

การเฝ้าสังเกตการกักกร่อนเชิงความเค้นของวัสดุที่ใช้ทำภาชนะรับความดัน โดยวิธีการปล่อยคลื่นอะคูสติก



นายสินชัย บริบูรณ์สกุลสุข

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2549
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

STRESS CORROSION MONITORING OF MATERIAL USED FOR PRESSURE VESSEL BY
ACOUSTIC EMISSION METHOD

Mr. Sinchai Boriboonsakulsook

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

Department of Physics

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2006

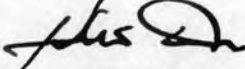
Copyright of Chulalongkorn University

491523

83P4F405T


หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเฝ้าสังเกตการกักต่อนเชิงความเค้นของวัสดุที่ใช้ทำภาชนะรับความดันโดยวิธีการปล่อยคลื่นอะคูสติก
โดย	นายสินชัย บริบูรณ์สกุลสุข
สาขาวิชา	ฟิสิกส์
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร.ต้นพงศ์ แก้วคงคา
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์ ดร.จิรพงศ์ ลิ้ม


คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

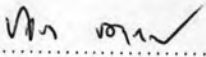

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.เปี่ยมศักดิ์ เมณะเศวต)

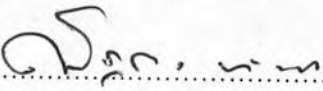
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยสิงห์ ภูรักษาเกียรติ)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร.ต้นพงศ์ แก้วคงคา)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(อาจารย์ ดร.จิรพงศ์ ลิ้ม)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปัจฉา ฉัตรภรณ์)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.ณัฐกร ทับทอง)

สินชัย บริบูรณ์สกุลสุข : การเฝ้าสังเกตการกัดกร่อนเชิงความเค้นของวัสดุที่ใช้ทำภาชนะ
รับความดันโดยวิธีการปล่อยคลื่นอะคูสติก (STRESS CORROSION MONITORING OF
MATERIAL USED FOR PRESSURE VESSEL BY ACOUSTIC EMISSION METHOD)
อ. ที่ปรึกษา : อ. ดร. ต้นพงศ์ แก้วคงคา, อ.ที่ปรึกษาร่วม : อ. ดร. จิรพงศ์ ลิ้ม, 104 หน้า.

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการตรวจจับการกัดกร่อนเชิงความเค้น (stress corrosion) ด้วยวิธีการ
ปล่อยคลื่นอะคูสติก (acoustic emission) ของเหล็กกล้าไม่เป็นสนิมเบอร์ 304 (stainless steel
304) ที่ได้รับความเค้นตกค้างจากการตัดงอ ทดสอบในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ที่มีการปรับค่า
พีเอชเท่ากับ 2.32 ด้วยการเติมกรดไฮโดรคลอริก ทดสอบที่อุณหภูมิห้อง โดยตรวจจับสัญญาณ
ด้วยตัวรับรู้สัญญาณชนิด ไพโซอิเล็กทริก (piezoelectric sensor) จากผลการทดลองพบว่า
สามารถตรวจจับสัญญาณ อะคูสติกจากการกัดกร่อนเชิงความเค้นได้ โดยตัวแปรที่สัมพันธ์กับการ
กัดกร่อนคือจำนวนครั้งของสัญญาณที่ตรวจจับได้ ค่าแอมพลิจูด และค่าพลังงาน นอกจากนี้ยัง
พัฒนาระบบหาตำแหน่งของการกัดกร่อน เพื่อทดสอบการหาตำแหน่งที่เกิดสัญญาณอะคูสติก ทั้ง
วิธีการหาตำแหน่งจากตัวรับรู้สัญญาณ 2 ตัว ทำการทดสอบท่อโลหะ และวิธีการหาตำแหน่งจาก
ตัวรับรู้สัญญาณ 3 ตัว ทำการทดสอบบนแผ่นเหล็กกล้าไม่เป็นสนิม เบอร์ 304 โดยใช้สัญญาณอะ
คูสติกจากการหักได้ดินสอดตามมาตรฐาน ASTM E-97 และจากการ กัดกร่อนด้วยการหยดกรด
ไฮโดรคลอริก ผลการทดลองพบว่าทั้งสองวิธีสามารถจับสัญญาณจากการกัดกร่อนได้อย่าง
แม่นยำ โดยมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูงสุด 5%

ภาควิชา.....ฟิสิกส์..... ลายมือชื่อนิสิต.....สินชัย.....บริบูรณ์สกุลสุข.....
สาขาวิชา.....ฟิสิกส์..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา2549ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4672444523 : MAJOR PHYSICS

KEY WORD: ACOUSTIC EMISSION / STRESS CORROSION / SS304

SINCHAI BORIBOONSAKULSOOK : STRESS CORROSION MONITORING OF MATERIAL USED FOR PRESSURE VESSEL BY ACOUSTIC EMISSION METHOD.

THESIS ADVISOR : TONPHONG KAEWKONGKA,Ph.D., THESIS COADVISOR : JIRAPHONG LIM,Ph.D., 104 pp.

In order to test the feasibility of using acoustic emission (AE) technique for detection and monitoring of stress corrosion cracking on 304 austenitic stainless steel. The residual stress from a bending specimens and 0.35 M sodium chloride solution that was acidified to pH 2.34 at room temperature induced stress corrosion cracking. The AE signals that were measured by piezoelectric sensor. The results showed that AE signals were easily detected during stress corrosion and a good correlation was observed between AE activity and corrosion evolution. The determination of the source location of each event can detected by used two sensors to detect AE signal simultaneous in difference distance, the corrosion position could be calculate from the difference time arrivals, position of sensors, and wave velocity of the sample. This method is work only pipes line testing but it does not provide sufficient information to locate the event in metal plate, however by using three sensors to as multi-sensor arrays and generate the hyperbola equation. The intersection of the three hyperbolas indicates the location of the event. Results from the pencil lead break testing (ASTM E-97) and HCl acid drop testing show that both methods can use to determine the source location with error 5 %.

Department.....Physics.....Student's signature.. *สินชัย บวรวิเศษกุล*
Field of study.....Physics.....Advisor's signature..... *[Signature]*
Academic year2006.....Co-advisor's signature..... *[Signature]*

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องด้วยคำแนะนำ การให้ความรู้ ข้อคิดเห็น แนวทางการดำเนินงาน การจัดหาเครื่องมือและอุปกรณ์ที่จำเป็น ตลอดจนการตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์ จากอาจารย์ ดร.ต้นพงศ์ แก้วคงคา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ อาจารย์ ดร.จิรพงศ์ ลิ้ม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยสิงห์ ภูรักษาเกียรติ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปัจฉา จัตุราภรณ์ และ อาจารย์ ดร. ณัฐกร ทับทอง ที่กรุณาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆในการตรวจทานวิทยานิพนธ์

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ศิริพร ดาวพิเศษ รองผู้อำนวยการศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยี ไทย-ฝรั่งเศส และเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการการกัดกร่อนทุกท่าน ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือตรวจจับคลื่นอะคูสติกและการทดสอบด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า สารเคมีที่จำเป็น รวมถึงคำแนะนำ และความรู้ในการใช้เครื่องมือ

ผู้เขียนขอขอบคุณ นายเชิดไชย ธีระวัฒนานนท์ ที่ช่วยเหลือในการออกแบบ การจัดทำอุปกรณ์สำหรับการทดลอง และการจัดเตรียมเครื่องมือต่างๆ ตลอดจนเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ภาควิชาฟิสิกส์ทุกท่าน ที่มีส่วนช่วยในการทำงานวิจัยนี้ การจัดทำเล่มวิทยานิพนธ์ และทำให้บรรยากาศในการทำงานเป็นไปด้วยดี

สุดท้ายผู้เขียนขอขอบพระคุณผู้ให้การสนับสนุนทางด้านทุนการศึกษาสำหรับการทำวิจัยได้แก่ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และที่สำคัญขอขอบพระคุณสมาชิกทุกคนในครอบครัวที่ให้ความหวังใยและการสนับสนุนในด้านต่างๆสำหรับการวิจัยนี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัยโดยย่อ	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัยนี้	3

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.2 การตรวจสอบด้วยวิธีการปล่อยคลื่นอะคูสติก	
2.2.1 การตรวจสอบแบบไม่ทำลาย	5
2.2.2 ลักษณะของคลื่นอะคูสติก	8
2.2.3 แหล่งกำเนิดคลื่นอะคูสติก.....	8
2.2.4 อุปกรณ์สำหรับการตรวจวัดด้วยวิธีการปล่อยคลื่นอะคูสติก	9
2.2.5 คุณลักษณะของคลื่นอะคูสติก.....	13
2.2.6 แหล่งกำเนิดคลื่นอะคูสติกในระบบการกักคลื่น.....	15
2.2.7 การหาตำแหน่งของความผิดปกติด้วยคลื่นอะคูสติก.....	17
2.3 การกักคลื่น	
2.3.1 ความหมายของการกักคลื่น.....	23
2.3.2 การเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของโลหะ	23
2.3.3 การกักคลื่นเชิงความเค้น.....	28
2.4 เหล็กกล้าไม่เป็นสนิม	

2.4.1 ลักษณะของเหล็กไม่เป็นสนิม	37
2.4.2 ชนิดของเหล็กกล้าไร้สนิม	38
บทที่ 3 การพัฒนาระบบอัตโนมัติสำหรับการหาตำแหน่งของคลื่นอะคูสติก.....	41
3.1 วิธีการหาความเร็วเสียงจากตัวรับรู้สัญญาณ 2 ตัว.....	41
3.2 วิธีการหาตำแหน่งจากตัวรับรู้สัญญาณ 2 ตัว.....	46
3.3 วิธีการหาตำแหน่งจากตัวรับรู้สัญญาณ 3 ตัว.....	50
บทที่ 4 วิธีการทดลอง	
4.1 การตรวจจับสัญญาณอะคูสติกจากการกักร้อนเชิงความเค้น.....	52
4.1.1 การออกแบบการทดลอง	52
4.1.2 การเตรียมวัสดุและอุปกรณ์การทดลอง.....	55
4.1.3 การติดตั้งอุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	57
4.2 การหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณอะคูสติก.....	61
4.2.1 วิธีการหาตำแหน่งจากตัวรับรู้สัญญาณ 2 ตัว	61
4.2.2 วิธีการหาตำแหน่งจากตัวรับรู้สัญญาณ 3 ตัว.....	64
บทที่ 5 ผลการวิจัย	
5.1 ผลการตรวจจับสัญญาณอะคูสติกจากการกักร้อนเชิงความเค้น.....	67
5.2 ผลการทดสอบการหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณอะคูสติก	
5.2.1 วิธีการหาตำแหน่งจากตัวรับรู้สัญญาณ 2 ตัว.....	74
5.2.2 วิธีการหาตำแหน่งจากตัวรับรู้สัญญาณ 3 ตัว.....	84
บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง	
6.1 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง	95
6.2 ข้อจำกัดของงานวิจัย	96
6.3 งานวิจัยที่สามารถดำเนินการต่อไปในอนาคต	96
รายการอ้างอิง	97

ภาคผนวก	99
ภาคผนวก ก. ตารางแสดงสมบัติของเหล็กกล้าไร้สนิม 304	100
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	104

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ของค่าศักย์ไฟฟ้ากับค่าเดซิเบล	12
ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงลำดับแรงเคลื่อนไฟฟ้ามาตรฐาน ของโลหะ	27
ตารางที่ 2.3 สภาพแวดล้อมที่เกิดการกัดกร่อนเชิงความเค้นของโลหะประเภทต่างๆ	30
ตารางที่ 4.1 ค่าตัวแปรเริ่มต้นของวิธีการหาตำแหน่งจากตัวรับรู้สัญญาณ 2 ตัว.....	62
ตารางที่ 4.2 ค่าตัวแปรเริ่มต้นของวิธีการหาตำแหน่งจากตัวรับรู้สัญญาณ 3 ตัว.....	66
ตารางที่ 5.1 แสดงจำนวนสัญญาณอะคูสติคที่มีค่าแอมพลิจูดต่างๆกัน	71
ตารางที่ 5.2 การหาความเร็วเสียงของท่อโลหะ ยาว 2 เมตร	74
ตารางที่ 5.3 การทดสอบหาตำแหน่งของท่อโลหะยาว 2 เมตร	75
ตารางที่ 5.4 การหาความเร็วเสียงของท่อโลหะ ยาว 4 เมตร	79
ตารางที่ 5.5 การทดสอบหาตำแหน่งของท่อโลหะยาว 4 เมตร	76
ตารางที่ 5.6 ตารางแสดงค่าจากการวัดและการทดลอง ของท่อยาว 2 เมตร	78
ตารางที่ 5.7 ตารางแสดงค่าจากการวัดและการทดลอง ของท่อยาว 4 เมตร	78
ตารางที่ 5.8 แสดงค่าความสัมพันธ์ของแอมพลิจูดกับระยะทางของเซนเซอร์ตัวที่ 1	79
ตารางที่ 5.9 แสดงค่าความสัมพันธ์ของแอมพลิจูดกับระยะทางของเซนเซอร์ตัวที่ 2	80
ตารางที่ 5.10 แสดงค่าเฉลี่ยของแอมพลิจูดที่ตำแหน่งต่างๆของตัวรับรู้สัญญาณทั้งสองตัว.....	80
ตารางที่ 5.11 การหาความเร็วเสียงของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม เบอร์ 304	83
ตารางที่ 5.12 ผลการหาตำแหน่งจากตัวรับรู้สัญญาณ 3 ตัว ที่ตำแหน่งที่ 1 ถึง 5.....	84
ตารางที่ 5.13 ผลการหาตำแหน่งจากตัวรับรู้สัญญาณ 3 ตัว ที่ตำแหน่งที่ 6 ถึง 11.....	85
ตารางที่ 5.14 แสดงผลการเก็บสัญญาณจากการกัดกร่อนที่ตำแหน่งที่ 1	93
ตารางที่ 5.15 แสดงค่าเฉลี่ยของแอมพลิจูด	93

ตารางภาพ

	๗ หน้า
ภาพประกอบ	
รูปที่ 2.1 การจำแนกการตรวจสอบแบบไม่ทำลายวิธีต่างๆ	7
รูปที่ 2.2 ค่าแอมพลิจูดของคลื่นอะคูสติกจากการเปลี่ยนแปลงของวัสดุในเหตุการณ์ต่างๆ	9
รูปที่ 2.3 การทำงานเบื้องต้นของการตรวจสอบด้วยวิธีการปล่อยคลื่นอะคูสติก	10
รูปที่ 2.4 ลักษณะคลื่นอะคูสติก และตัวแปรทางอะคูสติกต่างๆ	14
รูปที่ 2.5 ลักษณะของสัญญาณแบบจับพัด และแบบต่อเนื่อง	15
รูปที่ 2.6 วิธีการหาตำแหน่งของคลื่นอะคูสติกด้วยตัวรับรู้สัญญาณ 2 ตัว	18
รูปที่ 2.7 ข้อจำกัดของการหาตำแหน่งด้วยตัวรับรู้สัญญาณ 2 ตัว	19
รูปที่ 2.8 การหาตำแหน่งของคลื่นอะคูสติกบนแผ่นวัสดุด้วยตัวรับรู้สัญญาณ 2 ตัว	20
รูปที่ 2.9 การหาตำแหน่งของคลื่นอะคูสติกบนแผ่นวัสดุด้วยตัวรับรู้สัญญาณ 3 ตัว.....	20
รูปที่ 2.10 การละลายของโลหะในน้ำ	24
รูปที่ 2.11 การเกิดปฏิกิริยาการกัดกร่อนของโลหะ	24
รูปที่ 2.12 การเกิดพาสซีฟฟิล์มที่ผิวของโลหะในน้ำ	26
รูปที่ 2.13 การกัดกร่อนเชิงความเค้นทั้งแบบตามขอบเกรนและแบบผ่าเกรน	29
รูปที่ 2.14 ค่าศักย์ไฟฟ้าเทียบกับลือกของความหนาแน่นของกระแส	33
รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ของความเค้นเริ่มต้นเทียบกับเวลา	35
รูปที่ 2.16 แสดงความสัมพันธ์ของความเร็วของการขยายตัวของรอยร้าวเทียบกับแฟกเตอร์ความ เข้มของความเค้น	36
รูปที่ 3.1 หลักการหาความเร็วเสียงในท่อโลหะ	41
รูปที่ 3.2 แสดงขั้นตอนการทำงานของวิธีการหาความเร็วเสียง	42
รูปที่ 3.3 แสดงส่วนที่รับคำสั่ง ควบคุมการทำงาน และแสดงผล.....	43
รูปที่ 3.4 แสดงตัวแปรเอชดีทีและพีดีที.....	45
รูปที่ 3.5 ภาพแสดงขั้นตอนการทำงานของวิธีการหาตำแหน่งจากตัวรับรู้สัญญาณ 2 ตำแหน่ง...47	47
รูปที่ 3.6 ส่วนควบคุมสำหรับวิธีการหาตำแหน่งจากตัวรับรู้สัญญาณ 2 ตำแหน่ง	49
รูปที่ 3.7 ส่วนแสดงผลสำหรับวิธีการหาตำแหน่งจากตัวรับรู้สัญญาณ 2 ตำแหน่ง.....	49
รูปที่ 3.8 ภาพแสดงส่วนของการแสดงผล วิธีการหาตำแหน่งจากตัวรับรู้สัญญาณ 3 ตัว	50
รูปที่ 4.1 แสดงขั้นตอนทดสอบ อุปกรณ์ยึดจับตัวรับรู้สัญญาณ และอุปกรณ์กำหนดระยะ.....	57
รูปที่ 4.2 แสดงอุปกรณ์ช่วยกำหนดมุมตามมาตรฐานเอเอสทีเอ็ม อี97	58
รูปที่ 4.3 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดลอง	60
รูปที่ 4.4 แสดงการติดตั้งตัวรับรู้สัญญาณบนท่อยาว 2 เมตรในการทดลองครั้งที่ 1	63

ตารางภาพ

	๗ หน้า
ภาพประกอบ	
รูปที่ 4.5 ตำแหน่งสำหรับการทดสอบบนท่อยาว 2 เมตรในการทดลองครั้งที่ 1	63
รูปที่ 4.6 ตำแหน่งสำหรับการทดสอบบนท่อยาว 4 เมตรในการทดลองครั้งที่ 2.....	63
รูปที่ 4.7 ตำแหน่งในการทดลองด้วยวิธีการหาตำแหน่งจากตัวรับรู้สัญญาณ 3 ตัว.....	65
รูปที่ 5.1 ภาพแสดงสัญญาณอะคูสติกของชิ้นทดสอบที่ได้รับความเค้นจากการพับ.....	67
รูปที่ 5.2 กราฟของความต่างศักย์เทียบกับกระแสของชิ้นทดสอบที่ได้รับความเค้นจากการพับ..	67
รูปที่ 5.3 ภาพแสดงสัญญาณอะคูสติกของชิ้นทดสอบไม่ได้รับความเค้นจากการพับ.....	68
รูปที่ 5.4 กราฟความต่างศักย์เทียบกับกระแสของชิ้นทดสอบที่ไม่ได้รับความเค้นจากการพับ	68
รูปที่ 5.5 แสดงค่าพลังงานของสัญญาณอะคูสติกที่ตรวจจับได้เทียบกับเวลา.....	69
รูปที่ 5.6 ภาพบริเวณรอยพับของชิ้นทดสอบ	69
รูปที่ 5.7 ภาพแสดงสัญญาณอะคูสติกจากการกั๊กก่อน	70
รูปที่ 5.8 ภาพแสดงจำนวนสัญญาณอะคูสติกที่มีค่าแอมพลิจูดต่างๆกัน.....	71
รูปที่ 5.9 กราฟของจำนวนสัญญาณอะคูสติกที่ตรวจจับได้ในช่วงเวลาต่างๆ.....	72
รูปที่ 5.10 ภาพแสดงลักษณะของชิ้นทดสอบหลังการทดลอง.....	73
รูปที่ 5.11 ภาพสัญญาณอะคูสติกที่เกิดจากการหักใส่ดินสอที่ระยะ 23.5 ซม.....	73
รูปที่ 5.12 กราฟความสัมพันธ์ของแอมพลิจูดเทียบกับระยะทาง.....	81
รูปที่ 5.13 ภาพแสดงผลการหาตำแหน่งด้วยวิธีการหาตำแหน่งจากตัวรับรู้สัญญาณ 3 ตัว.....	88
รูปที่ 5.14 รูปแสดงตำแหน่งที่กำหนดสำหรับแบบจำลอง.....	89
รูปที่ 5.15 รูปแสดงกราฟที่ได้จากการคำนวณตำแหน่งทดสอบที่ 1.....	90
รูปที่ 5.16 รูปแสดงกราฟที่ได้จากการคำนวณตำแหน่งทดสอบที่ 2	90
รูปที่ 5.17 รูปแสดงกราฟที่ได้จากการคำนวณตำแหน่งทดสอบที่ 3.....	91
รูปที่ 5.18 รูปแสดงกราฟที่ได้จากการคำนวณตำแหน่งทดสอบที่ 4.....	91
รูปที่ 5.19 แสดงสัญญาณในการทดลองด้วยการหยดกรด.....	92
รูปที่ 5.20 แสดงการทดลองด้วยวิธีการหยดกรด.....	94

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องด้วยคำแนะนำ การให้ความรู้ ข้อคิดเห็น แนวทางการดำเนินงาน การจัดหาเครื่องมือและอุปกรณ์ที่จำเป็น ตลอดจนการตรวจสอบและ แก้ไขวิทยานิพนธ์ จากอาจารย์ ดร.ต้นพงศ์ แก้วคงคา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ อาจารย์ ดร.จิรพงศ์ ลิ้ม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยสิงห์ ภูรักษาเกียรติ ผู้ช่วย ศาสตราจารย์ ดร. ปัจฉา ฉัตรภรณ์ และ อาจารย์ ดร. ณัฐกร ทับทอง ที่กรุณาให้คำแนะนำและ ข้อคิดเห็นต่างๆในการตรวจทานวิทยานิพนธ์

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ศิริพร ดาวพิเศษ รองผู้อำนวยการ ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยี ไทย-ฝรั่งเศส และเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการการกัดกร่อนทุกท่าน ที่ ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือตรวจจับคลื่นอะคูสติกและการทดสอบด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า สารเคมีที่จำเป็น รวมถึงคำแนะนำ และความรู้ในการใช้เครื่องมือ

ผู้เขียนขอขอบคุณ นายเชิดไชย ธีระวัฒนานนท์ ที่ช่วยเหลือในการออกแบบ การจัดทำ อุปกรณ์สำหรับการทดลอง และการจัดเตรียมเครื่องมือต่างๆ ตลอดจนเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ภาควิชา ฟิสิกส์ทุกท่าน ที่มีส่วนช่วยในการทำงานวิจัยนี้ การจัดทำเล่มวิทยานิพนธ์ และทำให้บรรยากาศใน การทำงานเป็นไปด้วยดี

สุดท้ายผู้เขียนขอขอบพระคุณผู้ให้การสนับสนุนทางด้านทุนการศึกษาสำหรับการทำ วิจัยได้แก่ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และที่สำคัญขอขอบพระคุณสมาชิกทุกคน ในครอบครัวที่ให้ความห่วงใยและการสนับสนุนในด้านต่างๆสำหรับการวิจัยนี้