมีรูอยู่ทางด้านล่างสำหรับกำจัดพื้นที่ในการเกิดการกัดกร่อน (ดังในรูปที่ 5.2) ซึ่งด้านล่างจะมีช่องสำหรับประกอบหัววัดสัญญาณการปลดปล่อยคลื่นอคูสติกอยู่ด้วย



รูปที่ 5.1 ชุดทดสอบโพเทนชิโอดีนามิกส์เพื่อหาอัตราการกัดกร่อน





รูปที่ 5.2 แสดงกระบอกบรรจุสารเคมีสำหรับทดสอบการกักความร้อน

รูปด้านข้าง (ภาพซ้าย), ด้านบน (ภาพขวาบน) และด้านล่าง (ภาพขวาล่าง)

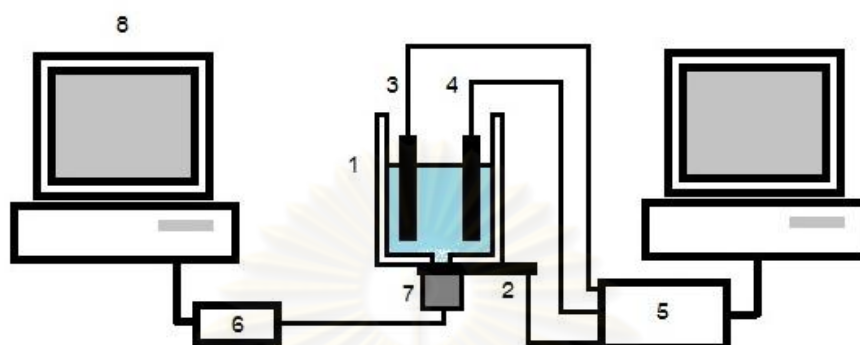


รูปที่ 5.3 ชุดทดสอบวัดสัญญาณอคูสติก, เครื่องคอมพิวเตอร์ที่ติดตั้งการรับสัญญาณ (ภาพซ้าย), หัววัดและอุปกรณ์ขยายสัญญาณ (ขวาบน), และช่องรับสัญญาณของการติดตั้งด้านท้ายเครื่องคอมพิวเตอร์ (ขวาล่าง)

สำหรับชุดวัดสัญญาณการปลดปล่อย คลื่นอคูสติก (PAC) จะประกอบด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งมีการรับสัญญาณติดตั้งอยู่ภายใน ส่วนหัววัดสัญญาณจะต่อกับ อุปกรณ์ขยายสัญญาณ (ปรีแอมป์) และต่อเข้ากับการรับสัญญาณทางด้านท้ายเครื่อง (รูปที่ 5.3)

Acoustic emission measurement

Corrosion rate measurement



1 : Electrolyte container

5 : Potentiostat

2 : Carbonsteel (Working electrode)

6 : Pre-amplifier

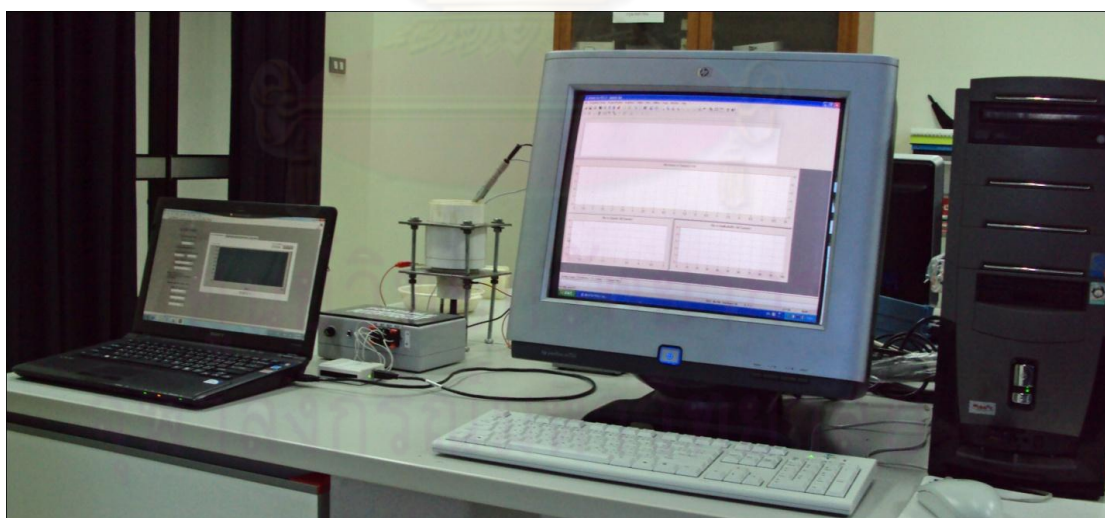
3 : Reference electrode

7 : AE sensor

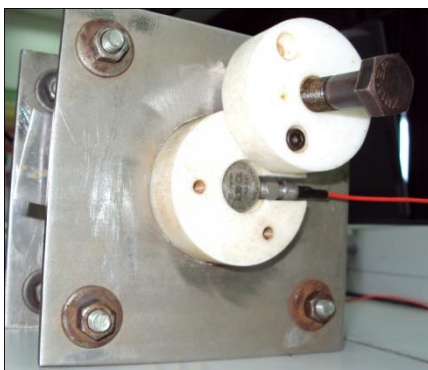
4 : Counter electrode

8 : AE acquisition device

รูปที่ 5.4 แผนผังการจับคู่อุปกรณ์ทดสอบ



รูปที่ 5.5 อุปกรณ์สำหรับการทดสอบโพเทนชิโอดินามิกส์

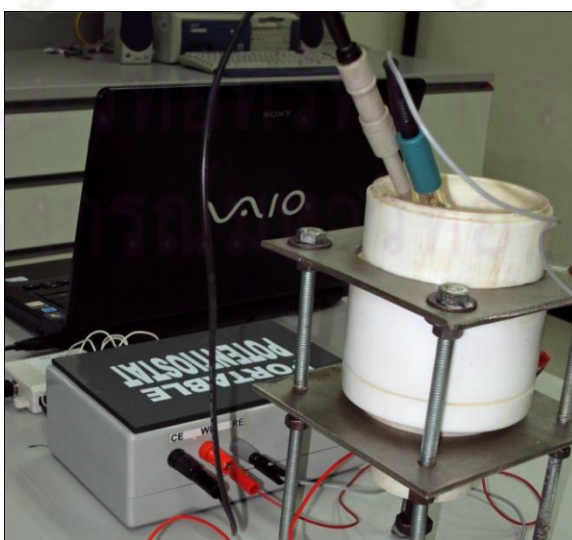


รูปที่ 5.6 การประกอบหัววัดสัญญาณเข้าที่ผิวโลหะ ซึ่งจะประกอบลงในช่องด้านล่างของกระบอบก

ในการทดสอบวัดสัญญาณการปลดปล่อย ออกุสติกที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบการกัดกร่อนด้วยวิธีโพเทนชิโอไดนามิกส์ จะใช้ชุดวัดสัญญาณออกุสติก (PAC) ร่วมกับชุดทดสอบโพเทนชิโอไดนามิกส์ และมีการจัดอุปกรณ์ตาม แผนผังใน รูปที่ 5.4 และสำหรับภาพอุปกรณ์ทดสอบจริง แสดงในรูปที่ 5.5

สำหรับขั้นตอนในการทดสอบจะมีการดำเนินงานดังต่อไปนี้

1. ประกอบโลหะที่จะใช้ทดสอบ ซึ่งในที่นี้คือเหล็กกล้าคาร์บอนที่ผ่านการขัดผิวเรียบมาแล้วเข้ากับกระบอบกบรรจุสารเคมี และประกอบหัววัดสัญญาณ ออกุสติกที่ด้านล่างของกระบอบกบรรจุ ดังในรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.7 ต่อชุดทดสอบโพเทนชิโอไดนามิกส์เข้ากับชุดการกัดกร่อน

2. ต่อข้อจากชุดทดสอบโพเทนชิโอดนามิกส์ ซึ่งได้แก่ เคาน์เตอร์อิเล็กทรอนิกส์ (CE) ขั้วอ้างอิงศักย์ไฟฟ้า (RE) และ ขั้วเวิร์คกิ้งอิเล็กทรอนิกส์ (WE) ดังในรูปที่ 5.7

3. รินสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่เตรียมไว้ซึ่งมีความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ จากนั้นจึงเริ่มทำการวัดสัญญาณอคูสติก กับ สัญญาณจากโพเทนชิโอดนามิกส์ พร้อมๆกัน โดยการทดสอบโพเทนชิโอดนามิกส์นั้นจะมีขั้นตอนในการทดสอบหลักๆอยู่ 2 ขั้นตอนด้วยกัน ได้แก่ การหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนเทียบกับเวลา ( $E_{cor}$  vs time) และ วิธีการหาโพเทนชิโอดนามิกส์

เมื่อเริ่มต้นทำการทดสอบ ระบบของชุดทดสอบทั้งสองชุดจะเริ่มแสดงผล และบันทึกข้อมูล จากนั้นจึงทำการทดลองซ้ำอีกสองครั้ง จากนั้นจึงเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรคลอริก เป็น 0.10 และ 0.20 โมลาร์ ทดลองซ้ำตามลำดับ จากนั้นจึงนำผลการทดสอบที่ได้มาวิเคราะห์

## 5.2 การทดสอบการหาตำแหน่งการกัดกร่อนของระบบที่พัฒนาขึ้น

### 5.2.1 อุปกรณ์การทดสอบ

1. ตัวรับรู้สัญญาณอคูสติก AE monitrend S140A
2. วงจรขยายสัญญาณปฐมภูมิ AE monitrend ACS-2100/PA
3. วงจรขยายสัญญาณหลัก AE monitrend ACS-AE16ch
4. คอมพิวเตอร์ Advantech510 ติดตั้งการ์ดรับสัญญาณ Advantech PCI-1714
5. แผ่นโลหะสำหรับทดสอบ ขนาดกว้าง 1 เมตร ยาว 1 เมตร
6. ตัวจำลองการเกิดสัญญาณอคูสติก (AE artificial source) Holroyd AE-P1 Pulser

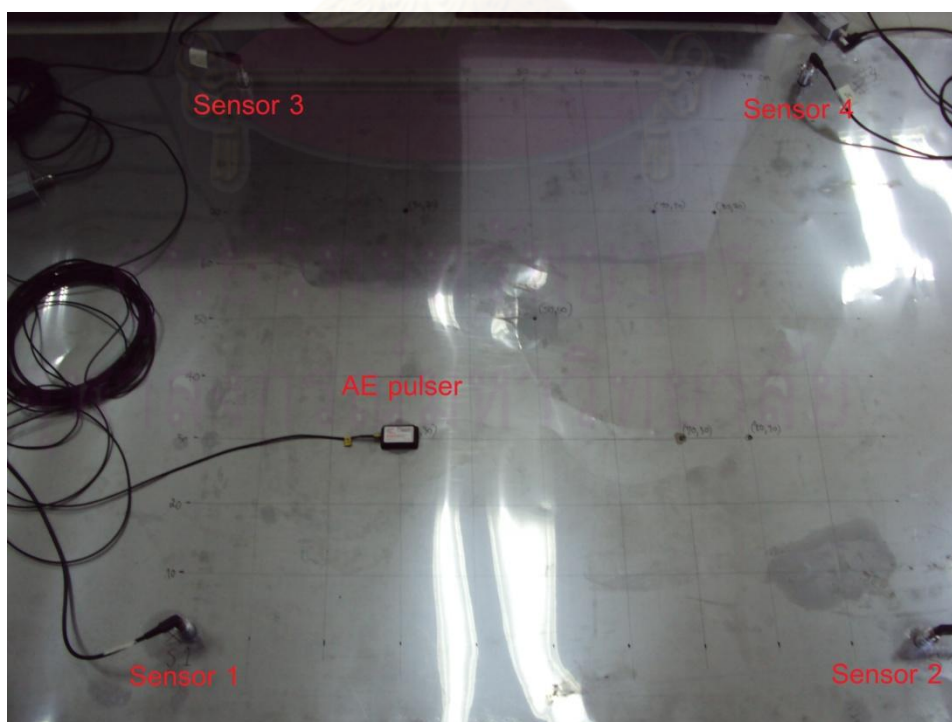
### 5.2.2 การทดสอบ

การจัดอุปกรณ์สำหรับทดสอบโปรแกรมหาตำแหน่งคลื่น อคูสติก ดังแสดงในรูปที่ 5.8 โดยกำหนดตำแหน่งใน ส่วนของแผ่นโลหะที่นำมาใช้ทดสอบจะถูกตีเส้นขึ้นมาเป็นตารางพิกัด และติดตั้งตัวรับรู้ในแนวสี่เหลี่ยมจัตุรัสทั้งสี่มุม ดังรูปที่ 5.9

จากนั้นจึงนำตัวจำลองการเกิดสัญญาณอคูสติก (AE pulser) มาติดตั้งตามจุดต่างๆ ที่ละจุด ดังตัวอย่างในรูปที่ 5.10 ในพิกัด X,Y ได้แก่ ตำแหน่ง 30,30ซม., ตำแหน่ง 30,70ซม., ตำแหน่ง 50,50ซม., ตำแหน่ง 70,30ซม., และ ตำแหน่ง 70,70ซม. ตามลำดับ และบันทึกสัญญาณ อคูสติกที่ถูกจำลองการเกิดด้วย AE Puler ตำแหน่งละ 100 ครั้ง แล้วนำมาวิเคราะห์ หาความถูกต้องในการประมวลผลสัญญาณเพื่อระบุตำแหน่งการเกิดสัญญาณในตำแหน่งที่แตกต่างกัน



รูปที่ 5.8 ระบบการประมวลผลสัญญาณการปล่อยคลื่นอคูสติกเพื่อหาตำแหน่ง



รูปที่ 5.9 แผ่นโลหะที่ใช้ทดสอบและการติดตั้งตัวรับรู้เพื่อหาตำแหน่ง



รูปที่ 5.10 การติดตั้งตัวกำเนิดสัญญาณอคูสติก



รูปที่ 5.11 ตัวกำเนิดสัญญาณอคูสติก (AE Pulser)

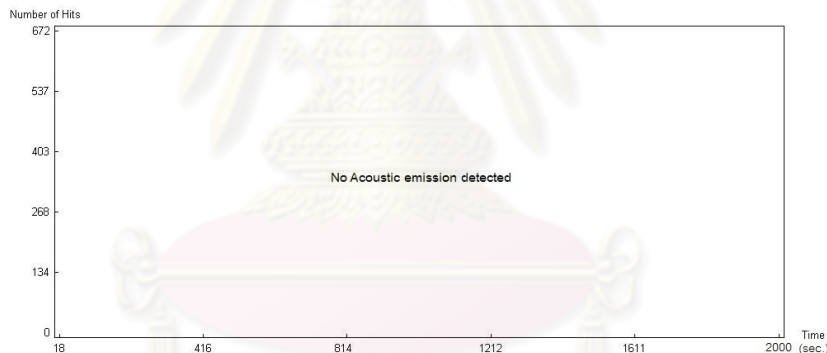
## บทที่ 6

### ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล

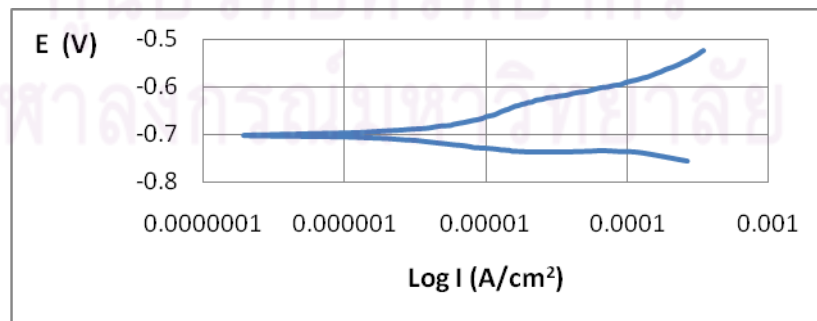
#### 6.1 การทดสอบหาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆของสัญญาณอคูสติกเทียบกับอัตราการกัดกร่อน

##### 6.1.1 ผลการทดสอบ

ในรูปที่ 6.1 เป็นผลการทดสอบซึ่งแสดงจำนวนการเกิดสัญญาณ อคูสติกเทียบกับเวลา ซึ่งเกิดขึ้นในช่วงขณะที่ทำการทดสอบการหาอัตรา การกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนในสารละลายไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ โดยที่ช่วงการทดสอบหาศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน จะอยู่ในช่วงของ วินาทีที่ 0-1800 และช่วงทดสอบโพเทนชิโอดีนามิกส์ จะอยู่ในช่วงวินาทีที่ 1800-2000 โดยจากผลการทดสอบด้วยวิธีโพเทนชิโอดีนามิกส์ (ในรูปที่ 6.2) พบว่าอัตราการกัดกร่อนมีค่าเท่ากับ 0.002 มิลลิเมตรต่อปี แต่ไม่พบการเกิดการปลดปล่อยคลื่นอคูสติก

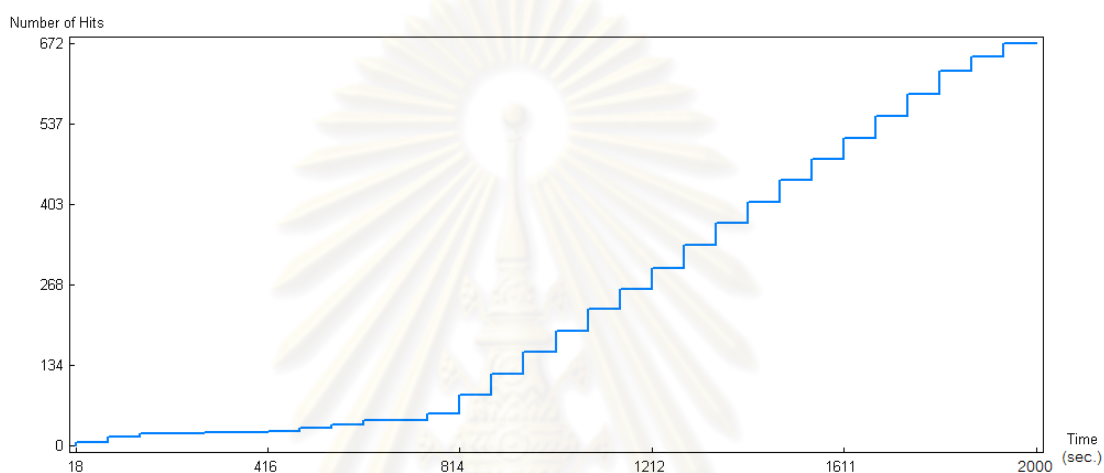


รูปที่ 6.1 แสดงจำนวนการเกิดคลื่นอคูสติกเทียบกับเวลา

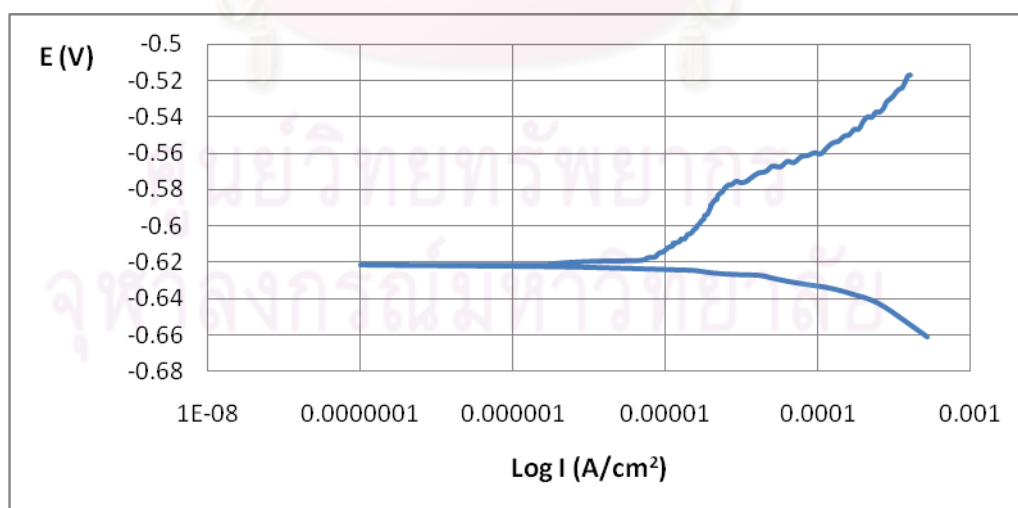


รูปที่ 6.2 แสดงกราฟโพลาร์ไรเซชัน (อัตราการกัดกร่อนเท่ากับ 0.002 มม.ต่อปี)

ในรูปที่ 6.3 เป็นผลการทดสอบซึ่งแสดงจำนวนการเกิดสัญญาณ อคูสติกเทียบกับเวลา ซึ่งเกิดขึ้นในช่วงขณะที่ทำการทดสอบการหาอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนในสารละลายไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ โดยที่ช่วงการทดสอบหาค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน จะอยู่ในช่วงของ วินาทีที่ 0-1800 และช่วงทดสอบโพเทนชิโอสแตติก จะอยู่ในช่วงวินาทีที่ 1800-2000 โดยจากผลการทดสอบด้วยวิธีโพเทนชิโอสแตติก (ในรูปที่ 6.4) พบว่าอัตราการกัดกร่อนมีค่าเท่ากับ 0.006 มิลลิเมตรต่อปี



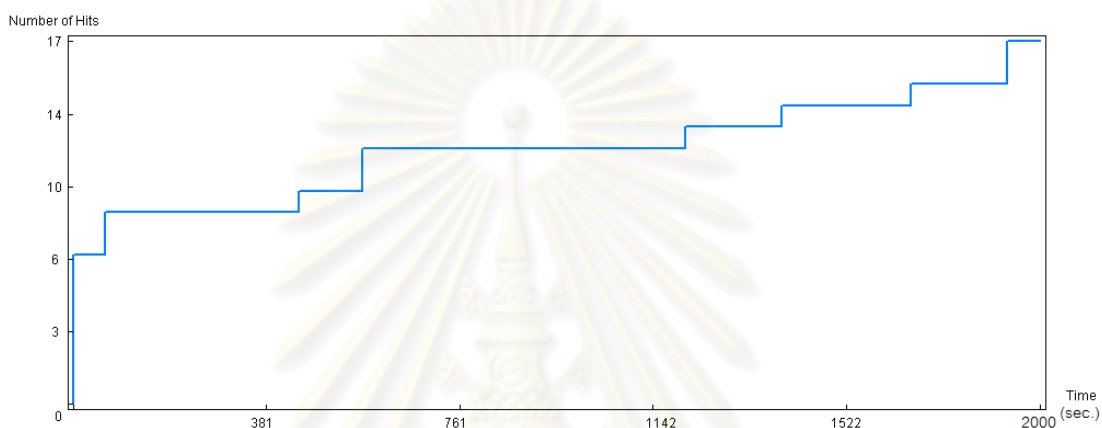
รูปที่ 6.3 แสดงจำนวนการเกิดคลื่นอคูสติกเทียบกับเวลา



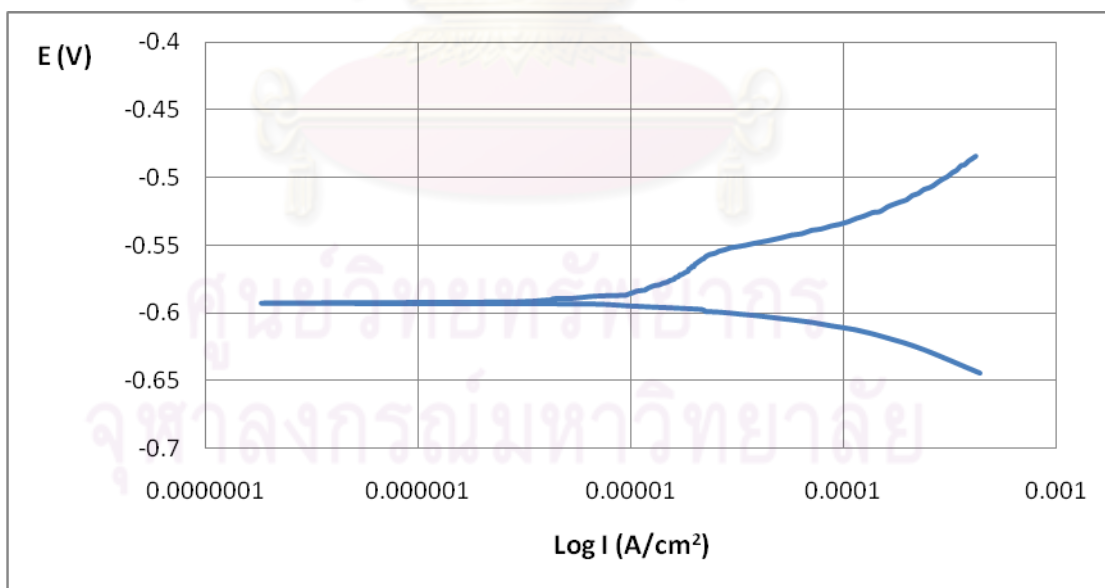
รูปที่ 6.4 แสดงกราฟโพลาริเซชัน (อัตราการกัดกร่อนเท่ากับ 0.006 มม.ต่อปี)



ในรูปที่ 6.5 เป็นผลการทดสอบซึ่งแสดงจำนวนการเกิดสัญญาณ อนุสติกเทียบกับเวลา ซึ่งเกิดขึ้นในช่วงขณะที่ทำการทดสอบการหาอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนในสารละลาย ไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.20 โมลาร์ โดยที่ช่วงการทดสอบหาค่า ยี่ไฟฟ้ากัดกร่อน จะอยู่ในช่วงของ วินาทีที่ 0-1800 และช่วงทดสอบโพเทนชิโอดนามิกส์ จะอยู่ในช่วงวินาทีที่ 1800-2000 โดยจากผลการทดสอบด้วยวิธีโพเทนชิโอดนามิกส์ (ในรูปที่ 6.6) พบว่าอัตราการกัดกร่อนมีค่าเท่ากับ 0.057 มิลลิเมตรต่อปี



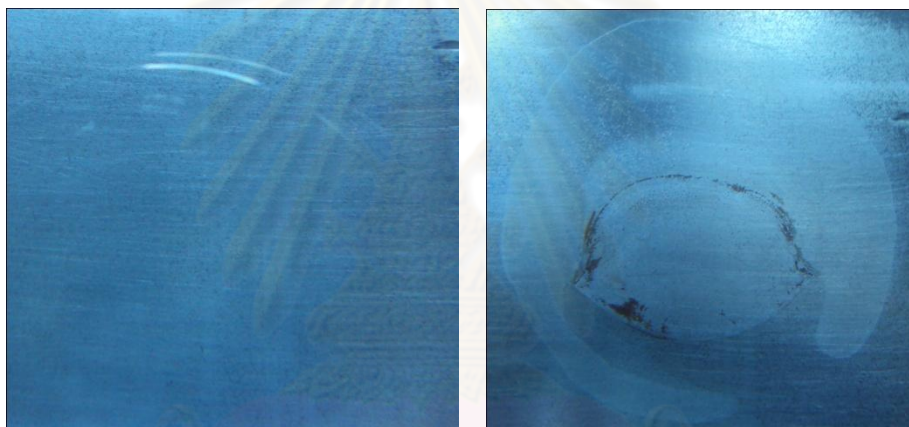
รูปที่ 6.5 แสดงจำนวนการเกิดคลื่นอนุสติกเทียบกับเวลา



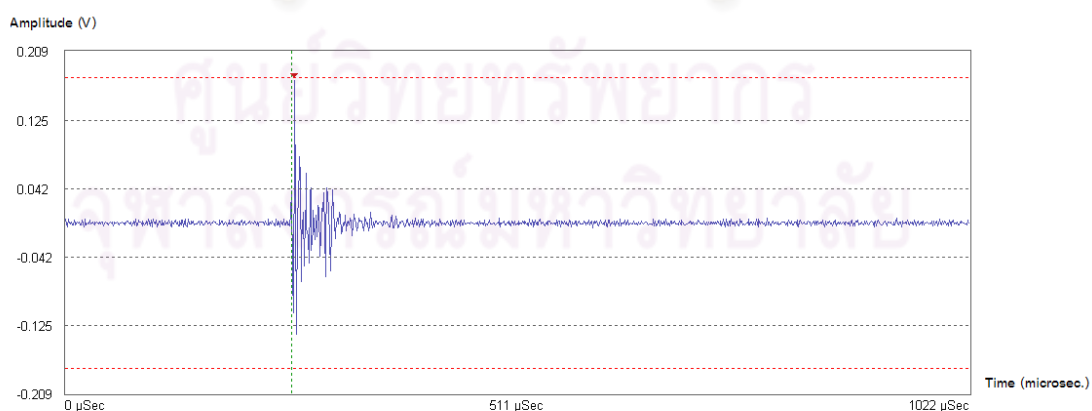
รูปที่ 6.6 แสดงกราฟโพลาร์ไรเซชัน (อัตราการกัดกร่อนเท่ากับ 0.057 มม.ต่อปี)

ตารางที่ 6.1 เปรียบเทียบผลการทดสอบการวัดสัญญาณอคูสติก ที่เกิดขึ้นจากเหล็กกล้าคาร์บอน ในสารละลายความเข้มข้นต่างๆ

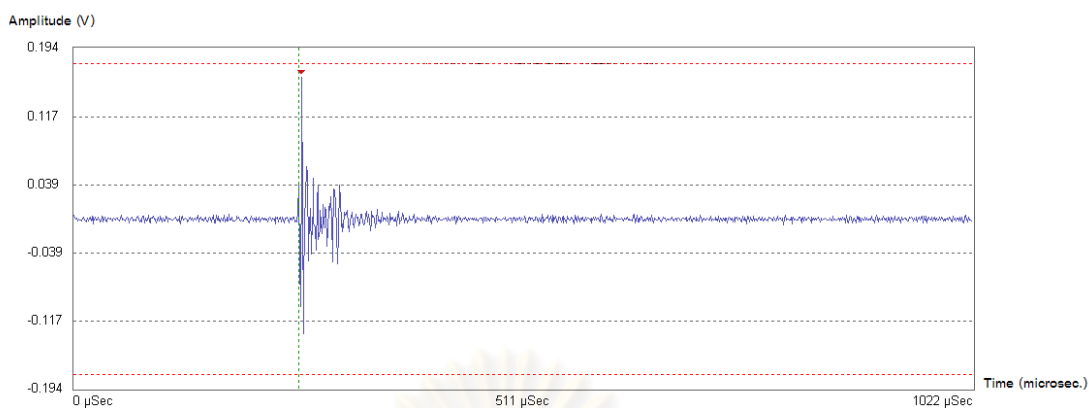
ความเข้มข้นสารละลาย	Hits (ครั้ง)	Risetime (mS)	Count (ครั้ง)	Energy (J)	Duration (mS)	Amplitude (dB)	Rms (V)
0.05 โมล%	0	0	0	0.0000	0	0	0.0000
0.10 โมล%	672	0	1	0.0045	1	46	0.0002
0.20 โมล%	17	5	3	0.2941	59	49	0.0002



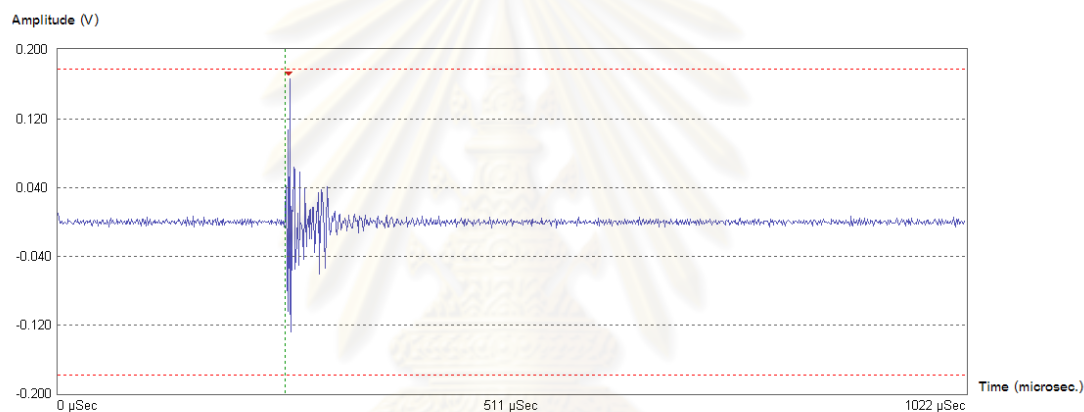
รูปที่ 6.7 พื้นผิวชิ้นงาน ก่อนการทดสอบ (ซ้าย) หลังการทดสอบ (ขวา)



รูปที่ 6.8 ลักษณะสัญญาณอคูสติกในช่วงการหาศักย์กักตร้อน ( $E_{oc}$ )



รูปที่ 6.9 ลักษณะสัญญาณอคูสติคในช่วงกระแสแคโทดิก



รูปที่ 6.10 ลักษณะสัญญาณอคูสติคในช่วงกระแสแอนอดิก

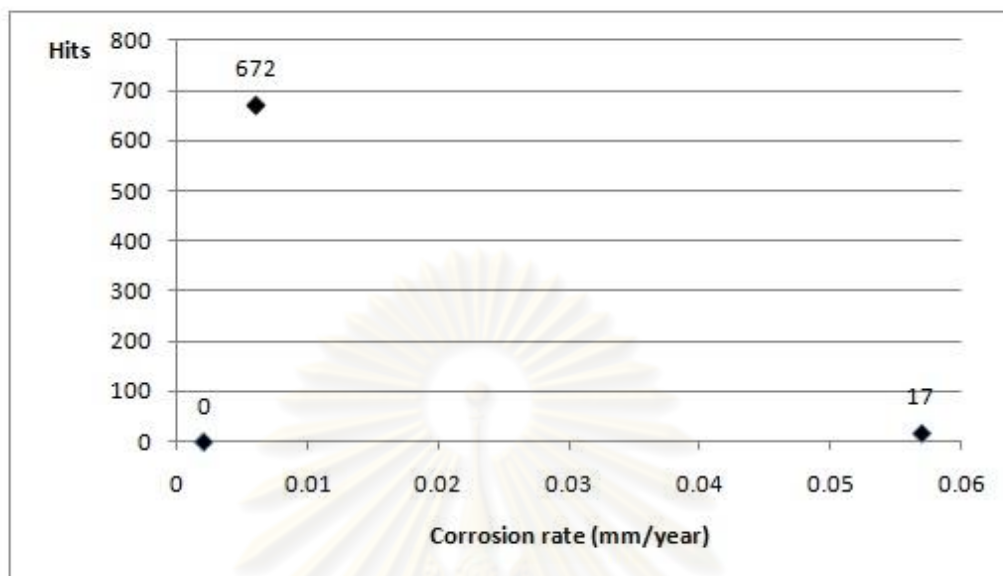
### 6.1.2 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากการทดลองในขั้นแรก เป็นการทดลองหาอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าในสารละลายไฮโดรคลอ-ริกความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ เมื่อใช้สมการ Stern-Geary ในการคำนวณกราฟโพลาริเซชัน (รูปที่ 6.2) พบว่ามีอัตราการกัดกร่อนอยู่ที่ 0.002 มิลลิเมตรต่อปี และจากผลการทดสอบวัดสัญญาณอคูสติค ไม่พบว่ามี การปลดปล่อยคลื่นอคูสติค ทั้งในช่วงการหาค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน และในช่วงโพเทนชิโอดินามิกส์ (รูปที่ 6.1) ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าปฏิกิริยาการกัดกร่อนมีความรุนแรงไม่พอที่จะทำให้เกิดสัญญาณอคูสติค

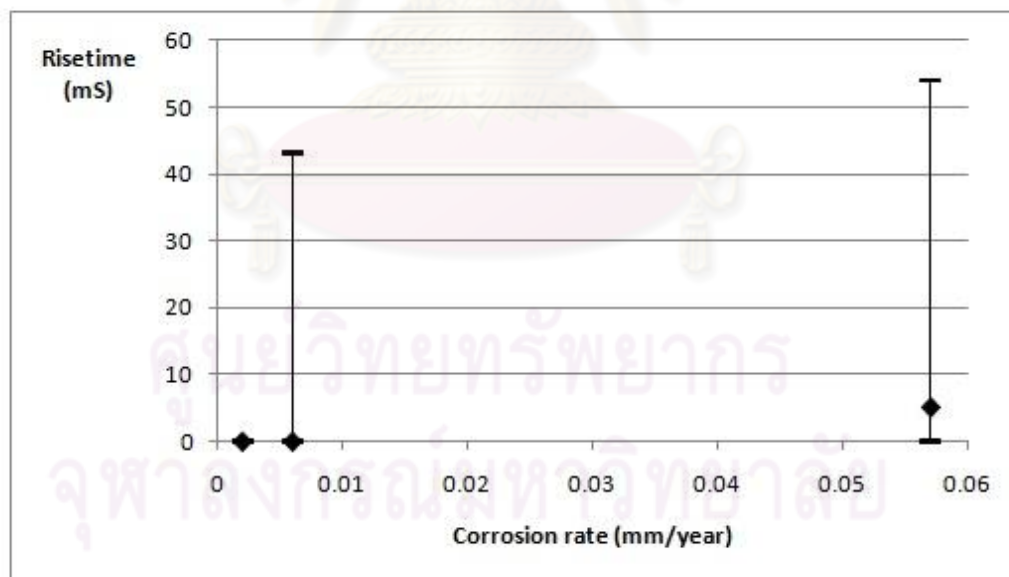
จากการทดลองในตอนถัดมา เป็นการทดลองหาอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าในสารละลายไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ เมื่อใช้สมการ Stern-Geary ในการคำนวณกราฟโพลาร์ไรเซชัน (รูปที่ 6.4) พบว่ามีอัตราการกัดกร่อนอยู่ที่ 0.006 มิลลิเมตรต่อปี และจากผลการทดสอบวัดสัญญาณ อคูสติค พบว่ามีการปลดปล่อยคลื่น อคูสติค ตั้งแต่ในช่วงการหาค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน และในช่วงโพเทนชิโอไดนามิกส์อย่างต่อเนื่อง (รูปที่ 6.3) นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาแนวโน้มการเกิดคลื่นอคูสติคแล้ว พบว่าแนวโน้มการเกิดคลื่นอคูสติคจะเป็นเส้นตรงอย่างต่อเนื่องไม่เปลี่ยนแปลง แม้ว่าจะมีการปล่อยศักย์ไฟฟ้าที่โลหะทดสอบก็ตาม

จากการทดลองในขั้นสุดท้าย เป็นการทดลองหาอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าในสารละลายไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.20 โมลาร์ เมื่อใช้สมการ Stern-Geary ในการคำนวณกราฟโพลาร์ไรเซชัน (รูปที่ 6.6) พบว่ามีอัตราการกัดกร่อนอยู่ที่ 0.057 มิลลิเมตรต่อปี และจากผลการทดสอบวัดสัญญาณ อคูสติค พบว่ามีการปลดปล่อยคลื่น อคูสติค ตั้งแต่ในช่วงการหาค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน และในช่วงโพเทนชิโอไดนามิกส์อย่างต่อเนื่อง (รูปที่ 5.11) แต่เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบในสารละลายความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ พบว่าการทดสอบที่สารละลายความเข้มข้น 0.20 โมลาร์มีจำนวนการเกิดคลื่นอคูสติคที่น้อยกว่าอย่างชัดเจน นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาที่แนวโน้มการเกิดคลื่น อคูสติค (รูปที่ 6.5) พบว่าในช่วงต้นมีอัตราการเกิดคลื่น อคูสติคมากกว่าในช่วงท้ายของการทดสอบ ซึ่งอาจเป็นเพราะว่าสารละลายมีความเข้มข้นมาก เมื่อเวลาผ่านไปจึงเข้าสู่สภาวะสมดุล ปฏิกิริยากัดกร่อนจึงเกิดขึ้นน้อยลง นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาจากลักษณะของรูปสัญญาณดังรูปที่ 6.8-6.10 ซึ่งเกิดขึ้นที่ช่วงต่างๆของการทดสอบโพเทนชิโอไดนามิกส์ ไม่พบถึงความแตกต่างของสัญญาณ

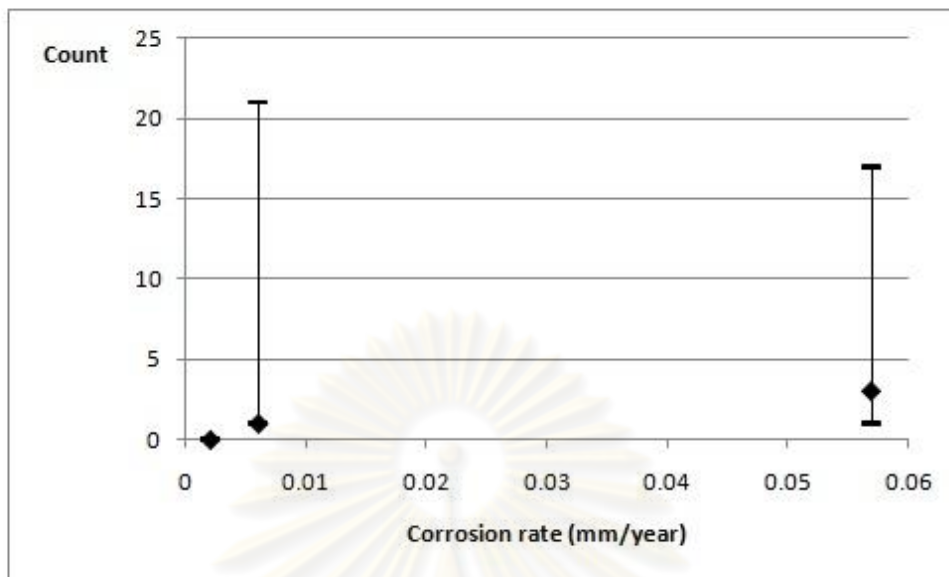
สำหรับการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรของสัญญาณ อคูสติค กับอัตราการกัดกร่อน สามารถแสดงได้ตามกราฟในรูปที่ 6.11-6.17 โดยรูปที่ 6.11 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนสัญญาณกับอัตราการกัดกร่อน, รูปที่ 6.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาขาขึ้นของสัญญาณกับอัตราการกัดกร่อน โดยมีแถบความคลาดเคลื่อนบ่งบอกถึงการกระจายตัวของข้อมูล, รูปที่ 6.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเคาท์กับอัตราการกัดกร่อน พร้อมแถบความคลาดเคลื่อน, รูปที่ 6.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานกับอัตราการกัดกร่อน พร้อมแสดงแถบความคลาดเคลื่อน, รูปที่ 6.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาของสัญญาณกับอัตราการกัดกร่อน, รูปที่ 6.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดกับอัตราการกัดกร่อน, และในรูปที่ 6.17 เป็นรูปที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยรากที่สองกับอัตราการกัดกร่อน พร้อมแถบความคลาดเคลื่อน ดังนี้



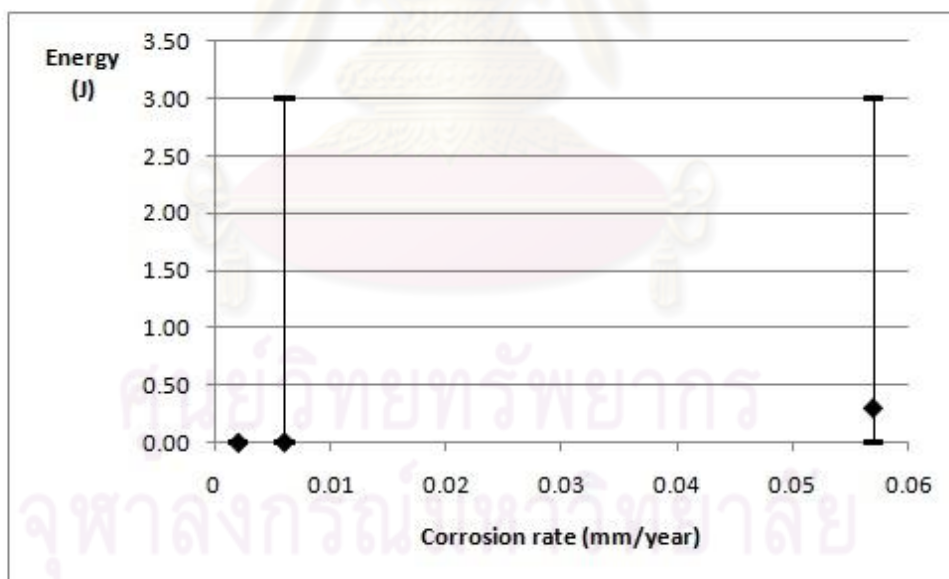
รูปที่ 6.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนสัญญาณกับอัตราการกัดกร่อน



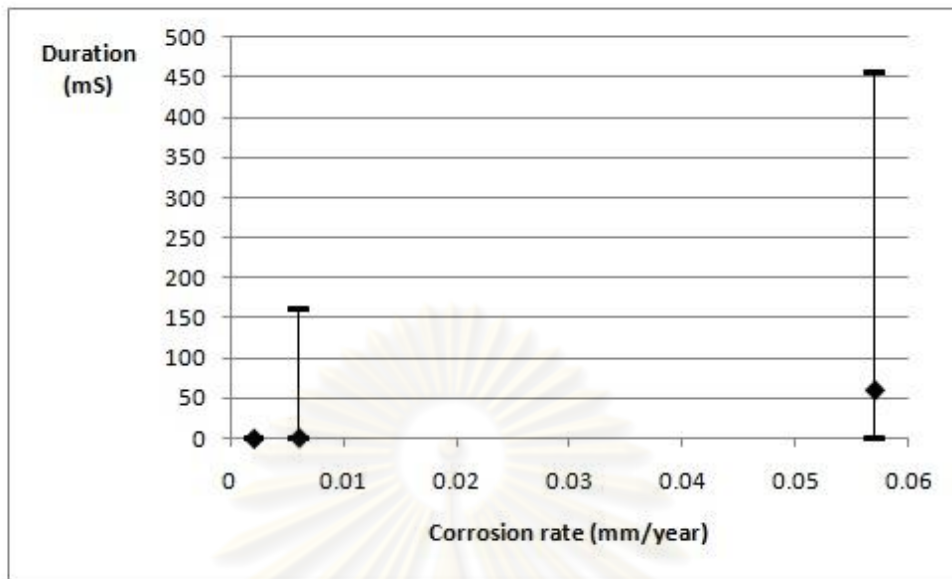
รูปที่ 6.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาขาขึ้นของสัญญาณกับอัตราการกัดกร่อน



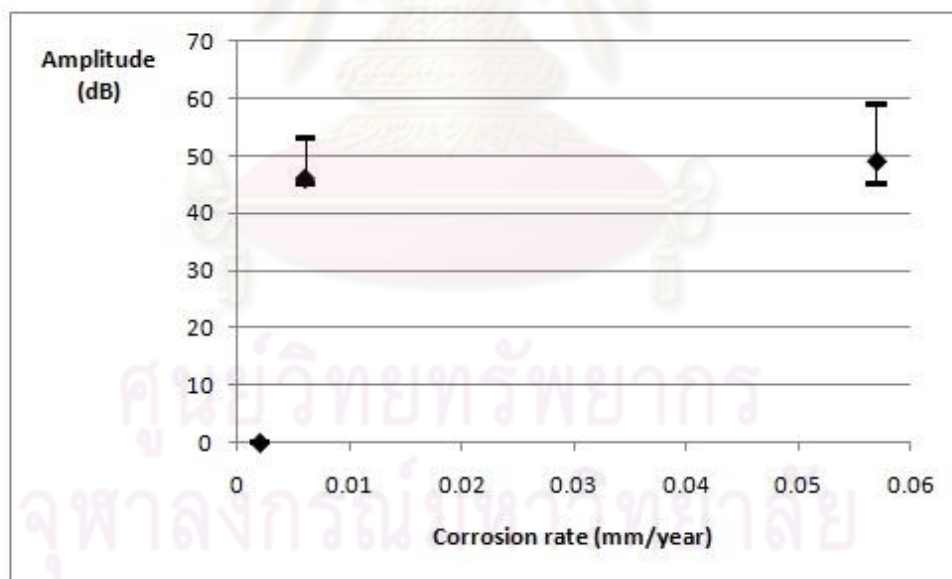
รูปที่ 6.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเคาท์กับอัตราการกัดกร่อน



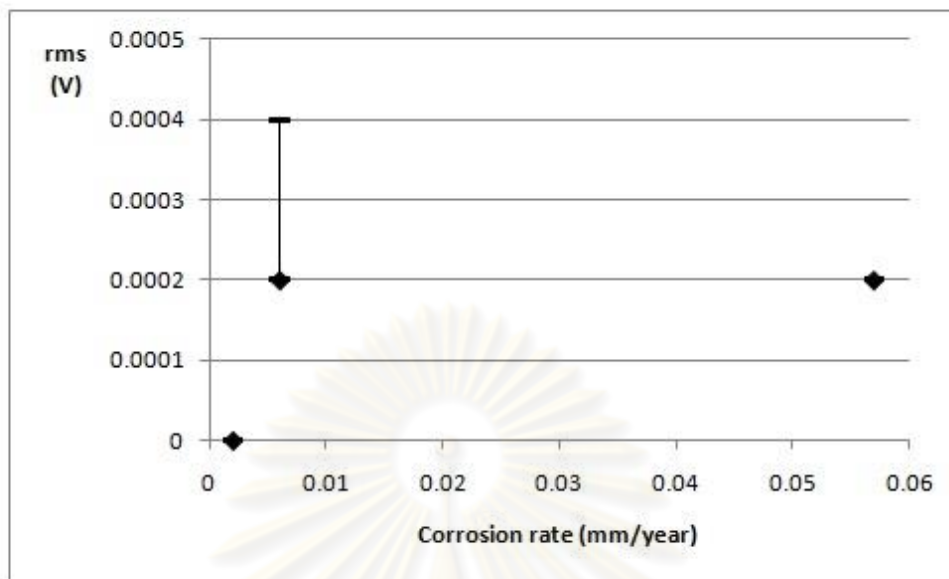
รูปที่ 6.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานกับอัตราการกัดกร่อน



รูปที่ 6.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาของสัญญาณกับอัตราการกัดกร่อน



รูปที่ 6.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอมพลิจูดกับอัตราการกัดกร่อน



รูปที่ 6.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยรากที่สองกับอัตราการกัดกร่อน

เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 6.1 เป็นการรวบรวมผลของค่าเฉลี่ยตัวแปรต่างๆของสัญญาณ อคูสติก พบว่ามีตัวแปร ซึ่งได้แก่ ช่วงเวลาขาขึ้นสัญญาณ (Risetime), เคานท์ (Count), พลังงาน (Energy), ช่วงเวลาของสัญญาณ (Duration) มีค่าแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 6.11-6.17 แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณา แลพบความคลาดเคลื่อน พบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวค่อนข้างสูง ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าการทดสอบการปล่อยคลื่น อคูสติกสามารถนำมาใช้ในการ ตรวจสอบสถานะของการเกิดการกัดกร่อนได้ แต่ไม่สามารถนำมาทำนายอัตราการกัดกร่อนได้อย่างแม่นยำ

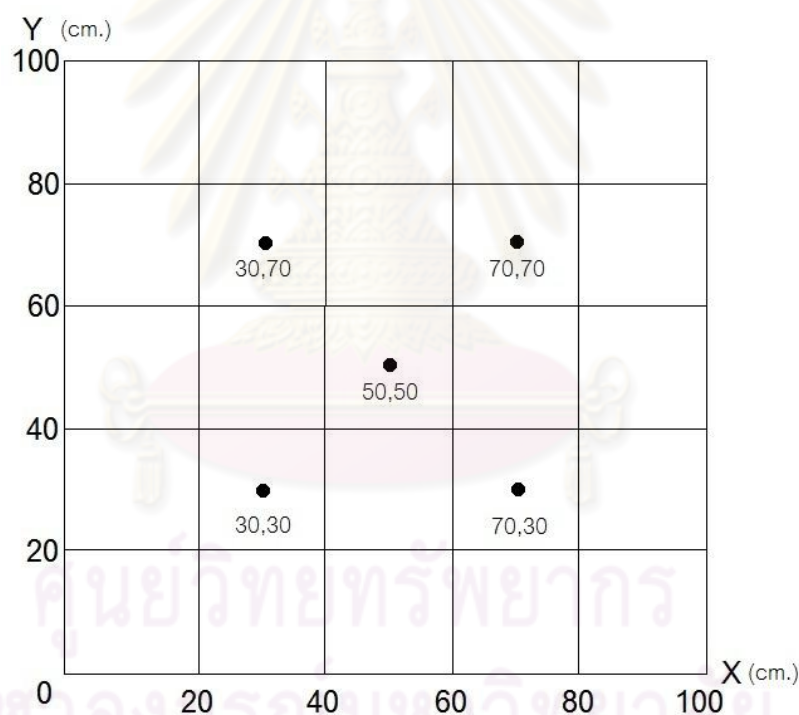
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## 6.2 การทดสอบการหาตำแหน่งของสัญญาณอคูสติก

### 6.2.1 ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบจะแบ่งการทดสอบออกเป็น 5 จุด ดังแสดงในรูปที่ 6.18 และตารางที่ 6.2 และจากตารางดังกล่าวสามารถนำมาแสดงเป็นกราฟใน รูปแบบพิกัด X,Y ได้ โดยรูปที่ 6.19 จะเป็นผลลัพธ์ในการหาตำแหน่งที่จุด 30,30 ซม. ผลลัพธ์ที่ถูกต้องจะซ้อนทับกันในตำแหน่งดังกล่าว และจุดที่กระจายตัวออก จะเป็นผลลัพธ์ที่ไม่ถูกต้อง เช่นเดียวกับกับรูปที่ 6.20 จะเป็นผลลัพธ์ในการหาตำแหน่งที่จุด 30,70 ซม., รูปที่ 6.21 จะเป็นผลลัพธ์ที่ตำแหน่ง 50,50 ซม., รูปที่ 6.22 เป็นผลลัพธ์ที่ตำแหน่ง 70,30 ซม., และรูปที่ 6.23 เป็นผลลัพธ์ที่ตำแหน่ง 70,70 ซม. ตามลำดับ



รูปที่ 6.18 แสดงจุดพิกัดที่ทำการทดสอบทั้ง 5 จุด

ตารางที่ 6.2 ผลลัพธ์ของการทดสอบโปรแกรมเพื่อหาตำแหน่งทั้ง 5 จุด (ทดสอบจุดละ 100 ครั้ง)

ครั้งที่	0.3,0.3 ม.	0.3,0.7 ม.	0.5,0.5 ม.	0.7,0.3 ม.	0.7,0.7 ม.
1	0.268,0.298	0.293,0.686	0.549,0.549	0.696,0.304	0.727,0.727
2	0.277,0.297	0.293,0.686	0.492,0.476	0.701,0.299	0.733,0.733
3	0.277,0.297	0.293,0.686	0.493,0.476	0.701,0.299	0.733,0.733
4	0.277,0.297	0.284,0.685	0.369,0.490	0.693,0.297	0.733,0.733
5	0.277,0.297	0.293,0.686	0.484,0.467	0.693,0.297	0.868,0.952
6	0.277,0.297	0.293,0.686	0.493,0.476	0.693,0.297	0.733,0.733
7	0.273,0.303	0.284,0.685	0.492,0.476	0.695,0.305	0.735,0.726
8	0.773,0.803	0.298,0.680	0.493,0.476	0.626,0.729	0.733,0.733
9	0.277,0.297	0.284,0.685	0.492,0.476	0.693,0.297	0.733,0.733
10	0.277,0.297	0.284,0.685	0.493,0.476	0.693,0.297	0.727,0.727
11	0.277,0.297	0.285,0.684	0.493,0.476	0.693,0.297	0.733,0.733
12	0.277,0.297	0.289,0.679	0.485,0.485	-8.192,9.192	0.733,0.733
13	0.277,0.297	0.357,0.370	0.462,0.505	0.693,0.297	0.727,0.727
14	0.277,0.297	0.398,0.161	0.493,0.476	0.693,0.297	0.727,0.727
15	0.277,0.297	0.293,0.686	0.493,0.476	0.693,0.297	0.733,0.733
16	0.397,0.411	0.285,0.684	0.485,0.485	0.700,0.300	0.732,0.732
17	0.282,0.302	9.216,-8.216	0.493,0.476	0.692,0.297	0.733,0.733

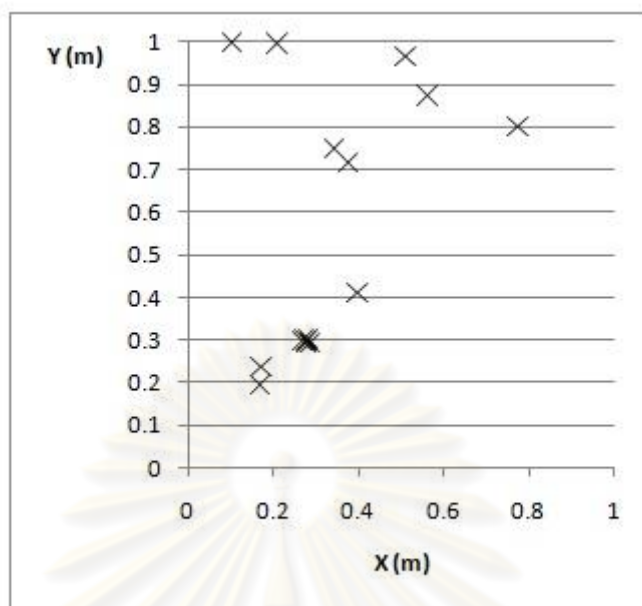
ครั้งที่	0.3,0.3 ม.	0.3,0.7 ม.	0.5,0.5 ม.	0.7,0.3 ม.	0.7,0.7 ม.
18	0.277,0.297	0.293,0.686	0.485,0.485	0.694,0.306	0.733,0.733
19	0.277,0.297	0.293,0.686	0.493,0.476	0.693,0.297	0.736,0.717
20	0.277,0.297	0.000,0.244	0.462,0.505	0.692,0.297	0.733,0.733
21	0.277,0.297	0.293,0.686	0.502,0.485	0.699,0.301	0.733,0.733
22	0.277,0.297	0.285,0.684	0.494,0.477	0.694,0.306	0.727,0.727
23	0.171,0.236	0.293,0.686	0.461,0.506	0.611,0.498	0.727,0.727
24	0.277,0.297	0.299,0.680	0.494,0.506	0.699,0.301	1.004,-0.219
25	0.277,0.297	0.293,0.686	0.513,0.513	0.699,0.301	0.573,0.457
26	0.277,0.297	0.284,0.685	0.512,0.512	0.523,0.347	0.728,0.728
27	0.277,0.297	0.293,0.686	0.512,0.512	0.691,0.298	0.727,0.727
28	0.277,0.297	0.293,0.686	0.492,0.492	0.691,0.298	0.735,0.726
29	0.277,0.297	0.285,0.684	0.540,0.540	0.699,0.301	0.733,0.733
30	0.277,0.297	0.293,0.686	0.502,0.485	0.692,0.308	0.727,0.727
31	9.037,9.322	0.293,0.686	0.492,0.492	0.698,0.302	0.735,0.726
32	0.277,0.297	0.293,0.686	0.502,0.485	0.699,0.301	0.735,0.726
33	0.277,0.297	0.293,0.686	0.492,0.492	0.704,0.296	0.727,0.727
34	0.282,0.302	0.293,0.686	0.493,0.493	0.698,0.302	0.734,0.725

ครั้งที่	0.3,0.3 ม.	0.3,0.7 ม.	0.5,0.5 ม.	0.7,0.3 ม.	0.7,0.7 ม.
35	0.277,0.297	0.293,0.686	0.492,0.492	0.698,0.302	0.727,0.727
36	0.277,0.297	0.415,0.993	0.492,0.492	0.698,0.302	0.734,0.725
37	0.277,0.297	0.293,0.686	0.512,0.512	0.624,0.624	0.733,0.733
38	0.281,0.301	0.293,0.686	0.505,0.505	0.513,0.495	0.734,0.725
39	0.277,0.297	0.284,0.685	0.513,0.513	0.698,0.302	0.380,0.033
40	0.277,0.297	0.293,0.686	0.512,0.512	0.697,0.303	0.727,0.727
41	0.273,0.304	0.293,0.686	0.494,0.506	0.692,0.308	0.733,0.733
42	0.277,0.297	0.284,0.685	0.505,0.505	0.697,0.303	0.735,0.726
43	0.277,0.297	0.373,0.614	0.505,0.505	1.105,1.274	0.727,0.727
44	0.277,0.297	0.299,0.680	0.512,0.512	0.697,0.303	0.727,0.727
45	0.277,0.297	0.293,0.686	0.494,0.494	0.690,0.300	0.733,0.733
46	0.277,0.297	0.293,0.686	0.504,0.504	0.697,0.303	0.734,0.725
47	0.170,0.196	0.293,0.686	0.494,0.494	0.697,0.303	0.733,0.733
48	0.277,0.297	0.112,0.846	0.512,0.512	0.690,0.300	0.734,0.725
49	0.281,0.301	0.324,0.348	0.504,0.504	0.690,0.300	0.530,0.171
50	0.281,0.301	0.293,0.686	0.505,0.505	0.697,0.303	0.733,0.733
51	0.375,0.717	0.299,0.680	0.512,0.512	0.688,0.291	0.733,0.733

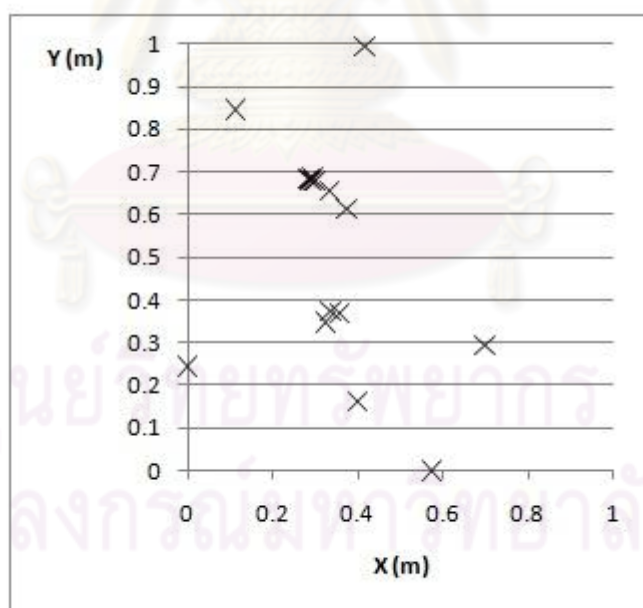
ครั้งที่	0.3,0.3 ม.	0.3,0.7 ม.	0.5,0.5 ม.	0.7,0.3 ม.	0.7,0.7 ม.
52	0.277,0.297	9.008,-8.293	0.505,0.505	0.697,0.303	0.734,0.725
53	0.277,0.297	0.293,0.686	0.505,0.505	0.689,0.300	0.504,0.496
54	0.561,0.874	0.299,0.680	0.512,0.512	0.696,0.304	0.734,0.725
55	0.281,0.301	0.285,0.684	0.512,0.512	0.690,0.300	0.735,0.726
56	0.268,0.298	0.293,0.686	0.505,0.505	0.690,0.300	0.727,0.727
57	0.277,0.297	0.336,0.373	0.512,0.512	0.118,0.242	0.733,0.733
58	0.277,0.297	0.293,0.686	0.513,0.513	0.689,0.300	0.728,0.728
59	0.273,0.303	0.293,0.686	0.493,0.493	0.696,0.304	0.735,0.726
60	0.277,0.297	0.298,0.680	0.494,0.494	0.688,0.301	0.733,0.733
61	0.277,0.297	0.293,0.686	0.504,0.504	0.626,0.728	0.727,0.727
62	0.277,0.297	0.333,0.655	0.494,0.494	0.694,0.296	0.733,0.733
63	0.277,0.297	0.293,0.686	0.504,0.504	0.688,0.301	0.703,0.506
64	0.277,0.297	0.299,0.680	0.965,0.498	0.689,0.300	0.727,0.727
65	0.277,0.297	0.293,0.686	0.493,0.493	0.680,0.299	0.727,0.727
66	0.281,0.301	0.293,0.686	0.493,0.493	0.688,0.302	0.727,0.727
67	0.510,0.966	0.284,0.685	0.508,0.492	0.694,0.296	0.257,0.267
68	0.277,0.297	0.293,0.686	0.507,0.493	0.687,0.292	0.727,0.727

ครั้งที่	0.3,0.3 ม.	0.3,0.7 ม.	0.5,0.5 ม.	0.7,0.3 ม.	0.7,0.7 ม.
69	0.277,0.297	0.293,0.686	0.494,0.494	0.688,0.301	0.734,0.725
70	0.276,0.296	0.293,0.686	0.508,0.492	0.688,0.302	0.728,0.728
71	0.282,0.302	0.293,0.686	0.513,0.513	0.688,0.302	0.727,0.727
72	0.277,0.297	0.285,0.684	0.513,0.513	0.694,0.296	0.733,0.733
73	0.277,0.297	0.285,0.684	0.504,0.504	0.694,0.296	0.734,0.725
74	0.277,0.297	0.285,0.684	0.505,0.505	0.687,0.292	0.734,0.725
75	0.277,0.297	0.293,0.686	0.512,0.512	0.680,0.299	0.733,0.733
76	0.281,0.301	0.285,0.684	0.512,0.512	0.522,0.505	0.727,0.727
77	0.277,0.297	0.293,0.686	0.505,0.505	0.600,0.348	0.735,0.726
78	0.277,0.297	0.293,0.686	0.504,0.504	0.687,0.292	0.727,0.727
79	0.277,0.297	0.697,0.293	0.504,0.504	0.688,0.301	0.740,0.731
80	0.281,0.301	0.285,0.684	0.512,0.512	0.747,1.000	0.735,0.726
81	0.277,0.297	0.293,0.686	0.504,0.504	0.688,0.302	0.024,0.007
82	0.281,0.301	0.293,0.686	0.505,0.505	0.680,0.299	0.734,0.725
83	0.104,0.998	0.298,0.680	0.512,0.512	0.524,0.507	0.727,0.727
84	0.277,0.297	0.293,0.686	0.493,0.493	0.688,0.302	0.735,0.726
85	0.277,0.297	0.293,0.686	0.505,0.505	0.688,0.302	0.733,0.733

ครั้งที่	0.3,0.3 ม.	0.3,0.7 ม.	0.5,0.5 ม.	0.7,0.3 ม.	0.7,0.7 ม.
86	0.561,0.874	0.299,0.680	0.504,0.504	0.687,0.292	0.727,0.727
87	0.277,0.297	0.574,0.000	0.512,0.512	0.688,0.301	0.733,0.733
88	0.285,0.295	0.285,0.684	0.512,0.512	0.687,0.292	0.727,0.727
89	0.277,0.297	0.298,0.680	0.512,0.512	0.686,0.293	0.733,0.733
90	0.277,0.297	0.293,0.686	0.504,0.504	0.688,0.302	0.735,0.726
91	0.277,0.297	0.293,0.686	0.434,0.834	0.680,0.298	0.257,0.266
92	0.277,0.297	0.293,0.686	0.469,0.514	0.688,0.302	0.729,0.719
93	0.282,0.302	0.293,0.686	0.460,0.507	0.686,0.293	0.727,0.727
94	0.285,0.295	0.285,0.684	0.505,0.505	0.688,0.301	0.735,0.726
95	0.209,0.996	0.293,0.686	0.505,0.505	0.688,0.302	0.734,0.725
96	0.281,0.301	0.293,0.686	0.505,0.505	0.681,0.297	0.733,0.733
97	0.277,0.297	0.284,0.685	0.512,0.512	0.688,0.302	0.727,0.727
98	0.277,0.297	0.299,0.680	0.549,0.739	0.266,0.995	0.733,0.733
99	0.277,0.297	0.293,0.686	0.505,0.505	-0.662,-0.323	0.729,0.719
100	0.343,0.750	0.293,0.686	0.323,0.497	0.000,0.762	0.727,0.727

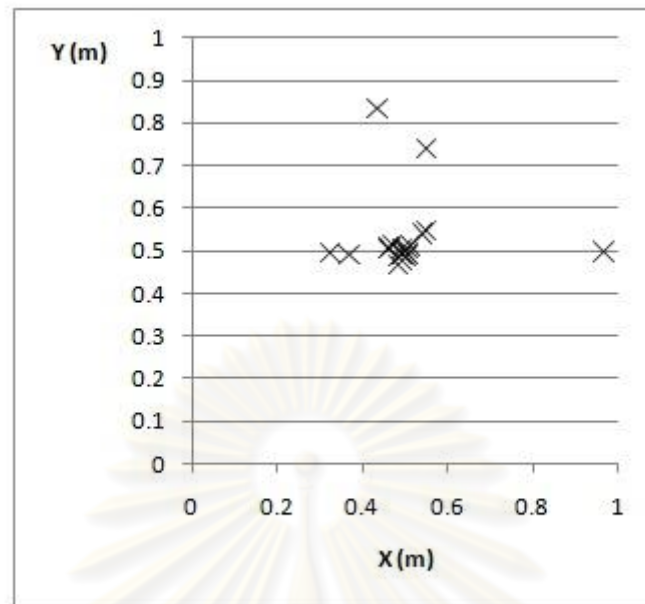


รูปที่ 6.19 ผลลัพธ์ในการหาตำแหน่งคลื่นออกสูดติกที่ตำแหน่ง 0.3,0.3 ม.

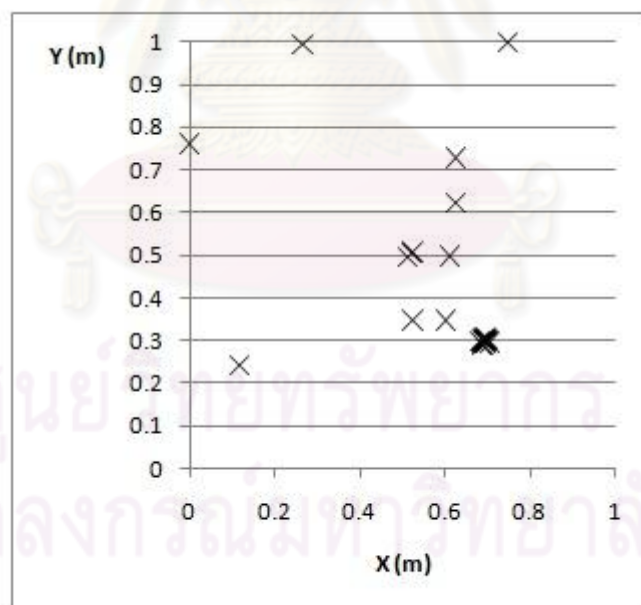


รูปที่ 6.20 ผลลัพธ์ในการหาตำแหน่งคลื่นออกสูดติกที่ตำแหน่ง 0.3,0.7 ม.

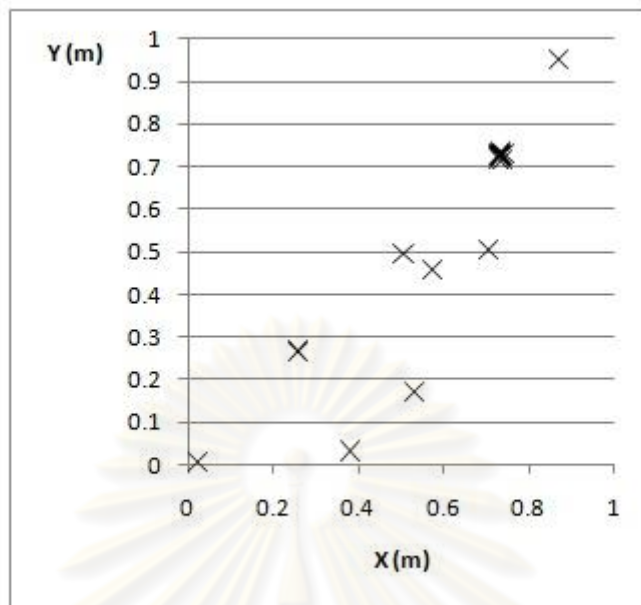




รูปที่ 6.21 ผลลัพธ์ในการหาตำแหน่งคลื่นออกสูดติกที่ตำแหน่ง 0.5,0.5 ม.



รูปที่ 6.22 ผลลัพธ์ในการหาตำแหน่งคลื่นออกสูดติกที่ตำแหน่ง 0.7,0.3 ม.



รูปที่ 6.23 ผลลัพธ์ในการหาตำแหน่งคลื่นอนุภาคที่ตำแหน่ง 0.7,0.7 ม.

### 6.2.2 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

ในการวิเคราะห์ผลลัพธ์ของการหาตำแหน่งจาก อัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้นมา จะพิจารณาอยู่สองปัจจัย ได้แก่ ร้อยละของความถูกต้อง (ซึ่งคิดจากผลลัพธ์ที่มีความคลาดเคลื่อนไม่เกินค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเทียบกับจำนวนครั้งของการทดสอบทั้งหมด) และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (คำนวณจากผลลัพธ์ในแต่ละจุดแล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยรวม) ดังในตารางที่ 6.3 โดยเมื่อพิจารณาจากข้อมูล สามารถอธิบายได้ว่าระบบหาตำแหน่งที่พัฒนาขึ้น มีค่าความถูกต้องอยู่ที่ 91 เปอร์เซ็นต์และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยอยู่ที่ 1 เซนติเมตร

ตารางที่ 6.3 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของความถูกต้องในการหาตำแหน่งและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตำแหน่งที่ทดสอบ (ชม.)	ความถูกต้อง (เปอร์เซ็นต์)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ชม.)
30, 30	90	1.27
30, 70	89	1.77
50, 50	93	0.07
70, 30	89	1.28
70, 70	92	0.19
<b>รวมทั้งหมด</b>	<b>91</b>	<b>0.91</b>

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 7

### สรุปผลการทดสอบ

#### 7.1 สรุปและวิเคราะห์ผล

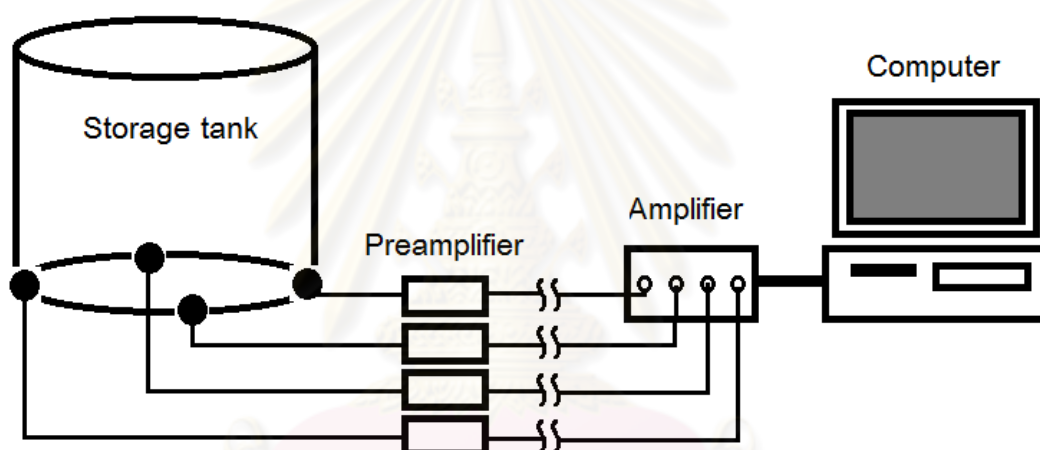
งานนี้ได้ทำการพัฒนาระบบประเมินสภาพการกัดกร่อนของพื้นถึงบรรจุโดยการทดสอบการปล่อยคลื่นอะคูสติก การทดสอบแบ่งออกเป็นสองส่วน ได้แก่ การทดสอบเพื่อวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ของสัญญาณอะคูสติกเทียบกับอัตราการกัดกร่อน และการทดสอบเพื่อวิเคราะห์ตำแหน่งของการกัดกร่อนบริเวณกันถังโดยใช้วิธีประมวลผลสัญญาณ

สำหรับการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ของสัญญาณอะคูสติกเทียบกับอัตราการกัดกร่อน ทดสอบโดยการตรวจจับคลื่นอะคูสติกในขณะที่ทดสอบการกัดกร่อนด้วยวิธีโพเทนชิโอสแตติก โลหะที่ใช้ทดสอบได้แก่เหล็กกล้าคาร์บอน สารละลายที่ใช้เพื่อทำให้เกิดการกัดกร่อน ได้แก่กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid) ซึ่งมีความเข้มข้น 0.05 โมลาร์(M), 0.10 โมลาร์, 0.20 โมลาร์ ซึ่งจะทำให้มีอัตราการกัดกร่อนอยู่ที่ 0.002, 0.006, 0.057 มิลลิเมตรต่อปี ผลการทดสอบพบว่าตัวแปรของสัญญาณอะคูสติกที่มีแนวโน้มสูงขึ้นตามอัตราการกัดกร่อน ได้แก่ ช่วงเวลาของสัญญาณขาขึ้น (Risetime), เคานท์ (Count), พลังงาน (Energy), ช่วงเวลาของสัญญาณ (Duration) แต่แนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้นนั้นเมื่อพิจารณา การกระจายตัวของข้อมูลตามที่ได้แสดงไว้ในแถบความคลาดเคลื่อน พบว่ามีการเพิ่มขึ้นอย่างไม่แน่นอน ดังนั้นจึงสรุปว่าการทดสอบการปล่อยคลื่นอะคูสติกสามารถใช้เพียงเพื่อบ่งบอกถึงสภาวะที่เกิดการกัดกร่อนได้ ทั้งนี้เมื่อพิจารณาจากพื้นผิวของวัสดุทดสอบพบว่ามีการแยกขนาดเล็กลอยบนผิว ซึ่งมีผลทำให้ค่าที่ได้จากการทดลองมีการกระจายตัวของข้อมูลสูงมาก

นอกจากนี้สำหรับการวิเคราะห์ตำแหน่งของการกัดกร่อนบริเวณกันถัง ได้พัฒนาระบบการหาตำแหน่งที่เกิดสัญญาณอะคูสติกโดยใช้ตัวรับรู้ สัญญาณ (Sensor) 4 ตัว โดยการทดสอบจะติดตั้งตัวรับรู้ไว้บนพื้นผิวที่ทดสอบอยู่ในแนวของสี่เหลี่ยมจัตุรัส กว้าง 1 เมตร การทดสอบใช้การจำลองคลื่นอะคูสติก (AE artificial source) ด้วยตัวกำเนิดสัญญาณจำลอง (AE Pulser) โดยจำลองคลื่นอะคูสติกขึ้นบนตำแหน่งต่างๆ แล้วนำมาเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากระบบการหาตำแหน่ง ผลการทดสอบพบว่าความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ได้จากระบบการหาตำแหน่งที่พัฒนาขึ้น มีความถูกต้องในการหาตำแหน่งที่ 91 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 1 เซนติเมตร

## 7.2 การนำไปประยุกต์ใช้งาน

ระบบที่สร้างขึ้นมีความสามารถในการเฝ้าระวังและติดตามสภาวะที่เกิดการกักต้อนของกันถึงได้ โดยจำแนกความแตกต่างระหว่างสภาวะที่ไม่มีการกักต้อน และสภาวะที่มีการกักต้อนได้ โดยไม่จำเป็นต้องรบกวนหรือหยุดกระบวนการผลิต ซึ่งข้อมูลจากสัญญาณออสติคที่ทำการบันทึกไว้สามารถนำไปวิเคราะห์หาตำแหน่งเพื่อเป็นข้อมูลเบื้องต้นเพื่อใช้สำหรับการเฝ้าระวังการความผิดปกติของสภาพถังบรรจุ และเป็นข้อมูลสนับสนุนในการทดสอบแบบไม่ทำลายด้วยวิธีอื่น เพื่อประเมินสภาพอย่างละเอียดได้ เช่นการทดสอบด้วยอัลตราโซนิก เป็นต้น



ระบบพบสัญญาณออสติค  $\Rightarrow$  แจ้งเตือนว่ามีการกักต้อนเกิดขึ้น  $\Rightarrow$  เก็บข้อมูล / วิเคราะห์ตำแหน่งที่เกิดการกักต้อน

รูปที่ 7.1 การนำไปประยุกต์ใช้งานกับพื้นถังบรรจุจริง

ศูนย์บริการเพื่อการศึกษา  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

- [1] Jeong-Rock Kwon, Geun-Jun Lyu, Tae-Hee Lee, Jee-Yoon Kim. Acoustic emission testing of repaired storage tank. International journal of pressure vessels and piping 2001 : 373-378.
- [2] Standard test method for examination of liquid-filled atmospheric and low-pressure metal storage tanks using acoustic emission. American society for testing and materials E 1930-97 : 1-12.
- [3] Dieter Landolt. Corrosion and surface chemistry of metals. Italy : CRC Press, 2003.
- [4] พุทธิณี ซาโตะ. การทดสอบแบบไม่ทำลาย. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2543.
- [5] สิทธิชัย อนุภาพอุดม. การสร้างตัวตรวจจับการปล่อยคลื่นอะคูสติกด้วยฟิล์มพีวีดีเอพและสารพีแซดที. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.
- [6] สิ้นชัย บริบูรณ์สกุลสุข. การเฝ้าสังเกตการกัดกร่อนเชิงความเค้นของวัสดุที่ใช้ทำภาชนะรับความดันโดยวิธีการปล่อยคลื่นอะคูสติก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.
- [7] PCI-2 Based AE system user's manual. Rev 1a. : Physical Acoustics Corporation, 2003.
- [8] Data acquisition basics manual. USA : National Instrument Corporation, 1998.
- [9] Denny A.Jones. Principles and prevention of corrosion. 2nd edition. Reno : Prentice hall, 1996.
- [10] L.L.Shreir. Corrosion. Volume 2. USA : Newnes-Butterwoths, 1978.
- [11] Larry A. Duesing. Acoustic emission testing of composite materials. Proceedings annual reliability and maintainability symposium 1989 : 128-134.
- [12] H.Mazille, R.Rothea, C.Tronel. An acoustic emission technique for monitoring pitting corrosion of austenitic stainless steels. Corrosion science 1995 : 1365-1375.
- [13] James C.Spall, John L.Maryak, Mark S.Asher. Neural network approach to locating acoustic emission sources in nondestructive evaluation. Proceedings of the American control conference 1998 : 68-72.

- [14] F.Ferrer, H.Idrissi, H.Mazille, P.Fleischmann, P.Labeeuw. On the potential of acoustic emission for the characterization and understanding of mechanical damaging during abrasion-corrosion processes. Elsevier science 1999 : 108-115.
- [15] Jeong-Rock Kwon, Geun-Jun Lyu, Tae-Hee Lee, Jee-Yoon Kim. Acoustic emission testing of repaired storage tank. International journal of pressure vessels and piping 2001 : 373-378.
- [16] Mannur J.Sunderesan, Mark J.Schulz, Anindya Ghoshal. Linear location of acoustic emission sources with a single channel distributed sensor. Journal of intelligent material systems and structures 2001 : 689-699.
- [17] K.Darowicki, A.Mirakowski, S.Krakowiak. Investigation of pitting corrosion of stainless steel by means of acoustic emission and potentiodynamic methods. Corrosion science 2003 : 1747-1756.
- [18] Matthew Ing, Simon Austin, Richard Lyons. Cover zone properties influencing acoustic emission due to corrosion. Cement and concrete research 2005 : 284-295.
- [19] Yeun-Ho Yu, Jin-Ho Choi, Jin-Hwe Kweon, Dong-Hyun Kim. A study on the failure detection of composite materials using an acoustic emission. Composite structures 2006 : 163-169.
- [20] Y.P.Kim, M.Fregonese, H.Mazille, D.Feron, G.Santarini. Study of oxygen reduction on stainless steel surfaces and its contribution to acoustic emission recorded during corrosion processes. Corrosion science 2006: 3945-3959.
- [21] Frederic Ferrer, Thierry Faure, Jean Goudiakas, Eric Andres. Acoustic emission study of active-passive transitions during carbon steel erosion-corrosion in concentrated sulfuric acid. Corrosion science 2002 : 1529-1540.
- [22] C.Jomdecha, A.Prateepasen, P.Kaewtrakulpong. Study on source location using an acoustic emission system for various corrosion types. NDT&E International 2007 : 584-593.
- [23] Craig Webster. Development of Non-Destructive evaluation techniques for CNG fuel tank. Transportation development center of transport Canada 2007.

- [24] S.Ramadan, L.Gaillet, C.Tessier, H.Idrissi. Detection of stress corrosion cracking of high-strength steel used in prestressed concrete structures by acoustic emission technique. Applied surface science 2007 : 1-7.
- [25] H.Shaikh, R.Amirthalingam, T.Anita, N.Sivaibharasi, T.Jaykumar, P.Manohar, H.S.Khatak. Evaluation of stress corrosion cracking phenomenon in an AISI type 316LN stainless steel using acoustic emission technique. Corrosion science 2007 : 740-765.
- [26] Matthew Geoffrey Baxter, Rhys Pullin, Karen M.Holford, Sam L.Evans. Delta T source location for acoustic emission. Mechanical systems and signal processing 2007 :1552-1520.
- [27] Petr Sedlak. New automatic localization technique of AE signals in thin metal plate. Ultrasonics 2009 : 254-262.
- [28] C.U.Grosse. Acoustic emission localization methods for large structures based on beamforming and array technique. Non-destructive testing in civil engineering 2009.





ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## LM741 Operational Amplifier

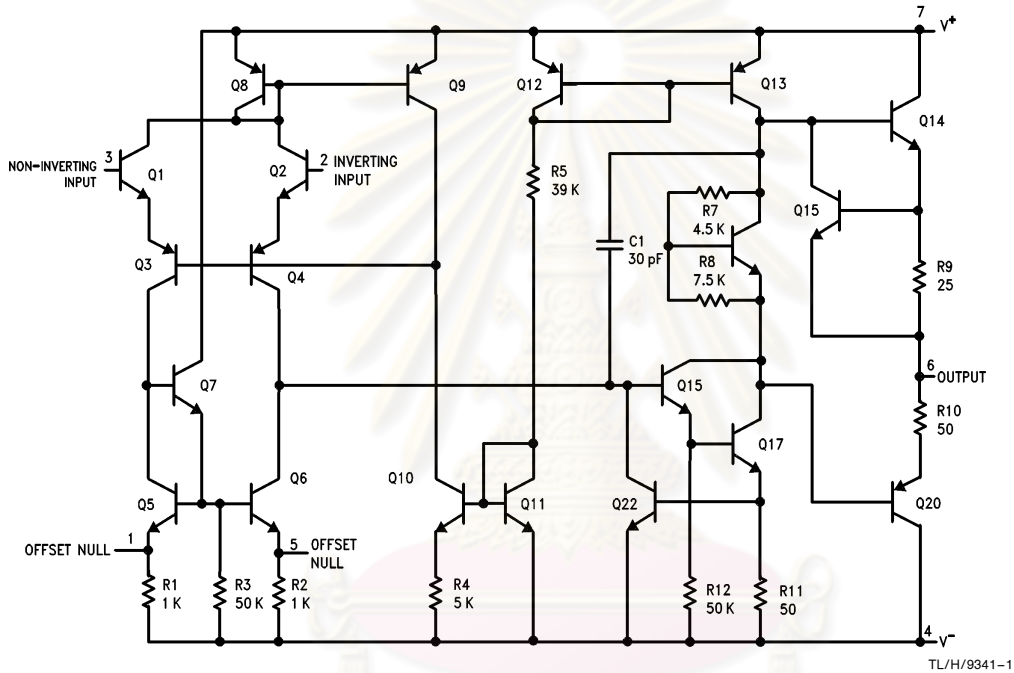
### General Description

The LM741 series are general purpose operational amplifiers which feature improved performance over industry standards like the LM709. They are direct, plug-in replacements for the 709C, LM201, MC1439 and 748 in most applications. The amplifiers offer many features which make their application nearly foolproof: overload protection on the input and

output, no latch-up when the common mode range is exceeded, as well as freedom from oscillations.

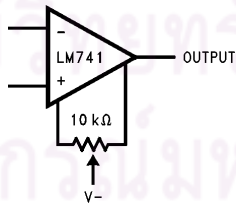
The LM741C/LM741E are identical to the LM741/LM741A except that the LM741C/LM741E have their performance guaranteed over a 0°C to +70°C temperature range, instead of -55°C to +125°C.

### Schematic Diagram



TL/H/9341-1

#### Offset Nulling Circuit



TL/H/9341-7

## Absolute Maximum Ratings

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications.  
(Note 5)

	LM741A	LM741E	LM741	LM741C
Supply Voltage	±22V	±22V	±22V	±18V
Power Dissipation (Note 1)	500 mW	500 mW	500 mW	500 mW
Differential Input Voltage	±30V	±30V	±30V	±30V
Input Voltage (Note 2)	±15V	±15V	±15V	±15V
Output Short Circuit Duration	Continuous	Continuous	Continuous	Continuous
Operating Temperature Range	−55°C to +125°C	0°C to +70°C	−55°C to +125°C	0°C to +70°C
Storage Temperature Range	−65°C to +150°C	−65°C to +150°C	−65°C to +150°C	−65°C to +150°C
Junction Temperature	150°C	100°C	150°C	100°C
Soldering Information				
N-Package (10 seconds)	260°C	260°C	260°C	260°C
J- or H-Package (10 seconds)	300°C	300°C	300°C	300°C
M-Package				
Vapor Phase (60 seconds)	215°C	215°C	215°C	215°C
Infrared (15 seconds)	215°C	215°C	215°C	215°C
See AN-450 "Surface Mounting Methods and Their Effect on Product Reliability" for other methods of soldering surface mount devices.				
ESD Tolerance (Note 6)	400V	400V	400V	400V

## Electrical Characteristics (Note 3)

Parameter	Conditions	LM741A/LM741E			LM741			LM741C			Units
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Input Offset Voltage	$T_A = 25^\circ\text{C}$ $R_S \leq 10\text{ k}\Omega$ $R_S \leq 50\Omega$		0.8	3.0		1.0	5.0	2.0	6.0	mV mV	
	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$ $R_S \leq 50\Omega$ $R_S \leq 10\text{ k}\Omega$			4.0			6.0		7.5	mV mV	
Average Input Offset Voltage Drift				15						$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	
Input Offset Voltage Adjustment Range	$T_A = 25^\circ\text{C}$ , $V_S = \pm 20\text{V}$	±10				±15			±15	mV	
Input Offset Current	$T_A = 25^\circ\text{C}$		3.0	30		20	200	20	200	nA	
	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$			70		85	500		300	nA	
Average Input Offset Current Drift				0.5						nA/ $^\circ\text{C}$	
Input Bias Current	$T_A = 25^\circ\text{C}$		30	80		80	500	80	500	nA	
	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$			0.210			1.5		0.8	$\mu\text{A}$	
Input Resistance	$T_A = 25^\circ\text{C}$ , $V_S = \pm 20\text{V}$	1.0	6.0		0.3	2.0		0.3	2.0	M $\Omega$	
	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$ , $V_S = \pm 20\text{V}$	0.5								M $\Omega$	
Input Voltage Range	$T_A = 25^\circ\text{C}$							±12	±13	V	
	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$				±12	±13				V	
Large Signal Voltage Gain	$T_A = 25^\circ\text{C}$ , $R_L \geq 2\text{ k}\Omega$ $V_S = \pm 20\text{V}$ , $V_O = \pm 15\text{V}$ $V_S = \pm 15\text{V}$ , $V_O = \pm 10\text{V}$	50			50	200		20	200	V/mV V/mV	
	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$ , $R_L \geq 2\text{ k}\Omega$ , $V_S = \pm 20\text{V}$ , $V_O = \pm 15\text{V}$ $V_S = \pm 15\text{V}$ , $V_O = \pm 10\text{V}$	32								V/mV V/mV V/mV	
	$V_S = \pm 5\text{V}$ , $V_O = \pm 2\text{V}$	10			25			15		V/mV V/mV V/mV	

<b>Electrical Characteristics</b> (Note 3) (Continued)											
Parameter	Conditions	LM741A/LM741E			LM741			LM741C			Units
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Output Voltage Swing	$V_S = \pm 20V$ $R_L \geq 10\text{ k}\Omega$ $R_L \geq 2\text{ k}\Omega$	$\pm 16$ $\pm 15$									V V
	$V_S = \pm 15V$ $R_L \geq 10\text{ k}\Omega$ $R_L \geq 2\text{ k}\Omega$				$\pm 12$ $\pm 10$	$\pm 14$ $\pm 13$		$\pm 12$ $\pm 10$	$\pm 14$ $\pm 13$		V V
Output Short Circuit Current	$T_A = 25^\circ\text{C}$ $T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$	10 10	25	35 40		25			25		mA mA
Common-Mode Rejection Ratio	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$ $R_S \leq 10\text{ k}\Omega, V_{CM} = \pm 12V$ $R_S \leq 50\Omega, V_{CM} = \pm 12V$	80	95		70	90		70	90		dB dB
Supply Voltage Rejection Ratio	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$ , $V_S = \pm 20V$ to $V_S = \pm 5V$ $R_S \leq 50\Omega$ $R_S \leq 10\text{ k}\Omega$	86	96		77	96		77	96		dB dB
Transient Response Rise Time Overshoot	$T_A = 25^\circ\text{C}$ , Unity Gain		0.25 6.0	0.8 20		0.3 5			0.3 5		$\mu\text{s}$ %
Bandwidth (Note 4)	$T_A = 25^\circ\text{C}$	0.437	1.5								MHz
Slew Rate	$T_A = 25^\circ\text{C}$ , Unity Gain	0.3	0.7			0.5			0.5		V/ $\mu\text{s}$
Supply Current	$T_A = 25^\circ\text{C}$					1.7	2.8		1.7	2.8	mA
Power Consumption	$T_A = 25^\circ\text{C}$ $V_S = \pm 20V$ $V_S = \pm 15V$		80	150		50	85		50	85	mW mW
LM741A	$V_S = \pm 20V$ $T_A = T_{AMIN}$ $T_A = T_{AMAX}$			165 135							mW mW
LM741E	$V_S = \pm 20V$ $T_A = T_{AMIN}$ $T_A = T_{AMAX}$			150 150							mW mW
LM741	$V_S = \pm 15V$ $T_A = T_{AMIN}$ $T_A = T_{AMAX}$					60 45	100 75				mW mW

**Note 1:** For operation at elevated temperatures, these devices must be derated based on thermal resistance, and  $T_J$  max. (listed under "Absolute Maximum Ratings").  $T_J = T_A + (\theta_{JA} P_D)$ .

Thermal Resistance	Cerdip (J)	DIP (N)	HO8 (H)	SO-8 (M)
$\theta_{JA}$ (Junction to Ambient)	100°C/W	100°C/W	170°C/W	195°C/W
$\theta_{JC}$ (Junction to Case)	N/A	N/A	25°C/W	N/A

**Note 2:** For supply voltages less than  $\pm 15V$ , the absolute maximum input voltage is equal to the supply voltage.

**Note 3:** Unless otherwise specified, these specifications apply for  $V_S = \pm 15V$ ,  $-55^\circ\text{C} \leq T_A \leq +125^\circ\text{C}$  (LM741/LM741A). For the LM741C/LM741E, these specifications are limited to  $0^\circ\text{C} \leq T_A \leq +70^\circ\text{C}$ .

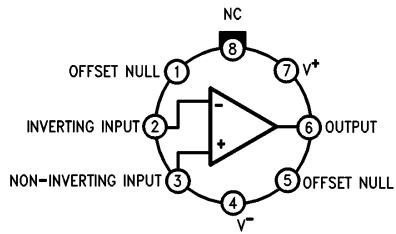
**Note 4:** Calculated value from: BW (MHz) = 0.35/Rise Time( $\mu\text{s}$ ).

**Note 5:** For military specifications see RETS741X for LM741 and RETS741AX for LM741A.

**Note 6:** Human body model, 1.5 k $\Omega$  in series with 100 pF.

## Connection Diagrams

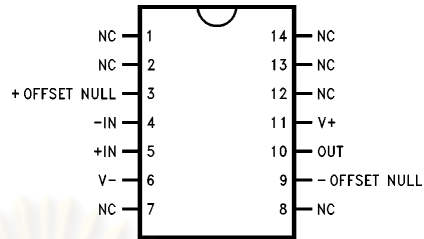
**Metal Can Package**



TL/H/9341-2

**Order Number LM741H, LM741H/883\*,  
LM741AH/883 or LM741CH  
See NS Package Number H08C**

**Ceramic Dual-In-Line Package**

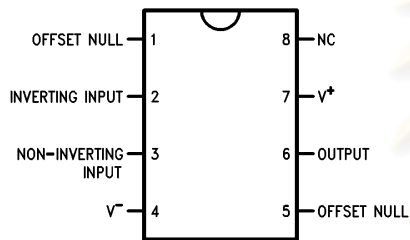


TL/H/9341-5

**Order Number LM741J-14/883\*, LM741AJ-14/883\*\*  
See NS Package Number J14A**

\*also available per JM38510/10101  
\*\*also available per JM38510/10102

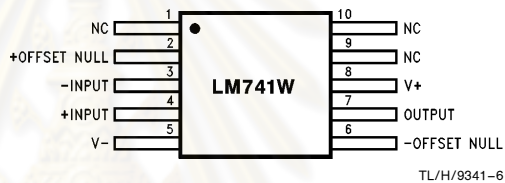
**Dual-In-Line or S.O. Package**



TL/H/9341-3

**Order Number LM741J, LM741J/883,  
LM741CM, LM741CN or LM741EN  
See NS Package Number J08A, M08A or N08E**

**Ceramic Flatpak**

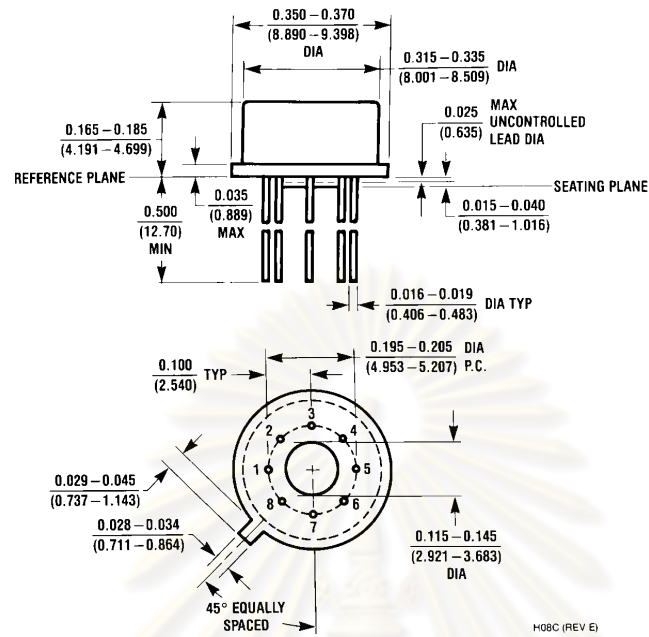


TL/H/9341-6

**Order Number LM741W/883  
See NS Package Number W10A**

\*LM741H is available per JM38510/10101

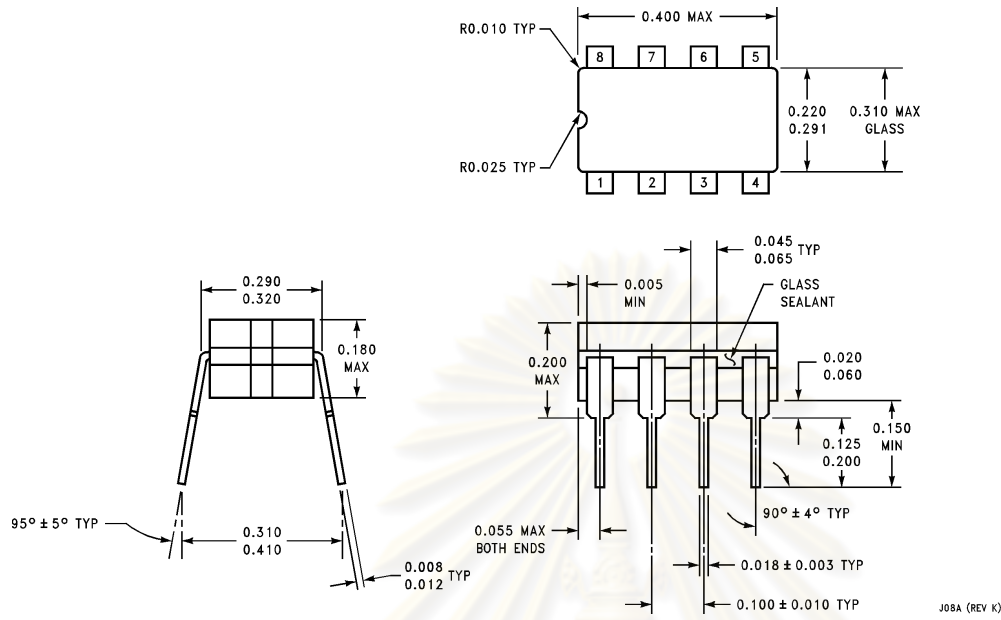
**Physical Dimensions** inches (millimeters)



**Metal Can Package (H)**  
**Order Number LM741H, LM741H/883, LM741AH/883, LM741CH or LM741EH**  
**NS Package Number H08C**

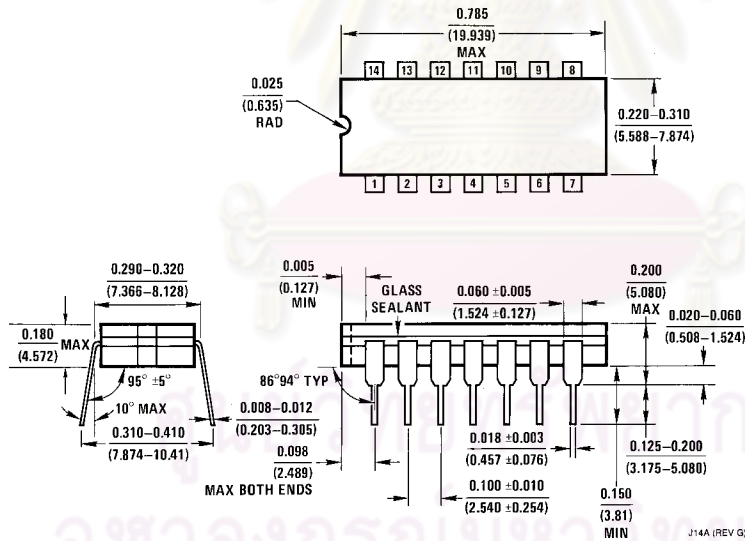
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**Physical Dimensions** inches (millimeters) (Continued)



**Ceramic Dual-In-Line Package (J)**  
**Order Number LM741CJ or LM741J/883**  
**NS Package Number J08A**

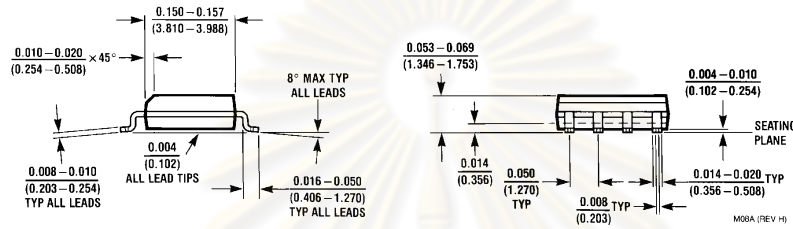
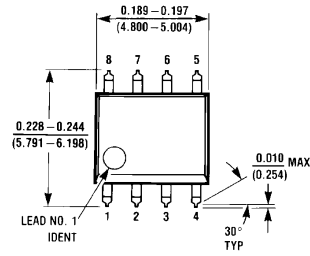
J08A (REV K)



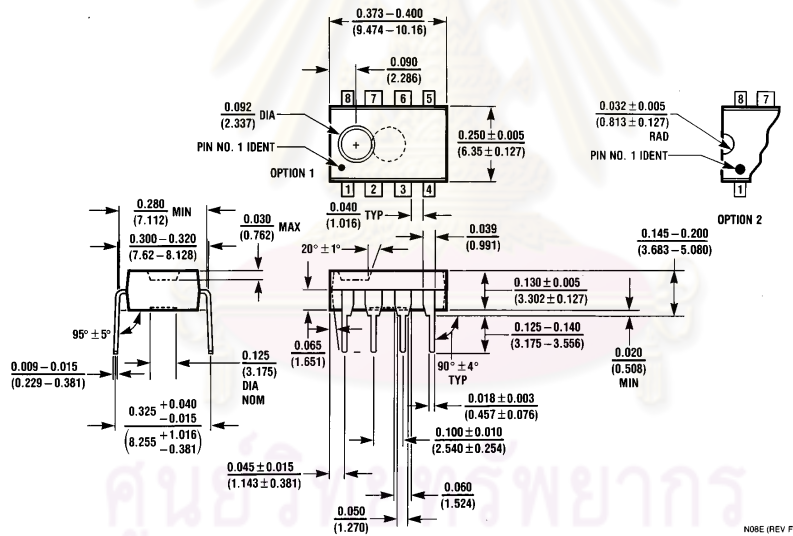
**Ceramic Dual-In-Line Package (J)**  
**Order Number LM741J-14/883 or LM741AJ-14/883**  
**NS Package Number J14A**

J14A (REV G)

**Physical Dimensions** inches (millimeters) (Continued)

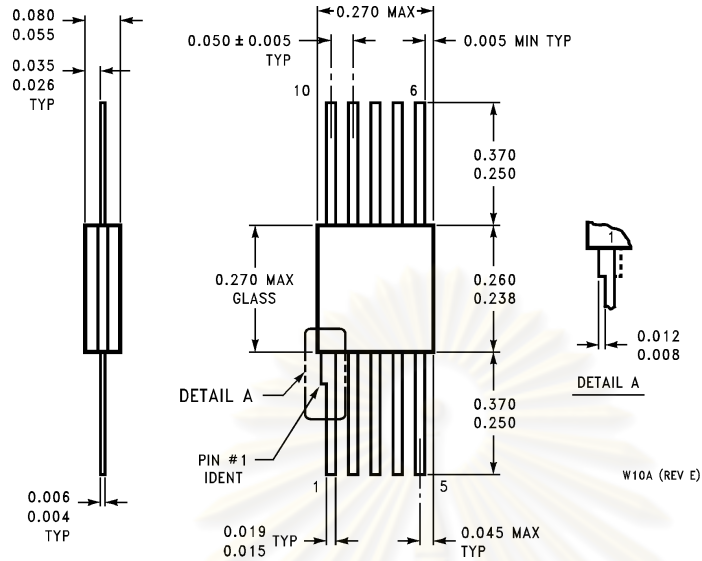


**Small Outline Package (M)**  
**Order Number LM741CM**  
**NS Package Number M08A**



**Dual-In-Line Package (N)**  
**Order Number LM741CN or LM741EN**  
**NS Package Number N08E**



**Physical Dimensions** inches (millimeters) (Continued)

**10-Lead Ceramic Flatpak (W)**  
**Order Number LM741W/883**  
**NS Package Number W10A**

**LIFE SUPPORT POLICY**

NATIONAL'S PRODUCTS ARE NOT AUTHORIZED FOR USE AS CRITICAL COMPONENTS IN LIFE SUPPORT DEVICES OR SYSTEMS WITHOUT THE EXPRESS WRITTEN APPROVAL OF THE PRESIDENT OF NATIONAL SEMICONDUCTOR CORPORATION. As used herein:

- Life support devices or systems are devices or systems which, (a) are intended for surgical implant into the body, or (b) support or sustain life, and whose failure to perform, when properly used in accordance with instructions for use provided in the labeling, can be reasonably expected to result in a significant injury to the user.
- A critical component is any component of a life support device or system whose failure to perform can be reasonably expected to cause the failure of the life support device or system, or to affect its safety or effectiveness.



**National Semiconductor Corporation**  
 1111 West Bardin Road  
 Arlington, TX 76017  
 Tel: 1(800) 272-9959  
 Fax: 1(800) 737-7018

**National Semiconductor Europe**  
 Fax: (+49) 0-180-530 85 86  
 Email: cnjwge@tevm2.nsc.com  
 Deutsch Tel: (+49) 0-180-530 85 85  
 English Tel: (+49) 0-180-532 78 32  
 Français Tel: (+49) 0-180-532 93 58  
 Italiano Tel: (+49) 0-180-534 16 80

**National Semiconductor Hong Kong Ltd.**  
 19th Floor, Straight Block,  
 Ocean Centre, 5 Canton Rd.  
 Tsimshatsui, Kowloon  
 Hong Kong  
 Tel: (852) 2737-1600  
 Fax: (852) 2736-9960

**National Semiconductor Japan Ltd.**  
 Tel: 81-043-299-2309  
 Fax: 81-043-299-2408

This datasheet has been download from:

[www.datasheetcatalog.com](http://www.datasheetcatalog.com)

Datasheets for electronics components.



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



### DESCRIPTION

SRC Device's epoxy molded DIP 14 Series offers a variety of contacts and schematics to meet the needs of a wide range of applications. It features the MVS2/MVS7 models designed for high reliability. The MSS2/7 DIPs are 1-Form-A relays equipped with the MYAD® all-position mounting switch. With switching up to 50 Watts and a 4000V isolation option, the DIP 14 Series is a relay package that allows for automatic insertion directly on PCBs as well as insertion into standard 14 Pin DIP sockets.

### FEATURES

- All position mercury contacts on some models
- Stable contact resistance over life
- 4000 Vac input-output isolation
- Bounce free operation
- High insulation resistance
- Switching speed of 300Hz
- Long life > 1 billion operations
- Epoxy molded for automatic board processing
- FCC68 compatible (MSS2 & MSS7)

### APPLICATIONS

- Automatic test equipment
- Process control
- Industrial
- Telecom
- Datacom
- High-end security systems
- Signaling
- Metering

### APPROVALS

- UL approval (DSS7 & PRMA)
- EN 60950 certified (MVS7, DSS7 & MSS7)
- CSA approval (PRMA)

### RATINGS (@ 25° C)

Parameter	Min	Typ	Max	Unit
Switching Voltage				
PRMA/PRME/DSS7			200	Volts
PRMA Form C			100	Volts
MSS2/MSS7			500	Volts
MVS2/MVS7			1000	Volts
Switching Current				
PRMA/PRME/DSS7			0.5	Amps
PRMA Form C			0.25	Amps
MSS2/MSS7/MVS2/MVS7			2	Amps
Carry Current				
PRMA/PRME/DSS7			2	Amps
PRMA Form C			0.4	Amps
MSS2/MSS7			3	Amps
MVS2/MVS7			3	Amps
Switching Frequency				
PRMA/PRME/DSS7			500	Hz
PRMA Form C			50	Hz
MSS2/MSS7/MVS2/MVS7			200	Hz
Contact Resistance				
PRMA/PRME/DSS7			150	mΩ
PRMA Form C			200	mΩ
MSS2/MSS7/MVS2/MVS7			100	mΩ

(See detailed specifications for more information.)

## DIP 14 SERIES REED RELAYS

MSS2 ■ MSS7 ■ PRMA ■ DSS7 ■ PRME ■ MVS2 ■ MVS7



### SPECIFICATIONS

All parameters are at 25°C unless otherwise stated.  
Operate voltage, release voltage, and coil resistance will change  
approximately 0.4%/°C as ambient temperature varies.

**MSS2**  
Molded 8 Pin  
All position  
Wetted contacts

**MSS7**  
Molded 4 Pin  
All position  
Wetted contacts

PARAMETER	CONDITIONS	SYMBOL	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	UNITS
<b>Contact Ratings</b>									
Switching Voltage	Max DC/PeakAC Resistive	VL	-	-	500	-	-	500	Volts
Switching Current	Max DC/PeakAC Resistive	IL	-	-	2	-	-	2	Amps
Carry Current	Max DC/PeakAC Resistive	Ic	-	-	3	-	-	3	Amps
Contact Rating	Max DC/PeakAC Resistive		-	-	50	-	-	50	Watts
Life Expectancy	Signal Level 1.0 V 10mA Related Loads <sup>(1)</sup>		-	200	-	-	200	-	x10 <sup>6</sup> Ops
Static Contact Resistance	50mV, 10mA	CR	-	40	100	-	65	100	mΩ
Dynamic Contact Resistance	.5V, 50mA at 100Hz, 1.5 msec	DCR	-	N/A	-	-	N/A	-	mΩ
Contact Material			-	Hg	-	-	Hg	-	
Hg Content			-	16	-	-	16	-	mgrams
<b>Relay Specifications</b>									
Insulation Resistance	Between all isolated pins at 100V, 25°C, 40% RH	IR	10 <sup>8</sup>	10 <sup>10</sup>	-	10 <sup>8</sup>	10 <sup>10</sup>	-	Ω
Capacitance	Across Open Contacts		-	1.5	2	-	1.2	2	pF
	Open Contact to Coil		-	3	4	-	3	4	pF
Dielectric Strength	Between Contacts		1400	-	-	2000	-	-	VDC/Peak AC
	Contacts to Coil	I/O	1400	-	-	5600	-	-	VDC/Peak AC
Operate Time, including bounce	At Nominal Coil Voltage 10Hz Square Wave	TOP	-	1.2	1.75	-	1.2	1.75	ms
Release Time	Zener-Diode Suppression	TREL	-	1	1.50	-	1	1.50	ms
<b>Environmental Ratings</b>									
Storage Temperature		TA	-40	-	+105	-40	-	+105	°C
Operating Temperature		To	-38	-	+75	-38	-	+75	°C
Soldering Temperature	Applied to pins, 5 sec. max.		-	260	-	-	260	-	°C
Vibration Resistance (Survival)	10Hz - 500Hz	G	-	-	10	-	-	10	Gs
Shock Resistance (Survival)	11±1ms, 1/2 Sine Wave	S	-	-	30	-	-	30	Gs
Weight			-	2.3	-	-	2.3	-	grams

(1) Refer to life graphs

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## SPECIFICATIONS

All parameters are at 25°C unless otherwise stated.  
Operate voltage, release voltage, and coil resistance will change approximately 0.4%/°C as ambient temperature varies.

**PRMA**  
Molded 8 Pin  
Form-C  
Dry Reed

**PRMA**  
Molded 8 Pin  
Form-A&B  
Dry Reed

PARAMETER	CONDITIONS	SYMBOL	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	UNITS
<b>Contact Ratings</b>									
Switching Voltage	Max DC/PeakAC Resistive	VL	-	-	100	-	-	200	Volts
Switching Current	Max DC/PeakAC Resistive	IL	-	-	0.25	-	-	0.5	Amps
Carry Current	Max DC/PeakAC Resistive	Ic	-	-	0.4	-	-	2	Amps
Contact Rating	Max DC/PeakAC Resistive	-	-	-	3	-	-	10	Watts
Life Expectancy	Signal Level 1.0V 10mA Related Loads <sup>(1)</sup>	-	-	20	-	300	500	-	x10 <sup>6</sup> Ops
Static Contact Resistance	50mV, 10mA	CR	-	-	200	-	-	150	mΩ
Dynamic Contact Resistance	.5V, 50mA at 100Hz, 1.5 msec	DCR	-	N/A	-	-	N/A	-	mΩ
Contact Material		-	-	Rh	-	-	Ru	-	
<b>Relay Specifications</b>									
Insulation Resistance	Between all isolated pins at 100V, 25°C, 40% RH	IR	10 <sup>9</sup>	10 <sup>10</sup>	-	10 <sup>10</sup>	10 <sup>12</sup>	-	Ω
Capacitance	Across Open Contacts	-	-	2.5	3	-	0.7	1	pF
Dielectric Strength	Open Contact to Coil	-	-	3	3	-	1.5	2	pF
	Between Contacts	-	250	-	-	250	-	-	VDC/Peak AC
Operate Time, including bounce	Contacts to Coil	I/O	1400	-	-	1400	-	-	VDC/Peak AC
	At Nominal Coil Voltage 10Hz Square Wave	TOP	-	1.5	2	-	.25	0.5	ms
Release Time	Zener-Diode Suppression	TREL	-	1.5	3	-	.25	0.5	ms
<b>Environmental Ratings</b>									
Storage Temperature		TA	-40	-	+105	-40	-	+105	°C
Operating Temperature		To	-40	-	+80	-40	-	+80	°C
Soldering Temperature	Applied to pins, 5 sec. max.	-	-	260	-	-	-	260	°C
Vibration Resistance <sup>(2)</sup> (Survival)	10 Hz - 500 Hz for PRMA Form A&B 5Hz - 500Hz for PRMA Form C	G	-	-	10	-	-	20	Gs
Shock Resistance (Survival)	11±1ms, 1/2 Sine Wave	S	-	-	50	-	-	100	Gs
Weight		-	-	1.5	-	-	1.5	-	grams

<sup>(1)</sup> Refer to life graphs

<sup>(2)</sup> Use caution not to exceed vibration resistance limits while ultrasonically cleaning relays with DYAD switches. Contact SRC Devices Engineering for more details/recommendations.

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## DIP 14 SERIES REED RELAYS

MSS2 ■ MSS7 ■ PRMA ■ DSS7 ■ PRME ■ MVS2 ■ MVS7



### SPECIFICATIONS

All parameters are at 25°C unless otherwise stated.  
Operate voltage, release voltage, and coil resistance will change approximately 0.4%/°C as ambient temperature varies.

**DSS7**  
Molded 4 Pin  
Dry Reed

**PRME**  
Molded 8 Pin  
Low profile  
Dry Reed

PARAMETER	CONDITIONS	SYMBOL	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	UNITS
<b>Contact Ratings</b>									
Switching Voltage	Max DC/PeakAC Resistive	VL	-	-	200	-	-	200	Volts
Switching Current	Max DC/PeakAC Resistive	IL	-	-	0.5	-	-	0.5	Amps
Carry Current	Max DC/PeakAC Resistive	Ic	-	-	2	-	-	2	Amps
Contact Rating	Max DC/PeakAC Resistive		-	-	10	-	-	10	Watts
Life Expectancy	Signal Level 1.0 V 10mA Related Loads <sup>(1)</sup>		300	500	-	300	500	-	x10 <sup>6</sup> Ops
Static Contact Resistance	50mV, 10mA	CR	-	-	150	-	-	150	mΩ
Dynamic Contact Resistance	.5V, 50mA at 100Hz, 1.5 msec	DCR	-	N/A	-	-	N/A	-	mΩ
Contact Material			-	Ru	-	-	Ru	-	
<b>Relay Specifications</b>									
Insulation Resistance	Between all isolated pins at 100V, 25°C, 40% RH	IR	10 <sup>10</sup>	10 <sup>12</sup>	-	10 <sup>10</sup>	10 <sup>12</sup>	-	Ω
Capacitance	Across Open Contacts		-	0.7	1	-	0.8	1	pF
Dielectric Strength	Open Contact to Coil		-	1.5	2	-	1.5	2	pF
	Between Contacts		250	-	-	250	-	-	VDC/Peak AC
Operate Time, including bounce	Contacts to Coil	I/O	5600	-	-	1000	-	-	VDC/Peak AC
	At Nominal Coil Voltage	T <sub>OP</sub>	-	0.25	0.5	-	0.25	1	ms
Release Time	10Hz Square Wave Zener-Diode Suppression	T <sub>REL</sub>	-	0.25	0.5	-	0.25	0.5	ms
<b>Environmental Ratings</b>									
Storage Temperature		T <sub>A</sub>	-40	-	+105	-40	-	+105	°C
Operating Temperature		T <sub>O</sub>	-40	-	+80	-40	-	+80	°C
Soldering Temperature	Applied to pins, 5 sec. max.		-	-	260	-	-	260	°C
Vibration Resistance <sup>(2)</sup> (Survival)	5Hz - 500Hz	G	-	-	20	-	-	20	Gs
Shock Resistance (Survival)	11±1ms, 1/2 Sine Wave	S	-	-	100	-	-	100	Gs
Weight			-	1.5	-	-	1.5	-	grams

(1) Refer to life graphs

(2) Use caution not to exceed vibration resistance limits while ultrasonically cleaning relays with DYAD switches. Contact SRC Devices Engineering for more details/recommendations.

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## SPECIFICATIONS

All parameters are at 25°C unless otherwise stated.  
Operate voltage, release voltage, and coil resistance will change  
approximately 0.4%/°C as ambient temperature varies.

PARAMETER	CONDITIONS	SYMBOL	MVS2 8 Pin DIP Wetted Contacts <sup>(3)</sup>			MVS7 4 Pin DIP Wetted Contacts <sup>(3)</sup>			UNITS
			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
<b>Contact Ratings</b>									
Switching Voltage	Max DC/PeakAC Resistive	VL	-	-	1000 <sup>(1)</sup>	-	-	1000 <sup>(1)</sup>	Volts
Switching Current	Max DC/PeakAC Resistive	IL	-	-	2	-	-	2	Amps
Carry Current	Max DC/PeakAC Resistive	Ic	-	-	3	-	-	3	Amps
Contact Rating	Max DC/PeakAC Resistive		-	-	50	-	-	50	Watts
Life Expectancy	Signal Level 1.0 V 10mA		1000	-	-	1000	-	-	x10 <sup>6</sup> Ops
	50V, 1A		-	2	-	-	2	-	x10 <sup>6</sup> Ops
	500V, 100mA Related Loads <sup>(2)</sup>		-	50	-	-	50	-	x10 <sup>6</sup> Ops
Static Contact Resistance	50mV, 10mA	CR	-	-	100	-	-	100	mΩ
Contact Material			-	Hg	-	-	Hg	-	
Hg Content			-	40	-	-	40	-	mgrams
<b>Relay Specifications</b>									
Insulation Resistance	Between all isolated pins at 100V, 25°C, 40% RH	IR	10 <sup>10</sup>	10 <sup>12</sup>	-	10 <sup>10</sup>	10 <sup>12</sup>	-	Ω
Capacitance	Across Open Contacts		-	0.7	-	-	0.7	-	pF
	Upper Contact to Coil		-	1.2	-	-	1.5	-	pF
	Closed Contact to Coil		-	3.2	-	-	2.5	-	pF
Dielectric Strength	Open Contacts		1400	-	-	2000	-	-	VDC/Peak AC
	Contacts to Coil	I/O	1400	-	-	5600	-	-	VDC/Peak AC
Operate Time	At Nominal Coil Voltage 10Hz Square Wave	T <sub>OP</sub>	-	1.5	2.5	-	1.5	2.5	ms
Release Time	Zener-Diode Suppression	T <sub>REL</sub>	-	1	2.5	-	1	2.5	ms
<b>Environmental Ratings</b>									
Storage Temperature		T <sub>A</sub>	-40	-	+105	-40	-	+105	°C
Operating Temperature		T <sub>O</sub>	-	-	+260	-	-	+260	°C
Soldering Temperature	Applied to pins, 5 sec. max.		-38	-	+85	-38	-	+85	°C
Vibration Resistance <sup>(2)</sup> (Survival)	10Hz - 500Hz	G	-	-	10	-	-	10	Gs
Shock Resistance (Survival)	11±1ms, 1/2 Sine Wave	S	-	-	30	-	-	30	Gs
Weight			-	2.1	-	-	2.1	-	grams

<sup>(1)</sup> Current limited up to 5mA, minimum 20 million operations; for further information, consult factory

<sup>(2)</sup> Refer to life graphs

<sup>(3)</sup> Relay contains mercury wetted contacts and must be mounted vertically. Pin 1 is up.

## DIP 14 SERIES REED RELAYS

MSS2 ■ MSS7 ■ PRMA ■ DSS7 ■ PRME ■ MVS2 ■ MVS7

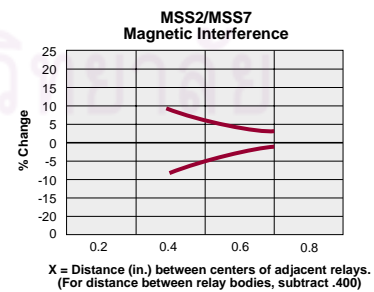
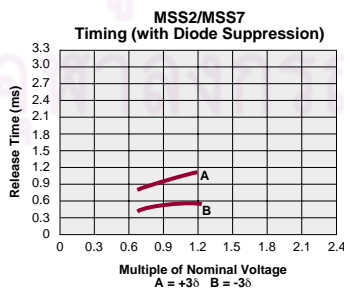
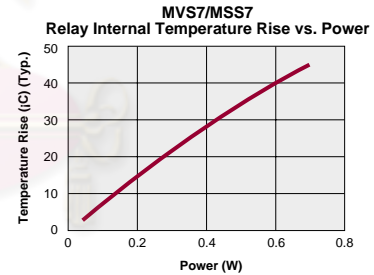
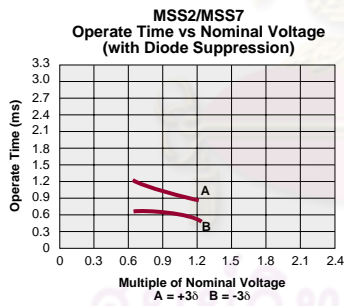
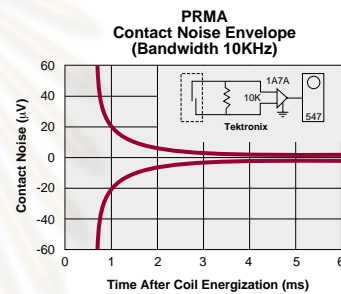
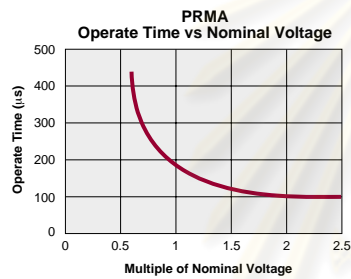
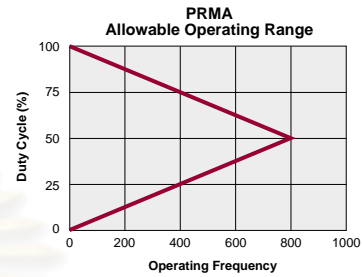
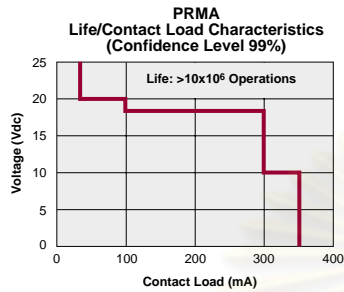


## COIL SPECIFICATIONS

Units	Contact Form	Coil Voltage			Coil Resistance			Operate Voltage			Release Voltage			Nominal Input Power		
		Volts			Ω			Volts			Volt			mW		
Conditions					+/- 10% (25°C)			Must operate by (25°C)			Must release by (25°C)					
Part #		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max
MSS2 1A05	1-Form-A		5	11	126	140	154			3.75	0.5					179
MSS2 1A12	1-Form-A		12	21	450	500	550			9	1					288
MSS2 1A24	1-Form-A		24	44	1935	2150	2365			18	2					268
MSS7 1A05	1-Form-A		5	11	126	140	154			3.75	0.5					179
MSS7 1A12	1-Form-A		12	21	450	500	550			9	1					288
MSS7 1A24	1-Form-A		24	43	1935	2150	2365			18	2					268
PRMA 1A05	1-Form-A		5	21	450	500	550			3.75	0.8					50
PRMA 1A12	1-Form-A		12	30	900	1000	1100			9	1					144
PRMA 1A24	1-Form-A		24	44	1935	2150	2365			18	2					268
PRMA 1B05	1-Form-B		5	6	450	500	550			3.75	0.8					50
PRMA 1B12	1-Form-B		12	14.5	900	1000	1100			9	1					144
PRMA 1B24	1-Form-B		24	29	1935	2150	2365			18	2					268
PRMA 1C05	1-Form-C		5	12	180	200	220			3.75	0.8					125
PRMA 1C12	1-Form-C		12	18	450	500	550			9	1					288
PRMA 1C24	1-Form-C		24	32	1935	2150	2365			18	2					268
PRMA 2A05	2-Form-A		5	11	126	140	154			3.75	0.8					179
PRMA 2A12	2-Form-A		12	21	450	500	550			9	1					288
PRMA 2A24	2-Form-A		24	44	1935	2150	2365			18	2					268
PRMA 10037	1-Form-A		5	15	342	380	418			3.75	0.8					66
PRMA 10038	1-Form-A		12	19	477	530	583			9	1					272
PRMA 10039	1-Form-A		24	32	1800	2000	2200			18	2					288
DSS7 1A05	1-Form-A		5	21	450	500	550			3.75	0.8					50
DSS7 1A12	1-Form-A		12	30	900	1000	1100			9	1					144
DSS7 1A24	1-Form-A		24	44	1935	2150	2365			18	2					268
PRME 25005	1-Form-A		5	19	450	500	550			3.8	0.8					50
PRME 15005	1-Form-A		5	15	342	380	418			3.5	1					66
PRME 15002	1-Form-A		12	19	477	530	583			8	1					272
PRME 15003	1-Form-A		24	32	1800	2000	2200			16	2					288
MVS2 1A05(A,B)	1-Form-A		5	7	94.5	105	116			3.75	0.5					238
MVS2 1A12(A,B)	1-Form-A		12	15	450	500	550			9	1					288
MVS2 1A24(A,B)	1-Form-A		24	30	1935	2150	2365			18	2					268
MVS7 1A05(S)	1-Form-A		5	7	94.5	105	116			3.75	0.5					238
MVS7 1A12(S)	1-Form-A		12	15	450	500	550			9	1					288
MVS7 1A24(S)	1-Form-A		24	30	1935	2150	2365			18	2					268



PERFORMANCE GRAPHS



# DIP 14 SERIES REED RELAYS

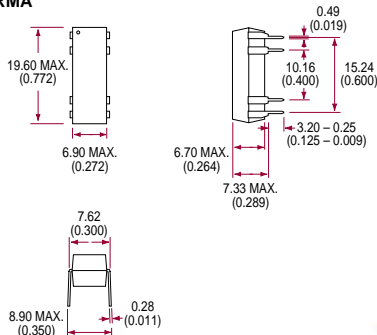
MSS2 ■ MSS7 ■ PRMA ■ DSS7 ■ PRME ■ MVS2 ■ MVS7



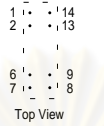
**DIMENSIONS**  
mm  
(inches)

## MECHANICAL DIMENSIONS

### PRMA

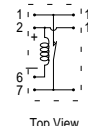


### PRMA 1A



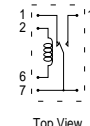
Options:  
Diode - pin #2 is positive  
Electrostatic shield - pin 9

### PRMA 1B



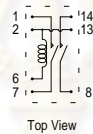
Options:  
Diode - pin #2 is positive  
Electrostatic shield - pin 9

### PRMA 1C



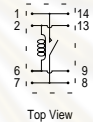
Options:  
Diode - pin #2 is positive  
Electrostatic shield - pin 9

### PRMA 2A



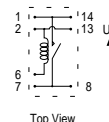
Options:  
Diode - pin #2 is positive  
Electrostatic shield - pin 9

### PRMA 10037/10038/10039



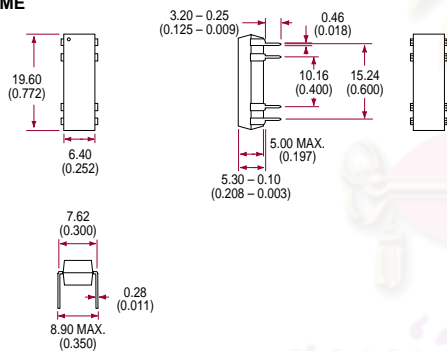
Options:  
Diode - pin #2 is positive  
Electrostatic shield - pin 9

### MVS2/MSS2

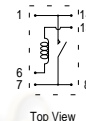


\* MVS2 only must be mounted vertically with pin #1 UP.

### PRME

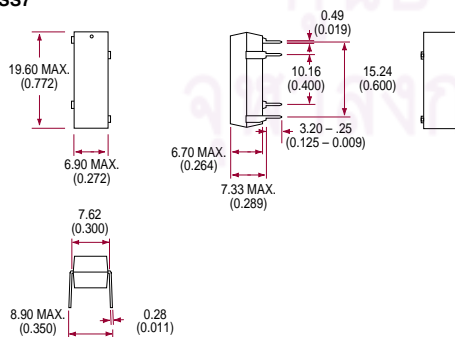


### PRME

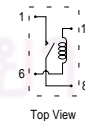


Options:  
Diode - pin #13 is positive  
Electrostatic shield - pin 9

### DSS7



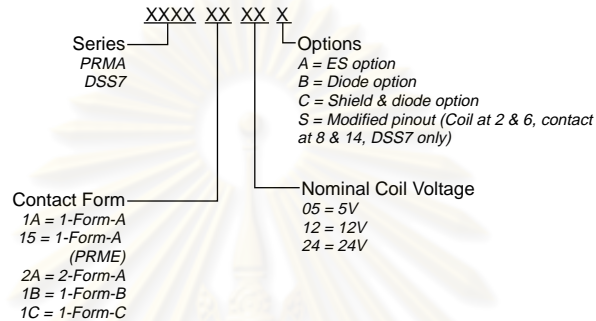
### DSS7



MVS must be mounted vertically. Pin #1 is up.

## ORDERING INFORMATION

A complete part number is represented by the digits below. For example, the PRMA1A05 is a model 2 PRMA relay with a 1-Form A contact form, a nominal voltage of 5V and no extra options.

Ordering Information  
Special Schematics

PRME 25005  
PRME 15005  
PRME 15002  
PRME 15003

PRMA 10037  
PRMA 10038  
PRMA 10039

*These represent full part numbers.*

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ULN2001A-ULN2002A ULN2003A-ULN2004A

### SEVEN DARLINGTON ARRAYS

- SEVEN DARLINGTONS PER PACKAGE
- OUTPUT CURRENT 500mA PER DRIVER (600mA PEAK)
- OUTPUT VOLTAGE 50V
- INTEGRATED SUPPRESSION DIODES FOR INDUCTIVE LOADS
- OUTPUTS CAN BE PARALLELED FOR HIGHER CURRENT
- TTL/CMOS/PMOS/DTL COMPATIBLE INPUTS
- INPUTS PINNED OPPOSITE OUTPUTS TO SIMPLIFY LAYOUT

#### DESCRIPTION

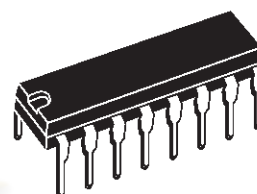
The ULN2001A, ULN2002A, ULN2003 and ULN2004A are high voltage, high current darlington arrays each containing seven open collector darlington pairs with common emitters. Each channel rated at 500mA and can withstand peak currents of 600mA. Suppression diodes are included for inductive load driving and the inputs are pinned opposite the outputs to simplify board layout.

The four versions interface to all common logic families :

ULN2001A	General Purpose, DTL, TTL, PMOS, CMOS
ULN2002A	14-25V PMOS
ULN2003A	5V TTL, CMOS
ULN2004A	6-15V CMOS, PMOS

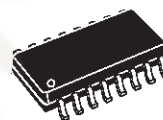
These versatile devices are useful for driving a wide range of loads including solenoids, relays DC motors, LED displays filament lamps, thermal print-heads and high power buffers.

The ULN2001A/2002A/2003A and 2004A are supplied in 16 pin plastic DIP packages with a copper leadframe to reduce thermal resistance. They are available also in small outline package (SO-16) as ULN2001D/2002D/2003D/2004D.



DIP16

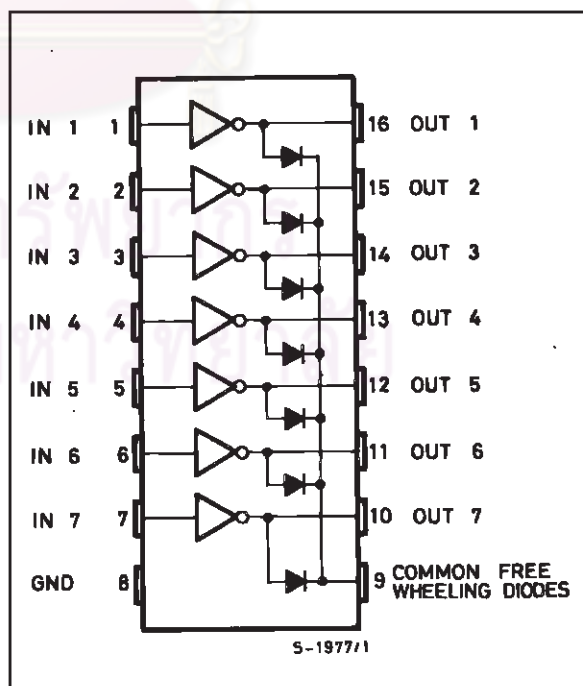
ORDERING NUMBERS: ULN2001A/2A/3A/4A



SO16

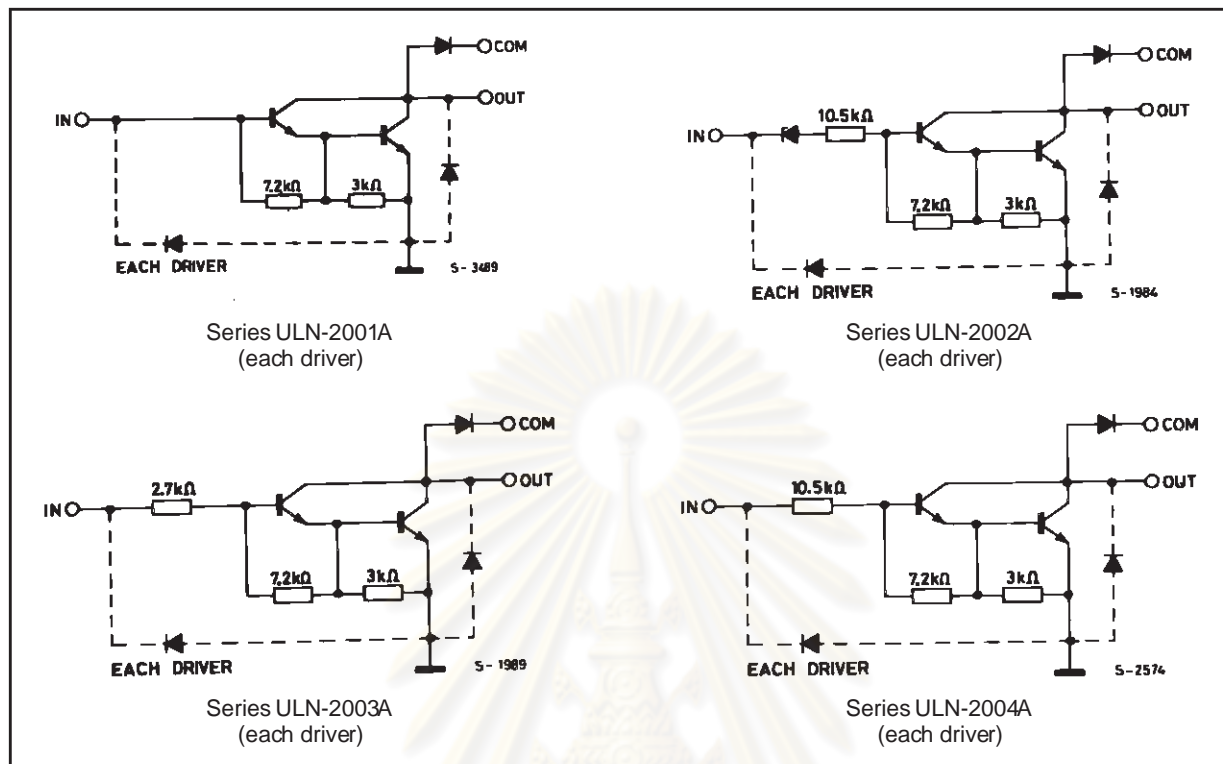
ORDERING NUMBERS: ULN2001D/2D/3D/4D

#### PIN CONNECTION



## ULN2001A - ULN2002A - ULN2003A - ULN2004A

### SCHEMATIC DIAGRAM



### ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Symbol	Parameter	Value	Unit
$V_o$	Output Voltage	50	V
$V_{in}$	Input Voltage (for ULN2002A/D - 2003A/D - 2004A/D)	30	V
$I_c$	Continuous Collector Current	500	mA
$I_b$	Continuous Base Current	25	mA
$T_{amb}$	Operating Ambient Temperature Range	- 20 to 85	°C
$T_{stg}$	Storage Temperature Range	- 55 to 150	°C
$T_j$	Junction Temperature	150	°C

### THERMAL DATA

Symbol	Parameter	DIP16	SO16	Unit
$R_{th\ j-amb}$	Thermal Resistance Junction-ambient	70	100	°C/W

## ULN2001A - ULN2002A - ULN2003A - ULN2004A

### ELECTRICAL CHARACTERISTICS ( $T_{amb} = 25^{\circ}\text{C}$ unless otherwise specified)

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit	Fig.
$I_{CEX}$	Output Leakage Current	$V_{CE} = 50\text{V}$ $T_{amb} = 70^{\circ}\text{C}, V_{CE} = 50\text{V}$			50 100	$\mu\text{A}$ $\mu\text{A}$	1a 1a
		$T_{amb} = 70^{\circ}\text{C}$ for ULN2002A $V_{CE} = 50\text{V}, V_i = 6\text{V}$			500	$\mu\text{A}$	1b
		for ULN2004A $V_{CE} = 50\text{V}, V_i = 1\text{V}$			500	$\mu\text{A}$	1b
$V_{CE(sat)}$	Collector-emitter Saturation Voltage	$I_C = 100\text{mA}, I_B = 250\mu\text{A}$		0.9	1.1	V	2
		$I_C = 200\text{mA}, I_B = 350\mu\text{A}$		1.1	1.3	V	2
		$I_C = 350\text{mA}, I_B = 500\mu\text{A}$		1.3	1.6	V	2
$I_{i(on)}$	Input Current	for ULN2002A, $V_i = 17\text{V}$		0.82	1.25	mA	3
		for ULN2003A, $V_i = 3.85\text{V}$		0.93	1.35	mA	3
		for ULN2004A, $V_i = 5\text{V}$		0.35	0.5	mA	3
		$V_i = 12\text{V}$		1	1.45	mA	3
$I_{i(off)}$	Input Current	$T_{amb} = 70^{\circ}\text{C}, I_C = 500\mu\text{A}$	50	65		$\mu\text{A}$	4
$V_{i(on)}$	Input Voltage	$V_{CE} = 2\text{V}$ for ULN2002A $I_C = 300\text{mA}$			13	V	5
		for ULN2003A $I_C = 200\text{mA}$			2.4		
		$I_C = 250\text{mA}$			2.7		
		$I_C = 300\text{mA}$			3		
		for ULN2004A $I_C = 125\text{mA}$			5		
		$I_C = 200\text{mA}$			6		
		$I_C = 275\text{mA}$			7		
		$I_C = 350\text{mA}$			8		
$h_{FE}$	DC Forward Current Gain	for ULN2001A $V_{CE} = 2\text{V}, I_C = 350\text{mA}$	1000				2
$C_i$	Input Capacitance			15	25	pF	
$t_{PLH}$	Turn-on Delay Time	$0.5 V_i$ to $0.5 V_o$		0.25	1	$\mu\text{s}$	
$t_{PHL}$	Turn-off Delay Time	$0.5 V_i$ to $0.5 V_o$		0.25	1	$\mu\text{s}$	
$I_R$	Clamp Diode Leakage Current	$V_R = 50\text{V}$			50	$\mu\text{A}$	6
		$T_{amb} = 70^{\circ}\text{C}, V_R = 50\text{V}$			100	$\mu\text{A}$	6
$V_F$	Clamp Diode Forward Voltage	$I_F = 350\text{mA}$		1.7	2	V	7

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ULN2001A - ULN2002A - ULN2003A - ULN2004A

TEST CIRCUITS

Figure 1a.

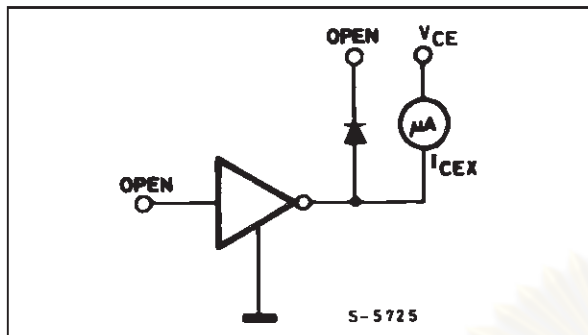


Figure 1b.

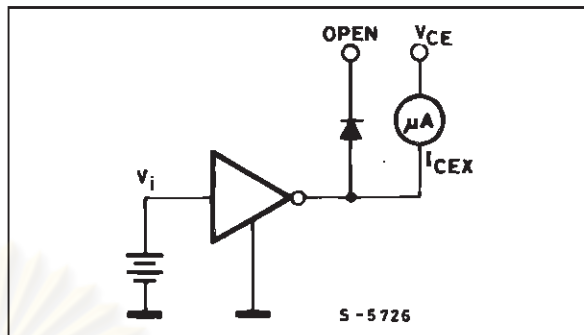


Figure 2.

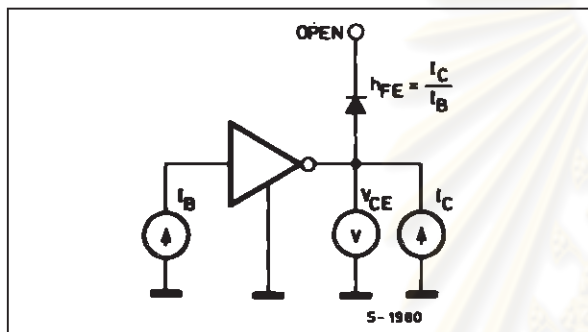


Figure 3.

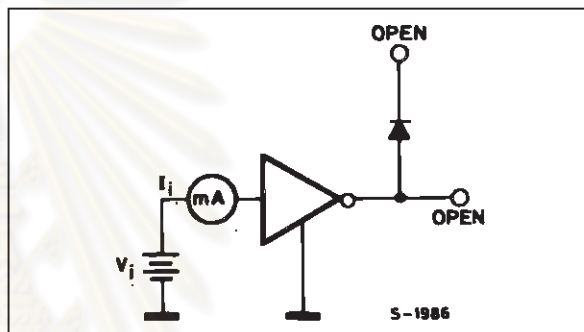


Figure 4.

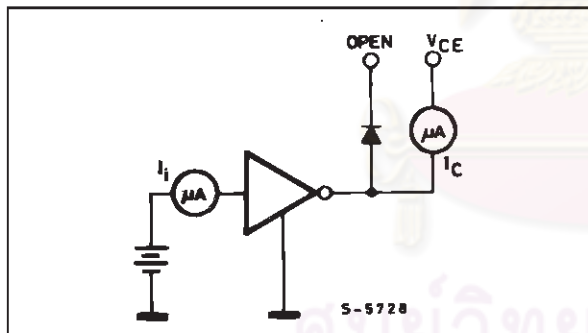


Figure 5.

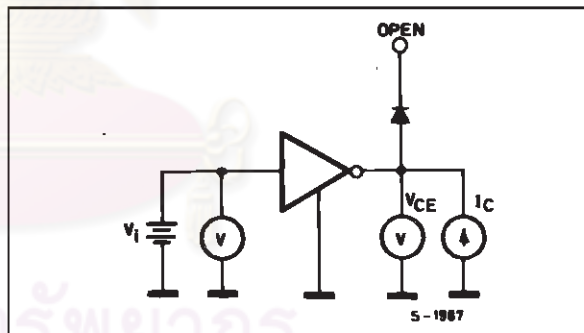


Figure 6.

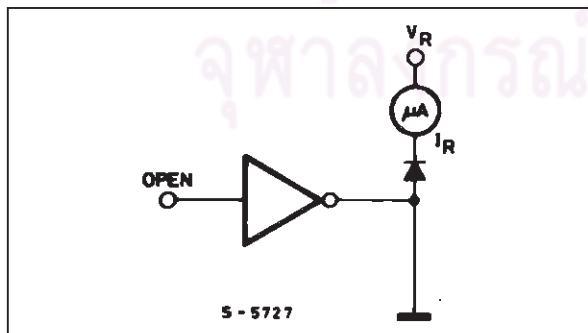
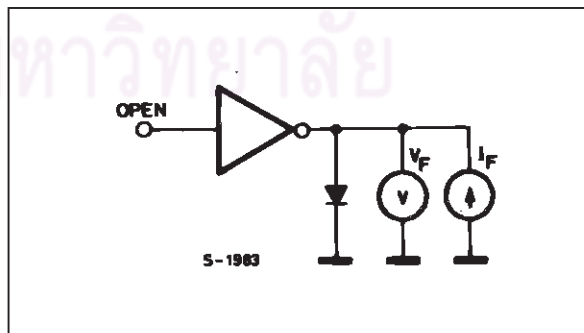


Figure 7.



ULN2001A - ULN2002A - ULN2003A - ULN2004A

Figure 8: Collector Current versus Input Current

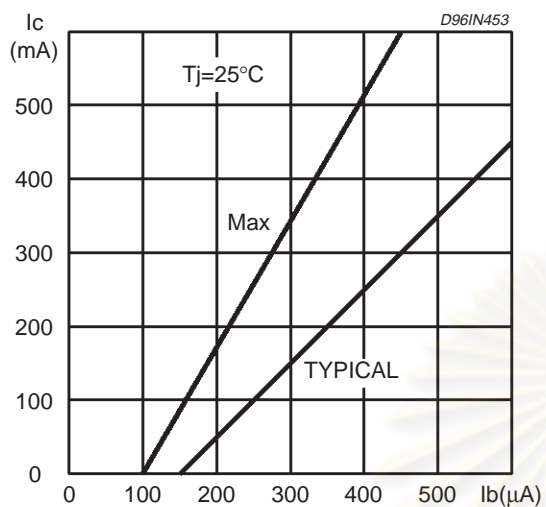


Figure 9: Collector Current versus Saturation Voltage

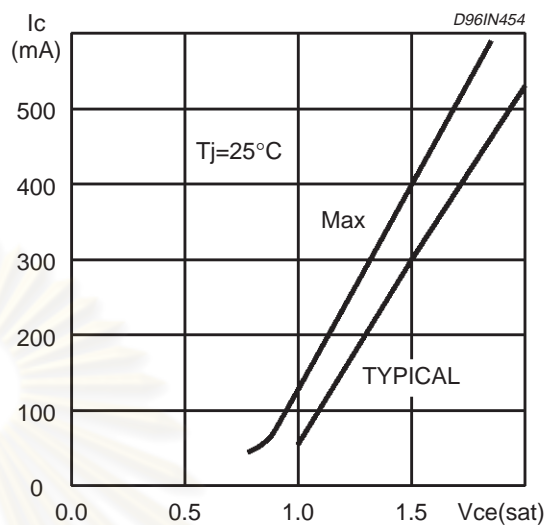


Figure 10: Peak Collector Current versus Duty Cycle

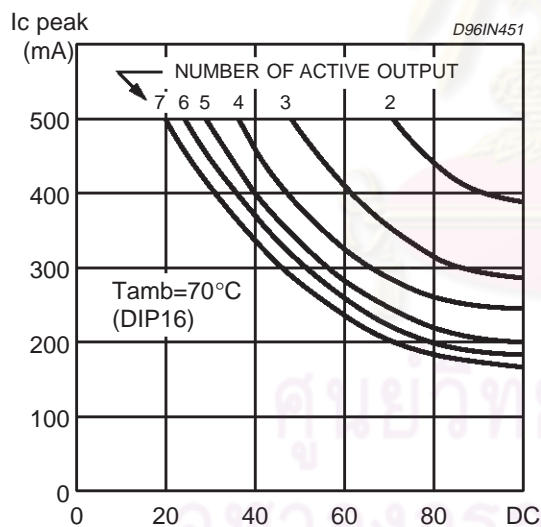
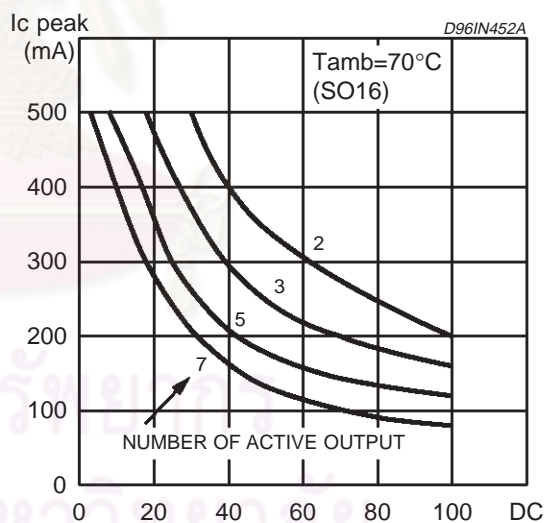


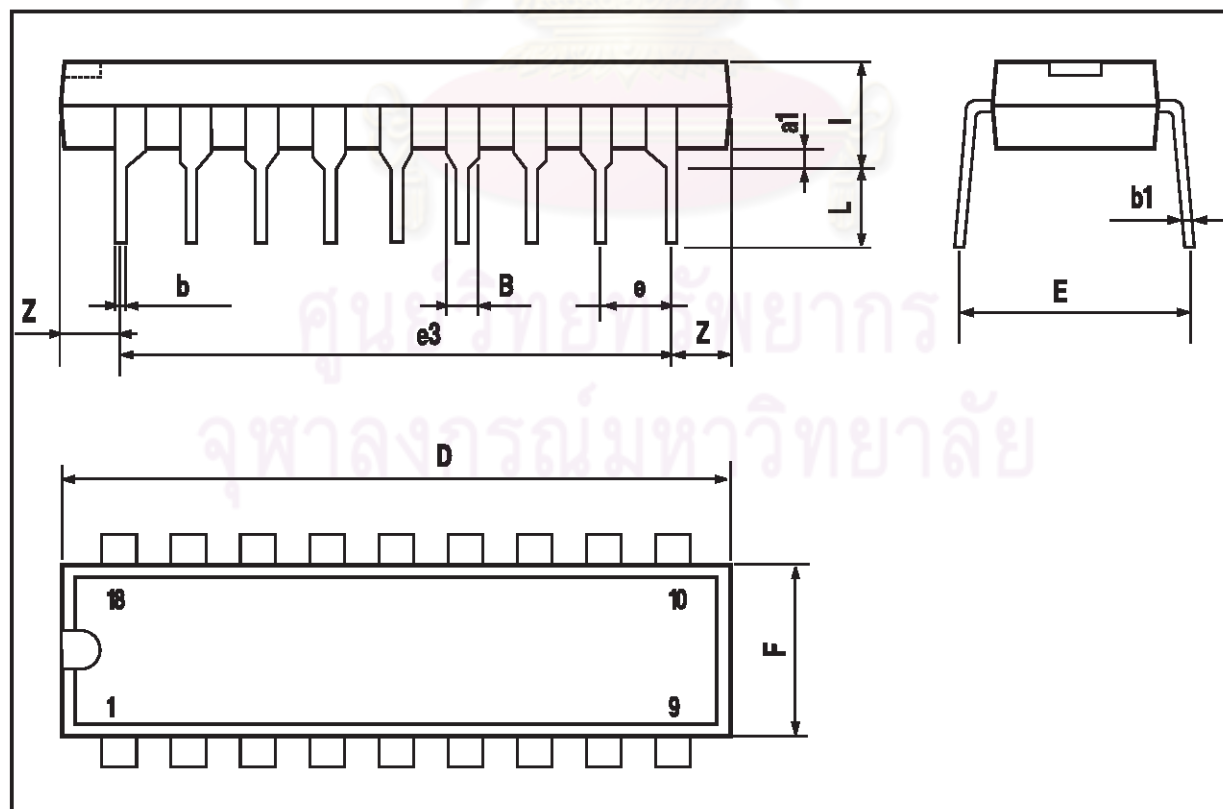
Figure 11: Peak Collector Current versus Duty Cycle





**ULN2001A - ULN2002A - ULN2003A - ULN2004A**
**DIP16 PACKAGE MECHANICAL DATA**

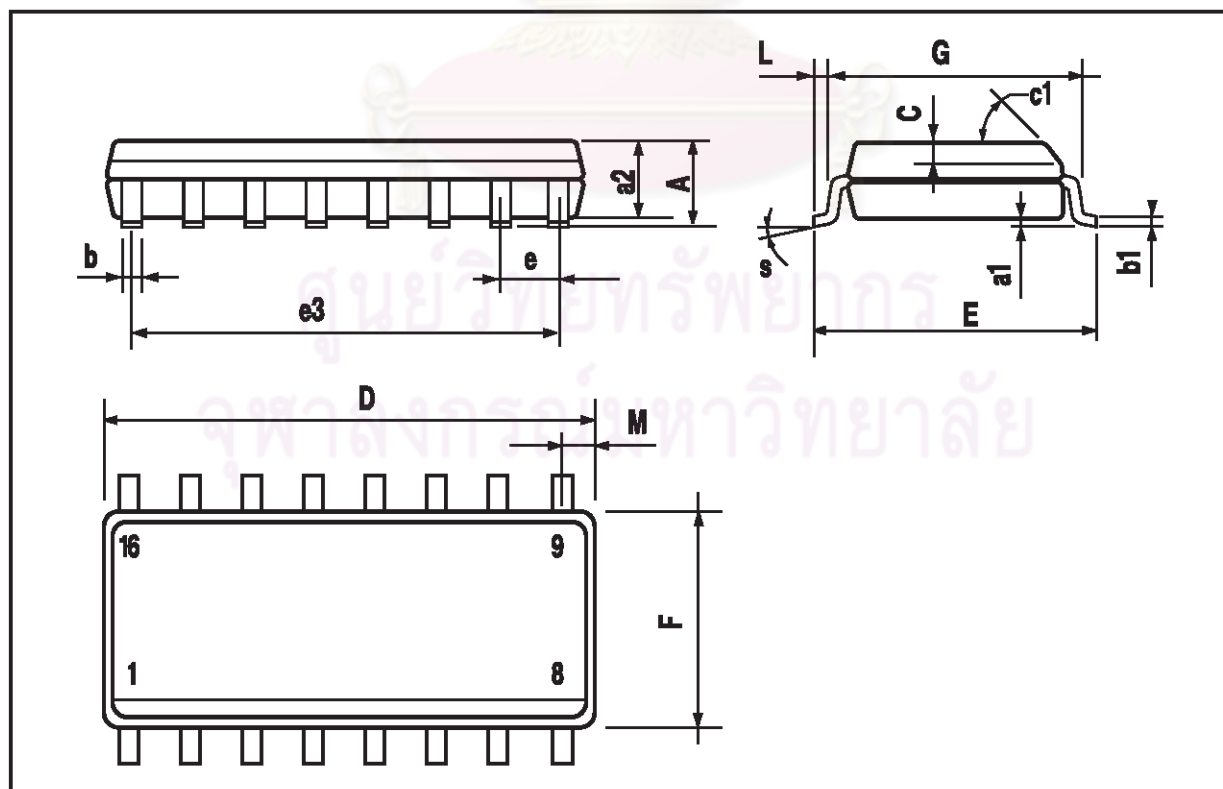
DIM.	mm			inch		
	MIN.	TYP.	MAX.	MIN.	TYP.	MAX.
a1	0.51			0.020		
B	0.77		1.65	0.030		0.065
b		0.5			0.020	
b1		0.25			0.010	
D			20			0.787
E		8.5			0.335	
e		2.54			0.100	
e3		17.78			0.700	
F			7.1			0.280
l			5.1			0.201
L		3.3			0.130	
Z			1.27			0.050



## ULN2001A - ULN2002A - ULN2003A - ULN2004A

## SO16 PACKAGE MECHANICAL DATA

DIM.	mm			inch		
	MIN.	TYP.	MAX.	MIN.	TYP.	MAX.
A			1.75			0.069
a1	0.1		0.25	0.004		0.009
a2			1.6			0.063
b	0.35		0.46	0.014		0.018
b1	0.19		0.25	0.007		0.010
C		0.5			0.020	
c1	45 (typ.)					
D	9.8		10	0.386		0.394
E	5.8		6.2	0.228		0.244
e		1.27			0.050	
e3		8.89			0.350	
F	3.8		4.0	0.150		0.157
L	0.4		1.27	0.016		0.050
M			0.62			0.024
S	8 (max.)					



**ULN2001A - ULN2002A - ULN2003A - ULN2004A**

---



Information furnished is believed to be accurate and reliable. However, STMicroelectronics assumes no responsibility for the consequences of use of such information nor for any infringement of patents or other rights of third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of STMicroelectronics. Specification mentioned in this publication are subject to change without notice. This publication supersedes and replaces all information previously supplied. STMicroelectronics products are not authorized for use as critical components in life support devices or systems without express written approval of STMicroelectronics.

The ST logo is a registered trademark of STMicroelectronics  
© 1998 STMicroelectronics – Printed in Italy – All Rights Reserved  
STMicroelectronics GROUP OF COMPANIES

Australia - Brazil - Canada - China - France - Germany - Italy - Japan - Korea - Malaysia - Malta - Mexico - Morocco - The Netherlands - Singapore - Spain - Sweden - Switzerland - Taiwan - Thailand - United Kingdom - U.S.A.

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายฤทธิรงค์ นิยมโชค เกิดเมื่อวันที่ 1 มีนาคม พ.ศ. 2525 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนฤทธิยะวรรณาลัย กรุงเทพมหานคร ได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาตรีในปีการศึกษา 2543 ในหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย หลังจากจบการศึกษาในระดับปริญญาตรีแล้ว ได้ศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขามาตรวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2549

## ผลงานตีพิมพ์

### การประชุมวิชาการ

1. ฤทธิรงค์ นิยมโชค, ผศ.ดร.ต้นพงส์ แก้วคงคา, ผศ.ดร.จิรพงศ์ ลิ้ม, รศ.ศิริพร ดาวพิเศษ, การทดสอบการกักกรองของโลหะด้วยวิธีโพเทนชิโอไดนามิกส์โดยใช้คอมพิวเตอรืควบคุมและบันทึกข้อมูล, การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม, 2009
2. ฤทธิรงค์ นิยมโชค, ผศ.ดร.ต้นพงส์ แก้วคงคา, ผศ.ดร.จิรพงศ์ ลิ้ม, รศ.ศิริพร ดาวพิเศษ, การตรวจจับการกักกรองของโลหะด้วยวิธีอะคูสติคอีมีสชัน, การประชุมวิชาการสมาคมมาตรวิทยาแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 3, 2008

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย