

การออกแบบและสร้างชุดทดสอบความคงทนไดอิเล็กตริกกระแสสลับของน้ำมันหม้อแปลง



นายพินิจ ศรีธรรม

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

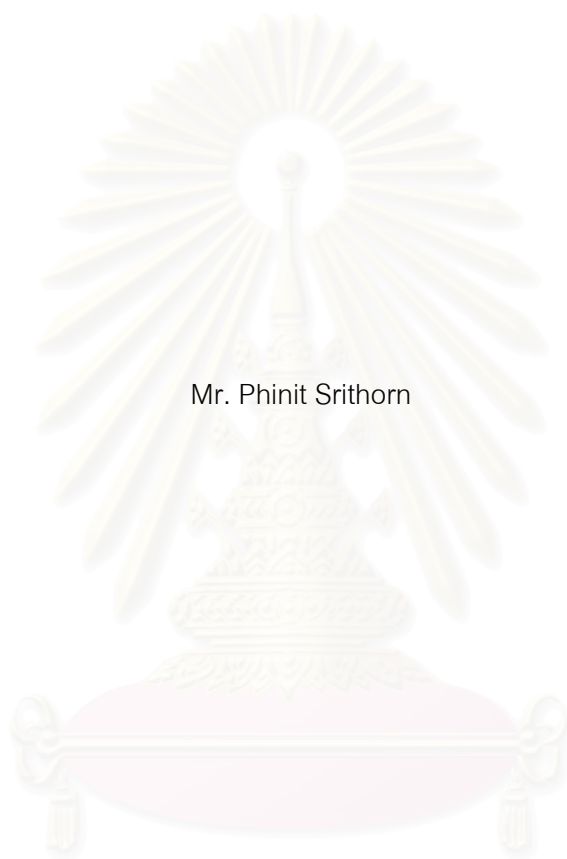
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2543

ISBN 974-13-0308-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A TRANSFORMER OIL AC DIELECTRIC STRENGTH TEST SET



Mr. Phinit Srithorn

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

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2000

ISBN 974-13-0308-4

พินิจ ศรีธีร : การออกแบบและสร้างชุดทดสอบความคงทนไดอิเล็กตริกกระแสสลับของน้ำมันหม้อแปลง (DESIGN AND CONSTRUCTION OF A TRANSFORMER OIL AC DIELECTRIC STRENGTH TEST SET) อ. ที่ปรึกษา : ดร. คมสัน เพ็ชรรักษ์, 97 หน้า ISBN 974-13-0308-4.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้รายงานถึง การออกแบบและสร้างชุดทดสอบความคงทนไดอิเล็กตริกกระแสสลับของน้ำมันหม้อแปลง ใช้ระบบอิเล็กทรอนิกส์ในการควบคุมการเพิ่มขึ้นของแรงดันขณะทำการทดสอบคุณสมบัติความคงทนไดอิเล็กตริกกระแสสลับของน้ำมันหม้อแปลงและบันทึกค่าแรงดันเบรกดาว์นที่เกิดขึ้น การควบคุมดังกล่าวเป็นไปอย่างอัตโนมัติ นอกจากนี้ยังสามารถเชื่อมโยงกับคอมพิวเตอร์ผ่านทางช่องทางสื่อสารอนุกรมเพื่อการควบคุม แสดงผลแบบกราฟฟิก การพิมพ์และบันทึกผลเป็นไฟล์ข้อมูล การทดสอบระบบที่ออกแบบสร้างมานี้กับน้ำมันหม้อแปลงได้ผลเป็นที่น่าพอใจ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา.....2543.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4170439621 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD : TRANSFORMER OIL / AC DIELECTRIC STRENGTH

PHINIT SRITHORN : DESIGN AND CONSTRUCTION OF A TRANSFORMER OIL AC
DIELECTRIC STRENGTH TEST SET.

THESIS ADVISOR : KOMSON PETCHARAKS, Dr. Sc. Techn. 97 pp.

ISBN 974-13-0308-4

This thesis presents the design and construction of a transformer oil AC dielectric test set. Electronic circuits are used for increasing voltage during testing to determine a transformer oil AC dielectric strength and recording this value. The process for this test is set to be an automatically control. Otherwise, serial communication port is offered for linking to computer for controlling, graphic displaying, data storage and printing out by computer software. The performance of this testing set is satisfactory.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department..... Electrical Engineering..... Student's signature.....
Field of study..... Electrical Engineering..... Advisor's signature.....
Academic year..... 2000..... Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรรัักษ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาในการ
ค้นคว้าวิจัย และกรุณาให้คำแนะนำและตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ จนทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จ
เรียบร้อย ขอขอบคุณ รศ.ดร. สุขุมวิทย์ ภูมิวุฒิสาร รศ.ดร.เอกชัย ลีลาวัศมี และคุณวรา จุห้อง
ที่ได้ให้คำวิจารณ์และข้อคิดเห็นในการแก้ไขวิทยานิพนธ์ รวมถึงเพื่อนๆ พี่ๆและน้องๆทุกคนที่อยู่ใน
ในห้องทดลองไฟฟ้าแรงสูงที่ได้ให้คำปรึกษา รวมทั้งกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณศูนย์
เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง รวมทั้งเจ้าหน้าที่ทุกคนที่ได้ให้การสนับสนุนใน
ด้านต่างๆ รวมทั้งด้านการเงินในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จไปด้วยดี

ทำยนี้ขอขอบพระคุณมารดา รวมทั้งพี่น้องของผู้วิจัยที่ได้ให้กำลังใจในการศึกษา
ตลอดมา

พินิจ ศรีธรร

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

| | หน้า |
|-------------------------------------------------------------------------|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | จ |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ฉ |
| สารบัญตาราง..... | ฎ |
| สารบัญรูป..... | ฏ |
| บทที่ | |
| 1. บทนำ..... | 1 |
| 1.1 บทนำทั่วไป..... | 1 |
| 1.2 ที่มาของปัญหา..... | 2 |
| 1.3 งานวิจัยในอดีต..... | 2 |
| 1.4 วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... | 3 |
| 1.5 ขอบเขตการทำวิทยานิพนธ์..... | 3 |
| 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 3 |
| 2. ฉนวนเหลว..... | 4 |
| 2.1 ประเภทของฉนวนเหลว..... | 4 |
| 2.2 น้ำมันหม้อแปลง..... | 6 |
| 2.3 องค์ประกอบที่มีผลต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า..... | 8 |
| 2.4 กลไกการเกิดเบรกดาวนในสารฉนวนเหลว..... | 8 |
| 2.4.1 กลไกการเกิดเบรกดาวนในสารฉนวนเหลวบริสุทธิ์..... | 9 |
| 2.4.2 กลไกการเกิดเบรกดาวนในสารฉนวนเหลวไม่บริสุทธิ์..... | 9 |
| 2.5 กลไกการเกิดสตรีมเมอร์เบรกดาวนในน้ำมันหม้อแปลง..... | 11 |
| 3. การออกแบบชุดทดสอบความคงทนไดอิเล็กตริกกระแสสลับของน้ำมันหม้อแปลง..... | 15 |
| 3.1 ส่วนประกอบที่เป็นโครงสร้างหลัก..... | 15 |
| 3.2 ชุดควบคุมแบบบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์..... | 18 |
| 3.3 วงจรตรวจจับการเกิดดีสชาร์จเบรกดาวน..... | 21 |

| | หน้า |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 3.4 วงจรข้ามมอเตอร์..... | 24 |
| 3.5 วงจรแปลงสัญญาณจากอนาลอกเป็นดิจิตอล..... | 27 |
| 3.6 วงจรสำหรับคีย์บอร์ดและการแสดงผล..... | 28 |
| 3.7 โปรแกรมควบคุมการทำงาน..... | 33 |
| 3.7.1 โปรแกรมสำหรับคอนโทรลเลอร์..... | 33 |
| 3.7.2 โปรแกรมสำหรับคอมพิวเตอร์..... | 42 |
| 3.8 โครงสร้างประกอบ..... | 43 |
| 3.8.1 โครงสร้างชุดแรก..... | 43 |
| 3.8.2 โครงสร้างชุดที่สอง..... | 44 |
| 3.8.3 โครงสร้างกล่องบรรจุ..... | 46 |
| 4. การทดสอบใช้งาน..... | 48 |
| 4.1 การทดสอบวงจรตรวจจับการเกิดกระแสเกิน..... | 48 |
| 4.2 การทดสอบวงจรวัดและแสดงผลค่าแรงดันแบบดิจิตอล..... | 54 |
| 4.3 การทดสอบใช้งานจริง..... | 55 |
| 4.3.1 การเตรียมการทดสอบ..... | 55 |
| 4.3.2 ขั้นตอนการทดสอบ..... | 55 |
| 4.3.3 ตัวอย่างผลการทดสอบ..... | 56 |
| 4.4 การทดสอบเปรียบเทียบผลต่างของอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกลม แบบหัวเห็ด และแบบจานกลม..... | 66 |
| 5. การวิเคราะห์ผลการทดสอบ..... | 70 |
| 6. สรุปผลและข้อเสนอแนะ..... | 73 |
| รายการอ้างอิง..... | 76 |
| ภาคผนวก | |
| ก. ขั้นตอนการใช้งานชุดทดสอบ..... | 80 |
| ข. รูปร่างอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการทดสอบ..... | 81 |

| | หน้า |
|-----------------------------------------|------|
| ค. โครงสร้างอุปกรณ์ที่ใช้กวนน้ำมัน..... | 82 |
| ประวัติผู้เขียน..... | 83 |



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

| ตาราง | หน้า |
|-------------------------------------------------------------------------------|------|
| 2.1 คุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลงตามมาตรฐาน IEC 296:1969 | 7 |
| 3.1 แสดงตำแหน่งการโปรแกรมพอร์ตของไอซีอินเตอร์เฟส | 19 |
| 3.2 การทำงานของ 8255 ในโหมด 0 | 20 |
| 3.3 แสดงรหัสคีย์บอร์ด | 32 |
| 4.1 ผลการทดสอบวงจรวัดและแสดงผลค่าแรงดันแบบดิจิตอล | 54 |
| 5.1 เปรียบเทียบแรงดันเบรกดาวน์เฉลี่ยของชุดทดสอบ | 69 |
| 5.2 ค่าแรงดันเบรกดาวน์เฉลี่ยของอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกลม แบบหัวเห็ดและแบบจานกลม | 70 |
| 5.3 ความแตกต่างของแรงดันเบรกดาวน์เฉลี่ยจากตารางที่ 5.2 | 71 |



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

| ภาพประกอบ | หน้า |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 2.1 ฉนวนเหลวประเภทต่างๆ..... | 5 |
| 2.2 ความเร็วของสตรีมเมอร์ในโหมดต่างๆ..... | 12 |
| 2.3 อิเล็กโตรดpoint -plane และ Semi-uniform..... | 13 |
| 2.4 สนามไฟฟ้าจากกอิเล็กโตรดปลายแหลมกับระนาบ ระนาบกับระนาบ และแบบ Semi-uniform [12] ก่อนเกิดดีสชาร์จเบรกดาวน์..... | 13 |
| 3.1 ไดอะแกรมโครงสร้างของชุดทดสอบ..... | 16 |
| 3.2 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์..... | 19 |
| 3.3.1 วงจรการตรวจจับกระแสเกินจากการเกิดเบรกดาวน์..... | 22 |
| 3.3.2 วงจรการเปรียบเทียบสัญญาณที่ได้จากรูปที่3.3.1 กับสัญญาณอ้างอิง..... | 22 |
| 3.3.3 วงจรสั่งเปิดและปิดการทดสอบจากการเกิดเบรกดาวน์ จากสวิตช์คอนโทรลเลอร์..... | 22 |
| 3.3.4 แสดงลายวงจรตรวจจับการเกิดเบรกดาวน์บนแผ่นวงจรรวม..... | 23 |
| 3.3.5 แสดงตำแหน่งการวางอุปกรณ์ในวงจรตรวจจับการเกิดเบรกดาวน์..... | 24 |
| 3.4.1 วงจรขับมอเตอร์กระแสตรงด้วยไอซีเบอร์ L293D..... | 25 |
| 3.4.2 วงจรป้องกันความเสียหายด้วยการตัดกระแสจ่ายมอเตอร์..... | 25 |
| 3.4.3 ลายวงจรขับมอเตอร์กระแสตรงด้วยไอซีเบอร์ L293D บนแผ่นวงจรรวม..... | 26 |
| 3.4.4 ตำแหน่งอุปกรณ์วงจรถูกขับมอเตอร์กระแสตรงด้วยไอซีเบอร์ L293D..... | 26 |
| 3.4.5 ลายวงจรป้องกันมอเตอร์กระแสตรงด้วยการตัดกระแสจ่าย บนแผ่นวงจรรวม..... | 26 |
| 3.4.6 ตำแหน่งอุปกรณ์ของวงจรถูกขับมอเตอร์กระแสตรงด้วยการตัดกระแสจ่าย..... | 26 |
| 3.5.1 การต่อวงจรแปลงสัญญาณจากอนาลอกเป็นดิจิตอล..... | 27 |
| 3.5.2 ลายวงจรแปลงสัญญาณจากอนาลอกเป็นดิจิตอลบนแผ่นวงจรรวม..... | 27 |
| 3.5.3 ตำแหน่งอุปกรณ์วงจรแปลงสัญญาณจากอนาลอกเป็นดิจิตอล..... | 28 |
| 3.6.1 คีบอร์ดแบบเมตริก 4X4..... | 28 |
| 3.6.2 วงจรการต่อคีบอร์ดกับคอนโทรลเลอร์..... | 29 |
| 3.6.3 การต่อวงจรแสดงผลกับคอนโทรลเลอร์..... | 29 |
| 3.6.4 แสดงลายวงจรรวมสำหรับคีบอร์ดและจอแสดงผลแบบ LCD..... | 30 |
| 3.6.5 แสดงตำแหน่งการวางอุปกรณ์สำหรับคีบอร์ดและจอแสดงผลแบบ LCD..... | 30 |
| 3.6.6 แสดงผังงานการโปรแกรมสำหรับคีบอร์ด..... | 31 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.7.1 แสดงลำดับภาพขั้นตอนการโปรแกรมการทำงานหลักของคอนโทรลเลอร์..... | 34 |
| 3.7.2 แสดงลำดับภาพขั้นตอนการโปรแกรมการทำงานแบบที่ละขั้นตอน(Manual)..... | 35 |
| 3.7.3 แสดงลำดับภาพขั้นตอนการโปรแกรมการทำงานแบบอัตโนมัติ(Auto)..... | 37 |
| 3.7.4 แสดงลำดับภาพขั้นตอนการโปรแกรมการทำงานแบบป้อนค่าแรงดัน..... | 39 |
| 3.7.5 แสดงลำดับภาพขั้นตอนการโปรแกรมการทำงานแบบกดคีย์ลูกศรเพิ่มค่าแรงดัน..... | 41 |
| 3.7.6 แผนภาพแสดงลำดับขั้นตอนการโปรแกรมควบคุมและแสดงผลจากคอมพิวเตอร์..... | 42 |
| 3.8.1 แสดงภาพมุมมองด้านบน ด้านข้าง ด้านหน้าและภาพ 3มิติของโครงสร้างชุดแรก..... | 43 |
| 3.8.2 แสดงภาพขนาดของโครงสร้างด้านข้างชุดแรก..... | 43 |
| 3.8.3 แสดงภาพขนาดของโครงสร้างด้านบน ชุดแรก..... | 44 |
| 3.8.4 แสดงภาพมุมมองด้านบน ด้านข้าง ด้านหน้าและภาพ3มิติ ของโครงสร้างชุดที่สอง..... | 44 |
| 3.8.5 แสดงภาพขนาดของโครงสร้างด้านข้างชุดที่สอง..... | 45 |
| 3.8.6 แสดงภาพขนาดของโครงสร้างด้านบน ชุดที่สอง..... | 45 |
| 3.8.7 แสดงภาพมุมมองด้านบน ด้านข้าง ด้านหน้าและภาพ 3มิติของกล่องบรรจุ..... | 46 |
| 3.8.8 แสดงภาพขนาด ของโครงสร้างด้านข้างของกล่องบรรจุ..... | 46 |
| 3.8.9 แสดงภาพขนาดของโครงสร้างด้านบน ของกล่องบรรจุ..... | 47 |
| 3.8.10 แสดงภาพมุมมองด้านบน ด้านข้าง ด้านหน้าและภาพ 3มิติ ของโครงสร้างทั้งหมด..... | 47 |
| 4.1.1 ไดอะแกรมการทดสอบวงจรตรวจสอบการเกิดกระแสเกิน..... | 48 |
| 4.1.2 สัญญาณกระแสเมื่อเกิดลัดวงจรและเปิดวงจรด้วยวงจรตรวจสอบกระแสเกิน ขณะแรงดันด้านแรงต่ำไม่เกิน 20 โวลท์..... | 49 |
| 4.1.3 สัญญาณกระแสเมื่อเกิดลัดวงจรและเปิดวงจรด้วยวงจรตรวจสอบกระแสเกิน ขณะแรงดันด้านแรงต่ำ 20-50 โวลท์..... | 50 |
| 4.1.4 สัญญาณกระแสเมื่อเกิดลัดวงจรและเปิดวงจรด้วยวงจรตรวจสอบกระแสเกิน ขณะแรงดันด้านแรงต่ำ 50-100 โวลท์..... | 51 |
| 4.1.5 สัญญาณกระแสเมื่อเกิดลัดวงจรและเปิดวงจรด้วยวงจรตรวจสอบกระแสเกิน ขณะแรงดันด้านแรงต่ำ 100-150 โวลท์..... | 52 |
| 4.1.6 สัญญาณกระแสเมื่อเกิดลัดวงจรและเปิดวงจรด้วยวงจรตรวจสอบกระแสเกิน ขณะแรงดันด้านแรงต่ำ 150-200 โวลท์..... | 53 |

| | | |
|----------|-------------------------------------------------------|----|
| 4.2.1 | ไดอะแกรมการทดสอบวงจรแสดงผล..... | 54 |
| 4.3.1 | ผลการทดสอบตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงที่ 1 ครั้งที่ 1..... | 56 |
| 4.3.2 | ผลการทดสอบตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงที่ 1 ครั้งที่ 2..... | 57 |
| 4.3.3 | ผลการทดสอบตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงที่ 2 ครั้งที่ 1..... | 58 |
| 4.3.4 | ผลการทดสอบตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงที่ 2 ครั้งที่ 2..... | 59 |
| 4.3.5 | ผลการทดสอบตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงที่ 3 ครั้งที่ 1..... | 60 |
| 4.3.6 | ผลการทดสอบตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงที่ 3 ครั้งที่ 2..... | 61 |
| 4.3.7 | ผลการทดสอบตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงที่ 4 ครั้งที่ 1..... | 62 |
| 4.3.8 | ผลการทดสอบตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงที่ 4 ครั้งที่ 2..... | 63 |
| 4.3.9 | ผลการทดสอบตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงที่ 5 ครั้งที่ 1..... | 64 |
| 4.3.10 | ผลการทดสอบตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงที่ 5 ครั้งที่ 2..... | 65 |
| 4.4.1(ก) | ผลการทดสอบด้วยอิเล็กโตรดทรงกลม ระยะแกป 1.5 mm..... | 66 |
| 4.4.1(ข) | ผลการทดสอบด้วยอิเล็กโตรดหัวเห็ด ระยะแกป 1.5 mm..... | 66 |
| 4.4.1(ค) | ผลการทดสอบด้วยอิเล็กโตรดจานกลม ระยะแกป 1.5 mm..... | 67 |
| 4.4.2(ก) | ผลการทดสอบด้วยอิเล็กโตรดทรงกลม ระยะแกป 2.5 mm..... | 67 |
| 4.4.2(ข) | ผลการทดสอบด้วยอิเล็กโตรดหัวเห็ด ระยะแกป 2.5 mm..... | 68 |
| 4.4.2(ค) | ผลการทดสอบด้วยอิเล็กโตรดจานกลม ระยะแกป 2.5 mm..... | 68 |
| 4.4.3(ก) | ผลการทดสอบด้วยอิเล็กโตรดทรงกลม ระยะแกป 3.0 mm..... | 69 |
| 4.4.3(ข) | ผลการทดสอบด้วยอิเล็กโตรดหัวเห็ด ระยะแกป 3.0 mm..... | 69 |
| 4.4.3(ค) | ผลการทดสอบด้วยอิเล็กโตรดจานกลม ระยะแกป 3.0 mm..... | 69 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำทั่วไป

ในระบบไฟฟ้ากำลัง เริ่มตั้งแต่ระบบการผลิต ระบบส่งและจำหน่ายไฟฟ้า ทั้งหมดเป็นระบบที่ใช้ระดับแรงดันสูงเพื่อที่จะทำให้ระบบไฟฟ้านั้นมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ดังนั้นอุปกรณ์ที่ใช้จึงถูกออกแบบให้สามารถทำงานได้ดีภายใต้สภาวะแรงดันสูง การทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงจึงเป็นตัวแปรสำคัญที่เกี่ยวกับเสถียรภาพและความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้ากำลัง วิศวกรรมการด้านการสร้างและใช้งานอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้แรงดันสูงจึงขึ้นอยู่กับระบบการฉนวนที่เหมาะสม สารฉนวนเหลวเป็นฉนวนทางไฟฟ้าที่คืออย่างหนึ่งที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายเพราะนอกจากจะเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีแล้วยังช่วยในการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากการทำงานของอุปกรณ์ได้ดีด้วย จากข้อมูลเกี่ยวกับสารฉนวนเหลว[1] ระบุว่าฉนวนเหลวเกือบทั้งหมดที่ใช้มาตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบันคือน้ำมันหม้อแปลง และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้นตามจำนวนประชากรและความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีในสังคมปัจจุบัน ถึงแม้ว่าจะได้พยายามนำก๊าซมาเป็นฉนวนในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาก็ตาม เช่น ก๊าซ SF₆ (sulfur hexafluoride) แต่การใช้ก๊าซ SF₆ สามารถก่อให้เกิดสารพิษที่เป็นอันตรายและมีผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมได้[2] ในหลายประเทศจึงพยายามลดการใช้ก๊าซ SF₆ ลง

อย่างไรก็ตามคุณสมบัติการเป็นฉนวนไฟฟ้าและตัวกลางระบายความร้อนของน้ำมันหม้อแปลงจะลดลงเมื่อมีความชื้นหรือกากตะกอนของอนุภาคเจือปนในหม้อแปลงเพิ่มขึ้น ซึ่งสิ่งเจือปนเหล่านี้อาจเกิดขึ้นระหว่างขบวนการผลิตและขั้นตอนในการนำน้ำมันหม้อแปลงไปใช้งาน โดยในขณะที่ใช้งานที่อุณหภูมิสูงขึ้นหรือจากความเครียดทางไฟฟ้า (electrical stress) ก็อาจเกิดก๊าซและกรดที่นำไปสู่การกัดกร่อนวัสดุอื่น ก่อให้เกิดสิ่งเจือปนมากขึ้นได้[3] โดยที่การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของน้ำมันอาจเกิดขึ้นได้จากสีของน้ำมันที่เปลี่ยนไป แต่เพื่อให้มั่นใจว่าน้ำมันหม้อแปลงมีคุณสมบัติต่างๆในระดับสูงเพียงพอเพื่อที่อุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลังจะทำงานได้ดีและมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน หลายองค์กรจึงได้กำหนดคุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลงที่ต้องการมาเป็นมาตรฐานขึ้น คุณสมบัติหลักที่สำคัญและต้องมีการตรวจสอบอยู่เสมอคือ การเป็นฉนวนไฟฟ้าหรือการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า เช่น ตามมาตรฐาน IEC296 [4] ระบุว่าน้ำมันหม้อแปลงต้องมีค่าแรงดันเบรกดาวนมากกว่า หรือเท่ากับ 30 kVrms (รูปร่างและการจัดวางอิเล็กโตรดตามที่ระบุในมาตรฐาน) ถ้าต่ำกว่านี้ต้องทำการปรับปรุงคุณภาพ

ใหม่แล้วจึงนำมาทดสอบอีกครั้ง และจะต้องได้ค่าแรงดันเบรกดาวนั้มากกว่าหรือเท่ากับ 50 kVrms. หลายองค์กรทั้งภาครัฐและบริษัทเอกชนในประเทศไทยที่ประกอบกิจการเกี่ยวกับการใช้ อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่ใช้น้ำมันหม้อแปลงเป็นฉนวน จึงต้องนำเข้าเครื่องทดสอบน้ำมันหม้อแปลง จากต่างประเทศในราคาที่สูงในปัจจุบัน ดังนั้นการออกแบบและสร้างเองภายในประเทศก็จะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมและเศรษฐกิจของประเทศได้

1.2 ที่มาของปัญหา

ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยมีการทดสอบหาค่าความคงทนไดอิเล็กตริกกระแสสลับของน้ำมันหม้อแปลง สำหรับการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้น้ำมันหม้อแปลงเป็นฉนวนและตัวระบายความร้อน รวมถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลง ที่ใช้เครื่องทดสอบของบริษัท AEG ที่มีอายุการใช้งาน นานกว่า 30 ปีและมีรูปแบบการดำเนินการทดสอบที่ยังไม่ค่อยสะดวกมากนัก นอกจากนี้หน่วยงานอื่นของทั้งภาครัฐและบริษัทเอกชนที่ใช้สารฉนวนเหลวเป็นฉนวนก็ต้องดำเนินการทดสอบเช่นกัน จึงมีการนำเข้าเครื่องทดสอบจากต่างประเทศที่ราคาแพง รายงานฉบับนี้จึงอธิบายการออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบหาค่าความคงทนไดอิเล็กตริกกระแสสลับของน้ำมันหม้อแปลง โดยการใช้ความก้าวหน้าทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ ดิจิตอลมาช่วยในการดำเนินการออกแบบการทดสอบตามมาตรฐาน IEC ให้เป็นแบบอัตโนมัติและเคลื่อนย้ายได้สะดวก ซึ่งจะเป็นแนวทางพื้นฐานในการพัฒนาเทคโนโลยีของตนเองได้ในอนาคต

1.3 งานวิจัยในอดีต

การวิจัยและออกแบบสร้างเครื่องทดสอบความคงทนไดอิเล็กตริกกระแสสลับของน้ำมันหม้อแปลงในอดีต เช่นเครื่องรุ่นเก่าของบริษัท AEG ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปี ค.ศ.1990 บริษัท KATO ELECTRIC [5] ประเทศญี่ปุ่น ออกแบบสร้างเครื่องทดสอบน้ำมันหม้อแปลงโดยแรงดันทดสอบสูงสุด 80kVrms. ปี ค.ศ.1995 หน่วยงานวิจัยและพัฒนา Baur Pruf und Messtechnik [6] ประเทศออสเตรีย ได้ออกแบบสร้างเครื่องทดสอบน้ำมันหม้อแปลง ขนาดแรงดันทดสอบสูงสุด 80kVrms. เพื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของขนาดกระแสลัดวงจร และปัจจุบันที่นิยมนำเข้าจากต่างประเทศจากบริษัท AVO International ประเทศสหรัฐอเมริกาที่มีเครื่องทดสอบน้ำมันหม้อแปลงทั้งแบบกึ่งอัตโนมัติและอัตโนมัติ โดยใช้ชื่อทางการค้าว่า MEGGER และ FOSTER [7] รุ่น OTS60xx. ขนาดแรงดันทดสอบสูงสุด 60kVrms

หรือรุ่น OTS80xx ที่มีแรงดันทดสอบสูงขึ้น โดยมีรูปแบบการทดสอบตามมาตรฐานต่างๆ การแสดงผลเป็นแบบดิจิทัลและมีเครื่องพิมพ์แบบพิมพ์ขนาดเล็กไว้พิมพ์ผลการทดสอบในตัว

1.4 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.4.1 เพื่อพัฒนาแนวความคิดในการออกแบบสร้างเครื่องทดสอบทางวิศวกรรมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ในประเทศ

1.4.2 เพื่อเป็นการวิจัยและประยุกต์การนำเทคโนโลยีดิจิทัลคอมพิวเตอร์มาใช้กับงานวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง

1.4.3 เพื่อให้ได้ชุดทดสอบความคงทนไดอิเล็กตริกกระแสสลับของน้ำมันหม้อแปลง

1.5 ขอบเขตการทำวิทยานิพนธ์

ออกแบบและประกอบสร้างชุดทดสอบความคงทนไดอิเล็กตริกกระแสสลับของน้ำมันหม้อแปลงแบบอัตโนมัติ ขนาดแรงดันทดสอบสูงสุด 60 kVrms ควบคุมการทำงานและแสดงผลด้วยไมโครโพรเซสเซอร์ สามารถใช้คอมพิวเตอร์เพิ่มความสะดวกในการใช้งาน เช่น การควบคุม การแสดงผลในโหมดกราฟฟิก

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ชุดทดสอบความคงทนไดอิเล็กตริกกระแสสลับของน้ำมันหม้อแปลงที่ได้ออกแบบสร้างมา สามารถใช้เป็นประโยชน์สำหรับการศึกษาวิจัยและการทดสอบด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงที่ใช้ น้ำมันหม้อแปลงเป็นฉนวน โดยการหาค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าที่เป็นคุณสมบัติที่สำคัญของสารฉนวนเหลวในระบบการทำฉนวนไฟฟ้าแรงสูง

1.6.2 เป็นเครื่องต้นแบบของการพัฒนาออกแบบสร้างชุดทดสอบความคงทนไดอิเล็กตริกกระแสสลับของน้ำมันหม้อแปลงแบบอัตโนมัติ ที่จะทำให้อัตราต้นทุนในการสร้างต่ำลง เพื่อนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมได้อย่างดียิ่งขึ้นต่อไป

บทที่ 2 ฉนวนเหลว

อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยเฉพาะอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนรูปพลังงานและอุปกรณ์ที่สนับสนุนให้ระบบไฟฟ้าทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งในสภาวะปกติของการทำงานจะไม่สามารถหลีกเลี่ยงสภาวะการทำงานที่ต้องเกิดการสูญเสียพลังงานได้ พลังงานสูญเสียดังกล่าวนี้จะแสดงออกมาในรูปของความร้อนที่เพิ่มขึ้นตามเวลา จึงกล่าวได้ว่าเมื่อมีการนำอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ามาใช้งาน ก็จะทำให้เกิดการสะสมความร้อนและอุณหภูมิก็จะสูงขึ้นเรื่อยๆ ดังนั้นอุปกรณ์หรือเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่จะถูกนำมาใช้จึงต้องมีการออกแบบให้สามารถทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้ในระดับหนึ่งตามมาตรฐาน ในขณะที่เดียวกันก็ต้องมีการถ่ายเทความร้อนออกจากตัวอุปกรณ์นั้นๆ ตลอดเวลาด้วยเสมอ การออกแบบอุปกรณ์เหล่านี้จึงต้องพิจารณาเลือกสารฉนวนที่จะใช้ทำระบบฉนวน โดยไม่เพียงแต่จะสามารถรับหรือทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้ค่าหนึ่งเท่านั้น ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนจึงควรเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่พิจารณาประกอบกัน

ฉนวนเหลวเป็นสารฉนวนทางไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่ถูกนำมาใช้เป็นฉนวนหลักในการออกแบบระบบการทำฉนวนของอุปกรณ์ โดยเฉพาะในระบบไฟฟ้าแรงสูง เนื่องจากเหตุผลที่เป็นฉนวนชนิดที่มีคุณสมบัติในการเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีและสามารถไหลแทรกซึมเข้าไปในช่องว่างต่างๆ เพื่อระบายความร้อนได้เกือบทุกส่วนของอุปกรณ์

2.1 ประเภทของฉนวนเหลว[8]

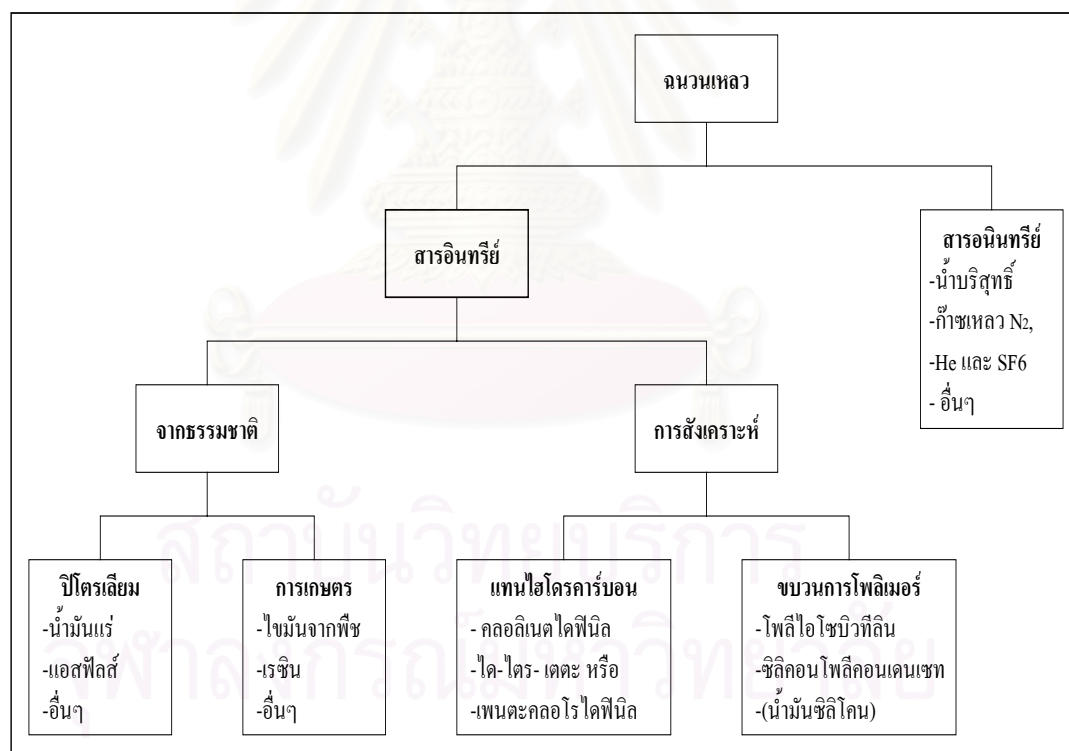
สารฉนวนเหลวที่มีใช้ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน สามารถที่จะผลิตได้ทั้งจากธรรมชาติโดยขบวนการกลั่นปิโตรเลียมและจากการสังเคราะห์ทางเคมี ซึ่งความหลากหลายจากแหล่งวัตถุดิบที่เป็นแร่ น้ำมันดิบและกรรมวิธีในการผลิต จึงทำให้มีสารฉนวนเหลวที่มีคุณสมบัติและคุณภาพที่แตกต่างกันออกไป โดยสามารถแบ่งเป็นประเภทใหญ่ๆ ได้เป็น 2 ประเภท คือ สารอินทรีย์กับสารอนินทรีย์

ประเภทที่เป็นสารอินทรีย์จะประกอบด้วยธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก ฉนวนเหลวที่เป็นประเภทสารอินทรีย์ที่ได้จากธรรมชาติได้แก่ น้ำมันแร่(mineral oil) น้ำมันปิโตรเลียม น้ำมันพืช ไขมัน เรซินและแอสฟัลต์ เป็นต้น โดยเฉพาะน้ำมันแร่เป็นที่นิยมนำไปใช้เป็นสารฉนวนและตัวระบายความร้อนให้แก่หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในระบบไฟฟ้าแรงสูง จึงมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า น้ำมันหม้อแปลง(transformer oil) สารฉนวนประเภทนี้นอกจากจะผลิตได้จากแหล่งวัตถุดิบธรรมชาติแล้วยังสามารถผลิตได้จากขบวนการสังเคราะห์สารทางเคมี

ที่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีสถานะเป็นของเหลวและก๊าซ เช่น คลอรีเนตไดฟีนีล (chlorinated diphenyls) แต่เป็นสารที่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมและราคาแพง ปัจจุบันจึงไม่มีการใช้งาน หรือประเภทที่เป็นโครงสร้างโพลิเมอร์ เช่น โพลีไอโซบิวทิลีน (poly isobutylene) ที่มีคุณสมบัติในการเป็นฉนวนทางไฟฟ้าดีกว่าน้ำมันหม้อแปลง จึงถูกนำไปใช้ในอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต้องการความน่าเชื่อถือสูงอย่างเช่น เคเบิลและคาปาซิเตอร์แรงสูง รวมถึงซิลิโคนโพลีคอนเซทที่มีคุณสมบัติทางความร้อนและเคมีที่ดีกว่าน้ำมันหม้อแปลง

ส่วนสารฉนวนเหลวประเภทสารอินทรีย์ ที่ผลิตได้ เช่น ไนโตรเจนเหลว อาร์กอน ออกซิเจนเหลวและน้ำบริสุทธิ์

จากข้อมูลดังที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นสามารถสรุปประเภทของฉนวนเหลวเป็นได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ฉนวนเหลวประเภทต่างๆ

2.2 น้ำมันหม้อแปลง(Transformer oil)[8]

น้ำมันหม้อแปลงหรือน้ำมันแร่(mineral oil) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกลั่นน้ำมันดิบจากธรรมชาติที่มีองค์ประกอบพื้นฐานหลักเป็นไฮโดรคาร์บอนที่สำคัญในขบวนการกลั่นนำมาใช้งานและองค์ประกอบอื่นเจือปน โดยสามารถจำแนกตามโครงสร้างของโมเลกุลได้ 3 ประเภทคือ พาราฟินิก(parafinic) แนฟทีนิก(napthenic)และอโรมาติก(aromatic) ซึ่งพาราฟินิกและแนฟทีนิกเป็นประเภทที่มีโครงสร้างของไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว จึงถือได้ว่ามีเสถียรภาพสูง ส่วนอโรมาติกเป็นประเภทที่มีโครงสร้างของไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัวทำให้สารประเภทนี้ไม่ค่อยมีเสถียรภาพ แต่ละประเภทยังประกอบไปด้วยโมเลกุลที่มีขนาดและความซับซ้อนของโครงสร้างที่แตกต่างกัน เช่นขณะที่อุณหภูมิห้อง ประเภทที่มีขนาดของไฮโดรคาร์บอนเล็กและโครงสร้างไม่ซับซ้อนมากนัก จะอยู่ในสถานะก๊าซ ประเภทที่มีมวลโมเลกุลสูงจะมีความหนืดระเหยกลายเป็นไอยาก ประเภทที่มีมวลโมเลกุลสูงมาก ๆ และโครงสร้างสลับซับซ้อนยิ่งระเหยยาก มีความหนืดสูงและมีสถานะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง เช่น แอสฟัลต์(asphaltic Bitumen) และขี้ผึ้งพาราฟิน(paraffin wax) เป็นต้น

ส่วนองค์ประกอบอื่นที่ไม่ใช่ไฮโดรคาร์บอนหรือสิ่งแปลกปลอมอื่น ๆ จะถูกกำจัดออกไประหว่างขบวนการกลั่นน้ำมัน จากความแตกต่างของน้ำมันดิบและขบวนการกลั่นปิโตรเลียมดังกล่าวจึงทำให้คุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลงจากแต่ละแห่งแตกต่างกันออกไปด้วย

โดยเฉพาะน้ำมันดิบซึ่งเป็นวัตถุดิบที่สำคัญนั้นพอจะแบ่งได้ 3 ประเภท

ประเภทแรกเป็นน้ำมันดิบที่มีพาราฟินิกเป็นมูลฐาน(Parafin base crude) ประกอบด้วยพาราฟินิกและแนฟทีนิกที่มีมวลโมเลกุลมีค่ามากและซับซ้อน สัดส่วนของพาราฟินิกมากกว่า และสัดส่วนของอโรมาติกต่ำ ดังนั้นจึงมีขี้ผึ้ง(wax)เป็นจำนวนมาก ส่วนแอสฟัลต์มีจำนวนน้อย

ประเภทที่สองเป็นน้ำมันดิบที่มีแนฟทีนิกเป็นมูลฐาน(Naphtene base crude) มีสัดส่วนของแนฟทีนิกและอโรมาติกมากกว่าประเภทแรก และมีสัดส่วนของพาราฟินิกต่ำ แนฟทีนิกที่ผสมอยู่มีมวลโมเลกุลสูง จึงมีสัดส่วนของปริมาณแอสฟัลต์มากกว่า

ประเภทที่สามเป็นน้ำมันดิบผสม(Mixed base crude) มีสัดส่วนของพาราฟินิกและแนฟทีนิกใกล้เคียงกัน น้ำมันที่ได้จากน้ำมันดิบชนิดนี้จะคล้ายกับที่ได้จากน้ำมันดิบสองชนิดแรกขึ้นอยู่กับว่าไฮโดรคาร์บอนประเภทใดมีสัดส่วนมากกว่าก็จะแสดงคุณสมบัติดังกล่าวออกมา

น้ำมันหม้อแปลงที่ใช้กันทั่วไปนั้นสามารถผลิตได้จากน้ำมันดิบทั้งสามชนิดที่กล่าวมาข้างต้นเป็นวัตถุดิบเบื้องต้น โดยมีกระบวนการที่ใช้ในการผลิตสำหรับน้ำมันดิบแต่ละชนิดจะแตกต่างกันออกไป เพื่อให้ได้อัตราส่วนขององค์ประกอบไฮโดรคาร์บอนทั้ง 3 ประเภท

เหมาะสม โดยทั่วไปแล้วจะมีสัดส่วนของพาราฟินิกประมาณ 40-60 เปอร์เซ็นต์ แนฟทีนิกประมาณ 30-50 เปอร์เซ็นต์ และอโรมาติก 5-20 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนัก นอกจากนี้ยังมีการเติมสารเติมแต่ง(additive)บางชนิดเพื่อช่วยเพิ่มคุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลง ตัวอย่างเช่น สารยับยั้งการเกิดออกซิเดชัน(oxidation inhibitor) ช่วยให้น้ำมันเกิดออกซิเดชันยากขึ้นเพื่อให้น้ำมันหม้อแปลงที่ได้มีมีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น มีคุณสมบัติเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานเป็นฉนวนทางไฟฟ้าที่ดี

น้ำมันหม้อแปลงที่นิยมใช้ในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง บางครั้งอาจจะมีชื่อเรียกแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับคุณสมบัติและการนำไปใช้งานกับอุปกรณ์ชนิดใด ส่วนใหญ่ใช้ทำหน้าที่เป็นฉนวนและระบายความร้อนในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง และที่ใช้ในปาสเตอร์แรงสูงก็มักจะเรียกว่าน้ำมันคาปาซิเตอร์ เป็นชนิดที่มีคุณสมบัติคล้ายกับน้ำมันหม้อแปลง แต่มีความบริสุทธิ์สูงกว่า ซึ่งใช้เป็นตัวกลางในการแช่กระดาษฉนวนและฟิล์มโพลีเมอร์ ในการสร้างคาปาซิเตอร์ เป็นต้น

คุณสมบัติบางประการของน้ำมันหม้อแปลงใหม่ที่ใช้กับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังและสวิตช์เกียร์ตามมาตรฐาน IEC 296:1969 พอจะสรุปได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลงตามมาตรฐาน IEC 296:1969

| คุณสมบัติ | ปริมาณที่กำหนด |
|-----------------------------------------|----------------|
| สีและลักษณะที่มองเห็น | ใส |
| ความหนืด ที่ 20°C | |
| -ประเภท I | 40cst |
| -ประเภท II | 25cst |
| จุดติดไฟ | |
| -ประเภท I | 140°C |
| -ประเภท II | 130°C |
| จุดเยือกแข็ง | |
| -ประเภท I | -30°C |
| -ประเภท II | -45°C |
| ค่าความเป็นกลาง | ≤ 0.03mgKOH/g |
| ค่ากำมะถันกัดกร่อน(corrosive sulphur) | >2 |
| แรงดันเบรกดาวน์ | |
| -ไม่ผ่านการกำจัดอนุภาคเจือปนและความชื้น | ≥30kV |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| -ผ่านการกำจัดอนุภาคเจือปนและความชื้น | $\geq 50\text{kV}$ |
| แพคเกจจิ้งการสูญเสียไดอิเล็กตริก ที่ 90°C | ≤ 0.005 |
| ความมีเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชัน(oxidation stability) -น้ำมันที่ไม่เติมสารยับยั้งการเกิดออกซิเดชัน(uninhibited oil) -การทำให้เป็นกลาง -เลนน้ำมัน(sludge) -น้ำมันที่เติมสารยับยั้งการเกิดออกซิเดชัน(inhibited oil) | $\leq 0.40\text{mgKOH/g}$ 0.10% โดยน้ำหนัก - |

2.3 องค์ประกอบที่มีผลต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า[8]

นอกเหนือจากคุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลงที่ได้จากผู้ผลิต ที่เป็นคุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของฉนวนเหลว องค์ประกอบอื่นอีกหลายอย่างที่ยังไม่ได้กล่าวถึงก็มักจะมีผลต่อค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า อย่างเช่น สิ่งเจือปนจำพวก ก๊าซ(ฟองอากาศ) อนุภาคของแข็งและน้ำ(ความชื้น) รวมทั้งขนาดและรูปร่างของอิเล็กโตรด(คู่ของวัสดุที่ใช้เป็นตัวนำไฟฟ้าและเกิดความต่างศักย์ระหว่างกันขณะใช้งาน)

2.4 กลไกการเกิดเบรกดาวนในสารฉนวนเหลว[8]

นอกเหนือจากคุณสมบัติของสารฉนวนเหลวแต่ละชนิดแล้ว ปัจจัยหรือพารามิเตอร์อย่างอื่นหลายตัวก็มีผลกระทบต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าหรือความเป็นฉนวนไฟฟ้าของสารฉนวน การอธิบายถึงกลไกในสภาวะของการเสียคุณสมบัติของการเป็นฉนวนหรือการเกิดดีสชาร์จเบรกดาวน จึงมีหลายทฤษฎีที่เสนอแนวคิดเพื่อที่จะกล่าวถึงขบวนการเกิดดีสชาร์จเบรกดาวนที่สอดคล้องและเหมาะสมต่อสภาวะแวดล้อมที่ควรจะเป็นหรือบางกรณีอาจจะต้องนำเสนอหลายทฤษฎีในการอธิบายพร้อมกันเพื่อหาเหตุผลที่สอดคล้องต่อปรากฏการณ์หนึ่งๆ

ปัจจุบันกลไกการเกิดเบรกดาวนในสารฉนวนเหลวมักจะจำแนกออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่คือ กลไกการเกิดเบรกดาวนในสารฉนวนเหลวบริสุทธิ์และกลไกการเกิดเบรกดาวนในสารฉนวนเหลวไม่บริสุทธิ์ซึ่งสามารถจะอธิบายได้ดังนี้

2.4.1 กลไกการเกิดเบรกดาวนีย์ในสารฉนวนเหลวบริสุทธิ์

เมื่อมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงมากพออิเล็กตรอนก็จะสามารถหลุดออกจากผิวของขั้วคาโทดได้ อิเล็กตรอนอิสระที่หลุดออกมาได้เหล่านี้จะได้รับ พลังงานจากสนามไฟฟ้าที่เกิดจากการป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโตรด จึงเกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนไปยังขั้วแอโนด โดยขณะที่เคลื่อนที่ไปนั้นถึงแม้จะสูญเสียพลังงานไปกับการชนกับโมเลกุลของเหลว แต่หากพลังงานที่ได้รับจากสนามไฟฟ้าที่จ่ายให้ยังมากพออิเล็กตรอนเหล่านี้ก็ถูกเร่งจนมีพลังงานสูงพอที่จะชนกับโมเลกุลแล้วทำให้เกิดการแตกตัวเป็น ไอออนและก่ออวาลานซ์ได้ จึงนำไปสู่การเกิดเบรกดาวนีย์ได้ในที่สุด

2.4.2 กลไกการเกิดเบรกดาวนีย์ในสารฉนวนเหลวไม่บริสุทธิ์

โดยทั่วไปฉนวนเหลวเชิงการค้ำมักจะไม่สามารถที่จะทำให้มีความบริสุทธิ์สูงได้ ดังนั้นกลไกการเกิดเบรกดาวนีย์จึงขึ้นอยู่กับสิ่งเจือปนในฉนวนเหลว ตัวอย่างเช่น อนุภาคตัวนำของแข็ง ความชื้น เป็นต้น สามารถจำแนกกลไกการเกิดเบรกดาวนีย์ได้ดังนี้

- กลไกการเกิดเบรกดาวนีย์เนื่องจากอนุภาคเจือปนของแข็ง
- กลไกการเกิดเบรกดาวนีย์เนื่องจากฟองก๊าซ
- กลไกการเกิดเบรกดาวนีย์จากหยดของเหลวเจือปน
- กลไกการเกิดเบรกดาวนีย์จากความร้อน
- กลไกการเกิดเบรกดาวนีย์เนื่องจากปริมาตรส่วนที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง
- กลไกการเกิดเบรกดาวนีย์จากปรากฏการณ์EHD (Electrohydrodynamic)

2.4.2.1 กลไกการเกิดเบรกดาวนีย์เนื่องจากอนุภาคเจือปนของแข็ง[9]

สิ่งเจือปนของแข็งในฉนวนเหลวไม่บริสุทธิ์ เช่นอนุภาคตัวนำ ไฟเบอร์ หรือฝุ่นละออง เมื่อมีสนามไฟฟ้าสูงมากพอค่าหนึ่งอนุภาคเหล่านี้จะเกิดขั้วจากการเหนี่ยวนำภายใต้สนามไฟฟ้า ทำให้เกิดแรงกระทำบนอนุภาค โดยหากจำลองอนุภาคเป็นรูปร่างทรงกลม แรงที่เกิดขึ้นจะมีค่าเท่ากับ

$$F_e = r^3 \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + 2\epsilon_1} E \nabla E$$

โดยที่

r = รัศมีของอนุภาค

ϵ_1 = เพอมิตติวิตีในฉนวน

ϵ_2 = เพอมิตติวิตีของอนุภาค

E = ความเครียดสนามไฟฟ้าเมื่อละเลยผลของอนุภาคเจ็อบน

โดยหาก $\epsilon_2 > \epsilon_1$ เช่น เศษโลหะเจ็อบนแรงจะมีทิศทางไปยังบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด ถ้า $\epsilon_2 < \epsilon_1$ เช่น ฟองก๊าซ แรงจะกระทำในทิศตรงข้าม

ในกรณีสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ เช่น อิเล็กโตรดแบบระนาบกับระนาบ หรือ ทรงแกลมกับทรงกลม ที่แกปแคบ ∇E เท่ากับศูนย์ ทำให้ไม่มีแรงกระทำต่ออนุภาคเจ็อบน อย่างไรก็ตามถ้า $\epsilon_2 > \epsilon_1$ ความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนที่ผิวของอนุภาคจะมีค่าสูงกว่าบริเวณอื่น จึงเกิดการ เคลื่อนที่และเรียงต่อกันของอนุภาคตามแนวของสนามไฟฟ้า ความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนที่ปลายแนวเรียงของอนุภาคทั้งสองมากขึ้น การเพิ่มขึ้นของความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนเหล่านี้อยู่กับรูปร่างของอนุภาค ดังตัวอย่างผลการคำนวณเมื่ออนุภาคเจ็อบนเป็นตัวนำรูปร่างต่างๆดังนี้

- อนุภาคทรงกลม ($\gamma = 1$) $E_1 = 3E$

- อนุภาคทรงกลมรียาว(prolate spheroidal particle, $\gamma = 2$) $E_1 = 5.8E$

- อนุภาคทรงกลมรียาว ($\gamma = 5$) $E_1 = 18E$

โดยที่

γ = อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางส่วนที่ยาวที่สุดต่อส่วนที่สั้นที่สุดของอนุภาค

E_1 = ความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนที่ปลายอนุภาค

E = ความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนเมื่อละเลยผลของอนุภาคเจ็อบน

เมื่อ E_1 มากกว่าหรือเท่ากับความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดของฉนวนที่จะทนได้หรือความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤตก็จะทำให้เกิดดิซชาร์จบางส่วนบริเวณนั้น และนำมาสู่การเกิดการเบรกดาวน

2.4.2.2 กลไกการเกิดเบรกดาวนเนื่องจากฟองก๊าซ[8]

ก๊าซสามารถที่จะละลายในฉนวนเหลวได้ในปริมาณมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับสภาวะความดันและอุณหภูมิขณะนั้น และสาเหตุของการเกิดก๊าซในฉนวนเหลวไม่บริสุทธิ์ก็อาจจะมีมาจากหลายสาเหตุด้วยกัน เช่น

- ก๊าซจับอยู่ที่ผิวอิเล็กโทรด
- การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความดัน
- การเปลี่ยนแปลงทางเคมีของโมเลกุลฉนวนเหลวเนื่องจากการชนของอิเล็กตรอน
- การกลายเป็นไอของฉนวนเหลวจากผลของโคโรนาบริเวณผิวอิเล็กโทรดที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง

ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจากสาเหตุที่กล่าวมาอาจจะจำลองรูปร่างเป็นทรงกลมและเกิดความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวฟองก๊าซได้จากความสัมพันธ์

$$E_b = \frac{3E}{\epsilon_1 + 1}$$

โดยที่

E = ความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนเหลว(kV/cm.)

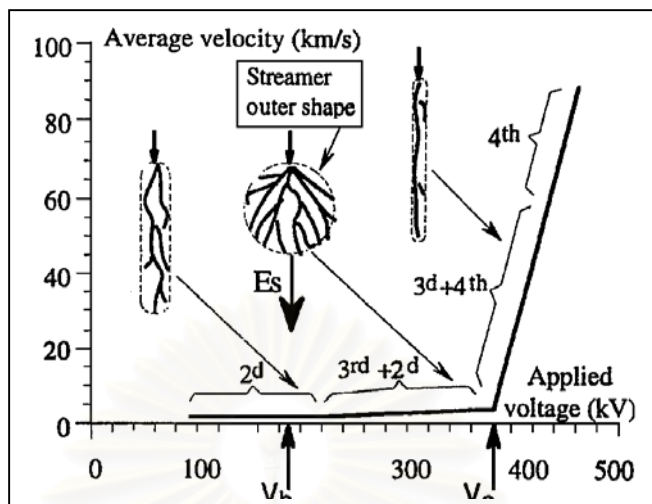
E_b = ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวฟองก๊าซ(kV/cm.)

ϵ_1 = เพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนเหลว

ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวฟองก๊าซหากมีค่าสูงเท่ากับความเครียดสนามไฟฟ้าที่ก๊าซเกิดไอออไนเซชัน จะทำให้เกิดดีสชาร์จ เกิดปฏิกิริยาเคมีและการขยายตัวของฟองก๊าซจากความร้อนที่เกิดขึ้นและนำมาไปสู่การเกิดเบรกดาวน

2.5 กลไกการเกิดสตรีมเมอร์เบรกดาวนในน้ำมันหม้อแปลง[10],[11],[12],[13]

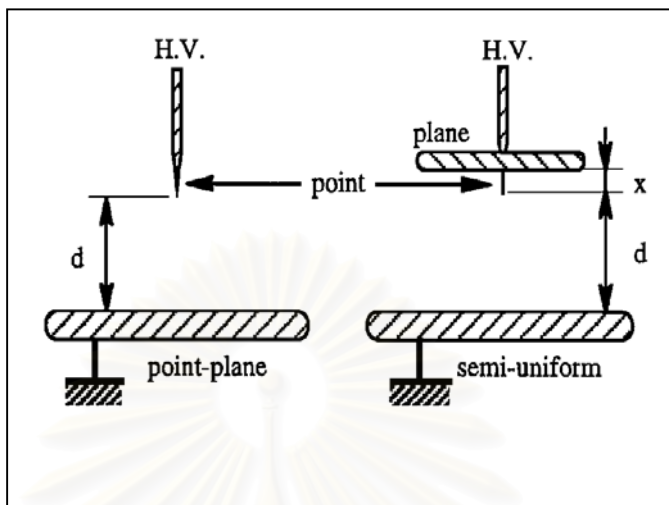
ปรากฏการณ์การเกิดดีสชาร์จเบรกดาวนในสารฉนวนเหลวนั้นเป็นที่เข้าใจกันดีมานานแล้วว่าเริ่มจากกลไกการเกิดสตรีมเมอร์ก่อนและเป็นที่ยอมรับกันว่า "สตรีมเมอร์" ที่มองเห็นนั้นเป็นก๊าซหรือพลาสมา อันเนื่องมาจากการเกิดไอออไนเซชัน(ionization)และการระเหย(evaporation)ของสารฉนวนเหลว มีการศึกษาเกี่ยวกับสตรีมเมอร์จากความเครียดสนามไฟฟ้าที่ได้จากการจ่ายแรงดันแบบอิมพัลส์แล้วเกิดสตรีมเมอร์ ทั้งสตรีมเมอร์ขั้วบวก(positive streamer) และสตรีมเมอร์ขั้วลบ(negative streamer) ซึ่งจากการศึกษาในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาแสดงให้เห็นถึงความเร็วเฉลี่ยและรูปร่างของการแพร่กระจายดังในรูปที่ 2.2 โดยเฉพาะสตรีมเมอร์ขั้วบวกที่มีการแพร่กระจายได้รวดเร็วกว่าและระยะทางก็ไกลกว่าสตรีมเมอร์ขั้วลบ จึงอาจจะกล่าวได้ว่าสามารถทำให้เกิดความเสียหายได้มากกว่าด้วย



รูปที่ 2.2 ความเร็วของสตรีมเมอร์ในโหมดต่างๆ[12]

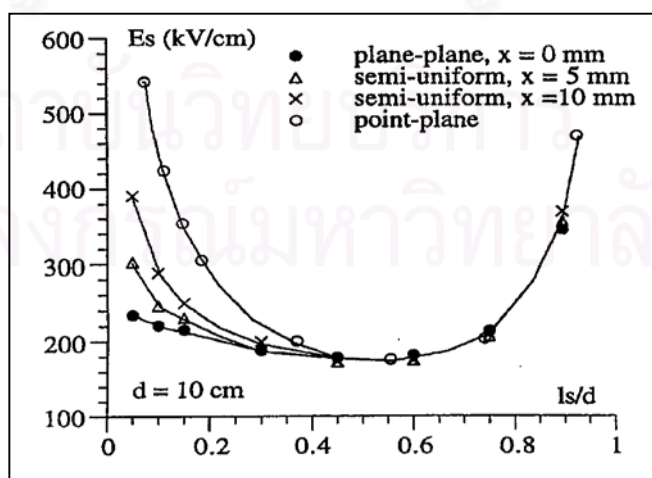
จากรูปที่ 2.2 จำแนกระดับความเร็วของสตรีมเมอร์ออกเป็นโหมดต่างๆ 4 โหมด ที่ระดับแรงดันเบรกดาวน์ 50% (U_{BD50}) สตรีมเมอร์ที่เกิดขึ้นจะมีความเร็วในโหมดสอง (2nd mode) ประมาณ 2-3 กิโลเมตรต่อวินาที มีรูปร่างภายนอกเป็นทรงกระบอกกลม เมื่อเพิ่มแรงดันเป็นค่าระหว่างแรงดันเบรกดาวน์ 50% ถึงประมาณสองเท่าของแรงดันเบรกดาวน์ 50% (ค่าแรงดันวิกฤติ) ความเร็วของสตรีมเมอร์จะเพิ่มขึ้นเป็น 10 กิโลเมตรต่อวินาทีในโหมดสาม (3rd mode) มีรูปร่างเป็นทรงกลมและหากค่าแรงดันมากกว่าค่าวิกฤติหรือ V_a (acceleration voltage) สตรีมเมอร์ยังคงมีความเร็วต้นที่โหมดสามและเพิ่มขึ้นถึงโหมดสี่ (4th mode) มีความเร็วประมาณ 100 กิโลเมตรต่อวินาที มีรูปร่างเป็นทรงกระบอกเล็กและอาจจะมีมากกว่าสาขาเดียว ซึ่งนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์หรือเป็นสตรีมเมอร์เบรกดาวน์จัดอยู่ในโหมดที่ทั่วไปเรียกว่า โหมดความเร็วสูง (fast even / Very fast mode)

การศึกษาถึงสตรีมเมอร์ในน้ำมันหม้อแปลงแบบการจำลองสภาวะการทำงานจริงของน้ำมันหม้อแปลงจากอิเล็กโตรดแบบปลายแหลมกับระนาบ (point to plane) และอาจจะทำให้สมจริงมากยิ่งขึ้นด้วยการนำอิเล็กโตรดแบบระนาบมาเพิ่มด้านหลังของอิเล็กโตรดปลายแหลมซึ่งอิเล็กโตรดปลายแหลมใช้จำลองอนุภาคของแข็งเจือปนที่ลอยมาเกาะติดและนำไปสู่การเกิดสตรีมเมอร์ กลายเป็นอิเล็กโตรดแบบ Semi uniform ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 อิเล็กโทรด point-plane และ Semi-uniform [12]

จากเหตุผลและการอ้างอิงด้วยรูปที่ 2.2 พอจะสรุปได้ว่าสตรีมเมอร์ที่จะนำไปสู่การเบรกดาวนได้เมื่อเริ่มแพร่กระจายที่โหมดสาม ดังนั้นจากการได้ศึกษาถึงการเกิดสนามไฟฟ้าจากสตรีมเมอร์ในโหมดสามที่มีรูปร่างภายนอกเป็นแบบทรงกลม โดยใช้วิธี charge simulation method แสดงถึงสนามไฟฟ้าที่คาดว่าจะเกิดจากสตรีมเมอร์ดังกล่าวเช่นจากอิเล็กโทรดปลายแหลมกับระนาบ ระนาบกับระนาบ และแบบ Semi-uniform แสดงได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.4 สนามไฟฟ้าจากกอิเล็กโทรดปลายแหลมกับระนาบ ระนาบกับระนาบ และแบบ Semi-uniform [12] ก่อนเกิดดีสชาร์จเบรกดาวน

การที่สนามไฟฟ้าที่แสดงในรูปที่ 2.4 ลดลงตามระยะภายในช่วงแรกถึงประมาณครึ่งหนึ่งของระยะภายในนั้น เนื่องจากกิ่งก้านสาขาของสตรีมเมอร์เพิ่มมากขึ้นหรือเปรียบได้กับว่าอิเล็กโตรดโตขึ้นทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าลดลง แล้วจะเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อระยะห่างระหว่างสตรีมเมอร์กับอิเล็กโตรดเหลือแคบลงเรื่อยๆ

ค่าแรงดันเริ่มเกิดสตรีมเมอร์ (streamer inception voltage) นั้นเป็นค่าที่ไม่แน่นอนตัวขึ้นกับการจัดวางอิเล็กโตรด (สนามไฟฟ้า) และสารฉนวนชนิดไหนเช่นกัน ส่วนมากจะอ้างอิงค่าที่ต่ำกว่าความน่าจะเป็นที่ 50% เล็กน้อย ที่ระดับแรงดันต่ำกว่าแรงดันเบรกดาวน์ 50% มักจะไม่ก่อให้เกิดสตรีมเมอร์ในโหมดสามหรือไม่สามารถเกิดปรากฏการณ์เบรกดาวน์นี้ได้ ดังนั้นเมื่อขยายตัวออกไปได้ระยะหนึ่งระหว่างอิเล็กโตรดก็จะดับหายไปเอง ขณะเกิดสตรีมเมอร์นั้นนอกจากแสงสว่างที่มองเห็นแล้วยังมีปรากฏการณ์การไหลของกระแสที่เป็นพัลส์ความเร็วสูงและเกิดแรงดันตกคร่อมที่สตรีมเมอร์โดยมีค่าประมาณ 2 กิโลโวลต์ต่อมิลลิเมตร ในระดับแรงดันที่สตรีมเมอร์เริ่มเกิดโหมดสามก่อนจากอิเล็กโตรดแบบปลายแหลมกับระนาบ หากเปลี่ยนอิเล็กโตรดเป็นแบบ Semi-uniform ผลของอิเล็กโตรดแบบระนาบที่เพิ่มเข้าไปจะช่วยลดความเครียดสนามไฟฟ้าลง ทำให้สตรีมเมอร์เริ่มต้นที่โหมดสองแทนและการขยายตัวก็ยากขึ้น ทำให้ต้องใช้แรงดันสูงขึ้นจึงจะทำให้เกิดสตรีมเมอร์ที่นำไปสู่การเบรกดาวน์ ซึ่งของขนาดระยะ x ต่างๆ ของอิเล็กโตรดแบบ semi-uniform (รูปที่ 2.4) เป็นผลให้ค่าแรงดันเริ่มเกิดสตรีมเมอร์ที่นำไปสู่การเบรกดาวน์ลดลงเมื่อระยะ x เพิ่มขึ้น โดยอิเล็กโตรดแบบปลายแหลมกับระนาบมีค่าแรงดันเริ่มเกิดสตรีมเมอร์ที่นำไปสู่การเบรกดาวน์ต่ำที่สุด

จึงกล่าวได้ว่าขนาดของอนุภาคของแข็งเจือปนที่ใหญ่กว่ามีโอกาสนำไปสู่การเบรกดาวน์ได้ง่ายกว่าและหากขนาดของอิเล็กโตรดที่ใหญ่กว่าก็มีโอกาสที่อนุภาคของแข็งจะลอบไปเกาะติดได้มากกว่า ดังนั้นการเกิดสตรีมเมอร์ที่ก่อให้เกิดเบรกดาวน์ของอิเล็กโตรดขนาดใหญ่จึงมีโอกาสเป็นไปได้มากเช่นกัน

บทที่ 3

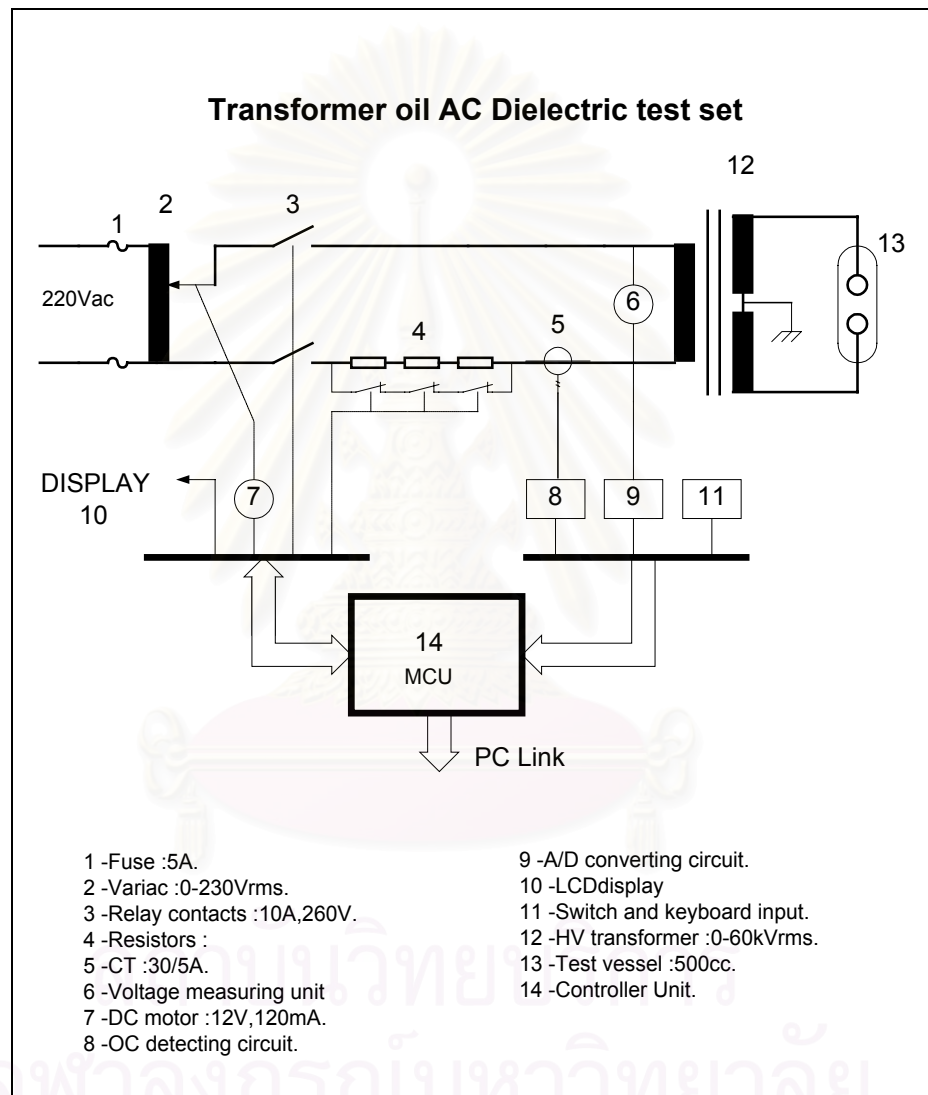
การออกแบบชุดทดสอบความคงทนไดอิเล็กตริกกระแสสลับของน้ำมันหม้อแปลง

การทดสอบความคงทนไดอิเล็กตริกกระแสสลับของฉนวนเหลวจะกระทำในลักษณะของการสร้างความเครียดสนามไฟฟ้ากระแสสลับให้แก่ฉนวนเหลวที่จะทดสอบ ลักษณะของสนามไฟฟ้าและอัตราการเพิ่มค่าขึ้นของความเครียดสนามไฟฟ้า กำหนดจากอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์และเกณฑ์ตามมาตรฐาน IEC Publ.156 [14] ดังนั้นชุดทดสอบนี้จึงมีโครงสร้างในส่วนของการปรับระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ เพื่อให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้า โดยอาศัยการทำงานของหม้อแปลงเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กำหนดลักษณะของสนามไฟฟ้าให้ได้ตามมาตรฐาน และชุดควบคุมแบบไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อควบคุมการทำงานของชุดทดสอบ การแสดงผลของการทดสอบและการต่อเชื่อมกับคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล เพื่อให้สามารถควบคุมการทำงานและแสดงผลแบบกราฟฟิคดังนั้นการออกแบบโดยรวมสำหรับชุดทดสอบนี้จึงจะกล่าวถึงในสองเรื่องคือ การออกแบบที่เกี่ยวกับระบบฮาร์ดแวร์และการออกแบบระบบที่เกี่ยวกับการโปรแกรมที่เป็นซอฟต์แวร์

การออกแบบฮาร์ดแวร์จะกล่าวถึงโครงสร้างหลักเช่น อุปกรณ์ที่ใช้ในการปรับระดับแรงดันเพื่อสร้างสนามไฟฟ้าให้ได้ตามมาตรฐานของการทดสอบ และโครงสร้างสำหรับชุดควบคุมทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ดิจิทัล รวมถึงโครงสร้างที่เป็นรูปร่างภายนอก การออกแบบทางด้านซอฟต์แวร์จะกล่าวถึงรูปแบบการโปรแกรมและแสดงการทำงานของโปรแกรมด้วยลำดับภาพการไหลตามขั้นตอน เนื่องจากส่วนของโปรแกรมทั้งหมดมีความยาวมาก ดังนั้นจึงมีเพียงการยกตัวอย่างในบางส่วน การโปรแกรมที่เสร็จสมบูรณ์แล้วทั้งหมดจัดเก็บในแผ่น CD ที่แนบท้ายมากับเอกสารนี้

3.1 ส่วนประกอบที่เป็นโครงสร้างหลัก

ชุดทดสอบความคงทนไดอิเล็กตริกกระแสสลับของน้ำมันหม้อแปลงจะรับเอาไฟฟ้ากระแสสลับจากระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสขนาดแรงดัน 220 โวลต์ จ่ายให้กับหม้อแปลงปรับระดับแรงดันและใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่จะทำให้อัตราการเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้าได้โดยอัตโนมัติตรงตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ โดยมีหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูงแปลงระดับให้สูงขึ้นก่อนที่จะจ่ายให้กับอิเล็กทรอนิกส์เพื่อกำหนดความเข้มสนามไฟฟ้าให้แก่ฉนวนเหลว จากหลักการดังกล่าวจึงได้มีการออกแบบส่วนประกอบที่เป็นฮาร์ดแวร์ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ไดอะแกรมโครงสร้างของชุดทดสอบ

3.1.1 หม้อแปลงทดสอบ[15],[16]

การออกแบบอุปกรณ์ในรูปที่3.1 จะเริ่มจากการประมาณหาค่าขนาดของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูงที่จะใช้ในการทดสอบ มักจะนิยมเรียกว่าหม้อแปลงทดสอบ(Testing Transformer) โดยจะหาขนาดจากการประมาณค่าของโหลดที่จะนำมาต่อ ในกรณีของชุดทดสอบนี้คือน้ำมันหม้อแปลงซึ่งจะเป็นลักษณะของโหลดประเภทความจุไฟฟ้าที่พอประมาณค่าเป็นค่าความจุไฟฟ้าได้จากสมการ 3.1

$$C = (\epsilon A/d) \quad (3.1)$$

โดย C - ค่าความจุไฟฟ้า
 ϵ - ค่าเพอร์มิตติวิตี
 A - พื้นที่หน้าตัดของอิเล็กโตรด
 d - ระยะทางระหว่างอิเล็กโตรด

เช่น จาก $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ F/m และ ϵ_r ของน้ำมันหม้อแปลงประมาณ 2.5 จัดวางอิเล็กโตรดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 cm. มีพื้นที่หน้าตัดประมาณ 0.5×10^{-3} m² ระยะทางระหว่างอิเล็กโตรด 2.54 mm. ค่า C จากสมการที่ 3.1 จะได้ประมาณ 4.5 pF.

นอกจากอิเล็กโตรดแล้วส่วนต่างๆที่ต่อทางด้านแรงสูงก็ประมาณค่า C รวมด้วย เช่น ตัวนำจากขั้วต่อไปยังอิเล็กโตรด ประมาณ 5 pF. ขนาดของหม้อแปลงทดสอบประมาณได้จากสมการที่ 3.2

$$\begin{aligned} S &= \omega C U^2 \\ &= 2\pi f C U^2 \times 10^{-9} \quad \text{kVA.} \end{aligned} \quad (3.2)$$

โดย C - ค่าความจุไฟฟ้า หน่วย pF
 U - แรงดันทดสอบ หน่วย kVrms
 f - ความถี่ของแรงดัน หน่วย Hz.

เมื่อแรงดันทดสอบสูงสุด 60kVrms. ดังนั้นจะได้

$$S \sim 20 \quad \text{VA.}$$

นอกเหนือจากค่ากำลังไฟฟ้าจากโหลดประเภทความจุไฟฟ้าที่คำนวณได้ การเลือกขนาดพิกัดของหม้อแปลงควรพิจารณาถึงผลของกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่อาจจะเกิดขึ้นขณะใช้งานและขนาดของหม้อแปลงในเชิงการค้า ซึ่งผู้ผลิตและจำหน่ายหม้อแปลงทดสอบไฟฟ้าแรงสูงภายในประเทศมีหม้อแปลงขนาดต่ำสุด 500 VA. จึงเลือกใช้หม้อแปลงขนาดพิกัด 220V/60kV. 500 VA.

3.1.2 หม้อแปลงปรับระดับแรงดัน

เมื่อทราบขนาดของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูงที่จะใช้เป็นหม้อแปลงทดสอบ จึงหาขนาดของหม้อแปลงปรับระดับแรงดันได้ โดยการพิจารณาถึงพิกัดกำลังว่าหม้อแปลงปรับระดับแรงดันจะต้องสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่หม้อแปลงทดสอบได้โดยไม่เสียหายในขณะที่หม้อแปลงทดสอบมีโหลดที่พิกัดกำลัง การเพิ่มค่าแรงดันของหม้อแปลงปรับระดับแรงดันนี้จะทำให้ค่าแรงดันและความเครียดสนามไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตของหม้อแปลงแรงสูงเพิ่มค่าขึ้นไปด้วย

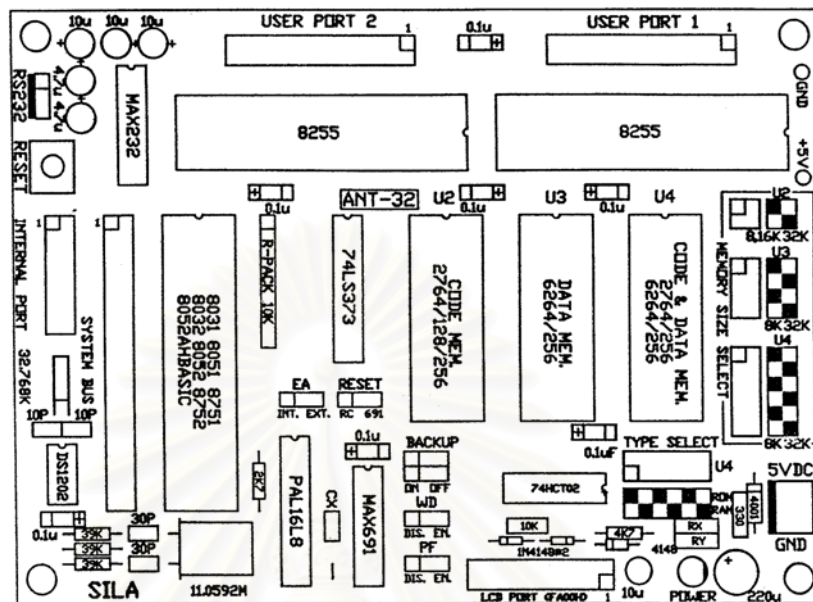
ซึ่งการปรับค่าแรงดันในที่นี้ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นตัวหมุนแกนของหม้อแปลงปรับระดับในระดับความเร็วที่พอดีกับอัตราการเพิ่มของแรงดันตามมาตรฐาน โดยออกแบบเลือกหม้อแปลงปรับระดับแรงดันขนาด 500 VA, 220/0-230V. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 12V, 120mA. และใช้เฟืองทดรอบที่แกนของหม้อแปลงกับมอเตอร์ที่อัตราทด 2.75 /1

ส่วนการป้องกันความเสียหายที่จะเกิดแก่ชุดทดสอบนี้ ที่อาจจะเกิดจากการเกิดกระแสเกินเนื่องจากการลัดวงจร หรือจากการเกิดเบรกดาวนระหว่างอิเล็กทรอนิกส์ได้ จึงได้ออกแบบวงจรตรวจจับกระแสเกินหรือวงจรตรวจจับการเกิดเบรกดาวนซึ่งเป็นการป้องกันขั้นแรกที่ทำงานตัดวงจรได้รวดเร็วภายในเวลาไม่เกิน 20 mSec. และมีการสำรองการป้องกันด้วยการใช้ฟิวส์ดังแสดงในรูปที่ 3.1

3.2 ชุดควบคุมแบบบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์[17],[18]

เนื่องจากวงจรต่างๆในการออกแบบสร้างชุดทดสอบทุกวงจรจะอ้างอิงถึงการใช้งานที่เกี่ยวข้องกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ดังนั้นจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะกล่าวถึงบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้เป็นชุดควบคุมการทำงานชุดทดสอบ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ในลักษณะของแผ่นวงจรรวมบอร์ดที่มีไอซีไมโครโปรเซสเซอร์รวมถึงไอซีเบอร์ต่างๆเพื่อการใช้งานได้สะดวก ที่ถูกออกแบบมาเพื่องานควบคุมโดยเฉพาะ สามารถกำหนดรูปแบบการทำงานให้มีการรับข้อมูลและการส่งออกข้อมูลได้ด้วยการโปรแกรม โดยบอร์ดคอนโทรลเลอร์มักจะติดตั้งอยู่ในเครื่องมือเครื่องจักรกล เครื่องใช้ไฟฟ้า และระบบอัตโนมัติต่างๆ สำหรับการออกแบบชุดทดสอบนี้ใช้บอร์ดที่มีซีพียู(CPU) เป็นชิพไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 ของบริษัท INTEL เบอร์ 80C32 ทำงานที่ความถี่สัญญาณนาฬิกา 11.0592 MHz. มีวงจรที่อำนวยความสะดวกในการสื่อสารทางพอร์ตนุกรมด้วยชิพเบอร์ MAX232 เพื่อการต่อเชื่อมเข้ากับคอมพิวเตอร์ สามารถพัฒนาโปรแกรมได้ทั้งภาษาเบสิกและแอสเซมบลี มีหน่วยความจำสำหรับการเก็บโปรแกรมในรูปแบบ

ของไอซีซีพ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งเป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ของบริษัทลิวารีเสิร์ช จำกัด ที่ผลิตและจำหน่ายภายในประเทศ



รูปที่ 3.2 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์[18]

อุปกรณ์ประกอบที่จำเป็นในการโปรแกรมใช้งานบอร์ดเพื่อการรับและส่งออกข้อมูลการควบคุมวงจรประกอบต่างๆคือ ไอซีอินเทอร์เฟซแบบที่สามารถโปรแกรมได้เบอร์ 8255 (8255 Programmable Peripheral Interface: PPI) เป็นชิพพอร์ตแบบขนานขนาด 3 พอร์ต หรือ 24 บิต จำนวนสองตัว คือ 8255 พอร์ต 1 และพอร์ต 2 โดยระบุตำแหน่งในการติดต่อกับซีพียู ดังแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงตำแหน่งการโปรแกรมพอร์ตของไอซีอินเทอร์เฟซ[18]

| | PORT | ADDRESS |
|-------------|-----------|---------|
| USER PORT 1 | PORT A | F800H |
| | PORT B | F801H |
| | PORT C | F802H |
| | MODE PORT | F803H |
| USER PORT 2 | PORT A | FC00H |
| | PORT B | FC01H |
| | PORT C | FC02H |
| | MODE PORT | FC03H |

ก่อนการใช้งานพอร์ต 8255 จะต้องทำการกำหนดโหมดการทำงานให้เป็นพอร์ตอินพุทหรือเอาต์พุทให้สอดคล้องกับความต้องการ โดยการโปรแกรมรหัสควบคุมไปที่ Mode port ในการออกแบบสำหรับชุดทดสอบนี้จะใช้งานในโหมด 0 เท่านั้น ซึ่งความหมายของรหัสควบคุมการทำงานของ 8255 โหมด 0 นี้แสดงดังในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 การทำงานของ 8255 ในโหมด 0[18]

| Port A (PA0-PA7) | Port C (PC4-PC7) | Port B (PB0-PB7) | Port C (PC0-PA3) | Control code (HEX) |
|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|
| Output | Output | Output | Output | 80H |
| Output | Output | Output | Input | 81H |
| Output | Output | Input | Output | 82H |
| Output | Output | Input | Input | 83H |
| Output | Input | Output | Output | 88H |
| Output | Input | Output | Input | 89H |
| Output | Input | Input | Output | 8AH |
| Output | Input | Input | Input | 8BH |
| Input | Output | Output | Output | 90H |
| Input | Output | Output | Input | 91H |
| Input | Output | Input | Output | 92H |
| Input | Output | Input | Input | 93H |
| Input | Input | Output | Output | 98H |
| Input | Input | Output | Input | 99H |
| Input | Input | Input | Output | 9AH |
| Input | Input | Input | Input | 9BH |

ตัวอย่างการโปรแกรมให้ 8255 มีรูปแบบของพอร์ต A ทำงานเป็นพอร์ตอินพุท พอร์ต B และ C เป็นพอร์ตเอาต์พุท และกำหนดค่าเริ่มต้นให้พอร์ต A และ C เป็นลอจิก 0 ทั้งหมด พอร์ต B เป็นลอจิก 1 ทั้งหมด โดยการเขียนภาษาแอสเซมบลีดังนี้

INIT_8255_1:

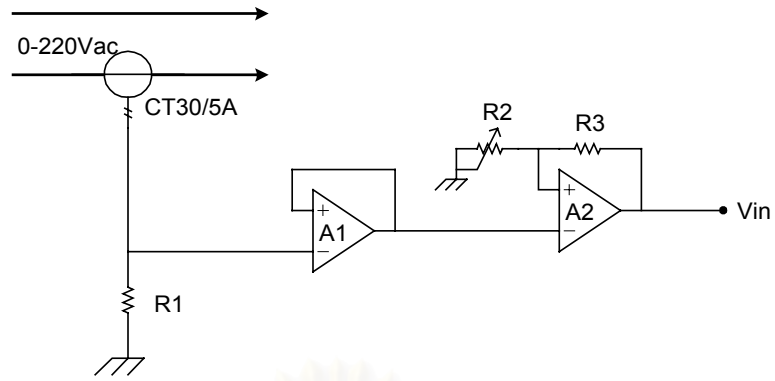
```

MOV     DPTR,#PORT_CON_1 ;Init 8255 mode
MOV     A,#90H
MOVX    @DPTR,A
MOV     A,#00H
MOV     DPTR,#PORTA_1
MOVX    @DPTR,A
MOV     A,#0FFH
MOV     DPTR,#PORTB_1    ;PORT B IS OUTPUT
MOVX    @DPTR,A
MOV     A,#00H
MOV     DPTR,#PORTC_1    ;PORT C IS OUTPUT
MOVX    @DPTR,A
RET

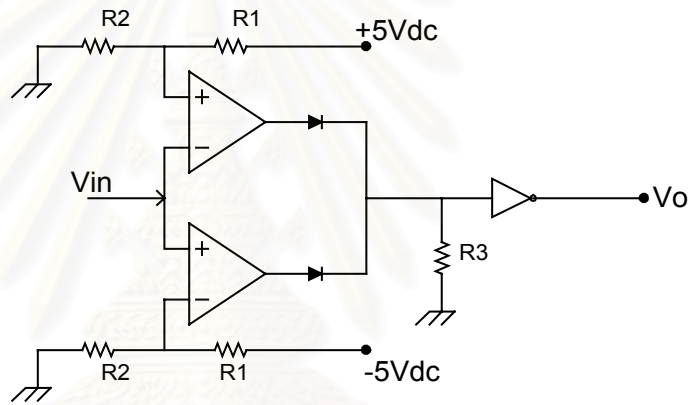
```

3.3 วงจรตรวจจับการเกิดเบรกดาวน[19]

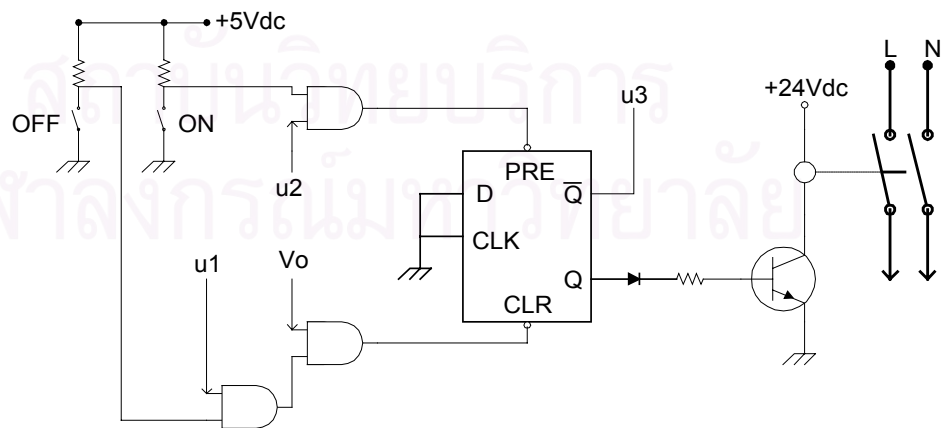
เมื่อมีการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับอิเล็กทรอนิกส์ทั้งสองที่เชื่อมต่อในฉนวนเลขที่จะทดสอบหรือตัวอย่างเช่นในน้ำมันหม้อแปลง โดยมีลักษณะการจัดวางและอัตราการเพิ่มค่าของแรงดันตามมาตรฐานที่กำหนดจะเกิดความเครียดสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงค่าหนึ่งความเป็นฉนวนไฟฟ้าหรือสารไดอิเล็กตริกของฉนวนก็จะไม่สามารถทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นได้ ก่อให้เกิดปรากฏการณ์เบรกดาวนระหว่างอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถมองเห็นได้ถึงแสงสว่างจากลำสตรีมเมอร์ที่เชื่อมอิเล็กทรอนิกส์ทั้งสอง เปรียบได้กับเกิดการลัดวงจร และปรากฏการณ์นี้จึงมีกระแสไหลในวงจรมากกว่าสภาวะปกติหลายเท่าตัว ดังนั้นจึงได้นำเอาปรากฏการณ์ของกระแสไหลนี้มาออกแบบวงจรตรวจจับการเกิดเบรกดาวนเพื่อให้ชุดควบคุมรับรู้และสั่งงานในขั้นตอนต่อไป วงจรตรวจจับที่ออกแบบได้แสดงในรูปที่3.3.1, 3.3.2 และ3.3.3



รูปที่ 3.3.1 วงจรการตรวจจับกระแสเกินจากการเกิดเบรกดาวน



รูปที่ 3.3.2 วงจรการเปรียบเทียบสัญญาณที่ได้จากรูป 3.3.1 กับสัญญาณอ้างอิง



รูปที่ 3.3.3 วงจรสั่งเปิดและปิดการทดสอบจากการเกิดเบรกดาวน จากสวิตช์คอนโทรลเลอร์

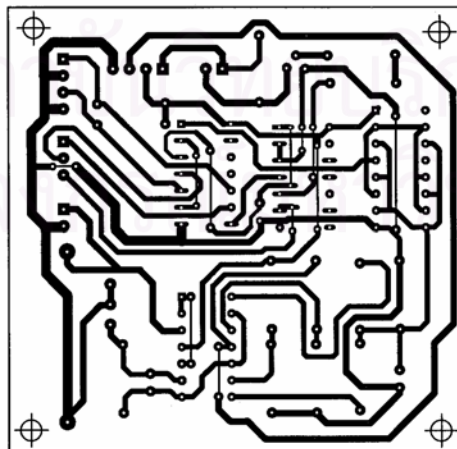
จากรูปที่ 3.3.3 กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหม้อแปลงทดสอบจ่ายหม้อแปลงปรับระดับแรงดันจะต่อสายผ่านหม้อแปลงกระแส(current transformer) ที่มีอัตราส่วนการแปลงกระแสเป็น 30 ต่อ 5 แอมป์เมื่อมีกระแสไหลในสาย 5 แอมป์ ซึ่งเป็นค่ากระแสเต็มพิกัดของหม้อแปลงปรับระดับแรงดันก็จะมีกระแสไหลผ่านความต้านทาน R1 เท่ากับ

$$\begin{aligned} I &= (5 \times 5) / 30 \\ &= 0.833 \text{ แอมป์} \end{aligned}$$

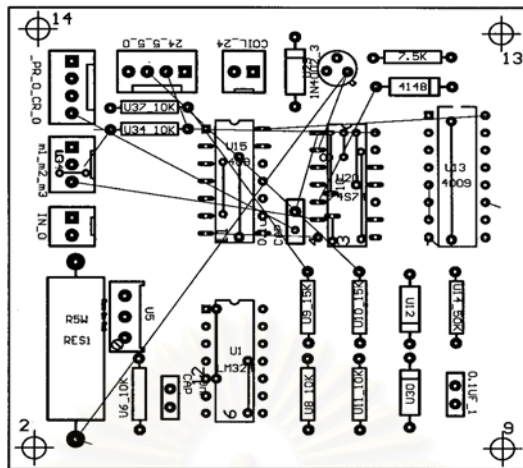
เกิดแรงดันตกคร่อมที่ความต้านทาน R1 (0.1 โอห์ม) เท่ากับ

$$\begin{aligned} V &= 0.833 \times 0.1 \\ &= 0.0833 \text{ โวลท์} \end{aligned}$$

แรงดัน V ค่านี้ต้องนำมาขยายเพื่อให้ได้เท่าค่าสัญญาณแรงดันอ้างอิง โดยผ่านออปแอมป์ A1 ที่ต่อเป็นวงจรตามแรงดัน(voltage follower) เพื่อสับสัญญาณให้ออปแอมป์ A2 ที่ทำหน้าที่ขยายสัญญาณได้อย่างถูกต้อง โดยสามารถปรับอัตราขยายได้จากความต้านทาน R2 และนำสัญญาณที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงที่วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ(comparator circuit) ดังในรูปที่ 3.3.2 เป็นการเปรียบเทียบทั้งครึ่งไซเคิลบวกและครึ่งไซเคิลลบของสัญญาณไซน์ หากกระแสที่ไหลในสายมีค่ามากเกินไปกว่า 5 แอมป์ เอาท์พุทของฟิลิปฟลอปที่อยู่ในรูปที่ 3.3.3 เปลี่ยนสถานะและรีเลย์ทำงานเปิดวงจรการทดสอบ คอนโทรลเลอร์รับรู้และเป็นการหยุดการเพิ่มแรงดันโดยอัตโนมัติ หรือสามารถกดสวิทช์และการสั่งควบคุมทางคอนโทรลเลอร์เพื่อปิดและ เปิดวงจรการทดสอบได้ เมื่อนำวงจรดังกล่าวในรูปที่ 3.3.1, 3.3.2 และ 3.3.3 มาต่อรวมกัน จะสามารถออกแบบลายวงจรบนแผ่นรวมวงจรได้ดังรูปที่ 3.3.4 และตำแหน่งการจัดวางอุปกรณ์แสดงได้ดังรูปที่ 3.3.5



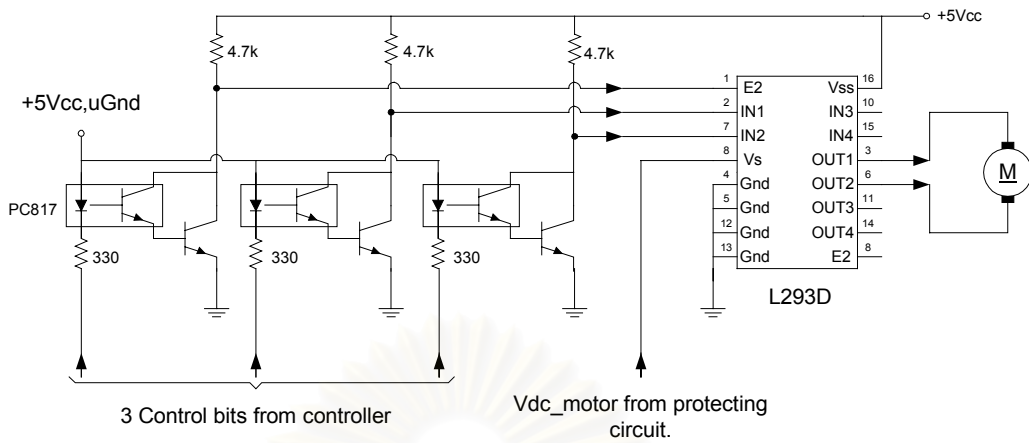
รูปที่ 3.3.4 แสดงลายวงจรตรวจจับการเกิดเบรกดาว์นบนแผ่นรวมวงจร



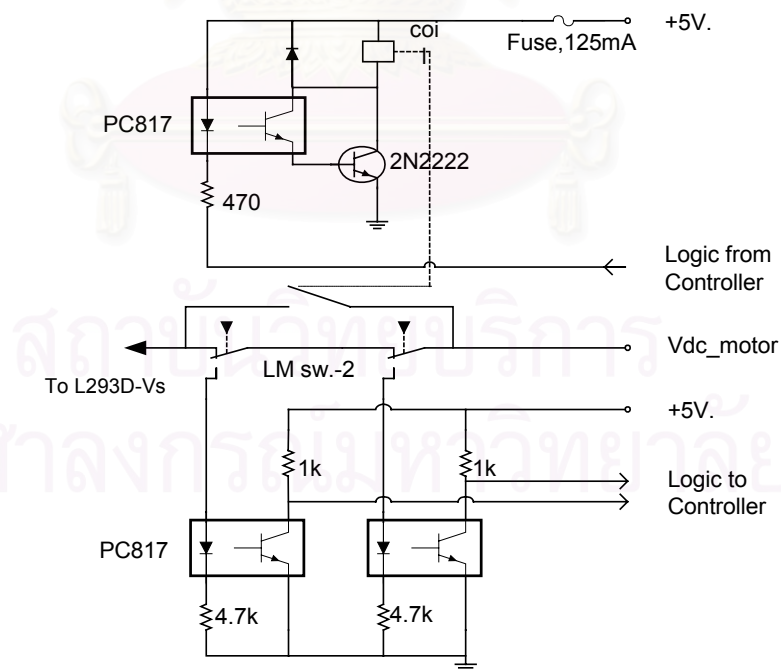
รูปที่ 3.3.5 แสดงตำแหน่งการวางอุปกรณ์ในวงจรตรวจจับการเกิดเบรกคาว์นบนแผ่นวงจรรวม

3.4 วงจรขั้วมอเตอร์[20]

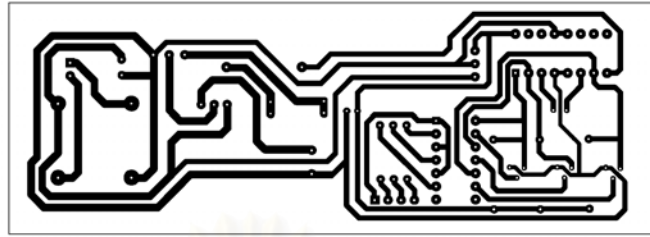
การปรับแรงดันของหม้อแปลงปรับแรงดันแบบอัตโนมัติสำหรับชุดทดสอบนี้ใช้มอเตอร์กระแสตรงในการปรับระดับแรงดันให้มากขึ้นหรือลดลงตามอัตราที่กำหนด โดยสามารถออกแบบวงจรขั้วมอเตอร์ด้วยไอซีสำเร็จรูปเบอร์L293D ซึ่งเป็นไอซีที่สามารถสั่งควบคุมการทำงานได้ด้วยลอจิกจากชุดคอนโทรลเลอร์แสดงดังรูปที่ 3.4.1 การควบคุมให้มอเตอร์หมุนไปและหมุนกลับรวมถึงการสั่งหยุดหมุนจึงควบคุมได้จากโปรแกรมควบคุมการทำงาน โดยในขณะที่มอเตอร์หมุนปรับระดับแรงดันอยู่นั้นการทำงานของชุดอ่านค่าแรงดันและแสดงผลก็จะทำงานไปพร้อมกัน ดังนั้นหากคอนโทรลเลอร์รับรู้ค่าแรงดันไม่อยู่ในย่านที่กำหนดก็จะสั่งให้มอเตอร์หยุดทำงานได้ ซึ่งเป็นการป้องกันความเสียหายที่จะเกิดตามมาจากการหมุนไม่หยุดของมอเตอร์โดยวิธีการทางซอฟต์แวร์ อย่างไรก็ตามการป้องกันความเสียหายทางกลด้วยวิธีการทางโปรแกรมอย่างเดียวอาจจะเกิดข้อผิดพลาดได้ เมื่อไอซีที่ใช้เก็บโปรแกรมและคอนโทรลเลอร์ขาดเสถียรภาพในการทำงานบางจังหวะตามสภาวะที่แตกต่างกันออกไป การป้องกันความเสียหายทางกลด้วยฮาร์ดแวร์จึงจำเป็นสำหรับการสำรองการป้องกัน จากรูปที่ 3.4.2 ด้วยการออกแบบวงจรการตัดกระแสที่จ่ายให้มอเตอร์เมื่อการหมุนของมอเตอร์ไม่อยู่ในตำแหน่งที่กำหนด



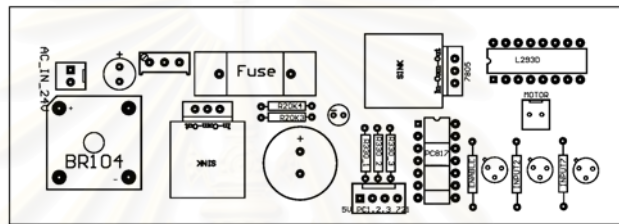
รูปที่ 3.4.1 วงจรขับมอเตอร์กระแสตรงด้วยไอซีเบอร์ L293D



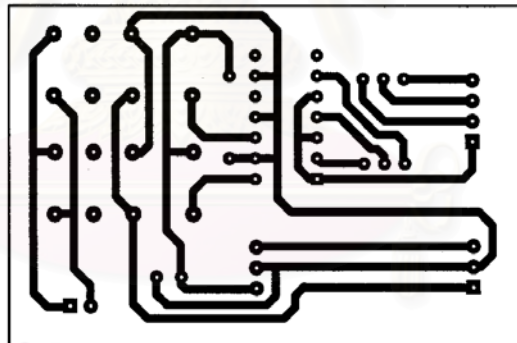
รูปที่ 3.4.2 วงจรป้องกันความเสียหายด้วยการตัดกระแสจ่ายมอเตอร์



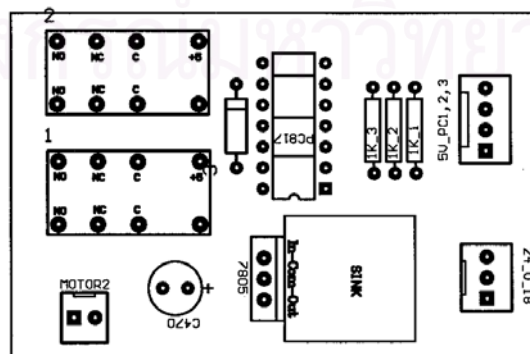
รูปที่ 3.4.3 ลายวงจรขับมอเตอร์กระแสตรงด้วยไอซีเบอร์ L293D บนแผ่นวงจรรวม



รูปที่ 3.4.4 ตำแหน่งอุปกรณ์วงจรขับมอเตอร์กระแสตรงด้วยไอซีเบอร์ L293D บนแผ่นวงจรรวม



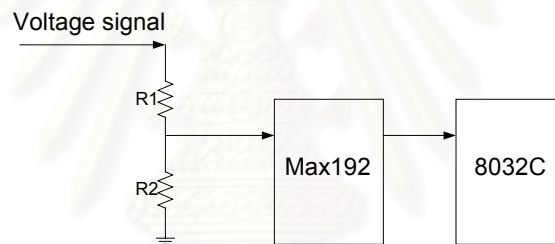
รูปที่ 3.4.5 ลายวงจรป้องกันมอเตอร์กระแสตรงด้วยการตัดกระแสจ่าย บนแผ่นวงจรรวม



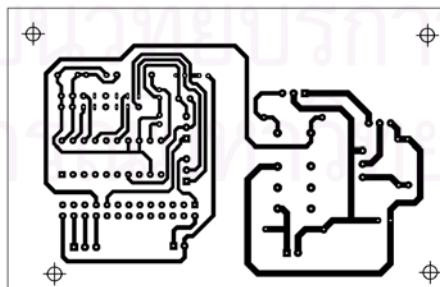
รูปที่ 3.4.6 ตำแหน่งอุปกรณ์ของวงจรป้องกันมอเตอร์กระแสตรงด้วยการตัดกระแสจ่าย

3.5 วงจรแปลงสัญญาณจากอนาลอกเป็นดิจิทัล[21]

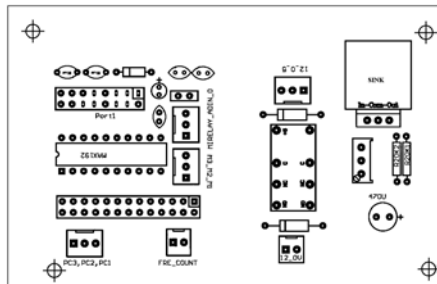
ในการออกแบบชุดทดสอบนี้มีการอ่านค่าแรงดันหรือการวัดค่าแรงดันที่ทำการทดสอบ ตลอดเวลาที่อยู่ระหว่างการทดสอบ โดยการรับค่าแรงดันที่มีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลาในอัตราส่วนค่าหนึ่งแล้วทำการแปลงที่สอดคล้องกับความจริง เพื่อการแสดงผลทางจอ LCD ดังนั้นจะต้องแปลงค่าสัญญาณที่รับมาแบบสัญญาณอนาลอกให้เป็นแบบสัญญาณดิจิทัลก่อนที่จะส่งค่าแบบดิจิทัลให้คอนโทรลเลอร์สามารถรับรู้ได้และจะทำงานตามขั้นตอนการคำนวณและแสดงผลอีกต่อไป การออกแบบวงจรแปลงสัญญาณนี้ใช้ไอซีสำเร็จรูปเบอร์ MAX192 ซึ่งเป็นไอซีประเภทที่เรียกว่า A/D ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์หลักในการทำงาน ซึ่งจะทำการส่งสัญญาณที่ได้ไปยังชุดคอนโทรลเลอร์ด้วยระบบอนุกรมที่ต่อตรงถึงกันโดยไม่ผ่านไอซีอินเตอร์เฟส สำหรับวงจรการต่อและการวางอุปกรณ์ลงบนแผ่นวงจรรวม แสดงได้ดังในรูปที่ 3.5.1, 3.5.2 และ 3.5.3



รูปที่ 3.5.1 การต่อวงจรแปลงสัญญาณจากอนาลอกเป็นดิจิทัล



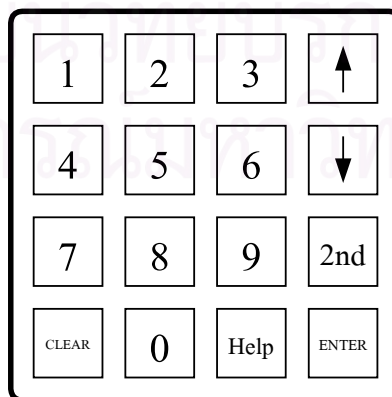
รูปที่ 3.5.2 ลายวงจรแปลงสัญญาณจากอนาลอกเป็นดิจิทัลบนแผ่นวงจรรวม



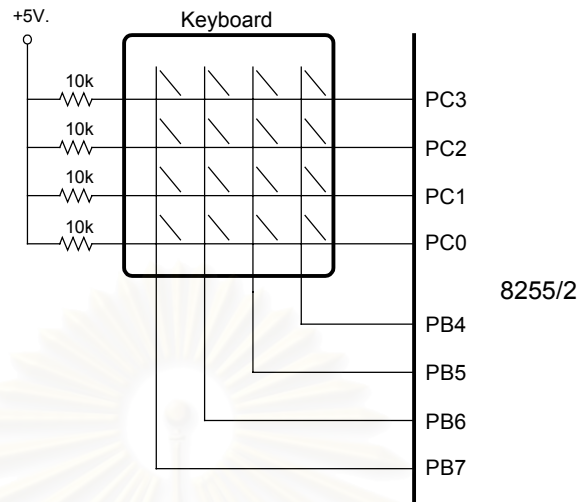
รูปที่ 3.5.3 ตำแหน่งอุปกรณ์วงจรแปลงสัญญาณจากอนาลอกเป็นดิจิตอลบนแผ่นวงจรรวม

3.6 วงจรสำหรับคีย์บอร์ดและการแสดงผล[22]

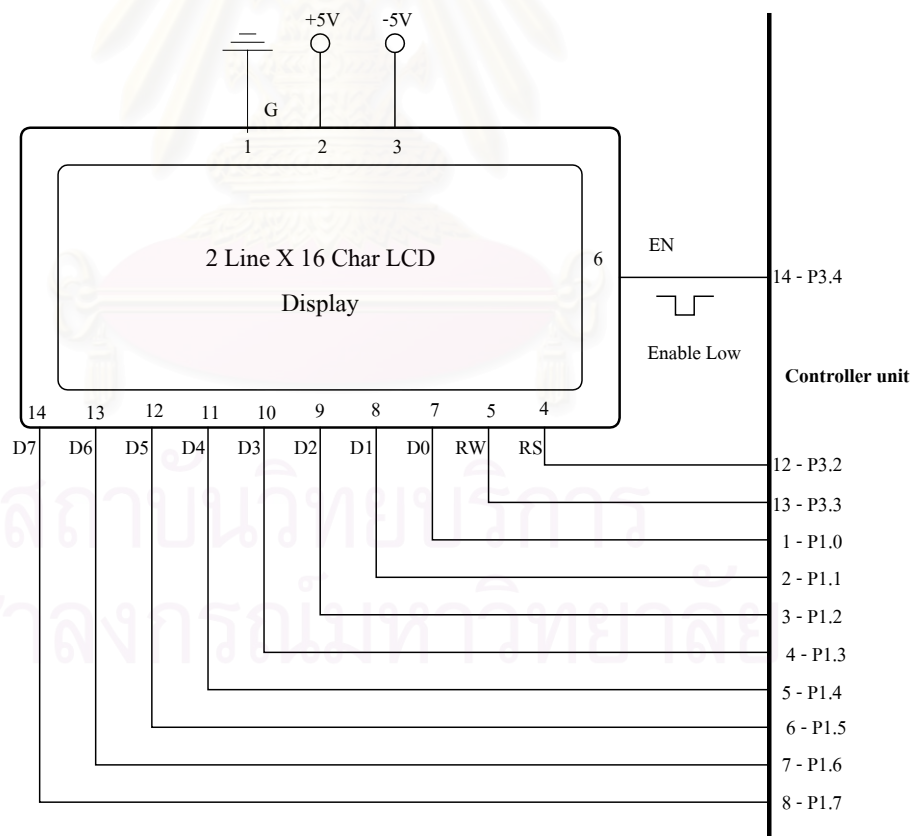
เพื่อให้การทำงานของชุดทดสอบเป็นไปในลักษณะของความต้องการและอยู่ในการควบคุมของผู้ที่จะทำการทดสอบได้ การออกแบบจึงนำอุปกรณ์ที่เรียกว่าคีย์บอร์ดและจอแสดงผลแบบ LCD (Liquid Crystal Display) มาต่อเข้ากับคอนโทรลเลอร์ ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวจัดเป็นอุปกรณ์ที่ถูกออกแบบมาเพื่อทำหน้าที่ในการติดต่อระหว่างผู้ใช้กับชุดควบคุมด้วยการรับคำสั่งจากผู้ใช้งานทางคีย์บอร์ดที่ต่อเข้ากับคอนโทรลเลอร์ด้วยไอซีอินเตอร์เฟสเบอร์ 8255 เพื่อควบคุมการทำงานหรือเรียกว่าการอินเตอร์เฟสระหว่างคนกับคอนโทรลเลอร์ส่วนจอแสดงผล LCD จะสื่อความหมายให้ผู้ใช้งานเข้าว่ามีการติดต่อกันในลักษณะใด ดังนั้นการออกแบบวงจรเพื่อให้อุปกรณ์ทั้งสองนี้ทำงานได้จึงเกี่ยวข้องกับการโปรแกรมชุดควบคุมตรงส่วนที่สอดคล้องกับตำแหน่งที่อุปกรณ์ทั้งสองต่อไปด้วยเสมอ โดยคีย์บอร์ดในชุดทดสอบนี้เป็นแบบเมตริก 4X4 มีรูปร่างภายนอกแสดงดังรูปที่ 3.6.1 ส่วนการต่อวงจรสำหรับคีย์บอร์ดแสดงด้วยรูปที่ 3.6.2 และจอแสดงผล LCD ที่เป็นแบบ 16 ตัวอักษร สองบรรทัด จากรูปที่ 3.6.3 แสดงการต่อวงจรของ LCD เข้ากับพอร์ตของคอนโทรลเลอร์



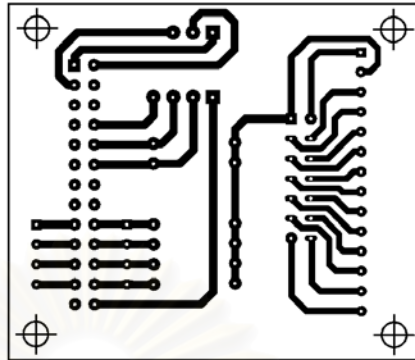
รูปที่ 3.6.1 คีย์บอร์ดแบบเมตริก 4X4



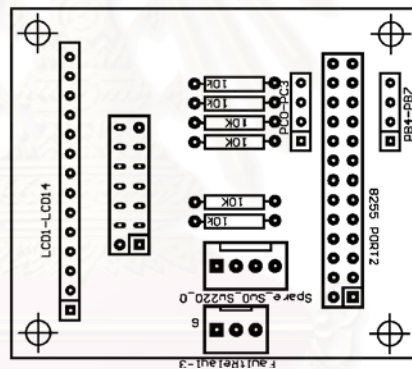
รูปที่ 3.6.2 วงจรการต่อคีย์บอร์ดกับคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 3.6.3 การต่อวงจรจอแสดงผลกับคอนโทรลเลอร์

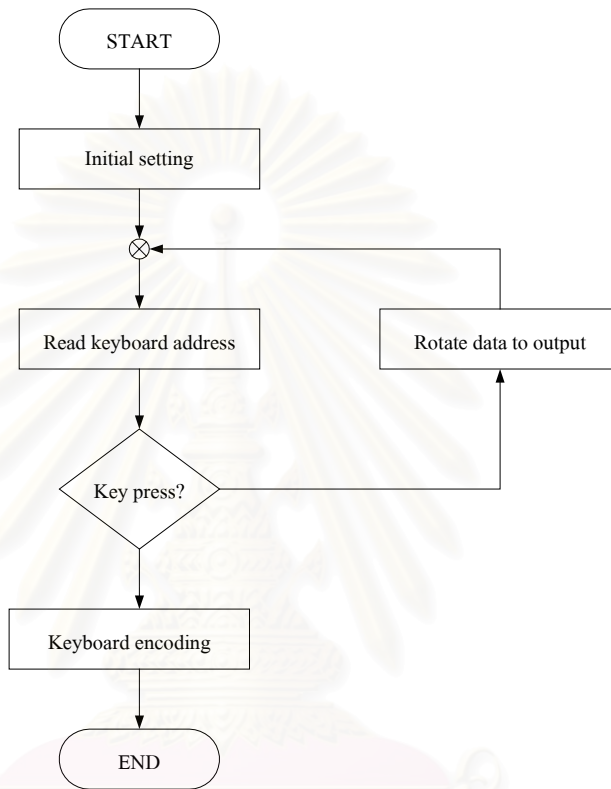


รูปที่ 3.6.4 แสดงลายวงจรรวมสำหรับคีย์บอร์ดและจอแสดงผลแบบ LCD



รูปที่ 3.6.5 แสดงตำแหน่งการวางอุปกรณ์สำหรับคีย์บอร์ดและจอแสดงผลแบบ LCD

ส่วนการโปรแกรมสำหรับรับรู้การกดคีย์บอร์ด ออกแบบลำดับการทำงานของคอนโทรลเลอร์ได้ตามรูปที่ 3.6.6 ซึ่งเป็นการส่งข้อมูลค่า 11101111 ออกไปทางพอร์ต B ของไอซีอินเตอร์เฟซเบอร์ 8255 ที่ตำแหน่งใช้งาน PB4 – PB7 หมายถึงค่า 1110 สำหรับการรับรู้การกดคีย์ในคอลัมน์ที่ 4 และเลื่อนบิตไปทางซ้ายทีละบิตสำหรับการตรวจสอบในคอลัมน์อื่นที่สอดคล้อง หากมีการกดคีย์จะได้ค่ารหัสออกมาค่าหนึ่งทีบันทึกไว้ให้คอนโทรลเลอร์รับรู้ว่าเป็นการกดแป้นคีย์ใดของคีย์บอร์ด สำหรับการถอดรหัสคีย์บอร์ดโดยค่าที่ได้จากการกดคีย์ แสดงดังในตารางที่ 3.3



รูปที่ 3.6.6 แสดงผังงานการโปรแกรมสำหรับคีย์บอร์ด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.3 แสดงรหัสคีย์บอร์ด

| Key Code(Binary) | | Key Code (Hex) | Key |
|------------------|---------|-------------------|-----------------|
| PB7-PB4 | PC3-PB0 | | |
| 1110 | 1110 | EE | ENTER |
| 1110 | 1101 | ED | 2 ND |
| 1110 | 1011 | EB | DOWN |
| 1110 | 0111 | E7 | UP |
| 1101 | 1110 | DE | HELP |
| 1101 | 1101 | DD | 9 |
| 1101 | 1011 | DB | 6 |
| 1101 | 0111 | D7 | 3 |
| 1011 | 1110 | BE | 0 |
| 1011 | 1101 | BD | 8 |
| 1011 | 1011 | BB | 5 |
| 1011 | 0111 | B7 | 2 |
| 0111 | 1110 | 7E | CLEAR |
| 0111 | 1101 | 7D | 7 |
| 0111 | 1011 | 7B | 4 |
| 0111 | 0111 | 77 | 1 |

3.7 โปรแกรมควบคุมการทำงาน

ชุดทดสอบความคงทนไดอิเล็กตริกกระแสสลับของน้ำมันหม้อแปลงมีการโปรแกรมเพื่อควบคุมการทำงานของชุดทดสอบนี้ให้สามารถทำงานได้จากเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลด้วย ดังนั้นจึงมีการโปรแกรมที่ชุดทดสอบที่ควบคุมด้วยไอซีเบอร์ 8032 เป็นหัวใจหลักในการทำงานและการโปรแกรมที่เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลเพื่อติดต่อกับชุดทดสอบในการสั่งควบคุมการทำงาน

โปรแกรมที่ใช้ควบคุมการทำงานจึงเขียนในสองส่วนคือ โปรแกรมที่เขียนขึ้นด้วยภาษาแอสเซมบลี(Assembly) เพื่อการควบคุมการทำงานทั้งหมดของชุดทดสอบและทำหน้าที่ในการเชื่อมโยงสื่อสารกับคอมพิวเตอร์ทางช่องสื่อสารอนุกรม(Serial Port) เพื่อการส่งข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์ที่จะดำเนินการต่อไปในกรณีที่ต้องการใช้คอมพิวเตอร์อำนวยความสะดวกในการควบคุมการทำงาน การพิมพ์ผลลัพธ์หรือการแสดงผลแบบรูปภาพ โปรแกรมอีกส่วนหนึ่งนั้นเขียนขึ้นด้วยภาษาเบสิกแบบใช้ระบบปฏิบัติการบนวินโดวส์เป็นฐาน(Visual basic)

3.7.1 โปรแกรมสำหรับคอนโทรลเลอร์[17]

สำหรับโปรแกรมในส่วนของภาษาแอสเซมบลีเขียนขึ้นสำหรับควบคุมการทำงานของไอซีชิพในตระกูล MCS8051 ซึ่งการออกแบบชุดทดสอบนี้เลือกใช้ไอซีเบอร์ 8032C การพัฒนาโปรแกรมผ่านทางระบบปฏิบัติการดอส โปรแกรมภาษาแอสเซมบลีจะเป็นโปรแกรมหลักในการทำงานทั้งหมดของชุดทดสอบ โดยมีลำดับขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมควบคุมขบวนการทั้งหมดแสดงได้ดังรูปที่ 3.6 โดยแต่ละรูปเป็นการแสดงลำดับภาพขั้นตอนการโปรแกรม ดังนี้

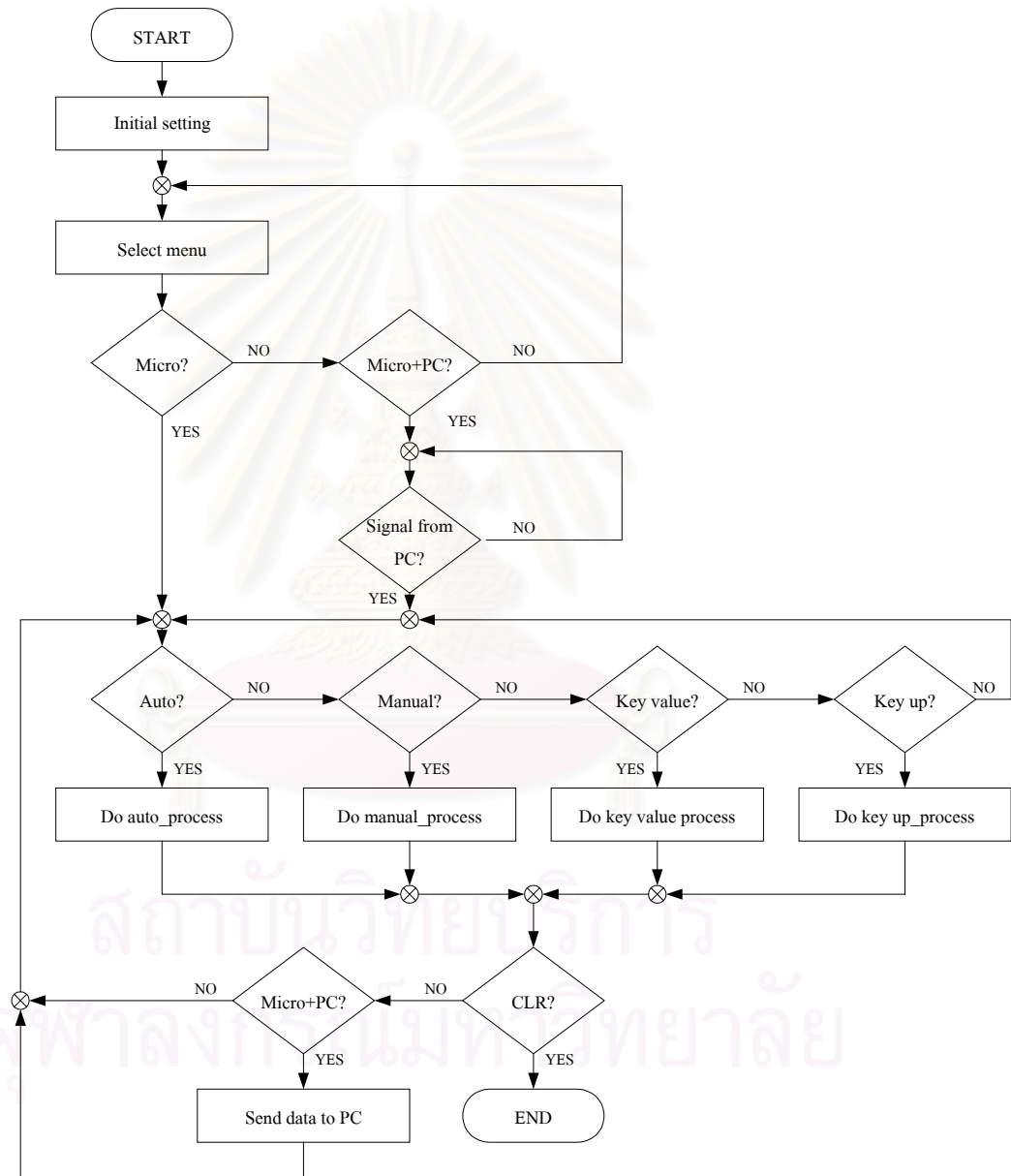
รูปที่ 3.7.1 แสดงลำดับภาพขั้นตอนการโปรแกรมการทำงานหลักของคอนโทรลเลอร์ ซึ่งจะรับคำสั่งการเลือกรูปแบบการทำงานว่าจะใช้คอมพิวเตอร์หรือคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมการทำงานโดยจะต้องต่อสายเชื่อมโยงทางช่องทางสื่อสารอนุกรมในกรณีที่ต้องการใช้งานกับคอมพิวเตอร์หรือกรณีที่ต้องการพิมพ์ผลลัพธ์

รูปที่ 3.7.2 แสดงลำดับภาพขั้นตอนการโปรแกรมการทำงานแบบที่ละขั้นตอน (Manual) เป็นการควบคุมการทำงานตามขั้นตอนการทดสอบที่ละขั้นโดยการตัดสินใจของผู้ทดสอบ

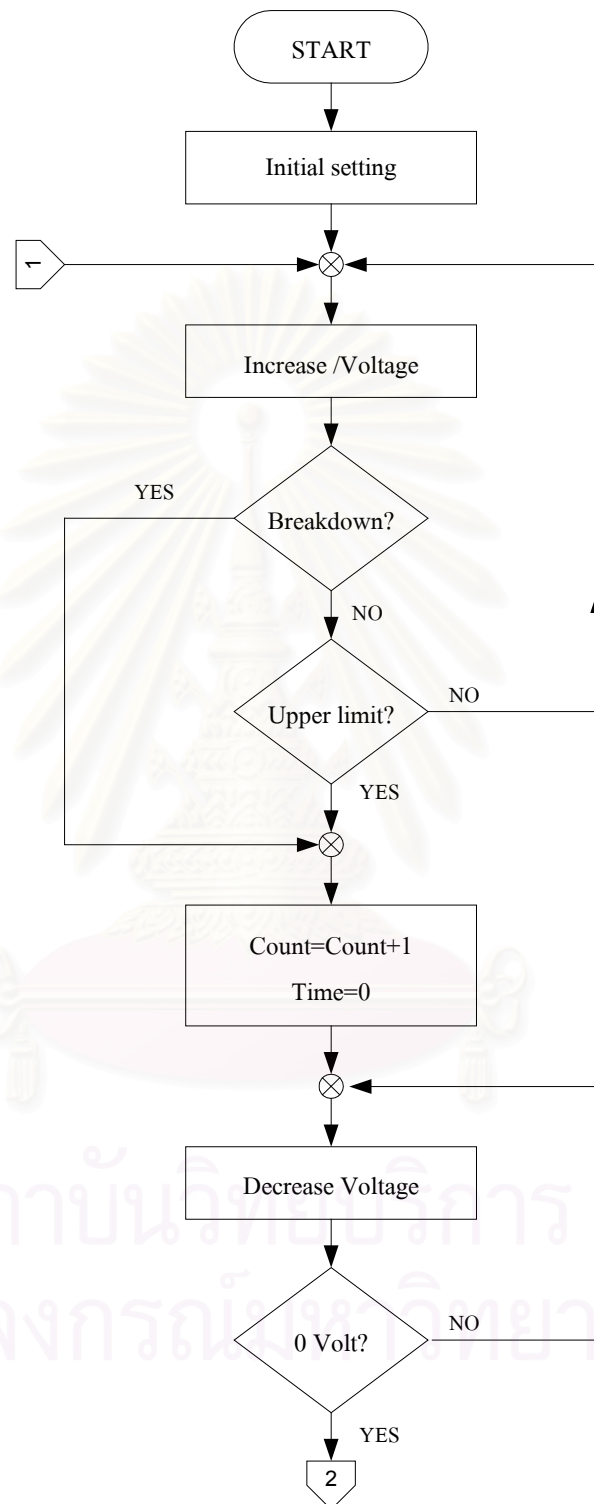
รูปที่ 3.7.3 แสดงลำดับภาพขั้นตอนการโปรแกรมการทำงานแบบอัตโนมัติ(Auto) เป็นการควบคุมการทำงานอัตโนมัติทั้งหมดทุกขั้นตอนของการทดสอบ

รูปที่ 3.7.4 แสดงลำดับภาพขั้นตอนการโปรแกรมการทำงานแบบป้อนค่าแรงดัน เป็นการรับค่าแรงดันค่าสุดท้ายที่จะให้หยุดการเพิ่มค่าแรงดัน

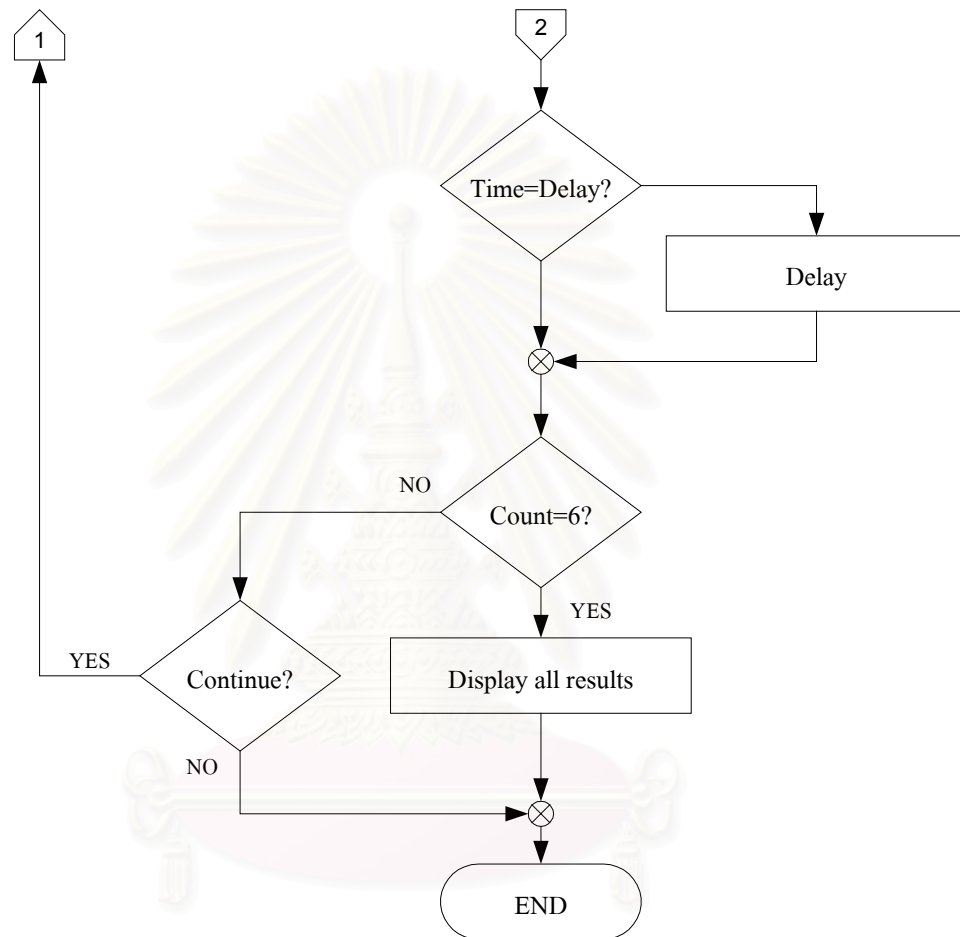
รูปที่ 3.7.5 แสดงลำดับภาพขั้นตอนการโปรแกรมการทำงานแบบกดคีย์ลูกศรเพิ่มค่าแรงดัน เป็นการทำงานเพิ่มค่าแรงดัน เมื่อมีการกดคีย์ลูกศร



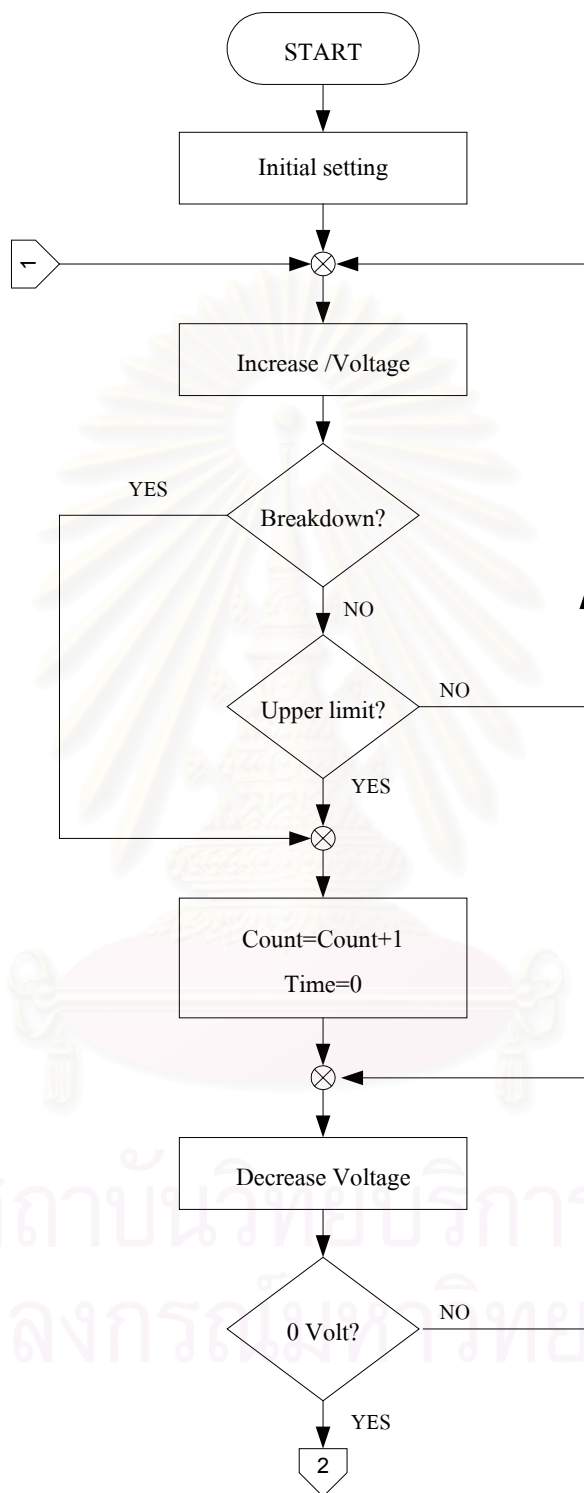
รูปที่ 3.7.1 แสดงลำดับภาพขั้นตอนการโปรแกรมการทำงานหลักของคอนโทรลเลอร์



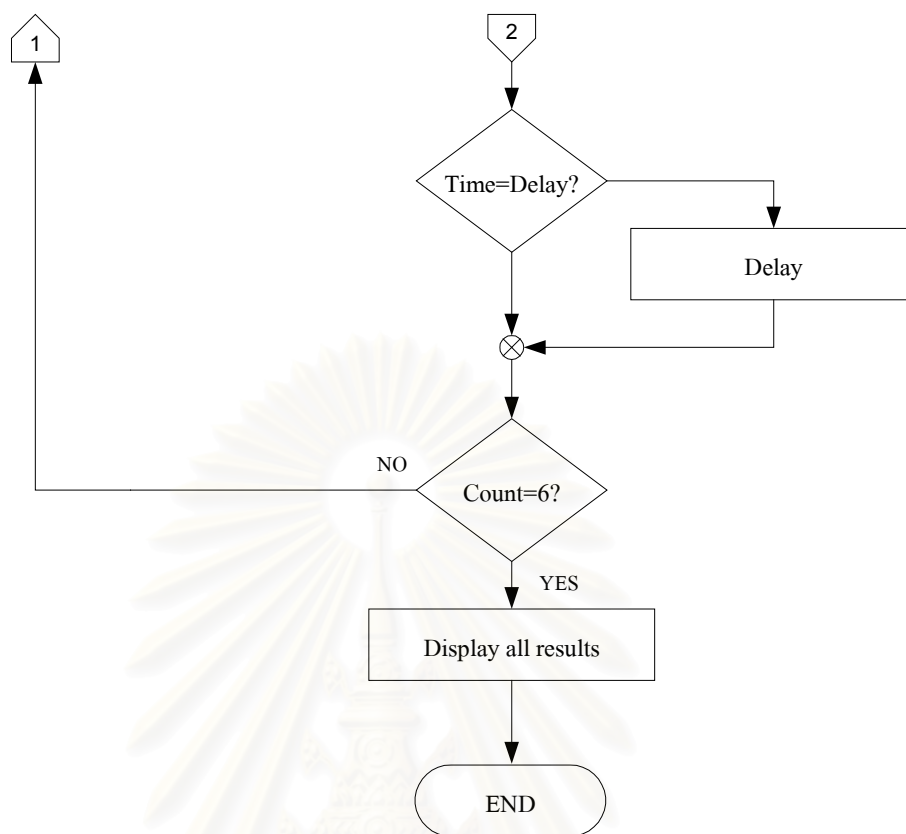
รูปที่ 3.7.2 แสดงลำดับภาพขั้นตอนการโปรแกรมการทำงานแบบที่ละขั้นตอน(Manual)



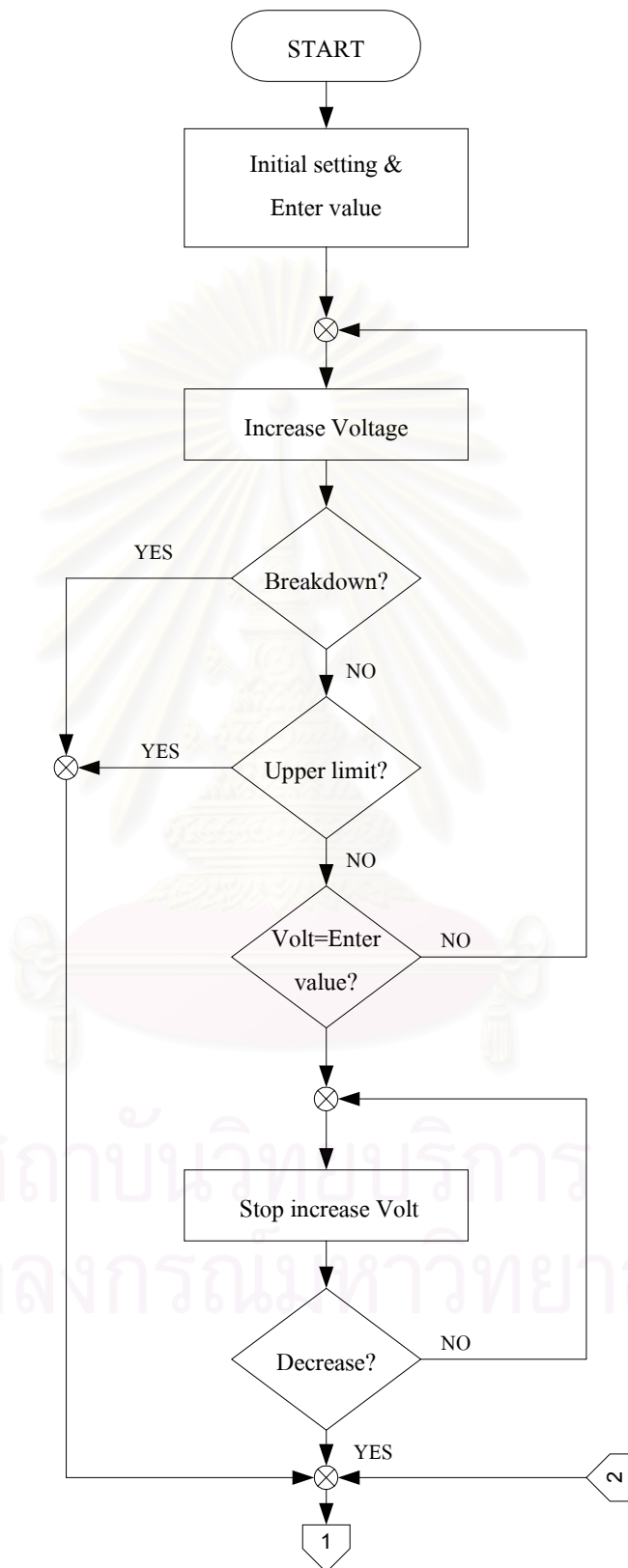
รูปที่ 3.7.2(ต่อ) แสดงลำดับภาพขั้นตอนการโปรแกรมการทำงานแบบที่ละขั้นตอน(Manual)



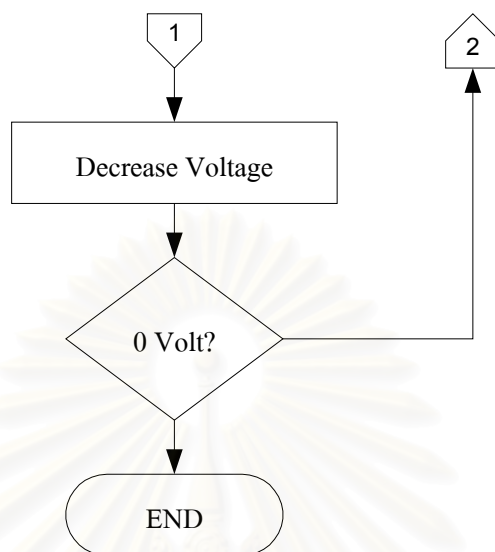
รูปที่ 3.7.3 แสดงลำดับภาพขั้นตอนการโปรแกรมการทำงานแบบอัตโนมัติ(Auto)



รูปที่ 3.7.3(ต่อ) แสดงลำดับภาพขั้นตอนการโปรแกรมการทำงานแบบอัตโนมัติ(Auto)

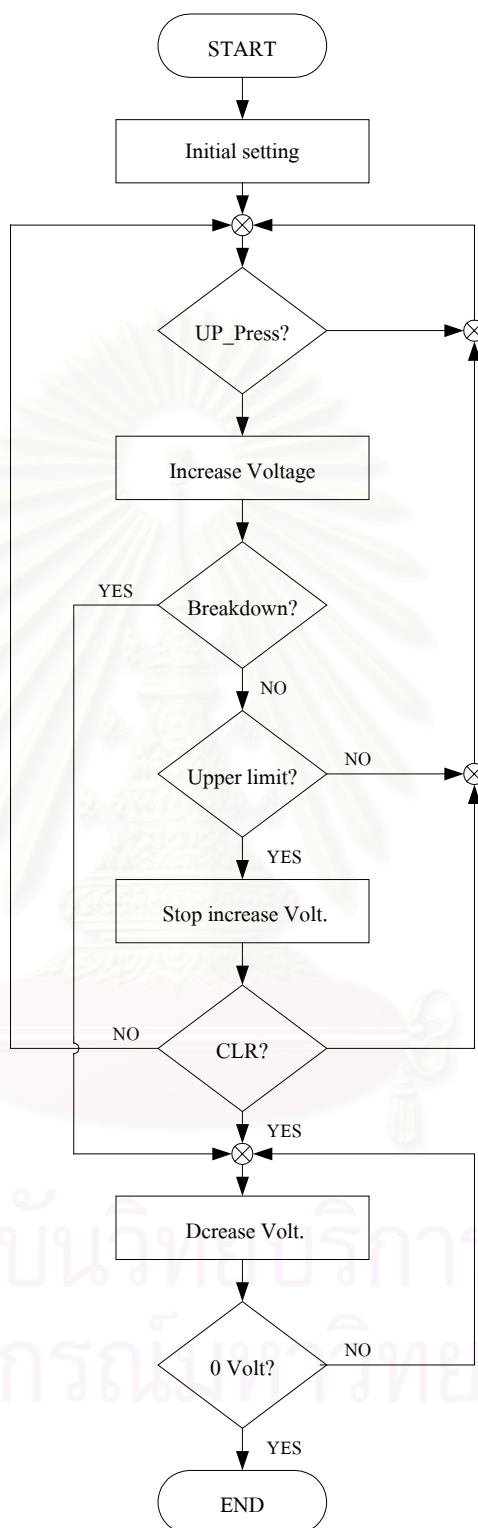


รูปที่ 3.7.4 แสดงลำดับภาพขั้นตอนการโปรแกรมการทำงานแบบป้อนค่าแรงดัน



รูปที่ 3.7.4(ต่อ) แสดงลำดับภาพขั้นตอนการโปรแกรมการทำงานแบบป้อนค่าแรงดัน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.7.5 แสดงลำดับภาพขั้นตอนการโปรแกรมการทำงานแบบกดคีย์ถูกตรเพิ่มค่าแรงดัน

3.7.2 โปรแกรมสำหรับคอมพิวเตอร์[23]

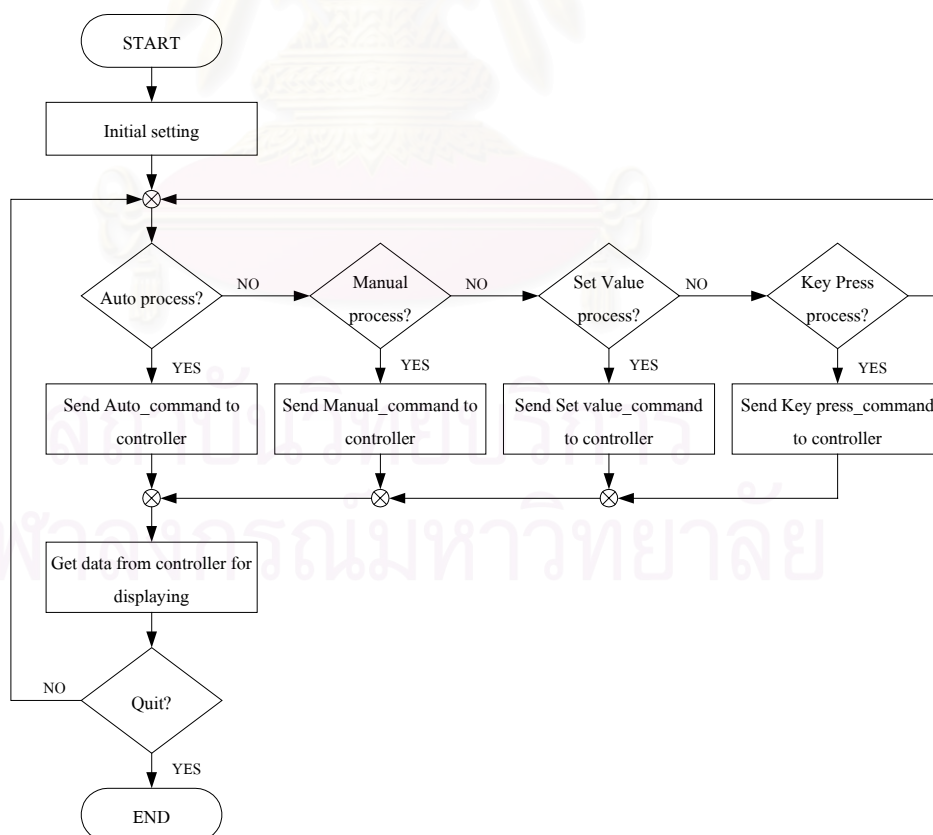
โปรแกรมสำหรับการรับข้อมูลและส่งสัญญาณคำสั่งระหว่างคอมพิวเตอร์และคอนโทรลเลอร์ เพื่อการแสดงผลในลักษณะกราฟของค่าแรงดันเทียบกับเวลา การโปรแกรมภาษาเบสิกที่มีรูปแบบการเขียนบนวินโดวส์ที่เรียกว่าวิชวลเบสิก(visual basic) มีลำดับขั้นตอนการโปรแกรมควบคุมและแสดงผลจากคอมพิวเตอร์ดังรูปที่ 3.6(จ) ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

(1) เริ่มจากการปรับตั้งค่าองค์ประกอบพื้นฐานของโปรแกรม เช่น การกำหนดรูปแบบของการทดสอบว่าจะดำเนินการทดสอบ เลือกช่องทางในการติดต่อกับคอนโทรลเลอร์

(2) เริ่มการส่งคำสั่งไปคอนโทรลเลอร์ เพื่อระบุนการเริ่มต้นและลักษณะการดำเนินการทดสอบให้ไอซีคอนโทรลเลอร์เริ่มขั้นตอนการส่งควบคุมการทำงาน

(3) ตรวจสอบที่พอร์ตช่องทางการสื่อสารว่ามีข้อมูลใดๆมาหรือไม่ หากมีข้อมูลที่ส่งมาจากคอนโทรลเลอร์ก็นำไปผ่านขั้นตอนการถอดรหัสข้อมูลนั้นก่อน แล้วนำไปแสดงผล

(4) ตรวจสอบว่าไอซีคอนโทรลเลอร์ส่งข้อมูลสุดท้ายมาหรือยัง หากเป็นข้อมูลสุดท้ายให้ทำการแสดงค่าผลลัพธ์ที่ได้ทั้งหมดและค่าเฉลี่ยตามมาตรฐาน



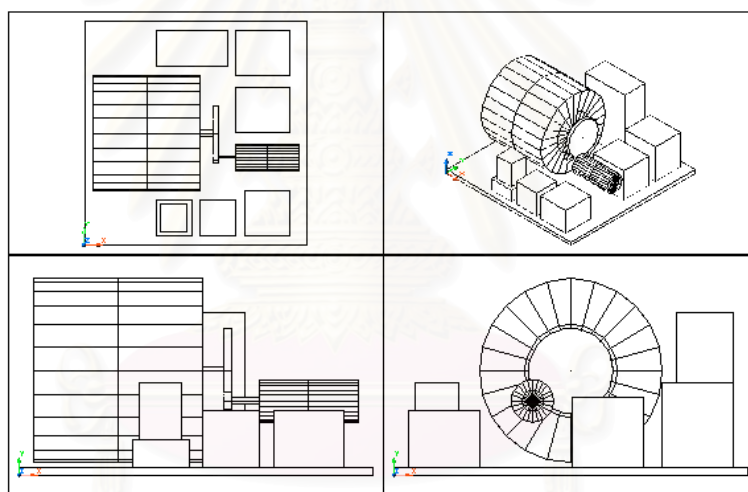
รูปที่ 3.7.6 แผนภาพแสดงลำดับขั้นตอนการโปรแกรมควบคุมและแสดงผลจากคอมพิวเตอร์

3.8 โครงสร้างประกอบ

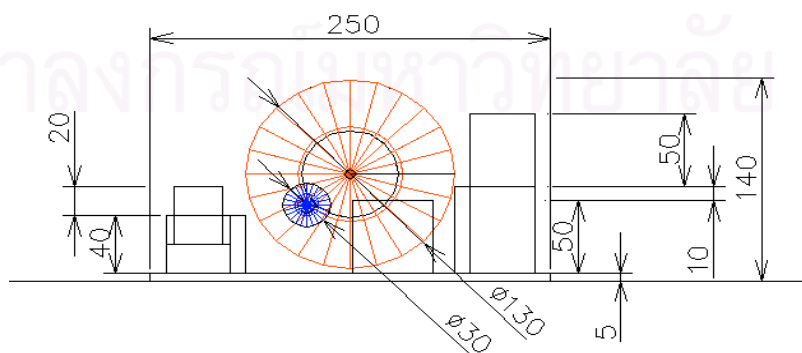
เมื่อนำแผ่นวงจรรวมอุปกรณ์ต่างๆมาต่อรวมกันเพื่อการประกอบสร้างในขั้นสุดท้าย ในขั้นแรกได้จำลองขนาดและการวางอุปกรณ์ต่างๆ โดยโปรแกรมสำเร็จที่สามารถประมาณขนาดและตำแหน่งของอุปกรณ์ตามโครงสร้างต่างๆได้

3.8.1 โครงสร้างชุดแรก

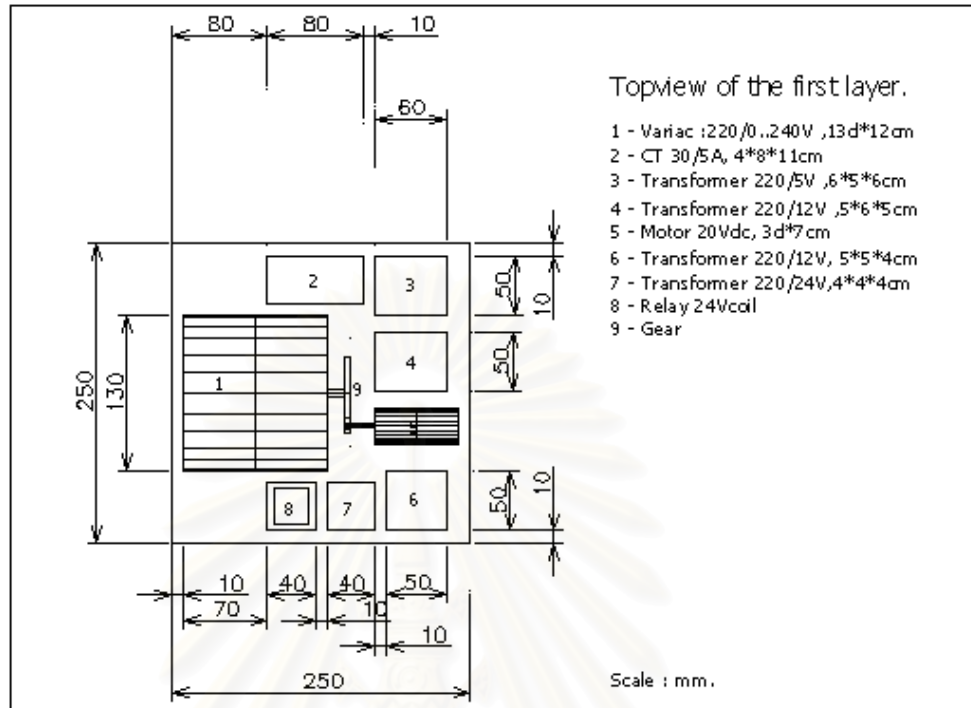
โครงสร้างในชุดนี้ประกอบด้วยหม้อแปลงปรับแรงดัน มอเตอร์ เฟืองทด แมกเนติกคอนแทคเตอร์และหม้อแปลงที่ใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้แก่วงจรรวมที่เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และชุดคอนโทรลเลอร์ แสดงภาพที่ได้จากการจำลองดังรูปที่ 3.8.1, 3.8.2 และ 3.8.3



รูปที่ 3.8.1 แสดงภาพมุมมองด้านบน ด้านข้าง ด้านหน้าและภาพ 3มิติของโครงสร้างชุดแรก



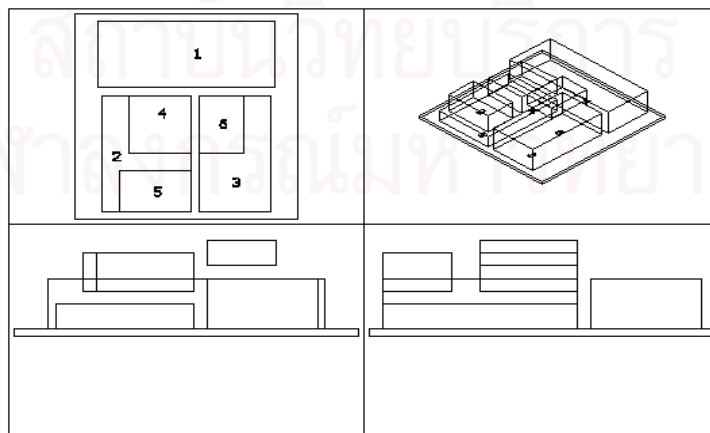
รูปที่ 3.8.2 แสดงภาพขนาดของโครงสร้างด้านข้างชุดแรก (หน่วยวัดเป็นมิลลิเมตร)



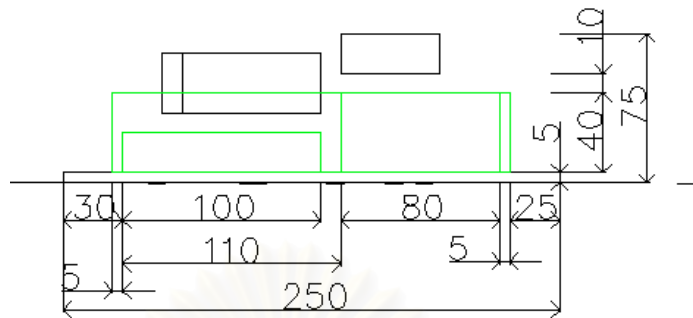
รูปที่ 3.8.3 แสดงภาพขนาดของโครงสร้างด้านบน ชุดแรก(หน่วยวัดเป็นมิลลิเมตร)

3.8.2 โครงสร้างชุดที่สอง

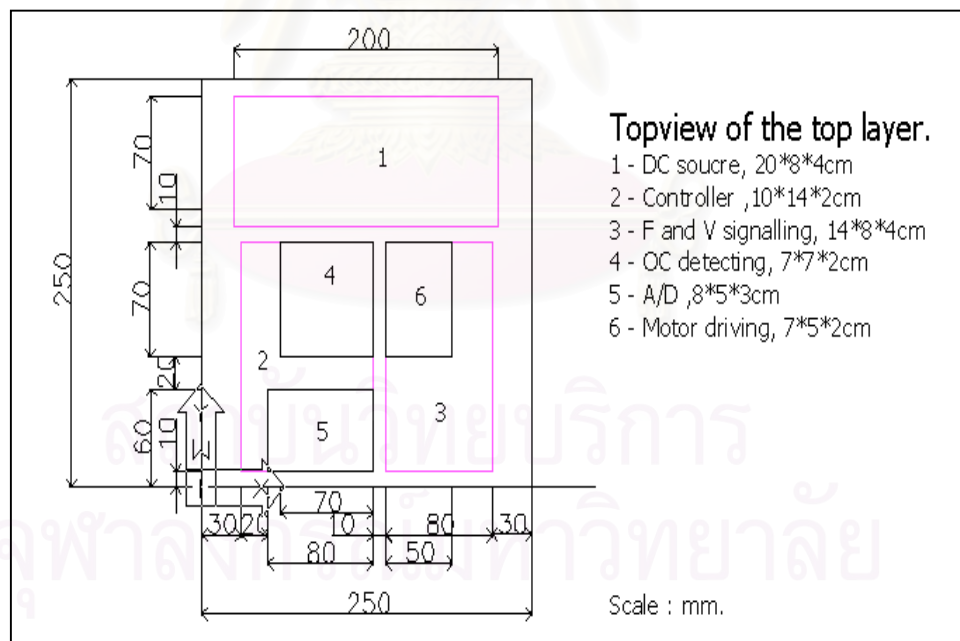
โครงสร้างในชุดนี้ประกอบด้วยแผ่นวงจรรวมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ต่อรวมกับชุดคอนโทรลเลอร์ และแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับวงจรต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.8.4, 3.8.5 และ 3.8.6



รูปที่ 3.8.4 แสดงภาพมุมมองด้านบน ด้านข้าง ด้านหน้าและภาพ 3มิติของโครงสร้างชุดที่สอง



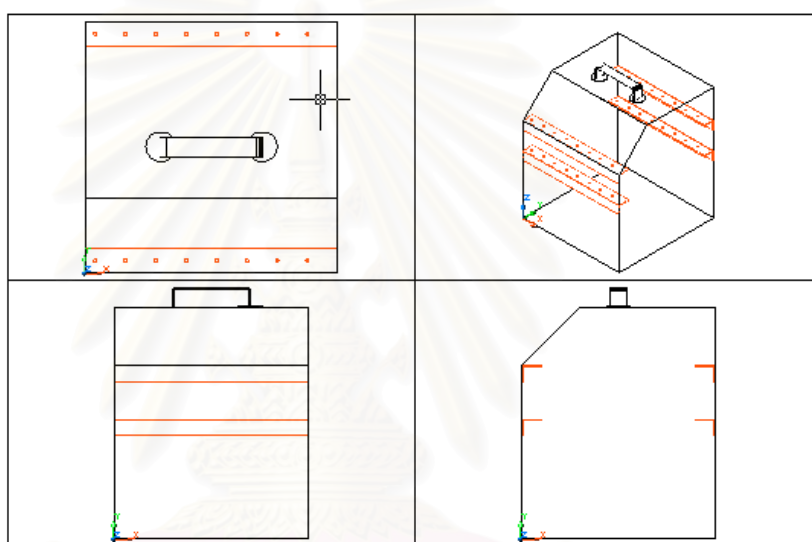
รูปที่ 3.8.5 แสดงภาพขนาดของโครงสร้างด้านข้างชุดที่สอง (หน่วยวัดเป็นมิลลิเมตร)



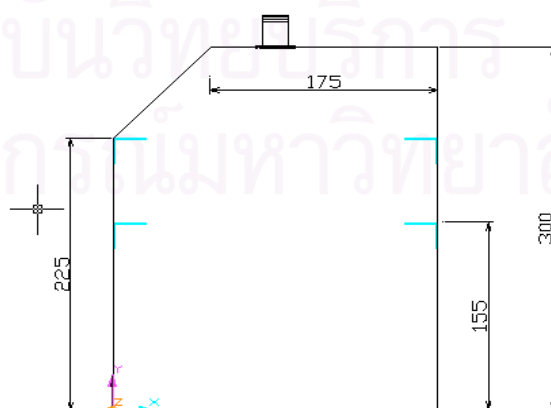
รูปที่ 3.8.6 แสดงภาพขนาดของโครงสร้างด้านบน ชุดที่สอง(หน่วยวัดเป็นมิลลิเมตร)

3.8.3 โครงสร้างกล่องบรรจุ

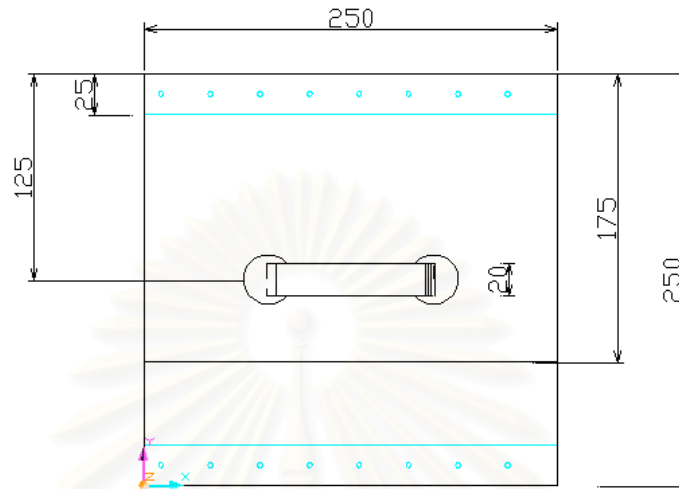
เป็นโครงสร้างกล่องที่ออกแบบมาให้ผู้ที่ทำการทดสอบสามารถ มองเห็นจอ LCD และการกดคีย์บอร์ดสะดวกในระหว่างดำเนินการทดสอบ โดยใช้เหล็กเป็นวัสดุประกอบเพื่อความแข็งแรงและทนทาน ดังแสดงในรูปที่ 3.8.7, 3.8.8 และ 3.8.9 เมื่อนำโครงสร้างต่างๆมาประกอบรวมกันแล้วจะได้ดังรูปที่ 3.8.10



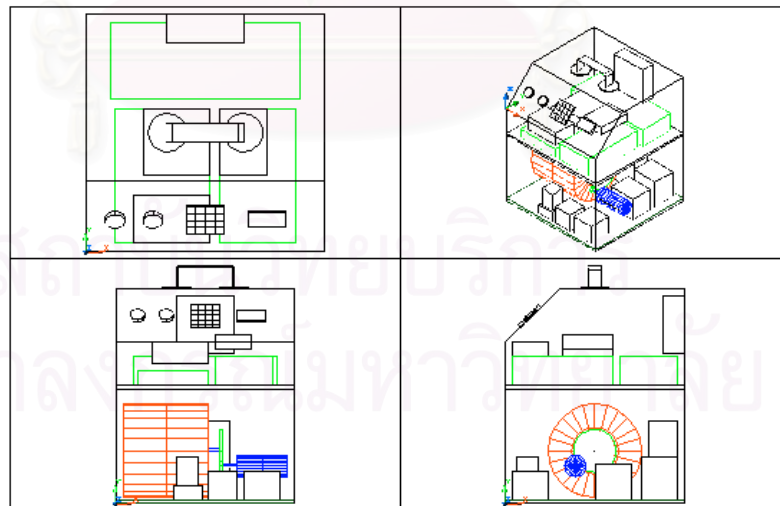
รูปที่ 3.8.7 แสดงภาพมุมมองด้านบน ด้านข้าง ด้านหน้าและภาพ 3มิติของกล่องบรรจุ



รูปที่ 3.8.8 แสดงภาพขนาด ของโครงสร้างด้านข้างของกล่องบรรจุ(หน่วยวัดเป็นมิลลิเมตร)



รูปที่ 3.8.9 แสดงภาพขนาดของโครงสร้างด้านบน ของกล่องบรรจุ(หน่วยวัดเป็นมิลลิเมตร)



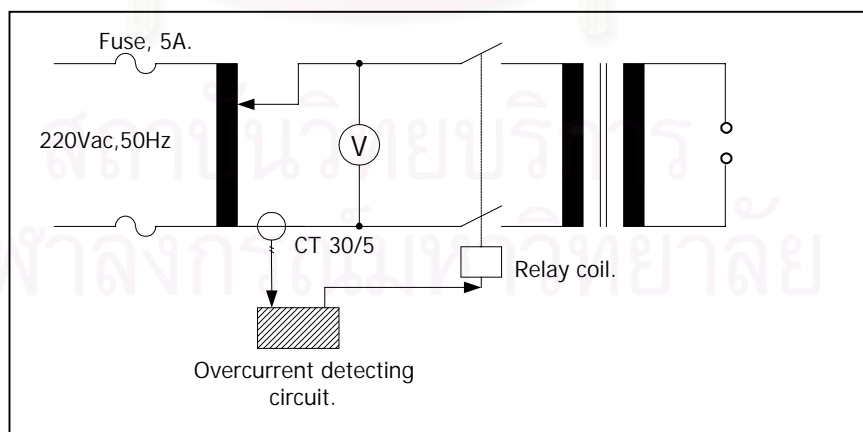
รูปที่ 3.8.10 แสดงภาพมุมมองด้านบน ด้านข้าง ด้านหน้าและภาพ 3มิติของโครงสร้างทั้งหมด

บทที่ 4 การทดสอบใช้งาน

การทดสอบที่จะกล่าวถึงดังต่อไปนี้เป็นรูปแบบของการตรวจสอบการทำงานของ ส่วนต่างๆของชุดทดสอบไดอิเล็กตริกกระแสสลับของน้ำมันหม้อแปลงที่จำเป็นต้องทดสอบการทำงานที่ละส่วนก่อนการนำมาต่อรวมกันทั้งหมด เพื่อให้สามารถตรวจแก้ไขได้ง่ายในกรณีที่การทำงานไม่เป็นไปตามที่ได้ออกแบบไว้หรือกรณีที่การทำงาน โดยพอจะสรุปได้ว่าส่วนสำคัญที่จำเป็นต้องตรวจสอบการทำงานในขั้นต้นก่อนนี้คือ วงจรตรวจจับการเกิดกระแสเกิน วงจรวัดและ แสดงผลค่าแรงดันแบบดิจิตอล หลังจากประกอบและติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆจนครบ จึงทำการทดสอบการใช้งานจริงตามมาตรฐานการทดสอบหาค่าความคงทนไดอิเล็กตริกกระแสสลับ

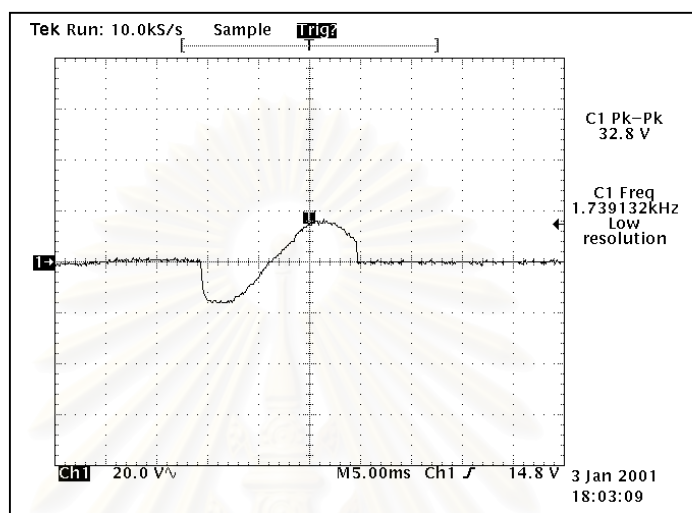
4.1 การทดสอบวงจรตรวจจับการเกิดกระแสเกิน

วงจรมีถูกออกแบบมาเพื่อตรวจสอบสภาวะการไหลของกระแสในวงจรการทดสอบ หากกระแสในวงจรไหลมากกว่าค่าที่ตั้งไว้หรือเกิดสภาวะดีสชาร์จเบรคดาวน์ วงจรตรวจจับการเกิดกระแสเกินก็จะส่งสัญญาณไปกระตุ้นให้รีเลย์ทำงาน เพื่อเปิดวงจรหรือตัดวงจรไม่ กระแสไหลต่อเนื่องต่อไปและส่งลจิกไปชุดคอนโทรลเลอร์ให้เกิดการรับรู้ ดังนั้นการตรวจสอบว่าวงจรมีทำงานได้ตามที่ออกแบบไว้ได้จริง จึงสามารถทดสอบได้จากการทดสอบด้วยวงจรดังรูป

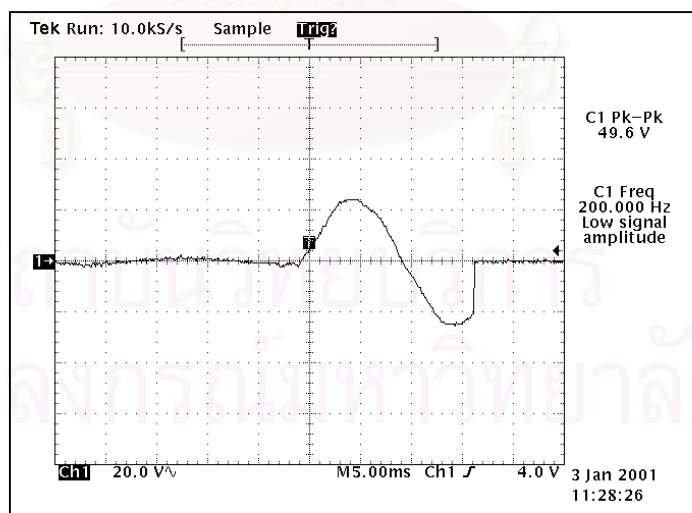


รูปที่ 4.1.1 ไดอะแกรมการทดสอบวงจรตรวจจับการเกิดกระแสเกิน

จากการทดสอบตามวงจรถูกที่ 4.1.1 เมื่อแรงดันทดสอบทางด้านแรงต่ำไม่เกิน 20 โวลต์ จำนวน 50 ครั้ง ปรากฏว่าวงจรตรวจจับการเกิดกระแสเกินทำงานเปิดวงจรทุกครั้ง โดยมีตัวอย่างสัญญาณกระแสที่ถูกตัดแสดงดังรูปที่ 4.1.2



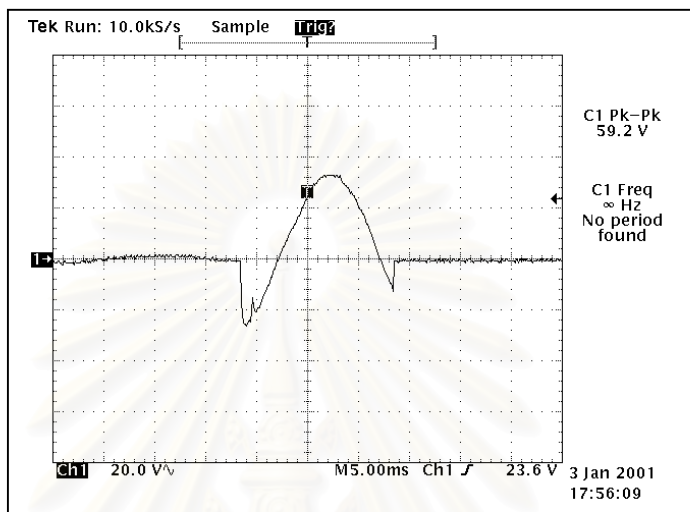
(ก)



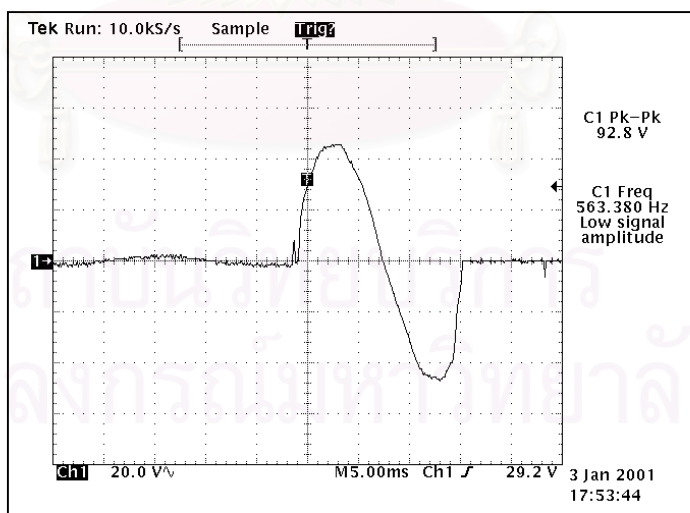
(ข)

รูปที่ 4.1.2 (ก)และ (ข) แสดงสัญญาณกระแสเมื่อเกิดลัดวงจรและเปิดวงจรด้วยวงจรตรวจสอบกระแสเกิน ขณะแรงดันทดสอบด้านแรงต่ำไม่เกิน 20 โวลต์

จากการทดสอบตามวงจรรูปที่ 4.1.1 เมื่อแรงดันทดสอบทางด้านแรงต่ำ 20 โวลต์ ถึง 50 โวลต์ จำนวน 50 ครั้ง ปรากฏว่าวงจรตรวจจับการเกิดกระแสเกินทำงานเปิดวงจรทุกครั้ง โดยมีตัวอย่างสัญญาณกระแสที่ถูกตัดแสดงดังรูปที่ 4.1.3



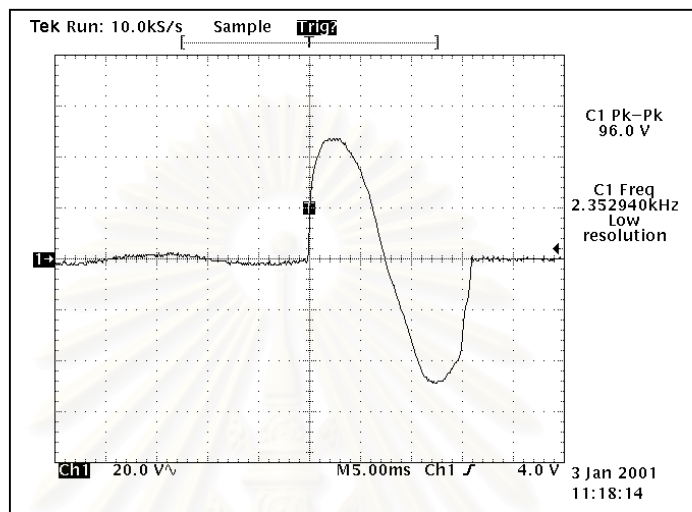
(ก)



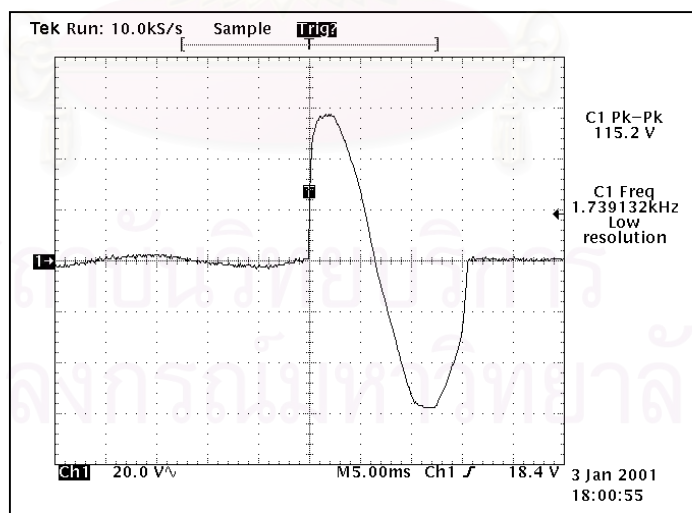
(ข)

รูปที่ 4.1.3 (ก)และ (ข) แสดงสัญญาณกระแสเมื่อเกิดลัดวงจรและเปิดวงจรด้วยวงจรตรวจสอบกระแสเกิน ขณะแรงดันทดสอบด้านแรงต่ำ 20-50 โวลต์

จากการทดสอบตามวงจรรูปที่ 4.1.1 เมื่อแรงดันทดสอบทางด้านแรงต่ำ 50 โวลต์ ถึง 100 โวลต์ จำนวน 50 ครั้ง ปรากฏว่าวงจรตรวจจับการเกิดกระแสเกินทำงานเปิดวงจรทุกครั้ง โดยมีตัวอย่างสัญญาณกระแสที่ถูกตัดแสดงดังรูปที่ 4.1.4



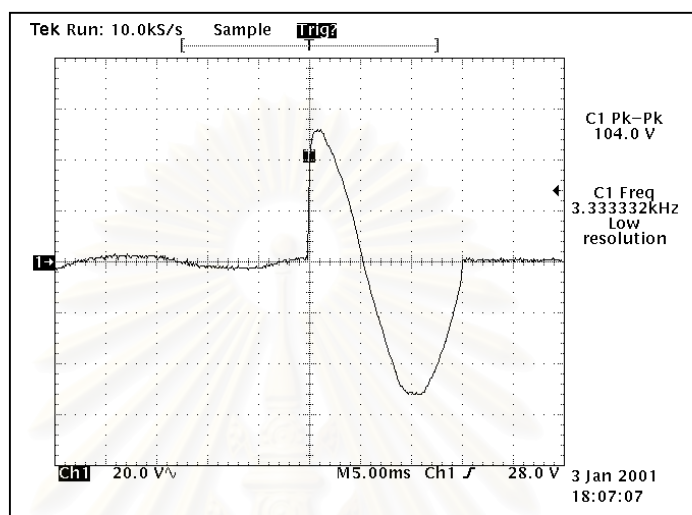
(ก)



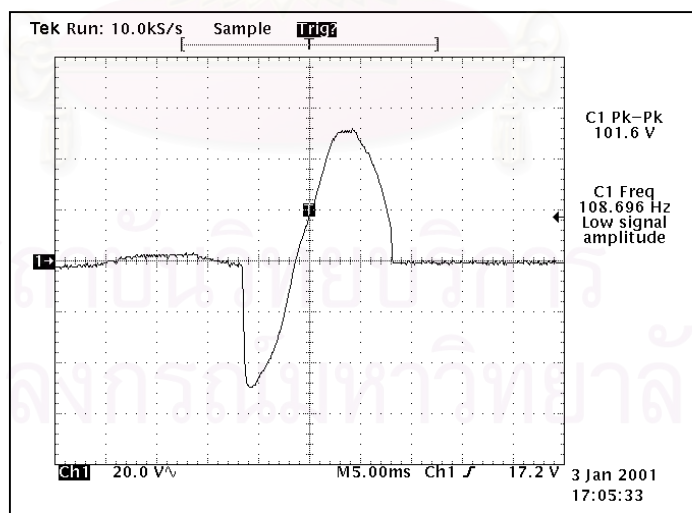
(ข)

รูปที่ 4.1.4 (ก)และ (ข) แสดงสัญญาณกระแสเมื่อเกิดลัดวงจรและเปิดวงจรด้วยวงจรตรวจสอบกระแสเกิน ขณะแรงดันทดสอบด้านแรงต่ำ 50-100 โวลต์

จากการทดสอบตามวงจรงจรรูปที่ 4.1.1 เมื่อแรงดันทดสอบทางด้านแรงต่ำ 100 โวลต์ ถึง 150 โวลต์ จำนวน 50 ครั้ง ปรากฏว่าวงจรตรวจจับการเกิดกระแสเกินทำงานเปิดวงจรทุกครั้ง โดยมีตัวอย่างสัญญาณกระแสที่ถูกตัดแสดงดังรูปที่ 4.1.5



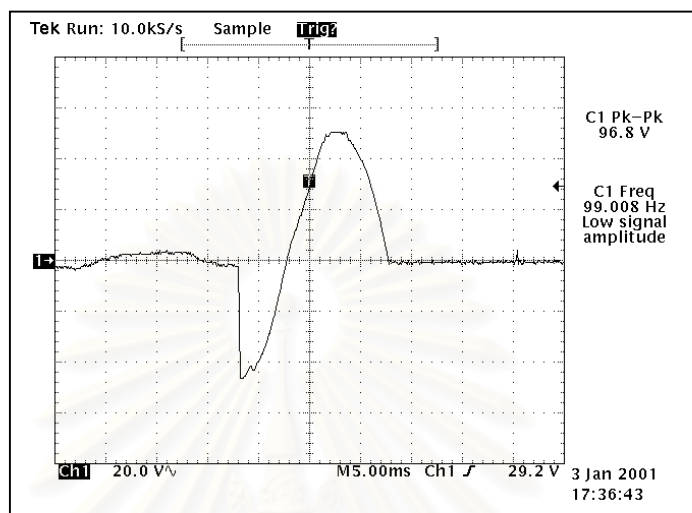
(ก)



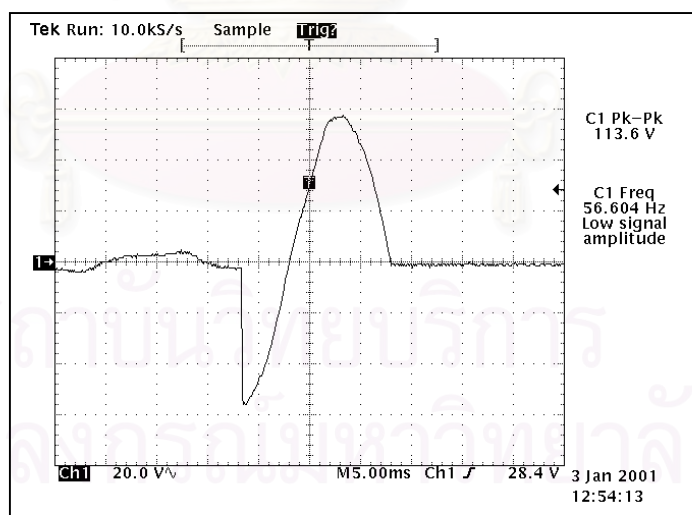
(ข)

รูปที่ 4.1.5 (ก)และ (ข) แสดงสัญญาณกระแสเมื่อเกิดลัดวงจรและเปิดวงจรด้วยวงจรตรวจสอบกระแสเกิน ขณะแรงดันทดสอบด้านแรงต่ำ 100-150 โวลต์

จากการทดสอบตามวงจรรูปที่ 4.1.1 เมื่อแรงดันทดสอบทางด้านแรงต่ำ 150 โวลต์ ถึง 200 โวลต์ จำนวน 50 ครั้ง ปรากฏว่าวงจรตรวจจับการเกิดกระแสเกินทำงานเปิดวงจรทุกครั้ง โดยมีตัวอย่างสัญญาณกระแสที่ถูกตัดแสดงดังรูปที่ 4.1.6



(ก)

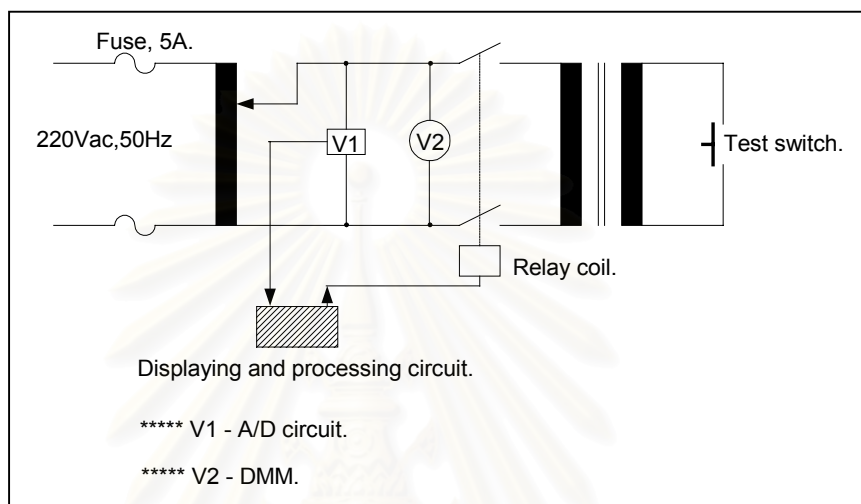


(ข)

รูปที่ 4.1.6 (ก)และ (ข) แสดงสัญญาณกระแสเมื่อเกิดลัดวงจรและเปิดวงจรด้วยวงจรตรวจสอบกระแสเกิน ขณะแรงดันทดสอบด้านแรงต่ำ 150-200 โวลต์

4.2 การทดสอบวงจรวัดและแสดงผลค่าแรงดันแบบดิจิตอล

เป็นวงจรที่ใช้ไอซีแปลงสัญญาณแรงดันแบบอนาลอกที่ต้องการวัดให้เป็นแบบดิจิตอล แล้วนำไปประมวลผลทางด้านดิจิตอลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ แสดงผลด้วยจอ LCD ดังนั้นการตรวจสอบวงจรจึงแสดงได้ด้วยการปรับเทียบความถูกต้องกับเครื่องวัดมาตรฐานที่ในที่นี้ใช้ Digital multimeter (DMM) วงจรการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.2.1



รูปที่ 4.2.1 ไดอะแกรมการทดสอบวงจรวัดและแสดงผลค่าแรงดันแบบดิจิตอล

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบวงจรวัดและแสดงผลค่าแรงดันแบบดิจิตอล

| ครั้งที่ | ชุดทดสอบ | DMM | ครั้งที่ | ชุดทดสอบ | DMM |
|----------|----------|-------|----------|----------|-------|
| 1 | 10.1 | 10.0 | 11 | 120.6 | 119.4 |
| 2 | 20.3 | 19.9 | 12 | 130.4 | 129.7 |
| 3 | 41.1 | 40.8 | 13 | 140.3 | 139.3 |
| 4 | 50.2 | 49.2 | 14 | 150.7 | 149.4 |
| 5 | 61.4 | 61.2 | 15 | 160.9 | 159.7 |
| 6 | 70.6 | 69.7 | 16 | 170.0 | 168.9 |
| 7 | 80.0 | 79.0 | 17 | 180.1 | 179.4 |
| 8 | 90.4 | 89.1 | 18 | 190.8 | 189.3 |
| 9 | 100.9 | 99.7 | 19 | 201.2 | 199.8 |
| 10 | 110.7 | 109.6 | 20 | 221.3 | 220.0 |

4.3 การทดสอบใช้งานจริง

การทดสอบในสภาวะใช้งานจริง เป็นการสุ่มทดสอบกับน้ำมันหม้อแปลงที่มีค่าความคงไดอิเล็กตริกกระแสสลับในระดับต่างกัน เพื่อการเปรียบเทียบวิเคราะห์ผลที่ได้จากชุดทดสอบเท่ากับค่าที่ได้จากชุดทดสอบที่ได้ออกแบบสร้างขึ้น โดยในหนึ่งตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงจะทดสอบสองรอบ ตามมาตรฐาน IEC โดยใช้อิเล็กทรอนิกส์แบบหัวเห็ด ซึ่งสามารถสรุปลำดับขั้นการทดสอบได้ดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.3.1 การเตรียมการทดสอบ

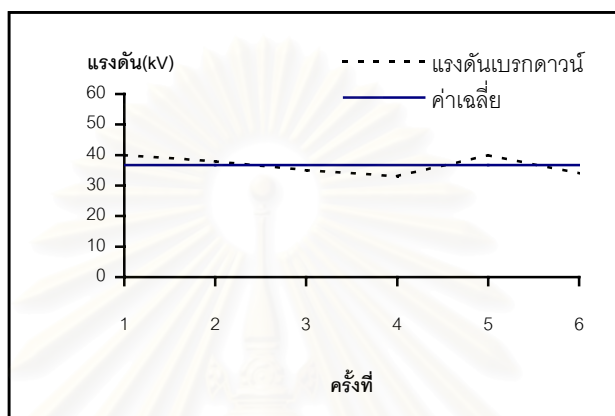
เก็บตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงประมาณ 350 – 600 ml. ใส่ภาชนะที่มีการจัดวางคู่ของอิเล็กโตรดแบบทรงกลมหรือแบบหัวเห็ดแช่อยู่ลึกในตัวอย่างน้ำมันประมาณ 40 mm. วางห่างกันเป็นระยะแกป 2.5 mm. โดยคู่อิเล็กโตรดนี้อาจจะทำมาจากทองแดง ทองเหลือง หรือสแตนเลส อิเล็กโตรดแบบทรงกลมจะต้องให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 12.5-13.0 mm. หากเป็นอิเล็กโตรดแบบหัวเห็ดต้องมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 mm. ดังแสดงในภาคผนวก ค.

4.3.2 ขั้นตอนการทดสอบ

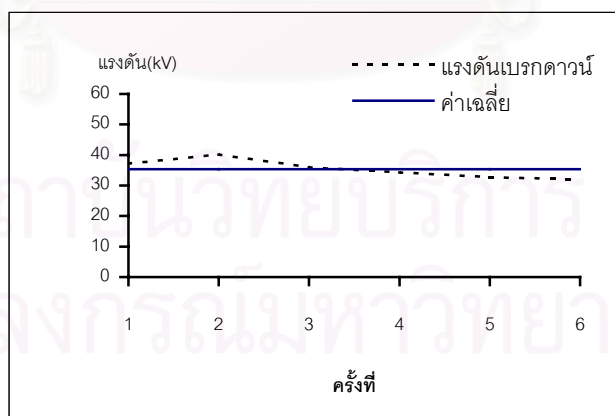
ควรเริ่มทำการทดสอบทันทีภายหลังจากการเตรียมตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงให้พร้อมตามหัวข้อที่ 4.3.1 โดยการจ่ายแรงดันทดสอบที่คู่อิเล็กโตรดให้มีอัตราการเพิ่มของแรงดันประมาณ 2kV/Sec. ความถี่ประมาณ 48 – 62 Hz. จนกระทั่งเกิดปรากฏการณ์เบรกดาวขึ้น จึงหยุดการเพิ่มแรงดันและเปิดวงจรการทดสอบเพื่อตัดการไหลของกระแสเบรกดาว เริ่มคนตัวอย่างน้ำมันเบาๆหลังจากกระแสหยุดไหล โดยใช้แท่งแก้วหรือคนด้วยระบบมอเตอร์หมุนดังแสดงในภาคผนวก ค. เพื่อกำจัดช่องทางเขม่าคาร์บอนที่เกิดขึ้นจากปรากฏการณ์เบรกดาว เนื่องจากเขม่าคาร์บอนนี้อาจจะทำให้การทดสอบครั้งต่อไปได้แรงดันเบรกดาวไม่ตรงตามคุณสมบัติที่แท้จริงของตัวอย่างน้ำมันการทดสอบต้องทำต่อเนื่องไปจนครบ 6 ครั้ง ในแต่ละครั้งควรทำในเวลาห่างกันอย่างน้อย 1 นาที แล้วนำค่าทั้งหมดเฉลี่ยเป็นค่าแรงดันเบรกดาวของตัวอย่างน้ำมันนั้น

4.3.3 ตัวอย่างผลการทดสอบ

ตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงที่ 1 ครั้งที่ 1

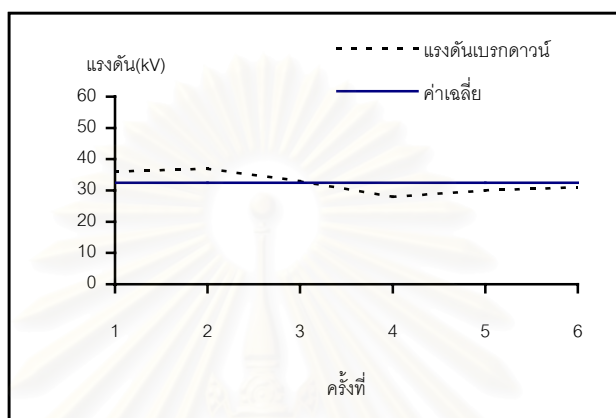


รูปที่ 4.3.1 (ก) ผลการทดสอบด้วยชุดทดสอบชุดเก่า(ค่า SD เท่ากับ 3.07)

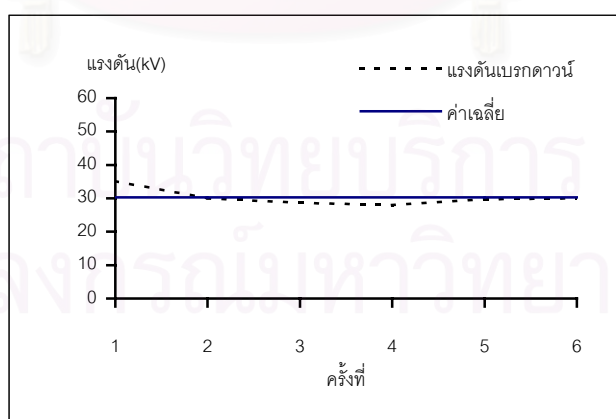


รูปที่ 4.3.1 (ข) ผลการทดสอบด้วยชุดที่ออกแบบสร้าง(ค่า SD เท่ากับ 3.04)

ตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงที่ 1 ครั้งที่ 2

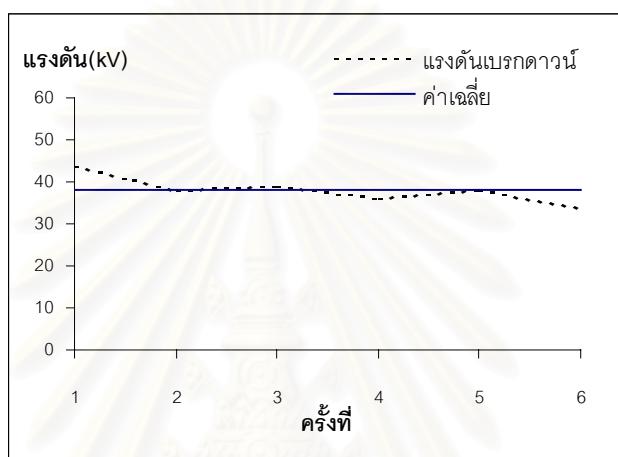


รูปที่ 4.3.2 (ก) ผลการทดสอบด้วยชุดทดสอบชุดเก่า(ค่า SD เท่ากับ 2.78)

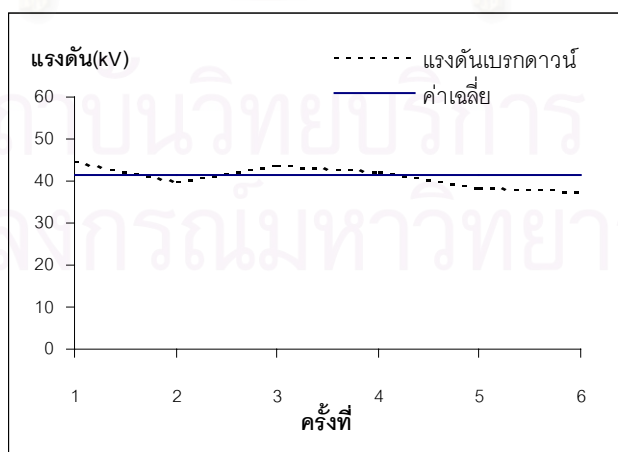


รูปที่ 4.3.2 (ข) ผลการทดสอบด้วยชุดที่ออกแบบสร้าง(ค่า SD เท่ากับ 2.54)

ตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงที่ 2 ครั้งที่ 1

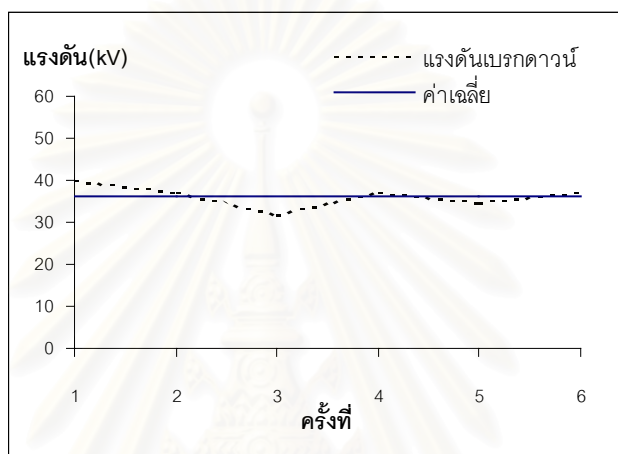


รูปที่ 4.3.3 (ก) ผลการทดสอบด้วยชุดทดสอบชุดเก่า(ค่า SD เท่ากับ 3.37)

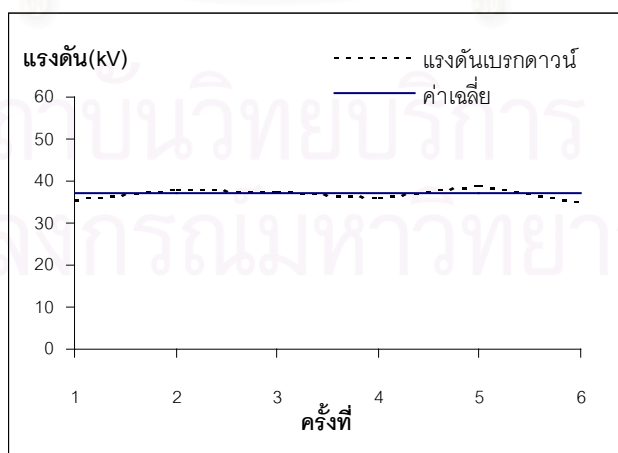


รูปที่ 4.3.3 (ข) ผลการทดสอบด้วยชุดที่ออกแบบสร้าง(ค่า SD เท่ากับ 2.99)

ตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงที่ 2 ครั้งที่ 2

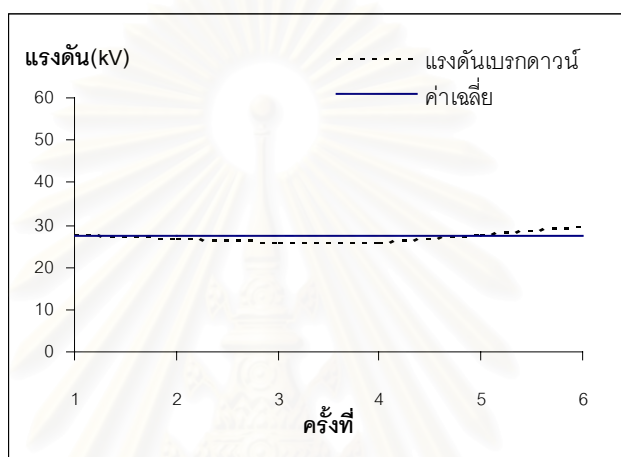


รูปที่ 4.3.4 (ก) ผลการทดสอบด้วยชุดทดสอบชุดเก่า(ค่า SD เท่ากับ 2.65)

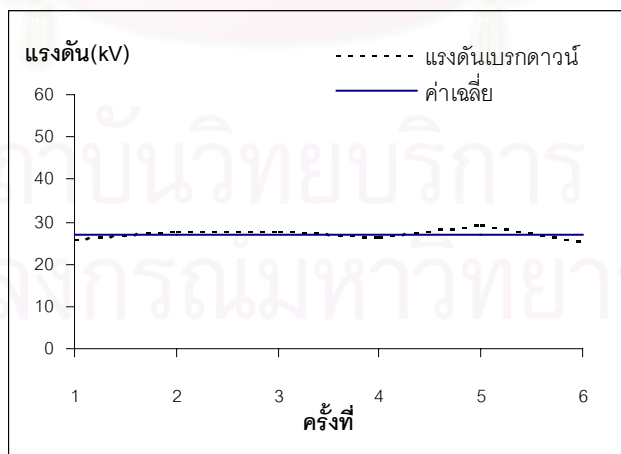


รูปที่ 4.3.4 (ข) ผลการทดสอบด้วยชุดที่ออกแบบสร้าง(ค่า SD เท่ากับ 1.45)

ตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงที่ 3 ครั้งที่ 1

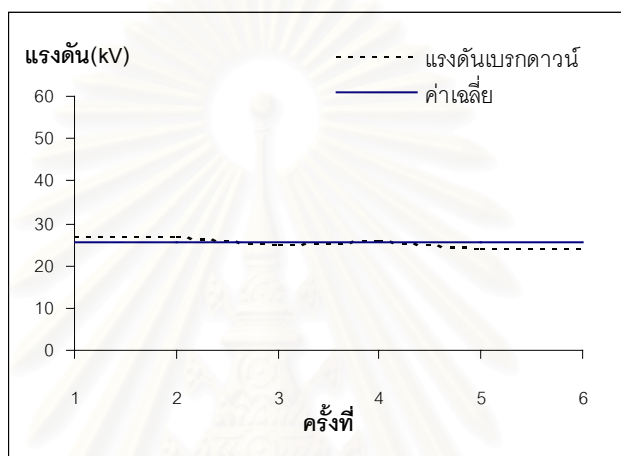


รูปที่ 4.3.5 (ก) ผลการทดสอบด้วยชุดทดสอบชุดเก่า(ค่า SD เท่ากับ 1.51)

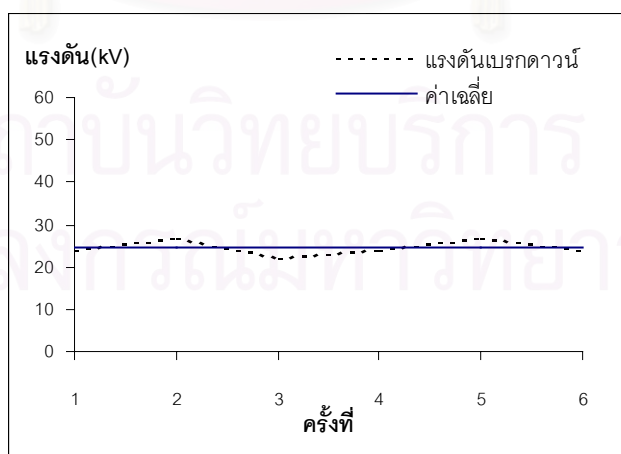


รูปที่ 4.3.5 (ข) ผลการทดสอบด้วยชุดที่ออกแบบสร้าง(ค่า SD เท่ากับ 1.45)

ตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงที่ 3 ครั้งที่ 2

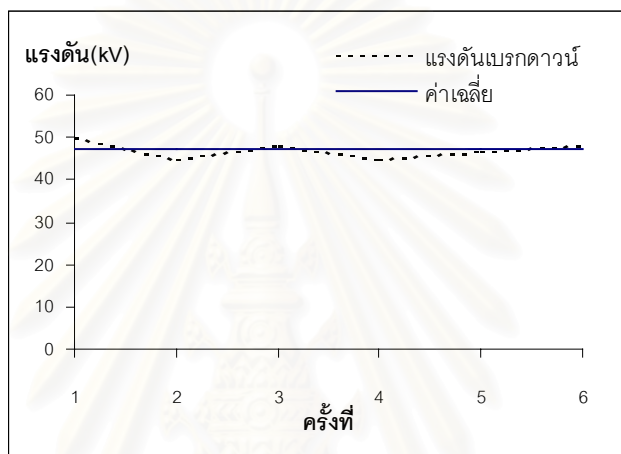


รูปที่ 4.3.6 (ก) ผลการทดสอบด้วยชุดทดสอบชุดเก่า(ค่า SD เท่ากับ 1.37)

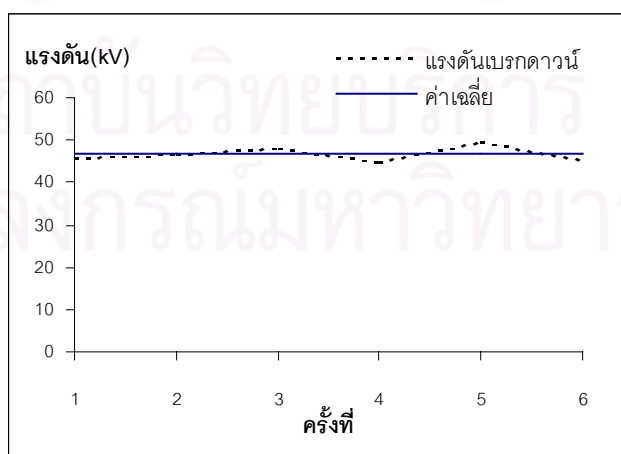


รูปที่ 4.3.6 (ข) ผลการทดสอบด้วยชุดที่ออกแบบสร้าง(ค่า SD เท่ากับ 1.84)

ตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงที่ 4 ครั้งที่ 1

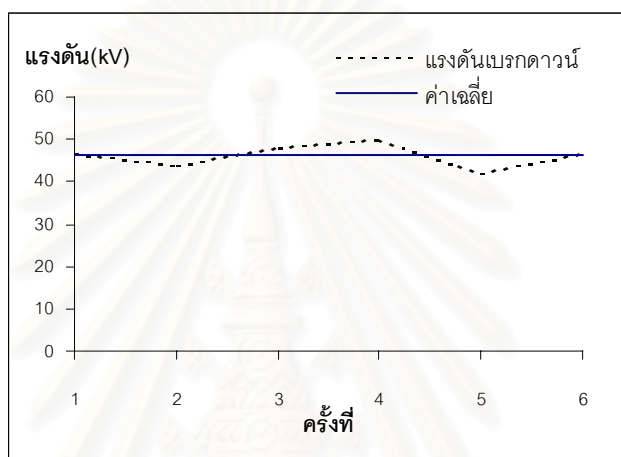


รูปที่ 4.3.7 (ก) ผลการทดสอบด้วยชุดทดสอบชุดเก่า(ค่า SD เท่ากับ 1.94)

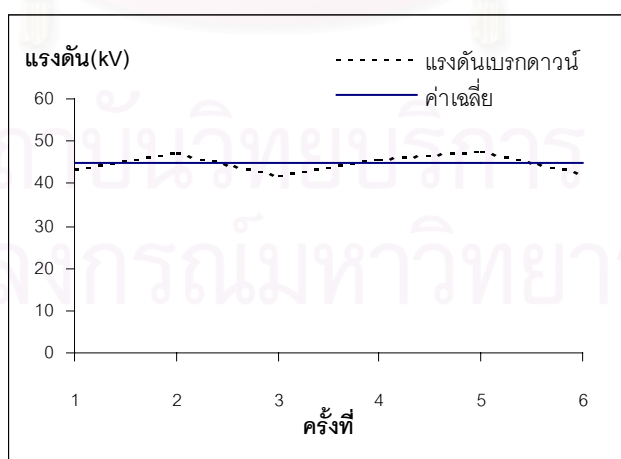


รูปที่ 4.3.7 (ข) ผลการทดสอบด้วยชุดที่ออกแบบสร้าง(ค่า SD เท่ากับ 1.93)

ตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงที่ 4 ครั้งที่ 2

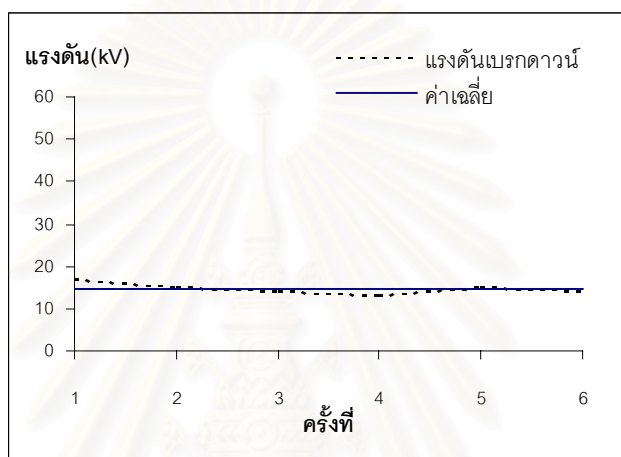


รูปที่ 4.3.8 (ก) ผลการทดสอบด้วยชุดทดสอบชุดเก่า(ค่า SD เท่ากับ 2.87)

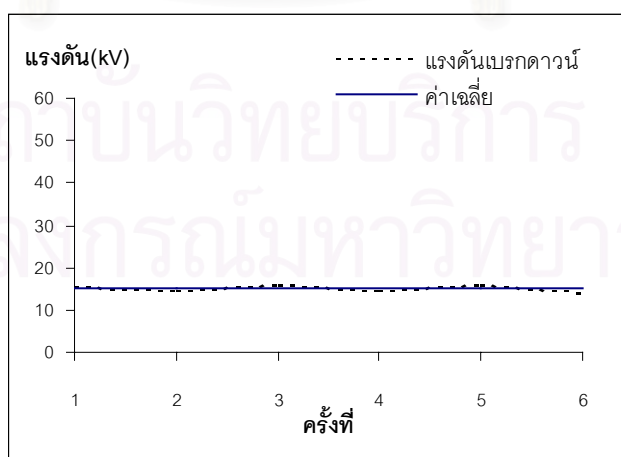


รูปที่ 4.3.8 (ข) ผลการทดสอบด้วยชุดที่ออกแบบสร้าง(ค่า SD เท่ากับ 2.43)

ตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงที่ 5 ครั้งที่ 1

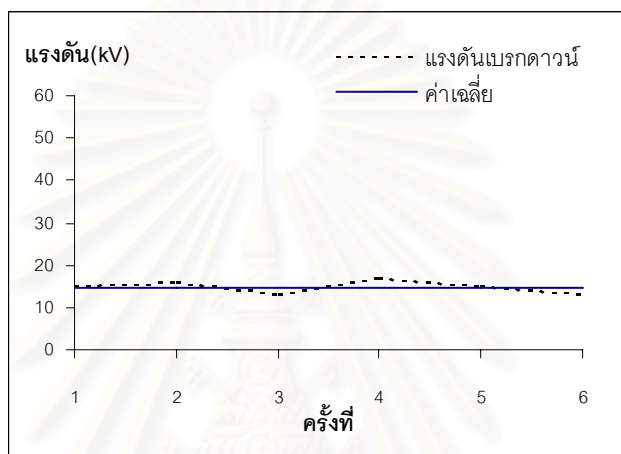


รูปที่ 4.3.9 (ก) ผลการทดสอบด้วยชุดทดสอบชุดเก่า(ค่า SD เท่ากับ 1.36)

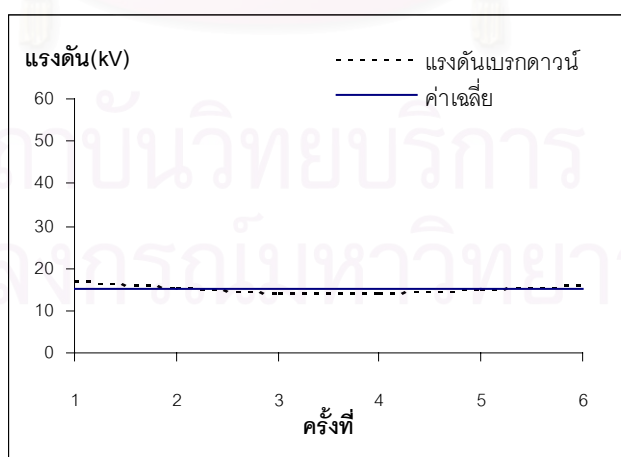


รูปที่ 4.3.9 (ข) ผลการทดสอบด้วยชุดที่ออกแบบสร้าง(ค่า SD เท่ากับ 0.83)

ตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงที่ 5 ครั้งที่ 2



รูปที่ 4.3.10 (ก) ผลการทดสอบด้วยชุดทดสอบชุดเก่า(ค่า SD เท่ากับ 1.60)

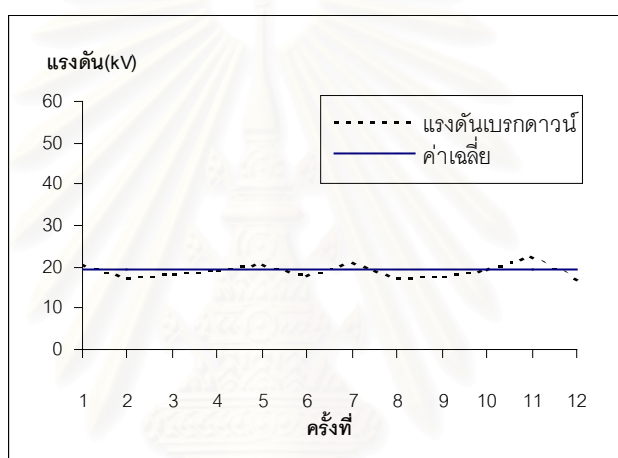


รูปที่ 4.3.10(ข) ผลการทดสอบด้วยชุดที่ออกแบบสร้าง(ค่า SD เท่ากับ 1.08)

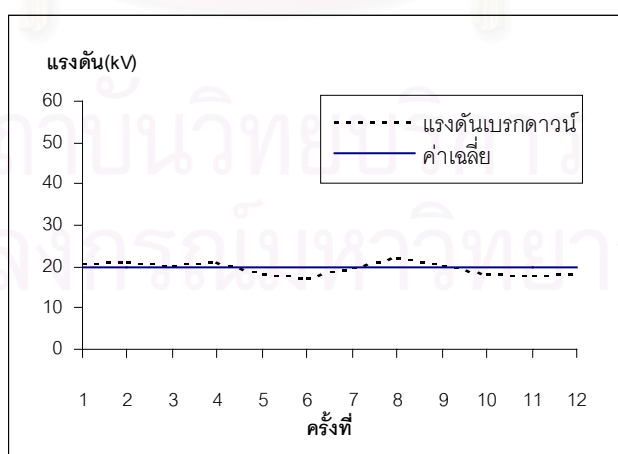
4.4 การทดสอบเปรียบเทียบผลต่างของอิเล็กโตรด

เป็นการทดสอบด้วยอิเล็กโตรด 3 ชนิดที่แตกต่างกันคือ อิเล็กโตรดแบบทรงกลม (sphere) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร อิเล็กโตรดแบบหัวเห็ด(mushroom) เส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 มิลลิเมตร และอิเล็กโตรดแบบจานกลม(disk) เส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 มิลลิเมตร โดยจะทำการทดสอบที่ระยะแกปไม่เท่ากัน 3 ค่า คือ 1.5 มิลลิเมตร 2.5 มิลลิเมตร และ 3.0 มิลลิเมตร จากตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงในถังเดียวกัน เวลาใกล้เคียงกันดังนี้

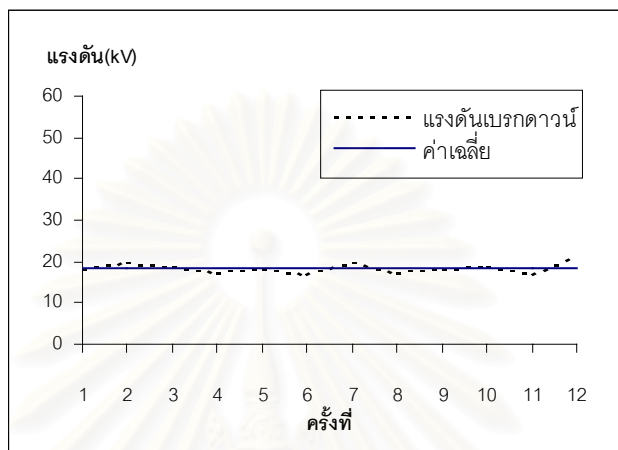
4.4.1 การทดสอบที่ระยะแกป 1.5 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.4.1(ก) ผลการทดสอบด้วยอิเล็กโตรดทรงกลม (SD=1.83)

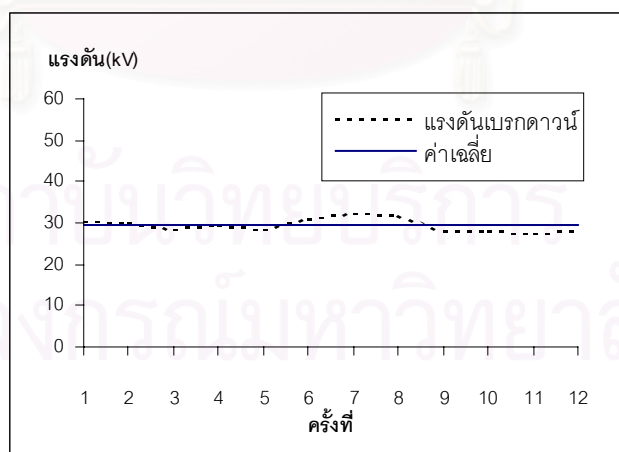


รูปที่ 4.4.1(ข) ผลการทดสอบด้วยอิเล็กโตรดทรงกลม (SD=1.96)

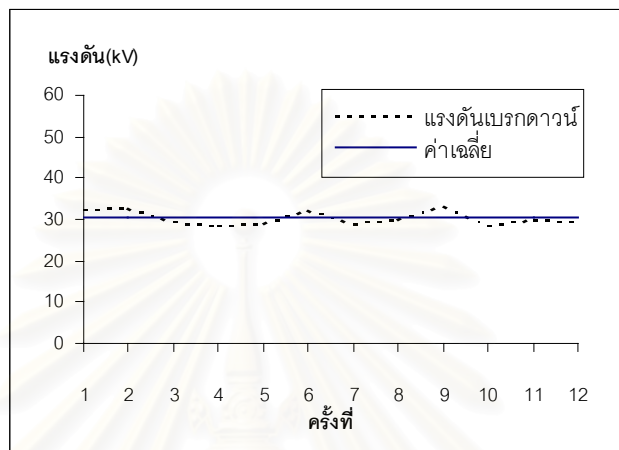


รูปที่ 4.4.1(ค) ผลการทดสอบด้วยอิเล็กโตรดจางกลม (SD=1.73)

4.4.2 การทดสอบที่ระยะแกป 2.5 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.4.2(ก) ผลการทดสอบด้วยอิเล็กโตรดทรงกลม (SD=1.71)

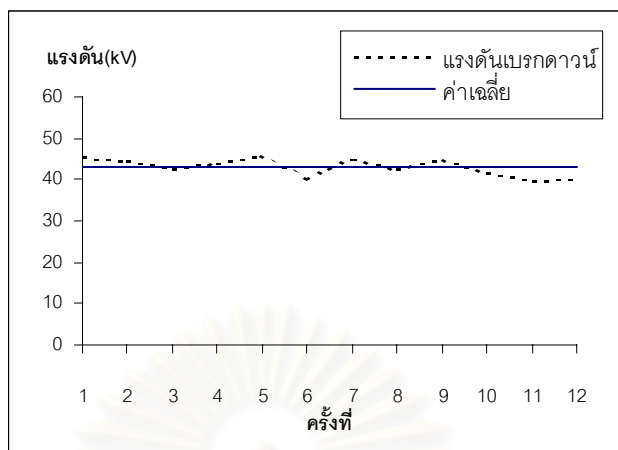


รูปที่ 4.4.2(ข) ผลการทดสอบด้วยอิเล็กทรอนิกส์หัวเห็ด (SD=1.89)

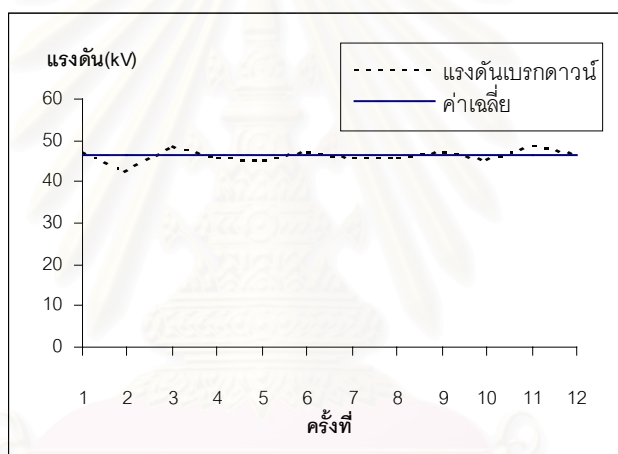


รูปที่ 4.4.2(ค) ผลการทดสอบด้วยอิเล็กทรอนิกส์จานกลม (SD=1.54)

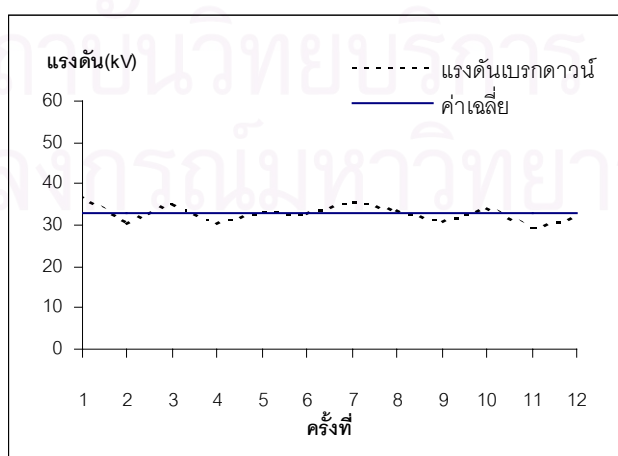
4.4.3 การทดสอบที่ระยะแกป 3.0 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.4.3(ก) ผลการทดสอบด้วยอิเล็กโตรดทรงกลม (SD=2.29)



รูปที่ 4.4.2(ข) ผลการทดสอบด้วยอิเล็กโตรดหัวเห็ด (SD=1.77)



รูปที่ 4.4.2(ค) ผลการทดสอบด้วยอิเล็กโตรดหัวเห็ด (SD=2.35)

บทที่ 5 วิเคราะห์ผลการสอบ

บทนี้กล่าวถึงการวิเคราะห์ผลการทดสอบที่ได้กระทำมาแล้วในบทที่ 4 ซึ่งได้ทำการทดสอบในเรื่องความเร็วการตัดวงจรของชุดทดสอบ การทดสอบใช้งานจริงและการทดสอบที่ใช้อิเล็กทรอนิกส์ที่แตกต่างกัน ดังหัวข้อต่อไปนี้

5.1 ผลการทดสอบเรื่องความเร็วในการตัดวงจร

จากการทดสอบการใช้งานนั้นมีการปรับระยะแกปหลายระยะเพื่อให้เกิดการเบรกดาวนในหลายระดับแรงดัน ซึ่งจากรูปคลื่นของกระแสขณะเกิดเบรกดาวนจนกระทั่งรีเลย์เปิดวงจรการทดสอบ แสดงให้เห็นว่าใช้เวลาในการตัดวงจรประมาณ 20 mSec. เวลาที่ใช้ในการตัดวงจรนี้จริงๆแล้ว คือเวลาในการเคลื่อนตัวของหน้าสัมผัสของรีเลย์ ดังนั้นการเลือกใช้รีเลย์จึงจำเป็นต้องพิจารณาเวลาในการเคลื่อนตัวนี้ด้วย

5.2 ผลการทดสอบการใช้งานจริง

การทดสอบใช้งานจริงได้ทำการเปรียบเทียบผลระหว่างชุดทดสอบที่สร้างขึ้นกับชุดเก่าที่มีอยู่ โดยได้สรุปผลการทดสอบเป็นค่าเฉลี่ยดังนี้

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบแรงดันเบรกดาวนเฉลี่ยของชุดทดสอบ

| แรงดันเบรกดาวนเฉลี่ย | | | | | | | | | | |
|----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| ตัวอย่างน้ำมันที่ | 1\1 | 1\2 | 2\1 | 2\2 | 3\1 | 3\2 | 4\1 | 4\2 | 5\1 | 5\2 |
| ชุดเก่า(kV) | 36.7 | 33.2 | 38.2 | 36.3 | 27.5 | 25.5 | 47.2 | 46.3 | 14.9 | 14.8 |
| ชุดที่สร้างขึ้น(kV) | 35.4 | 30.3 | 41.3 | 37.1 | 27.1 | 24.7 | 46.8 | 44.8 | 15.2 | 15.3 |
| ผลต่าง(%) | 3.5 | 8.7 | 8.1 | 2.1 | 1.5 | 3.1 | 0.8 | 3.3 | 2.1 | 2.8 |
| ผลต่างเฉลี่ย(%) | 3.6 | | | | | | | | | |

จากค่าความแตกต่างที่ได้จากตารางที่ 5.1 แสดงให้เห็นว่าผลต่างอยู่ที่ประมาณ 3.6 เปอร์เซ็นต์ โดยความแตกต่างนี้นอกจากค่าความผิดพลาดจากชุดสอบแล้วยังรวมถึงความผิดพลาดอันเกิดจากผู้ทดสอบในการเตรียมตัวอย่างน้ำมันด้วย

5.3 ผลการทดสอบเปรียบเทียบระหว่างอิเล็กโตรดแบบทรงกลม แบบหัวเห็ดและแบบจานกลม

ผลการทดสอบจากอิเล็กโตรดทั้งสามแบบคืออิเล็กโตรดแบบทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร อิเล็กโตรดแบบหัวเห็ดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 มิลลิเมตร และอิเล็กโตรดแบบจานกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 มิลลิเมตร สรุปได้ดังตารางที่ 5.2 ซึ่งแสดงค่าแรงดันเบรกดาว์นเฉลี่ยจากการทดสอบที่ระยะแกป 1.5 มิลลิเมตร 2.5 มิลลิเมตร และ 3.0 มิลลิเมตร ในตัวอย่างน้ำมันเดียวกัน ดังรายละเอียดผลการทดสอบในบทที่ 4 ซึ่งสามารถสรุปผลเป็นค่าเฉลี่ยได้ดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 แสดงค่าแรงดันเบรกดาว์นเฉลี่ยของอิเล็กโตรดแบบทรงกลม แบบหัวเห็ดและแบบจานกลม

| แรงดันเบรกดาว์นเฉลี่ย | | | |
|--------------------------|-------|-------|-------|
| ระยะแกป(mm) | 1.5 | 2.5 | 3 |
| อิเล็กโตรดแบบทรงกลม(kV) | 19.23 | 29.53 | 43.12 |
| อิเล็กโตรดแบบหัวเห็ด(kV) | 19.68 | 30.46 | 46.48 |
| อิเล็กโตรดแบบจานกลม(kV) | 18.58 | 23.51 | 33.00 |

จากผลค่าแรงดันเบรกดาว์นเฉลี่ยในตารางที่ 5.2 สามารถอธิบายได้คือ จากการทดสอบที่ระยะแกป 1.5 มิลลิเมตร อิเล็กโตรดแบบจานกลมมีค่าแรงดันเบรกดาว์นเฉลี่ยต่ำที่สุด ส่วนอิเล็กโตรดแบบทรงกลมและแบบหัวเห็ดมีค่าแรงดันเบรกดาว์นที่ใกล้เคียงกัน แต่อาจจะกล่าวได้ว่าผลที่ได้มีความใกล้เคียงกันมากที่สุดจากระยะแกปทั้งสามค่า

แรงดันเบรกดาว์นที่ระยะแกป 2.5 มิลลิเมตร อิเล็กโตรดแบบจานกลมแสดงให้เห็นความแตกต่างที่มากขึ้นเมื่อระยะแกปเพิ่มมากขึ้น ส่วนค่าที่ได้จากอิเล็กโตรดแบบทรงกลมและแบบหัวเห็ดยังคงมีค่าที่ใกล้เคียงกันอยู่ ส่วนที่ระยะแกป 3.0 มิลลิเมตร ผลที่ได้จากอิเล็กโตรดแบบจานกลมนั้นยังแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างที่มากขึ้นเมื่อระยะแกปเพิ่มขึ้น คือ

น้อยกว่ามากขึ้น และแสดงให้เห็นว่าเกิดความแตกต่างของแรงดันเบรกดาวนจากอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกลมและแบบหัวเห็ด ซึ่งสามารถแสดงความแตกต่างได้ดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ความแตกต่างของแรงดันเบรกดาวนเฉลี่ยจากตารางที่ 5.2

| ความแตกต่างของแรงดันเบรกดาวนเฉลี่ย(%) | | | |
|---------------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| อิเล็กทรอนิกส์ | แกป 1.5 mm. | แกป 2.5 mm. | แกป 3.0 mm. |
| ทรงกลมกับหัวเห็ด | 2.29 | 3.05 | 7.23 |
| หัวเห็ดกับจานกลม | 5.92 | 29.56 | 40.85 |

จากตารางที่ 5.2 และ 5.3 สามารถอธิบายได้ว่าสนามไฟฟ้าบริเวณที่เกิดเบรกดาวนจากอิเล็กทรอนิกส์ทั้งสามแบบ เมื่อระยะแกปแคบจะมีความสม่ำเสมอที่ใกล้เคียงกัน ทำให้ค่าแรงดันเบรกดาวนใกล้เคียงกัน เมื่อระยะแกปมากขึ้นลักษณะของสนามไฟฟ้าจากอิเล็กทรอนิกส์ทั้งสามจะเริ่มแตกต่างกันออกไประดับแรงดันเบรกดาวนจึงแตกต่างกันชัดเจนขึ้น โดยเฉพาะลักษณะของสนามไฟฟ้าจากอิเล็กทรอนิกส์แบบจานกลมเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับสองชนิดที่เหลือจะมีความแตกต่างมากกว่าการพิจารณาระหว่างอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกลมและแบบหัวเห็ด

เนื่องจากอิเล็กทรอนิกส์แบบหัวเห็ดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าเป็นสองเท่าของอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกลม ดังนั้นที่ระยะแกปที่กว้างกว่า 2.5 มิลลิเมตร จึงมีความสม่ำเสมอมากกว่า ระดับแรงดันเบรกดาวนจึงสูงกว่า

บทที่ 6

สรุปผลงานและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการใช้งาน

ชุดทดสอบความคงทนไดอิเล็กตริกกระแสสลับของน้ำมันหม้อแปลงได้รับการออกแบบขึ้น สำหรับการทดสอบเพื่อหาค่าความคงทนไดอิเล็กตริกกระแสสลับของน้ำมันหม้อแปลงที่เป็นค่าดัชนีตัวสำคัญในการระบุว่าน้ำมันหม้อแปลงจะอยู่ในเกณฑ์ที่เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี และเหมาะสมต่อการใช้งานหรือไม่ เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาให้ชุดทดสอบมีขีดความสามารถ และประสิทธิภาพที่ดีขึ้นหรือเป็นแนวทางสำหรับการพัฒนาเพื่อเชิงการค้าต่อไป เนื่องจากชุดทดสอบได้ถูกออกแบบให้สามารถปรับอัตราการเพิ่มแรงดันได้ ดังนั้นจึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานกับการทดสอบทางไฟฟ้าแรงสูงอย่างอื่นที่เหมาะสมได้

ชุดทดสอบความคงทนไดอิเล็กตริกกระแสสลับของน้ำมันหม้อแปลงได้รับการออกแบบขึ้นโดยเป็นระบบที่ใช้อุปกรณ์หลักที่ประกอบไปด้วย

1) หม้อแปลงทดสอบ

-พิกัดขนาด 500VA. แรงดัน 220V/60kV. 1 ตัว

2) หม้อแปลงปรับระดับแรงดัน

-พิกัดขนาด 500VA. แรงดัน 220V/0..230V. 1 ตัว

3) ไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ด

-CPU เบอร์ 80C32 อินพุทและเอาต์พุทแบบ 8255 1 ชุด

4) วงจรรวมของชุดตรวจสอบการเกิดดีส์ชาร์จเบรกดาวน 1 ชุด

5) วงจรรวมของชุดควบคุมแรงดัน 1 ชุด

6) วงจรรวมของชุดแสดงผล 1 ชุด

7) วงจรรวมของชุดแหล่งจ่ายสำหรับชุดควบคุม 1 ชุด

8) กล่องบรรจุอุปกรณ์ 1 กล่อง

9) คอมพิวเตอร์(กรณีต้องการ)

-ส่วนบุคคลหรือแบบกระเป๋าทู 1 เครื่อง

จากรายการอุปกรณ์ดังกล่าวข้างต้นนี้สามารถแยกประมาณราคาได้เป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นอุปกรณ์ในชุดควบคุม(ไม่รวมเครื่องคอมพิวเตอร์)ประมาณ 15,000 บาท และ ส่วนที่เป็นหม้อแปลงทดสอบราคาประมาณ 50,000 บาท ดังนั้นราคาโดยรวมทั้งสิ้นของเครื่อง

ต้นแบบนี้ประมาณ 65,000 บาท ซึ่งราคาเครื่องจากต่างประเทศที่ยังไม่รวมภาษีประมาณ 200,000 บาท สำหรับการพัฒนาเพื่อการสร้างชุดทดสอบนี้เชิงการค้าในขนาดราคาต้นทุนอาจ จะสูงกว่า 65,000 บาท

ผลการทดสอบการใช้งานชุดทดสอบค่าความคงทนไดอิเล็กตริกกระแสสลับของ น้ำมันหม้อแปลงนั้นผลการทดสอบอยู่ในเกณฑ์ที่มีความถูกต้องยอมรับได้และน่าเชื่อถือในระดับหนึ่ง มีความสามารถในการตัดวงจรได้ตามที่มาตรฐานกำหนด สามารถเลือกให้มีการทดสอบ ได้ 4 แบบคือ การทำงานให้เป็นเป็นอัตโนมัติ แบบควบคุมที่ละขั้นตอน แบบกดคีย์บอร์ดเพิ่มค่า และแบบตั้งค่าแรงดันได้ ทำให้เกิดความยืดหยุ่นในการใช้งานและใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมการ ทดสอบ การแสดงผลแบบกราฟฟิกและพิมพ์ผลลัพธ์ได้ แต่เนื่องจากวงจรตรวจจ่ายกระแสดีส ชาร์จได้ออกแบบให้ทำงานเมื่อเกิดดีสชาร์จเบรกดาวน์ที่กระแสประมาณ 1 แอมป์ขึ้นไป(ด้านแรง ดันต่ำ) ดังนั้นหากเกิดดีสชาร์จเบรกดาวน์ที่กระแสต่ำกว่านี้ ความเร็วในการตัดวงจรจะลดลง

งานวิจัยการออกแบบและสร้างชุดทดสอบค่าความคงทนไดอิเล็กตริกกระแสสลับ ของน้ำมันหม้อแปลงนี้ คาดว่าจะได้ประโยชน์จากการวิจัยคือ

-สามารถใช้ชุดทดสอบต้นแบบดังกล่าวหาค่าความคงทนไดอิเล็กตริกกระแสสลับ ของน้ำมันหม้อแปลงได้อย่างสะดวกและบันทึกผลการทดสอบในลักษณะของไฟล์เอกสารทาง คอมพิวเตอร์ได้

-วงจรชุดตรวจสอบการเกิดดีสชาร์จเบรกดาวน์และการควบคุมแรงดัน สามารถ นำไปประยุกต์ใช้กับการทดสอบทางไฟฟ้าแรงสูงอย่างอื่นได้

-ระบบเชื่อมโยงแบบอนุกรมเป็นระบบที่เป็นแนวทางในการออกแบบการทดสอบ อัตโนมัติที่ผู้ทดสอบไม่จำเป็นต้องอยู่ใกล้บริเวณทดสอบที่อาจจะเป็นอันตรายได้

6.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

ในการวิจัยออกแบบและสร้างชุดทดสอบค่าความคงทนไดอิเล็กตริกกระแสสลับ ของน้ำมันหม้อแปลงครั้งนี้ใช้การควบคุมแรงดันด้วยหม้อแปลงปรับระดับแรงดันเป็นอุปกรณ์หลัก ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีน้ำหนักมาก ระบบควบคุมด้วยมอเตอร์และการป้องกันทางกลอาจจะทำให้ ความน่าเชื่อถือลดลง ดังนั้นเพื่อให้ได้ชุดทดสอบที่มีน้ำหนักเบาและสามารถควบคุมการ ทดสอบได้หลากหลาย มีความน่าเชื่อถือสูง ควรจะปรับปรุงดังนี้

-ออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังให้สามารถสร้างสัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่รับ ระดับได้และจ่ายกระแสดีสชาร์จเบรกดาวน์ได้ไม่น้อยกว่า 10 แอมป์ภายในเวลาไม่น้อยกว่า 20 mSec.

- ออกแบบวงจรสร้างแหล่งจ่ายแบบสวิทช์ซึ่งสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ดิจิทัล ซึ่งจะทำให้วงจรต่างๆที่ต่อร่วมกับคอนโทรลเลอร์มีเสถียรภาพสูง ลดปัญหาเรื่องสัญญาณรบกวน
- น้ำมันหม้อแปลงที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว อาจจะต้องใช้เวลาในการคืนตัวนานกว่าปกติ ดังนั้นการทดสอบเพื่อหาค่าความคงทนได้อิเล็กทรอนิกส์กระแสสลับอาจจะต้องมีเวลาหน่วงในแต่ละขั้นตอนมากกว่า 1 นาที จึงจะทำให้ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ในระดับที่ยอมรับได้



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- [1]Rouse, T.O., Mineral Insulating Oil in Transformers, IEEE Electrical Insulation Magazine Vol.143, pp: 6-16, 1998.
- [2]Clavreul, R., Analysis of SF6/N2 Mixture Decomposition by Products in Electric Discharges, IEE International Conference on Materials Measurements & Application, 23-26 September 1996.
- [3]Pahlavanpour, B. and Roberts, I.A., Transformer Oil Condition Monitoring, IEE, Savoy Place, London WC2R 0BL, UK, 1998.
- [4]IEC Publication 296, Specification for new insulation oils for transformers and switchgear, 1969.
- [5]KATO ELECTRIC, Portable Oil Tester, Kato working No.S-9125E Tokyo Japan, 1990.
- [6]R.Musil, M.Baur and W.Pfister. Testing Practices for the AC Breakdown Voltage Testing of Insulation Liquids, IEEE Electrical Insulation Magazine Vol.11 No.1, pp:21-26, 1995.
- [7]Megger and Foster, Oil Test Set OTS60AF/2, User guide, 1997.
- [8]มนตรี ระชารักษ์, ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ, วิทยานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
- [9]Gallagher, T.J. and Pearmain, A.J., HIGH VOLTAGE(Measurement, Testing and Design), John Wiley & Sons, pp:59-64, 1983.

[10]L.Lundgaard, D.Linhjell, G.Berg and S.Sigmond, Propagation of Positive and Negative Streamer in Oil with and without Pressboard Interface, IEEE Trans. on Dielec. and Elect. Insulation, pp. 388-395, 1998.

[11]G.Massala and O.Lesaint, Streamer Propagation and Breakdown in Transformer Oil under Overvoltage in Semi-uniform Gaps, Conf. On Elec. Ins. And Dielec. Phen. IEEE, pp. 676-679,1995.

[12]T.V.Top and O.Lesaint, Streamer Initiation in Dielectric Liquid using a Semi-uniform Electrode Geometry, International Symposium on Elec. Ins. IEEE,pp. 636-639,1998.

[13]Billar, P., A simple qualitative model for the different types of streamers in dielectric liquids, Conference Record of the ICDL'96 12th International Conference on Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids, Roma, Italy 15-19, 1996.

[14]IEC Publication 156, Method for The Determination of The Electric Strength of Insulating Oil, 1963.

[15]Kuffel, E. and Zaengl, W.S., High-Voltage Engineering (fundamentals), Pergamon Press, pp: 32-44, 1984.

[16]สำรวจ สังข์สะอาด, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, หน้า17-20, 2528.

[17]สุนทร วิฑูสูรพจน์, การใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ ตระกูล 8051, บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด, 2537.

[18]ศิลาเรีเสิร์ช, Embedded Control Board: ANT-32 ver 3.0 User Manual, บริษัท ศิลาเรีเสิร์ช จำกัด, 2542.

[19]Robert F. Coughlin and Frederick F. Driscoll, Operational Amplifiers & Linear Integrated Circuits, Prentice-Hall International, Inc., 1998.

[20]SGS-ATES GROUP, Power Linear Actuators: 2nd Edition, SGS-ATES Ltd., 1984.

[21]สุนทร วิทวัสพจน์, ปฏิบัติการทดลองด้วย JAZZ-31 เล่มที่ 2, บริษัท ศิลาริเสิร์ช จำกัด, 2542.

[22]ทีมงาน ETT, Dot Matrix LCD Module: User Manual, บริษัท อีทีที จำกัด, 2543.

[23]Bob Reselman, Using Microsoft Visual basic 5, Que Corporation, 1997.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

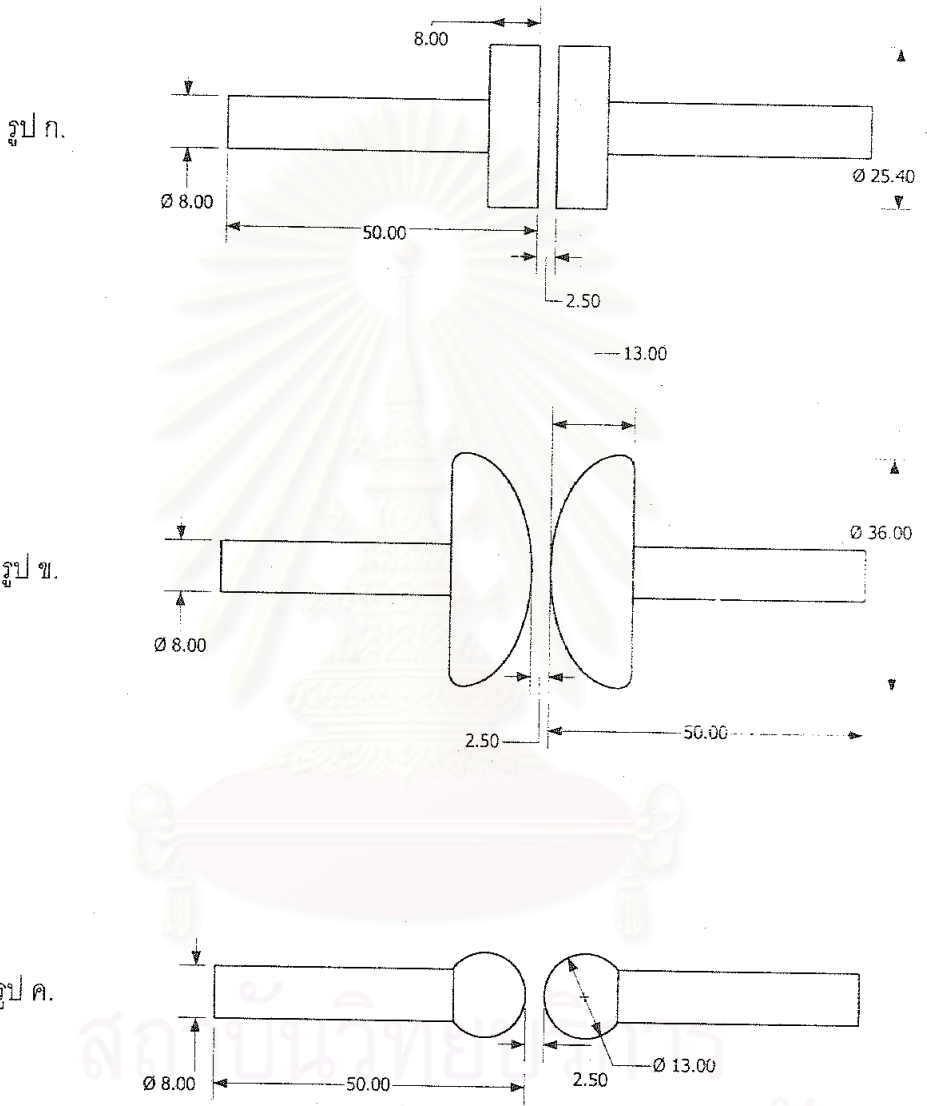
วิธีการใช้เครื่องต้นแบบ

1. เปิดสวิตซ์ที่เครื่องต้นแบบ จอ LCD จะแสดงข้อความ "Press Enter"
2. หากต้องการใช้คอมพิวเตอร์ในการทดสอบ ให้ต่อสาย RS-232 เข้าที่พอร์ตที่เตรียมไว้ แล้วเลือกเมนูที่ 2 (สำหรับรายละเอียดการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์จัดอยู่ในตัวโปรแกรมแล้ว สามารถเลือกดูได้ที่เมนู Help) หรือเลือกเมนูที่ 1 หากไม่ต้องการใช้คอมพิวเตอร์ช่วย แล้วกดปุ่ม Enter
3. เครื่องจะปรากฏข้อความเป็นเมนูให้เลือกเวลาในการหน่วงเวลาในการทดสอบแบบอัตโนมัติ แล้วกดปุ่ม Enter
4. กดปุ่ม Enter เพื่อเริ่มทดสอบ
5. กรณีเลือกการทดสอบแบบ Manual ผู้ทดสอบต้องคอยควบคุมการทดสอบในแต่ละขั้นตอนและสามารถตรวจสอบผลการทดสอบในระหว่างการทดสอบได้
6. เมื่อครบรอบจนครบทุกขั้นตอนแล้วจะปรากฏข้อความให้เลือกดูผลการทดสอบในแต่ละขั้นตอนและผลทั้งหมด
7. กรณีที่ต้องการพิมพ์และบันทึกผลการทดสอบต้องใช้คอมพิวเตอร์ในการทดสอบเท่านั้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

อิเล็กโทรดที่ใช้ในการทดสอบ

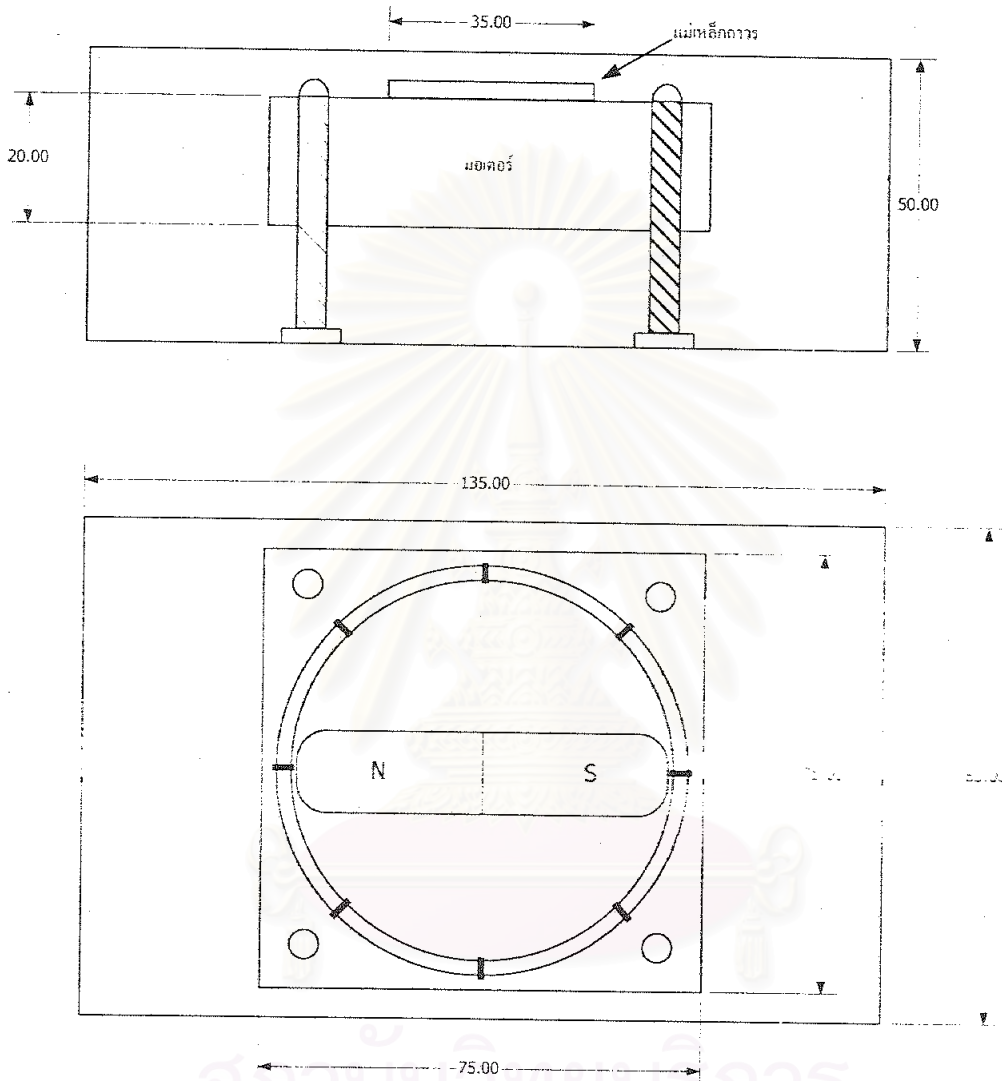


รูป ก. แสดงภาพอิเล็กโทรดแบบจานกลม(Disk Electrode)

รูป ข. แสดงภาพอิเล็กโทรดแบบหัวเห็ด(Mushroom Electrode)

รูป ค. แสดงภาพอิเล็กโทรดแบบทรงกลม(Sphere Electrode)

ภาคผนวก ค



แสดงโครงสร้างอุปกรณ์ที่ใช้กวนน้ำมันด้วยมอเตอร์ยัดติดด้วยแม่เหล็กถาวร โดยตัวถาวรเป็นแท่งโลหะขนาดเล็กปล่อยลอยเป็นอิสระภายในภาชนะเก็บตัวอย่างน้ำมัน

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายพินิจ ศรีธรรม เกิดที่จังหวัดนครราชสีมา เมื่อวันที่ 28 กันยายน พ.ศ.2515 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าจากสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตเทเวศร์ เมื่อปีการศึกษา 2537 ปัจจุบันรับราชการเป็น อาจารย์ 1 ระดับ 4 สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ นครราชสีมา



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย