


การตรวจวัดระดับมลภาวะของลูกถ้วยไฟฟ้าบริเวณชายฝั่งทะเลภาคใต้ของประเทศ



นายณัฐพงศ์ ตันทนุช

ศูนย์วิจัยทรัพยากร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-4222-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

INVESTIGATION OF PORCELAIN INSULATOR CONTAMINATION
ALONG THAILAND SOUTHERN COASTAL AREA

Mr. Nutthaphong Tanthanuch

ศูนย์วิทยทรัพยากร

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering
Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering
Chulalongkorn University

Academic Year 2003

ISBN 974-17-4222-3

นายณัฐพงศ์ ตันตานุช : การตรวจวัดระดับมลภาวะของลูกถ้วยไฟฟ้าบริเวณชายฝั่งทะเลภาคใต้ของประเทศ. (INVESTIGATION OF PORCELAIN INSULATOR CONTAMINATION ALONG THAILAND SOUTHERN COASTAL AREA)
 อ.ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์, จำนวนหน้า 180 หน้า. ISBN 974-17-4222-3.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสนอผลการศึกษากเกี่ยวกับการตรวจวัดระดับมลภาวะของลูกถ้วยไฟฟ้าบริเวณชายฝั่งทะเลภาคใต้ของประเทศ ทำการศึกษาการจับเกาะของสิ่งเปราะเปื้อน, การวัดค่ากระแสรั่วไหลบนลูกถ้วยไฟฟ้า พร้อมกับวัดค่าทางอุตุนิยมวิทยาจากสถานีที่วิจัย 3 แห่ง ได้แก่ ที่ อ.ระโนด และ อ.เมือง จ.สงขลา ซึ่งอยู่บริเวณชายฝั่งทะเลด้านตะวันออกของประเทศ และอีกแห่งที่ อ.กะทู้ จ.ภูเก็ต ซึ่งอยู่บริเวณชายฝั่งทะเลด้านตะวันตกของประเทศ ผลการตรวจวัดสิ่งเปราะเปื้อนบนลูกถ้วยไฟฟ้าด้วยวิธีการวัดค่า ESDD (IEC 507, 1991) พบว่า ค่า ESDD บนลูกถ้วยไฟฟ้าจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล ไม่ขึ้นกับระยะเวลาและตำแหน่งที่ทำการติดตั้ง โดยค่า ESDD บริเวณชายฝั่งทะเลด้านตะวันออกจะมีค่าสูงในช่วงเดือนธันวาคมถึงเดือนกุมภาพันธ์และค่า ESDD บริเวณชายฝั่งทะเลด้านตะวันตกจะมีค่าสูงในช่วงเดือนพฤษภาคมถึงเดือนกรกฎาคม จากการวัดค่ากระแสรั่วไหลบนลูกถ้วยไฟฟ้ากับค่าทางอุตุนิยมวิทยา บัจฉัยที่มีผลต่อค่ากระแสรั่วไหล คือ ปริมาณน้ำฝน, ความชื้นสัมพัทธ์ และทิศทางลม นอกจากนี้ยังทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วไหลกับค่าทางอุตุนิยมวิทยาด้วยวิธีการหาความสัมพันธ์แบบถดถอย พบว่าวิธีการดังกล่าวไม่เหมาะที่จะนำมาใช้หาความสัมพันธ์เพื่อหาค่ากระแสรั่วไหลบนลูกถ้วยเนื่องจากค่าความน่าเชื่อถือของความสัมพันธ์ที่ได้มีค่าต่ำ

ศูนย์วิทยพัชการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อนิสิต.....ณัฐ ตันตานุช.....
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....คมสัน เพ็ชรรักษ์.....
 ปีการศึกษา.....2546.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4470298721 : ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORDS : CONTAMINATION / ESDD / LEAKAGE CURRENT

NUTTHAPHONG TANTHANUCH : INVESTIGATION OF PORCELAIN INSULATOR
CONTAMINATION ALONG THAILAND SOUTHERN COASTAL AREA. THESIS
ADVISOR : KOMSON PETCHARAKS Dr.Sc.Techn, 180 pp. ISBN 974-17-4222-3.

This thesis presents experimental results on an investigation of insulator contamination along Thailand southern coastal area. The experiment was consisted of the investigation of the pollution pattern, the measurement of leakage current on insulator and the measurement of meteorological data from 3 experimental sites, two on the east coast and the other one on the west coast. The results of pollution pattern from ESDD (IEC 507, 1991) measurement show that ESDD on insulator depends upon season changed, irrespect of exposure time and position on poles. High ESDD level is recorded during the month from December to February in the east coast and from May to July in the west coast. For the leakage current , parameters which affect the leakage current are rainfall, relative humidity and wind direction. In addition, the relationship between leakage current and meteorological variables has been proposed using multiple linear regression technique. However, the result obtained from this analytical expression is not appropriate for a prediction of leakage current on insulator as the coefficient of determination (R^2) of relation is relatively low.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department Electrical Engineering.....
Field of study Electrical Engineering.....
Academic year 2003.....

Student's signature Nutthaphong Tanthanuch
Advisor's signature K. Petcharak
Co-advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือจากอาจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชร
รักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้แนวทางแก้ปัญหา, ข้อเสนอแนะในการศึกษาวิจัยและแก้ไข
ข้อบกพร่องจนวิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์ได้ รองศาสตราจารย์ ดร.สุขุมวิทย์ ภูมิวุฒิสารและคุณพิเชฐ
ศรีสวัสดิ์ ที่ตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร.ชาญนรงค์ บาลมงคล ที่คอยให้คำปรึกษา
ตลอดการวิจัย คุณถาวร เอื้อดี ที่ได้คำแนะนำและช่วยในการเก็บข้อมูลการวิจัย คุณเกรียงไกร ไธธธนู
ที่ช่วยสร้างอุปกรณ์ในการตรวจวัดข้อมูล ตลอดจนเพื่อนๆและเพื่อนๆในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงทุก
ท่านที่อำนวยความสะดวกและให้กำลังใจด้วยดีเสมอ รวมทั้งศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัยและการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคที่ให้การสนับสนุนด้านการประสานงาน, ด้านเงินทุนในการ
วิจัยและข้อมูลเบื้องต้นที่เป็นประโยชน์ต่อการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

ท้ายที่สุด ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา, มารดา, พี่ชายและพี่สาว ผู้ให้การสนับสนุนใน
ทุกๆเรื่องและเป็นกำลังใจที่ดีที่สุดตลอดมา จนทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

| | หน้า |
|--------------------------|------|
| บทคัดย่อวิทยานิพนธ์..... | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | จ |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ฉ |
| สารบัญตาราง..... | ญ |
| สารบัญรูป..... | ฐ |

บทที่

| | |
|---|----|
| 1. บทนำ..... | 1 |
| 1.1 บทนำทั่วไป..... | 1 |
| 1.2 ที่มาของปัญหา..... | 1 |
| 1.3 ผลการวิจัยในอดีต..... | 2 |
| 1.4 ขอบเขตงานวิจัย..... | 13 |
| 1.5 เนื้อหาวิทยานิพนธ์..... | 13 |
| 2. ทฤษฎีเบื้องต้น..... | 14 |
| 2.1 สิ่งประอะเปื้อน..... | 14 |
| 2.1.1 ชนิดของสิ่งประอะเปื้อน..... | 14 |
| 2.1.2 การแบ่งระดับความประอะเปื้อน..... | 15 |
| 2.1.3 Equivalent Salt Deposit Density (ESDD)..... | 16 |
| 2.2 กระแสรั่ว..... | 17 |
| 2.3 การเกิดวาบไฟบนผิวลูกถ้วย..... | 17 |
| 2.4 การเปียกของผิวลูกถ้วย..... | 19 |
| 2.4.1 กลไกการเปียกของลูกถ้วยไฟฟ้า..... | 19 |
| 2.4.2 คุณสมบัติไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic)..... | 20 |

สารบัญ(ต่อ)

| บทที่ | หน้า |
|---|------|
| 2.5 แนวทางการแก้ไขการเกิดวาบไฟตามผิวลูกถ้วยเนื่องจากการใช้งานในบริเวณเปราะเปื้อน .. | 25 |
| 2.5.1 การลดปริมาณการสะสมของสิ่งเปราะเปื้อนบนผิวลูกถ้วย | 25 |
| 2.5.2 การป้องกันการเกิดสภาพนำไฟฟ้าบนผิวลูกถ้วย | 26 |
| 2.5.3 การเพิ่มความคงทนต่อแรงดันวาบไฟตามผิวลูกถ้วยโดยการเพิ่มระยะรั้ว | 27 |
| 2.5.4 การใช้ลูกถ้วยเคลือบสารกึ่งตัวนำ | 28 |
| 2.5.5 ใช้อุปกรณ์พิเศษป้องกัน | 29 |
| 3. หลักสถิติ..... | 30 |
| 3.1 การวิเคราะห์ถดถอย (Regression Methods)..... | 30 |
| 3.1.1 วัตถุประสงค์ของการวิเคราะห์ความถดถอย..... | 31 |
| 3.1.2 การวิเคราะห์ความถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple Linear Regression Analysis) . | 32 |
| 3.1.3 การวิเคราะห์ความถดถอยเชิงซ้อน (Multiple Regression Analysis) | 39 |
| 3.2 การตรวจสอบสมมติฐานของการวิเคราะห์ความถดถอย..... | 48 |
| 3.3 ข้อจำกัดในการพยากรณ์ Y เมื่อกำหนดค่า X..... | 54 |
| 4. การทดลอง..... | 56 |
| 4.1 พื้นที่ทำการวิจัย | 56 |
| 4.2 การตรวจวัดค่าการสะสมของสิ่งเปราะเปื้อนบนลูกถ้วย..... | 60 |
| 4.2.1 ลูกถ้วยที่ใช้ในการวิจัยวัดค่า ESDD | 60 |
| 4.2.2 การติดตั้งลูกถ้วยที่ใช้ในการวิจัยวัดค่า ESDD | 60 |
| 4.2.3 ตำแหน่งของลูกถ้วยและแผนการสุ่มเพื่อวัด ESDD..... | 63 |
| 4.2.4.การคำนวณค่า ESDD ตามมาตรฐาน IEC 507 | 64 |
| 4.2.5.ขั้นตอนการวัดค่า ESDD..... | 68 |
| 4.3.การตรวจวัดค่ากระแสรั่วไหลบนลูกถ้วยทดลอง | 69 |
| 4.4.การตรวจวัดค่าทางอุตุนิยมวิทยา | 73 |
| 4.4.1.อุปกรณ์ตรวจวัดสภาพอากาศ | 74 |

สารบัญ(ต่อ)

| บทที่ | หน้า |
|--|------|
| 5. การวิเคราะห์ผลการตรวจวัด | 76 |
| 5.1 การวิเคราะห์ผลการวัดค่า Equivalent Salt Deposit Density (ESDD)..... | 76 |
| 5.2 การตรวจวัดค่ากระแสรั่วบนลูกถ้วยทดลอง | 88 |
| 5.3 การหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วไหลบนลูกถ้วยกับค่าทางอูดุณิยวิทยา | 100 |
| 5.4 การลดการสะสมของสิ่งเปราะอะเปื้อนบนลูกถ้วย..... | 121 |
| 6. สรุปและข้อเสนอแนะการวิจัย | 127 |
| 6.1 สรุปผลการวิจัย | 127 |
| 6.2 ข้อเสนอแนะ | 128 |
| รายการอ้างอิง..... | 130 |
| ภาคผนวก..... | 135 |
| ภาคผนวก ก | 136 |
| ภาคผนวก ข | 151 |
| ภาคผนวก ค | 153 |
| ภาคผนวก ง..... | 158 |
| ภาคผนวก จ | 166 |
| ภาคผนวก ฉ | 169 |
| ภาคผนวก ช | 179 |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... | 180 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|---|------|
| 1.1 การวิจัยที่เกี่ยวกับการศึกษาปรากฏการณ์ต่างๆที่เกิดบนอุปกรณ์ไฟฟ้าเนื่องจากผลของมลภาวะ | 3 |
| 1.2 การวิจัยที่เกี่ยวกับการศึกษาและพัฒนาอุปกรณ์ และวิธีการบำรุงรักษา ให้มีความสามารถทนต่อมลภาวะที่เกิดขึ้นบนอุปกรณ์ได้ | 8 |
| 1.3 การวิจัยที่เกี่ยวกับการสร้างโมเดลทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นบนลูกถ้วยเปรอะเปื้อน..... | 11 |
| 2.1 การแบ่งระดับของความเปรอะเปื้อนตามมาตรฐาน IEC 815..... | 15 |
| 2.2 การแบ่งระดับของความเปรอะเปื้อนตามระดับค่า ESDD [EPRI Red Book, 1982] | 17 |
| 2.3 การแบ่งระดับของความเปรอะเปื้อน | 21 |
| 2.4 ปริมาณการจับเกาะของสิ่งเปรอะเปื้อน (mg) บนลูกถ้วยแต่ละแบบ..... | 26 |
| 2.5 ค่าต่ำสุดของ Nominal specific creepage distance ที่ใช้สำหรับการออกแบบหรือเลือกใช้ลูกถ้วยที่จะนำไปใช้ในบริเวณเปรอะเปื้อน [IEC 815, 1986] | 28 |
| 4.1 สถานที่ทำการวิจัย | 56 |
| 4.2 การติดตั้งลูกถ้วย | 61 |
| 4.3 แผนการสุ่มลูกถ้วยเพื่อวัดค่า ESDD ในแต่ละเดือน..... | 64 |
| 4.4 ค่าตัวประกอบ b ที่ใช้ในการหาค่า ความนำไฟฟ้าเชิงปริมาตร ที่อุณหภูมิต่างๆ | 65 |
| 4.5 พื้นที่ผิวของลูกถ้วยที่ใช้ในการวัดค่า ESDD | 68 |
| 5.1 ลำดับขนาดของกระแสรั่วไหลเฉลี่ยบนลูกถ้วยทดลอง..... | 97 |
| 5.2 ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์จากข้อมูลในช่วงเดือนกันยายน พ.ศ.2545 ถึงเดือนมีนาคม พ.ศ.2546 ของลูกถ้วยแท่ง 57-4 ที่ อ.ระโนด จ.สงขลา | 100 |
| 5.3 ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์จากข้อมูลในช่วงเดือนกันยายน พ.ศ.2545 ถึงเดือนมีนาคม พ.ศ.2546 ของลูกถ้วยแขน 52-4 ที่ อ.ระโนด จ.สงขลา | 101 |
| 5.4 ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์จากข้อมูลทั้ง 3 สถานที่ทดลองในช่วงเดือนกันยายน พ.ศ.2545 ถึงเดือนมีนาคม พ.ศ.2546 | 101 |

สารบัญตาราง(ต่อ)

| ตารางที่ | หน้า |
|--|------|
| 5.5 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างวิธีใช้พารามิเตอร์ทุกตัวกับวิธีตัดพารามิเตอร์บางตัวที่มีความสัมพันธ์กันออกของกระแสรั่วไหลบนลูกถ้วยแขวน 52-4 ในเดือนตุลาคม พ.ศ.2545 อ.เมือง จ.สงขลา..... | 104 |
| 5.6 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างวิธีใช้พารามิเตอร์ทุกตัวกับวิธีตัดพารามิเตอร์บางตัวที่มีความสัมพันธ์กันออกของกระแสรั่วไหลบนลูกถ้วยแท่งก้านตรง 56/57-4 ในเดือนตุลาคม พ.ศ.2545 ที่ อ.เมือง จ.สงขลา..... | 104 |
| 5.7 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างวิธีใช้พารามิเตอร์ทุกตัวกับวิธีตัดพารามิเตอร์บางตัวที่มีความสัมพันธ์กันออกของกระแสรั่วไหลบนลูกถ้วยแท่งก้านตรง 56/57-4 ในเดือนพฤศจิกายน พ.ศ.2545 ที่ อ.ระโนด จ.สงขลา..... | 104 |
| 5.8 ค่าเฉลี่ยสัญญาณรบกวนบนลูกถ้วยแต่ละชนิด | 106 |
| 5.9 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ที่ได้จากวิธีใช้พารามิเตอร์ทุกตัวระหว่างข้อมูลที่ไม่กำจัดผลของสัญญาณรบกวนกับข้อมูลที่กำลังผลของสัญญาณรบกวนของกระแสรั่วไหลบนลูกถ้วยแขวน 52-4 ในเดือนตุลาคม พ.ศ.2545 ที่ อ.เมือง จ.สงขลา..... | 106 |
| 5.10 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ที่ได้จากวิธีใช้พารามิเตอร์ทุกตัวระหว่างข้อมูลที่ไม่กำจัดผลของสัญญาณรบกวนกับข้อมูลที่กำลังผลของสัญญาณรบกวนของกระแสรั่วไหลบนลูกถ้วยแท่งก้านตรง 56/57-4 ในเดือนตุลาคม พ.ศ.2545 ที่ อ.เมือง จ.สงขลา..... | 107 |
| 5.11 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ที่ได้จากวิธีใช้พารามิเตอร์ทุกตัวระหว่างข้อมูลที่ไม่กำจัดผลของสัญญาณรบกวนกับข้อมูลที่กำลังผลของสัญญาณรบกวนของกระแสรั่วไหลบนลูกถ้วยแท่งก้านตรง 56/57-4 ในเดือนพฤศจิกายน พ.ศ.2545 ที่ อ.ระโนดจ.สงขลา | 107 |
| 5.12 ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วกับพารามิเตอร์แต่ละตัวบนลูกถ้วยแขวน 52-4 ในเดือนตุลาคม พ.ศ.2545 ที่ อ.เมือง จ.สงขลา | 109 |
| 5.13 ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วกับพารามิเตอร์แต่ละตัวบนลูกถ้วยแท่งก้านตรง 56/57-4 ในเดือนตุลาคม พ.ศ.2545 ที่ อ.เมือง จ.สงขลา | 109 |
| 5.14 ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วกับพารามิเตอร์แต่ละตัวบนลูกถ้วยแท่งก้านตรง 56/57-4 ในเดือนพฤศจิกายน พ.ศ.2545 ที่ อ.ระโนด จ.สงขลา | 109 |

สารบัญตาราง(ต่อ)

| ตารางที่ | หน้า |
|---|------|
| 5.15 ระดับการแบ่งค่ากระแสรั่วบนลูกถ้วย..... | 113 |
| 5.16 ความสัมพันธ์ที่ได้จากวิธีใช้พารามิเตอร์ทุกตัวโดยใช้ข้อมูลที่มีการแบ่งระดับของกระแสรั่ว บนลูกถ้วยแขวน 52-4 ในเดือนตุลาคม พ.ศ.2545 ที่ อ.เมือง จ.สงขลา..... | 113 |
| 5.17 ความสัมพันธ์ที่ได้จากวิธีใช้พารามิเตอร์ทุกตัวโดยใช้ข้อมูลที่มีการแบ่งระดับของกระแสรั่ว บนลูกถ้วยแท่งก้านตรง 56/57-4 ในเดือนตุลาคม พ.ศ.2545 ที่ อ.เมืองจ.สงขลา | 114 |
| 5.18 ความสัมพันธ์ที่ได้จากวิธีใช้พารามิเตอร์ทุกตัวโดยใช้ข้อมูลที่มีการแบ่งระดับของกระแสรั่ว บนลูกถ้วยแท่งก้านตรง 56/57-4 ในเดือนพฤศจิกายน พ.ศ.2545 ที่ อ.ระโนด จ.สงขลา..... | 114 |
| 5.19 ความสัมพันธ์ที่ได้จากวิธีใช้พารามิเตอร์ทุกตัวโดยใช้ข้อมูลในช่วงที่กระแสมีการเปลี่ยนแปลง อย่างรวดเร็วบนลูกถ้วยแขวน 52-4 ในเดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ.2546 ที่ อ.กะทู้ จ.ภูเก็ต..... | 117 |
| 5.20 ความสัมพันธ์ที่ได้จากวิธีใช้พารามิเตอร์ทุกตัวโดยใช้ข้อมูลในช่วงที่กระแสมีการเปลี่ยนแปลง อย่างรวดเร็วบนลูกถ้วยแท่งก้านตรง 56/57-4 ในเดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ.2546 ที่ อ.กะทู้ จ.ภูเก็ต | 117 |
| 5.21 ความสัมพันธ์ที่ได้จากวิธีใช้พารามิเตอร์ทุกตัวโดยใช้ข้อมูลในช่วงที่กระแสมีการเปลี่ยนแปลง อย่างรวดเร็วบนลูกถ้วยแขวน 52-4 ในเดือนมีนาคม พ.ศ.2546 ที่ อ.กะทู้ จ.ภูเก็ต | 117 |
| 5.22 ค่าแรงดันวาบไฟตามผิวของลูกถ้วย 56/57-4 NM และลูกถ้วย 56/57-4 SP | 123 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 2.1 ขั้นตอนการเกิดวาบไฟตามผิวเนื่องจากสิ่งเปราะเปื้อน | 18 |
| 2.2 มุมสัมผัสผิวของแข็งของหยดน้ำในแนวราบ..... | 19 |
| 2.3 มุมระหว่างหยดน้ำกับพื้นผิวที่ทำการพิจารณา..... | 21 |
| 2.4 ตัวอย่างพื้นผิวแบ่งตามระดับความไม่ชอบน้ำจากระดับที่ 1 ถึง 6 | 22 |
| 2.5 สเปกตรัมของยางซิลิโคนและ Kaolin จากผิวยางซิลิโคนที่ได้จากวิธี FTIR | 23 |
| 2.6 การจับเกาะที่ส่วนต่างๆของผิวลูกถ้วยแต่ละแบบที่เกิดจากสิ่งเปราะเปื้อนประเภทวันเคลือบที่ ด้วยความเร็วลมที่แตกต่างกัน | 25 |
| 2.7 การเคลือบผิวลูกถ้วยด้วยวัสดุไม่ชอบน้ำ | 27 |
| 2.8 กระแสรั่วไหลบนลูกถ้วยเคลือบธรรมดา | 28 |
| 2.9 กระแสรั่วไหลบนลูกถ้วยเคลือบสารกึ่งตัวนำ | 29 |
| 2.10 ตัวอย่างของอุปกรณ์ที่ป้องกันไม่ให้ส่วนล่างของลูกถ้วยสะสมมลภาวะมากเกินไป..... | 29 |
| 3.1 ตัวอย่างแผนภาพการกระจาย | 31 |
| 3.2 | 32 |
| 3.3 แสดงค่า β , เมื่อ X และ Y มีความสัมพันธ์รูปเส้นตรง..... | 33 |
| 3.4 แสดงค่าของ R ที่มีค่า $-1 < R < 1$ | 39 |
| 3.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง e กับ \hat{Y} | 48 |
| 3.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง e_t กับ t | 49 |
| 3.7 การแจกแจงของ α | 51 |
| 3.8 ฮิสโตแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง e_t กับความถี่ที่เกิด..... | 53 |
| 4.1 แผนที่แสดงสถานที่วิจัยบริเวณ อ.กะหู่ จ.ภูเก็ต..... | 57 |
| 4.2 แผนที่แสดงสถานที่วิจัยบริเวณ อ.ระโนด จ.สงขลา..... | 58 |
| 4.3 แผนที่แสดงสถานที่วิจัยบริเวณ อ.เมือง จ.สงขลา..... | 59 |
| 4.4 ลูกถ้วยแบบต่างๆที่จะทำการวิจัยวัดค่า ESDD | 60 |
| 4.5 แบบก่อสร้างรวมเพื่อติดตั้งลูกถ้วยที่จะทำการวิจัยวัดค่า ESDD | 62 |
| 4.6 ตำแหน่งของลูกถ้วย ที่จะทำการวิจัยวัดค่า ESDD..... | 63 |

สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 4.7 ลูกถ้วย SIR ที่ใช้ในการวัดค่ากระแสรั่วไหล..... | 69 |
| 4.8 แบบก่อสร้างเพื่อติดตั้งลูกถ้วยที่จะทำการวิจัยวัดค่ากระแสรั่ว..... | 70 |
| 4.9 วงจรภายในตู้จ่ายไฟ..... | 70 |
| 4.10 การวัดค่ากระแสรั่วไหลบนลูกถ้วยทดลอง..... | 71 |
| 4.11 หน้าจอแสดงผลของโปรแกรมวัดค่ากระแสรั่ว..... | 72 |
| 4.12 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดค่ากระแสรั่วไหลที่สถานที่ทำการทดลอง..... | 73 |
| 4.13 หน้าจอแสดงผลของโปรแกรมตรวจวัดค่าทางอุดมศึกษา..... | 75 |
| 4.14 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดทางอุดมศึกษาที่สถานที่ทำการทดลอง..... | 75 |
| 5.1 ผลการวัดค่า ESDD ของลูกถ้วยทดลองชนิดต่างๆ ที่ติดตั้งเป็นระยะเวลา 1 เดือน ณ อ.เมือง จ.สงขลา..... | 76 |
| 5.2 ผลการวัดค่า ESDD ของลูกถ้วยทดลองชนิดต่างๆ ที่ติดตั้งเป็นระยะเวลา 4 เดือน ณ อ.กะทู้ จ.ภูเก็ต..... | 77 |
| 5.3 ผลการวัดค่า ESDD ของลูกถ้วยทดลองชนิดต่างๆ ที่ติดตั้งเป็นระยะเวลา 12 เดือน ณ อ.ระโนด จ.สงขลา..... | 78 |
| 5.4 ผลการวัดค่า ESDD ของลูกถ้วยแท่ง 57-3 ที่ติดตั้งเป็นระยะเวลาต่างๆ โดยวัดค่าพร้อมกันใน เดือนมีนาคม พ.ศ. 2546..... | 79 |
| 5.5 ผลการวัดค่า ESDD ของลูกถ้วยแท่ง 57-4 ที่ติดตั้งเป็นระยะเวลาต่างๆ โดยวัดค่าพร้อมกันใน เดือนมีนาคม พ.ศ. 2546..... | 79 |
| 5.6 ผลการวัดค่า ESDD ของลูกถ้วยก้านตรงแบบ Fog ที่ติดตั้งเป็นระยะเวลาต่างๆ โดยวัดค่าพร้อม กันในเดือนมีนาคม พ.ศ. 2546..... | 80 |
| 5.7 ผลการวัดค่า ESDD ของลูกถ้วยแท่งก้านตรง 56/57-4 ที่ติดตั้งเป็นระยะเวลาต่างๆ โดยวัดค่า พร้อมกันในเดือนมีนาคม พ.ศ. 2546..... | 80 |
| 5.8 ผลการวัดค่า ESDD ของลูกถ้วยแขวน 52-4 ที่ติดตั้งเป็นระยะเวลาต่างๆ โดยวัดค่าพร้อมกันใน เดือนมีนาคม พ.ศ. 2546..... | 80 |
| 5.9 ผลการวัดค่า ESDD ของลูกถ้วยทดลองที่ติดตั้งเป็นระยะเวลา 1 เดือน ณ อ.กะทู้ จ.ภูเก็ต..... | 81 |

สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 5.10 ผลการวัดค่า ESDD ของลูกถ้วยทดลองที่ติดตั้งเป็นระยะเวลา 1 เดือน ณ อ.ระโนด จ.สงขลา.. | 81 |
| 5.11 ผลการวัดค่า ESDD ของลูกถ้วยทดลองที่ติดตั้งเป็นระยะเวลา 1 เดือน ณ อ.เมือง จ.สงขลา.... | 82 |
| 5.12 ทิศทางลมมรสุมของประเทศไทย..... | 83 |
| 5.13 การจับเกาะของสิ่งเปรอะเปื้อนบนลูกถ้วยแท่ง 57-3..... | 83 |
| 5.14 การจับเกาะของสิ่งเปรอะเปื้อนบนลูกถ้วยแท่ง 57-4..... | 84 |
| 5.15 การจับเกาะของสิ่งเปรอะเปื้อนบนลูกถ้วยก้านตรงแบบ Fog..... | 84 |
| 5.16 การจับเกาะของสิ่งเปรอะเปื้อนบนลูกถ้วยแท่งก้านตรง 56/57-4..... | 84 |
| 5.17 การจับเกาะของสิ่งเปรอะเปื้อนบนลูกถ้วยแขวน 52-4..... | 85 |
| 5.18 การจับเกาะของสิ่งเปรอะเปื้อนบนลูกถ้วยแขวนและลูกถ้วย Pin Type..... | 86 |
| 5.19 ค่า ESDD ในช่วงเวลาต่างๆ จากสถานที่วิจัยทั้ง 3 แห่ง..... | 87 |
| 5.20 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของอากาศที่มีผลต่อกระแสรั่วไหลบนลูกถ้วยทดลองใน วันที่ 20 เมษายน พ.ศ.2546 ณ อ.กะทู้ จ.ภูเก็ต..... | 89 |
| 5.21 การเปลี่ยนแปลงของความดันอากาศของอากาศที่มีผลต่อกระแสรั่วไหลบนลูกถ้วยทดลอง ในวันที่ 9 พฤษภาคม พ.ศ.2546 ณ อ.เมือง จ.สงขลา..... | 90 |
| 5.22 การเปลี่ยนแปลงของระดับปริมาณน้ำฝนที่มีผลต่อกระแสรั่วไหลบนลูกถ้วยทดลองใน วันที่ 21 มีนาคม พ.ศ.2546 ณ อ.เมือง จ.สงขลา..... | 91 |
| 5.23 การเปลี่ยนแปลงของระดับปริมาณน้ำฝนที่มีผลต่อกระแสรั่วไหลบนลูกถ้วยทดลองใน วันที่ 29 มีนาคม พ.ศ.2546 ณ อ.กะทู้ จ.ภูเก็ต..... | 91 |
| 5.24 การเปลี่ยนแปลงความเร็วลมที่มีผลต่อกระแสรั่วไหลบนลูกถ้วยทดลองในวันที่ 23 กรกฎาคม พ.ศ.2546 ณ อ.กะทู้ จ.ภูเก็ต..... | 92 |
| 5.25 ค่ากระแสรั่วไหลบนลูกถ้วยทดลองและค่าทางอุตุนิยมหาวิทยาลัยในวันที่มีฝนตกในวันที่ 20 เมษายน พ.ศ. 2546 ที่ อ.กะทู้ จ.ภูเก็ต..... | 93 |
| 5.26 ค่ากระแสรั่วไหลบนลูกถ้วยทดลองและค่าทางอุตุนิยมหาวิทยาลัยในวันที่ไม่มีฝนตกในวันที่ 9 มกราคม พ.ศ. 2546 ที่ อ.ระโนด จ.สงขลา..... | 95 |
| 5.27 ระยะห่างระหว่างชั้นปีกในแนวตั้งของลูกถ้วย..... | 98 |
| 5.28 การเชื่อมของหยดน้ำระหว่างปีกของลูกถ้วยในสภาวะเปรอะเปื้อน..... | 99 |

สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 5.29 ค่าแรงวาทไฟตามผิวงระหว่างลูกถ้วย SIR กับลูกถ้วยแขวนพอร์ซเลนในระบบ 230 kV | 99 |
| 5.30 เปรียบเทียบข้อมูลที่วัดได้จริงกับความสัมพันธ์ที่ได้จากตารางที่ 5.4 โดยใช้ข้อมูลเดือน ธันวาคม พ.ศ.2545 ของ อ.เมือง จ.สงขลา | 102 |
| 5.31 เปรียบเทียบข้อมูลที่วัดได้จริงกับความสัมพันธ์ที่ได้จากวิธีวัดพารามิเตอร์บางตัวที่มี ความสัมพันธ์กันออก | 105 |
| 5.32 เปรียบเทียบข้อมูลที่วัดได้จริงกับความสัมพันธ์ที่ได้จากวิธีใช้พารามิเตอร์ทุกตัวโดยใช้ข้อมูล ที่กำหนดผลของสัญญาณรบกวนที่ได้จากวิธีใช้พารามิเตอร์ทุกตัวโดยใช้ข้อมูลที่กำหนดผลของ สัญญาณรบกวน | 108 |
| 5.33 เปรียบเทียบข้อมูลที่วัดได้จริงกับความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วกับพารามิเตอร์แต่ละตัวบน ลูกถ้วยแขวน 52-4 ในเดือนตุลาคม พ.ศ.2545 ที่ อ.เมือง จ.สงขลา | 110 |
| 5.34 เปรียบเทียบข้อมูลที่วัดได้จริงกับความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วกับพารามิเตอร์แต่ละตัวบน ลูกถ้วยแท่งก้านตรง 56/57-4 ในเดือนตุลาคม พ.ศ.2545 ที่ อ.เมือง จ.สงขลา..... | 111 |
| 5.35 เปรียบเทียบข้อมูลที่วัดได้จริงกับความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วกับพารามิเตอร์แต่ละตัวบน ลูกถ้วยแท่งก้านตรง 56/57-4 ในเดือนพฤศจิกายน พ.ศ.2545 ที่ อ.ระโนด จ.สงขลา..... | 112 |
| 5.36 เปรียบเทียบข้อมูลที่วัดได้จริงกับความสัมพันธ์ที่ได้จากวิธีใช้พารามิเตอร์ทุกตัวโดยใช้ข้อมูล ที่มีการแบ่งระดับของกระแสรั่วไหลบนลูกถ้วยแขวน 52-4 ในเดือนตุลาคม พ.ศ.2545 ที่ อ.เมือง จ.สงขลา..... | 115 |
| 5.37 เปรียบเทียบข้อมูลที่วัดได้จริงกับความสัมพันธ์ที่ได้จากวิธีใช้พารามิเตอร์ทุกตัวโดยใช้ข้อมูล ที่มีการแบ่งระดับของกระแสรั่วไหลบนลูกถ้วยแท่งก้านตรง 56/57-4 ในเดือนตุลาคม พ.ศ.2545 ที่ อ.เมือง จ.สงขลา..... | 115 |
| 5.38 เปรียบเทียบข้อมูลที่วัดได้จริงกับความสัมพันธ์ที่ได้จากวิธีใช้พารามิเตอร์ทุกตัวโดยใช้ข้อมูล ที่มีการแบ่งระดับของกระแสรั่วไหลบนลูกถ้วยแท่งก้านตรง 56/57-4 ในเดือน พฤศจิกายน พ.ศ.2545 ที่ อ.ระโนด จ.สงขลา | 116 |
| 5.39 เปรียบเทียบข้อมูลที่วัดได้จริงกับความสัมพันธ์ที่ได้จากวิธีใช้พารามิเตอร์ทุกตัวโดยใช้ข้อมูล ในช่วงที่กระแสมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว | 118 |

สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 5.40 แผนภาพการกระจายของข้อมูลกระแสรั่วเมื่อเทียบกับค่าทางอุตุนิยมวิทยาทั้ง 6 ค่า..... | 119 |
| 5.41 ความสัมพันธ์ระหว่าง e กับ \hat{Y} | 120 |
| 5.42 ฮิสโตแกรมความสัมพันธ์ระหว่าง e_t กับความถี่ที่เกิด | 121 |
| 5.43 อุปกรณ์ลดการจับเกาะของสิ่งเปราะเปื้อนบนลูกถ้วยแท่งก้านตรง 57/57-4 | 122 |
| 5.44 การติดตั้งอุปกรณ์ลดการจับเกาะของสิ่งเปราะเปื้อนเข้ากับลูกถ้วยแท่งก้านตรง 57/57-4 | 122 |
| 5.45 ค่า ESDD บริเวณส่วนล่างของลูกถ้วย 56/57-4 NM และลูกถ้วย 56/57-4 SP จากสถานที่ วิจัยทั้ง 3 แห่ง..... | 124 |
| 5.46 การลดค่า ESDD บริเวณส่วนล่างของลูกถ้วย 56/57-4 SP เมื่อเทียบกับลูกถ้วย 56/57-4 NM จากสถานที่วิจัยทั้ง 3 แห่ง | 124 |
| 5.47 กระแสรั่วไหลบนลูกถ้วย 56/57-4 NM และลูกถ้วย 56/57-4 SP ที่ อ.เมือง จ.สงขลา | 125 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย