การออกแบบและสร้างระบบแสดงผลตามเวลาจริงพร้อมกับควบคุมชุดกำเนิดสนามไฟฟ้ากระแสตรงความต่างศักย์สูง

บรรดาศักดิ์ อ่างมณี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

DESIGN AND CONSTRUCTION OF THE REAL-TIME MONITORING AND CONTROL SYSTEM FOR THE HIGH VOLTAGE DIRECT CURRENT ELECTRIC FIELD GENERATORS

BUNDASAK ANGMANEE

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
MAJOR IN PHYSICS
FACULTY OF SCIENCE
UBON RATCHATHANI UNIVERSITY
ACADEMIC YEAR 2018

COPYRIGHT OF UBON RATCHATHANI UNIVERSITY

ใบรับรองวิทยานิพนธ์

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

เรื่อง การออกแบบและสร้างระบบแสดงผลตามเวลาจริงพร้อมกับควบคุมชุดกำเนิดสนามไฟฟ้ากระแสตรงความต่างศักย์สูง

ผู้วิจัย นายบรรดาศักดิ์ อ่างมณี

คณะกรรมการสอบ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชีวะ ทัศนา	ประธานกรรมการ
ดร.อมร เทศสกุลวงศ์	กรรมการ
ดร.สมคิด เพ็ญชารี	กรรมการ

อาจารย์ที่ปรึกษา

.....

(ดร.อมร เทศสกุลวงศ์)

.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชริดา ปุกหุต)

คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.อริยาภรณ์ พงษ์รัตน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ปีการศึกษา 2561

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลือเป็นอย่างดียิ่งจาก ดร.อมร เทศสกุลวงศ์ ผู้เป็นประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณที่ท่านคอยช่วยเหลือประสิทธิประศาสตร์วิชาความรู้รวมทั้งให้คำแนะนำปรึกษาแก้ไขข้อผิดพลาดจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี และขอขอบพระคุณกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.ชีวะ ทัศนา และ ดร.สมคิด เพ็ญชารี ที่ได้กรุณาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งให้คำแนะนำ และข้อเสนอแนะต่าง ๆ ตลอดทั้งการตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณทุนเรียนดีวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทย (Science Achievement Scholarship of Thailand) ที่ให้การสนับสนุนด้านทุนการศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษา ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สำหรับการอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ และเงินสนับสนุนในการซื้อวัสดุอุปกรณ์สำหรับการทำวิจัย ขอขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร.รัตติกร ยิ้มนิรัญ ที่ได้เอื้อเฟื้อที่พักให้ความรู้ขณะศึกษาดูงาน ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ขอขอบพระคุณ ดร.พินิจ กิจขุนทด ผู้อำนวยการสถานีวิจัยแสงซินโครตรอนที่ 5.2 XAS สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) ที่ได้เอื้อเฟื้อการทดสอบการใช้งานของอุปกรณ์ ขอขอบคุณนาย ชิณวัฒน์ เอกวงษา นักวิจัยสถานีวิจัยแสงซินโครตรอนที่ 5.2 XAS สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) ที่ได้ให้ความรู้และแนะนำอุปกรณ์ การใช้งานและความรู้ต่าง ๆ ในการวิจัยที่สถานีวิจัยแสงซินโครตรอน และท้ายที่สุดต้องขอขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ ผู้คอยให้การสนับสนุน และช่วยเหลือด้านการศึกษา สุดท้ายนี้หากการดำเนินการวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้มีข้อบกพร่องประการใด ผู้วิจัยต้องขออภัยไว้ ณ ที่นี้ด้วย

บรรดาศักดิ์ อ่างมณี
ผู้วิจัย

บทคัดย่อ

เรื่อง : การออกแบบและสร้างระบบแสดงผลตามเวลาจริงพร้อมกับควบคุมชุดกำเนิดสนามไฟฟ้ากระแสตรงความต่างศักย์สูง

ผู้วิจัย : บรรดาศักดิ์ อ่างมณี

ชื่อปริญญา : วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา : ฟิสิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษา: ดร.อมร เทศสกุลวงศ์

คำสำคัญ : การควบคุมศักย์ไฟฟ้าแรงสูง, Arduino, การควบคุมแบบ PID

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาระบบกำเนิดสนามไฟฟ้าความต่างศักย์สูงกระแสไฟฟ้าต่ำสำหรับจับสารตัวอย่างในการตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพด้วยเทคนิคการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ในย่านพลังงานของแสงซินโครตรอน โดยงานวิจัยมี 2 ส่วนในการพัฒนาคือส่วนการพัฒนาการออกแบบชุดอุปกรณ์ให้เหมาะสมกับการใช้งานและส่วนการพัฒนาระบบกำเนิดสนามไฟฟ้าความต่างศักย์สูงกระแสต่ำ ซึ่งส่วนนี้ได้ถูกพัฒนาระบบควบคุมและระบบแสดงผลผ่านคอมพิวเตอร์ โดยสามารถกำเนิดสนามไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์อยู่ในช่วง 1.0 - 3.2 kV ซึ่งระบบประกอบด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560 ระบบแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณอนาลอก วงจรกำเนิดความต่างศักย์สูง และโปรแกรมควบคุมโดยพัฒนาให้สามารถควบคุมบนคอมพิวเตอร์ด้วยซอฟต์แวร์ LabVIEW รุ่น Home Edition 2014 สำหรับการสร้างฟังก์ชันในการควบคุมศักย์ไฟฟ้าสูงและสำหรับแสดงผลความต่างศักย์ไฟฟ้าสูง ในส่วนของไมโครคอนโทรลเลอร์ถูกใช้สำหรับการรับ – ส่งข้อมูลดิจิตอลระหว่างระบบควบคุมจากซอฟแวร์บนคอมพิวเตอร์กับวงจรสำหรับแปลงค่าสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณอนาลอก โดยสัญญาณที่ผ่านการแปลงจะส่งไปควบคุมการกำเนิดศักย์ไฟฟ้าสูงจากวงจรกำเนิด โดยอ่านค่าศักย์ไฟฟ้าสูงด้วย High voltage probe ผ่าน ADC ของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งจัดการข้อมูลด้วยฟังก์ชัน Moving average และควบคุมการกำเนิดสนามไฟฟ้าแบบย้อนกลับด้วยฟังก์ชัน PID Control โดยสามารถกำเนิดสนามไฟฟ้าที่มีค่าความละเอียดในการกำเนิดอยู่ที่ 2.5 V/bit และมีค่าความผิดพลาดของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจริงเทียบกับการควบคุมต่ำกว่า 5% โดยทำงานแบบ real-time

ABSTRACT

TITLE : DESIGN AND CONSTRUCTION OF THE REAL-TIME MONITORING AND CONTROL SYSTEM FOR THE HIGH VOLTAGE DIRECT CURRENT ELECTRIC FIELD GENERATORS
AUTHOR : BUNDASAK ANGMANEE
DEGREE : MASTER OF SCIENCE
MAJOR : PHYSICS
ADVISOR : AMORN THEDSAKHULWONG, Ph.D.
KEYWORDS : HIGH VOLTAGE CONTROLLER, ARDUINO, PID CONTROLLER

This research has developed an electric field generator, high voltage and low current for capturing sample materials to study physical properties by X-ray absorption techniques in the energy level of synchrotron light. The research has 2 parts in development. Is the development of the equipment design to suit the application and the development of the electric field generator system, high voltage, and low current. This part has been developed control system and computer display system. Which can generate an electric field with a potential difference in the range of 1.0 - 3.2 kV. The system consists of Arduino Mega 2560 microcontroller board, digital to analog conversion system, high voltage potential generator and control systems developed to be controlled on the computer with LabVIEW version Home Edition 2014 software for generating high voltage control functions and displaying high voltage potentials. The part of the microcontroller is used for receiving - sending digital data between the control systems from the software on the computer to the circuit for converting digital signals into analogue signals. The signal that passes through the conversion is sent to control the electric potential generator from the generator circuit. Read the high voltage with the high voltage probe via the microcontroller ADC, which manages data with the moving average function and controls the reverse electric field generator with PID Control. The device can generate an electric field with a origin resolution of 2.5 V/bit and an error of the actual voltage difference compared to the control below 5% in real-time operation.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	**ก**
บทคัดย่อภาษาไทย	**ข**
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	**ค**
สารบัญ	**ง**
สารบัญตาราง	**ซ**
สารบัญภาพ	**ฌ**
คำอธิบายสัญลักษณ์และอักษรย่อ	**ต**
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของการศึกษาค้นคว้า	3
1.4 สถานที่ทำวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี	
2.1 สนามไฟฟ้า	4
2.2 สนามไฟฟ้าความต่างศักย์สูง	13
2.3 อิเล็กทรอนิกส์	15
2.4 โปรแกรมควบคุมและการพัฒนา	22
2.5 การควบคุมแบบป้อนกลับแบบ PID controller	32
บทที่ 3 ระบบกำเนิดสนามไฟฟ้าความต่างศักย์สูง	
3.1 หลักการทำงานของระบบกำเนิดสนามไฟฟ้า	40
3.2 หม้อแปลงไฟฟ้าความต่างศักย์สูง (Flyback Transformer)	41
3.3 วงจรอิเล็กทรอนิกส์สำหรับการกำเนิดสนามไฟฟ้าความต่างศักย์สูง	42
3.4 ระบบวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าสูง	46
3.5 การออกแบบระบบกำเนิดสนามไฟฟ้า	48

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 การเตรียมวงจรอิเล็กทรอนิกส์ของระบบควบคุมและการพัฒนาโปรแกรมการกำเนิดสนามไฟฟ้าความต่างศักย์สูง

4.1 การเตรียมวงจรควบคุมการกำเนิดสนามไฟฟ้าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูง 58

4.2 การพัฒนาโปรแกรมควบคุมการกำเนิดสนามไฟฟ้าความต่างศักย์สูง 65

4.3 การเตรียมวงจรอิเล็กทรอนิกส์ 77

4.4 การเตรียมระบบจับสารตัวอย่างและระบบควบคุม 81

บทที่ 5 ผลการทดลองระบบควบคุมการกำเนิดสนามไฟฟ้าความต่างศักย์สูง

5.1 ผลการทดลองเพื่อทดสอบการทำงานของวงจรสวิตช์เหนี่ยวนำ 87

5.2 ผลการทดลองเพื่อทดสอบการเหนี่ยวนำของหม้อแปลง Flyback 88

5.3 ผลการทดลองส่งค่าข้อมูลดิจิตอลให้กับบอร์ดแปลงสัญญาณ 89

5.4 ผลการทดลองแปลงค่าข้อมูลดิจิตอลเป็นสัญญาณอนาลอก 90

5.5 ผลการทดลองควบคุมแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสูง 92

5.6 ผลการทดลองการอ่านค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 94

5.7 ผลการจัดการข้อมูลแบบ Moving average 98

5.8 ผลการควบคุมสนามไฟฟ้าด้วยการควบคุมแบบย้อนกลับ (PID Control) 101

บทที่ 6 สรุปผลการดำเนินการวิจัย

6.1 สรุปการออกแบบ สร้าง และทดสอบระบบควบคุม 103

6.2 สรุปผลการพัฒนาโปรแกรม 104

6.3 สรุปผลการใช้งานระบบกำเนิดสนามไฟฟ้าความต่างศักย์สูง 105

เอกสารอ้างอิง **106**

ภาคผนวก

ก ผลงานการตีพิมพ์วิจัย 109

ข วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง 116

ค ภาพการออกแบบสิ้นส่วนอุปกรณ์สำหรับงานวิจัย 122

ประวัติผู้วิจัย **140**

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	วิธีปรับค่าพารามิเตอร์สำหรับ Proportional mode (P)	37
2.2	วิธีปรับค่าพารามิเตอร์สำหรับ Proportional-plus-integral mode (PI)	38
2.3	วิธีปรับค่าพารามิเตอร์สำหรับ Proportional-integral-derivative mode (PID)	39
5.1	พารามิเตอร์ PID สำหรับลดความผิดพลาดในการกำเนิดความต่างศักย์ไฟฟ้า	102

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	ลักษณะของสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่ง P จากจุดประจุไฟฟ้า q_1 โดยผู้สังเกตที่จุด O	5
2.2	การคำนวณหาสนามไฟฟ้าจากแผนตัวนำวงกลมที่จุด P ซึ่งห่างจากแผ่นวงกลมตัวนำเป็นระยะ x โดยมีรัศมีของแผ่นตัวนำเป็น R	6
2.3	การเกิดสนามไฟฟ้าจากแผนตัวนำสองแผ่นที่วางห่างกันเป็นระยะ d โดยสนามไฟฟ้าภายในระหว่างแผ่นทั้งสองมีความสม่ำเสมอ	7
2.4	สนามไฟฟ้าบนประจุบวกและปะจุลบ	8
2.5	การเกิดสนามไฟฟ้าระหว่างประจุไฟฟ้าสองจุด	8
2.6	การเกิดสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นตัวนำไฟฟ้าที่มีประจุต่างกันและแบบจำลอง	9
2.7	ขั้วคู่ไฟฟ้าของโมเลกุลของ CO และ H_2O	10
2.8	ขั้วคู่ไฟฟ้าในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ	10
2.9	สารไดอิเล็กทริกภายใต้สนามไฟฟ้า	11
2.10	สารไดอิเล็กทริกภายใต้สนามไฟฟ้าตามกฎของเกาส์โดยเส้นประแสดงลักษณะของผิวเกาส์เซียน	12
2.11	วงจรกำเนิดความต่างศักย์ไฟฟ้าสูง Cockcroft-Walton multiplier ซึ่งวงจรได้ใช้ตัวเก็บประจุร่วมกัน 3 ตัว แถวกลางเพื่อลดการใช้ตัวเก็บประจุ	14
2.12	หม้อแปลง Flyback จากหน้าจอแสดงผลชนิด CRT	15
2.13	ลักษณะของสัญญาณอนาลอกและสัญญาณดิจิตอลของการวัดค่าอุณหภูมิในรอบวัน (ก) สัญญาณอนาลอก (ข) สัญญาณดิจิตอล	16
2.14	ลักษณะของลอจิก HIGH และลอจิก LOW	17
2.15	ลักษณะของรูปแบบสัญญาณดิจิตอล	17
2.16	การส่งข้อมูลดิจิตอลผ่านการกำหนดจังหวะการส่งสัญญาณนาฬิกา	18
2.17	ลักษณะของรูปแบบในการส่งข้อมูลจากสัญญาณนาฬิกา	18
2.18	การแปลงอนาลอกเป็นดิจิตอล (ADC) โดยเมื่อสัญญาณผ่านการแปลงจะถูกเก็บในรูปของเลขฐานสองในลักษณะของลอจิก HIGH (1) และลอจิก LOW (0)	19
2.19	การแปลงดิจิตอลเป็นอนาลอก (DAC) (ก) โดยเมื่อสัญญาณผ่านการแปลงจะถูกเก็บในรูปของค่าอนาลอก (ข) และสัญญาณถูกทำให้เรียบด้วย Reconstruction filter	20

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
2.20	(ก) การเชื่อมต่อสื่อสารการรับ-ส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ Master และอุปกรณ์ Slave จำนวน 1 ตัว (ข) การเชื่อมต่อสื่อสารการรับ-ส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ Master และ Slave จำนวนมากกว่า 1 ตัวพร้อมกัน	21
2.21	การสื่อสารด้วย I2C (ก) รูปแบบการกำหนดคำสั่งจาก Master ไปหาอุปกรณ์ Slave (ข) รูปแบบคำสั่งจากอุปกรณ์ Slave ไปหา Master ซึ่งด้วยรหัสควบคุม	22
2.22	ข้อมูลช่องเชื่อมต่อใช้งานบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560	23
2.23	ซอฟต์แวร์ LabVIEW Home Edition 2014 พร้อม Activate	24
2.24	หน้าต่างสำหรับการพัฒนาโปรแกรมควบคุมด้วยซอฟต์แวร์ LabVIEW (ก) หน้าต่าง Front Panel (ข) หน้าต่าง Block Diagram	25
2.25	หน้าต่าง Controls บนส่วน Front Panel สำหรับการพัฒนาหน้าต่างควบคุมและแสดงผลให้ใช้งานได้อย่างง่าย	26
2.26	หน้าต่าง Functions บนส่วน Block Diagram สำหรับการพัฒนาโปรแกรมควบคุมการจัดการข้อมูลและการจัดแสดงผล	27
2.27	การแทนชนิดของฟังก์ชันด้วยสีและการแทนชนิดของข้อมูลด้วยความหนาของเส้นสำหรับการพัฒนาโปรแกรมบนหน้าต่าง Block Diagram ของซอฟต์แวร์ LabVIEW	28
2.28	โปรแกรม VI Package manager 2018 สำหรับการค้นหาและติดตั้งฟังก์ชันเพิ่มเติมจากผู้พัฒนาที่ได้รับอนุญาตจาก National Instruments	29
2.29	ฟังก์ชัน Degilent LINX ที่ได้รับอนุญาตให้สามารถสื่อสารรับ-ส่งข้อมูลด้วย NI-VISA ของ LabVIEW ผ่านบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino	30
2.30	ฟังก์ชันบนหน้าต่าง Block Diagram (ก) เมื่อติดตั้ง Digilent LINX เสร็จฟังก์ชัน MakerHub แสดงบนหน้าต่างฟังก์ชัน (ข) ฟังก์ชันภายในของ MakerHub (ค) ฟังก์ชันภายในของ LINX (ง) ฟังก์ชันภายในของ Peripherals	31
2.31	การดูข้อมูลเพิ่มเติมของฟังก์ชันโดยมีคำอธิบายพร้อมบอกข้อมูลการเชื่อมต่อ	31
2.32	การทำงานของระบบควบคุมย้อนกลับแบบ PID	32
2.33	การควบคุมแบบ P Control (K_p)	33
2.34	การควบคุมแบบ I Control (K_i)	33
2.35	การควบคุมแบบ D Control (K_d)	34

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
2.36	ไดอะแกรมการทำงานของการควบคุมแบบระบบเปิดของ PID Controller	35
2.37	กราฟสัญญาณเอาต์พุตจากระบบควบคุมและสัญญาณเอาต์พุตจากการวัดค่า	35
2.38	ไดอะแกรมการทำงานของการควบคุมแบบระบบปิดของ PID Controller	36
2.39	ลักษณะตอบสนองของสัญญาณเอาต์พุตโดยขึ้นอยู่กับการปรับจูนค่า PID	36
2.40	(ก) ลักษณะตอบสนองของสัญญาณเอาต์พุตเมื่อมีการปรับจูนค่า PI (ข) ลักษณะตอบสนองของสัญญาณเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนแปลงค่า T_i	38
3.1	ไดอะแกรมการทำงานของระบบกำเนิดสนามไฟฟ้าความต่างศักย์สูงกระแสต่ำ	40
3.2	วงจรการพันหม้อแปลง Flyback สำหรับการสร้างการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กบนแกนหม้อแปลงด้วยไฟฟ้ากระแสตรง	41
3.3	วงจรสวิตช์กระแสไฟฟ้าด้วย MOSFET สำหรับเหนี่ยวนำหม้อแปลง	42
3.4	การวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าด้วย Oscilloscope และ High voltage probe ซึ่งต่อกับ Agilent multimeter สำหรับอ่านค่าความต่างศักย์ในอัตราส่วน 1:1000	42
3.5	วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลจากซอฟต์แวร์ LabVIEW (Home Edition) ผ่านบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino MEGA 2560 ให้เป็นสัญญาณอนาลอก	43
3.6	(ก) ลักษณะสัญญาณดิจิตอลขนาด 16 bit สำหรับส่งข้อมูลโดยสามารถกำหนดพารามิเตอร์ในการแปลงสัญญาณได้ภายในสัญญาณดิจิตอล (ข) การส่งข้อมูลดิจิตอลกับสัญญาณนาฬิกา (SCK)	44
3.7	วงจรปรับระดับความต่างศักย์ Non-Inverting amplifier (a) รายละเอียดการเชื่อมต่อ IC LM358 (b) การคำนวณกำลังขยายของสัญญาณผ่านตัวต้านทาน	44
3.8	วงจรระดับกระแสไฟฟ้า LM317 ซึ่งต่อกับทรานซิสเตอร์ N3055 เพื่อเพิ่มระดับของกระแสไฟฟ้าสูงสุดได้ 1.5 แอมแปร์	45
3.9	วงจรทดลองควบคุมการกำเนิดสนามไฟฟ้าความต่างศักย์สูง	46
3.10	High voltage probe ซึ่งสามารถวัดได้ทั้งไฟฟ้ากระสตรงและไฟฟ้ากระแสสลับ	46
3.11	วงจรแสดงการรับค่านาลอกของสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าเพื่อแปลงเป็นค่าดิจิตอล	47

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
3.12	(ก) วงจร Voltage divider สำหรับสร้างอุปกรณ์วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าสูง (ข) สมการคำนวณเพื่อหาค่าความต้านทานที่เหมาะสมเพื่อลดความศักย์ไฟฟ้าอินพุตและเอาต์พุตด้วยอัตรา 1:1000 โวลต์ ถ้าใช้ความต้านทาน R_2 เท่ากับ 1 MΩ จะได้ R_1 เท่ากับ 999 MΩ	47
3.13	การออกแบบอุปกรณ์จับสารตัวอย่างที่สามารถกำเนิดสนามไฟฟ้า	48
3.14	การออกแบบฐานจับและฐานยึดของอุปกรณ์จับสารตัวอย่าง	49
3.15	การออกแบบอุปกรณ์ป้องกันสนามไฟฟ้าของอุปกรณ์จับสารตัวอย่าง	49
3.16	การออกแบบขั้วไฟฟ้าของอุปกรณ์จับสารตัวอย่าง	49
3.17	การออกแบบส่วนเชื่อมต่อสายไฟฟ้าความต่างศักย์สูงกับระบบจับสารตัวอย่าง	50
3.18	การออกแบบท่อเซรามิคสำหรับป้องกันการนำไฟฟ้าภายในอุปกรณ์	50
3.19	การออกแบบอุปกรณ์สำหรับวางชุดจับสารตัวอย่างเพื่อช่วยในการเตรียมสารตัวอย่างพร้อมทดสอบวางอุปกรณ์	50
3.20	การออกแบบการจัดวางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์	51
3.21	การออกแบบกล่องควบคุมพร้อมทดสอบวางตำแหน่งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์	52
3.22	การออกแบบฝากล่องควบคุมพร้อมรูสำหรับอากาศผ่านเพื่อช่วยลดความร้อนภายใน (ก) ฝาด้านบน (ข) ฝาด้านล่าง	53
3.23	การออกแบบฝาด้านหน้าและด้านหลังของกล่องควบคุม	53
3.24	การออกแบบฐานวางตำแหน่งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์	54
3.25	การออกแบบกล่องป้องกันหม้อแปลง Flyback	54
3.26	การออกแบบกล่องป้องกันวงจรแบ่งแรงดัน (Voltage divider) สำหรับวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงกระแสต่ำ	55
3.27	การออกแบบเพิ่มเติมภายในกล่องควบคุม อาทิ ชิ้นส่วนรองบอร์ดอิเล็กทรอนิกส์ ชิ้นส่วนรองพื้นช่วยให้กล่องยึดเกาะกับพื้นได้ดีขึ้น ชิ้นส่วนข้อต่อยึดกล่องวงจรแบ่งแรงดันและชิ้นส่วนยกบอร์ดอิเล็กทรอนิกส์ตามลำดับ	55
3.28	ไดอะแกรมการทำงานของโปรแกรมผ่านซอฟแวร์ LabVIEW Home Edition 2014 เข้ากับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino MEGA 2560	56

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
3.29	ไดอะแกรมแสดงส่วนประกอบภายในหน้าต่างควบคุมการกำเนิดสนามไฟฟ้าความต่างศักย์สูงกระแสต่ำ	57
4.1	การพันหม้อแปลง Flyback สำหรับการสร้างการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กบนแกนหม้อแปลงด้วยไฟฟ้ากระแสตรง	58
4.2	การเตรียมวงจรสำหรับการทดสอบหม้อแปลง Flyback พร้อมอ่านค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าด้วย High voltage probe ที่ต่อเข้ากับ Agilent Multimeter	59
4.3	การเตรียมวงจรสำหรับการทดลองแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณอนาลอกด้วยวงจรรวม MCP4922 พร้อมวัดสัญญาณด้วย Oscilloscope	60
4.4	การเตรียมวงจรสำหรับการทดลองแปลงระดับของความต่างศักย์ไฟฟ้า โดยขยายขึ้นเป็น 2 เท่าพร้อมวัดสัญญาณปรับเทียบเทียบความถูกต้องกับ Agilent Multimeter	61
4.5	การเตรียมวงจรสำหรับการทดลองแปลงระดับของกระแสไฟฟ้าโดยขยายขึ้นจากเดิมเป็น 1.5 แอมแปร์	62
4.6	การเตรียมวงจรสำหรับการปรับเทียบการรับค่าอนาลอกของความศักย์ไฟฟ้าสูง	63
4.7	การเตรียมวงจรสำหรับการปรับเทียบความถูกต้องของวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าในการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูง	64
4.8	การตรวจสอบการเชื่อมต่อของบอร์ดควบคุมและซอฟต์แวร์ LabVIEW	65
4.9	การตั้งค่าการเชื่อมต่อของบอร์ดควบคุมและซอฟต์แวร์ LabVIEW	66
4.10	การตั้งค่าใช้งานพอร์ตอนุกรมสำหรับเชื่อมต่อกับของบอร์ดควบคุม	67
4.11	การตั้งค่ารูปแบบการพัฒนาโปรแกรมควบคุมสำหรับเชื่อมต่อกับของบอร์ดควบคุม	67
4.12	หน้าต่างแสดงการเชื่อมต่อที่สมบูรณ์ของบอร์ดควบคุมและซอฟต์แวร์ LabVIEW	68
4.13	หน้าต่าง Block Diagram (ก) สำหรับการพัฒนาโปแกรมเพื่อเริ่มใช้งานการเชื่อมต่อสื่อสารแบบ SPI (ข) สำหรับการพัฒนาโปแกรมเพื่อหยุดการใช้งานการเชื่อมต่อสื่อสารกับบอร์ดไมโคคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560	69
4.14	หน้าต่าง Control Panel สำหรับการพัฒนาโปแกรมเพื่อรับค่าข้อมูลสำหรับการตั้งค่าการเชื่อมต่อสื่อสารแบบ SPI โดยรับค่า Serial Port และ Baud Rate พร้อมทั้งแสดงความถี่สัญญาณนาฬิกา (Clock Frequency) ที่โปรแกรมทำงาน	69

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.15	หน้าต่าง Block Diagram สำหรับการพัฒนาโปแกรมเพื่อจัดการข้อมูลสำหรับการเขียนข้อมูลดิจิตอลผ่านการเชื่อมต่อสื่อสารแบบ SPI	70
4.16	หน้าต่าง Control Panel สำหรับการพัฒนาโปแกรมเพื่อรับค่าข้อมูลสำหรับการกำหนดศักย์ไฟฟ้าเอาต์พุต และแสดงข้อมูลดิจิตอลที่ส่งผ่าน SPI เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลพร้อมแสดงเอาต์พุตของข้อมูลในรูปแบบ Decimal number	71
4.17	หน้าต่าง Block Diagram สำหรับการพัฒนาโปแกรมเพื่อรับค่าข้อมูลอนาลอกสำหรับการอ่านค่าข้อมูลความต่างศักย์ไฟฟ้ากลับเพื่อเปรียบเทียบกับอินพุต	71
4.18	หน้าต่าง Block Diagram สำหรับการพัฒนาโปแกรมเพื่อลดการแกว่งของข้อมูลจากการรับสัญญาณเข้าสู่ระบบควบคุม	72
4.19	หน้าต่าง Block Diagram สำหรับการพัฒนาโปแกรมเพื่อลดความผิดพลาดในการกำเนิดสนามไฟฟ้าด้วยการควบคุมแบบย้อนกลับ	73
4.20	หน้าต่าง Block Diagram สำหรับการพัฒนาโปแกรมเพื่อลดความผิดพลาดในการกำเนิดสนามไฟฟ้าด้วยการปรับพารามิเตอร์ PID Gains	73
4.21	หน้าต่าง Block Diagram สำหรับการพัฒนาโปแกรมเพื่อรับค่าข้อมูลอนาลอกสำหรับการอ่านค่าข้อมูลความต่างศักย์ไฟฟ้ากลับเพื่อเปรียบเทียบกับอินพุต	74
4.22	หน้าต่าง Block Diagram สำหรับการพัฒนาโปแกรมกำเนิดสนามไฟฟ้า	75
4.23	หน้าต่าง Control Panel สำหรับการพัฒนาโปแกรมกำเนิดสนามไฟฟ้า	76
4.24	การออกแบบ (ก) ลายวงจร (ข) สัญลักษณ์ตำแหน่งอุปกรณ์ของวงจรแบ่งแรงดันสำหรับวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูง	77
4.25	การออกแบบลายวงจรและสัญลักษณ์บอกตำแหน่งอุปกรณ์ของวงจรระบบควบคุม	78
4.26	การออกแบบลายวงจรและสัญลักษณ์ตำแหน่งอุปกรณ์ของวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าสำหรับระบบแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้กับระบบควบคุม	78
4.27	ลายวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่กัดทองแดงส่วนที่ไม่ต้องการออกด้วยกรดเฟอร์ริกคลอไลด์	79
4.28	ด้านหน้าของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่แสดงตำแหน่งของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์	79
4.29	ด้านหน้าของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ผ่านการเชื่อมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เข้ากับบอร์ด	80
4.30	ด้านหลังของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ผ่านการเคลือบผิวเพื่อป้องกันความเสียหาย	80

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.31	ชิ้นงานสำเร็จของระบบอุปกรณ์จับสารตัวอย่างที่สามารถกำเนิดสนามไฟฟ้าคร่อมสารตัวอย่าง	81
4.32	ชิ้นงานสำเร็จของฐานจับและฐานยึดของระบบอุปกรณ์จับสารตัวอย่างพร้อมกำเนิดสนามไฟฟ้า	81
4.33	ชิ้นงานสำเร็จของระบบอุปกรณ์ป้องกันสนามไฟฟ้าของอุปกรณ์จับสารตัวอย่างพร้อมกำเนิดสนามไฟฟ้า	82
4.34	ชิ้นงานสำเร็จของขั้วไฟฟ้าของอุปกรณ์จับสารตัวอย่างพร้อมกำเนิดสนามไฟฟ้า	82
4.35	ชิ้นงานสำเร็จของส่วนเชื่อมต่อสายไฟฟ้าความต่างศักย์สูงกับชุดจับสารตัวอย่าง	82
4.36	ชิ้นงานสำเร็จของท่อเซรามิดสำหรับป้องกันการนำไฟฟ้าภายในอุปกรณ์	82
4.37	ชิ้นงานสำเร็จของอุปกรณ์สำหรับวางชุดจับสารตัวอย่างเพื่อช่วยในการเตรียมสารตัวอย่างพร้อมทดสอบวางอุปกรณ์	83
4.38	การทดสอบจัดวางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์บนฐานรองก่อนทดสอบวางภายในกล่องระบบควบคุมการกำเนิดสนามไฟฟ้าความต่างศักย์สูง	84
4.39	ชิ้นส่วนสำเร็จของฝาด้านหน้ากล่องระบบควบคุมและชิ้นส่วนสำเร็จของฝาด้านหลังกล่องระบบควบคุมซึ่งมีช่องสำหรับเชื่อมต่อความต่างศักย์สูงไปที่อุปกรณ์จับสารตัวอย่างและช่องเชื่อมต่อสาย USB กับคอมพิวเตอร์นอกจากนี้ยังมีระบบระบายความร้อนด้วยพัดลมขนาดเล็ก	85
4.40	ชิ้นส่วนสำเร็จของฝาด้านบนและด้านล่างของกล่องระบบควบคุมพร้อมช่องระบายอากาศและชิ้นส่วนสำเร็จของฐานรองอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์	86
5.1	สัญญาณไฟฟ้าจากขดลวดทั้งสองบนแกนปฐมภูมิของแกนหม้อแปลง Flyback	87
5.2	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าอินพุตกับความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงเอาต์พุตจากหม้อแปลง Flyback	88
5.3	สัญญาณดิจิตอลที่ถูกส่งจากพอร์ต SPI ของบอร์ด Arduino MEGA 2560 เพื่อแปลงเป็นสัญญาณอนาลอกผ่าน IC MCP4922 ควบคุมด้วย LabVIEW (Home Edition)	89
5.4	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับค่าดิจิตอลจากการแปลงสัญญาณ	90
5.5	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับค่าดิจิตอลจากการขยายสัญญาณด้วยวงจร Non-Inverting Op-amp	91

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
5.6	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงกับแรงดันไฟฟ้าอินพุตที่เกิดขึ้นจากการทดสอบกับหม้อแปลง Flyback	92
5.7	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดิจิตอลอินพุตกับความต่างศักย์ไฟฟ้าเอาต์พุตของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสูง	93
5.8	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าอินพุตกับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสูง	94
5.9	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการอ่านค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ากับการจ่ายค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าในการปรับเทียบการอ่านค่าช่วง 0–5 V	95
5.10	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการอ่านค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ากับการจ่ายค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าในการปรับเทียบการอ่านค่าช่วง 0–10 V	96
5.11	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการอ่านค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจาก ADC และ Agilent	96
5.12	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงที่เกิดขึ้นจากการทดสอบกับหม้อแปลง Flyback บันทึกค่าด้วย ADC	97
5.13	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าอินพุตกระแสสูงกับความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงที่เกิดขึ้นจากหม้อแปลง Flyback โดยจัดการข้อมูลด้วย Moving average	98
5.14	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าอินพุตกระแสสูงกับความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงที่เกิดขึ้นจากการทดสอบกับหม้อแปลง Flyback โดยการจัดการข้อมูลด้วยฟังก์ชัน Moving average	100
5.15	กราฟเปรียบเทียบการควบคุมความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงจากหม้อแปลง Flyback	100
5.16	กราฟเปรียบเทียบการควบคุมความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงจากการควบคุมแบบย้อนกลับ	101
ก.1	High voltage Probe 40kV ยี่ห้อ Testec รุ่น TT-HVP40	116
ก.2	Power supply ยี่ห้อ Agilent รุ่น E3631A	116
ก.3	Digital multimeter ยี่ห้อ Agilent รุ่น 34405A	116
ก.4	Digital multimeter ยี่ห้อ Kyoritsu รุ่น KEW 1011	117
ก.5	Oscilloscope ยี่ห้อ Siglent รุ่น SDS 1102CML	117
ก.6	3D Printer ยี่ห้อ Anycubic I3 Mega	117
ก.7	ไมโครคอนโทรลเลอร์ ยี่ห้อ Arduino รุ่น MEGA 2560 พร้อมสายเชื่อมต่อ USB	118

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
ก.8	หม้อแปลง High voltage (Flyback) ยี่ห้อ Samsung	118
ก.9	แผ่น Printed circuit board (PCB) สำหรับทำวงจรอิเล็กทรอนิกส์	118
ก.10	กรดกัดทองแดง (Ferric chloride)	119
ก.11	วงจรรวมแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาลอก ขนาด 12 bit (MCP4922)	119
ก.12	ไอซีสำหรับเพิ่มกระแสไฟฟ้า (LM317)	119
ก.13	MOSFET N Channel (P55NF06)	120
ก.14	ซอฟต์แวร์ LabVIEW Home Edition 2014	120

คำอธิบายสัญลักษณ์ และอักษรย่อ

ความหมาย	สัญลักษณ์	หน่วย SI
Arduino MEGA 2560	Arduino	-
LabVIEW Home Edition 2014	LabVIEW	-
แรงระหว่างประจุไฟฟ้า	F	N
สนามไฟฟ้า	E	V/m, N/C
ประจุไฟฟ้า	q	C
ค่าคงที่ของคูลอมบ์	k	8.9876×10^{9} Nm^2/C^2
ความหนาแน่นประจุบนแผ่นตัวนำ	σ	C/m^2
ค่าคงตัวไดอิเล็กทริก	κ	-
ค่าความจุไฟฟ้า	C	F
ไฟฟ้ากระแสสลับ	AC	-
ไฟฟ้ากระแสตรง	DC	-
Serial-to-peripheral interface	SPI	-
Inter-integrated circuit	I2C	-
Proportional–Integral–Derivative controller	PID	-
สัญญาณควบคุม	$u(t)$	-
ค่าความคลาดเคลื่อนของสัญญาณขาออก	$e(t)$	-
Variable of integration	τ	s
ค่าอัตราขยายแบบสัดส่วน	K_p	-
integral time	T_i	s
derivative time	T_d	s
ฟังก์ชันการถ่ายโอน	$G(s)$	-
ฟังก์ชันเอาต์พุตจากการวัด	$Y(s)$	-
ฟังก์ชันเอาต์พุตจากการควบคุม	$U(s)$	-

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

การศึกษาหรือการวิจัยด้านวัสดุศาสตร์ในปัจจุบันถูกพัฒนามากขึ้นจากในอดีตเนื่องด้วยในปัจจุบันมีอุปกรณ์ เครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ที่ทันสมัยมากขึ้นและสามารถศึกษาคุณสมบัติเฉพาะได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่การพัฒนาเครื่องมือหรืออุปกรณ์ในการศึกษาวิจัยเป็นเรื่องสำคัญในการอนาคต ซึ่งคุณสมบัติเฉพาะบางประการของสารประกอบยังไม่สามารถอธิบายได้เนื่องด้วยเหตุผลด้านอุปกรณ์ในการศึกษา โดยในปัจจุบันการศึกษาวิจัยด้านวัสดุศาสตร์อาศัยอุปกรณ์ต่าง ๆ ในการศึกษาคุณสมบัติ เช่น ศึกษาลักษณะของอะตอมด้วยเครื่อง Scanning electron microscope (SEM) ศึกษาระนาบของอะตอมในการเกิดโครงสร้างทางเคมีด้วย X-Ray Diffraction (XRD) ศึกษาช่วงพลังงานในการกระตุ้นสารประกอบด้วยการอาศัยการสังเกตสเปคตรัม [1], [2]

การศึกษาทางวัสดุวัสดุศาสตร์ในประเทศไทยในปัจจุบันมีความหลากหลายมากขึ้นอย่างมาก เนื่องจากในช่วงปี พ.ศ. 2539 ประเทศไทยมีสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอนเกิดขึ้น โดยตั้งอยู่ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ซึ่งเป็นสถานีวิจัยที่อาศัยแสงซินโครตรอนที่ได้จากการเร่งอนุภาคที่มีประจุภายใต้สภาพสุญญากาศโดยสามารถเร่งให้มีพลังงานสูงสุดที่ 1.2 จิกะอิเล็กตรอนโวลต์ (GeV) ซึ่งสามารถศึกษาคุณสมบัติเฉพาะของวัสดุได้ลึกและถูกต้องมากยิ่งขึ้น โดยคุณสมบัติในการศึกษาด้วยเทคนิคการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ (x-ray absorption spectroscopy technique) สามารถศึกษาขนาดอะตอม ระยะห่างของพันธะ ระดับชั้นพลังงานของสารประกอบที่สามารถเกิดการกระตุ้นได้ [3] และด้วยเหตุนี้การศึกษาคุณสมบัติเหล่านี้จึงถูกกล่าวถึงเมื่อสารหรือสสารเหล่านี้อยู่ในสภาพที่แตกต่างจากสภาพปกติ โดยสภาพที่สามารถเป็นไปได้อย่างเช่น การอยู่ภายใต้อำนาจของความร้อน ภายใต้อำนาจของกระแสไฟฟ้า ภายใต้อำนาจของสนามแม่เหล็ก และการอยู่ภายใต้อำนาจของสนามไฟฟ้า ซึ่งการที่วัสดุอยู่ภายใต้สภาพแวดล้อมที่ไม่ปกติตามที่ได้กล่าวมานี้อาจทำให้คุณสมบัติบางประการเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งงานวิจัยของ W. Kempet, B. Marungsri, R. Yimniran and at al. [4] ได้ศึกษาโครงสร้างของวัสดุตัวอย่างประเภทเซรามิก (Lead zirconate titanate) ภายใต้อำนาจของสนามไฟฟ้าในช่วง 0.7 kV/mm และ 1.4 kV/mm โดยกำหนดกระแสมากที่สุดที่ 20 mA พบว่าความสามารถในการดูดกลืนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างลดลงเมื่อสนามไฟฟ้ามีค่ามากขึ้นซึ่งส่งผลในอะตอมกลางของธาตุไทเทเนียมเกิดการเคลื่อนตัวออกจากจุดเดิมไป 0.05 °A และ 0.1 °A ตามสนามไฟฟ้าที่มากขึ้น

นอกจากนี้งานวิจัยของ W. Kempet, B. Marungsri, R. Yimniran and at al. [5] ได้ศึกษาโครงสร้างของของเซรามิก (Lead zirconate titanate) และออกแบบอุปกรณ์กำเนิดสนามไฟฟ้าพร้อมจับสารตัวอย่างพบว่าภายใต้อำนาจของสนามไฟฟ้าในช่วง 0.7 kV/mm และ 1.4 kV/mm โดยกำหนดกระแสมากที่สุดที่ 14 mA พบว่าความสามารถในการดูดกลืนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างลดลงเมื่อสนามไฟฟ้ามีค่ามากขึ้นซึ่งส่งผลในอะตอมกลางของธาตุไทเทเนียมเกิดการเคลื่อนตัวออกจากจุดเดิมไป ซึ่งมีช่วงของการดูดกลืนเกิดขึ้น 4 ช่วงตามพลังงานของอิเล็กตอรน โดยแต่ละช่วงอะตอมของไทเทเนียมจะเบนออกจากจุดเดิมซึ่งมากขึ้นตามสนามไฟฟ้าที่มากขึ้น จากเหตุผลข้างต้นจึงเป็นที่มาในการพัฒนาเครื่องมืออุปกรณ์เพื่อศึกษาคุณสมบัติภายใต้อำนาจสภาพแวดล้อมที่ต่างจากปกติ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นในการพัฒนาสภาพแวดล้อมของสนามแม่เหล็ก นอกจากนี้สนามไฟฟ้าถูกใช้ในงานวิจัยของ Aizhi B. and at al. [6] ได้ทำวิจัยเกี่ยวกับชีววิทยาและสนามไฟฟ้าโดยเขาได้ศึกษาผลกระทบที่มีผลต่อเชื้อแบคทีเรียภายใต้สนามไฟฟ้าซึ่งสนามไฟฟ้าอยู่ที่ 4 kV/cm ซึ่งเป็นศักย์ไฟฟ้าสูง งานวิจัยทางด้วนวิศวกรรมของ Chen F. and at al. [7] ได้ศึกษาการกระจายตัวของอนุภาคคาร์บอนที่มีโครงสร้างเหมือนเพชรซึ่งถูกเคลือบลงบนหัวบดและหัวขัดของโรงสีข้าวโดยได้ใช้สนามไฟฟ้า มาช่วยในการกระจายตัวและทำให้การกระจายตัวดีมากขึ้น โดยได้ใช้ศักย์ไฟฟ้าในการกระจายอยู่ที่ 6 kV งานวิจัยทางด้านการเกษตรของ Guibao S. and at al. [8] ได้ศึกษาการใช้สนามไฟฟ้าช่วยในการฟักไข่โดยได้ใช้สนามไฟฟ้า 30 kV/m 60kV/m และ 90 kV/m และผลปรากฏว่าได้ผลเร็วขึ้น

โดยในงานวิจัยนี้ ได้พัฒนาอุปกรณ์กำเนิดสนามไฟฟ้าสำหรับศึกษาโครงสร้างของสารในระดับอะตอมด้วยเทคนิคการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ด้วยแสงซินโครตรอนภายใต้อำนาจของสนามไฟฟ้าแรงดันสูง ซึ่งในส่วนแรกของงานวิจัยเป็นการออกแบบอุปกรณ์จับสารตัวอย่างที่สามารถกำเนิดสนามไฟฟ้ากับสารตัวอย่างได้เฉพาะสำหรับใช้งานภายในสถานีวิจัยแสงซินโครตรอนสำหรับเทคนิคการดูดกลืนรังสีเอกซ์ โดยช่วงของสนามไฟฟ้าที่สามารถกำเนิดได้ศักย์ไฟฟ้าอยู่ในช่วง 1.0 kV ถึง 3.2 kV และสามารถควบคุมระดับศักย์ไฟฟ้าได้ด้วยระบบควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ที่พัฒนาด้วยซอฟต์แวร์ LabVIEW Home Edition 2014 ผ่านบอร์ดไมโครคอนโทรเลอร์ Arduino Mega 2560 ซึ่งมีความละเอียดในการกำเนิดสนามไฟฟ้าอยู่ที่ 2.5 V/bit โดยระบบควบคุมและการแสดงผลผ่านคอมพิวเตอร์ ส่วนที่ 2 เป็นส่วนสำหรับการทดสอบการกำเนินสนามไฟฟ้าและอุปกรณ์จับสารตัวอย่างซึ่งรวมถึงการทดสอบใช้งานหม้อแปลงศักย์ไฟฟ้าสูง (Flyback transformer) ในการกำเนิดศักย์ไฟฟ้านอกจากนี้ได้ใช้งานการควบคุมแบบย้อนกลับ (Proportional–Integral–Derivative controller, PID controller) เข้ามาช่วยในการลดค่าความผิดพลาดในการกำเนิดสนามไฟฟ้าซึ่งมีค่าความผิดพลาดไม่เกิน 5% ของสนามไฟฟ้าอินพุต

สำหรับส่วนที่ 3 เป็นส่วนของการออกแบบกล่องระบบควบคุมและการออกแบบโปรแกรมให้ง่ายสำหรับการใช้งาน โดยกล่องระบบควบคุมถูกออกแบบให้มีช่องเชื่อมต่อพอร์ตอนุกรมสำหรับเชื่อมต่อกับโปแกรมบนคอมพิวเตอร์ ช่องเชื่อมต่อศักย์ไฟฟ้าสูงไปยังตัวจับสารตัวอย่าง สำหรับการออกแบบโปรแกรมควบคุมได้แบ่งการทำงานของโปรแกรมเป็นส่วนประกอบด้วย หน้า Main หน้า Data Analysis หน้า Graph analysis หน้า PID Controller และหน้า Help เพื่อให้การใช้งานมีความเป็นระเบียบและง่ายต่อการควบคุมซึ่งรายละเอียดได้กล่าวถึงเป็นลำดับถัดไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาการออกแบบและสร้างอุปกรณ์จับสารตัวอย่าง

1.2.2 เพื่อศึกษาและควบคุมการกำเนิดสนามไฟฟ้าแรงดันสูงในช่วง 1.0 kV ถึง 3.2 kV

1.2.3 เพื่อศึกษาและออกแบบโปรแกรมควบคุมและแสดงผลการกำเนิดสนามไฟฟ้าผ่านโปรแกรมบนคอมพิวเตอร์

1.3 ขอบเขตของการศึกษาค้นคว้า

1.3.1 ศึกษาและออกแบบอุปกรณ์จับสารตัวอย่างพร้อมกำเนิดสนามไฟฟ้าเฉพาะสำหรับใช้งานในการวิจัยภายในสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน สถานีวิจัยที่ 5.2

1.3.2 ศึกษาการกำเนิดสนามไฟฟ้าแรงดันสูงในช่วงของศักย์ไฟฟ้าตั้งแต่ 1.0 kV ถึง 3.2 kV

1.3.3 ศึกษาการพัฒนาระบบควบคุมด้วยซอฟต์แวร์ LabVIEW ผ่านบอร์ด Arduino Mega 2560

1.4 สถานที่ทำวิจัย

1.4.1 ตึกฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

1.4.2 สถานีที่ 5.2 XAS (x-ray absorption spectroscopy) สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 สามารถสร้างอุปกรณ์จับสารตัวอย่างพร้อมทั้งกำเนิดสนามไฟฟ้าแรงดันสูงได้

1.5.2 มีความรู้ความสามารถในการพัฒนาโปรแกรมด้วยภาษา LabVIEW ร่วมกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560 การออกแบบอุปกรณ์และการสร้างเครื่องมือกำเนิดสนามไฟฟ้าความต่างศักย์สูง

1.5.3 ได้อุปกรณ์กำเนิดสนามไฟฟ้าพร้อมระบบควบคุมที่ใช้สำหรับวิจัยเฉพาะทางที่มีประโยชน์ต่อการวิจัยในอนาคตต่อไป

บทที่ 2
หลักการและทฤษฎี

บทนี้จะนำเสนอถึงทฤษฎีและหลักการที่ใช้ในการพัฒนาอุปกรณ์จับสารตัวอย่างภายใต้อำนาจสนามไฟฟ้าความต่างศักย์สูง โดยได้อธิบายหลักการทางฟิสิกส์เกี่ยวกับสนามไฟฟ้า สนามไฟฟ้าความต่างศักย์สูง พื้นฐานของอิเล็กทรอนิกส์ การพัฒนาโปรแกรมควบคุมและหลักการการควบคุมความต่างศักย์ไฟฟ้าแบบย้อนกลับ ซึ่งรายละเอียดมีดังต่อไปนี้

2.1 สนามไฟฟ้า

2.1.1 นิยามสนามไฟฟ้า

เมื่ออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าสองอนุภาคในสุญญากาศมีอันตรกิริยาระหว่างกัน แต่ละอนุภาครู้ได้อย่างไรว่ามีอีกอนุภาคที่มีประจุ [9], [10] สามารถเริ่มอธิบายคำตอบเหล่านี้ได้ด้วยกฎของคูลอมบ์ แม้ว่าสิ่งที่ได้จะเป็นแรงระหว่างอนุภาคที่มีประจุแต่ว่าผลที่ได้มีประโยชน์ต่อแนวความคิดเรื่องสนามไฟฟ้า โดยในบางครั้งสนามไฟฟ้าถูกพบในลักษณะของแรงต่อหน่วยประจุสำหรับจุดประจุ ซึ่งเป็นเวกเตอร์ฟังก์ชันของการบอกตำแหน่งแทนสัญลักษณ์ด้วย E ซึ่งเขียนได้เป็น

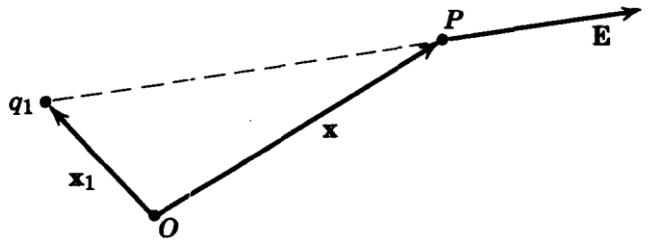
$$F = qE \tag{2.1}$$

เมื่อ F คือแรง E คือสนามไฟฟ้าและ q คือประจุไฟฟ้า จากสมการที่ 2.1 ให้ประจุไฟฟ้าอยู่ที่ตำแหน่งใด ๆ หรือจุดใด ๆ และทำให้แรงและสนามไฟฟ้าจะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งของประจุนั้น จากกฎของคูลอมบ์ ถ้า F คือแรงที่เกิดขึ้นจากจุดประจุไฟฟ้า q_1 ซึ่งอยู่ที่ตำแหน่ง x_1 กระทำกับจุดประจุไฟฟ้า q_2 ซึ่งอยู่ที่ตำแหน่ง x_2 สามารถเขียนได้เป็น

$$F = kq_1q_2\frac{(x_1 - x_2)}{|x_1 - x_2|^3} \tag{2.2}$$

ซึ่งประจุไฟฟ้า q_1 และประจุไฟฟ้า q_2 เป็นปริมาณที่มีได้ทั้งบวกและลบขึ้นกับชนิดของประจุและ k เป็นค่าคงที่ของคูลอมบ์ โดยสนามไฟฟ้าจากจุดประจุ x เนื่องจากประจุไฟฟ้า q_1 ที่อยู่ในตำแหน่ง x_1 ตามภาพที่ 2.1 สามารถเขียนได้เป็น

$$E(x) = kq_1 \frac{(x - x_1)}{|x - x_1|^3} \tag{2.3}$$



ภาพที่ 2.1 ลักษณะของสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่ง P จากจุดประจุไฟฟ้า q_1 โดยผู้สังเกตที่จุด O [9]

สำหรับไฟฟ้าสถิตนิยามหน่วยขอประจุไฟฟ้าคือขนาดของแรงที่กระทำต่อประจุทำให้ประจุเคลื่อนตำแหน่ง 1 เซนติเมตรตลอด ดังนั้นทำให้ $k = 1$ และเรียกหน่วยของประจุนี้ว่า “Stat-Coulomb” สำหรับการสังเกตสนามไฟฟ้าที่มีประจุจำนวนมากสามารถเขียนสมการสนามไฟฟ้าที่จุด x ซึ่ง q_i คือประจุไฟฟ้าตัวที่ i และ x_i คือตำแหน่งของจุดประจุตัวที่ i โดยที่ $i = 1, 2, \ldots, n$ ได้เป็น

$$E(x) = \sum_{i=1}^{n} q_i \frac{(x - x_i)}{|x - x_i|^3} \tag{2.4}$$

ถ้าประไฟฟ้ามีขนาดเล็กมากและมีจำนวนมาก สามารถเขียนประจุไฟฟ้าให้อยู่ในรูปของความหนาแน่นประจุ $\rho(x')$ ผลรวมของสนามไฟฟ้าสามารถเขียนในรูปของการปริพันธ์ได้เป็น

$$E(x) = \int \rho(x') \frac{(x - x')}{|x - x'|^3} d^3x' \tag{2.5}$$

เมื่อ $d^3x' = dx'\, dy'\, dz'$ คือองค์ประกอบของปริมาณสามมิติที่จุด x' และสามารถเขียนในรูปทั่วไปของการปริพันธ์ได้เป็น

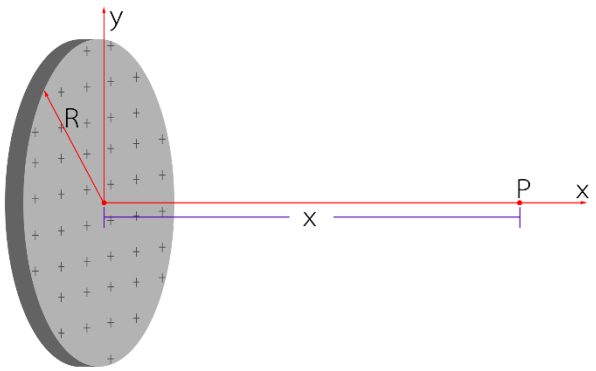
$$E(x) = \int \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{dq}{R^2} \tag{2.6}$$

เมื่อ R คือระยะระหว่างจุดที่ต้องการหาค่าสนามไฟฟ้ากับจุดประจุไฟฟ้า

สำหรับสนามไฟฟ้าของแผ่นตัวนำสามารถหาค่าได้จากสมการที่ 2.6 แต่เนื่องด้วยแผ่นตัวนำมีประจุไฟฟ้า q กระจายตัวอยู่ทั่วแผ่นสามารถจำนวนประจุได้จาก

$$\sigma = \frac{dq}{dA} \tag{2.7}$$

$$dq = \sigma\, dA \tag{2.8}$$



ภาพที่ 2.2 การคำนวณหาสนามไฟฟ้าจากแผนตัวนำวงกลมที่จุด P ซึ่งห่างจากแผ่นวงกลมตัวนำเป็นระยะ x โดยมีรัศมีของแผ่นตัวนำเป็น R

เมื่อ dq ประจุไฟฟ้าของแผ่นตัวนำที่มีรัศมี r ซึ่ง σ ความหนาแน่นประจุบนแผ่นตัวนำ และ $dA = 2\pi r\, dr$ โดยระยะห่างจากจุดสังเกตเขียนได้เป็น $R^2 = (x^2 + r^2)$ ตามภาพที่ 2.2 สมการที่ 2.6 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\mathrm{E(x)} = \int_0^{\mathrm{r}} \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{\mathrm{x}\,(2\pi \mathrm{r})\,\mathrm{dr}}{(\mathrm{x}^2 + \mathrm{r}^2)^{3/2}} \tag{2.9}$$

$$\mathrm{E(x)} = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}\left[1 - \frac{1}{\sqrt{\mathrm{R}^2/\mathrm{X}^2 + 1}}\right] \tag{2.10}$$

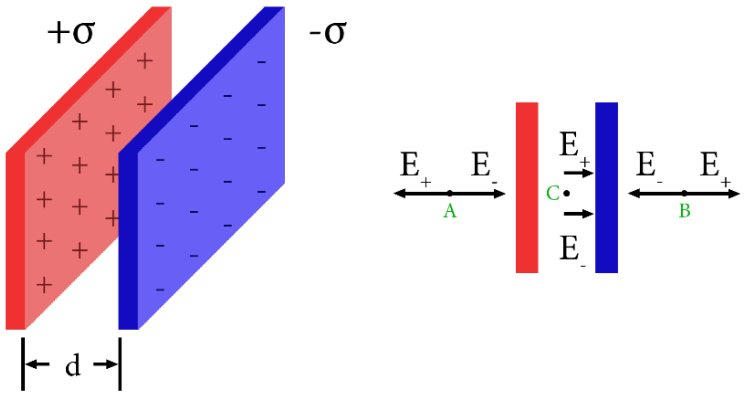
สมการที่ 2.10 คือสมการของผลเฉลยของสนามไฟฟ้าจากแผ่นตัวนำวงกลมที่มีรัศมี R โดยสังเกตห่างจากแผ่นตัวนำเป็นระยะ x และเนื่องจากระยะห่าง x มีค่าน้อยทากเมื่อเทียบกับขนาดของแผ่นทำให้สามารถพิจารณาเป็นแผ่นอนันต์เขียนสมการได้เป็น

$$E(x) = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0} \tag{2.11}$$

สำหรับบริเวณที่อยู่ระหว่างแผ่นตัวนำ สนามไฟฟ้าE_+ และ E_- จะมีทิศชี้ไปทางขวามือเหมือนกัน ดังนั้นสนามไฟฟ้ารวมจะเป็นผลรวมของสนามไฟฟ้า E_+ และ E_- ดังภาพที่ 2.3 โดยเขียนสมการได้เป็น

$$E = E_+ + E_- \tag{2.12}$$

$$E(x) = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0} + \frac{\sigma}{2\varepsilon_0} = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} \tag{2.13}$$

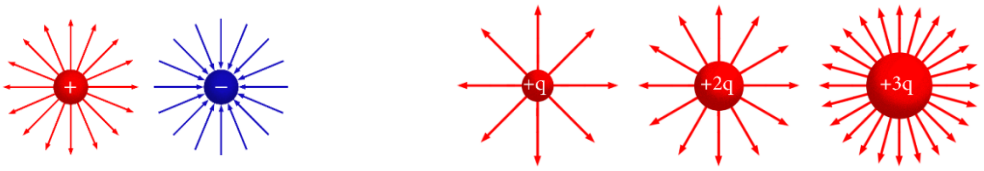


ภาพที่ 2.3 การเกิดสนามไฟฟ้าจากแผนตัวนำสองแผ่นที่วางห่างกันเป็นระยะ d โดยสนามไฟฟ้าภายในระหว่างแผ่นทั้งสองมีความสม่ำเสมอ

ดังนั้นสนามไฟฟ้าที่อยู่ระหว่างแผ่นตัวนำแบนขนาดใหญ่จะมีค่าสม่ำเสมอ ไม่ว่าจะเป็นจุดสนามไฟฟ้าที่อยู่ใกล้แผ่นหรืออยู่กึ่งกลางระหว่างแผ่น เพียงแต่จุดเหล่านั้นจะต้องอยู่ห่างจากขอบแบนมากพอที่จะประมาณให้เป็นแผ่นอนันต์ได้

2.1.2 เส้นสนามไฟฟ้า

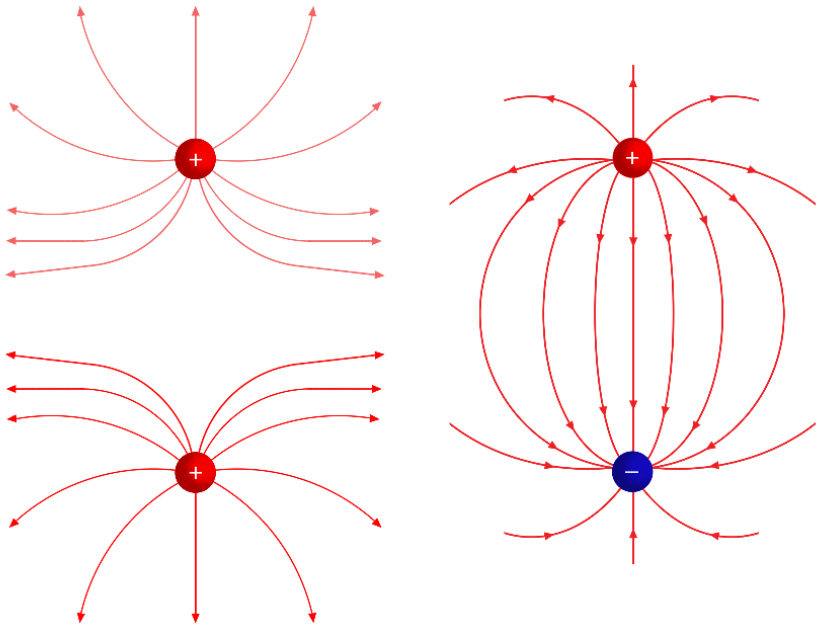
หนักแนวความคิดของสนามไฟฟ้าอาจเป็นเรื่องเข้าใจยาก เนื่องจากไม่สามารถมองเห็นสนามไฟฟ้าได้โดยตรง ซึ่งเส้นสนามไฟฟ้าเป็นสิ่งที่จะช่วยให้เห็นภาพสนามไฟฟ้าและทำให้ดูเป็นความจริงมากขึ้นได้ เส้นสนามไฟฟ้า [10], [11] เป็นเส้นตรงหรือเส้นโค้งสมสุติใช้แทนทิศทางของสนามไฟฟ้า ซึ่งนักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษ ไมเคิล ฟาราเดย์ (ค.ศ. 1791-1867) เป็นคนแรกที่ใช้แนวความคิดของเส้นสนาม เขาเรียกมันว่า “เส้นแรง” แต่คำว่า “เส้นสนาม” เป็นคำศัพท์ที่ดีกว่า



(ก) (ข)

ภาพที่ 2.4 สนามไฟฟ้าบนประจุบวกและปะจุลบ

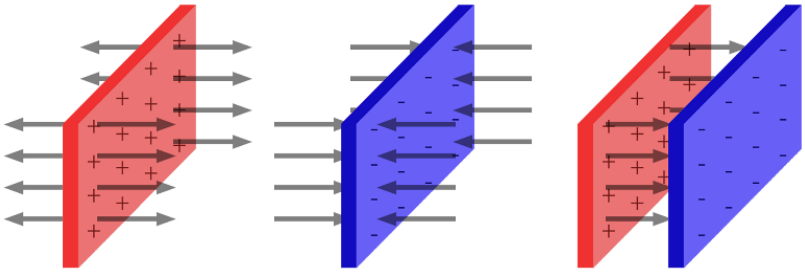
โดยประจุไฟฟ้าบวกและประจุไฟฟ้าลบมีลักษณะของเส้นสนามแตกต่างกัน โดยประจุไฟฟ้าบวกมีเส้นสนามไฟฟ้ามีทิศออกจากตัวประจุและประจุไปฟ้าลบมีทิศเข้าหาตัวประจุ ดังแสดงตามภาพที่ 2.4 (ก) ซึ่งเส้นสนาม และนอกจากชนิดของประจุแล้ว ขนาดของประจุไฟฟ้ามีผลต่อความเข้มของเส้นสนามไฟฟ้าด้วยดังแสดงตามภาพที่ 2.4 (ข) ซึ่งจะเห็นว่ามีความเข้มเพิ่มขึ้นตามความหนาแน่นประจุที่มากขึ้น เนื่องจากประจุไฟฟ้ามีเส้นสนามเกิดขึ้นดังนั้นเมื่อมีประจุสองจุดมาอยู่ใกล้กันทำให้ประจุเกิดอันตรกิริยาต่อกันขอเส้นสนามไฟฟ้าดังแสดงในภาพที่ 2.5 (ก) ซึ่งเป็นอันตรกิริยาของประจุบวกเหมือนกันมาอยู่ใกล้กันทำให้เกิดการผลักกันของเส้นสนามและเกิดลักษณะคล้ายกันสำหรับประจุลบและประจุลบ โดยส่วนประจุที่ต่างชนิดกันมาอยู่ใกล้กันทำให้เกิดเส้นสนามไฟฟ้าระหว่างประจุทั้งสองได้สมบูรณ์กังแสดงตามภาพที่ 2.5 (ข) ซึ่งส่วนใหญ่ใช้ประโยชน์จากสนามไฟฟ้ารูปแบบนี้



(ก) (ข)

ภาพที่ 2.5 การเกิดสนามไฟฟ้าระหว่างประจุไฟฟ้าสองจุด

จากสมการที่ 2.1 เป็นสมการของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นรอบ ๆ แผ่นตัวนำแบนอนันต์ โดยสนามไฟฟ้าบนแผ่นขึ้นอยู่กับชนิดของประจุที่กระจายตัวที่ผิวของแผ่นนั้น แสดงตามภาพที่ 2.6 (ก) ซึ่งแผ่นประจุบวก ที่ผิวทั้งสองทิศทางของเส้นสนามไฟฟ้ามีทิศออกจากแผ่นลักษณะคล้ายกับจุดประจุไฟฟ้าบวกและแผ่นประจุลบ ที่ผิวทั้งสองทิศทางของเส้นสนามไฟฟ้ามีทิศเข้าหาแผ่นลักษณะคล้ายจุดประจุลบ โดยที่ขอบของแผ่นตัวทำเส้นสนามไฟฟ้าเริ่มมีการโค้งออก และถ้านำแผ่นทั้งสองมาวางห่างกันทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นระหว่างแผ่นทั้งสองซึ่งมีความสม่ำเสมอของเส้นสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นตัวทำทั้งสองตามสมการที่ 2.13 แสดงตามภาพที่ 2.6 (ข)

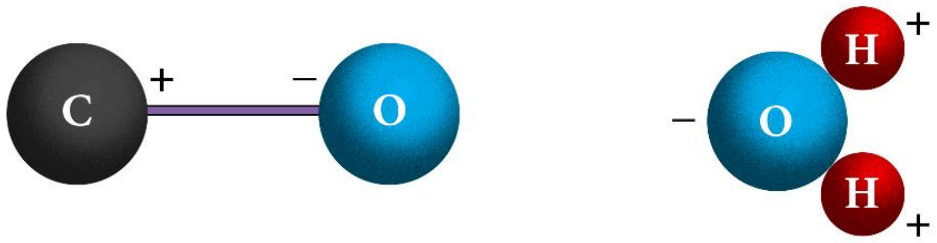


(ก) (ข)

ภาพที่ 2.6 การเกิดสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นตัวนำไฟฟ้าที่มีประจุต่างกันและแบบจำลอง

2.1.3 ขั้วคู่ไฟฟ้า

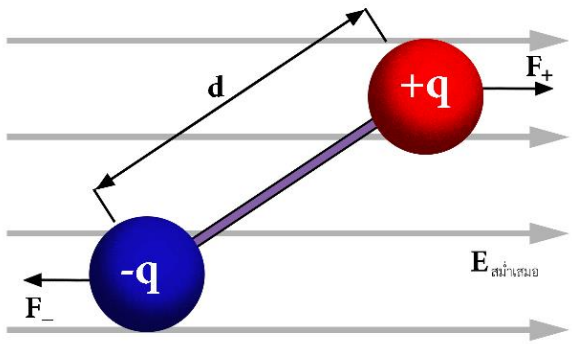
ประจุไฟฟ้าในระบบหนึ่ง ๆ มีหลายรูปแบบ การศึกษาสนามไฟฟ้ารวมไปถึงปรากฏการณ์ต่าง ๆ จึงอยู่บนพื้นฐานที่สามารถใช้ได้กับประจุในรูปแบบทั่วไป อย่างไรก็ดีรูปแบบของประจุบางประเภทจะพบได้บ่อยดังนั้นหากนำประจุเช่นนี้ขึ้นมาศึกษาเป็นกรณีเฉพาะจะช่วยให้การวิเคราะห์สามารถทำได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งขั้วคู่ไฟฟ้าเป็นรูปแบบของประจุประเภทหนึ่งที่พบได้บ่อย ขั้วคู่ไฟฟ้าเป็นประจุจุด 2 ประจุที่มีขนาดเท่ากันแต่มีเครื่องหมายตรงกันข้ามและวางห่างกัน โดยขั้วคู่ไฟฟ้าใช้เป็นแบบจำลองในโมเลกุลได้เป็นจำนวนมากในโมเลกุลที่เป็นกลางทางไฟฟ้าแต่มีการแบ่งอิเล็กตรอนไม่เท่ากันจะทำให้เกิดขั้วคู่ไฟฟ้าได้ เช่น โมเลกุล CO ซึ่งอะตอมของคาร์บอน (C) มีประจุบวกและอะตอมของออกซิเจน (O) มีประจุลบที่มีขนาดเท่ากันแสดงตามภาพที่ 2.7 (ก) ซึ่งโมเลกุลของน้ำ (H_2O) สามารถพิจารณาเป็นขั้วคู่ไฟฟ้าได้เช่นกันโดยอิเล็กตรอนที่ถูกแบ่งไม่เท่ากันจากพันธะเคมีภายในโมเลกุล ทำให้ด้านที่เป็นอะตอมออกซิเจนมีประจุไฟฟ้าสุทธิเป็นลบและด้านที่เป็นอะตอมของไฮโดรเจนมีประจุไฟฟ้าสุทธิเป็นบวก โมเลกุลของน้ำจึงประกอบด้วยขั้วคู่ไฟฟ้าย่อย 2 คู่ ดังแสดงตามภาพที่ 2.7 (ข)



(ก) (ข)

ภาพที่ 2.7 ขั้วคู่ไฟฟ้าของโมเลกุลของ CO และ H_2O

เนื่องจากขั้วคู่ไฟฟ้าประกอบด้วยประจุแบบจุด 2 ประจุ ดังนั้นเมื่อวางขั้วคู่ไฟฟ้าลงในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอดังแสดงในภาพที่ 2.8 แรงที่กระทำต่อประจุบวกและประจุลบส่งผลให้เกิดการพิจารณาแรงต่อประจุทั้งสอง ซึ่งแรงทั้งสองไม่ได้อยู่ในแนวเดียวกัน จึงทำให้เกิดทอร์กและทำให้ขั้วคู่ไฟฟ้ามีแนวโน้มที่จะหมุนหรือแรงคู่ควบเกิดขึ้น โดยขั้วคู่ทั้งสองจะเข้าสู่สมดุลแรงและเกิดการเรียงขั้วคู่ไฟฟ้าใหม่ภายในเกิดขึ้น

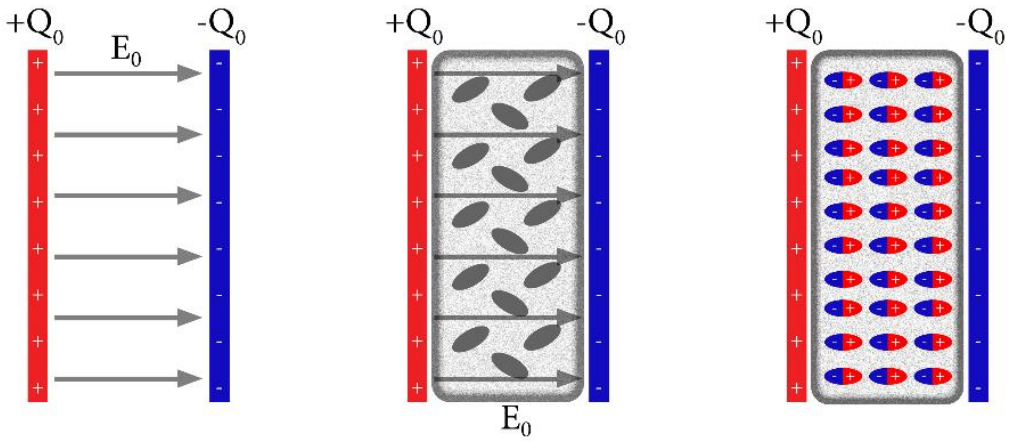


ภาพที่ 2.8 ขั้วคู่ไฟฟ้าในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

2.1.4 ไดอิเล็กทริก

ไดอิเล็กทริก [11] คือสารชนิดหนึ่งที่ถูกสอดเข้าไปในช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำภายใต้สนามไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้าทำให้ค่าความเก็บประจุหรือความสามารถในการเก็บประจุไฟฟ้ามากขึ้น ซึ่งสารหรือวัสดุที่ใช้เป็นสารไดอิเล็กทริกเป็นฉนวนไฟฟ้า เช่น ยาง แก้ว กระดาษ เป็นต้น โดยตัวเก็บประจุที่มีไดอิเล็กทริกใส่อยู่เต็มช่องระหว่างตัวนำแล้ว ค่าความจุ C เพิ่มขึ้นจากความจุ C_0 เมื่อตัวเก็บประจุไม่มีไดอิเล็กทริก ซึ่ง คือ κ ค่าคงตัวไดอิเล็กทริกเขียนเป็นสมการได้เป็น

$$C = \kappa C_0 \tag{2.14}$$



ภาพที่ 2.9 สารไดอิเล็กทริกภายใต้สนามไฟฟ้า

พิจารณาที่สารไดอิเล็กทริกดังแสดงตามภาพที่ 2.9 ซึ่งสนามไฟฟ้าเกิดจากแผ่นตัวนำที่มีประจุบวกและประจุลบ จากนั้นใส่สารไดอิเล็กทริกที่เป็นฉนวนไฟฟ้า ทำให้ไม่มีประจุอิสระที่จะเคลื่อนที่ได้เช่นเดียวกับตัวนำ แต่โมเลกุลของไดอิเล็กทริกยังสามารถจัดเรียงตัวใหม่ตามแนวสนามไฟฟ้า E โดยเกิดขึ้นจากคุณสมบัติขั้วคู่ไฟฟ้า สำหรับโมเลกุลอีกประเภทเป็นโมเลกุลไม่มีขั้ว โดยในสภาวะที่ไม่มีสนามไฟฟ้ากระทำต่อโมเลกุล อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่อยู่รอบนิวเคลียสที่มีประจุบวก และมีจุดศูนย์กลางของประจุบวกซ้อนทับกันพอดีกับจุดศูนย์กลางของประจุลบ แต่เมื่อมีสนามไฟฟ้ากระทำต่อโมเลกุล อิเล็กตรอนในอะตอมจะถูกเหนี่ยวนำจนกระทั่งจุดศูนย์กลางของประจุบวกและประจุลบเลื่อนออกจากกันเล็กน้อย ดังนั้นทำให้โมเลกุลของสารกลายเป็นขั้วคู่ไฟฟ้าซึ่งมีผลทำให้สนามไฟฟ้า (E) ลดลงเขียนได้เป็น

$$E = \frac{E_0}{\kappa} \tag{2.15}$$

เมื่อ E คือสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นหลังใส่สารไดอิเล็กทริกและ E_0 คือสนามไฟฟ้าก่อนใส่สารไดอิเล็กทริก โดยบริเวณที่มีไดอิเล็กทริกซึ่งมีค่าคงตัวไดอิเล็กทริก κ บรรจุอยู่เต็มบริเวณนั้นถูกแทนด้วยสภาพยอมทางไฟฟ้าของไดอิเล็กทริก ($\varepsilon = \kappa\varepsilon_0$) ดังนั้นสมการ E_0 จากสมการ 2.13 และสมการ 2.15 สนามไฟฟ้าภายใต้สาไดอิเล็กทริกเขียนได้เป็น

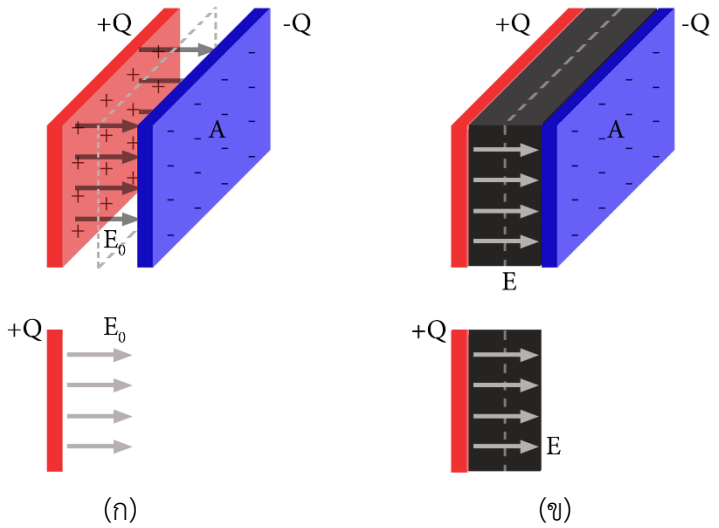
$$E = \frac{\frac{\sigma}{\varepsilon_0}}{\kappa} = \frac{\sigma}{\kappa\varepsilon_0} = \frac{\sigma}{\varepsilon} \tag{2.16}$$

2.1.5 กฎของเกาส์สำหรับไดอิเล็กทริก

จากสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากตัวเก็บประจุที่มีไดอิเล็กทริกอยู่ภายในกฎของเกาส์ได้อธิบายความสัมพันธ์ทั่วไปเมื่อประจุอยู่ในสุญญากาศ [11] เขียนได้เป็น

$$\oint E'\, dA = \frac{Q_{encl}}{\varepsilon_0} \tag{2.17}$$

โดย E ถูกเขียนแทนด้วย E' เพื่อให้เห็นความแตกต่างจากสนามไฟฟ้าในไดอิเล็กทริก ซึ่งจากภาพที่ 2.10 แสดงลักษณะสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแผ่นตัวนำที่มีพื้นที่ A และมีประจุไฟฟ้าเป็น Q โดยภาพ (a) เป็นกรณีที่ไม่มีไดอิเล็กทริก ส่วนภาพ (b) เป็นกรณีที่มีไดอิเล็กทริกโดยประจุไฟฟ้าเหนี่ยวนำบนผิวของไดอิเล็กทริกเท่ากับ Q_{ind}



ภาพที่ 2.10 สารไดอิเล็กทริกภายใต้สนามไฟฟ้าตามกฎของเกาส์โดยเส้นประแสดงลักษณะของผิวเกาส์เซียน

พิจารณาจากกรณีสนามไฟฟ้าที่ไม่มีไดอิเล็กทริกตามภาพที่ 2.10 (ก) ซึ่งสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นตัวนำเท่ากับ ทิศทางสนามไฟฟ้าชี้จากแผ่นประจุไฟฟ้าบวก ไปหาแผ่นประจุไฟฟ้าลบ สามารถเขียนสมการ 2.17 ใหม่ได้เป็น

$$\oint E'\, dA = E_0\, A = \frac{Q}{\varepsilon_0} \tag{2.18}$$

$$E = \frac{Q}{\varepsilon_0 A} \tag{2.19}$$

เนื่องจากผลของไดอิเล็กทริกจากภาพที่ 2.10 (ข) ทำให้สนามไฟฟ้า ลดลงจากสนามไฟฟ้าด้วยค่าคงตัวไดอิเล็กทริกตามสมการที่ 2.15 ดังนั้นสนามไฟฟ้าภายใต้ไดอิเล็กทริกเขียนได้เป็น

$$E = \frac{Q}{\kappa\varepsilon_0 A} \tag{2.20}$$

$$E = \frac{Q}{\varepsilon A} \tag{2.21}$$

เมื่อ E คือสนามไฟฟ้าเมื่อมีสารไดอิเล็กทริกอยู่ภายใน

Q คือประจุไฟฟ้าบนผิวของแผ่นตัวนำ

A คือพื้นผิวของแผ่นตัวนำ

κ คือค่าคงตัวไดอิเล็กทริกแทนด้วยสภาพยอมของไดอิเล็กทริก ($\varepsilon = \kappa\varepsilon_0$)

2.2 สนามไฟฟ้าความต่างศักย์สูง

สนามไฟฟ้าความต่างศักย์สูงมีลักษณะแตกต่างจากสนามไฟฟ้าทั่วไปในด้านพลังงานศักย์ โดยความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สูงมาก ๆ มีผลทำให้เกิดปรากฏการณ์ต่าง ๆ ได้ นอกจากนี้การกำเนิดสนามไฟฟ้าความต่างศักย์สูงมีได้หลายรูปแบบด้วยกัน เช่น การกำเนิดจากวงจร Cockcroft-Walton multiplier หรือแม้แต่การกำเนินสนามไฟฟ้าจากหม้อแปลงไฟฟ้า สนามไฟฟ้าความต่างศักย์สูงสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ตามชนิดของกระแสไฟฟ้าคือ ความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสสูงและความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสต่ำ ซึ่งความอันตรายของจากกระแสสูงมีมากกว่า โดยส่วนใหญ่พบเฉพาะในการส่งกระแสไฟฟ้าของการไฟฟ้า ส่วนสนามไฟฟ้าความต่างศักย์สูงกระแสต่ำเนื่องจากมีความปลอดภัยมากกว่าจึงนิยมนำมาใช้ในการผลิตจอแสดงผลแบบหลอดรังสีเอกซ์ (Cathode-ray tube, CRT) [9], [10] นอกจากนี้การใช้ประโยชน์ในการศึกษาสมบัติของวัสดุก็มีความสำคัญเช่นเดียวกัน

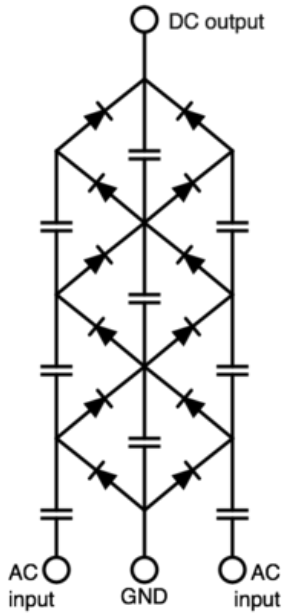
2.2.1 ปรากฏการณ์จากสนามไฟฟ้าความต่างศักย์สูง

สนามไฟฟ้าเมื่อมีความต่างศักย์สูงมาก ๆ สามารถทำให้อากาศเกิดการแตกตัวและเกิดไอออนขึ้น ซึ่งสามารถนำไฟฟ้าได้โดยถูกเรียกว่าพลาสมา ซึ่งพลาสมาในทางฟิสิกส์ [9], [10] คือ แก๊สที่มีสภาพเป็นไอออน และมักจะถือเป็นสถานะหนึ่งของสสาร การมีสภาพเป็นไอออนดังกล่าวนี้หมายความว่าจะมีอิเล็กตรอนอย่างน้อย 1 ตัว ถูกดึงออกจากโมเลกุล ประจุไฟฟ้าอิสระทำให้พลาสมามีสภาพการนำไฟฟ้าเกิดขึ้น โดยพลาสมาจัดได้ว่าเป็นสถานะที่ 4 ของสสารเนื่องจากมีลักษณะเฉพาะที่แตกต่างไปจากสถานะอื่นอย่างชัดเจน พลาสมาประกอบด้วยอนุภาคที่มีประจุทั้งประจุบวกและลบ ในสัดส่วนที่ทำให้ประจุสุทธิเป็นศูนย์

การอยู่รวมกันของอนุภาคเหล่านี้เป็นแบบประหนึ่งเป็นกลาง (Quasineutral) ซึ่งหมายความว่าจำนวนอิเล็กตรอนและไอออนในบริเวณนั้น โดยรวมแล้วมีจำนวนเท่า ๆ กัน และแสดงพฤติกรรมร่วม (collective behavior) พฤติกรรมร่วมนี้หมายถึงการเคลื่อนที่ของอนุภาคในพลาสมา ไม่เพียงแต่จะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขในบริเวณนั้น ๆ เท่านั้น แต่เป็นผลโดยรวมจากพลาสมาส่วนใหญ่มากกว่าจะเป็นผลมาจากการชนกันของอนุภาคที่อยู่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากอนุภาคในพลาสมาที่สถานะสมดุล จะมีการสั่นด้วยความถี่ที่สูงกว่าความถี่ในการชนกันของอนุภาค 2 ตัวที่อยู่ใกล้กัน ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าพฤติกรรมร่วมนี้เป็นพฤติกรรมที่กลุ่มพลาสมาแสดงออกมาร่วมกัน พลาสมาสามารถเกิดได้โดยการให้สนามไฟฟ้าปริมาณมากแก่ก๊าซที่เป็นกลาง เมื่อพลังงานส่งผ่านไปยังอิเล็กตรอนอิสระมากพอ จะทำให้อิเล็กตรอนอิสระชนกับอะตอมและทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอม กระบวนการนี้เรียกว่ากระบวนการแตกตัวเป็นไอออน (ionization)

2.2.2 สนามไฟฟ้าจากวงจร Cockcroft-Walton multiplier

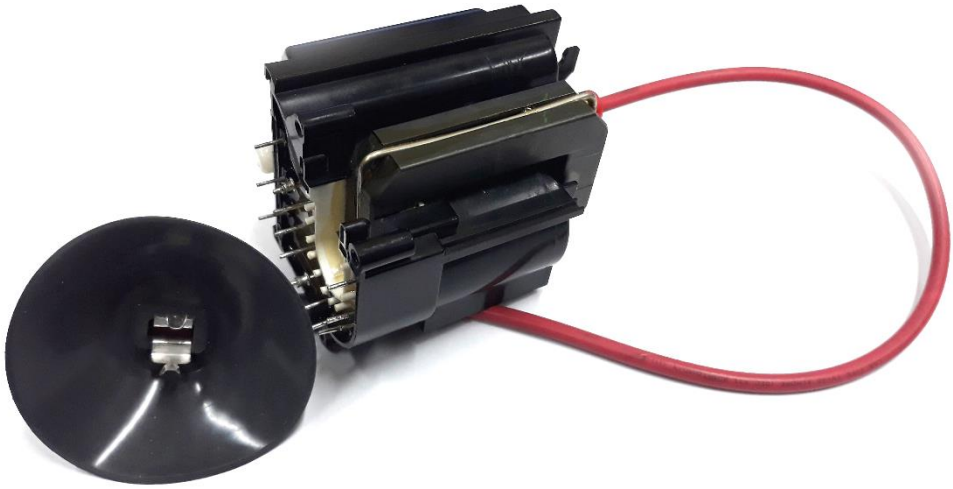
วงจร Cockcroft-Walton multiplier เป็นวงจรแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงและสามารถทวีคูณความต่างศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น [9], [10] ซึ่งสามารถกำเนิดสนามไฟฟ้ากระแสตรงความต่างศักย์สูงได้และตั้งชื่อตามนักฟิสิกส์ชาวอังกฤษและชาวไอริช โดยหลักการทำงานอาศัยตัวเก็บประจุในการเก็บประจุไฟฟ้าขณะกระไฟฟ้าผ่านและอาศัยไดโอดช่วยในการป้องกันกระแสไฟฟ้าจากตัวเก็บประจุไหลย้อนกลับซึ่งสามารถเพิ่มศักย์ไฟฟ้าเป็น 2 เท่าต่อตัวเก็บประจุและไดโอด 1 คู่ โดยวงจรแสดงตามภาพที่ 2.11 สามารถขยายความต่างศักย์ไฟฟ้าได้ 6 เท่า



ภาพที่ 2.11 วงจรกำเนิดความต่างศักย์ไฟฟ้าสูง Cockcroft-Walton multiplier ซึ่งวงจรได้ใช้ตัวเก็บประจุร่วมกัน 3 ตัว แถวกลางเพื่อลดการใช้ตัวเก็บประจุ [9]

2.2.3 สนามไฟฟ้าจากหม้อแปลงไฟฟ้า

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปปกรณ์ช่วงในการเปลี่ยนระดับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้งานอย่างแพร่หลาย [10], [11] ทั้งใช้ในการแปลงศักย์ไฟฟ้าให้สูงขึ้นหรือแปลงศักย์ไฟฟ้าให้ต่ำลง แต่การจะแปลงระดับศักย์ไฟฟ้าให้สูงขึ้นมาก ๆ นั้นเป็นเรื่องที่ทำได้ยากจากหม้อแปลงทั่วไป เนื่องจากต้องคำนึงถึงหลายปัจจัย อาทิเช่น จำนวนขดลวด ชนิดแกนหม้อแปลงเป็นต้น โดยหม้อแปลงสำหรับแปลงความต่างศักย์ไฟฟ้าให้อยู่ในระดับสูงได้เรียกว่า Flyback transformer หรือหม้อแปลง Flyback แสดงตามภาพที่ 2.12 ซึ่งการเหนี่ยวนำแกนปฐมภูมิของหม้อแปลงอาศัยการสวิตซ์จากวงจรอิเล็กทรอนิกส์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยหลักการทำงานเหมือนหม้อแปลงทั่วไป แตกต่างเพียงสามารถเหนี่ยวนำความต่างศักย์ไฟฟ้าในระดับสูงได้ดี

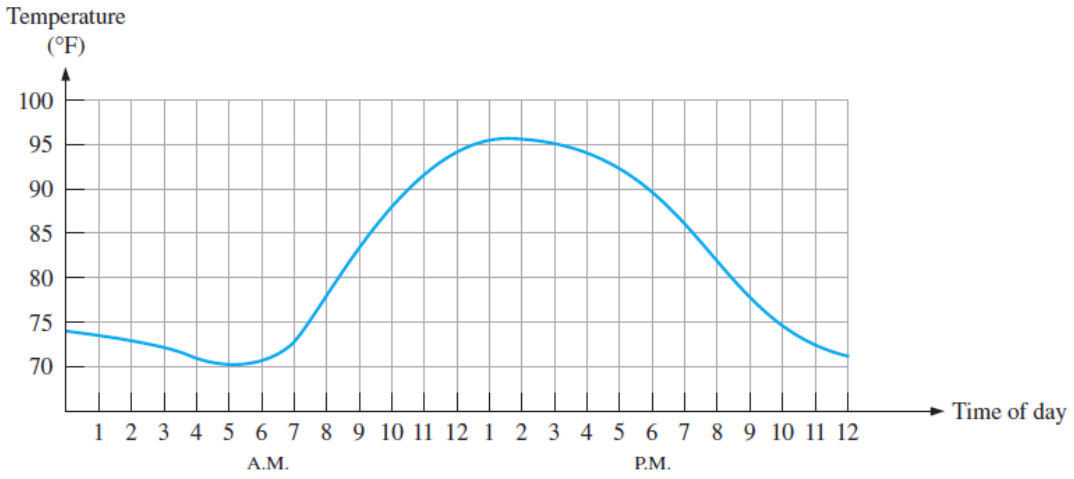


ภาพที่ 2.12 หม้อแปลง Flyback จากหน้าจอแสดงผลชนิด CRT

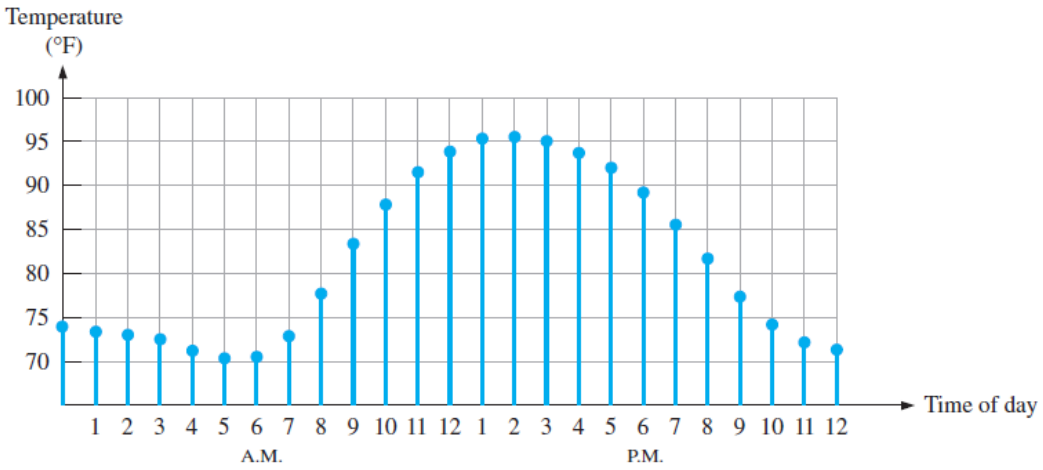
2.3 อิเล็กทรอนิกส์

2.3.1 ปริมาณอนาลอกและปริมาณดิจิตอล

การใช้งานอุปกรณ์หรือวงจรอิเล็กทรอนิกส์ [12] สิ่งสำคัญคือการวิเคราะห์ลักษณะของสัญญาณไฟฟ้าที่ใช้กับวงจร โดยสัญญาณไฟฟ้าของวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือสัญญาณดิจิตอล (Digital signal) และสัญญาณอนาลอก (Analog signal) ซึ่งสัญญาณดิจิตอลเกี่ยวเนื่องกับปริมาณที่มีค่าไม่ต่อเนื่องและสัญญาณอนาลอกจะเกี่ยวกับปริมาณที่มีค่าต่อเนื่อง ตามภาพที่ 2.13 (ก) แสดงตัวอย่างการวัดปริมาณของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปในรอบวันแบบต่อเนื่อง ในทางกลับกันเปลี่ยนการวัดปริมาณของอุณหภูมิต่อเวลาเป็นวัดเฉพาะบางช่วง ตามภาพที่ 2.13 (ข) แสดงตัวอย่างการวัดปริมาณของอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปในรอบวันทุกชั่วโมงแบบไม่ต่อเนื่อง



(ก)

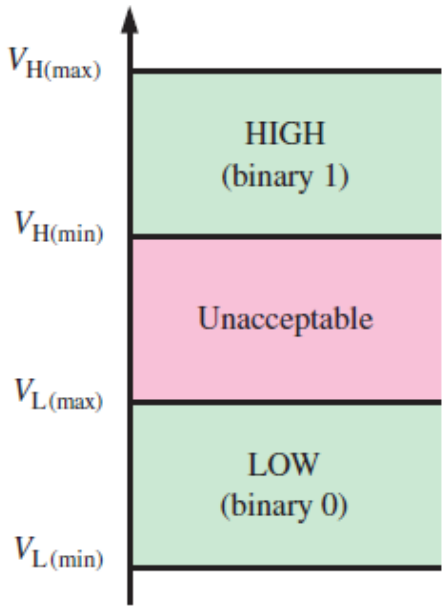


(ข)

ภาพที่ 2.13 ลักษณะของสัญญาณอนาลอกและสัญญาณดิจิตอลของการวัดค่าอุณหภูมิในรอบวัน (ก) สัญญาณอนาลอก (ข) สัญญาณดิจิตอล [12]

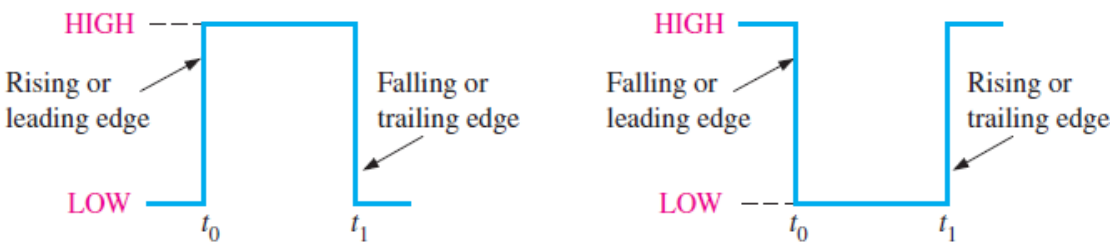
2.3.2 ลักษณะของข้อมูลดิจิตอล

การใช้งานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ส่วนใหญ่ในปัจจุบันเป็นระบบของสัญญาณดิจิตอล ซึ่งสัญญาณดิจิตอลจะมีการตอบสนองต่อความแตกต่างของระดับความต่างศักย์ไฟฟ้า 2 ระดับ คือระดับสูง (ลอจิก HIGH) และระดับต่ำ (ลอจิก LOW) โดยสามารถเก็บข้อมูลในรูปแบบของ Binary digits ซึ่งลอจิก HIGH มีค่าเป็น 1 และลอจิก LOW เป็น 0 ตามภาพที่ 2.14 แสดงลักษณะของลอจิกและมีช่วงที่เรียกว่า Unacceptable เป็นช่วงที่ไม่สามารถบอกได้ว่าเป็นลอจิก HIGH หรือลอจิก LOW



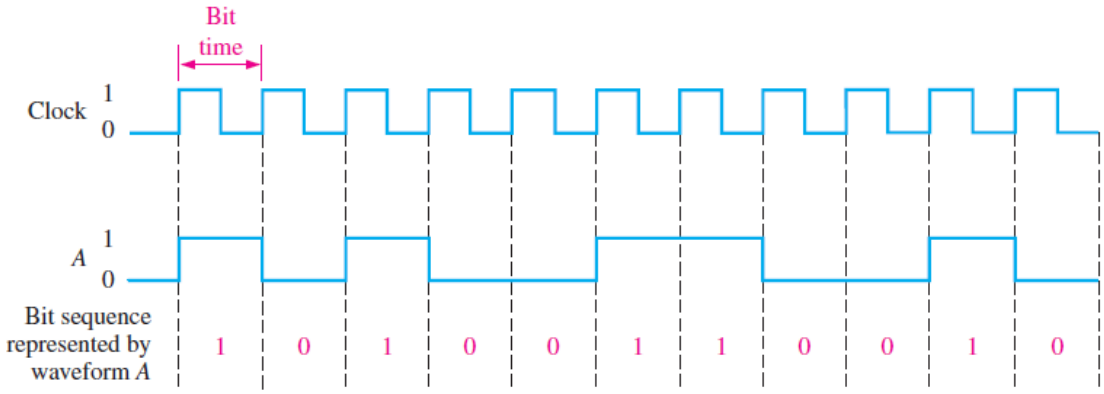
ภาพที่ 2.14 ลักษณะของลอจิก HIGH และลอจิก LOW [12]

รูปสัญญาณดิจิตอล (Digital waveforms) คือลักษณะระดับของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปตามระดับ HIGH และระดับ LOW ภาพที่ 2.15 (ก) แสดงลักษณะของรูปสัญญาณดิจิตอลแบบ Positive-going pulse ซึ่งเป็นการเปลี่ยนระดับจากความต่างศักย์ไฟฟ้าจะอยู่ที่ระดับ LOW เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของความต่างศักย์ไฟฟ้าไปอยู่ที่ระดับ HIGH รูปสัญญาณจะเปลี่ยนที่ระดับ HIGH และหลังจากนั้นก็กลับมาที่ระดับ LOW อีกครั้ง ภาพที่ 2.15 (ข) แสดงลักษณะของรูปสัญญาณดิจิตอล1แบบ Negative-going pulse ซึ่งระดับเริ่มต้นความต่างศักย์ไฟฟ้าจะอยู่ที่ระดับ HIGH เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของความต่างศักย์ไฟฟ้าไปอยู่ที่ระดับ LOW รูปสัญญาณจะเปลี่ยนที่ระดับ LOW และหลังจากนั้นก็กลับมาที่ระดับ HIGH อีกครั้ง

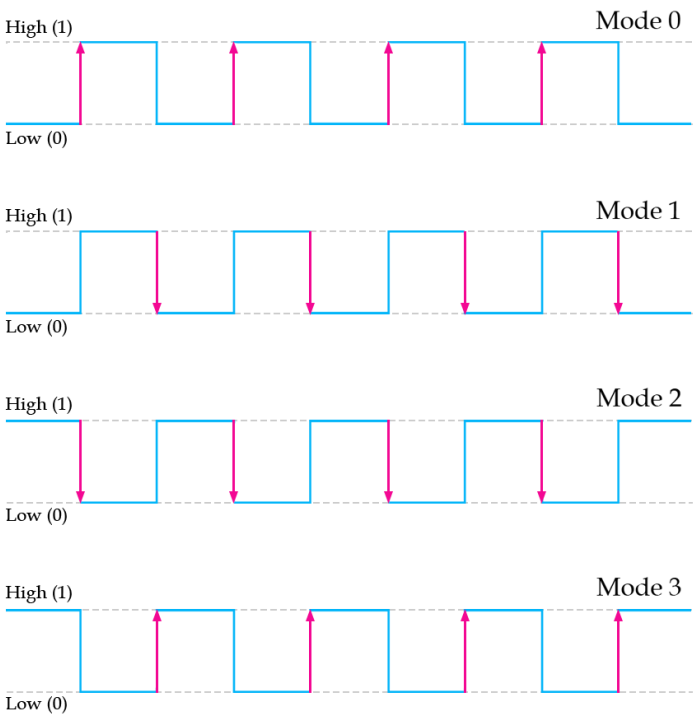


(ก) Positive-going pulse (ข) Negative-going pulse

ภาพที่ 2.15 ลักษณะของรูปแบบสัญญาณดิจิตอล [12]



ภาพที่ 2.16 การส่งข้อมูลดิจิตอลผ่านการกำหนดจังหวะการส่งสัญญาณนาฬิกา [12]



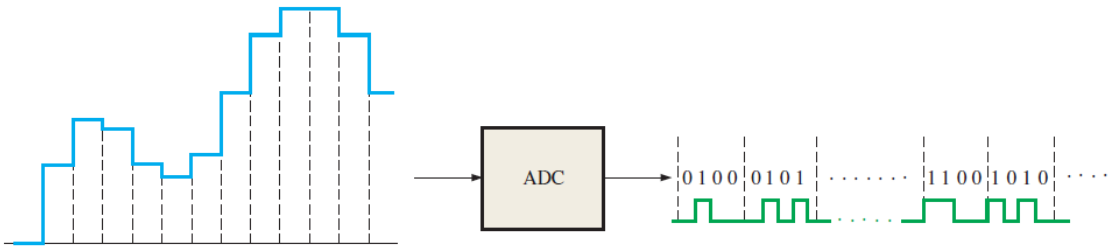
ภาพที่ 2.17 ลักษณะของรูปแบบในการส่งข้อมูลจากสัญญาณนาฬิกา

การสื่อสาร การส่งข้อมูลหรือการรับข้อมูลของสัญญาณดิจิตอลต้องอาศัยการกำหนดจังหวะในการส่งข้อมูลเพื่อให้ข้อมูลมีความเป็นระเบียบและไม่เกิดความผิดพลาดในการส่งข้อมูล ซึ่งตัวที่ใช้ในการกำหนดจังหวะการส่งข้อมูลเรียกว่า สัญญาณนาฬิกา (Clock) ตามภาพที่ 2.16 แสดงการส่งข้อมูลดิจิตอลผ่านการกำหนดจังหวะการส่งด้วยสัญญาณนาฬิกา ซึ่งสัญญาณนาฬิกาจะเป็นสัญญาณที่มีความถี่ในการส่งคงที่

โดยการที่สัญญาณนาฬิกาที่เปลี่ยนระดับจาก HIGH มายัง LOW เรียกว่า 1 bit ซึ่งภายใน 1 bit ข้อมูลที่ส่งหรือรับจะมีค่าเพียงสถานะเป็น HIGH (1) หรือ LOW (2) เท่านั้น ดังนั้นการส่งข้อมูลดิจิตอลจึงจำเป็นต้องส่งข้อมูลครั้งละจำนวนบิตมาก ๆ โดยการส่งข้อมูลจำนวน 8 bit เทียบสัญญาณนาฬิกาเรียกว่า 1 byte ซึ่งการที่มีการส่งข้อมูลได้ครั้งละมาก ๆ มีผลทำให้ข้อมูลถูกส่งได้เร็วยิ่งขึ้นหรือมีความละเอียดมากยิ่งขึ้น โดยการเริ่มส่งข้อมูลจะส่งเมื่อสัญญาณนาฬิกามีการเปลี่ยนแปลงและในการส่งสัญญาณนาฬิกาสามารถส่งได้ 4 รูปแบบ แสดงตามภาพที่ 2.17 ซึ่งแต่ละรูปแบบมีการอาศัยชอบขาขึ้นและขาลงในการเริ่มส่งข้อมูลโดย Mode 0 เริ่มส่งข้อมูลเมื่อสัญญาณเริ่มต้นเป็นลอจิก LOW (0) เปลี่ยนสถานะเป็น HIGH (1) Mode 1 เริ่มส่งข้อมูลเมื่อสัญญาณเริ่มต้นเป็นลอจิก LOW (0) เปลี่ยนสถานะเป็น HIGH (1) และตกกลับมาเป็นลอจิก LOW (0) Mode 2 เริ่มส่งข้อมูลเมื่อสัญญาณเริ่มต้นเป็นลอจิก HIGH (1) เปลี่ยนสถานะเป็น LOW (0) และ Mode 3 เริ่มส่งข้อมูลเมื่อสัญญาณเริ่มต้นเป็นลอจิก HIGH (1) เปลี่ยนสถานะเป็น LOW (0) และตกกลับมาเป็นลอจิก LHIGH (1)

2.3.3 การแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล (Analog-to-Digital Conversion)

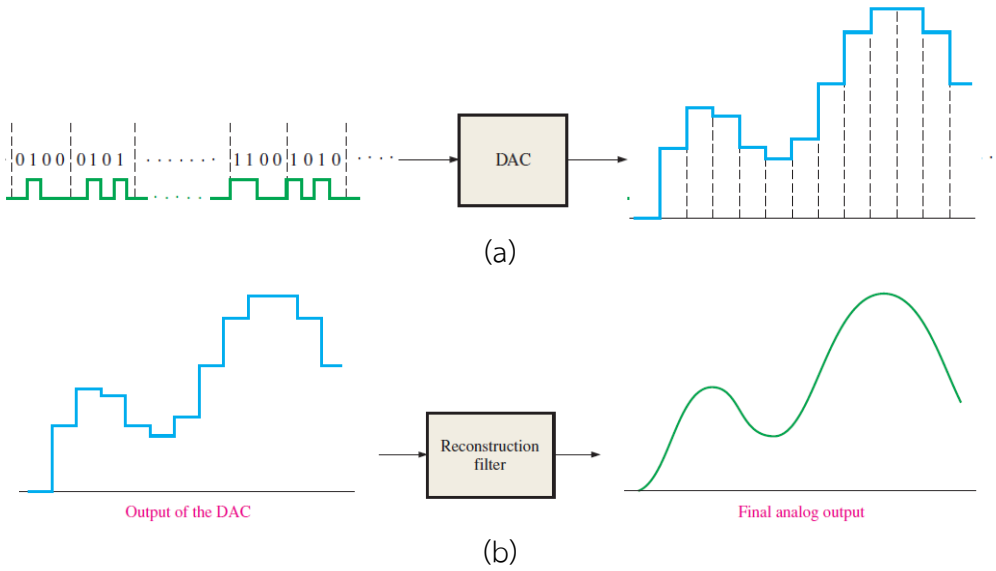
เป็นขบวนการเปลี่ยนรูปแบบสัญญาณขาออกของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ให้อยู่ในรูปของเลขฐานสอง (Binary number) [12] โดยขึ้นอยู่กับแอมพลิจูดของสัญญาณอนาลอกขาเข้า ซึ่งในกระบวนการเปลี่ยนสัญญาณอนาลอกขาเข้านั้นจะขึ้นอยู่กับความกว้างของพัลส์ด้วย ดังนั้นการแปลงอนาลอกเป็นดิจิตอลขึ้นอยู่กับค่าแอมพลิจูดและพัลส์ซึ่งเป็นค่าคงที่และความละเอียดในการแปลงสัญญาณขึ้นอยู่กับจำนวน bit ในการแปลงสัญญาณ ซึ่งลักษณะการแปลงสัญญาณแสดงดังภาพที่ 2.18 โดยสัญญาณอนาลอกขาเข้าถูก Sample-and-hold approximation ก่อนทำการแปลงข้อมูลด้วย ADC และส่งสัญญาณขาออกที่เป็นสัญญาณดิจิตอล



ภาพที่ 2.18 การแปลงอนาลอกเป็นดิจิตอล (ADC) โดยเมื่อสัญญาณผ่านการแปลงจะถูกเก็บในรูปของเลขฐานสองในลักษณะของลอจิก HIGH (1) และลอจิก LOW (0) [12]

2.3.4 การแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณอนาลอก (Digital-to-Analog Conversion)

การแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาลอก (DAC) [12] เป็นขบวนการเปลี่ยนรูปแบบสัญญาณ โดยหลักการทำงานตรงกันข้างกับ ADC แสดงตามภาพที่ 2.19 (ก) ค่าดิจิตอลถูกส่งเข้าไปที่ DAC และแปลงสัญญาณเป็นสัญญาณอนาลอกแต่ยังมีความไม่เรียบแสดงตามภาพที่ 2.19 (ข) โดยสัญญาณขาออกถูกส่งไปทำให้เรียบด้วยการ Reconstruction filter ซึ่งส่วนใหญ่นำไปใช้ในการควบคุมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำงานด้วยสัญญาณอนาลอก

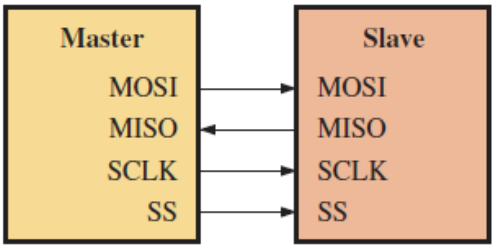


ภาพที่ 2.19 การแปลงดิจิตอลเป็นอนาลอก (DAC) (ก) โดยเมื่อสัญญาณผ่านการแปลงจะถูกเก็บในรูปของค่าอนาลอก (ข) และสัญญาณถูกทำให้เรียบด้วย Reconstruction filter

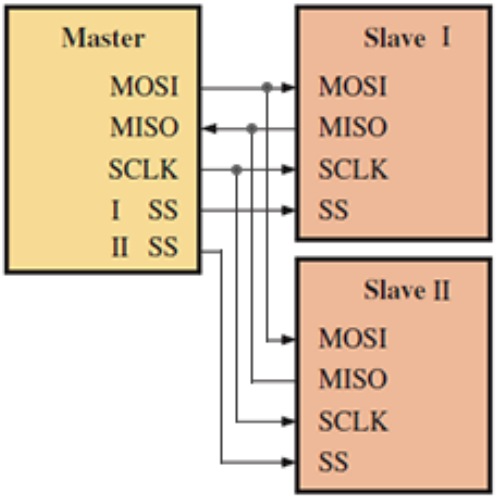
2.3.5 การเชื่อมต่อสื่อสารรับ-ส่งข้อมูลระหว่างระบบควบคุมและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

การเชื่อมต่อสื่อสารสำหรับรับ-ส่งข้อมูลมีมากมายหลายรูปแบบ โดยสำหรับการสื่อสารระหว่างระบบควบคุมและวงจรรวมอิเล็กทรอนิกส์ (integrated circuit, IC) นิยมใช้งานอยู่ 2 รูปแบบ คือรูปแบบ Serial-to-peripheral interface (SPI) และรูปแบบ Inter-integrated circuit (I2C) [12] ซึ่งทั้ง 2 รูปแบบ มีความแตกต่างกันในด้านรูปแบบการรับ-ส่งข้อมูลและความเร็วในการส่ง โดยการสื่อสารแบบ SPI เป็นการใช้งานการรับ-ส่งข้อมูลแบบอนุกรมส่วนการสื่อสารแบบ SPI เป็นการสื่อสารรับ-ส่งบนเส้นเดียว ซึ่งทั้งสองรูปแบบสามารถเชื่อมต่อกับ IC ได้หลายตัวพร้อมกัน โดยกำหนดที่อยู่สำหรับการรับ-ส่งข้อมูล การเชื่อมต่อแบบ Serial-to-peripheral interface (SPI) [1] เป็นวิธีการสื่อสารอนุกรมแบบ ซิงโครนัส (Synchronous)

อีกรูปแบบหนึ่งซึ่งทำงานในรูปแบบที่ให้อุปกรณ์ตัวหนึ่งทำหน้าที่เป็น Master ในขณะที่อีกตัวหนึ่งทำหน้าที่เป็น Slave และสามารถส่งข้อมูลในโหมด Full-duplex หมายความว่า สัญญาณสามารถส่งหากันได้ระหว่าง Master และ Slave ได้อย่างต่อเนื่องดังแสดงตามภาพที่ 2.20 (ก) ในอัตราการรับ-ส่งข้อมูล 10 Mbps โดยสามารถรับ-ส่งข้อมูลกับ Slave ได้หลายอุปกรณ์ดังแสดงตามภาพที่ 2. 20 (ข) ซึ่งการเชื่อมต่อแบบ SPI ประกอบด้วยสายสัญญาณ 4 เส้น คือ สาย SCK (Serial Clock) ใช้ส่งสัญญาณนาฬิกาจากอุปกรณ์ Master ไปยังอุปกรณ์ Slave เพื่อกำหนดจังหวะการรับ-ส่งข้อมูล สาย MOSI (Master Out Slave In) ใช้ส่งไปยังอุปกรณ์ Slave สาย MISO (Master In Slave Out) ใช้รับข้อมูลจากอุปกรณ์ Slave และสาย SS (Slave Select) หรือ ขา CS (Chip Select) ใช้ส่งสัญญาณ Low ไปยังอุปกรณ์ Slave ที่ต้องการรับ-ส่งข้อมูล เมื่อใช้งานอุปกรณ์ Slave มากกว่าหนึ่งตัว สาย SS หรือ CS จะทำหน้าที่ในการเลือกอุปกรณ์สำหรับส่งข้อมูลไปที่อุปกรณ์ Slave ด้วยการส่งสัญญาณ Low ไปที่อุปกรณ์ Slave นั้น



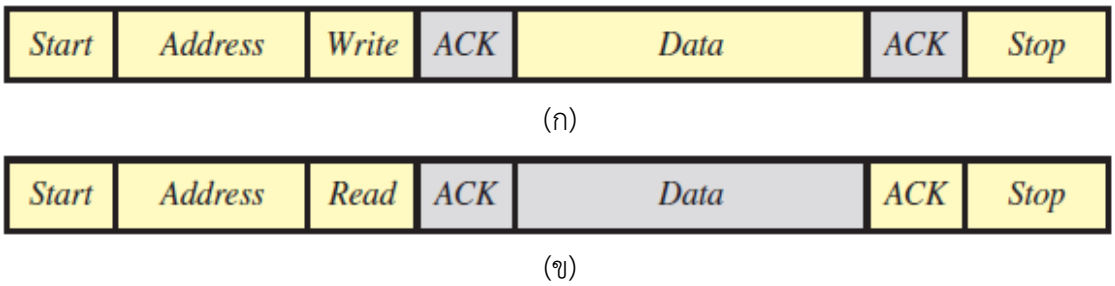
(a)



(b)

ภาพที่ 2.20 (ก) การเชื่อมต่อสื่อสารการรับ-ส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ Master และอุปกรณ์ Slave จำนวน 1 ตัว (ข) การเชื่อมต่อสื่อสารการรับ-ส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ Master และ Slave จำนวนมากกว่า 1 ตัวพร้อมกัน [12]

การเชื่อมต่อแบบ Inter-integrated circuit (I2C) [12] เป็นการสื่อสารอนุกรมแบบซิงโครนัส (Synchronous) เพื่อใช้ติดต่อสื่อสารระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์ หรือ Master กับอุปกรณ์ภายนอก (Slave) โดยใช้สายสัญญาณเพียง 2 เส้นเท่านั้น คือ Serial data (SDA) และ Serial clock (SCL) ซึ่งสามารถเชื่อมต่ออุปกรณ์จำนวนหลายตัวเข้าด้วยกันได้ ทำให้ Master ใช้พอร์ตเพียง 2 พอร์ตเท่านั้น สำหรับการเริ่มต้นการรับ-ส่งข้อมูล เริ่มด้วย Master ส่งสถานะเริ่มต้น (START Conditions) เพื่อแสดงการขอใช้บัสตามด้วยรหัสควบคุม (Control Byte) ซึ่งประกอบด้วยรหัสประจำตัวอุปกรณ์ Device ID ,Device Address และ Mode ในการเขียนหรืออ่านข้อมูล เมื่ออุปกรณ์ Slave รับทราบ Slave ต้องส่งสถานะรับรู้ (ACK) หรือแจ้งให้ Master รับรู้ว่าข้อมูลที่ได้ส่งมามีความถูกต้องและเมื่อสิ้นสุดการส่งข้อมูล Master ต้องส่งสถานะสิ้นสุด (STOP Conditions) เพื่อบอกกับอุปกรณ์ Slave ว่าสิ้นสุดการเชื่อมต่อใช้บัส แสดงตามภาพที่ 2.21



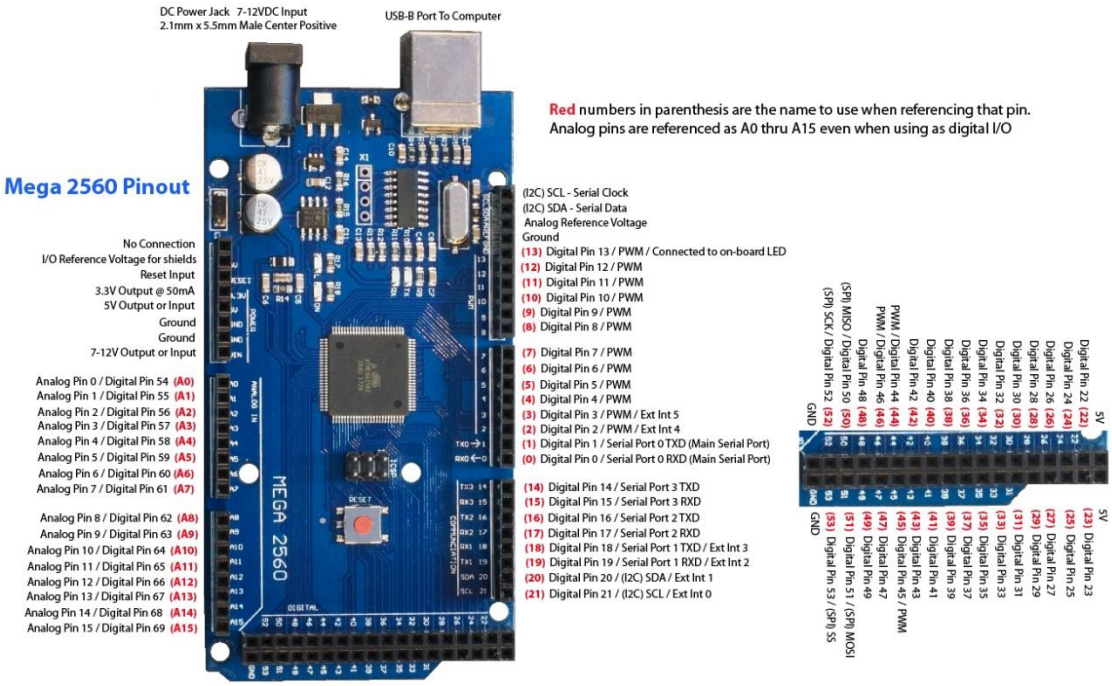
ภาพที่ 2.21 การสื่อสารด้วย I2C (ก) รูปแบบการกำหนดคำสั่งจาก Master ไปหาอุปกรณ์ Slave (ข) รูปแบบคำสั่งจากอุปกรณ์ Slave ไปหา Master ซึ่งด้วยรหัสควบคุม [12]

2.4 โปรแกรมควบคุมและการพัฒนา

การควบคุมระบบกำเนิดสนามไฟฟ้าพัฒนาด้วยซอฟต์แวร์ LabVIEW Home Edition 2014 โดยใช้ร่วมกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560 สำหรับการเชื่อมต่อรับส่งข้อมูล ซึ่งการควบคุมหลักทั้งหมดถูกเชื่อมต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์เพื่อให้ง่ายต่อการใช้งาน การบันทึกผลและการวิเคราะห์ผล นอกจากนี้ซอฟต์แวร์ LabVIEW ยังช่วยให้การพัฒนาระบบควบคุมได้ง่ายยิ่งขึ้นด้วยการพัฒนาด้วยบล็อกไดอะแกรมและมีฟังก์ชันที่จำเป็นต่อการพัฒนาระบบให้ใช้งานได้หลากหลาย ซึ่งการเชื่อมต่อกับบอร์ด Arduino มีหลายวิธีแต่การเชื่อมต่อผ่าน VISA ของ LINX มีความเสถียรภาพในการรับ - ส่งข้อมูลสูงสุด

2.4.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560

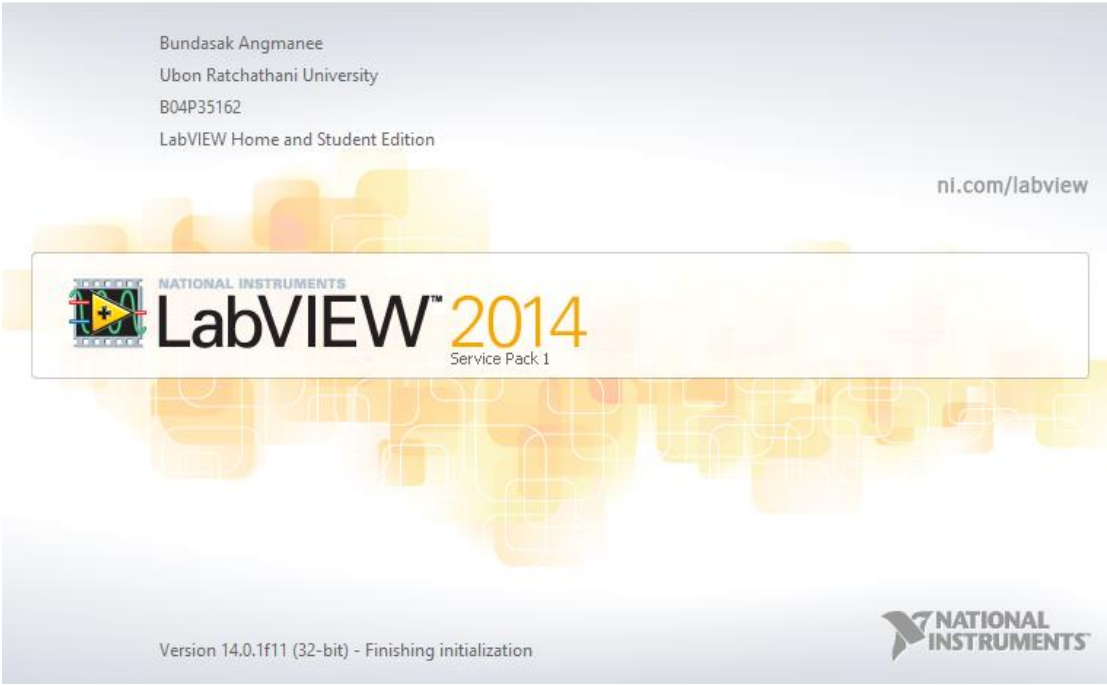
สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้งานร่วมกับซอฟต์แวร์ LabVIEW ถูกใช้สำหรับรับ-ส่งข้อมูล โดยการควบคุมการทำงานของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ถูกควบคุมผ่านการพัฒนาซอฟต์แวร์ LabVIEW เช่นกัน ซึ่งบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560 มีช่องเชื่อมต่อรับ-ส่งข้อมูลหลายช่อง แสดงตามภาพที่ 2.22 โดยมีช่องเชื่อมต่อรับ-ส่งข้อมูลดิจิตอล 54 ช่อง มีช่องเชื่อมต่อสำหรับแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล 16 ช่อง ด้วยความละเอียด 10 bits สามารถใช้งานสำหรับควบคุมอุปกรณ์แบบ Pulse-width modulation จำนวน 15 ช่อง ด้วยความละเอียด 8 bits สามารถใช้งานเชื่อมต่อแบบ Serial Port กับอุปกรณ์อื่นได้ 4 ช่อง ซึ่งสามารถใช้งานฟังก์ชัน External Interrupts จำนวน 6 ช่อง นอกจากนี้ยังมีช่องสำหรับเชื่อมต่อสื่อสารกับวงจรรวมแบบ Inter-integrated Circuit (I2C) จำนวน 2 ช่อง และช่องสำหรับเชื่อมต่อสื่อสารกับวงจรรวมแบบ Serial Peripheral Interface (SPI) จำนวน 1 ช่อง ซึ่งบอร์ดทำงานด้วยไฟเลี้ยงกระแสตรงความต่างศักย์ 7 - 12 V และสามารถจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้ที่ 3.3 V และ 5 V โดยกระแสขาออกสูงสุด 50 mA ซึ่งควบคุมและสื่อสารรับ-ส่งข้อมูลกับซอฟต์แวร์ LabVIEW ผ่านสาย USB-B Port ในช่วงความถี่ของสัญญาณ 16 MHz และมีหน่วยความจำ 256 KB



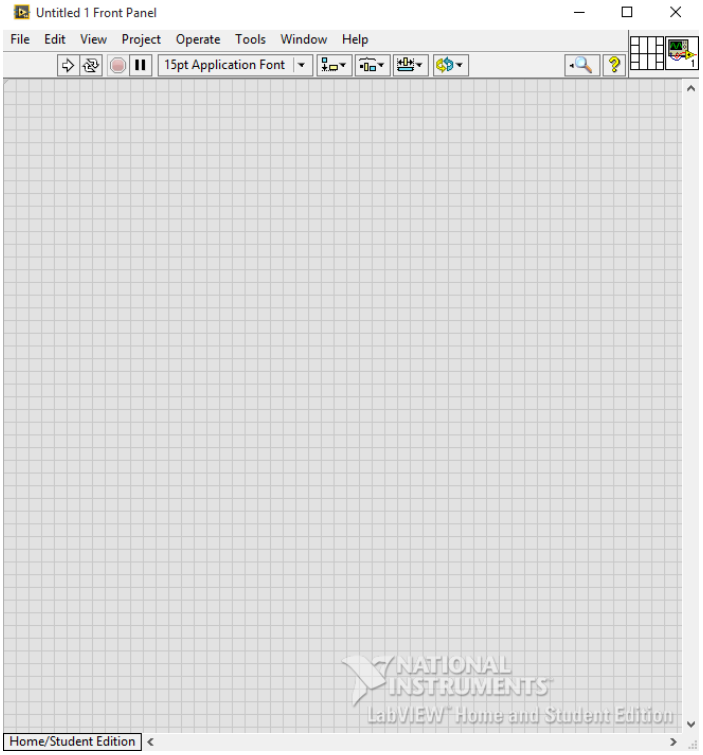
ภาพที่ 2.22 ข้อมูลช่องเชื่อมต่อใช้งานบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560

2.4.2 ซอฟต์แวร์ควบคุม LabVIEW Home Edition 2014

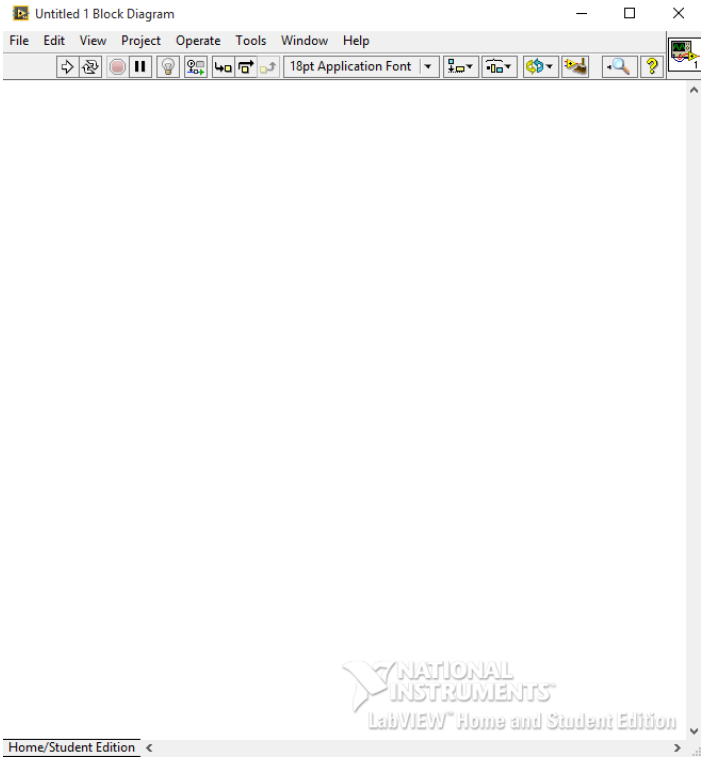
การพัฒนาระบบควบคุมหรือการพัฒนาโปรแกรมควบคุมด้วยซอฟต์แวร์ LabVIEW มีความแตกต่างกับการพัฒนาโปรแกรมจาการเขียนโปรแกรมมากพอสมควร เนื่องด้วยการพัฒนาด้วยซอฟต์แวร์ LabVIEW เป็นการพัฒนาด้วยภาษารูปภาพหรือบล็อกไดอะแกรม ทำให้ลดเวลาในการพัฒนาได้มาก อีกทั้งการพัฒนาด้วยซอฟต์แวร์ LabVIEW ยังมีฟังก์ชันมากมายที่การพัฒนาแบบเดิมทำไม่ได้ ดังนั้นความสำคัญของการพัฒนาด้วยภาษา LabVIEW จึงมีความจำเป็นมากขึ้นในวิทยาศาสตร์สมัยใหม่ โดยซอฟต์แวร์ LabVIEW เมื่อเปิดโปรแกรมแสดงตามภาพที่ 2.23 และที่สำคัญซอฟต์แวร์ LabVIEW ยังสามารถใช้งานร่วมกับไมโครคอนโทรเลอร์จะชนิดต่าง ๆ ได้ อาทิ เช่น การใช้งานร่วมกับบอร์ด Arduino ซึ่งสามารถใช้งานร่วมกับทุกรุ่นของบอร์ดตระกูล Arduino โดยสามารถควบคุมผ่านบอร์ดได้เลยด้วยการส่งข้อมูลผ่านสาย Serial USB เสมือนใช้บอร์ดไมโครคอนโทรเลอร์ในการรับข้อมูลแทนอุปกรณ์รับข้อมูลที่ทางบริษัทพัฒนา LabVIEW ได้ออกมา ซึ่งราคาสูงกว่าบอร์ด Arduino 6 - 7 เท่า โดยเมื่อเสร็จสิ้นการพัฒนาสามารถสร้างโปรแกรมควบคุมเมื่อโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้เลย ซึ่งเหมาะแก่งานวิจัยด้านการพัฒนาเครื่องมือและอุปกรณ์ทางวิทยาศาสตร์ที่ต้องการความสะดวกในการใช้งาน ในการพัฒนาด้วยซอร์ฟแวร์ LabVIEW ถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วน Front Panel และส่วน Block Diagram แสดงตามภาพที่ 2.24 ซึ่งส่วนแรกเป็นการใช้สำหรับแสดงการควบคุม การแสดงผลและส่วนที่สองใช้สำหรับการพัฒนาโปรแกรม ฟังก์ชันต่าง ๆ



ภาพที่ 2.23 ซอฟต์แวร์ LabVIEW Home Edition 2014 พร้อม Activate



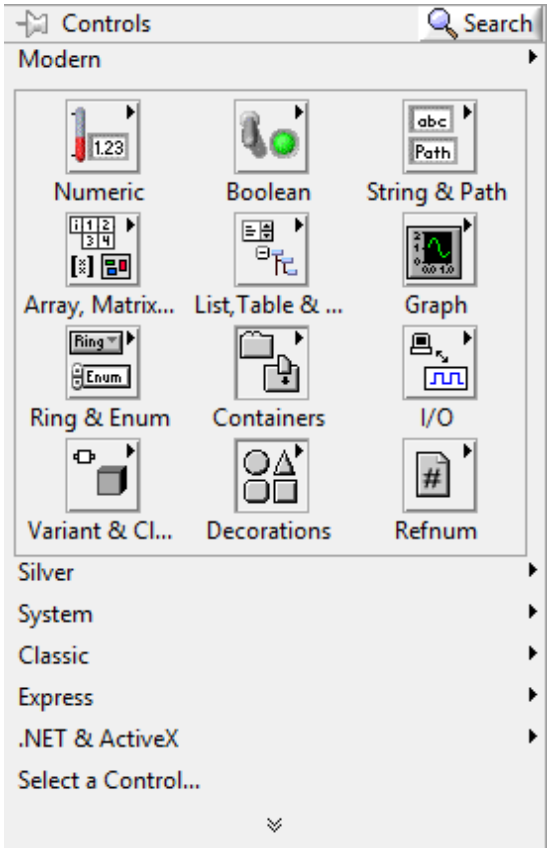
(ก)



(ข)

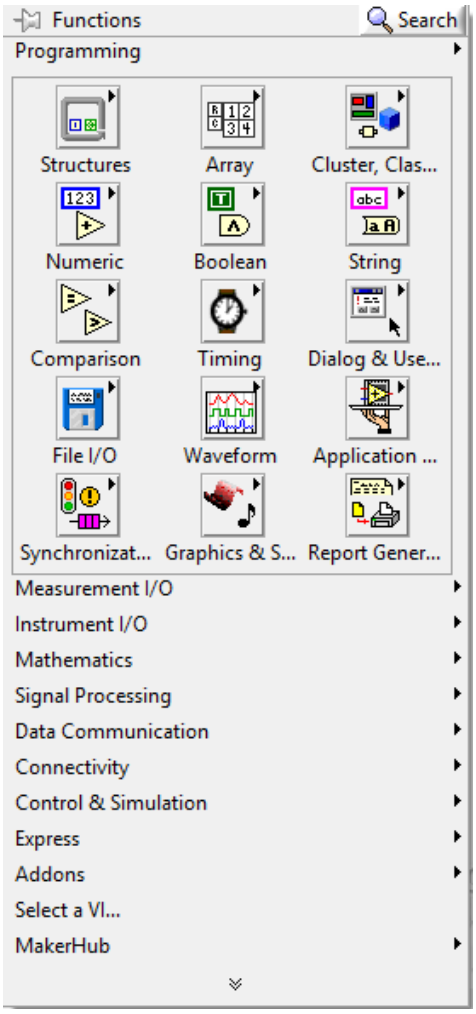
ภาพที่ 2.24 หน้าต่างสำหรับการพัฒนาโปรแกรมควบคุมด้วยซอฟต์แวร์ LabVIEW (ก) หน้าต่าง Front Panel (ข) หน้าต่าง Block Diagram

การพัฒนาส่วน Front Panel เมื่อคลิกขวาที่ว่าง หน้าต่าง Controls แสดงขึ้นมาตามภาพที่ 2.25 ซึ่งเป็นไดอะแกรมสำรับการพัฒนาระบบควบคุมและแสดงผล โดยไดอะแกรมที่สำคัญคือ Numeric เป็นการจัดการกับข้อมูลตัวเลขทั้งหมด ทั้งสำหรับรับค่าข้อมูลเข้าระบบควบคุมและแสดงผลข้อมูลชนิดตัวเลข ไดอะแกรม Boolean เป็นการจัดการกับข้อมูลชนิด True และ False อย่างเช่น การกดสวิตซ์ การกดปุ่ม การแสดงผล LED เป็นต้น ไดอะแกรม String & Path เป็นการจัดการกับข้อมูลชนิดตัวอักษรทั้งหมด นอกจากนี้ยังมีไดอะแกรมที่สำคัญหลายไดอะแกรม เช่น ไดอะแกรมจัดการข้อมูลจำพวก Array และ Matrix ไดอะแกรมการจัดการหน้าต่างควบคุมให้ดูง่ายด้วยไดอะแกรม List Table ไดอะแกรมสำหรับจัดการกับการแสดงผลในรูปแบบกราฟด้วยไดอะแกรม Graph เป็นต้น โดยภายในไดอะแกรมตามภาพที่ 2.25 ยังมีไดอะแกรมแยกย่อยให้เลือกใช้งานได้อีกมากมายตามความต้องการ ซึ่งมีความแตกต่างกันในเรื่องความสวยงาม โดยรูปแบบ Modern รูปแบบ Silver รูปแบบ System และรูปแบบ Classic มีไดอะแกรมให้เลือกใช้งานเหมือนกันโดยความสวยงามแตกต่างกันเพื่อให้มีความหลากหลายในการพัฒนาหน้าต่างควบคุม



ภาพที่ 2.25 หน้าต่าง Controls บนส่วน Front Panel สำหรับการพัฒนาหน้าต่างควบคุมและแสดงผลให้ใช้งานได้อย่างง่าย

การพัฒนาส่วน Block Diagram เมื่อคลิกขวาที่ว่าง หน้าต่าง Functions แสดงขึ้นมาตามภาพที่ 2.26 และไดอะแกรมจากส่วน Front Panel ก็จะแสดงบนหน้าต่างนี้ด้วย โดยฟังก์ชัน Programming ที่ใช้งานทั่วไปได้แก่ ฟังก์ชัน Structures เป็นฟังก์ชันเกี่ยวกับการกำหนดรูปแบบการพัฒนาโปแกรม เช่น For Loop และ While Loop เป็นต้น ฟังก์ชัน Array เป็นการใช้งานข้อมูล Array ทุกรูปแบบ ซึ่งนอกจากนี้ยังมีฟังก์ชัน Numeric โดยใช้สำหรับจัดการข้อมูล การบวก ลบ คูณ หาร เป็นต้น โดยฟังก์ชันอื่น ๆ ที่สำคัญ อาทิเช่น ฟังก์ชัน Boolean ฟังก์ชัน Comparison ฟังก์ชัน Timing เป็นต้น ซึ่งนอกจากฟังก์ชัน Programming แล้ว ยังมีฟังก์ชันอื่น ๆ ให้เลือกใช้งานในการพัฒนาโปรแกรมควบคุมได้หลากหลาย โดยบางครั้งหาฟังก์ชันไม่เจอ สามารถค้นหาฟังก์ชันด้วยการ Search



ภาพที่ 2.26 หน้าต่าง Functions บนส่วน Block Diagram สำหรับการพัฒนาโปรแกรมควบคุมการจัดการข้อมูลและการจัดแสดงผล

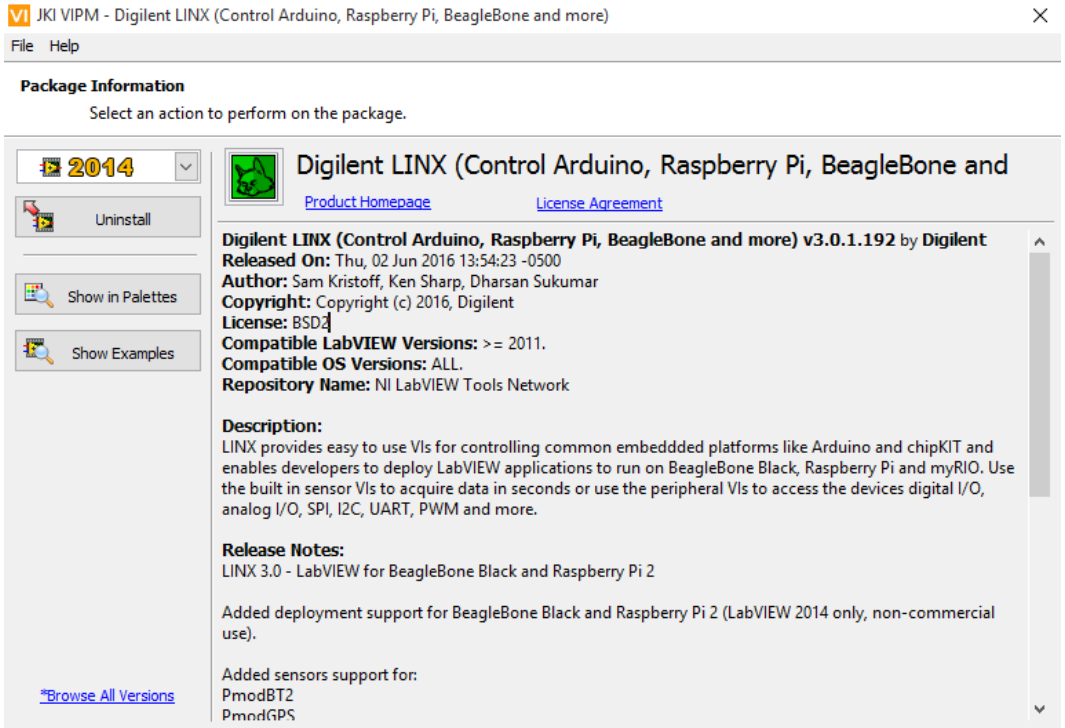
การพัฒนาส่วน Block Diagram ด้วยฟังก์ชันนั้น การรับ-ส่งข้อมูลจากฟังก์ชันหนึ่งไปอีกฟังก์ชันหนึ่งอาศัยเส้นแทนการเชื่อมต่อดังแสดงตามภาพที่ 2.27 โดยชนิดข้อมูลของฟังก์ชันถูกแทนด้วยสีของเส้น เช่น ฟังก์ชัน Numeric ถูกแทนด้วยสีส้มและสีน้ำเงิน ซึ่งสีส้มเป็นข้อมูลประเภท Floating-Point และสีน้ำเงินเป็นข้อมูลประเภท Integer สำหรับฟังก์ชันอื่น ๆ ที่จำเป็นและใช้งานเป็นประจำในการพัฒนา ได้แก่ ฟังก์ชัน Boolean ถูกแทนด้วยสีเขียว ฟังก์ชัน String ถูกแทนด้วยสีชมพู และฟังก์ชัน Path ถูกแทนด้วยสีเขียวเข้ม โดยนอกจากการแบ่งสีเพื่อแทนชนิดของฟังก์ชัน ความหนาของเส้นยังถูกนำมาใช้แทนรูปแบบการรับ-ส่งข้อมูลประเภท Array หรือ Matrix ด้วย ซึ่งเส้นเดียวปกติถูกแทนด้วยข้อมูลทั่วไปที่รับ-ส่งแบบไม่ได้เรียงข้อมูลหรือมีข้อมูลเพียงชนิดเดียว ส่วนเส้นเดียวหนาถูกนำมาแทนการรับ-ส่งข้อมูลชนิด Array แบบหนึ่งมิติ เหมาะกับการรับ-ส่งข้อมูลหลายค่าในการรับ-ส่งเพียงครั้งเดียวและเส้นคู่ปกติถูกนำมาแทนการับ-ส่งข้อมูลชนิด Array แบบสองมิติหรือข้อมูลประเภท Matrix ซึ่งเหมาะกับการรับ-ส่งข้อมูลเป็นชุดในการรับส่งเพียงครั้ง

ภาพที่ 2.27 การแทนชนิดของฟังก์ชันด้วยสีและการแทนชนิดของข้อมูลด้วยความหนาของเส้นสำหรับการพัฒนาโปรแกรมบนหน้าต่าง Block Diagram ของซอฟต์แวร์ LabVIEW

2.4.3 การใช้งาน LabVIEW ร่วมกับ Arduino ผ่าน LINX

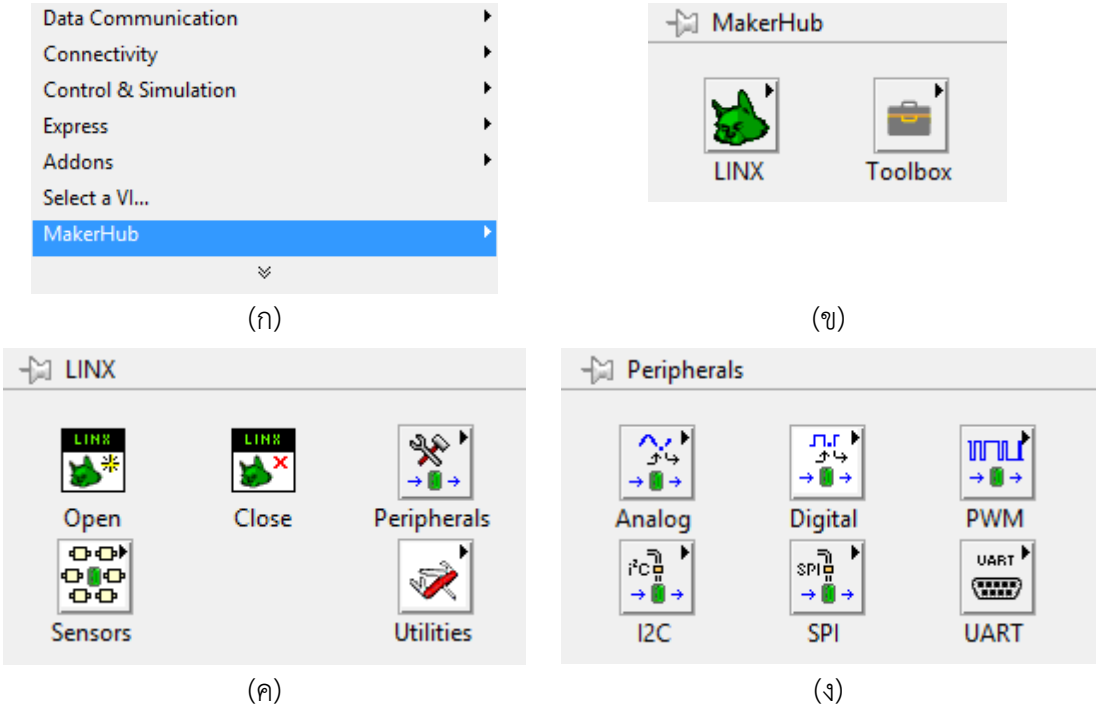
การสื่อสารเพื่อรับ-ส่งข้อมูลระหว่างซอฟต์แวร์ LabVIEW กับบอร์ด Arduino หรือบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์อื่น ๆ ต้องมีการขอใช้งานผ่าน NI-VISA (National Instruments-Virtual Instrument Software Architecture) ของผู้พัฒนาซอฟต์แวร์ โดยสามารถขอใช้งาน NI-VISA ด้วยโปรแกรม VI Package manager 2018 แสดงดังภาพที่ 2.28 ซึ่งผู้พัฒนา LabVIEW ทำขึ้นเพื่อให้สามารถใช้งานกับอุปกรณ์อื่นได้ โดยการขอ NI-VISA สำหรับใช้งานกับบอร์ด Arduino มีทั้งจากผู้พัฒนา LabVIEW และจากผู้พัฒนาย่อยซึ่งมีข้อดีและข้อเสียในการใช้งานแตกต่างกัน อาทิเช่น การขอใช้งาน NI-VISA ผ่านฟังก์ชัน LIFA (LabVIEW Interface for Arduino) ซึ่งพัฒนาโดย National Instruments (ผู้พัฒนา LabVIEW) การขอใช้งาน NI-VISA ผ่านฟังก์ชัน ACCL (Arduino Compatible Compiler for LabVIEW Home/Student ซึ่งพัฒนาโดย Aledyne-TSXperts และการขอใช้งาน NI-VISA ผ่านฟังก์ชัน Digilent LINX พัฒนาโดย Digilent โดยการสื่อสารเพื่อรับ-ส่งข้อมูลร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์จากผู้พัฒนา Digilent ใช้งานสะดวกที่สุด ดังนั้นการพัฒนาระบบควบคุมจึงพัฒนาผ่าน LINX โดยสามารถดาวน์โหลดและติดตั้งดังแสดงตามภาพที่ 2.29 ซึ่งนอกจากสามารถใช้งานร่วมกับบอร์ดไมโครคอนโทรเลอร์ Arduino ได้อย่างมีประสิทธิ์ภาพแล้ว ยังสามารถใช้งานร่วมกับบอร์ดไมโครคอนโทรเลอร์อื่นได้โดยไม่ต้องลง NI-VISA อื่นเพิ่มเติม อย่างเช่นใช้งานร่วมกับบอร์ด Raspberry Pi และบอร์ด BeagleBone เป็นต้น

ภาพที่ 2.28 โปรแกรม VI Package manager 2018 สำหรับการค้นหาและติดตั้งฟังก์ชันเพิ่มเติมจากผู้พัฒนาที่ได้รับอนุญาตจาก National Instruments



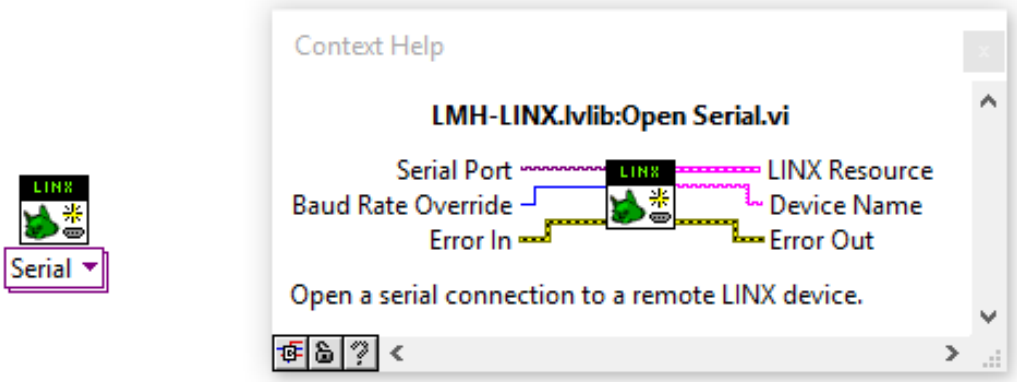
ภาพที่ 2.29 ฟังก์ชัน Degilent LINX ที่ได้รับอนุญาตให้สามารถสื่อสารรับ-ส่งข้อมูลด้วย NI-VISA ของ LabVIEW ผ่านบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino

เมื่อติดตั้ง Digilent LINX เสร็จ ฟังก์ชันจะอยู่ในส่วนของ Block Diagram โดยฟังก์ชันเพิ่มเติมส่วนใหญ่เป็นฟังก์ชันสำหรับพัฒนาโปรแกรมซึ่งสามารถตรวจสอบได้ด้วยการไปที่หน้าต่าง Controls เมื่อติดตั้งสำเร็จจะพบข้อความ MakerHub บนหน้าต่าง ดังแสดงตามภาพที่ 2.30 (ก) โดยเมื่อเข้าไปภายในจะพบฟังก์ชัน LINX และ Toolbox ดังแสดงตามภาพที่ 2.30 (ข) ซึ่งฟังก์ชัน LINX เป็นฟังก์ชันสำหรับการใช้งานการเชื่อมต่อสื่อสารรับ-ส่งข้อมูลและการพัฒนาระบบควบคุม ส่วนฟังก์ชัน Toolbox เป็นฟังก์ชันช่วยทางด้านการคำนวณคณิตศาสตร์ ทางด้านการวิเคราะห์ข้อมูล เมื่อเข้าไปภายในฟังก์ชัน LINX จะพบกับฟังก์ชัน Open Close Peripherals Sensors และ Utilities โดย 2 ฟังก์ชันแรก เป็นฟังก์ชันสำหรับการเริ่มใช้งานและหยุดการใช้งานการสื่อสารผ่านบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ส่วนฟังก์ชัน Peripherals เป็นฟังก์ชันสำหรับการพัฒนาระบบควบคุม และนอกจากนี้ยังมีฟังก์ชัน Sensors ซึ่งเป็นฟังก์ชันสำเร็จรูปสำหรับเซนเซอร์ที่ใช้งานบ่อยและพบได้ทั่วไปดังแสดงตามภาพที่ 2.30 (ค) และเมื่อเข้าไปในฟังก์ชัน Peripherals จะพบกับฟังก์ชันสำหรับการพัฒนาโปรแกรม Analog Digital PWM I2C SPI และ UART ดังแสดงตามภาพที่ 2.30 (ง)



ภาพที่ 2.30 ฟังก์ชันบนหน้าต่าง Block Diagram (ก) เมื่อติดตั้ง Digilent LINX เสร็จฟังก์ชัน MakerHub แสดงบนหน้าต่างฟังก์ชัน (ข) ฟังก์ชันภายในของ MakerHub (ค) ฟังก์ชันภายในของ LINX (ง) ฟังก์ชันภายในของ Peripherals

สำหรับการใช้งานฟังก์ชันต่าง ๆ บนหน้าต่าง Block Diagram สามารถอ่านคำอธิบายเพิ่มเติมได้โดยการไปที่ Help และเลือก Show Context Help ซึ่งจะอธิบายเพิ่มเติมพร้อมทั้งบอกข้อมูลการเชื่อมต่อเส้นข้อมูลดังแสดงตามภาพที่ 2.31 โดยสามารถใช้ดูข้อมูลฟังก์ชันทั้งหมดที่มีบนหน้าต่าง Block Diagram



ภาพที่ 2.31 การดูข้อมูลเพิ่มเติมของฟังก์ชันโดยมีคำอธิบายพร้อมบอกข้อมูลการเชื่อมต่อ

2.5 การควบคุมแบบป้อนกลับแบบ PID controller

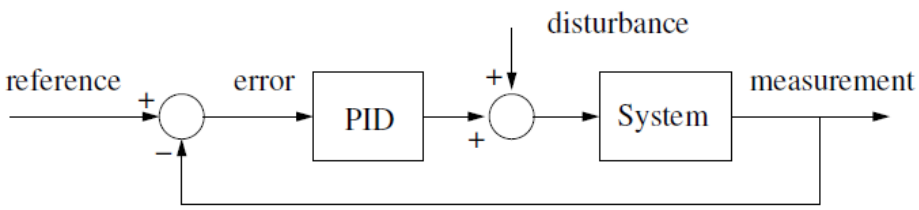
การควบคุมแบบป้อนกลับมีหลายวิธี อาทิเช่น การควบคุมแบบป้อนกลับด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์และการควบคุมแบบป้อนกลับด้วยการพัฒนาโปรแกรมควบคุม โดยวิธีที่นิยมใช้สำหรับการพัฒนาโปรแกรมควบคุมคือการควบคุมย้อยกลับแบบ Proportional–Integral–Derivative controller หรือ PID controller [13], [14] ซึ่งเป็นการนำข้อมูลจากการวัดกลับมาพิจารณาและปรับเทียบใหม่ให้ได้ค่าที่ถูกต้องที่สุดแสดงดังภาพที่ 2.32 โดยตัวควบคุม PID ประกอบไปเทคนิคการควบคุมพื้นฐาน 3 แบบ คือ แบบสัดส่วน (Proportional หรือ P) แบบอินทิกรัล (Integral หรือ I) และแบบอนุพันธ์ (Derivative หรือ D) แต่ละการควบคุมสามารถนำมาประกอบกันเพื่อให้ได้ตัวควบคุมที่ต้องการ ซึ่งควบคุมด้วยการปรับพารามิเตอร์ 3 ตัว คือ ค่าอัตราขยายแบบสัดส่วน (K_p) ค่า integral time (T_i) และ derivative time (T_d) ดังสมการ 2.22

$$u(t) = K_p\left(e(t) + \frac{1}{T_i}\int_0^t e(\tau)d\tau + T_d\frac{de(t)}{dt}\right) \tag{2.22}$$

เมื่อ $u(t)$ คือ สัญญาณควบคุม

$e(t)$ คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของสัญญาณขาออก

τ คือ Variable of integration (มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง t)



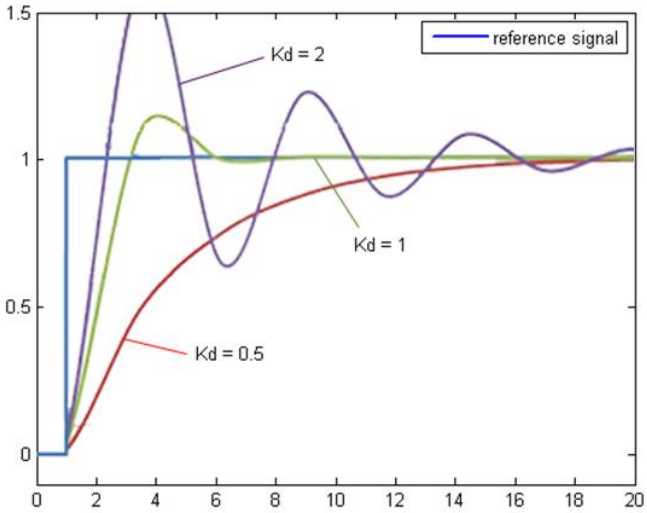
ภาพที่ 2.32 การทำงานของระบบควบคุมย้อนกลับแบบ PID [13]

2.5.1 การควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional Control)

เป็นการควบคุมจากการนำความคลาดเคลื่อนจากระบบควบคุมและค่าที่ได้จากการควบคุมกลับมาพิจารณาใหม่ [13], [14] ซึ่งค่าเอาต์พุตเป็นสัดส่วนกับความคลาดเคลื่อนแสดงตามภาพที่ 2.33 ซึ่งเขียนได้ดังสมการ 2.23 และสมการ 2.24

$$u(t) = K_p e(t) \tag{2.23}$$

$$e(t)_P = u(t)_{\,determine} - u(t)_{\,measurable} \tag{2.24}$$

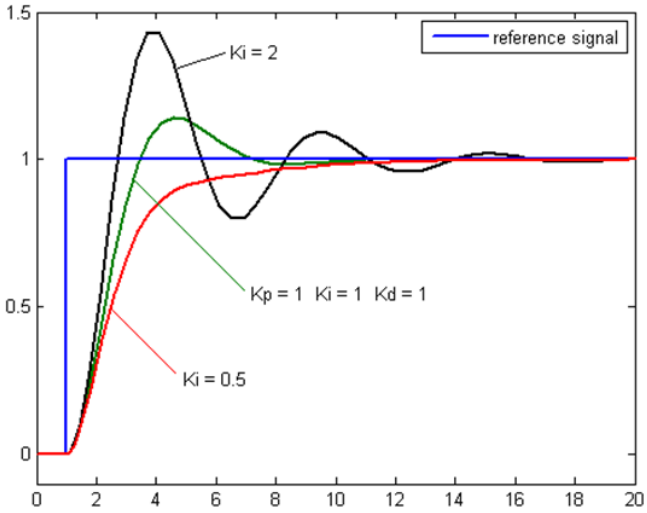


ภาพที่ 2.33 การควบคุมแบบ P Control (K_p) [13]

2.5.2 การควบคุมแบบอินทิกรัล (Integral Control)

เป็นการควบคุมด้วยการสะสมความคลาดเคลื่อนเพื่อใช้ในการปรับแต่งไบแอส [13], [14] และเริ่มหยุดสะสมเมื่อมีค่าความคลาดเคลื่อนของระบบเป็นศูนย์หรือเมื่อผลการควบคุมเข้าถึงค่าที่สมบูรณ์แล้ว เทอมไบแอสของระบบจะมีค่ามากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับลักษณะของการรบกวน (disturbance) เมื่อรวมกับการควบคุมแบบสัดส่วนเขียนดังสมการ 2.25

$$u(t)_I = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i}\int_0^t e(\tau)d\tau\right) \tag{2.25}$$



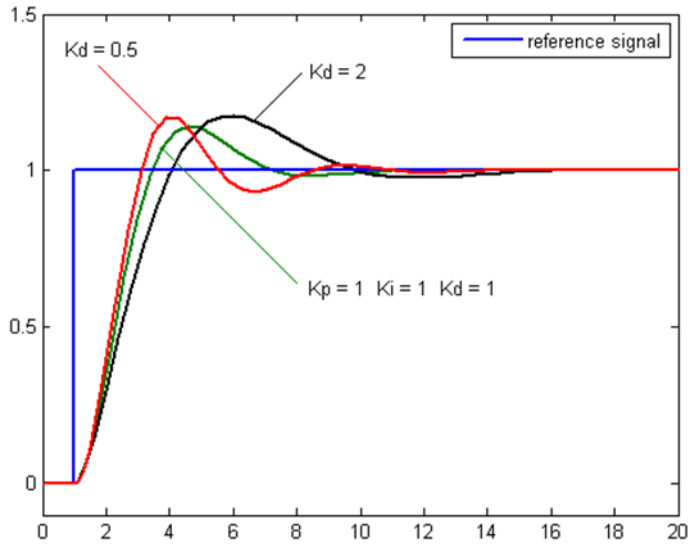
ภาพที่ 2.34 การควบคุมแบบ I Control (K_i) [13]

2.5.3 การควบคุมแบบอนุพันธ์ (Derivative Control)

เป็นการพิจารณาแนวโน้มของความคลาดเคลื่อนหรืออัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ โดยอาศัยหลักการทำงาน [13], [14] คือ ตัวควบคุมตอบสนองต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความคลาดเคลื่อน ถึงแม้ว่าค่าความคลาดเคลื่อนมียังค่าเล็กน้อย ซึ่งสัญญาณขาออกของตัวอนุพันธ์ไม่ได้สัมพันธ์กับขนาดของค่าความคลาดเคลื่อน แต่มีความสัมพันธ์ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของค่าความคลาดเคลื่อน ถ้าความคลาดเคลื่อนมีค่าคงที่ตัวอนุพันธ์จะให้สัญญาณออกเป็นศูนย์ โดยลักษณะเช่นนี้ทำให้ตัวควบคุมจะมีผลตอบสนองก่อนที่ความคลาดเคลื่อนจะเพิ่มมากขึ้น และทำให้ระบบมีผลตอบสนองที่เร็วขึ้น ซึ่งการควบคุมแบบอนุพันธ์เขียนได้ดังสมการ 2.26

$$u(t)_D = K_p \left(e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt}\right) \tag{2.26}$$

เมื่อ T_d คือ derivative time (วินาที, s)



ภาพที่ 2.35 การควบคุมแบบ D Control (K_d) [13]

2.5.4 ประเภทของการควบคุมแบบ PID Controller

การควบคุมแบบ PID Controller แบ่งประเภทการควบคุมออกเป็น 2 ประเภท คือ การควบคุมแบบระบบเปิด (Open loop control system) และการควบคุมแบบระบบปิด (Close loop control system) [13], [14], [15] ซึ่งการควบคุมทั้งสองรูปแบบมีความแตกต่างกันเรื่องระบบการควบคุม โดยการควบคุมด้วยระบบเปิดมีการปรับสัญญาณขาออก ส่วนระบบปิดมีการนำเอาเอาต์พุตจากการควบคุมกลับมาพิจารณาและแก้ไขความคลาดเคลื่อน

2.5.4.1 การควบคุมแบบระบบเปิด (Open loop control system) [13], [14], [15] เป็นระบบควบคุมที่นำเอาต์พุตของระบบมาทำการคำนวณร่วมและมีการปรับสัญญาณเอาต์พุตให้มีความถูกต้องแสดงตามภาพที่ 2.36 โดยเริ่มมาจากความคิดที่ว่า ผลตอบจากสัญญาณขั้น (step response) ของกระบวนการส่วนใหญ่มีลักษณะกราฟความสัมพันธ์คล้ายกับภาพที่ 2.37 ซึ่งเรียกว่า process reaction curve กราฟลักษณะดังกล่าวสามารถประมาณได้จากผลตอบสัญญาณเอาต์พุตของระบบล้าหลังอันดับหนึ่ง (first-order lag) ซึ่งมีฟังก์ชันถ่ายโอนเขียนได้ตามสมการ 2.27

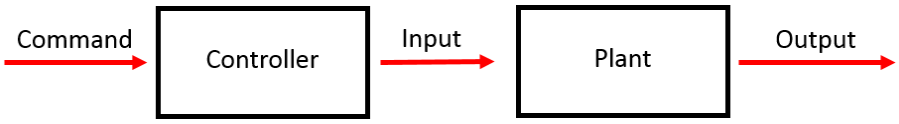
$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{Me^{-sL}}{ts+1} \tag{2.27}$$

เมื่อ $G(s)$ คือ ฟังก์ชันการถ่ายโอน

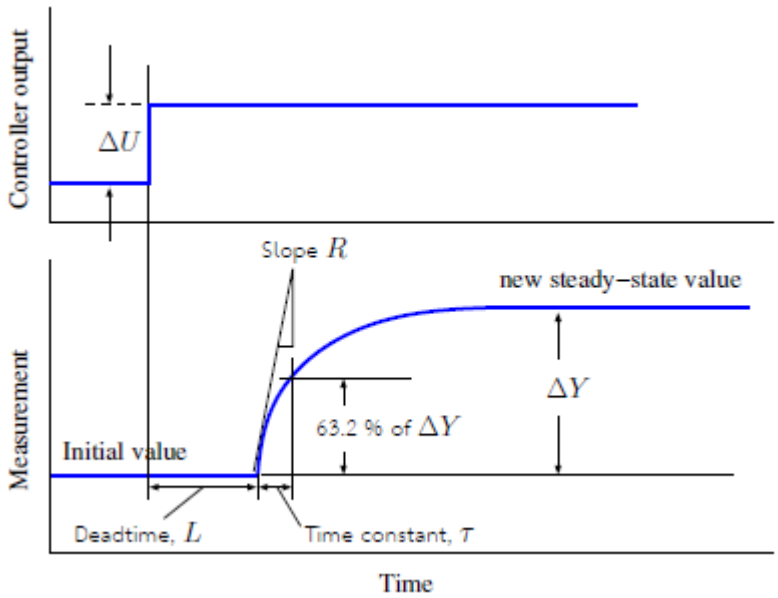
$Y(s)$ คือ ฟังก์ชันเอาต์พุตจากการวัด

$U(s)$ คือ ฟังก์ชันเอาต์พุตจากการควบคุม

s คือ complex frequency

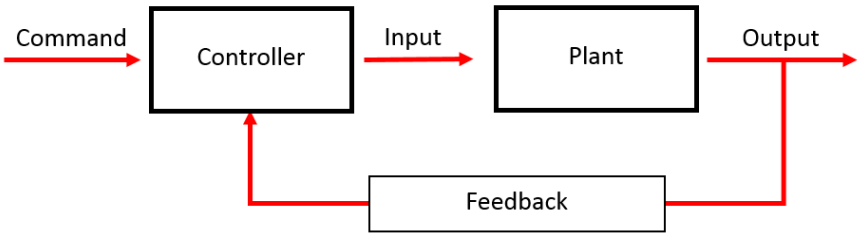


ภาพที่ 2.36 ไดอะแกรมการทำงานของการควบคุมแบบระบบเปิดของ PID Controller [13]

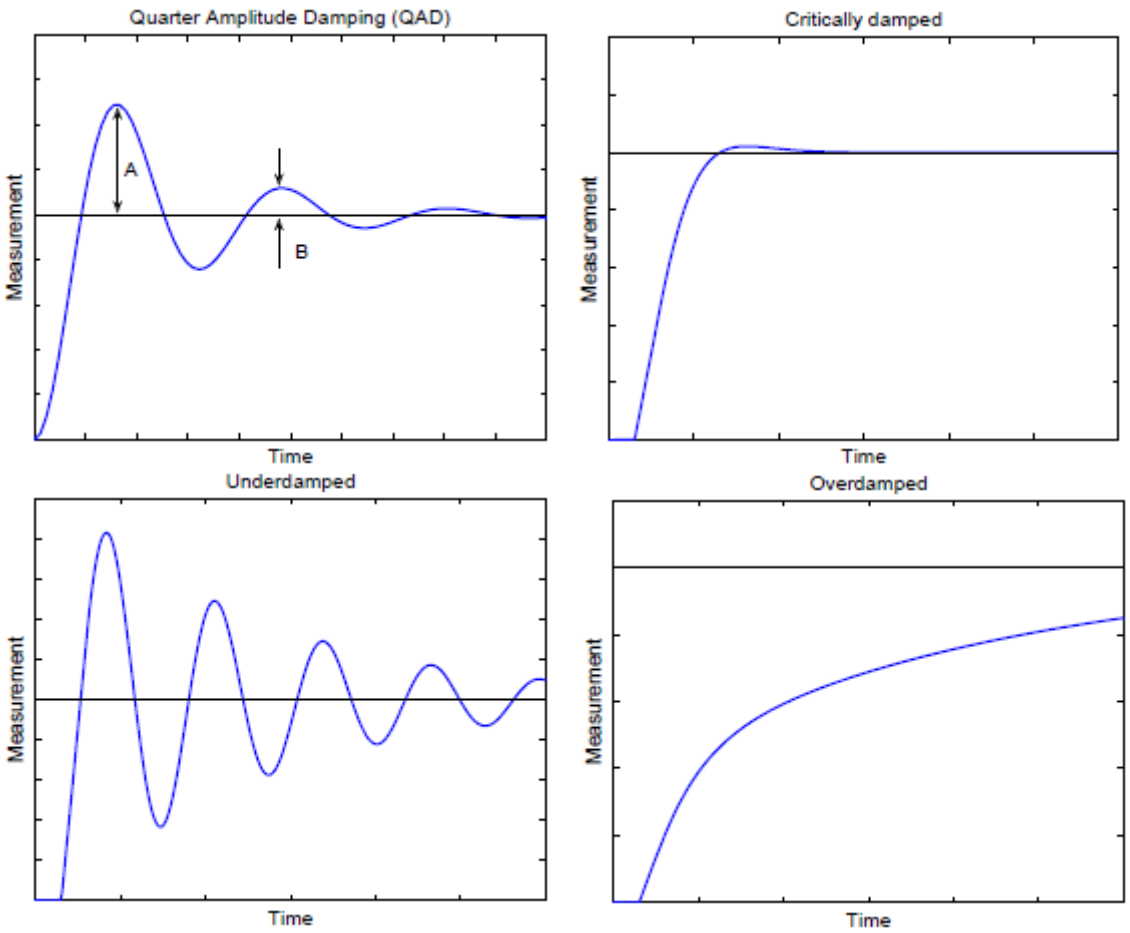


ภาพที่ 2.37 กราฟสัญญาณเอาต์พุตจากระบบควบคุมและสัญญาณเอาต์พุตจากการวัดค่า [13]

2.5.4.2 การควบคุมแบบระบบปิด (Close loop control system) เป็นระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่นำเอาเอาต์พุตของสัญญาณมาเปรียบเทียบกับค่าอินพุตของระบบเพื่อหาค่าความแตกต่างที่เกิดขึ้น การควบคุมวิธีนี้จะทำให้สัญญาณเอาต์พุตมีค่าใกล้เคียงกับความต้องการใช้งาน แสดงตามภาพที่ 2.38 ซึ่งเมื่อใช้งานแบบออฟไลน์ทำให้เอาต์พุตเกิดการแกว่งได้โดยมีรูปแบบการแกว่งที่แตกต่างกันไปดังแสดงตามภาพที่ 2.39



ภาพที่ 2.38 ไดอะแกรมการทำงานของการควบคุมแบบระบบปิดของ PID Controller [13]



ภาพที่ 2.39 ลักษณะตอบสนองของสัญญาณเอาต์พุตโดยขึ้นอยู่กับการปรับจูนค่า PID [13]

2.5.5 การปรับพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ PID Controller

การควบคุมแบบ PID Controller สามารถทำได้ด้วยการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ K_p, T_i และ T_d โดยแบ่งออกเป็น 3 Mode ได้แก่ Proportional mode (P), Proportional-plus-integral mode (PI) และ Proportional-integral-derivative mode (PID) [13], [14], [15] ซึ่งแต่ละโหมดปรับจูนค่าพารามิเตอร์ได้หลายรูปแบบ ได้แก่ การปรับค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีของ Ziegler-Nichols การปรับค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีของ Shinskey และการปรับค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีของ Cohen-Coon โดยพิจารณาจากฟังก์ชันการถ่ายโอนตามสมการ 2.28

$$G_C(s) = K_p(1 + \frac{1}{T_i} + T_d) \tag{2.28}$$

2.5.5.1 การปรับพารามิเตอร์ด้วย Proportional mode

ตัวควบคุมเชิงสัดส่วนเพียงอย่างเดียว จะถูกใช้งานกับกระบวนการที่ต้องการผลการตอบสนองที่รวดเร็ว และในขณะเดียวกันก็ยอมให้เกิดการเบี่ยงเบนขนาดคงที่ขนาดหนึ่ง ขนาดของการเบี่ยงเบนจะเป็นฟังก์ชันของ Proportional Band หรือ PB และไบแอส ตัวควบคุมชนิดเชิงสัดส่วนอย่างเพียงอย่างเดียวจะมีตัวที่ต้องปรับตั้งเพียงตัวเดียว โดยการปรับค่าพารามิเตอร์ K_p ดังแสดงตามตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 วิธีปรับค่าพารามิเตอร์สำหรับ Proportional mode (P)

วิธี	วงเปิด	วงปิด
Ziegler-Nichols/Shinskey	$K_p = \frac{1}{RL}$	$K_p = 0.5K_0$
Cohen-Coon	$K_p = \frac{1}{RL}(1 + \frac{1}{3\tau})$	–

เมื่อ K_p คือ พารามิเตอร์ Proportional mode

K_0 คือ พารามิเตอร์ proportional gain

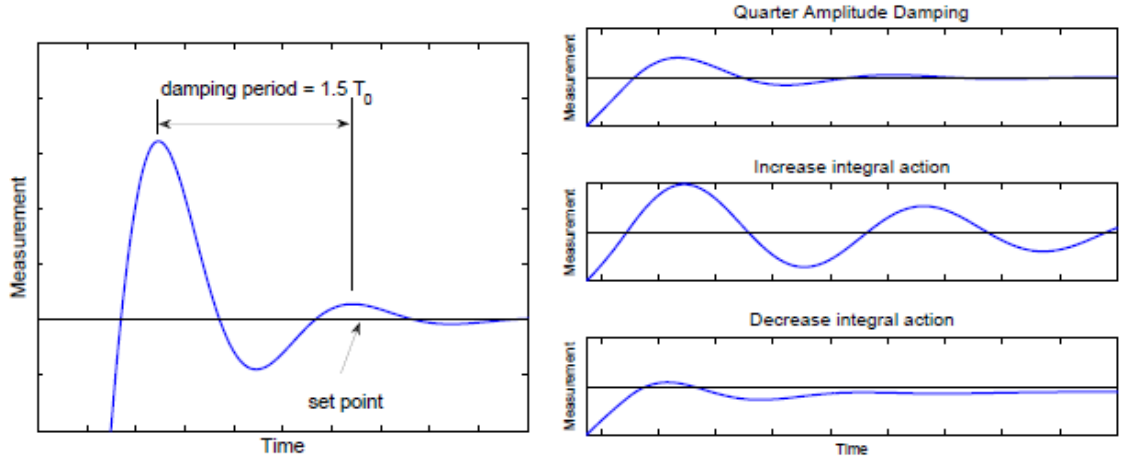
R คือ ค่าความชันของกราฟสัญญาณเอาต์พุต

L คือ ช่วงหน่วงเวลา (วินาที, s)

τ คือ Variable of integration (มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง t)

2.5.5.2 การปรับพารามิเตอร์ด้วย Proportional-plus-integral mode

การควบคุมเชิงสัดส่วนและอินทิกรัลหรือ PI [15] มีข้อได้เปรียบกว่าตัวควบคุมเชิงสัดส่วนอย่างเดียวคือให้ผลตอบที่เร็วและให้ค่าการเบี่ยงเบนที่สภาวะอยู่ตัวเป็นศูนย์วิธีการปรับตัวควบคุมแบบ PI จะยุ่งยากขึ้นเนื่องจากมีพารามิเตอร์ที่ต้องปรับจูน 2 ค่า โดยการตอบสนองแสดงตามภาพที่ 2.40 (ก) ซึ่งเป็นผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบ PI ที่ให้ค่า $T_{PI} = 1.5T_0$ และภาพที่ 2.40 (ข) เป็นผลตอบสนองของตัวควบคุม PI เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ T_i โดยการปรับค่าพารามิเตอร์ K_p และ T_i ดังแสดงตามตารางที่ 2.2



(ก) (ข)

ภาพที่ 2.40 (ก) ลักษณะตอบสนองของสัญญาณเอาต์พุตเมื่อมีการปรับจูนค่า PI (ข) ลักษณะตอบสนองของสัญญาณเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนแปลงค่า T_i

ตารางที่ 2.2 วิธีปรับค่าพารามิเตอร์สำหรับ Proportional-plus-integral mode (PI)

วิธี	วงเปิด	วงปิด
Ziegler-Nichols	$K_p = 0.9/RL$ $T_i = L/0.3$	$K_p = 0.5K_0$ $T_i = T_0/1.2$
Shinskey	– –	$K_p = 0.5K_0$ $T_i = 0.43T_0$
Cohen-Coon	$K_p = \frac{1}{RL}(0.9 + L/12\tau)$ $T_i = L\left(\frac{30+3L/\tau}{9+20L/\tau}\right)L$	– –

2.5.5.3 การปรับพารามิเตอร์ด้วย Proportional-integral-derivative mode

ตัวควบคุมแบบ Proportional-integral-derivative mode หรือ PID [15] ไม่สามารถใช้กับระบบที่มีสัญญาณรบกวนการวัดมากหรือการเปลี่ยนแปลงในลักษณะฉับพลันได้ เพราะว่าส่วนที่เป็นอนุพันธ์อาศัยอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าจากการวัด ตัวควบคุมแบบ PID จะใช้กับกระบวนการที่มีการตอบสนองช้าและมีคาบเวลาที่ค่อนข้างนาน ประยุกต์ใช้กับการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดีเมื่อค่าอุณหภูมิที่วัดได้เริ่มเปลี่ยนแปลง heat rate จะมีค่าเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ตัวอนุพันธ์จะลดคาบเวลาของผลตอบให้สั้นลงเมื่อเกิดการรบกวน โดยการปรับค่าพารามิเตอร์ K_p, T_i และ T_d ดังแสดงตามตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 วิธีปรับค่าพารามิเตอร์สำหรับ Proportional-integral-derivative mode (PID)

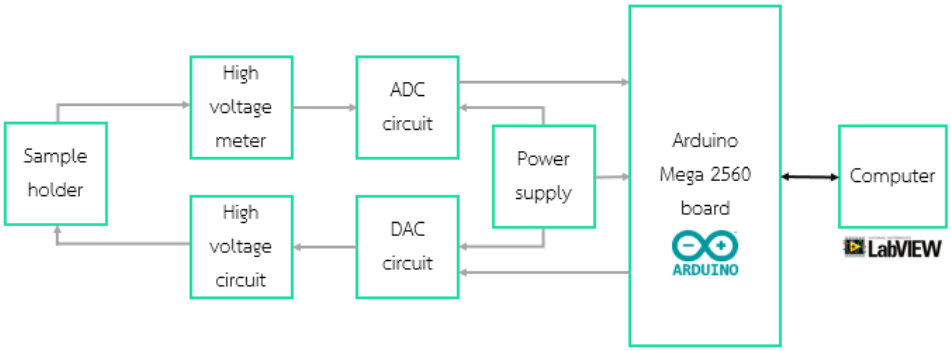
วิธี	วงเปิด	วงปิด
Ziegler-Nichols	$K_p = 1.2/RL$ $T_i = 2L$ $T_d = 0.5L$	$K_p = 0.6K_0$ $T_i = 0.5T_0$ $T_i = T_0/8$
Shinskey	– – –	$K_p = 0.25K_0$ $T_i = 0.5T_0$ $T_i = 0.12T_0$
Cohen-Coon	$K_p = \frac{1}{RL}(\frac{3}{4} + \frac{L}{4\tau})$ $T_i = L\left(\frac{32 + 6L/\tau}{13 + 8L/\tau}\right)L$ $T_d = \frac{4L}{11 + 2L/\tau}$	– – –

บทที่ 3
ระบบกำเนิดสนามไฟฟ้าความต่างศักย์สูง

ระบบกำเนิดสนามไฟฟ้าความต่างศักย์สูงกระแสต่ำเป็นระบบกำเนิดสนามไฟฟ้าสำหรับใช้ตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของสารตัวอย่าง โดยเป็นการศึกษาคุณสมบัติภายใต้อำนาจของสนามไฟฟ้าความต่างศักย์สูง ซึ่งภายในบทนี้เป็นการอธิบายหลักการทำงานของระบบโดยอาศัยการกำเนิดสนามไฟฟ้าด้วยหม้อแปลงไฟฟ้าความต่างศักย์สูง รวมไปถึงการอธิบายวงจรอิเล็กทรอนิกส์ของระบบควบคุมและเทคนิคการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูง นอกจากนี้ยังอธิบายถึงการออกแบบลักษณะเฉพาะของระบบกำเนิดสนามไฟฟ้าด้วย

3.1 หลักการทำงานของระบบกำเนิดสนามไฟฟ้า

การกำเนิดสนามไฟฟ้าความต่างศักย์สูงกระแสต่ำประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ ระบบควบคุม ระบบของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และระบบของอุปกรณ์จับสารตัวอย่าง แสดงการทำงานร่วมกันตามภาพที่ 3.1 โดยระบบควบคุมพัฒนาด้วยซอฟต์แวร์ LabVIEW Home Edition 2014 ซึ่งลักษณะการควบคุมเป็นการควบคุมการกำเนิดสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมบนคอมพิวเตอร์เพื่อให้ง่ายต่อการใช้งาน การเก็บข้อมูลและการวิเคราะห์ผล ส่วนระบบของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เป็นส่วนสำคัญสำหรับการเชื่อมต่อกับระบบควบคุม ซึ่งใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560 เป็นอุปกรณ์สื่อสารรับ-ส่งข้อมูลควบคุมกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์อื่น โดยเป็นการควบคุมด้วยซอฟต์แวร์ LabVIEW ผ่านบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ และส่วนระบบอุปกรณ์จับสารตัวอย่างเป็นบริเวณสำหรับจับสารตัวอย่างพร้อมทั้งกำเนิดสนามไฟฟ้าความต่างศักย์สูงตกคร่อมสารตัวอย่าง ซึ่งเชื่อมต่อกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับกำเนิดความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงเพื่อจ่ายให้กับอุปกรณ์จับสารตัวอย่าง



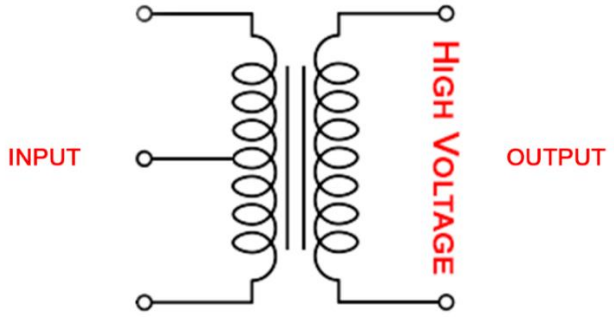
ภาพที่ 3.1 ไดอะแกรมการทำงานของระบบกำเนิดสนามไฟฟ้าความต่างศักย์สูงกระแสต่ำ

3.2 หม้อแปลงไฟฟ้าความต่างศักย์สูง (Flyback Transformer)

การกำเนิดสนามไฟฟ้าสามารถกำเนิดได้ด้วย วงจร Cockcroft-Walton multiplier และหม้อแปลงไฟฟ้าความต่างศักย์สูง โดยการกำเนิดสนามไฟฟ้าต้องการความคลาดเคลื่อนจากการกำหนดค่าสนามไฟฟ้าเอาต์พุตให้น้อยที่สุด ซึ่งวิธีที่ 1 การควบคุมมีการตอบสนองช้าต่อการควบคุมเนื่องจากมีตัวเก็บประจุ ส่วนวิธีที่ 2 เป็นการควบคุมจากศักย์ไฟฟ้าโดยตรง ทำให้การตอบสนองต่อการควบคุมได้ดีกว่า ดังนั้นการใช้งานวิธีกำเนิดด้วยหม้อแปลงไฟฟ้าความต่างศักย์สูงจึงมีความเหมาะสมมากกว่า

3.2.1 การพันขดลวดบนแกนหม้อแปลง

เตรียมหม้อแปลง (Flyback) ซึ่งสามารถหาได้จากหน้าจอโทรทัศน์หรือคอมพิวเตอร์แบบหลอดรังสีแคโทด (Cathode ray tube) เช็ดทำความสะอาด จากนั้นนำสายไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติในการนำกระแสไฟฟ้าได้ดีมาพันรอบแกนปฐมภูมิ ทั้งหมดสองเส้นและทิศทางเดียวกัน ดังแสดงตามภาพที่ 3.2 เนื่องจากเป็นการประยุกต์ใช้งาน ดังนั้นเอาต์พุตที่ใช้งานเฉพาะสายความต่างศักย์สูงและ Ground เท่านั้น ส่วนขาอื่นเป็นขาสำหรับควบคุมการกำเนิดความต่างศักย์สูงของหน้าจอรังสีแคโทด



ภาพที่ 3.2 วงจรการพันหม้อแปลง Flyback สำหรับการสร้างการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กบนแกนหม้อแปลงด้วยไฟฟ้ากระแสตรง

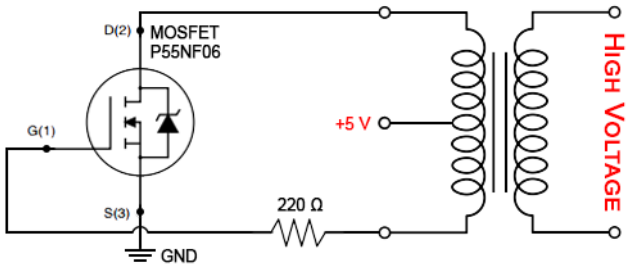
3.2.2 ทดสอบการทำงานของหม้อแปลง

การทดสอบการทำงานของของหม้อแปลงไฟฟ้าความต่างศักย์สูง Flyback ทำได้โดยการต่อวงจรจากขดลวดของหม้อแปลงเข้ากับวงจรสวิตซ์กระแสไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ในการสลับทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าเพื่อสร้างการเหนี่ยวนำแม่เหล็กบนแกนหม้อแปลงโดยการจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ระดับต่ำก่อนซึ่งสามารถอ่านค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าด้วย High Voltage Probe ซึ่งสามารถต่อเข้ากับ Multimeter อ่านค่าได้ทันที โดยทั่วไปอัตราส่วนในการลดความต่างศักย์ไฟฟ้าของอุปกรณ์วัดอยู่ที่ 1:1000 โวลต์ ซึ่งขณะทดสอบการทำงานของหม้อแปลงบริเวณทำการทดลองไม่ควรมีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นอยู่ภายในบริเวณนั้น อาจทำให้อุปกรณ์เสียหายได้

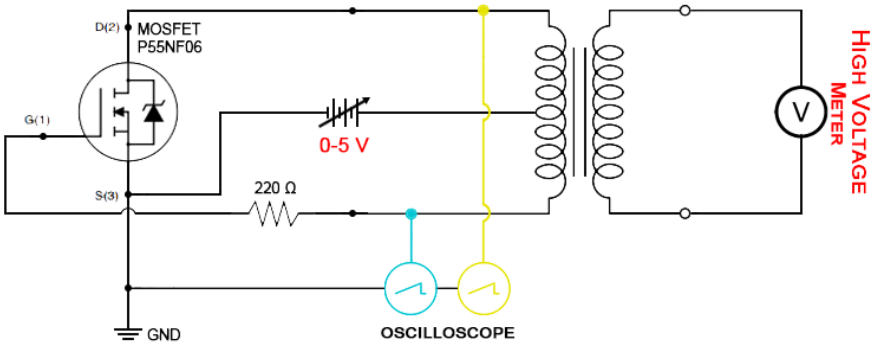
3.3 วงจรอิเล็กทรอนิกส์สำหรับการกำเนิดสนามไฟฟ้าความต่างศักย์สูง

3.3.1 วงจรสวิตซ์จรแสไฟฟ้า

การเตรียมวงจรสวิตซ์ซึ่งใช้สำหรับเปลี่ยนทิศทางของกระแสไฟฟ้าภายในขดลวดบนแกนหม้อแปลงเพื่อสร้างการเหนี่ยวนำ แสดงตามภาพที่ 3.3 และภาพที่ 3.4 ซึ่งใช้ในการเปลี่ยนทิศทางของกระแสไฟฟ้าเพื่อให้เกิดการเหนี่ยวนำและสร้างสนามแม่เหล็กบนแกนหม้อแปลงให้เกิดขึ้น โดยใช้ MOSFET ชนิด N channel (P55NF06) ช่วยในการสวิตซ์ทิศทางของกระแสไฟฟ้า



ภาพที่ 3.3 วงจรสวิตซ์กระแสไฟฟ้าด้วย MOSFET สำหรับเหนี่ยวนำหม้อแปลง



ภาพที่ 3.4 การวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าด้วย Oscilloscope และ High voltage probe ซึ่งต่อกับ Agilent multimeter สำหรับอ่านค่าความต่างศักย์ในอัตราส่วน 1:1000

3.3.2 วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลจากระบบควบคุมเป็นสัญญาณอนาลอก

เชื่อมต่อไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino MEGA 2560 สำหรับรับ-ส่งข้อมูลจากซอฟต์แวร์ LabVIEW (Home Edition) บนคอมพิวเตอร์ผ่านสาย USB จากนั้นต่อวงจรผ่าน Serial Peripheral Interface (SPI) กับ MCP4922 ซึ่งเป็นวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาลอกที่มีความละเอียดในการแปลงสัญญาณ 12 bit ดังแสดงตามภาพที่ 3.5 โดยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ทำหน้าที่สื่อสารระหว่างซอฟต์แวร์บนคอมพิวเตอร์กับวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณอนาลอก ในการส่งสัญญาณสื่อสารสามารถกำหนดพารามิเตอร์ของ MCP4922 ดังแสดงตามภาพที่ 3.6 (ก)

3.3.2.1 Bit ข้อมูลทางดิจิตอลจะเริ่มเก็บข้อมูลตั้งแต่ bit 0 ถึง bit 11 หรือ D0 ถึง D11 โดยที่ D หมายถึงข้อมูลดิจิตอลซึ่งมีสองลอจิก LOW และลอจิก HIGH

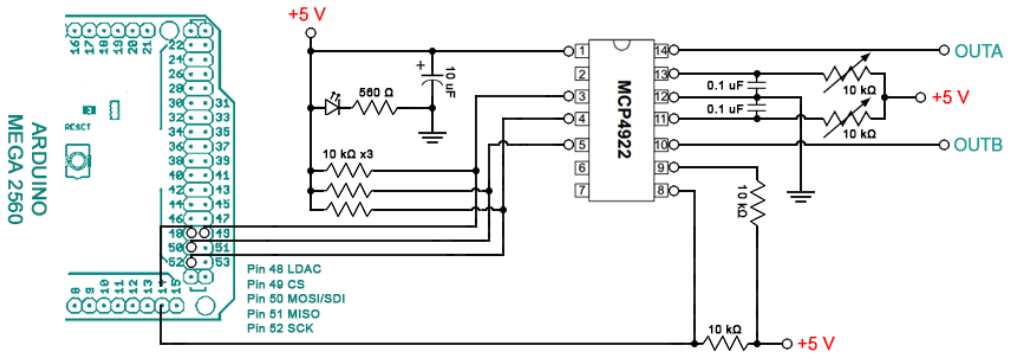
3.3.2.2 Bit ที่ 12 (SHDN) ทำหน้าที่เป็น bit สำหรับการเปิด-ปิดการรับข้อมูลกลับไปยังตัวควบคุมโดยที่ลอจิก LOW หมายถึงปิดการส่งข้อมูลและลอจิก HIGH หมายถึงการเปิดการส่งข้อมูล

3.3.2.3 Bit ที่ 13 (GA) ทำหน้าที่เป็น bit สำหรับการขยายสัญญาณในการแปลงข้อมูล โดยที่ลอจิก LOW หมายถึงการขยายสัญญาณข้อมูล 2 เท่า และลอจิก HIGH หมายถึงไม่มีการขยายสัญญาณ

3.3.2.4 Bit ที่ 14 (BUF) ทำหน้าที่เป็น bit สำหรับการกำหนดสถานะแรงดันอ้างอิงในการผ่าน Buffer ภายในของ IC โดยที่ลอจิก LOW หมายถึงแรงดันอ้างอิงไม่ผ่าน Buffer ของ IC และลอจิก HIGH หมายถึงแรงดันอ้างอิงผ่าน Buffer ของ IC

3.3.2.5 Bit ที่ 15 (A/B) ทำหน้าที่เป็น bit สำหรับในการเลือกช่องในการใช้งานแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาลอก โดยที่ลอจิก LOW หมายถึงการเลือกใช้ช่อง A ในการแปลงสัญญาณ และลอจิก HIGH หมายถึงการเลือกช่อง B ในการแปลงสัญญาณ

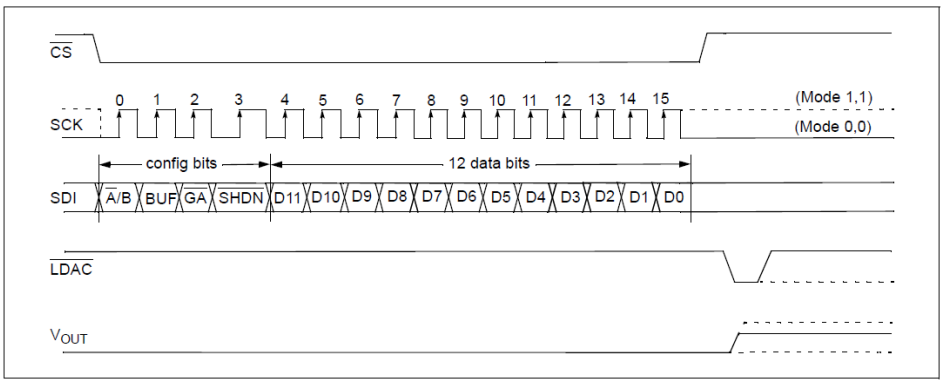
ซึ่งในการใช้งานรูปแบบของสัญญาณของ CS SCK SDI และ LDAC จะต้องเป็นไปในแนวทางตามภาพที่ 3.6 (ข) โดยที่ CS จะเปลี่ยนลอจิกจาก HIGH ไปเป็นลอจิก LOW จากนั้นจะมีการเริ่มส่งสัญญาณนาฬิกา (SCK) พร้อมกับการส่งข้อมูล (SDI) โดยในช่วงนี้ LDAC จะอยู่ในสถานะลอจิก HIGH และเมื่อส่งข้อมูลเสร็จหนึ่งครั้ง CS จะเปลี่ยนลอจิกกลับจาก LOW ไปเป็น HIGH พร้อมกับ LDAC เปลี่ยนลอจิก HIGH ไปเป็น LOW ซึ่งหลังจากนั้น V_{OUT} จะถูกส่งออกมาที่ขา V_{OUT} ของ IC



ภาพที่ 3.5 วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลจากซอฟต์แวร์ LabVIEW (Home Edition) ผ่านบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino MEGA 2560 ให้เป็นสัญญาณอนาลอก

W-x	W-x	W-x	W-0	W-x	W-x	W-x	W-x	W-x	W-x	W-x	W-x	W-x	W-x	W-x	W-x
$\overline{A}$/B	BUF	$\overline{GA}$	$\overline{SHDN}$	D11	D10	D9	D8	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
bit 15															bit 0

(ก)

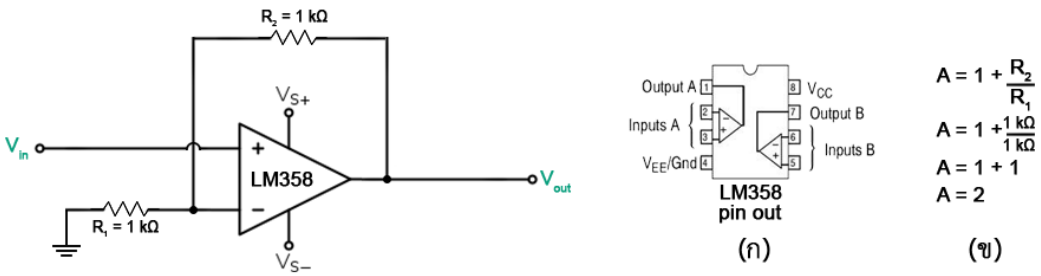


(ข)

ภาพที่ 3.6 (ก) ลักษณะสัญญาณดิจิตอลขนาด 16 bit สำหรับส่งข้อมูลโดยสามารถกำหนดพารามิเตอร์ในการแปลงสัญญาณได้ภายในสัญญาณดิจิตอล (ข) การส่งข้อมูลดิจิตอลกับสัญญาณนาฬิกา (SCK) [16]

3.3.3 วงจรแปลงระดับความต่างศักย์ไฟฟ้า

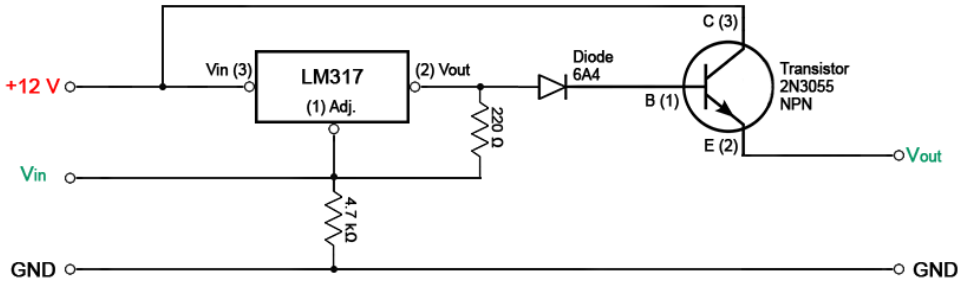
การแปลงระดับความต่างศักย์ไฟฟ้าทำได้โดยต่อวงจรจากขา Output จากวงจรแปลงสัญญาณที่สามารถแปลงความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดได้ 5 โวลต์ เข้ากับวงจร Non-Inverting amplifier ด้วย LM358 ดังแสดงตามภาพที่ 3.7 โดยหากำลังขยายของสัญญาณ Output ซึ่งต้องการกำลังขยาย 2 เท่า ดังนั้นค่าความต้านทาน R_1 และ R_2 จึงมีขนาด 1 $k\Omega$ แสดงตามภาพที่ 3.7 (ข)



ภาพที่ 3.7 วงจรปรับระดับความต่างศักย์ Non-Inverting amplifier (ก) รายละเอียดการเชื่อมต่อ IC LM358 (ข) การคำนวณกำลังขยายของสัญญาณผ่านตัวต้านทาน

3.3.4 วงจรแปลงระดับกระแสไฟฟ้า

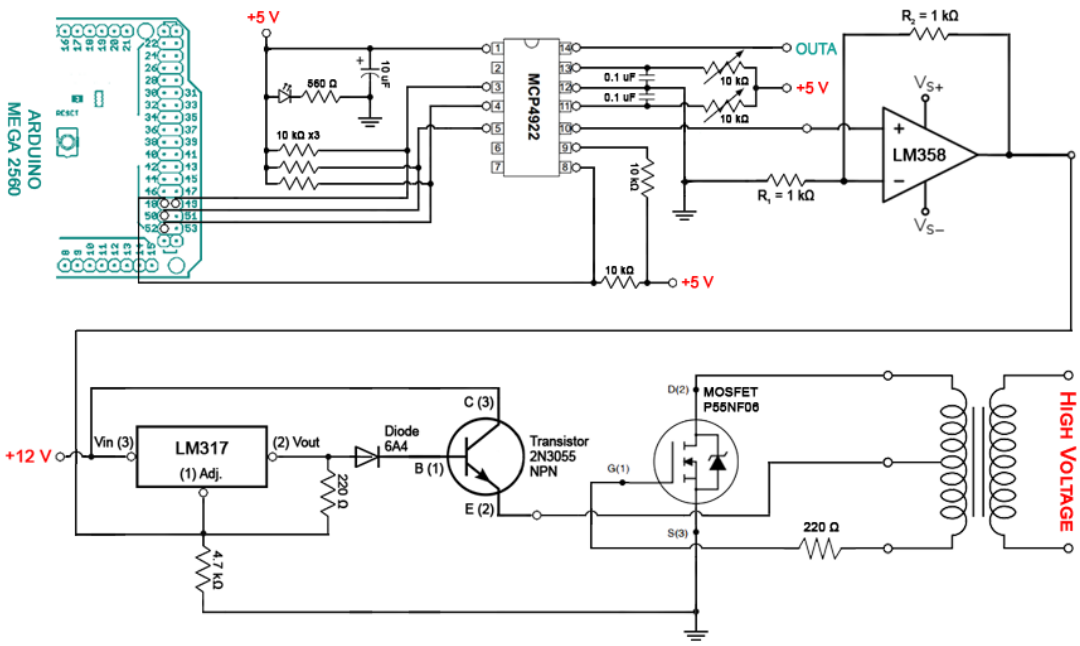
การแปลงระดับกระแสไฟฟ้าถูกนำมาใช้งานเพื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าให้มากพอสำหรับการเหนี่ยวนำแม่เหล็กบนแกนหม้อแปลงไฟฟ้า Flyback ซึ่งทำได้โดยต่อขาเอาต์พุตจากวงจรแปลงระดับความต่างศักย์ไฟฟ้าเข้ากับ LM317 แสดงดังวงจรตามภาพที่ 3.8 ซึ่งความต่างศักย์สามารถควบคุมการกระแสที่ออกจาก LM317 โดยกระแสสูงสุดของไอซีที่เอาต์พุตได้อยู่ที่ 1.5 แอมแปร์ ซึ่งวงจรรวม LM317 ใช้ไฟเลี้ยงความต่างศักย์ 12 V และขาเอาต์พุตต่อเข้ากับไดโอดกระแสสูงเพื่อป้องการการไหลย้อนกลับของกระแสไฟฟ้า



ภาพที่ 3.8 วงจรระดับกระแสไฟฟ้า LM317 ซึ่งต่อกับทรานซิสเตอร์ N3055 เพื่อเพิ่มระดับของกระแสไฟฟ้าสูงสุดได้ 1.5 แอมแปร์

3.3.5 วงจรสำหรับการควบคุมการกำเนิดสนามไฟฟ้า

การทดลองควบคุมการกำเนิดสนามไฟฟ้าเป็นการศึกษาความสัมพันธ์ของสัญญาณดิจิตอลและความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงที่เกิดขึ้นโดยการต่อวงจรดังภาพที่ 3.9 โดยเป็นการรวมวงจรสวิตซ์ทิศทางกระแสไฟฟ้า วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณอนาลอก วงจรแปลงระดับความต่างศักย์ไฟฟ้าและวงจรแปลงระดับกระไฟฟ้าเข้าด้วยกัน ซึ่งวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าด้วย High voltage probe ที่ต่อเข้ากับ Digital multimeter ยี่ห้อ Agilent รุ่น 34405A เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้า Input จากซอฟแวร์ LabVIEW ผ่านบอร์ด Arduino กับความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงที่เกิดขึ้น การทำงานของวงจรเริ่มจากบอร์ด Arduino ได้รับข้อมูลการควบคุมการกำเนิดสนามไฟฟ้าด้วยสัญญาณดิจิตอลส่งมาที่บอร์ด จากนั้นสัญญาณถูกแปลงให้เป็นสัญญาณอนาลอกและแปลงระดับความต่างศักย์ไฟฟ้าให้สูงขึ้นเพื่อการควบคุมการกำเนิดสนามไฟฟ้าที่สูงขึ้น ก่อนที่จะต่อเข้ากับวงจรแปลงระดับกระแสไฟฟ้าและวงจรสวิตซ์กระแสไฟฟ้า



ภาพที่ 3.9 วงจรทดลองควบคุมการกำเนิดสนามไฟฟ้าความต่างศักย์สูง

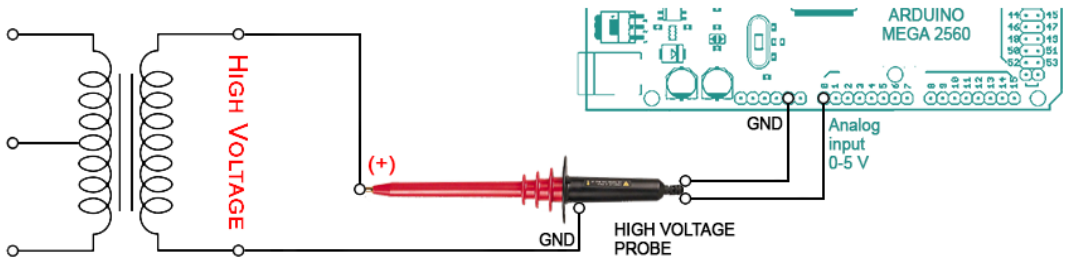
3.4 ระบบวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าสูง

3.4.1 เครื่องมือวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าสูง

เครื่องมือวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงหรือ High voltage probe ที่ใช้ในบันทึกค่าความศักย์ไฟฟ้าสูง โดยเชื่อต่อเข้ากับ Digital multimeter ยี่ห้อ Agilent รุ่น 34405A ซึ่งสามารถลดความต่างศักย์ไฟฟ้าลงด้วยอัตรา 1:1000 โวลต์ แสดงดังภาพที่ 3.10 โดยสามารถวัดได้ทั้งไฟฟ้ากระแสตรงและไฟฟ้ากระแสสลับ ความผิดพลาดในการวัดสำหรับไฟฟ้ากระแสตรงอยู่ที่ 1% ในช่วง 0 – 20 kV และความผิดพลาด 2% ในช่วง 21 – 40 kV

ภาพที่ 3.10 High voltage probe ซึ่งสามารถวัดได้ทั้งไฟฟ้ากระสตรงและไฟฟ้ากระแสสลับ

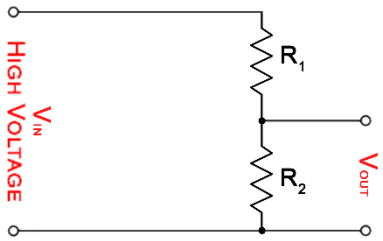
สำหรับการต่อ High voltage probe เข้ากับระบบควบคุมสามารถทำได้ตามภาพที่ 3.11 โดยต่อเข้าที่ขา Analog input ของบอร์ดไมโครคอนโทรเลอร์เพื่อแปลงสัญญาณอนาลอกจากการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงเป็นสัญญาณดิจิตอล และเพื่อความถูกต้องในการอ่านค่าต้องทำการปรับเทียบกับการอ่านค่าด้วย Digital multimeter ยี่ห้อ Agilent รุ่น 34405A



ภาพที่ 3.11 วงจรแสดงการรับค่านาลอกของสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าเพื่อแปลงเป็นค่าดิจิตอล

3.4.2 วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าสำหรับวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าสูง

วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้า (Voltage Divider Circuit) คือวงจรที่ประกอบด้วยความต้านทาน 2 ตัวขึ้นไปต่อวงจรกับแบบอนุกรม (Series) อยู่ระหว่างแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า (Power Supply) ซึ่งค่าความต้านทานในวงจรทำหน้าที่แบ่งแรงดันไฟฟ้าในวงจร โดยวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าพัฒนามาจากกฎของโอห์มเพียงแสดงตามภาพที่ 3.12



(ก)

$$V_{OUT} = \frac{V_{IN} R_2}{(R_1 + R_2)}$$

$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \frac{R_2}{(R_1 + R_2)}$$

(ข)

ภาพที่ 3.12 (ก) วงจร Voltage divider สำหรับสร้างอุปกรณ์วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าสูง (ข) สมการคำนวณเพื่อหาค่าความต้านทานที่เหมาะสมเพื่อลดความศักย์ไฟฟ้าอินพุตและเอาต์พุตด้วยอัตรา 1:1000 โวลต์ ถ้าใช้ความต้านทาน R_2 เท่ากับ 1 MΩ จะได้ R_1 เท่ากับ 999 MΩ

3.5 การออกแบบระบบกำเนิดสนามไฟฟ้า

3.5.1 การออกแบบชุดจับสารตัวอย่าง

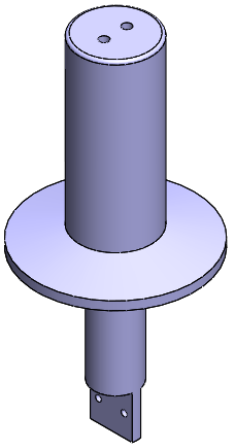
การออกแบบชุดจับสารตัวอย่างที่สมบูรณ์แสดงตามภาพที่ 3.13 เป็นอุปกรณ์จับสารสำหรับการศึกษาคุณสมบัติเฉพาะของสารตัวอย่าง ซึ่งประกอบด้วยส่วนหลัก 2 ส่วน คือส่วนบริเวณที่ใช้จับสารตัวอย่างพร้อมกำเนิดสนามไฟฟ้าและส่วนสำหรับการยึดกับอุปกรณ์ทดลอง ซึ่งอุปกรณ์ยาว 180 มิลลิเมตร ภายในมีรูสำหรับเชื่อมต่อสายไฟฟ้าความต่างศักย์สูงป้องกันการรั่วด้วยเซรามิก บริเวณสำหรับจับสารตัวอย่างทำจากเทฟลอน (Teflon) ทดความต่างศักย์ไฟฟ้าสูง

(ก) (ข) (ค)

ภาพที่ 3.13 การออกแบบอุปกรณ์จับสารตัวอย่างที่สามรถกำเนิดสนามไฟฟ้า

3.5.1.1 การออกแบบฐานจับและยึดขณะทำการทดลอง

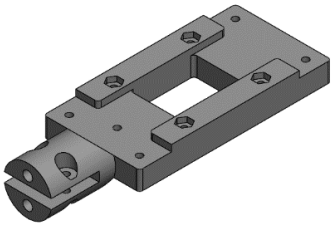
ในการทดลองอุปกรณ์ต้องไม่มีการเคลื่อนไหว ซึ่งฐานจับและฐานยึดถูกออกแบบให้มีน้ำหนักมาก เพื่อช่วยให้อุปกรณ์ไม่มีการเคลื่อนไหวโดยออกแบบให้ทำจากสแตนเลสเกรด 304 ซึ่งการออกแบบแสดงดังภาพที่ 3.14 โดยมีสูง 120 มิลลิเมตร ตรงกลางมีรู 2 รูเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตรสำหรับใส่เซรามิกและสายไฟฟ้าความต่างศักย์สูงและบริเวณส่วนปลายถูกออกแบบให้สามารถต่อกับส่วนยึดจับสารตัวอย่างได้ ซึ่งยาว 15 มิลลิเมตรและมีรูสำหรับยึด 2 รูเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร



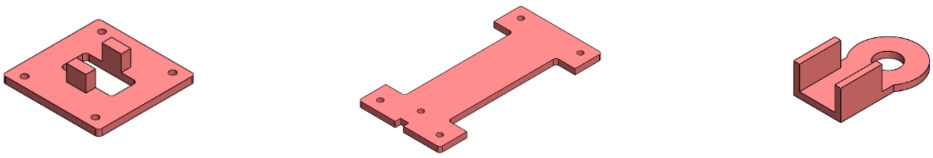
ภาพที่ 3.14 การออกแบบฐานจับและฐานยึดของอุปกรณ์จับสารตัวอย่าง

3.5.1.2 การออกแบบส่วนกำเนิดสนามไฟฟ้าความต่างศักย์สูง

บริเวณส่วนนี้ถูกออกแบบให้มีการกำเนิดสนามไฟฟ้าความต่างศักย์สูง ซึ่งส่วนป้องกันถูกออกแบบให้ทำวัสดุเทฟลอนโดยสามารถต้านทานสนามไฟฟ้าได้ดีแสดงตามภาพที่ 3.15 โดยสามารถเชื่อมต่อและยึดกับส่วนฐานจับได้ซึ่งส่วนป้องกันมีความยาว 60 มิลลิเมตร มีความหนา 6 มิลลิเมตร โดยมีการเจาะรูตรงกลางขนาด 16x20 มิลลิเมตรและเซาะร่อง เพื่อให้สามารถเชื่อมต่อกับขั้วไฟฟ้าได้ ซึ่งขั้วไฟฟ้าถูกออกแบบให้ทำจากทองแดงแสดงตามภาพที่ 3.16 โดยส่วน ก ใช้สำหรับกดสารตัวอย่างจากด้านบน ส่วน ข สำหรับกดสารตัวอย่างจากด้านล่าง และส่วน ค ใช้สำหรับต่อไฟฟ้าไปที่ส่วน ก และ ข เพื่อกำเนิดสนามไฟฟ้าคร่อมสารตัวอย่าง



ภาพที่ 3.15 การออกแบบอุปกรณ์ป้องกันสนามไฟฟ้าของอุปกรณ์จับสารตัวอย่าง



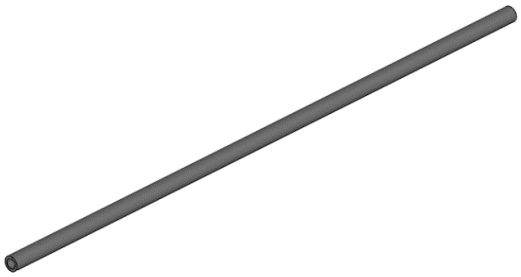
(ก) (ข) (ค)

ภาพที่ 3.16 การออกแบบขั้วไฟฟ้าของอุปกรณ์จับสารตัวอย่าง

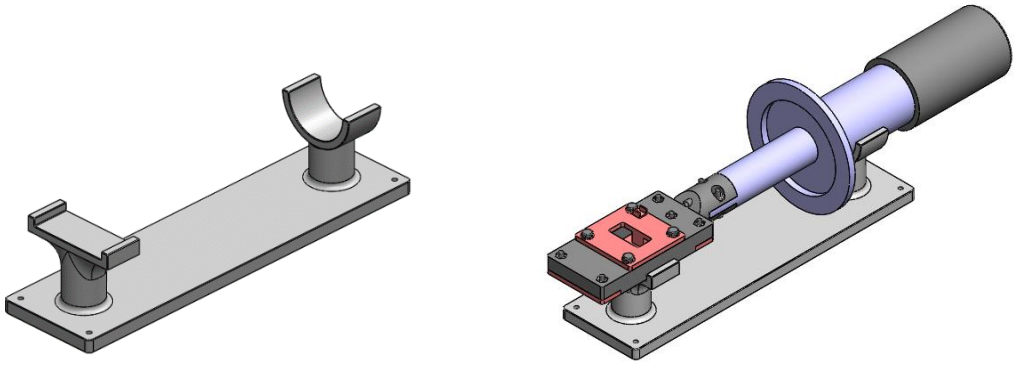
3.5.1.3 การออกแบบส่วนอุปกรณ์เพิ่มเติมของอุปกรณ์

อุปกรณ์เพิ่มเติมไม่ได้ช่วยในการกำเนิดสนามไฟฟ้า แต่ถูกออกแบบมาเพื่อช่วยป้องกันการรั้วของกระแสไฟฟ้าโดยอกแบบให้ทำจากเซรามิคที่มีคุณสมบัติในการต้านทานและไม่นำไฟฟ้า โดยท่อเซรามิคมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร มีความหนา 1 มิลลิเมตร และมีความยาว 125 มิลลิเมตร แสดงตามภาพที่ 3.18 ส่วนอุปกรณ์ตามภาพที่ 3.19 เป็นส่วนที่ถูกออกแบบมาเพื่อช่วยในการวางอุปกรณ์เพื่อให้สามารถเตรียมสารตัวอย่างได้ง่าย โดยออกแบบให้มีแขนยื่นออกมารับกับตัวจับสารพอดี

ภาพที่ 3.17 การออกแบบส่วนเชื่อมต่อสายไฟฟ้าความต่างศักย์สูงกับระบบจับสารตัวอย่าง



ภาพที่ 3.18 การออกแบบท่อเซรามิคสำหรับป้องกันการนำไฟฟ้าภายในอุปกรณ์



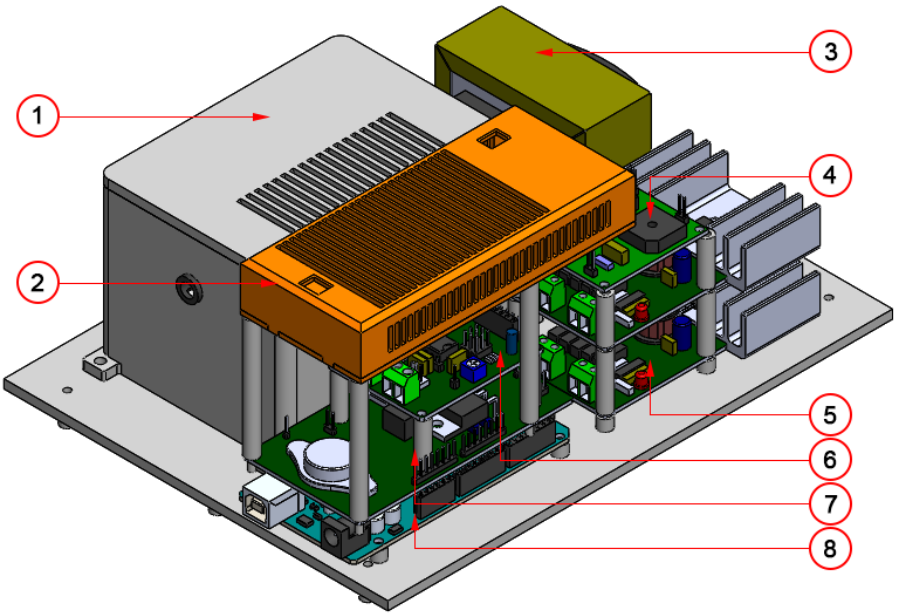
ภาพที่ 3.19 การออกแบบอุปกรณ์สำหรับวางชุดจับสารตัวอย่างเพื่อช่วยในการเตรียมสารตัวอย่างพร้อมทดสอบวางอุปกรณ์

3.5.2 การออกแบบชุดอุปกรณ์ของระบบควบคุม

ชุดอุปกรณ์ของระบบควบคุมเป็นกล่องสำหรับเก็บวงจรอิเล็กทรอนิกส์ของระบบควบคุมและอุปกรณ์วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าโดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือส่วนการออกแบบการจัดวางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เพื่อความเหมาะสมและส่วนการออกแบบชิ้นส่วนของตัวกล่องอุปกรณ์ของระบบควบคุม

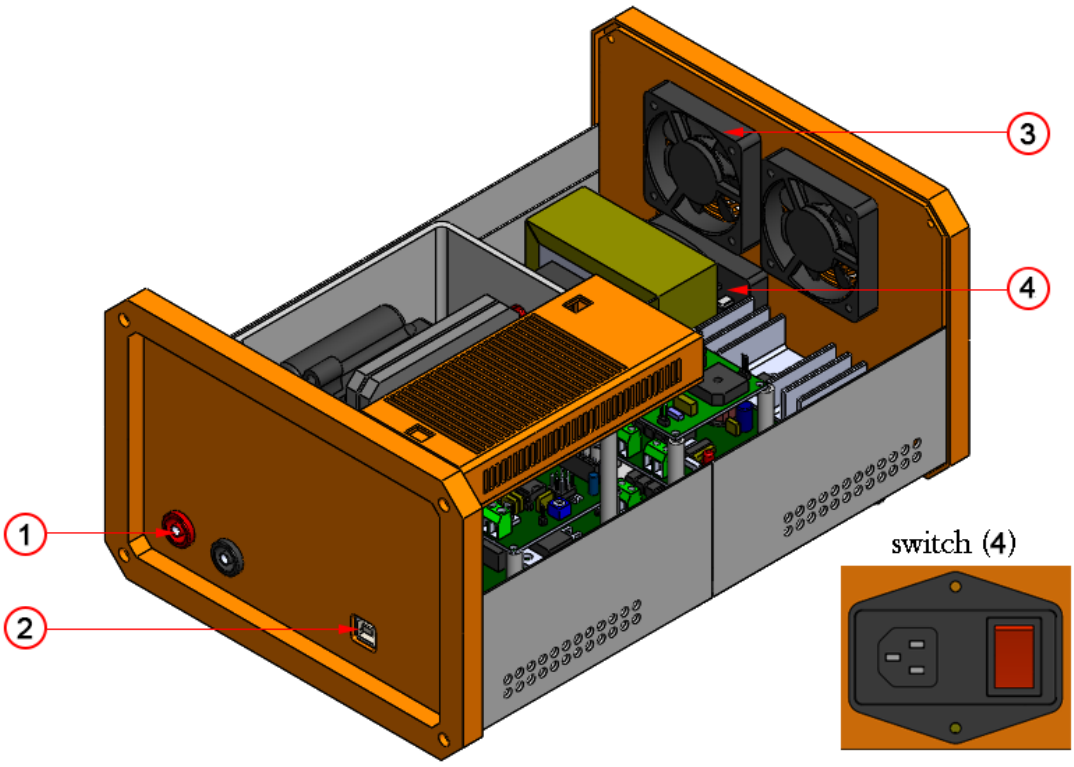
3.5.2.1 การออกแบบการจัดวางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

การจัดวางอุปกรณ์ให้เหมาะสมนั้นช่วยให้การประกอบง่ายยิ่งขึ้น พร้อมทั้งสามารถตรวจสอบความไม่สมบูรณ์ของตำแหน่งการวางได้อีกด้วย โดยภาพที่ 3.20 แสดงการวางตำแหน่งของอุปกรณ์และวงจรอิเล็กทรอนิกส์เพื่อความปลอดภัยและความเหมาะสมต่อการใช้งาน ภาพที่ 3.20 (1) แสดงตำแหน่งกล่องพร้อมหม้อแปลง Flyback ภาพที่ 3.20 (2) แสดงตำแหน่งวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าสำหรับแบ่งแรงดันจากการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงด้วยอัตราส่วน 1:1000 โวลต์ ภาพที่ 3.20 (3) แสดงตำแหน่งหม้อแปลงไฟฟ้า 220 VAC เป็น 18 VAC สำหรับเป็นแหล่งจ่ายไฟให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ภาพที่ 3.20 (4) แสดงตำแหน่งของวงจร Rectification และวงจร Smoothing ในการเริ่มแปลง 18 VAC เป็น 18 VDC ภาพที่ 3.20 (5) แสดงตำแหน่งของวงจร Regulations 18 VDC เป็น 5 VDC และ 12 VDC ภาพที่ 3.20 (6) แสดงตำแหน่งวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาลอก MCP4922 ภาพที่ 3.20 (7) แสดงตำแหน่งของวงจรขยายความต่างศักย์ไฟฟ้าและวงจรขยายกระแสไฟฟ้า ภาพที่ 3.20 (8) แสดงตำแหน่งของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560



ภาพที่ 3.20 การออกแบบการจัดวางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

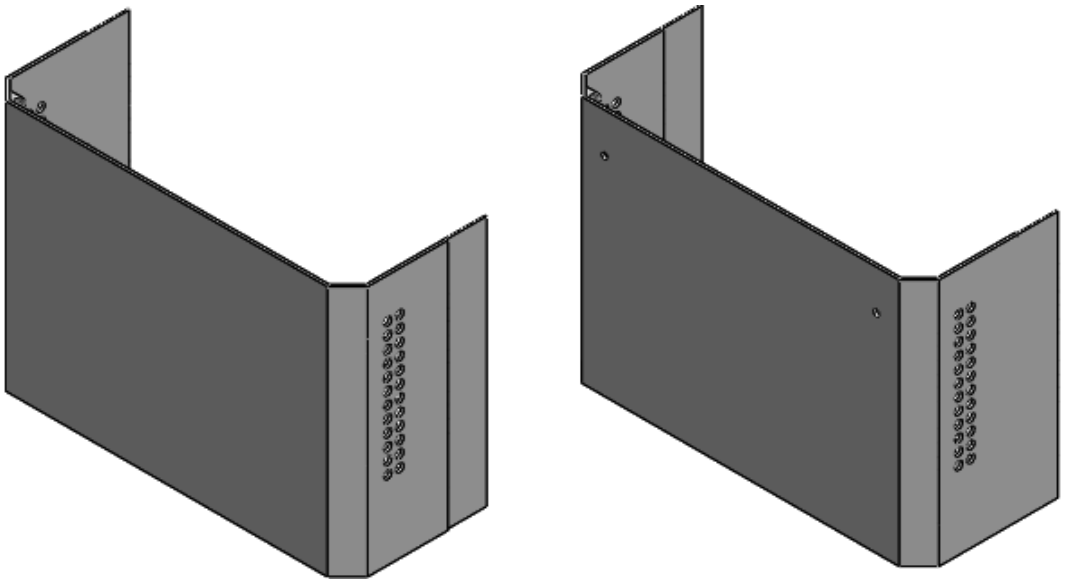
การออกแบบกล่องควบคุมพร้อมจัดวางตำแหน่งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ แสดงตามภาพที่ 2.21 (1) ซึ่งมีช่องเอาต์พุตความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงกระแสต่ำสำหรับเชื่อมต่อเข้ากับระบบจับสารตัวอย่าง ภาพที่ 2.21 (2) แสดงตำแหน่งช่องเชื่อมต่อพอร์ต USB-B โดยเชื่อมต่อระหว่างระบบควบคุมบนคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ควบคุมและวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ภาพที่ 2.21 (3) แสดงตำแหน่งการติดตั้งพัดลมระบายอากาศเพื่อลดความร้อนที่อาจเกิดขึ้นภายในกล่องควบคุม ซึ่งติดตั้ง 2 ตัว และภาพที่ 2.21 (4) แสดงตำแหน่งสวิตซ์ ปิด-เปิด การจ่ายไฟฟ้าเข้าสู่ระบบควบคุมพร้อมกับฟิวส์ไฟฟ้าเพื่อป้องกันการใช้กระแสไฟฟ้าเกินค่าที่กำหนดซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดไฟรั่วหรือการทำงานของระบบควบคุมมีความผิดปกติ



ภาพที่ 3.21 การออกแบบกล่องควบคุมพร้อมทดสอบวางตำแหน่งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

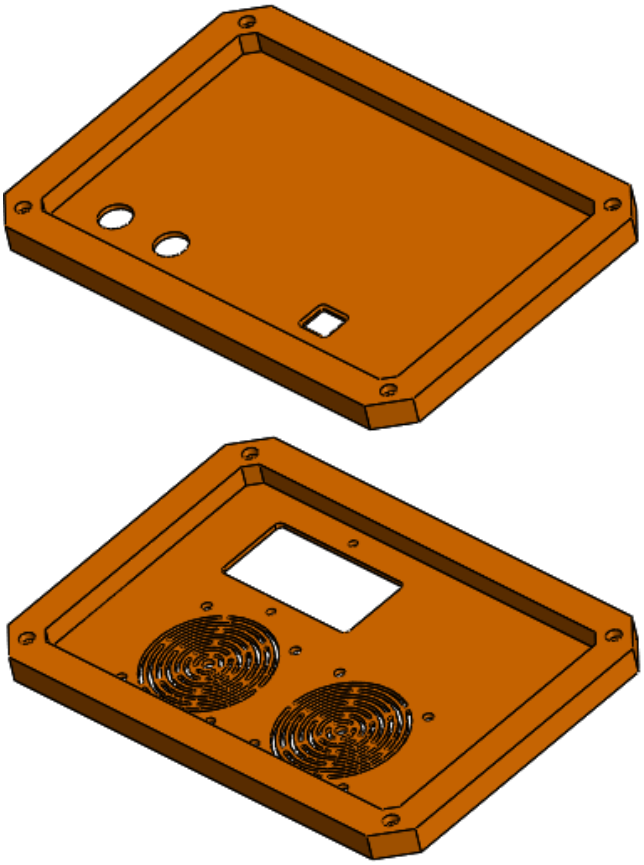
3.5.2.2 การออกแบบชิ้นส่วนกล่องของระบบควบคุม

ชิ้นส่วนกล่องของระบบควบคุมและชิ้นส่วนของอุปกรณ์ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ถูกออกแบบมาเฉพาะซึ่งทำด้วยพลาสติก Polylactic acid (PLA) ด้วยการปริ้นชิ้นส่วนวัสดุหรือเรียกว่า 3D Printing โดยมีจุดหลอมเหลวที่ 173–178 C° และมีคุณสมบัติการต้านทานสนามไฟฟ้าที่ 5.0 MV/cm [14] ซึ่งภาพต่อไปนี้แสดงลักษณะชิ้นส่วนเฉพาะของกล่องควบคุมและอุปกรณ์ภายในวงจรอิเล็กทรอนิกส์

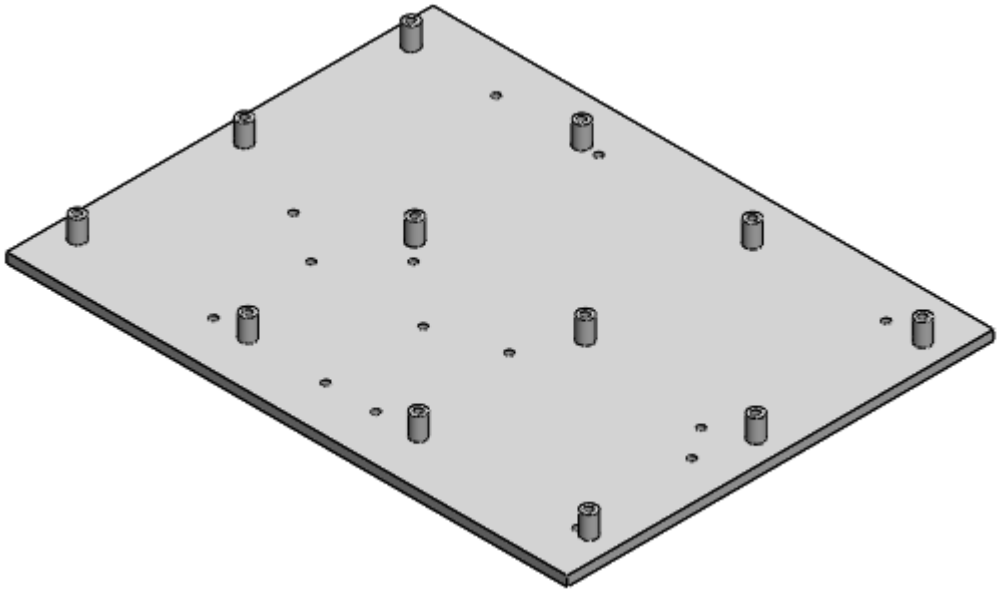


(ก) (ข)

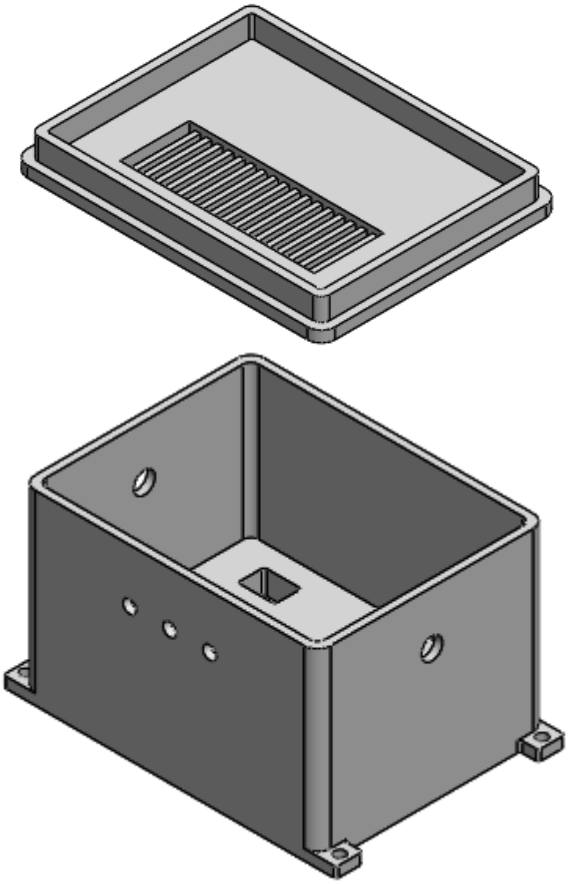
ภาพที่ 3.22 การออกแบบฝากล่องควบคุมพร้อมรูสำหรับอากาศผ่านเพื่อช่วยลดความร้อนภายใน (ก) ฝาด้านบน (ข) ฝาด้านล่าง



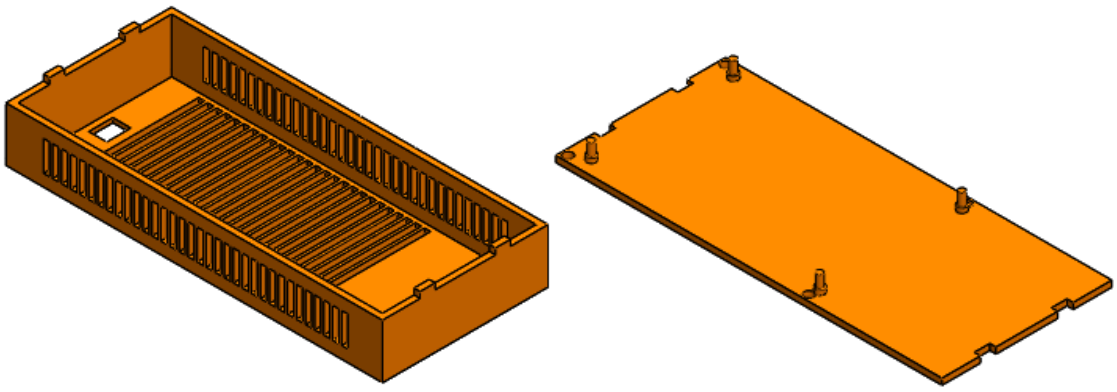
ภาพที่ 3.23 การออกแบบฝาด้านหน้าและด้านหลังของกล่องควบคุม



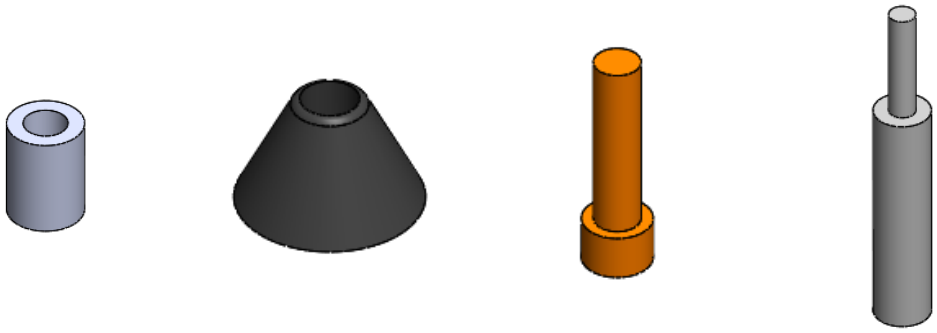
ภาพที่ 3.24 การออกแบบฐานวางตำแหน่งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์



ภาพที่ 3.25 การออกแบบกล่องป้องกันหม้อแปลง Flyback



ภาพที่ 3.26 การออกแบบกล่องป้องกันวงจรแบ่งแรงดัน (Voltage divider) สำหรับวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงกระแสต่ำ

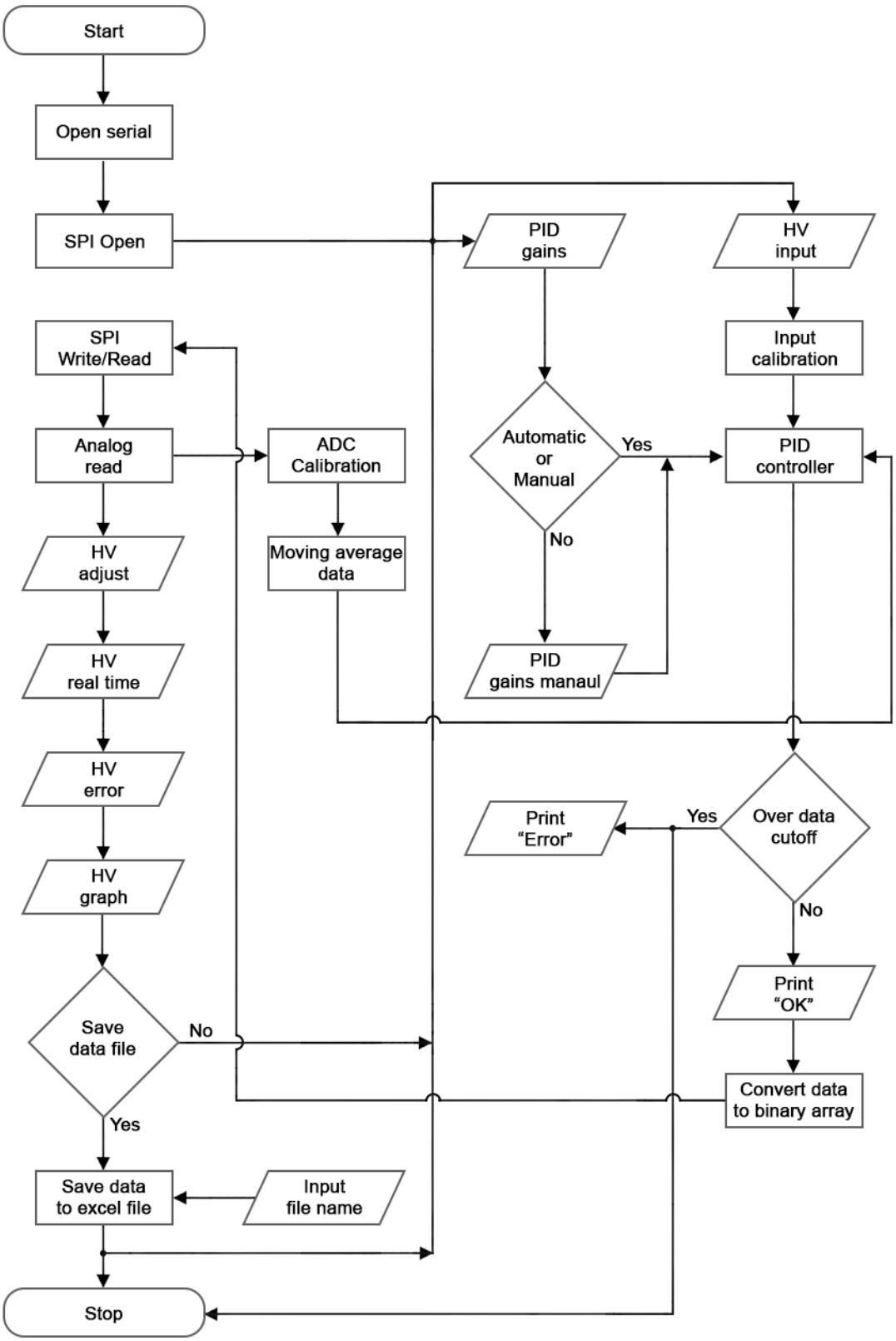


ภาพที่ 3.27 การออกแบบเพิ่มเติมภายในกล่องควบคุม อาทิ ชิ้นส่วนรองบอร์ดอิเล็กทรอนิกส์ ชิ้นส่วนรองพื้นช่วยให้กล่องยึดเกาะกับพื้นได้ดีขึ้น ชิ้นส่วนข้อต่อยึดกล่องวงจรแบ่งแรงดันและชิ้นส่วนยกบอร์ดอิเล็กทรอนิกส์ตามลำดับ

3.5.3 การออกแบบโปรแกรมควบคุม

3.5.3.1 การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อควบคุมการกำเนิดสนามไฟฟ้า

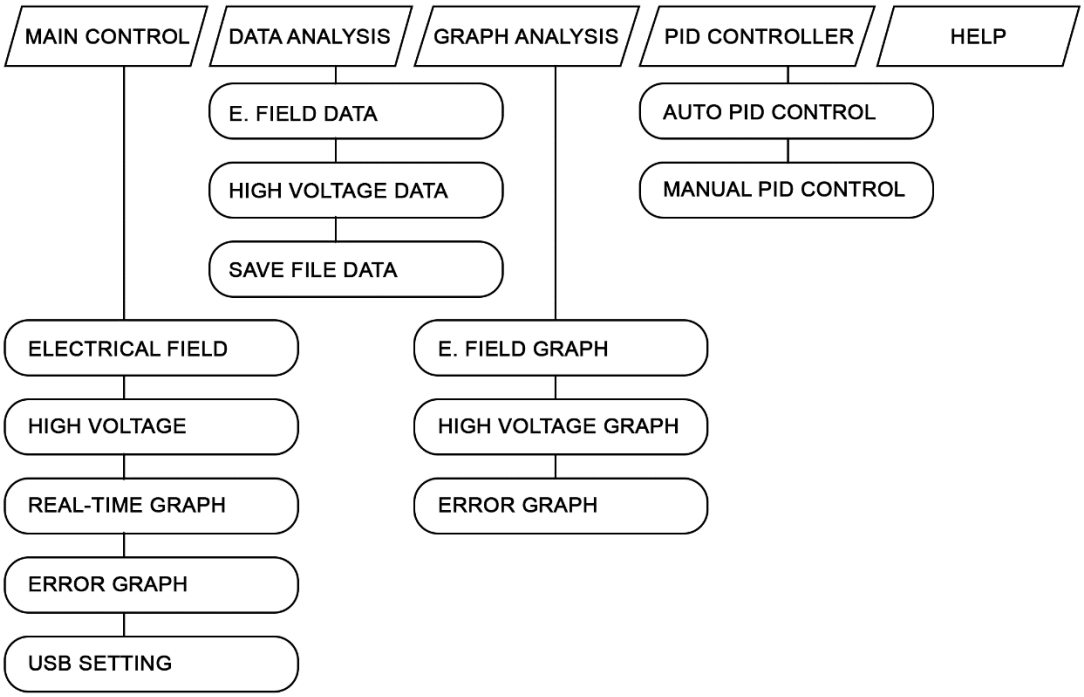
การพัฒนาโปรแกรมควบคุมด้วยซอฟต์แวร์ LabVIEW (Home Edition 2014) ซึ่งใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino MEGA 2560 ในการรับ-ส่งข้อมูล โดยเชื่อมต่อผ่านสาย USB สำหรับการควบคุมแบบ Real-time ซึ่งใช้ควบคุมการส่งค่าสนามไฟฟ้าโดยการแปลงค่าดิจิตอลให้เป็นสัญญาณอนาลอกผ่านช่อง SPI ของบอร์ด Arduino เพื่อสื่อสารกับ IC แปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาลอก MMCP4922 โดยสัญญาณถูกขยายด้วยวงจร Non-Inverting Op-Amp เพื่อเพิ่มระดับของสัญญาณ ซึ่งสัญญาณถูกทำให้มีกระแสที่สูงขึ้นด้วยวงจรขยายกระแส IC LM317 และเชื่อมต่อเข้ากับหม้อแปลง Flyback โดยตามภาพที่ 3.28 แสดงไดอะแกรมการพัฒนาโปรแกรม



ภาพที่ 3.28 ไดอะแกรมการพัฒนาโปรแกรมผ่านซอฟแวร์ LabVIEW Home Edition 2014 เข้ากับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino MEGA 2560

3.5.3.2 การออกแบบหน้าโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับควบคุมการกำเนิดสนามไฟฟ้า

หน้าต่างโปรแกรมควบคุมสำหรับระบบควบคุมการกำเนิดสนามไฟฟ้าความต่างศักย์สูงกระแสต่ำถูกออกแบบให้เหมาะสมกับการใช้งานซึ่งแบ่งหน้าต่างการควบคุมออกเป็น 5 ส่วน คือ Main Control, Data Analysis, Graph Analysis, PID Controller และ Help and About the Controls โดยภาพที่ 3.29 แสดงส่วนประกอบต่าง ๆ ภายในหน้าต่างควบคุมแต่ละตัวซึ่งพัฒนาด้วยการสร้างด้วย Tap Control หรือการสร้างหน้าต่างควบคุมหลายหน้าเพื่อแยกประเภทการควบคุม



ภาพที่ 3.29 ไดอะแกรมแสดงส่วนประกอบภายในหน้าต่างควบคุมการกำเนิดสนามไฟฟ้าความต่างศักย์สูงกระแสต่ำ

บทที่ 4
การเตรียมวงจรอิเล็กทรอนิกส์ของระบบควบคุมและการพัฒนาโปรแกรมการกำเนิดสนามไฟฟ้าความต่างศักย์สูง

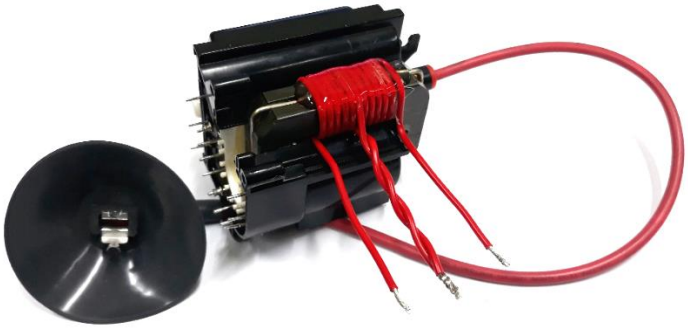
การทดลองกำเนิดสนามไฟฟ้าความต่างศักย์สูงกระแสต่ำเริ่มจากการเตรียมวงจรและอุปกรณ์ให้พร้อมใช้งาน โดยการเตรียมการทดลองแบ่งออกเป็น การเตรียมวงจรของระบบควบคุมการกำเนิดศักย์ไฟฟ้าสูงและการเตรียมการพัฒนาโปรแกรมควบคุมการกำเนิดสนามไฟฟ้า นอกจากนี้ยังได้กล่าวถึงการเตรียมการประกอบระบบควบคุมด้วยการเตรียมแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์และการเตรียมระบบจับสารตัวอย่างและระบบควบคุมซึ่งจะได้กล่าวถึงเป็นลำดับถัดไป

4.1 การเตรียมวงจรควบคุมการกำเนิดสนามไฟฟ้าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูง

สำหรับวงจรของระบบควบคุมการกำเนิดสนามไฟฟ้าความต่างศักย์สูงมีด้วยกัน 3 ส่วน โดยส่วนแรกเป็นส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้าความต่างศักย์สูง ส่วนที่ 2 เป็นวงจรที่ใช้สำหรับควบคุมและกำเนิดสนามไฟฟ้าและส่วนที่ 3 เป็นวงจรสำหรับการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงที่เกิดขึ้น โดยแต่ละส่วนได้อธิบายถึงวิธีการทดลอง

4.1.1 การเตรียมวงจรหม้อแปลงไฟฟ้าความต่างศักย์สูง

การเตรียมหม้อแปลงสำหรับการกำเนิดความศักย์ไฟฟ้าสูงซึ่งทำได้โดยนำสายไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติในการนำกระแสไฟฟ้าได้ดีมาพันรอบแกนปฐมภูมิจำนวน 5 รอบ ทั้งหมดสองเส้นและทิศทางเดียวกัน ดังแสดงตามภาพที่ 4.1 เนื่องจากเป็นการสร้างการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กบนแกนหม้อแปลงด้วยไฟฟ้ากระแสตรง

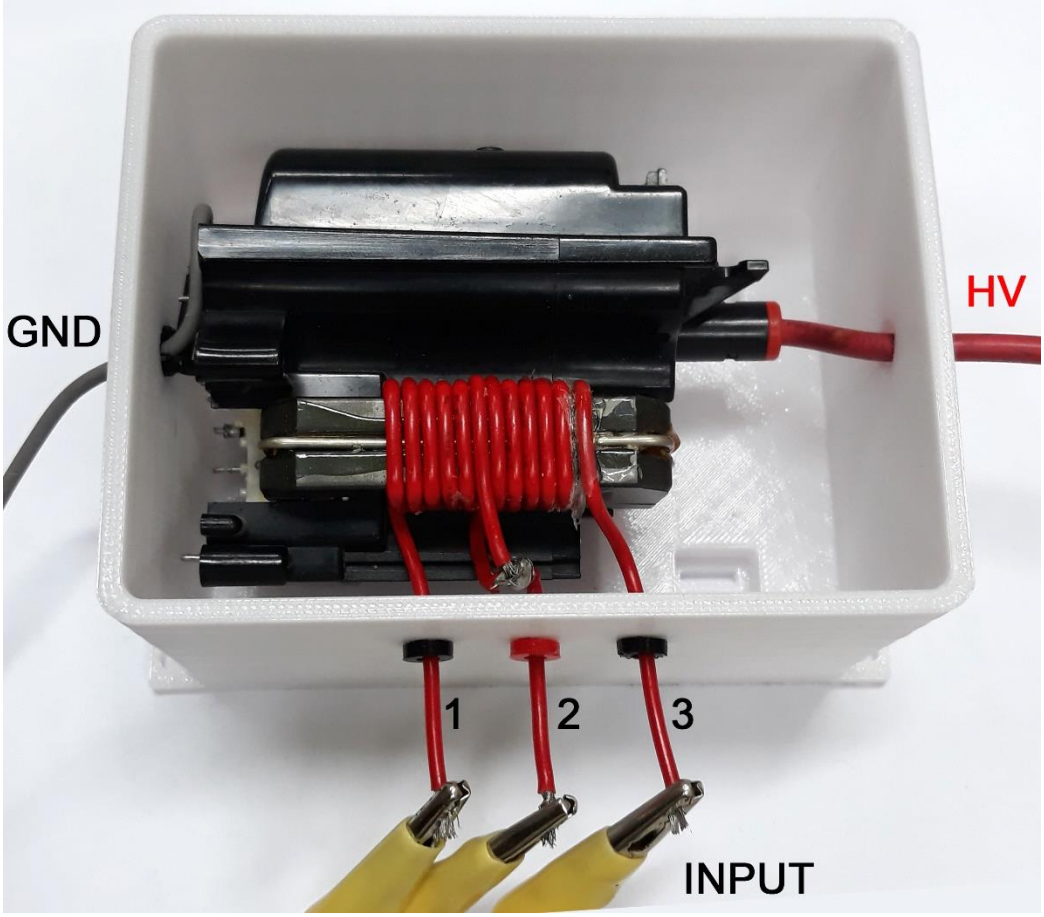


ภาพที่ 4.1 การพันหม้อแปลง Flyback สำหรับการสร้างการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กบนแกนหม้อแปลงด้วยไฟฟ้ากระแสตรง

การทดลองเพื่อทดสอบการทำงานของสวิตช์เหนี่ยวนำแม่เหล็กของหม้อแปลง Flyback แบ่งออกเป็น 2 การทดลองดังนี้

4.1.1.1 การทดลองเพื่อทดสอบการทำงานของวงจรสวิตช์เหนี่ยวนำ โดยต่อ Flyback กับวงจรสวิตช์กระแสไฟฟ้า จากนั้นจ่ายไฟฟ้าที่ระดับความต่างศักย์ไฟฟ้า 5 โวลต์ให้กับวงจรสวิตช์กระแสไฟฟ้าด้วย Power supply (Agilent) จากนั้นตรวจวัดสัญญาณที่ขดลวดทั้งสองบนหม้อแปลง Flyback ด้วย Oscilloscope เพื่อศึกษาสัญญาณการเหนี่ยวนำแม่เหล็กบนแกนของหม้อแปลง แสดงวงจรตามภาพที่ 4.2 ซึ่งแสดงถึงการเตรียมทดสอบหม้อแปลง

4.1.1.2 การทดลองเพื่อทดสอบการเหนี่ยวนำของหม้อแปลง Flyback โดยต่อ Flyback กับวงจรสวิตช์กระแสไฟฟ้า จากนั้นปรับระดับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้กับวงจรสวิตช์กระแสไฟฟ้าด้วย Power supply ในช่วง 0–5 โวลต์ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำกับความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงซึ่งวัดด้วย High voltage probe แสดงวงจรตามภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.2 การเตรียมวงจรสำหรับการทดสอบการทำงานของหม้อแปลง Flyback พร้อมอ่านค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าด้วย High voltage probe ที่ต่อเข้ากับ Agilent Multimeter

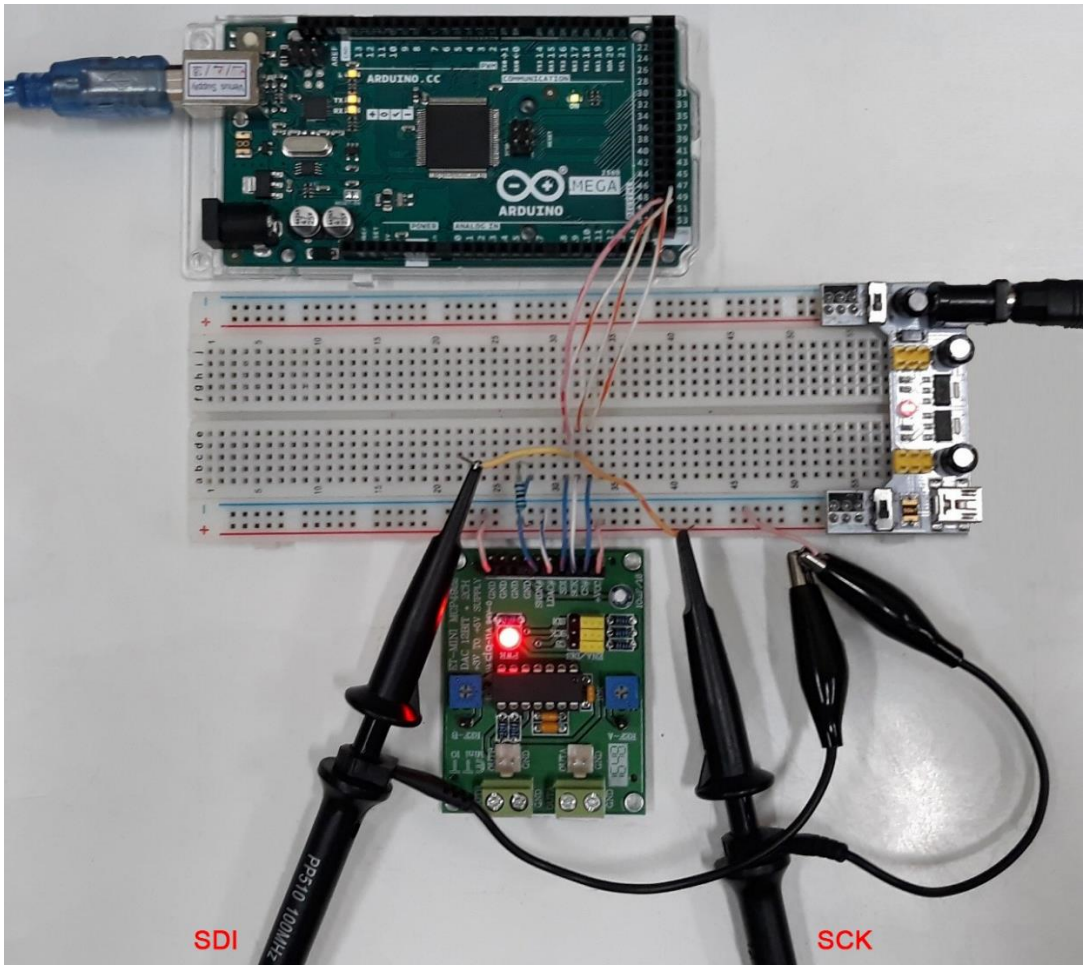
4.1.2 การเตรียมวงจรควบคุมการกำเนิดสนามไฟฟ้าความต่างศักย์สูง

4.1.2.1 การเตรียมวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณอนาลอก

การเตรียมวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณอนาลอกแสดงวงจรตามภาพที่ 4.3 โดยการทดลองสำหรับการแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาลอกมี 2 การทดลองดังนี้

1) การทดลองเพื่อทดสอบการแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาลอก โดยต่อวงจรตามภาพที่ 3.4 ซึ่งจับสัญญาณนาฬิกาที่ขา SCK และสัญญาณดิจิตอลที่ขา MOSI ที่ส่งจากซอฟต์แวร์บนคอมพิวเตอร์ผ่านบอร์ด Arduino ด้วย Oscilloscope พร้อมกับวัดค่า Output สัญญาณอนาลอกเพื่อศึกษาและเปรียบเทียบการส่งข้อมูลของการแปลงสัญญาณ

2) การทดลองเพื่อปรับเทียบค่าดิจิตอลกับสัญญาณอนาลอก ด้วยการส่งค่าดิจิตอลจากซอฟต์แวร์บนคอมพิวเตอร์ผ่านบอร์ด Arduino พร้อมกับวัดสัญญาณอนาลอกด้วย Agilent multimeter เพื่อสร้างกราฟปรับเทียบระหว่างค่าดิจิตอลและสัญญาณอนาลอก



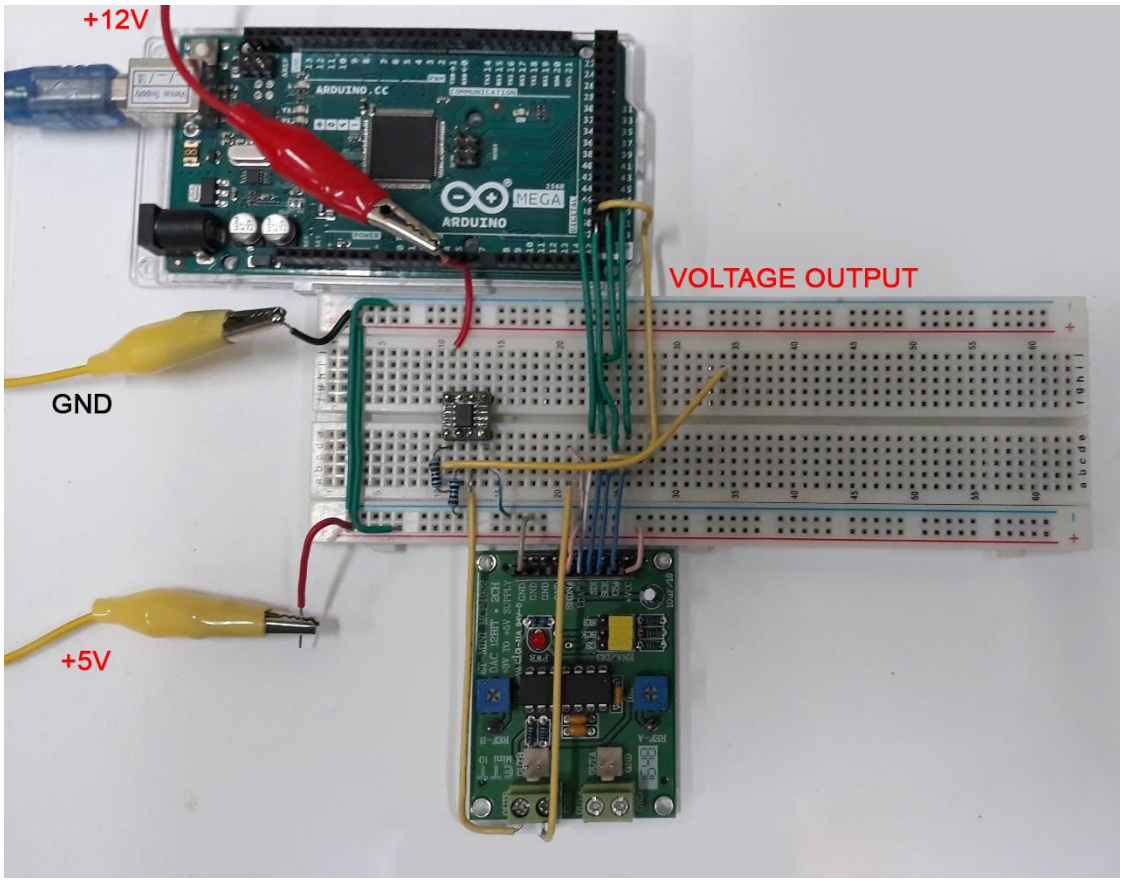
ภาพที่ 4.3 การเตรียมวงจรสำหรับการทดลองแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณอนาลอกด้วยวงจรรวม MCP4922 พร้อมวัดสัญญาณด้วย Oscilloscope

4.1.2.2 การเตรียมวงจรแปลงระดับความต่างศักย์ไฟฟ้า

การเตรียมวงจรแปลงระดับความต่างศักย์ไฟฟ้าเอาต์พุตจากสัญญาณอนาลอก แสดงวงจรตามภาพที่ 4.4 ซึ่งเป็นวงจรสำหรับขยายสัญญาณขึ้นเป็น 2 เท่าของสัญญาณขาอินพุต โดยการทดลองสำหรับการแปลงระดับความต่างศักย์ไฟฟ้ามี 2 การทดลองดังนี้

1) การทดลองเพื่อทดสอบการปรับเทียบค่าดิจิตอลกับความต่างศักย์ไฟฟ้า Output (5 โวลต์) เพื่อสร้างกราฟปรับเทียบระหว่างค่าดิจิตอลและความต่างศักย์ไฟฟ้า Output

2) การทดลองเพื่อทดสอบการปรับเทียบค่าดิจิตอลกับความต่างศักย์ไฟฟ้า Output (10 โวลต์) จากการต่อวงจรขา Output เข้ากับวงจรขยายความต่างศักย์ซึ่งวัดความต่างศักย์ด้วย Agilent multimeter เพื่อสร้างกราฟปรับเทียบระหว่างค่าดิจิตอลและความต่างศักย์ไฟฟ้า Output ที่ระดับ 10 โวลต์



ภาพที่ 4.4 การเตรียมวงจรสำหรับการทดลองแปลงระดับของความต่างศักย์ไฟฟ้า โดยขยายขึ้นเป็น 2 เท่าพร้อมวัดสัญญาณปรับเทียบเทียบความถูกต้องกับ Agilent Multimeter

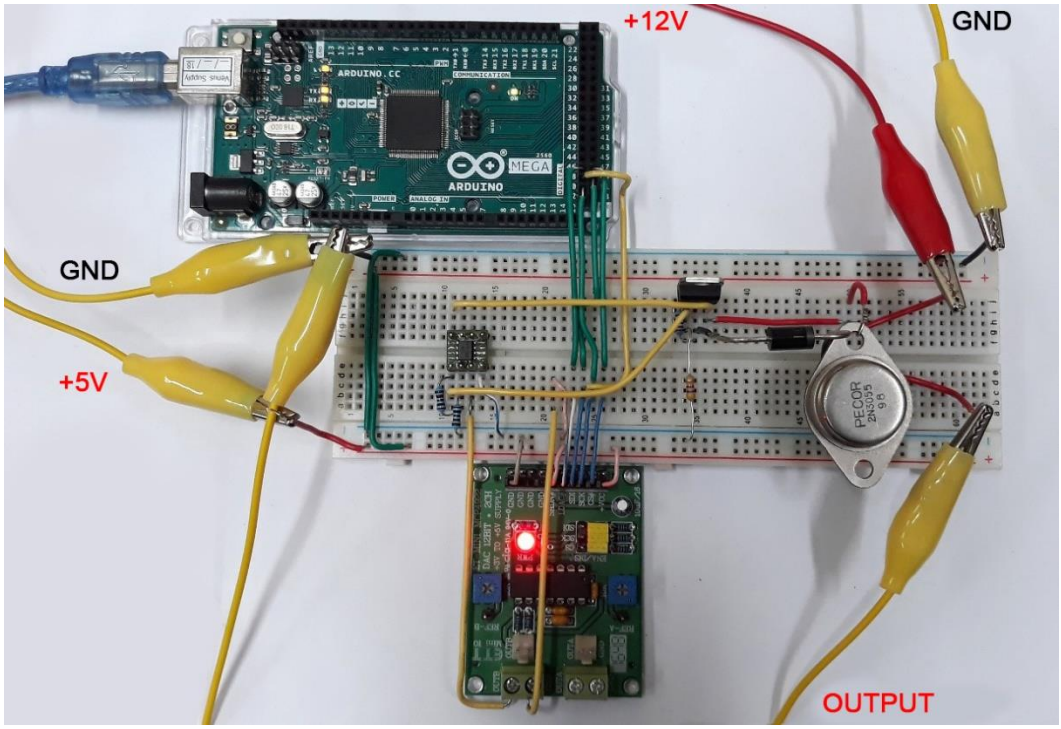
4.1.2.3 การเตรียมวงจรแปลงระดับกระแสไฟฟ้า

การแปลงระดับกระแสไฟฟ้าทำได้โดยต่อขา Output จากวงจรแปลงระดับความต่างศักย์ไฟฟ้าเข้ากับ LM317 แสดงดังวงจรตามภาพที่ 4.5 ซึ่งความต่างศักย์สามารถควบคุมการกระแสที่ออกจาก LM317 โดยกระแสสูงสุดของไอซีที่ Output ได้อยู่ที่ 1.5 แอมแปร์ ซึ่งการทดลองสำหรับการแปลงระดับกระแสไฟฟ้ามี 3 การทดลองดังนี้

1) การทดลองเพื่อทดสอบการปรับเทียบความถูกต้องของค่าดิจิตอลกับความต่างศักย์ไฟฟ้า Output จากการปรับระดับกระแสไฟฟ้าด้วย Agilent multimeter เพื่อสร้างกราฟปรับเทียบระหว่างค่าดิจิตอลและความต่างศักย์ไฟฟ้า Output

2) การทดลองเพื่อทดสอบการปรับเทียบความถูกต้องของความต่างศักย์ Input ให้กับวงจรกับความต่างศักย์ไฟฟ้า Output จากการปรับระดับกระแสไฟฟ้าด้วย Agilent multimeter เพื่อสร้างกราฟปรับเทียบระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้า Input และความต่างศักย์ไฟฟ้า Output ของการเปลี่ยนระดับกระแสไฟฟ้า

3) การทดลองเพื่อทดสอบการกำเนิดสนามไฟฟ้าด้วยการต่อวงจรเข้ากับ Flyback โดยเปรียบเทียบความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้กับ Flyback และความต่างศักย์ไฟฟ้าจาก Flyback เพื่อศึกษาความสัมพันธ์การกำเนิดสนามไฟฟ้า



ภาพที่ 4.5 การเตรียมวงจรสำหรับการทดลองแปลงระดับของกระแสไฟฟ้าโดยขยายขึ้นจากเดิมเป็น 1.5 แอมแปร์

4.1.3 การเตรียมวงจรวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าสูง

4.1.3.1 การเตรียมการปรับเทียบในการรับค่าอนาลอกของความศักย์ไฟฟ้าสูง

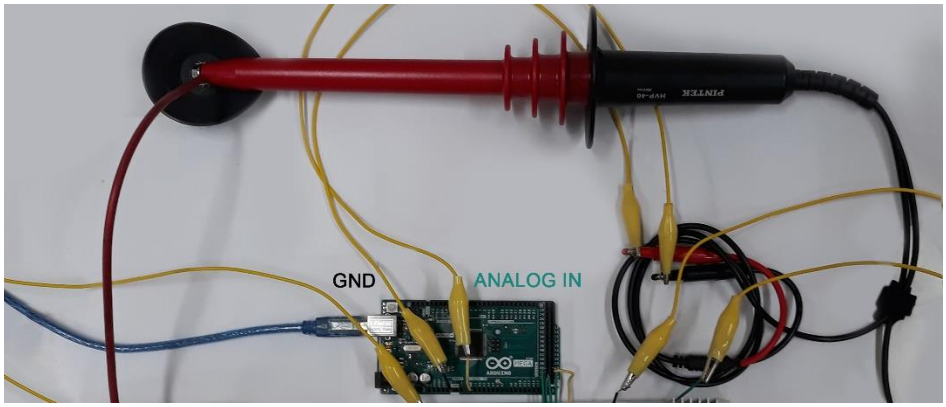
การปรับเทียบความถูกต้องในการรับค่าอนาลอกของสัญญาณความศักย์ไฟฟ้าสูงเป็นการปรับเปรียบความถูกต้องเทียบกับ Digital multimeter ยี่ห้อ Agilent รุ่น 34405A โดยใช้ช่องแปลงค่าสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอลภายในของบอร์ด Arduino MEGA 2560 ซึ่งมีความละเอียดในการแปลงสัญญาณอยู่ที่ 10 bit แสดงดังภาพที่ 4.6 โดยการทดลองสำหรับการปรับเทียบความถูกต้องในการรับค่าอนาลอกมี 4 การทดลองดังนี้

1) การทดลองเพื่อทดสอบการปรับเทียบความถูกต้องของค่าอนาลอกกับค่าดิจิตอลของความต่างศักย์ไฟฟ้า input จากการปรับความต่างศักย์ไฟฟ้าผ่านโปรแกรมบนคอมพิวเตอร์ เพื่อสร้างกราฟปรับเทียบระหว่างค่าอนาลอกและค่าดิจิตอลของความต่างศักย์ไฟฟ้า input ซึ่งปรับเทียบที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าไม่เกิน 5 โวลต์

2) การทดลองเพื่อทดสอบการปรับเทียบความถูกต้องของค่าอนาลอกกับค่าดิจิตอลของความต่างศักย์ไฟฟ้า input จากการปรับความต่างศักย์ไฟฟ้าผ่านโปรแกรมบนคอมพิวเตอร์ เพื่อสร้างกราฟปรับเทียบระหว่างค่าอนาลอกและค่าดิจิตอลของความต่างศักย์ไฟฟ้า input ซึ่งปรับเทียบที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าไม่เกิน 10 โวลต์

3) การทดลองเพื่อทดสอบการปรับเทียบความถูกต้องในการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอลของความต่างศักย์ไฟฟ้ากับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดค่าได้จาก Digital multimeter ยี่ห้อ Agilent รุ่น 34405A เพื่อศึกษาความผิดพลาดของข้อมูลและนำไปปรับแก้ในโปรแกรมเพื่อความถูกต้องและผิดพลาดน้อยที่สุด

4) การทดลองควบคุมการกำเนิดสนามไฟฟ้าเป็นการศึกษาความสัมพันธ์ของความต่างศักย์ไฟฟ้า Input และความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงที่เกิดขึ้น ซึ่งวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าด้วย High voltage probe ที่ต่อเข้ากับตัวแปลงสัญญาณ ADC ภายในบอร์ดไมโครคอนโทรเลอร์



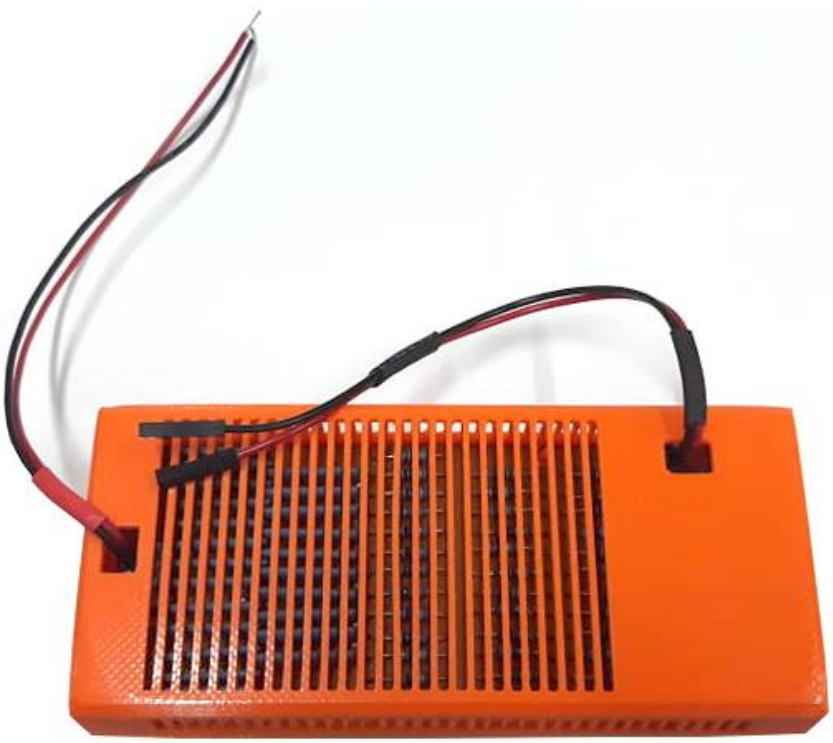
ภาพที่ 4.6 การเตรียมวงจรสำหรับการปรับเทียบการรับค่าอนาลอกของความศักย์ไฟฟ้าสูง

4.1.3.2 การเตรียมวงจรแบ่งแรงดันสำหรับวัดความศักย์ไฟฟ้าสูง

การปรับเทียบความถูกต้องของวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าความต่างศักย์สูง ซึ่งเป็นสัญญาณอนาลอกซึ่งเป็นสัญญาณอนาลอกของความศักย์ไฟฟ้าสูงและเป็นการปรับเปรียบความถูกต้องเทียบกับ Digital multimeter ยี่ห้อ Agilent รุ่น 34405A โดยใช้ช่องแปลงค่าสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอลภายในของบอร์ด Arduino MEGA 2560 ซึ่งมีความละเอียดในการแปลงสัญญาณอยู่ที่ 10 bit แสดงดังภาพที่ 4.7 โดยการทดลองสำหรับการปรับเทียบความถูกต้องในการรับค่าอนาลอกมี 2 การทดลองดังนี้

1) การทดลองเพื่อทดสอบการปรับเทียบความถูกต้องในการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอลของวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าความต่างศักย์สูง ซึ่งปรับเทียบความต่างศักย์ไฟฟ้าจากการแปลงสัญญาณของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์กับความต่างศักย์ไฟฟ้าจาก Digital multimeter ยี่ห้อ Agilent รุ่น 34405A เพื่อศึกษาความผิดพลาดของข้อมูลและนำไปปรับแก้ในโปรแกรมเพื่อความถูกต้องและผิดพลาดน้อยที่สุด

2) การทดลองควบคุมการกำเนิดสนามไฟฟ้าเป็นการศึกษาความสัมพันธ์ของความต่างศักย์ไฟฟ้า Input และความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงที่เกิดขึ้น ซึ่งวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าด้วย High voltage probe ที่ต่อเข้ากับตัวแปลงสัญญาณ ADC ภายในบอร์ดไมโครคอนโทรเลอร์



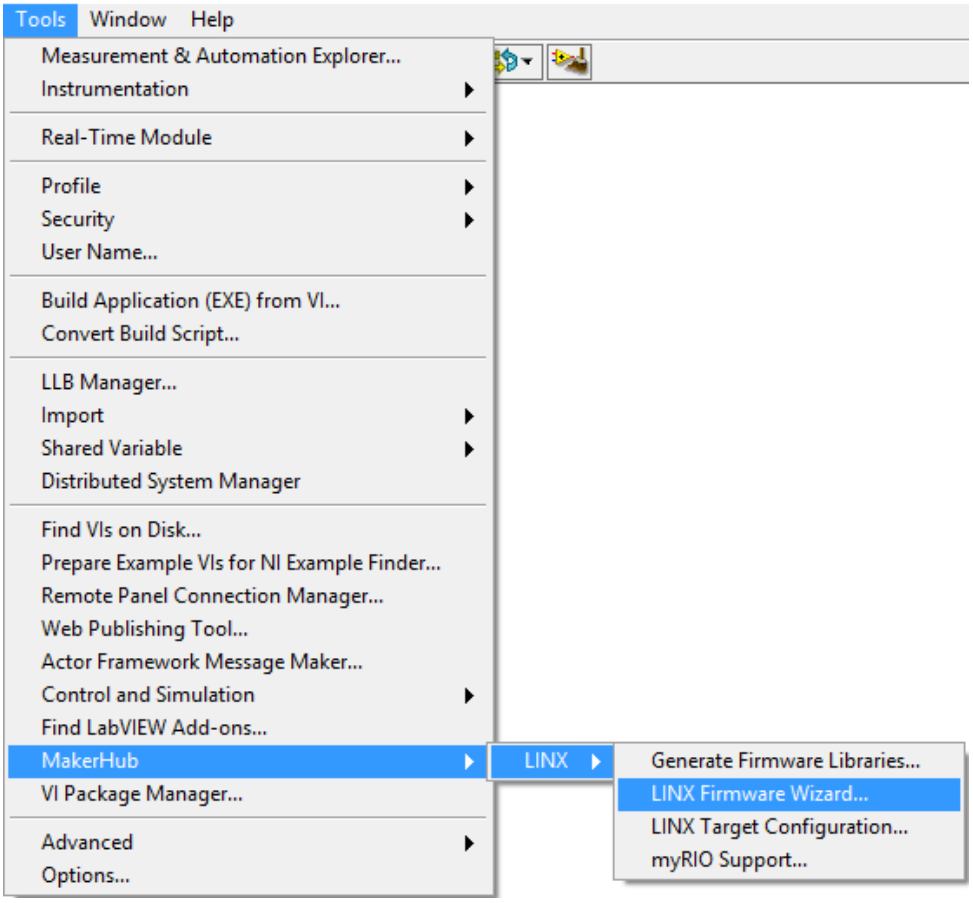
ภาพที่ 4.7 การเตรียมวงจรสำหรับการปรับเทียบความถูกต้องของวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าในการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูง

4.2 การพัฒนาโปรแกรมควบคุมการกำเนิดสนามไฟฟ้าความต่างศักย์สูง

การพัฒนาโปแกรมควบคุมการกำเนิดสนามไฟฟ้าความต่างศักย์สูงประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนการโปรแกรมควบคุมการเชื่อมต่อสื่อสารเพื่อรับ-ส่งข้อมูลระหว่างซอฟแวร์ LabVIEW และบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งได้ใช้บอร์ด Arduino Mega 2560 ในการเชื่อมต่อ และส่วนการพัฒนาโปรแกรมควบคุมสนามไฟฟ้า โดยเป็นส่วนสำหรับรับค่าข้อมูล ส่วนเก็บข้อมูล ส่วนควบคุมการแสดงผลและส่วนการประมวลผลโปรแกรม

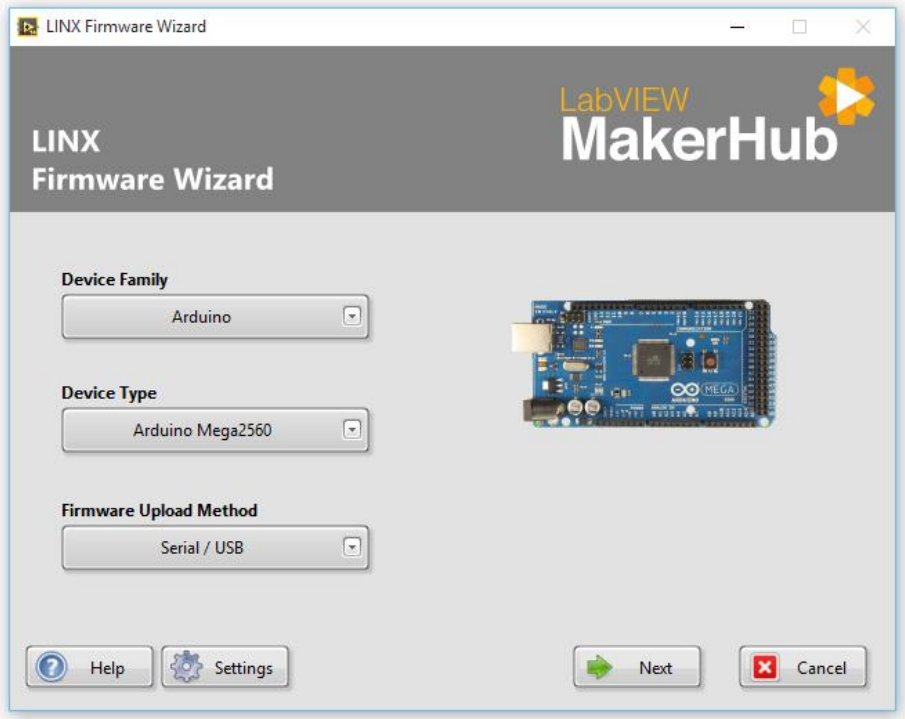
4.2.1 การพัฒนาโปรแกรมเชื่อมต่อ LabVIEW กับ Arduino

การสื่อสารผ่านบอร์ดไมโครคอนโทรเลอร์ของซอฟต์แวร์ LabVIEW ด้วยการสื่อสารด้วย LINX ฟังก์ชัน โดยการทดสอบการเชื่อมต่อสามารถทำได้ด้วยการตรวจสอบการรับ-ส่งข้อมูลพื้นฐาน ซึ่งตรวจสอบได้ด้วยการเชื่อมต่อบอร์ด Arduino กับซอฟต์แวร์ LabVIEW บนคอมพิวเตอร์ด้วย USB Serial Port จากนั้นไปที่ Tools และไปที่ MakerHub >LINX >LINX Firmware Wizard บนแถบเมนูบาร์แสดงตามภาพที่ 4.8 ซึ่งสามารถตรวจสอบได้ทั้งบนหน้าต่าง Front Panel และบนหน้าต่าง Block Diagram ของซอฟต์แวร์ LabVIEW

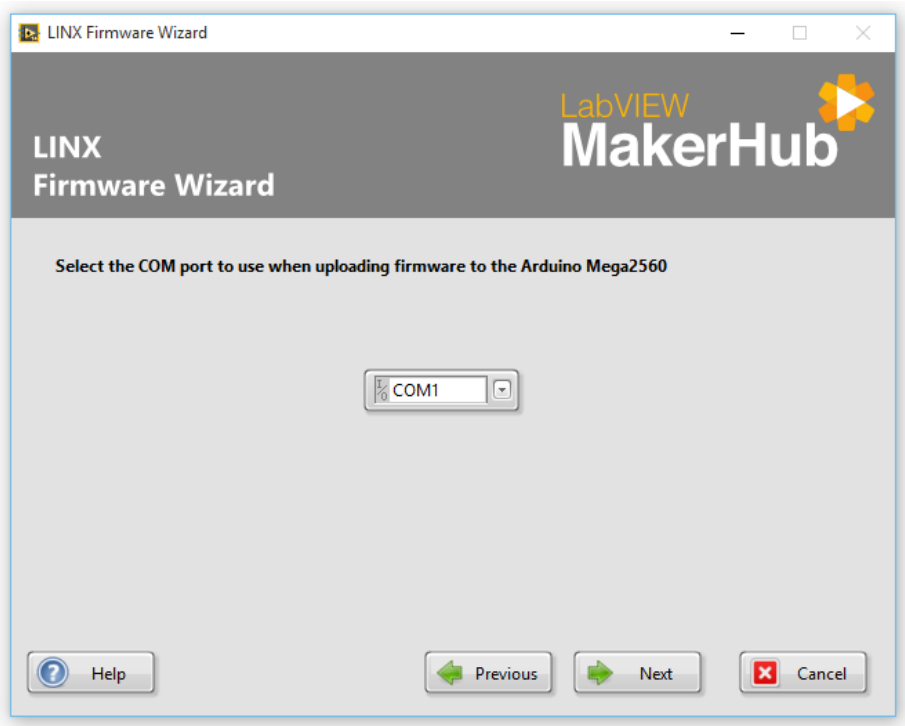


ภาพที่ 4.8 การตรวจสอบการเชื่อมต่อของบอร์ดควบคุมและซอฟต์แวร์ LabVIEW

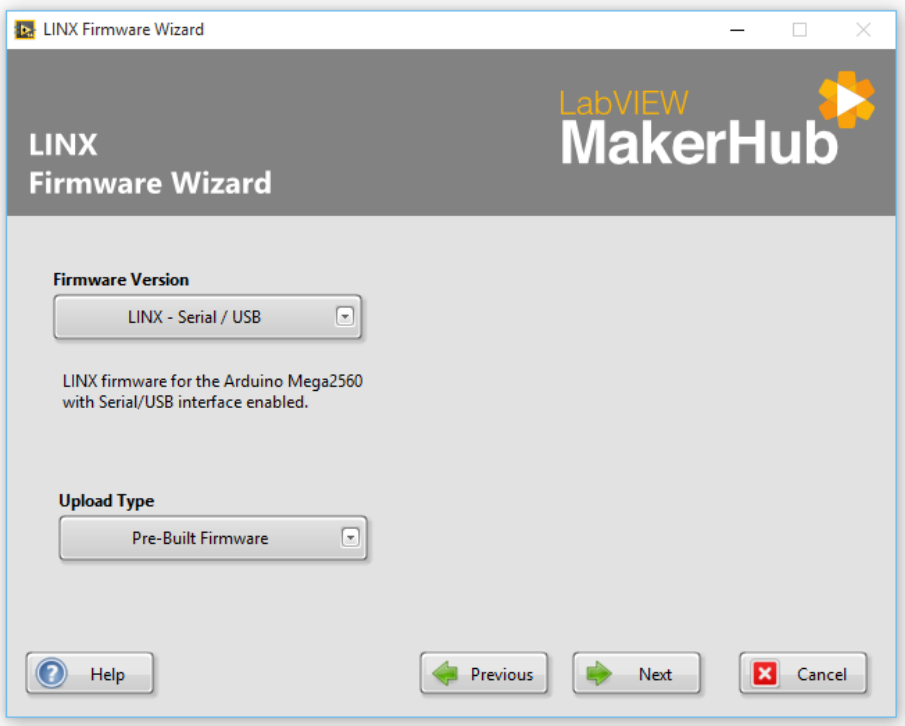
เมื่อเข้าไปที่ LINX Firmware Wizard จะแสดงหน้าต่างตามภาพที่ 4.9 โดยเป็นหน้าต่างการตั้งค่าการเชื่อมต่อระหว่างบอร์ดควบคุมและซอฟต์แวร์ LabVIEW ซึ่ง LINX Firmware Wizard สามารถใช้งานได้หลายบอร์ด โดยการตั้งค่า Device Family เป็นการเลือกตระกูลของบอร์ดควบคุม Device Type เป็นการเลือกชนิดของบอร์ดควบคุมและ Firmware Upload Method เป็นการเลือกวิธีในการอัพโหลดข้อมูลสู่บอร์ดควบคุม ซึ่งเมื่อตั้งค่าเสร็จสิ้นให้กด Next โดยภาพที่ 4.10 แสดงหน้าต่างถัดมาซึ่งใช้สำหรับตั้งค่า Serial Port (COM Port) โดยสามารถตรวจสอบ Port การเชื่อมต่อได้ที่ Device Manager และถ้าซอฟต์แวร์หา COM Port ไม่เจอ ให้ติดตั้ง NI-VISA ใหม่อีกครั้ง เมื่อตั้งค่าเสร็จสิ้นให้กด Next จากนั้นซอฟต์แวร์จะแสดงหน้าต่างตามภาพที่ 4.11 ซึ่งเป็นหน้าต่างการตั้งค่ารูปแบบในการพัฒนาโปรแกรมควบคุมโดยมี 2 รูปแบบ คือ การพัฒนาบนซอฟต์แวร์ LabVIEW โดยตรงและการพัฒนาบน Arduino IDE ร่วมกับ ซอฟต์แวร์ LabVIEW ซึ่งเป็นวิธีแบบเดิมและทำให้ยากสำหรับการพัฒนา เมื่อตั้งค่าเสร็จสิ้นให้กด Next จากนั้น LINX Firmware Wizard ทำการอัพโหลดและเมื่อเสร็จสิ้นการตั้งค่าหน้าต่างแสดงตามภาพที่ 4.12 โดยการตั้งค่านี้เป็นเพียงการตั้งค่าการเชื่อมต่อเพื่อให้การอัพโหลดข้อมูลสู่บอร์ดควบคุมถูกต้องเท่านั้น ข้อมูลที่พัฒนายังไม่ได้ถูกรับ-ส่งไปที่บอร์ดควบคุม ซึ่งการอัพโหลดข้อมูลจะสมบูรณ์ก็ต่อเมื่อมีการ Run โปรแกรมบนซอฟต์แวร์ LabVIEW โดยขั้นแรกสามารถทดสอบการควบคุม LED จากโปรแกรมสำเร็จรูปของ LINX Firmware Wizard ด้วยการเลือกที่ Launch Example



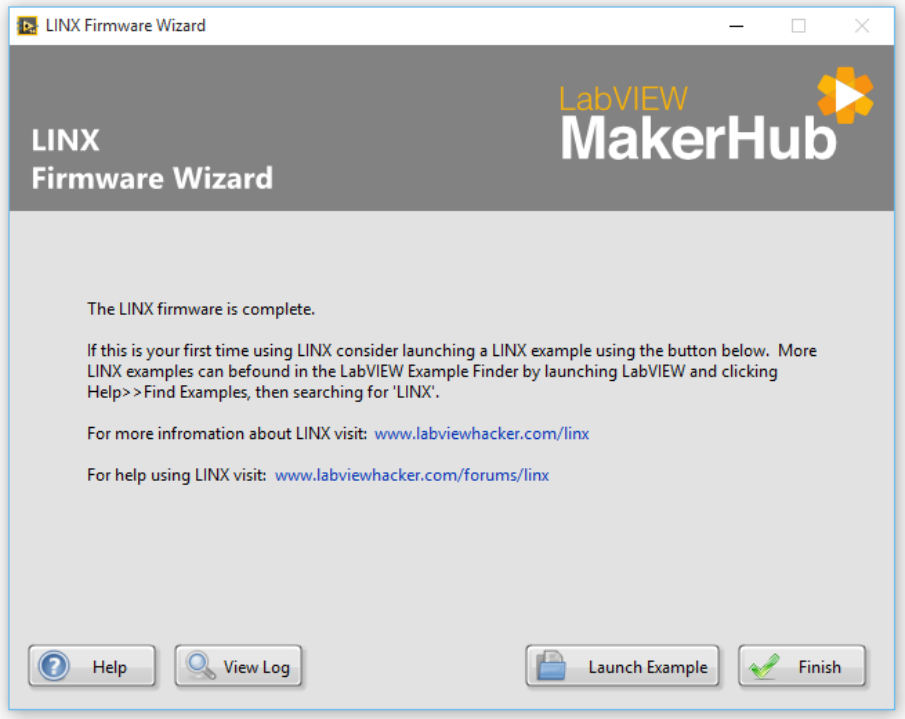
ภาพที่ 4.9 การตั้งค่าการเชื่อมต่อของบอร์ดควบคุมและซอฟต์แวร์ LabVIEW



ภาพที่ 4.10 การตั้งค่าใช้งานพอร์ตอนุกรมสำหรับเชื่อมต่อกับของบอร์ดควบคุม



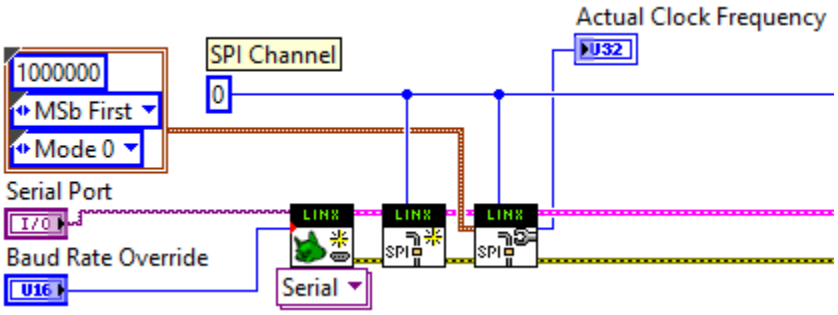
ภาพที่ 4.11 การตั้งค่ารูปแบบการพัฒนาโปรแกรมควบคุมสำหรับเชื่อมต่อกับของบอร์ดควบคุม



ภาพที่ 4.12 หน้าต่างแสดงการเชื่อมต่อที่สมบูรณ์ของบอร์ดควบคุมและซอฟต์แวร์ LabVIEW

4.2.2 การพัฒนาโปรแกรมเชื่อมต่อระบบควบคุมกับวงจรแปลงสัญญาณ MCP4922

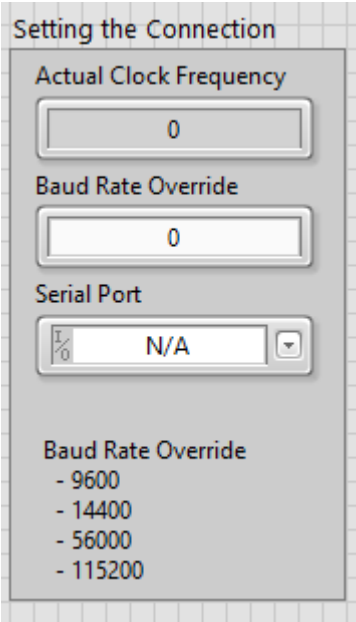
การพัฒนาโปรแกรมเชื่อมต่อเพื่อควบคุมผ่านคอมพิวเตอร์นั้นจำเป็นต้องแปลงข้อมูลให้อยู่ในรูปสัญญาณอนาลอกก่อน ซึ่งพิจารณาตามภาพที่ 4.13 (ก) แสดงการพัฒนาโปรแกรมด้วยซอฟต์แวร์ LabVIEW บนหน้าต่าง Block Diagram สำหรับการเริ่มต้นเชื่อมต่อสื่อสารกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560 โดยโปรแกรมแรกเป็นการเลือกรูปแบบการสื่อสารซึ่งมีการกำหนด Serial Port และ Baud Rate ในการสื่อสารและส่วนสำหรับการกำหนดรูปแบบสื่อสารแบบ SPI โดยมีการตั้งค่า SPI Configuration ที่มีการตั้งค่าความถี่ของสัญญาณนาฬิกา (Clock Frequency) ในการสื่อสารกันที่ 100000 (ข้อมูลประเภท 32-bit Integer) มีการกำหนด Bit order สำหรับการส่งข้อมูลแรกไปก่อน (Most Significant Bit First, MSb First) หรือส่งข้อมูลสุดท้ายไปก่อน (Last Significant Bit First, LSb First) และมีการกำหนด SPI Mode ซึ่งเป็นการตั้งค่ารูปแบบในการส่งสัญญาณ โดยแต่ละโหมดการอ่านค่าสัญญาณหรือลอจิกจะอ่านค่าที่ขอบขาขึ้น-ลงที่แตกต่างกัน ส่วนภาพที่ 4.13 (ข) เป็นการหยุดการเชื่อมต่อสื่อสารกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560 ซึ่งต้องมีการเชื่อมต่อทุกครั้งเพื่อเป็นการออกจากการเชื่อมต่อ ส่วนการพัฒนาโปรแกรมด้วยซอฟต์แวร์ LabVIEW บนหน้าต่าง Control Panel นั้นแสดงตามภาพที่ 3.14 ซึ่งมีไว้สำหรับรับข้อมูลการตั้งค่า Serial Port กับ Baud Rate และแสดงผล Clock Frequency



(ก)

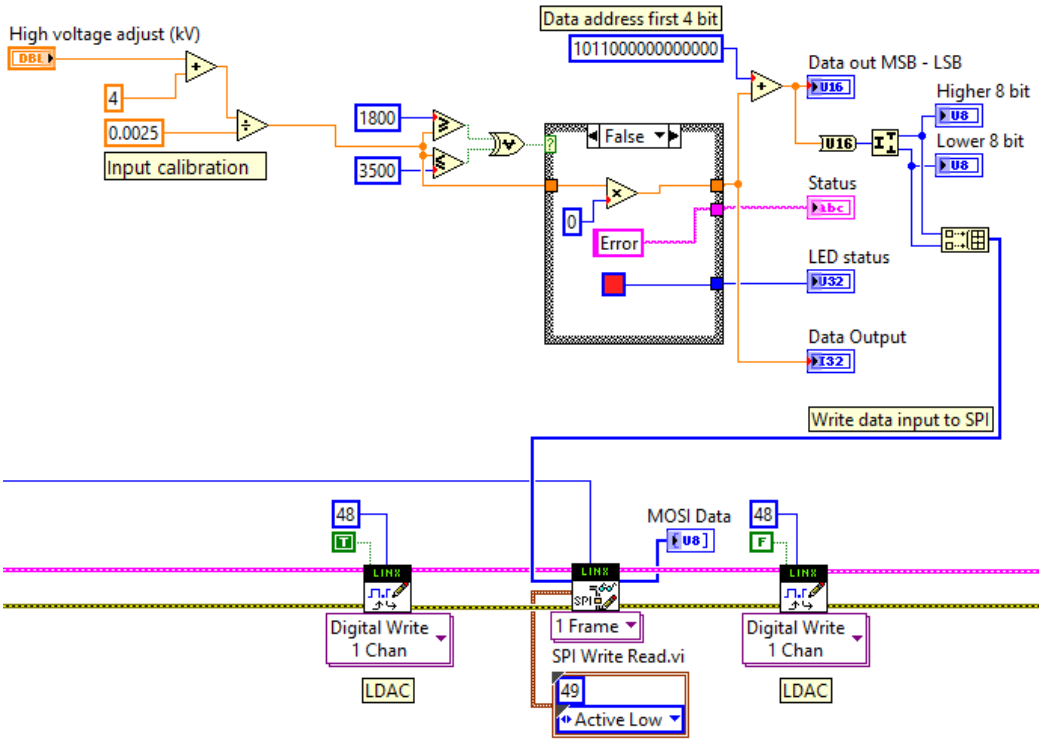
(ข)

ภาพที่ 4.13 หน้าต่าง Block Diagram (ก) สำหรับการพัฒนาโปแกรมเพื่อเริ่มใช้งานการเชื่อมต่อสื่อสารแบบ SPI (ข) สำหรับการพัฒนาโปแกรมเพื่อหยุดการใช้งานการเชื่อมต่อสื่อสารกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560

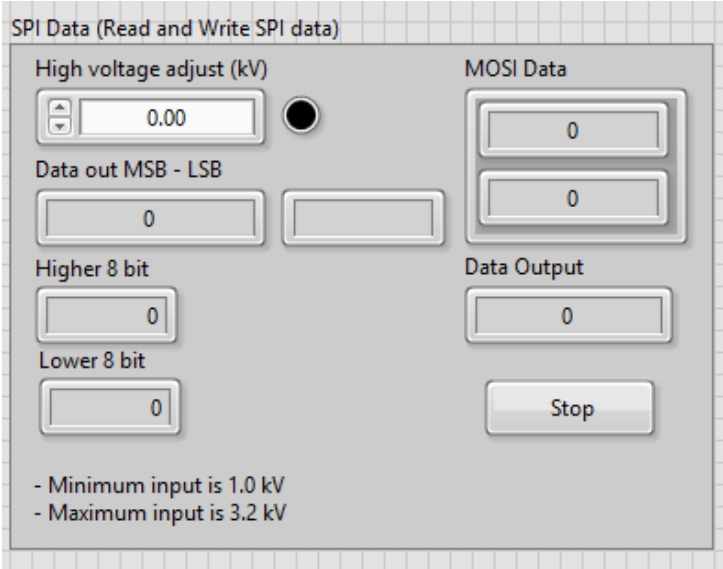


ภาพที่ 4.14 หน้าต่าง Control Panel สำหรับการพัฒนาโปแกรมเพื่อรับค่าข้อมูลสำหรับการตั้งค่าการเชื่อมต่อสื่อสารแบบ SPI โดยรับค่า Serial Port และ Baud Rate พร้อมทั้งแสดงความถี่สัญญาณนาฬิกา (Clock Frequency) ที่โปรแกรมทำงาน

สำหรับการส่งข้อมูลเป็นไปตามรูปแบบของตัวแปลงสัญญาณซึ่งมีข้อมูลทั้งหมด 16 bit โดย 4 bit แรกเป็นการตั้งค่าการใช้งานและเลือกช่องสัญญาณเอาต์พุต พิจารณาตามภาพที่ 4.15 โดยเชื่อมต่อจากโปรแกรมการกำเนิดการเชื่อมต่อ SPI ซึ่งข้อมูลความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงถูกอินพุตเข้ามาพร้อมปรับเทียบความถูกต้องในการเอาต์พุตศักย์ไฟฟ้า หลังจากนั้นข้อมูลถูกนำไปกำหนดค่าจำกัดของการอินพุตโดยถ้ามีการให้ค่าที่มากเกินไป โปรแกรมจะไม่ทำงานและส่งค่า Error ออกมาและแสดงสีแดงเพื่อแจ้งเตือนผู้ใช้งาน หลังจากนั้นข้อมูลจะถูกนำไปบวกกับข้อมูล 4 bit แรกและจัดการข้อมูลให้อยู่ในรูปเลขฐานสองพร้อมกับจัดเรียงข้อมูลแบบ array ก่อนส่งเข้าไปในการเขียน SPI เอาต์พุตซึ่งมีการส่งค่าดิจิตอลผ่านขา 48 โดยเป็นการส่งเพื่อสร้าง LDAC ตามรูปแบบการส่งข้อมูลของตัวแปลงสัญญาณ MCP4922 ซึ่งก่อนส่งข้อมูลผ่าน SPI สัญญาณ LDAC มีสถานะลอจิก HIGH และหลังส่งข้อมูลผ่าน SPI สัญญาณ LDAC มีสถานะลอจิก LOW สำหรับการรับค่าพิจารณาตามภาพที่ 4.16 แสดงหน้าต่าง Control Panel เพื่อรับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าในหน่วยกิโลโวลต์ นอกจากนี้ยังแสดงข้อมูลที่อินพุตในรูปแบบ Binary number ทั้งแบบ 16 bit สำหรับที่จะส่งผ่าน SPI และแบบ 8 bit ซึ่งได้จากการแบ่งข้อมูล 16 bit ในการจัดการ Array ก่อนส่งข้อมูลผ่าน SPI โดยมีการตรวจสอบข้อมูลอีกครั้งด้วยการดึงเอาต์พุตที่เตรียมส่งผ่าน SPI มาแปลงในรูปแบบ Decimal number



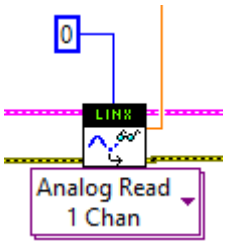
ภาพที่ 4.15 หน้าต่าง Block Diagram สำหรับการพัฒนาโปแกรมเพื่อจัดการข้อมูลสำหรับการเขียนข้อมูลดิจิตอลผ่านการเชื่อมต่อสื่อสารแบบ SPI



ภาพที่ 4.16 หน้าต่าง Control Panel สำหรับการพัฒนาโปแกรมเพื่อรับค่าข้อมูลสำหรับการกำหนดศักย์ไฟฟ้าเอาต์พุต และแสดงข้อมูลดิจิตอลที่ส่งผ่าน SPI เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลพร้อมแสดงเอาต์พุตของข้อมูลในรูปแบบ Decimal number

4.2.3 การพัฒนาโปรแกรมอ่านค่าข้อมูลความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงเข้าสู่ระบบควบคุม

การอ่านค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงเข้าระบบนั้น ช่วยให้ง่ายต่อการตรวจสอบความถูกต้องในการกำเนิดศักย์ไฟฟ้าโดยรับสัญญาณอนาลอกจาก High voltage probe ในช่วง 0 – 5 โวลต์ พิจารณาโปรแกรมบนหน้าต่าง Block Diagram ตามภาพที่ 4.17 ซึ่งต่อจากโปรแกรมแปลงสัญญาณ MCP4922 โดยรับสัญญาณที่ขาอนาลอกอินพุต 0 ของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino ซึ่งมีความระเอียดในการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอลอยู่ที่ 10 bit โดยข้อมูลที่รับเข้ามาถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าอินพุตศักย์ไฟฟ้าเพื่อหาค่าความผิดพลาดในการกำเนิดสนามไฟฟ้าและแก้ไขให้มีความแตกต่างน้อยที่สุดต่อไป



ภาพที่ 4.17 หน้าต่าง Block Diagram สำหรับการพัฒนาโปแกรมเพื่อรับค่าข้อมูลอนาลอกสำหรับการอ่านค่าข้อมูลความต่างศักย์ไฟฟ้ากลับเพื่อเปรียบเทียบกับอินพุต

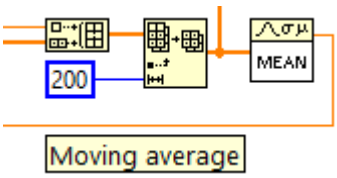
4.2.4 การพัฒนาโปรแกรมสำหรับใช้งาน Moving average

ข้อมูลจากการรับค่าผ่านตัวแปลงสัญญาณอนาลอกภายในของบอร์ด Arduino มีการแกว่ง การลดการแกว่งของข้อมูลสามารถทำได้โดยการเฉลี่ยข้อมูลเป็นช่วง ซึ่งใช้วิธี Moving average ข้อมูลเนื่องจากเป็นการรับข้อมูลแบบ Real-time และปรับเทียบค่าสนามไฟฟ้า แสดงตามภาพที่ 4.18 โดยค่าดิจิตอลจากการแปลงสัญญาณส่งข้อมูลมาที่ฟังก์ชันนี้พร้อมกับระบุจำนวนที่ต้องการเฉลี่ยข้อมูล ซึ่งการทดลองสำหรับการกรองข้อมูลและการปรับเทียบสนามไฟฟ้ามี 3 การทดลองดังนี้

4.2.4.1 การทดลองเพื่อทดสอบการกรองข้อมูลด้วย วิธี Moving average จากการปรับจำนวนข้อมูลในการเฉลี่ยผ่านโปรแกรมบนคอมพิวเตอร์ เพื่อศึกษาช่วงที่เหมาะสมต่อการเฉลี่ยของข้อมูลจากการสังเกตกราฟ

4.2.4.2 การทดลองเพื่อทดสอบการปรับเทียบการกำเนิดสนามไฟฟ้าด้วยการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้า Input กับความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงจากการปรับความต่างศักย์ไฟฟ้าผ่านโปรแกรมบนคอมพิวเตอร์ เพื่อสร้างกราฟปรับเทียบ

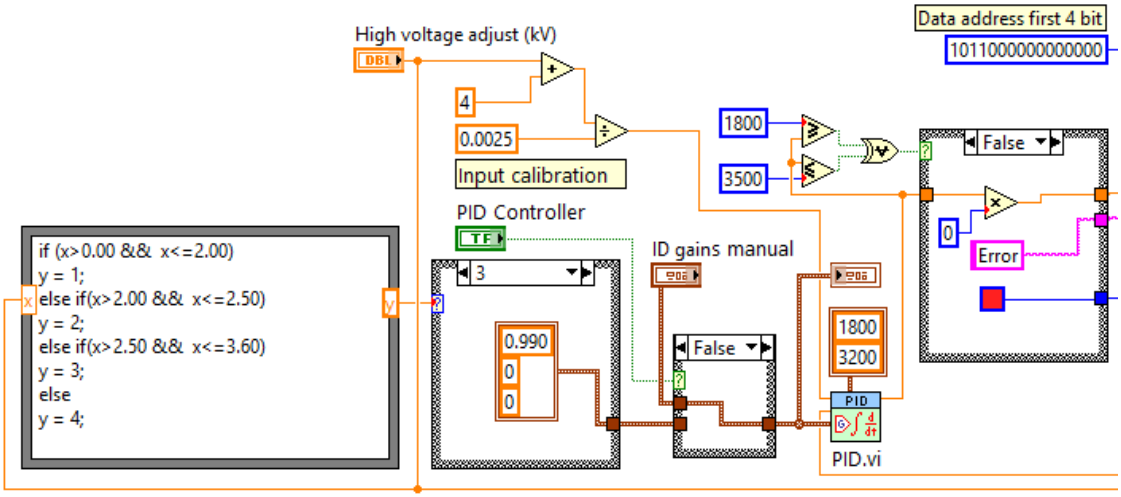
4.2.4.3 การทดลองเพื่อทดสอบการกำเนิดความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงจากการปรับความต่างศักย์ไฟฟ้าผ่านโปรแกรมบนคอมพิวเตอร์ เพื่อหาช่วงน้อยที่สุดและมากที่สุดที่สามารถกำเนิดความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงได้และเปรียบเทียบความผิดพลาดจากทดลอง



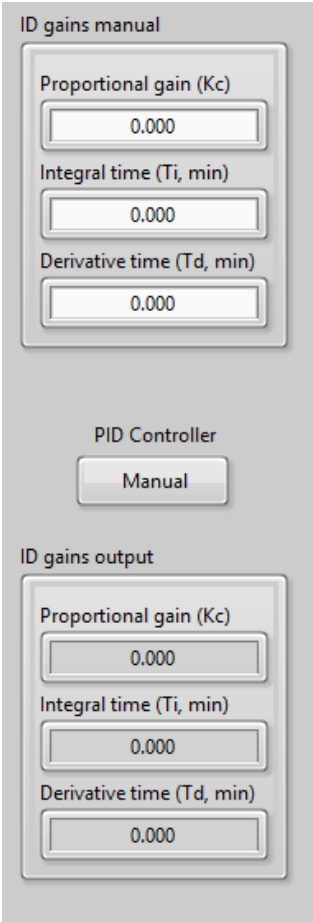
ภาพที่ 4.18 หน้าต่าง Block Diagram สำหรับการพัฒนาโปแกรมเพื่อลดการแกว่งของข้อมูลจากการรับสัญญาณเข้าสู่ระบบควบคุม

4.2.5 การพัฒนาโปรแกรมการควบคุมแบบย้อนกลับ (PID Control)

เนื่องจากความแตกต่างระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าอินพุตกับความต่างศักย์ไฟฟ้าเอาต์พุตที่วัดได้มีความแตกต่างกัน วิธีที่ลดความผิดพลาดด้วยการควบคุมแบบย้อนกลับสามารถพิจารณาตามภาพที่ 4.19 โดยรับค่าจากอินพุตมาเข้าที่ PID Diagram จากนั้นข้อมูลศักย์ไฟฟ้าถูกนำมาพิจารณาด้วยฟังก์ชัน การปรับพารามิเตอร์ที่เหมาะสมช่วยให้การกำเนิดสนามไฟฟ้ามีความผิดพลาดน้อยมากได้ซึ่งออกแบบให้สามารถปรับค่า PID Gains ได้ 2 วิธีคือค่า PID Gains จากโปรแกรมที่ผ่านการทดลองหาค่าที่เหมาะสมและวิธีปรับด้วยตัวเอง โดยสามารถเลือกใช้งานได้จากการกดสวิตซ์บนหน้าต่าง Control Panel แสดงตามภาพที่ 4.20



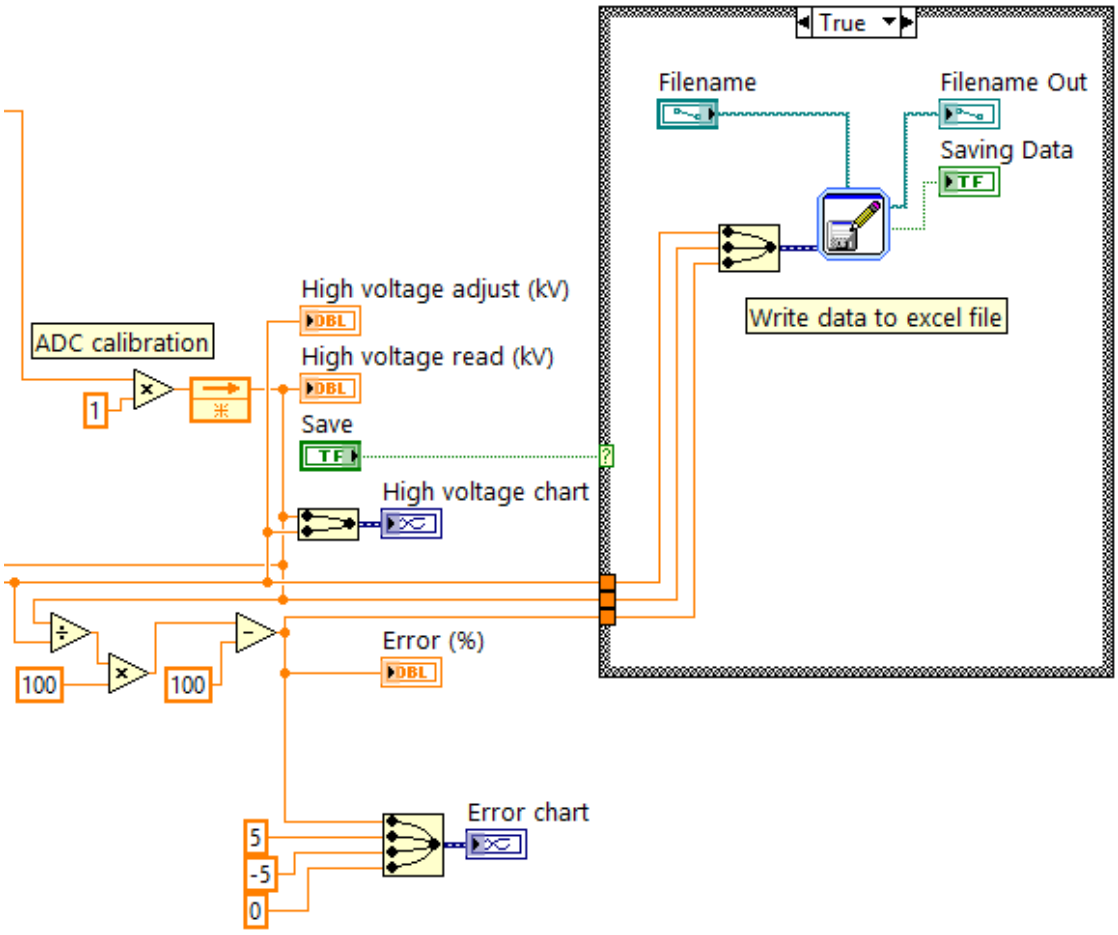
ภาพที่ 4.19 หน้าต่าง Block Diagram สำหรับการพัฒนาโปแกรมเพื่อลดความผิดพลาดในการกำเนิดสนามไฟฟ้าด้วยการควบคุมแบบย้อนกลับ



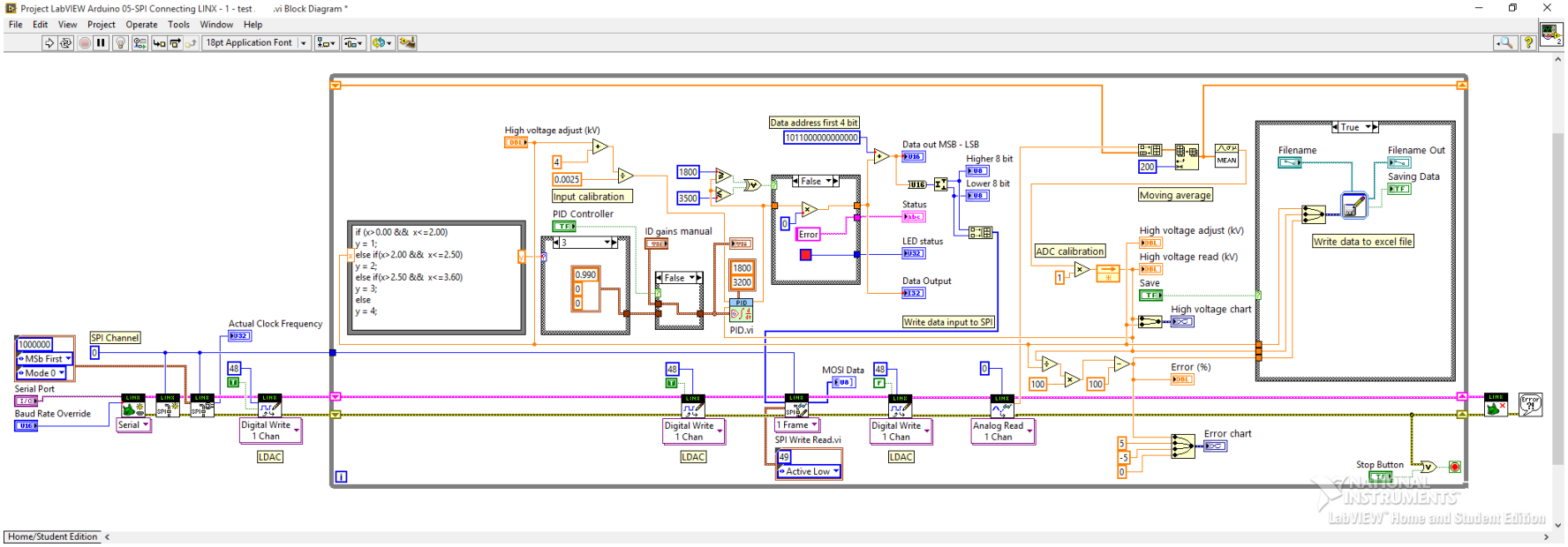
ภาพที่ 4.20 หน้าต่าง Block Diagram สำหรับการพัฒนาโปแกรมเพื่อลดความผิดพลาดในการกำเนิดสนามไฟฟ้าด้วยการปรับพารามิเตอร์ PID Gains

4.2.6 การพัฒนาโปรแกรมการบันทึกค่าข้อมูล

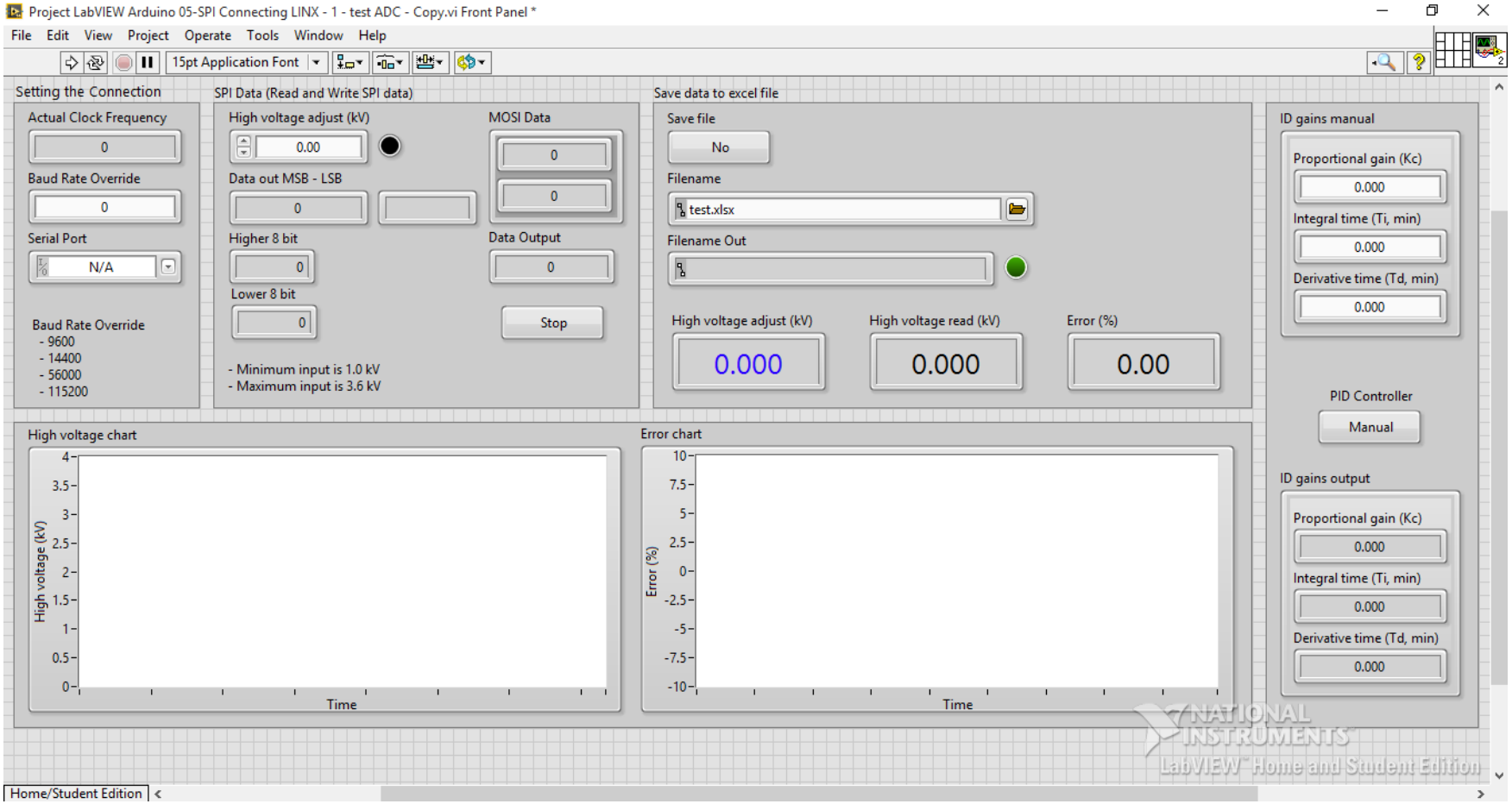
การเก็บข้อมูลเป็นวิธีที่ช่วยให้การวิเคราะห์ข้อมูลได้ดียิ่งขึ้น พิจารณาตามภาพที่ 4.21 เป็นโปรแกรมบนหน้าต่าง Block Diagram สำหรับการบันทึกค่าข้อมูลส่งบนไฟล์โดยข้อมูลที่ผ่านการ Moving average และผ่านการควบคุมแบบย้อนกลับถูกส่งมาเพื่อบันทึกลงไฟล์ ซึ่งเป็นฟังก์ชันให้เลือกบันทึกหรือไม่ด้วยการกดสวิตซ์บนหน้าต่าง Control Panel โดยถ้าต้องบันทึกก็มีการตั้งชื่อไฟล์ นอกจากนี้ข้อมูลการกำเนิดศักย์ไฟฟ้าถูกนำมาแสดงเพื่อเปรียบเทียบอินพุตและเอาต์พุตที่ได้ของความต่างศักย์ไฟฟ้าพร้อมคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด พร้อมที่แสดงข้อมูลในรูปแบบกราฟแบบ Real-time เพื่อสังเกตการกำเนิดศักย์ไฟฟ้า สำหรับโปรแกรมรวมทั้งหมดในการพัฒนาที่ส่วนของ Block Diagram แสดงตามภาพที่ 4.22 และตามภาพที่ 4.23 เป็นส่วนของ Control Panel



ภาพที่ 4.21 หน้าต่าง Block Diagram สำหรับการพัฒนาโปแกรมเพื่อรับค่าข้อมูลอนาลอกสำหรับการอ่านค่าข้อมูลความต่างศักย์ไฟฟ้ากลับเพื่อเปรียบเทียบกับอินพุต



ภาพที่ 4.22 หน้าต่าง Block Diagram สำหรับการพัฒนาโปแกรมกำเนิดสนามไฟฟ้า



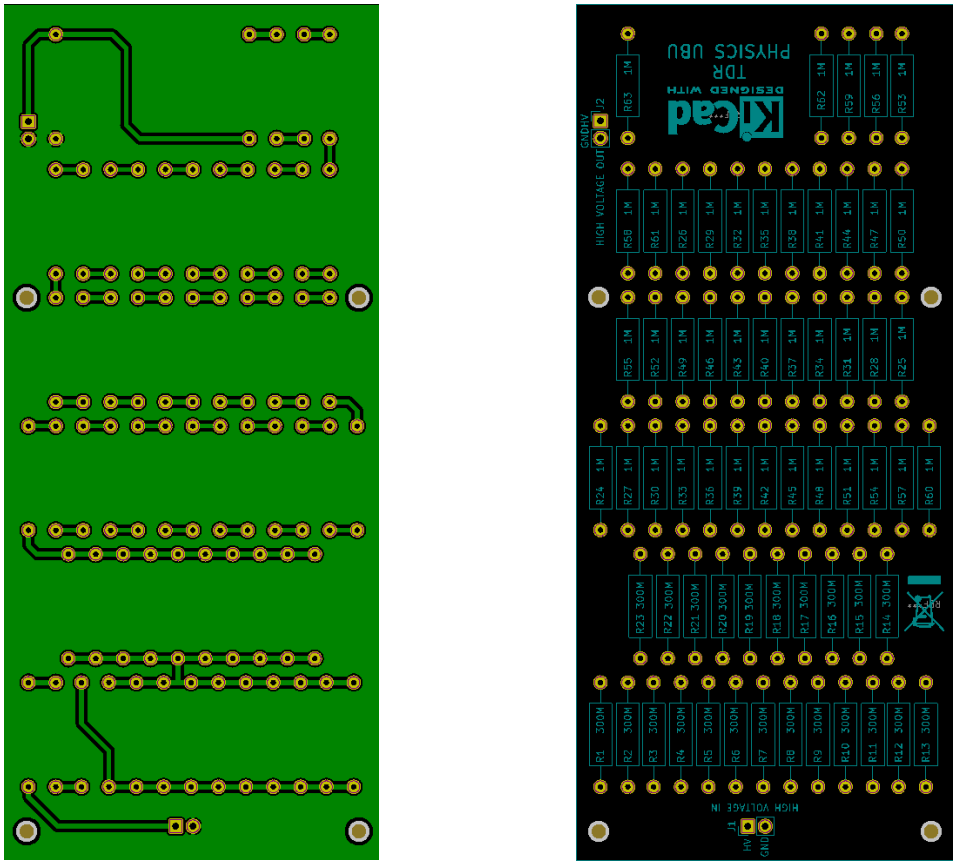
ภาพที่ 4.23 หน้าต่าง Control Panel สำหรับการพัฒนาโปแกรมกำเนิดสนามไฟฟ้า

4.3 การเตรียมวงจรอิเล็กทรอนิกส์

การเตรียมวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทำให้การใช้งานง่ายยิ่งขึ้น วงจรอิเล็กทรอนิกส์มีความเป็นระเบียบมากขึ้นและลดโอกาสผิดพลาดในการต่อวงจรลงได้ โดยประกอบด้วยการออกแบบลายวงจรอิเล็กทรอนิกส์และการทำแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์

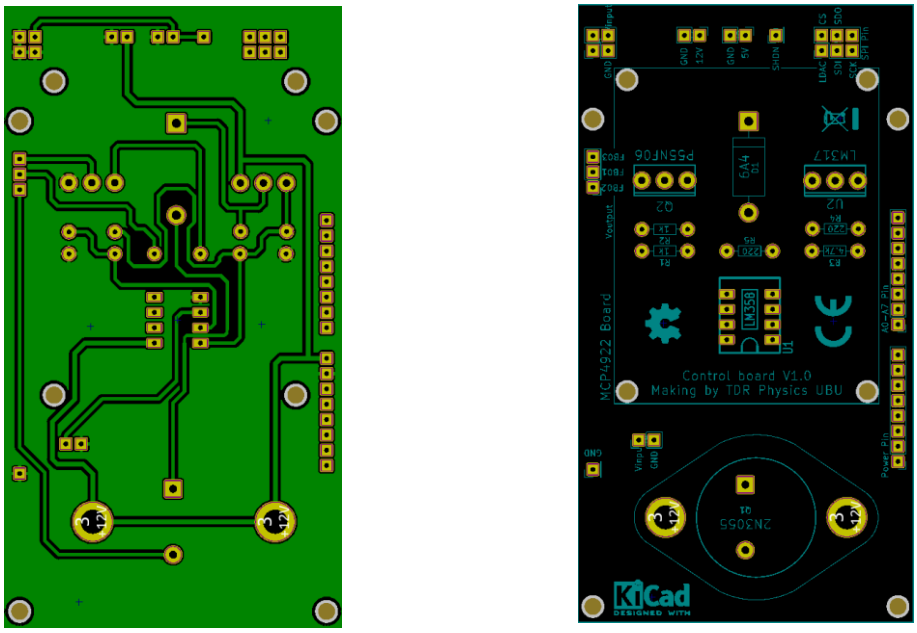
4.3.1 การออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยโปรแกรม KiCad

การออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยโปรแกรม KiCad สามารถใช้งานได้ทั่วไป เนื่องจากเป็นโปรแกรมที่เปิดให้สามารถใช้งานได้ฟรีและสามารถพัฒนาเพิ่มเติมได้ โดยการออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในงานวิจัยนี้มี 3 ส่วน คือ วงจรแบ่งแรงดันสำหรับวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูง แสดงตามภาพที่ 4.24 วงจรของระบบควบคุมแสดงตามภาพที่ 4.25 และวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าสำหรับระบบแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้กับระบบควบคุมแสดงตามภาพที่ 4.26 โดยแต่ละวงจรประกอบด้วยลายวงจรอิเล็กทรอนิกส์และสัญลักษณ์บอกตำแหน่งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ นอกจากนี้ยังสามารถจำลองการประกอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้

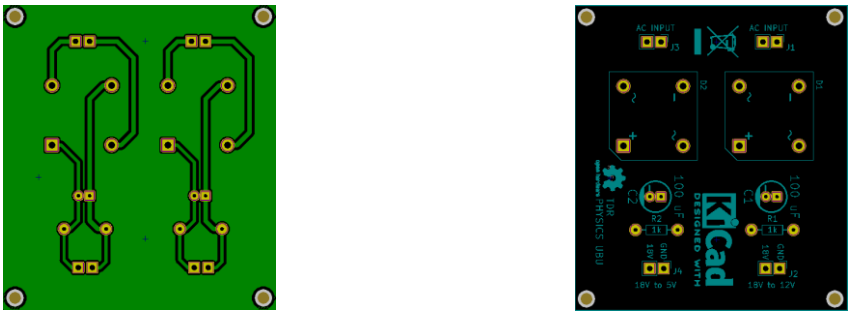


(ก) (ข)

ภาพที่ 4.24 การออกแบบ (ก) ลายวงจร (ข) สัญลักษณ์ตำแหน่งอุปกรณ์ของวงจรแบ่งแรงดันสำหรับวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูง



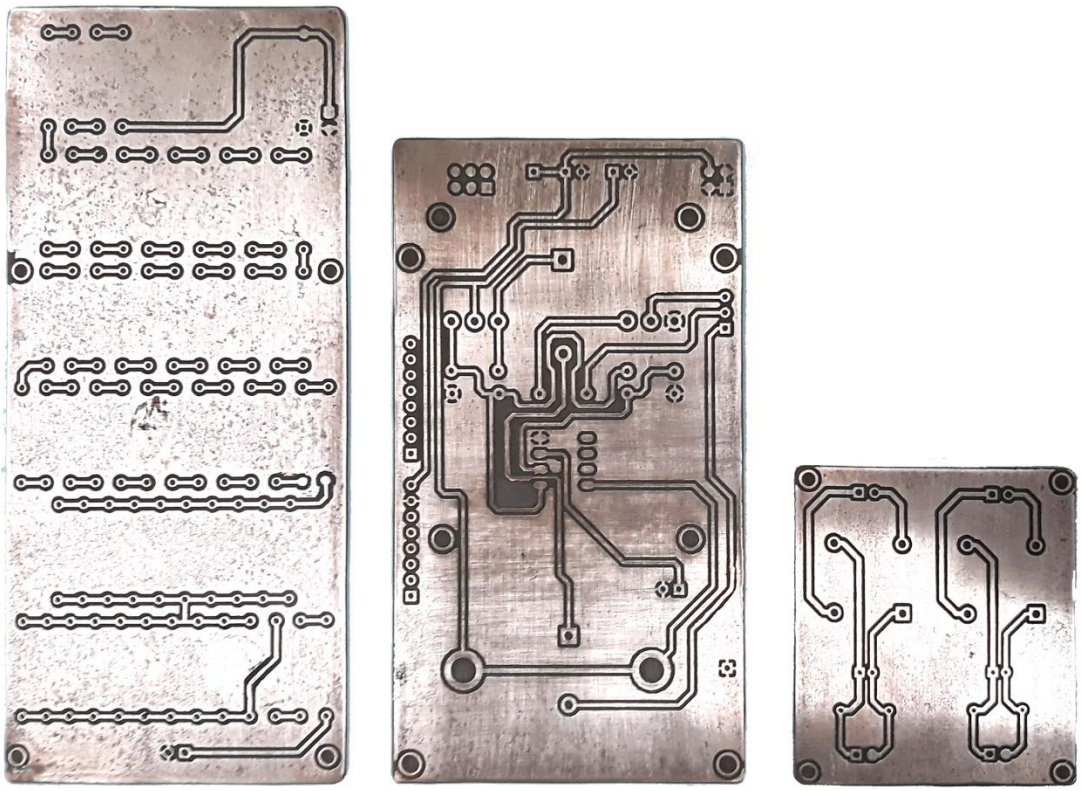
ภาพที่ 4.25 การออกแบบลายวงจรและสัญลักษณ์บอกตำแหน่งอุปกรณ์ของวงจรระบบควบคุม



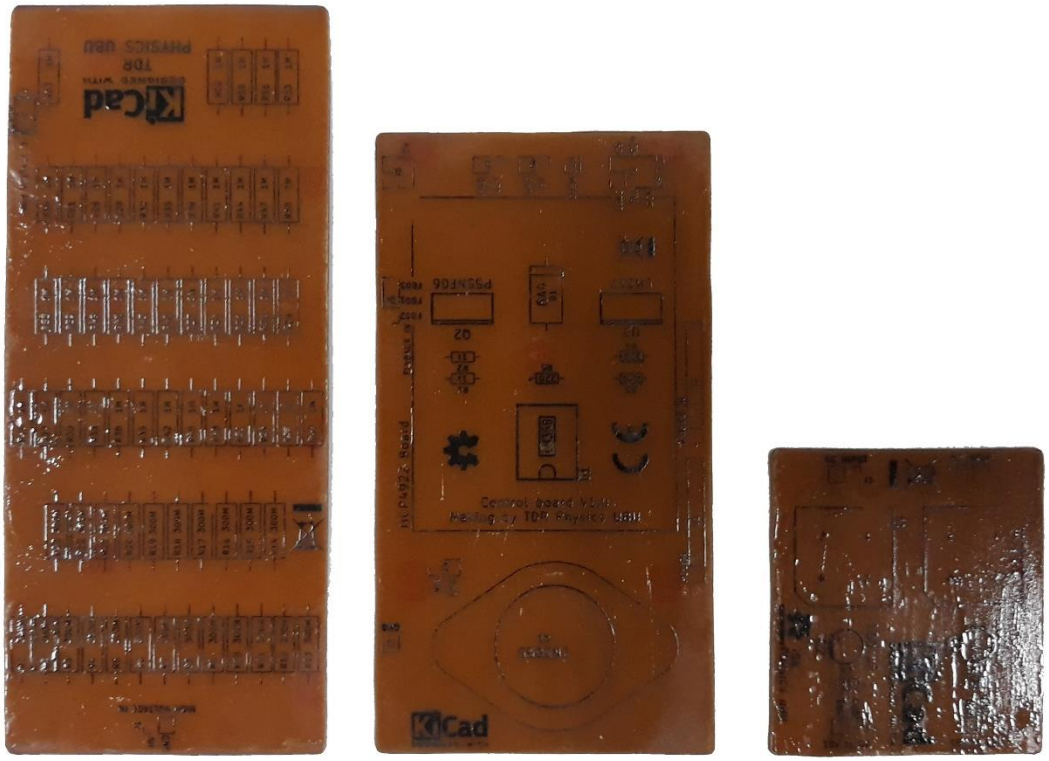
ภาพที่ 4.26 การออกแบบลายวงจรและสัญลักษณ์ตำแหน่งอุปกรณ์ของวงจรเรียงกระแสไฟฟ้า สำหรับระบบแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้กับระบบควบคุม

4.3.2 การทำแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์

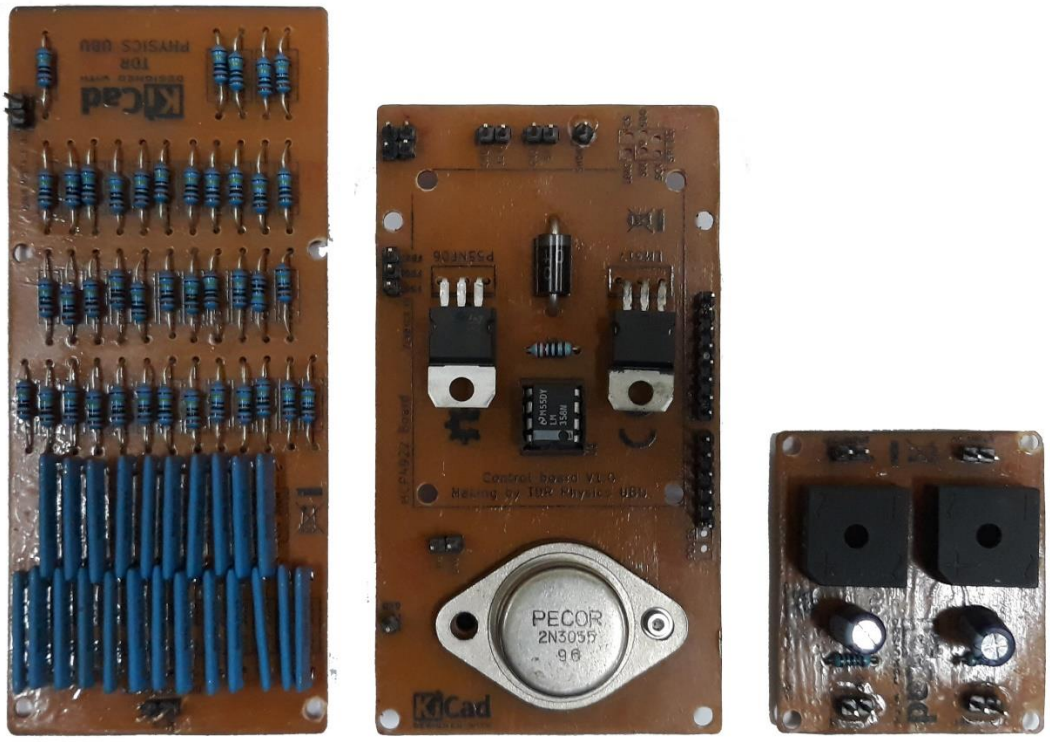
การทำแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์มีหลายวิธี เช่น การขึ้นลายวงจรด้วยการรีดความร้อน การขึ้นลายวงจรด้วยการใช้แผ่นไวแสง การขึ้นลายด้วยเครื่องสว่าน 3 แกนขนาดเล็ก (mini CNC) และการขึ้นลายด้วยการลอกลาย โดยแต่ละวิธีมีความสะดวก และคุณภาพชิ้นงานที่แตกต่างกัน ซึ่งชิ้นงานนี้ได้ขึ้นลายด้วยวิธีลอกลายแสดงตามภาพที่ 4.27 เป็นลายวงจรที่ผ่านการกัดทองแดงส่วนที่ไม่ต้องการออกด้วยกรดเฟอร์ริกคลอไลด์ โดยภาพที่ 4.28 เป็นการขึ้นลายตำแหน่งของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และเคลือบด้วยน้ำมันสน ภาพที่ 4.29 และภาพที่ 4.30 แสดงลักษณะของวงจรที่ผ่านการเชื่อมต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และเคลือบลายวงจรเพื่อป้องกันความเสียหายให้กับบอร์ด



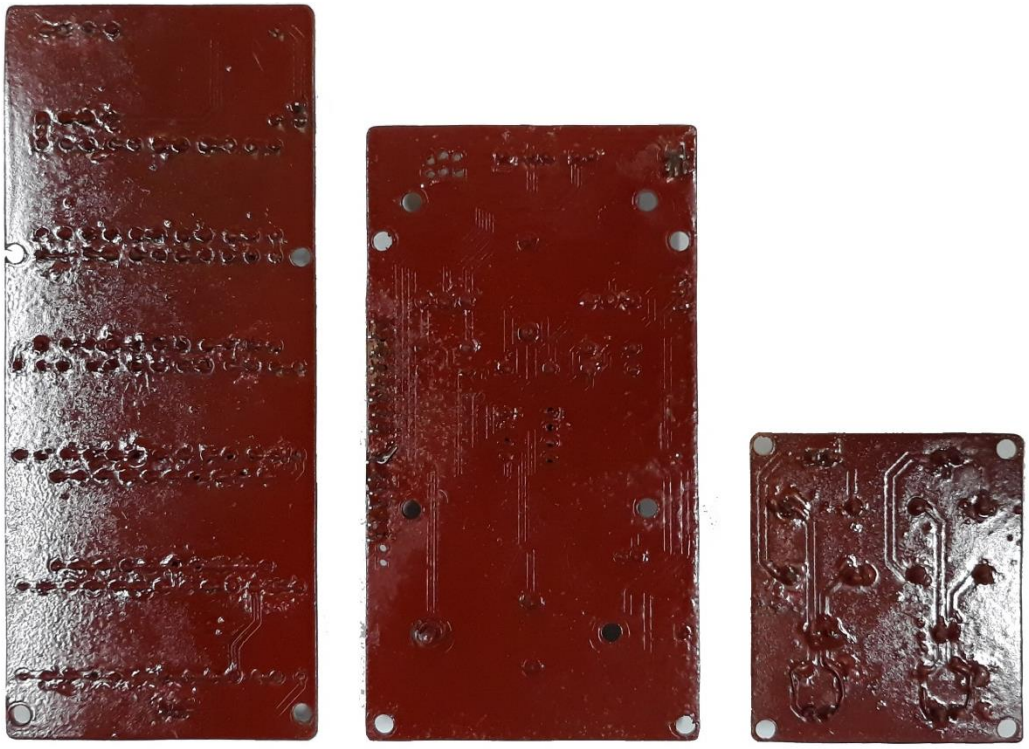
ภาพที่ 4.27 ลายวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่กัดทองแดงส่วนที่ไม่ต้องการออกด้วยกรดเฟอร์ริกคลอไลด์



ภาพที่ 4.28 ด้านหน้าของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่แสดงตำแหน่งของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์



ภาพที่ 4.29 ด้านหน้าของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ผ่านการเชื่อมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เข้ากับบอร์ด



ภาพที่ 4.30 ด้านหลังของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ผ่านการเคลือบผิวเพื่อป้องกันความเสียหาย

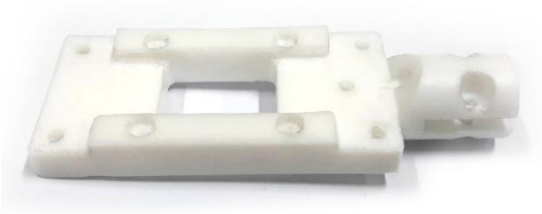
4.4 การเตรียมระบบจับสารตัวอย่างและระบบควบคุม

4.4.1 การเตรียมระบบจับสารตัวอย่าง

การออกแบบชุดจับสารตัวอย่างที่สมบูรณ์แสดงตามภาพที่ 4.31 เป็นอุปกรณ์จับสารสำหรับการศึกษาคุณสมบัติเฉพาะของสารตัวอย่างที่สามารถกำเนิดสนามไฟฟ้าความต่างศักย์สูง โดยส่วนฐานจับและฐานยึดแสดงตามภาพที่ 4.32 ทำมาจากสแตนเลส เกรด 304 ราคา 2,400 บาท ซึ่งส่วนอุปกรณ์ป้องกันสนามไฟฟ้าแสดงตามภาพที่ 4.33 ทำจากวัสดุพอลิเททระฟลูออโรเอทิลีนหรือเทฟลอน (Polytetrafluoroethylene ,PTFE) ราคา 2,000 บาท สำหรับส่วนของขั้วไฟฟ้าทำมาจากทองแดงแสดงตามภาพที่ 4.34 ราคารวม 2,850 บาท ซึ่งที่ 3 ส่วนนี้ถูกสั่งทำจากบริษัท ศรีวิศาล เกษรา จำกัด โดยในส่วนของท่อเซรามิกป้องกันไฟฟ้าขั้วเป็นวัสดุเซรามิกชนิดอลูมินา สั่งซื้อจากบริษัท 19 Forwarder Agent จำกัด ราคา 230 บาท แสดงตามภาพที่ 4.35 และส่วนสำหรับตั้งอุปกรณ์จับสารตัวอย่างแสดงตามภาพที่ 4.37 ทำจากพลาสติก PLA (Polylactic acid) จากการ Print 3D

ภาพที่ 4.31 ชิ้นงานสำเร็จของระบบอุปกรณ์จับสารตัวอย่างที่สามารถกำเนิดสนามไฟฟ้าตกคร่อมสารตัวอย่าง

ภาพที่ 4.32 ชิ้นงานสำเร็จของฐานจับและฐานยึดของระบบอุปกรณ์จับสารตัวอย่างพร้อมกำเนิดสนามไฟฟ้า

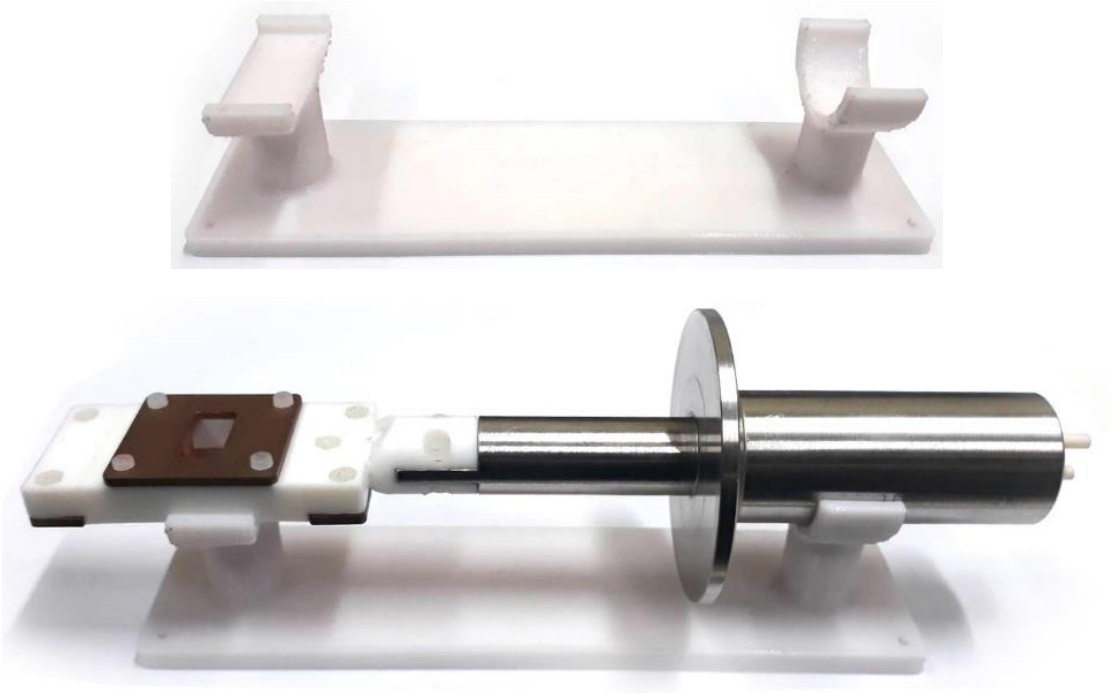


ภาพที่ 4.33 ชิ้นงานสำเร็จของระบบอุปกรณ์ป้องกันสนามไฟฟ้าของอุปกรณ์จับสารตัวอย่างพร้อมกำเนิดสนามไฟฟ้า

ภาพที่ 4.34 ชิ้นงานสำเร็จของขั้วไฟฟ้าของอุปกรณ์จับสารตัวอย่างพร้อมกำเนิดสนามไฟฟ้า

ภาพที่ 4.35 ชิ้นงานสำเร็จของส่วนเชื่อมต่อสายไฟฟ้าความต่างศักย์สูงกับชุดจับสารตัวอย่าง

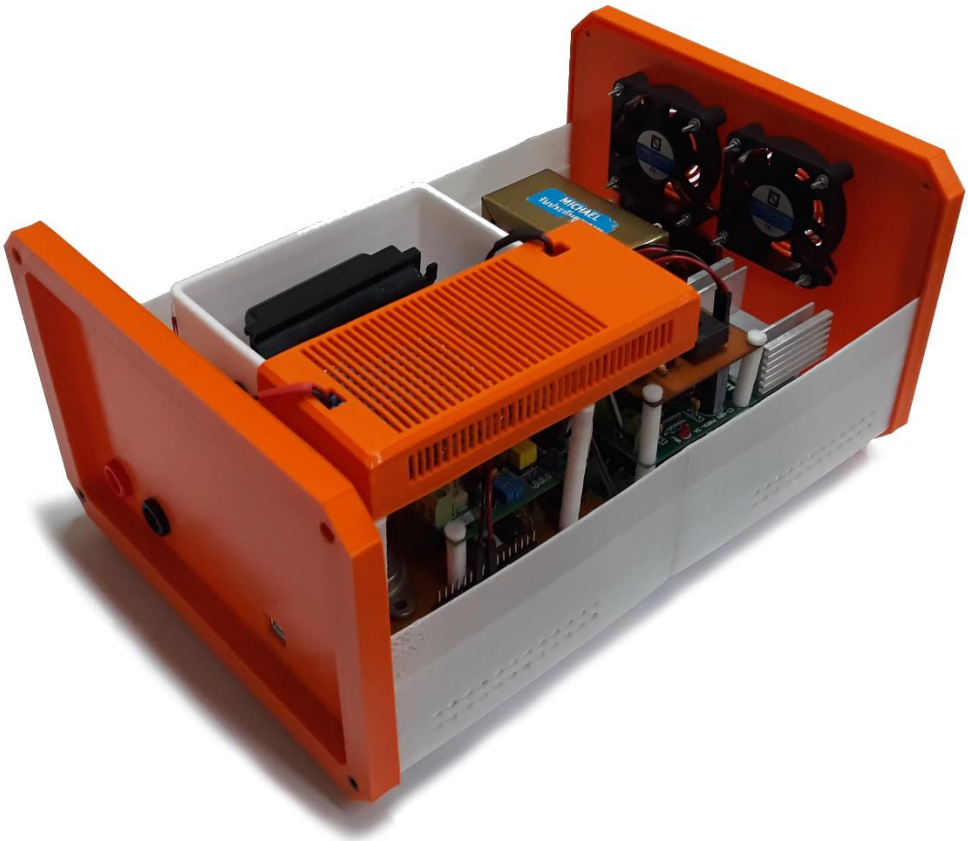
ภาพที่ 4.36 ชิ้นงานสำเร็จของท่อเซรามิดสำหรับป้องกันการนำไฟฟ้าภายในอุปกรณ์



ภาพที่ 4.37 ชิ้นงานสำเร็จของอุปกรณ์สำหรับวางชุดจับสารตัวอย่างเพื่อช่วยในการเตรียมสารตัวอย่างพร้อมทดสอบวางอุปกรณ์

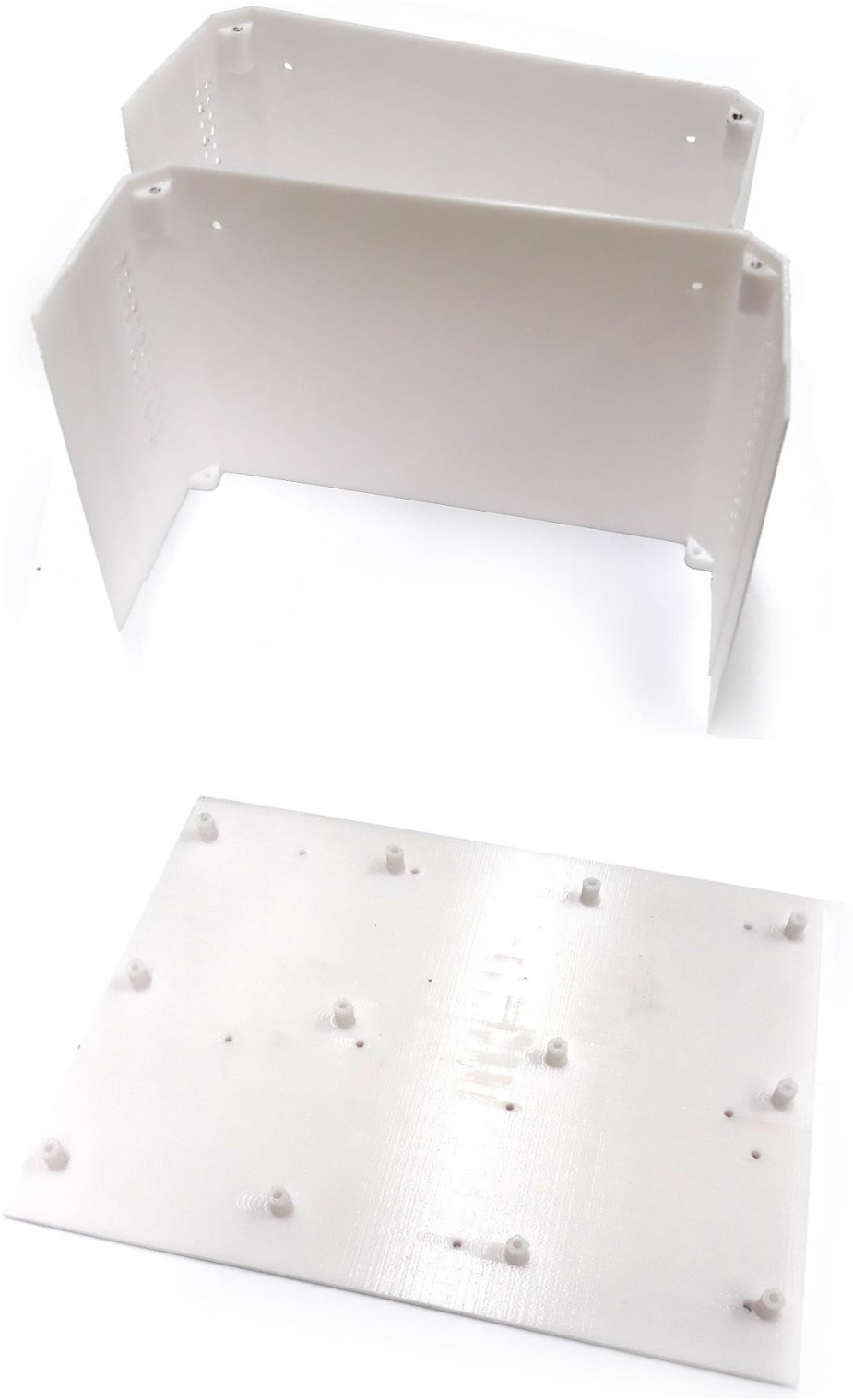
4.4.2 การเตรียมระบบควบคุม

การเตรียมกล่องระบบควบคุมการกำเนิดสนามไฟฟ้าความต่างศักย์สูงประกอบด้วยชิ้นส่วนที่ทำจากพลาสติก PLA จากการใช้งานเครื่อง Print 3D ซึ่งมีขนาดด้านกว้าง 20 เซนติเมตร ด้านยาว 26 เซนติเมตร และมีความสูง 12 เซนติเมตร โดยเมื่อประกอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แสดงตามภาพที่ 4.38 ซึ่งด้านหน้าของกล่องควบคุมถูกออกแบบให้สามารถเชื่อมต่อขั้วศักย์ไฟฟ้าไปยังอุปกรณ์จับสารตัวอย่างได้ พร้อมกับช่องเชื่อมต่อสาย USB สำหรับการควบคุมอุปกรณ์ผ่านคอมพิวเตอร์ โดยด้านหลังของกล่องถูกออกแบบให้สามารถติดพัดลมระบายอากาศขนาดเล็ก 2 ตัว เพื่อลดความร้อนที่อาจเกิดขึ้นกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์พร้อมกับสวิตซ์ไฟฟ้าเพื่อรับการเชื่อมต่อแสดงตามภาพที่ 4.39 ซึ่งด้านบนและด้านล่างของกล่องควบคุมแสดงตามภาพที่ 4.40 ถูกออกแบบให้มีช่องดูดอากาศเพื่อเป็นตัวช่วยในการระบายความร้อนให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ สำหรับฐานรองแสดงตามภาพที่ 4.40 ถูกออกแบบเฉพาะสำหรับยึดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆให้มั่นคง แข็งแรง เพื่อลดความเสียหายจากการเคลื่อนอุปกรณ์ขณะใช้งาน



ภาพที่ 4.38 การทดสอบจัดวางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์บนฐานรองก่อนทดสอบวางภายในกล่อง ระบบควบคุมการกำเนิดสนามไฟฟ้าความต่างศักย์สูง

ภาพที่ 4.39 ชิ้นส่วนสำเร็จของฝาด้านหน้ากล่องระบบควบคุมและชิ้นส่วนสำเร็จของฝาด้านหลังกล่องระบบควบคุมซึ่งมีช่องสำหรับเชื่อมต่อความต่างศักย์สูงไปที่อุปกรณ์จับสารตัวอย่างและช่องเชื่อมต่อสาย USB กับคอมพิวเตอร์นอกจากนี้ยังมีระบบระบายความร้อนด้วยพัดลมขนาดเล็ก



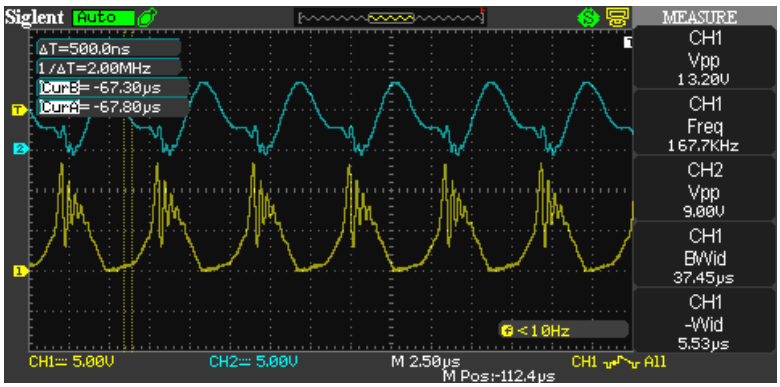
ภาพที่ 4.40 ชิ้นส่วนสำเร็จของฝาด้านบนและด้านล่างของกล่องระบบควบคุมพร้อมช่องระบายอากาศและชิ้นส่วนสำเร็จของฐานรองอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

บทที่ 5
ผลการทดลองระบบควบคุมการกำเนิดสนามไฟฟ้าความต่างศักย์สูง

ผลการทดลองระบบควบคุมการกำเนิดสนามไฟฟ้าความต่างศักย์สูงมีส่วนประกอบในการทดลองหลายส่วนซึ่งได้ประกอบด้วยผลจากการทดลองการทำงานของหม้อแปลง ผลการทำงานของวงจรสวิตซ์เหนี่ยวนำ ผลการปรับเทียบความถูกต้องของการแปลงสัญญาณ ผลการปรับเทียบการแปลงระดับสัญญาณ ผลการปรับเทียบการแปลงระดับกระแสไฟฟ้า ผลการควบคุมแบบ PID ซึ่งรายละเอียดได้อธิบายเป็นลำดับต่อไป

5.1 ผลการทดลองเพื่อทดสอบการทำงานของวงจรสวิตซ์เหนี่ยวนำ

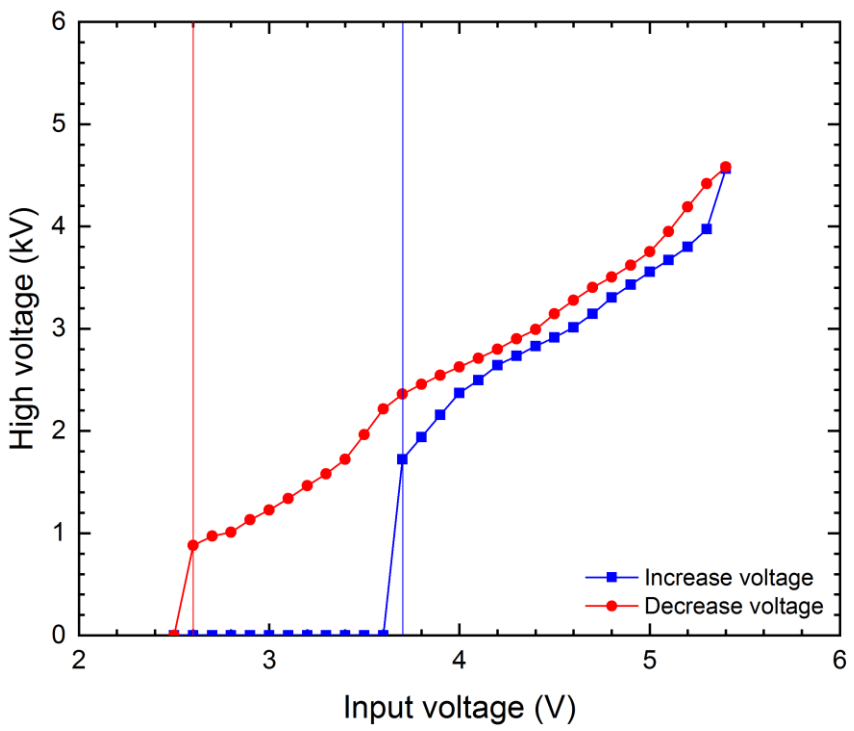
การทดลองวงจรสวิตซ์เหนี่ยวนำหม้อแปลงด้วยไฟฟ้ากระแสตรง พิจารณาภาพที่ 5.1 ซึ่งแสดงลักษณะของสัญญาณที่วัดสัญญาณด้วย Oscilloscope โดยต่อเข้ากับความต่างศักย์ไฟฟ้า 5 โวลต์กระแสตรง ผ่านวงจรสวิตซ์ทิศทางของกระแสไฟฟ้า พบว่าสัญญาณทั้งสองมีลักษณะคล้ายกับไฟฟ้ากระแสสลับโดยเป็นผลมาจากการใช้ MOSFET (P55NF06) และลักษณะของสัญญาณไฟฟ้าที่วัดได้ มีความต่างเฟสกัน 180° ตามต้องการ ซึ่งผลการทดสอบการสวิตซ์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วย MOSFET สามารถกำเนิดสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับได้ โดยลักษณะสัญญาณมีความไม่เรียบเป็นผลมาจากการแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ซึ่งไม่ได้แปลงจากการเหนี่ยวนำไฟฟ้าผ่านหม้อแปลง แต่วงจรสวิตซ์กระสไฟฟ้าเหนี่ยวนำพร้อมใช้งานสำหรับการทดลองขั้นต่อไป ซึ่งเป็นการทดลองศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับวงจรสวิตซ์กระแสเหนี่ยวนำกับศักย์ไฟฟ้าสูงที่เกิดขึ้นบนแกนทุติยภูมิของหม้อแปลง Flyback



ภาพที่ 5.1 สัญญาณไฟฟ้าจากขดลวดทั้งสองบนแกนปฐมภูมิของแกนหม้อแปลง Flyback

5.2 ผลการทดลองเพื่อทดสอบการเหนี่ยวนำของหม้อแปลง Flyback

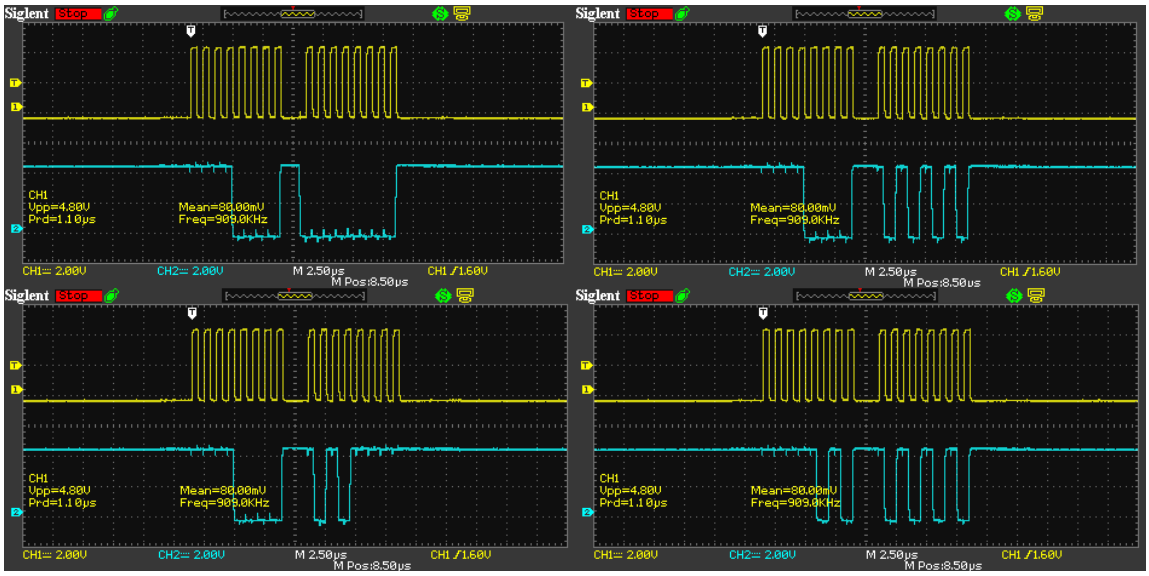
การทดสอบการเหนี่ยวนำหม้อแปลง Flyback ด้วยวงจรสวิตซ์กระแสไฟฟ้า โดยทดลอง 2 ช่วงการทำงานของหม้อแปลง เริ่มจากจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้า 2.5 – 5.0 โวลต์ให้กับขดลวดเหนี่ยวนำบนแกนหม้อแปลงและทดลองช่วงของการลดความต่างศักย์ที่จ่ายให้กับขดลวดเหนี่ยวนำบนแกนหม้อแปลง 5.0 - 2.5 โวลต์พร้อมเปรียบเทียบกับการบันทึกผลความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงที่เกิดขึ้นบนขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลง Flyback ปรากฏว่าการเหนี่ยวนำของหม้อแปลงเริ่มที่การจ่ายความต่างศักย์ 3.7 โวลต์ สำหรับช่วงการเพิ่มความต่างศักย์แสดงตามภาพที่ 5.2 (เส้นสีน้ำเงิน) และการเหนี่ยวนำหยุดลงเมื่อลดความต่างศักย์ช่วงการลดความต่างศักย์เหลือ 2.6 โวลต์ ซึ่งกราฟมีความเป็นเชิงเส้นต่ำเป็นผลมาจากกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหม้อแปลงมีการเปลี่ยนแปลงไม่มีความสม่ำเสมอ โดยผลจากการทดลองการเหนี่ยวนำหม้อแปลง Flyback ด้วยไฟฟ้ากระแสตรงผ่านวงจรสวิตซ์กระแสสามารถเหนี่ยวนำและสามารถเอาต์พุตความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงได้ ดังนั้นปัญหาความไม่สม่ำเสมอของกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อความเป็นเชิงเส้นของเอาต์พุตจึงถูกนำมาพิจารณาแก้ไข ซึ่งแก้ไขด้วยการจัดการกระแสไฟฟ้าให้มีความสม่ำเสมอมากขึ้นและระบบควบคุมการจ่ายแรงดันไฟฟ้าอินพุตให้กับหม้อแปลง โดยระบบควบคุมถูกพัฒนาและใช้งานบนคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยให้ง่ายต่อการใช้งาน การแสดงผล การเก็บข้อมูลและการวิเคราะห์ผลข้อมูล



ภาพที่ 5.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าอินพุตกับความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงเอาต์พุตจากหม้อแปลง Flyback

5.3 ผลการทดลองส่งค่าข้อมูลดิจิตอลให้กับบอร์ดแปลงสัญญาณ

ผลการทดลองส่งค่าข้อมูลดิจิตอลให้กับบอร์ดแปลงสัญญาณ โดยการปรับเทียบความถูกต้องของการแปลงสัญญาณพิจารณาตามภาพที่ 5.3 ซึ่งแสดงลักษณะสัญญาณนาฬิกา (สีเหลือง) และสัญญาณข้อมูล (สีฟ้า) โดยวัดสัญญาณข้อมูลด้วย Oscilloscope จากการเชื่อมต่อควบคุมจากซอต์ฟแวร์ LabVIEW ผ่านบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino MEGA 2560 โดยส่งข้อมูลผ่านพอร์ตเชื่อมต่อแบบ SPI เข้ากับวงจรรวม (IC) MCP4922 ซึ่งเป็นวงจรรวมสำหรับแปลงค่าสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณอนาลอก เพื่อนำสัญญาณอนาลอกเอาต์พุตไปควบคุมวงจรสวิตซ์กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำสำหรับกำเนิดศักย์ไฟฟ้าสูงด้วยหม้อแปลง Flyback ซึ่งการทดลองส่งค่าดิจิตอลด้วยเลขฐานสองขนาด 16 bit โดยส่งข้อมูล 4 ชุด ตามภาพที่ 4.9 ชุดที่ 1 ส่งค่าดิจิตอลเป็น 1111 0000 0000 0000 ชุดที่ 2 ส่งค่าดิจิตอลเป็น 1111 0000 1010 1010 ชุดที่ 3 ส่งค่าดิจิตอลเป็น 1111 0000 1010 1111 และชุดที่ 4 ส่งค่าดิจิตอลเป็น 1111 1010 1010 1010 ตามลำดับ ซึ่งข้อมูลดิจิตอล 4 bit แรก เป็นข้อมูลสำหรับการกำหนดพารามิเตอร์เอาต์พุตของสัญญาณและสำหรับ จัดการข้อมูล ส่วน 12 bit ที่เหลือเป็นข้อมูลดิจิตอลที่ถูกแปลงให้เป็นสัญญาณอนาลอก โดยการแปลงสัญญาณมีความสัมพันธ์ กับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับ IC แปลงสัญญาณซึ่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับ IC ที่ 5 โวลต์ ดังนั้นการแปลงข้อมูลขนาด 12 bit นี้ สามารถเก็บข้อมูลดิจิตอลได้ 4095 ค่า และสามารถแปลงเป็นสัญญาณอนาลอกที่มีความละเอียดที่ 1.22 mV/bit เพื่อความถูกต้องในการแปลงค่าสัญญาณและปรับแก้การพัฒนาโปรแกรม สามารถยืนยันความถูกต้องด้วยการทดลองหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างการส่งค่าดิจิตอลกับสัญญาณอนาลอกเอาต์พุต



ภาพที่ 5.3 สัญญาณดิจิตอลที่ถูกส่งจากพอร์ต SPI ของบอร์ด Arduino MEGA 2560 เพื่อแปลงเป็นสัญญาณอนาลอกผ่าน IC MCP4922 ควบคุมด้วย LabVIEW (Home Edition)

5.4 ผลการทดลองแปลงค่าข้อมูลดิจิตอลเป็นสัญญาณอนาลอก

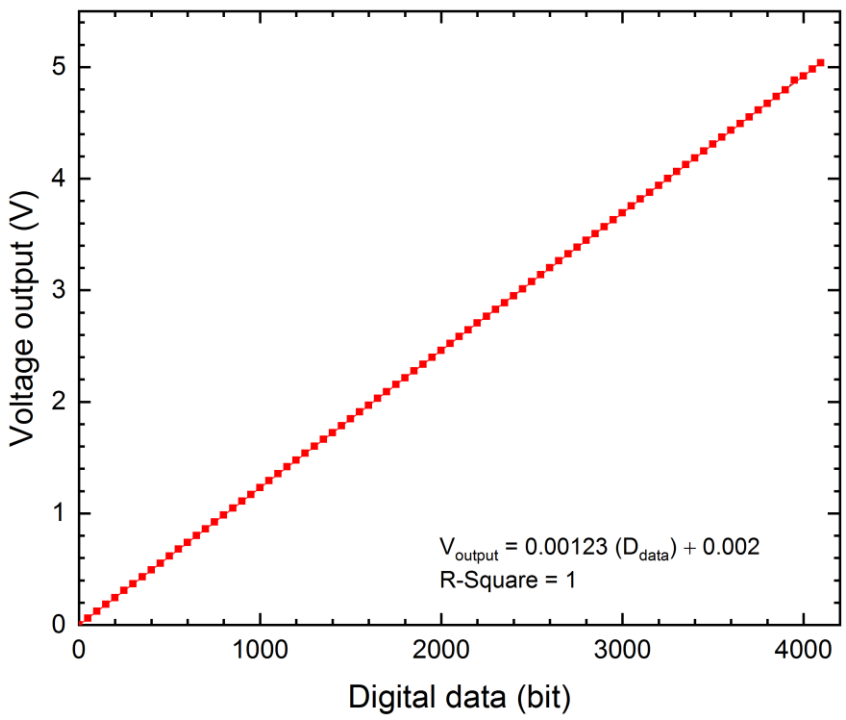
พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าดิจิตอลและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเอาต์พุตที่เกิดขึ้นจากการแปลงสัญญาณแสดงตามภาพที่ 5.4 ซึ่งกราฟมีความเป็นเชิงเส้นสูงอ้างอิงได้จากค่า R-Square ซึ่งยืนยันความสามารถในการแปลงสัญญาณของ IC MCP4922 โดยแปลงสัญญาณจากค่าดิจิตอลในช่วง 0 - 4095 ให้เป็นสัญญาณอนาลอกของสัญญาณไฟฟ้า 0 – 5 โวลต์ ซึ่งสมการจากกราฟเส้นตรงถูกนำไปปรับเทียบการแปลงสัญญาณจากการพัฒนาโปรแกรมดังแสดงตามสมการที่ 5.1 แต่เนื่องจากการเหนี่ยวนำไฟฟ้าช่วง 0 – 5 โวลต์ มีช่วงการเหนี่ยวนำและเอาต์พุตความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงได้ต่ำ ดังนั้นการขยายสัญญาณเอาต์พุตจากเดิมเป็น 0 – 10 โวลต์สามรถเพื่อช่วงของการเหนี่ยวนำให้สูงขึ้นได้ โดยการต่อสัญญาณเอาต์พุตเข้ากับวงจร Non-Inverting Op-amp ซึ่งเป็นวงจรสำหรับการย่อหรือขยายสัญญาณไฟฟ้า โดยมีอัตราส่วนการขยายอยู่ที่ 2 เท่า ทำให้สัญญาณไฟฟ้าเอาต์พุตถูกขยายสูงขึ้นและเพื่อความแม่นยำในการแปลงสัญญาณพร้อมขยายสัญญาณ พิจารณาตามภาพที่ 5.5 แสดงกราฟความสัมความสัมพันธ์ระหว่างค่าดิจิตอลและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เป็นสัญญาณอนาลอกที่เกิดขึ้นจากการแปลงสัญญาณโดยสัญญาณถูกการขยายให้สูงขึ้นเป็น 2 เท่า ซึ่งสมการมีความเป็นเชิงเส้นสูงอ้างอิงได้จากค่า R-Square โดยสมการจากกราฟเส้นตรงถูกนำไปปรับเทียบ การแปลงสัญญาณจากการพัฒนาโปรแกรมเช่นเดียวกัน ดังแสดงตามสมการที่ 5.2 ทำให้ได้สัญญาณสำหรับการควบคุมการเหนี่ยวนำหม้อแปลงในช่วงที่สูงขึ้นซึ่งพิจารณาตามภาพที่ 5.6 โดยทดลองช่วงเพิ่มแรงดันไฟฟ้าและช่วงของการลดแรงดันไฟฟ้าปรากฏว่าการทดลองควบคุมการจ่ายแรงดันไฟฟ้าช่วงเพิ่มเริ่มเกิดการเหนี่ยวนำและกำเนิดศักย์ไฟฟ้าสูงที่แรงดันไฟฟ้า 4.2 โวลต์ และมีแนวโน้มการเป็นเชิงเส้นของศักย์ไฟฟ้าสูงก่อนถึงแรงดันไฟฟ้า 5.5 โวลต์ ซึ่งหลังจากนั้นเกิดการแกว่งของศักย์ไฟฟ้าสูงเอาต์พุตเช่นเดียวกันกับการทดลองช่วงของการลดแรงดันไฟฟ้าลงโดยแรงดันไฟฟ้า 3.6 โวลต์ เป็นแรงดันสุดท้ายที่มีการเหนี่ยวนำเกิดขึ้น เนื่องจากศักย์ไฟฟ้ามีการแกว่งทำให้ไม่สามารถควบคุมและปรับเทียบความถูกต้องได้ ซึ่งปัญหาของการแกว่งของสัญญาณเอาต์พุตมาจากกระแสไฟฟ้า จากการแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณอนาลอกต่ำและไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นการเพิ่มกระแสไฟฟ้าให้กับแรงดันไฟฟ้าควบคุมให้สูงขึ้นสามารถช่วยให้การเหนี่ยวนำได้ดีขึ้นได้

$$D_{data} = \frac{V_{out} - 0.002}{0.00123} \tag{5.1}$$

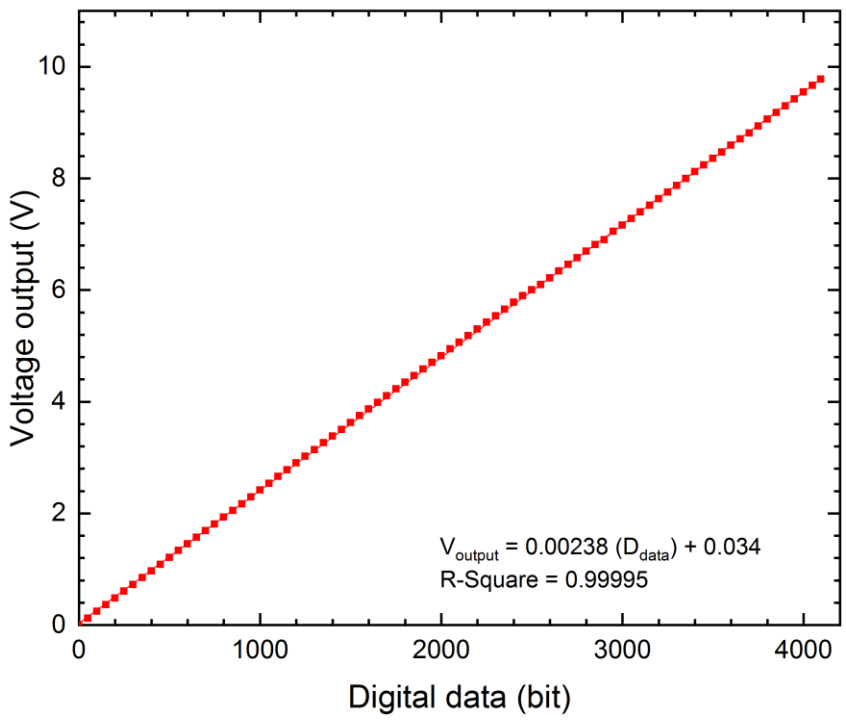
$$D_{data} = \frac{V_{out} - 0.034}{0.00238} \tag{5.2}$$

เมื่อ D_{data} คือค่าข้อมูลดิจิตอล โดยสามารถเก็บค่าข้อมูลได้ตั้งแต่ 0 – 4095

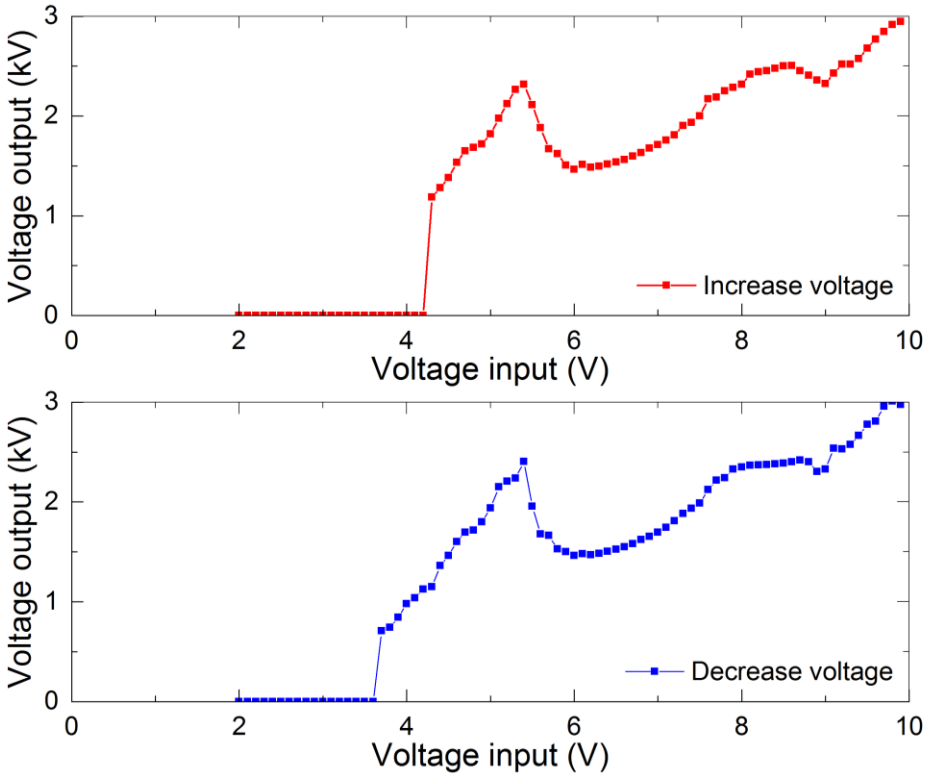
V_{out} คือค่าความต่างศักย์จากการแปลงสัญญาณ (V, โวลต์)



ภาพที่ 5.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับค่าดิจิตอลจากการแปลงสัญญาณ



ภาพที่ 5.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับค่าดิจิตอลจากการขยายสัญญาณด้วยวงจร Non-Inverting Op-amp



ภาพที่ 5.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงกับแรงดันไฟฟ้าอินพุตที่เกิดขึ้นจากการทดสอบกับหม้อแปลง Flyback

5.5 ผลการทดลองควบคุมแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสูง

การทดลองควบคุมแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสูงโดยการต่อวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาลอกพร้อมขยายสัญญาณกับวงจรเพิ่มระดับกระแสไฟฟ้า (IC LM317) พิจารณาตามภาพที่ 5.7 ซึ่งเป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าดิจิตอลกับความต่างศักย์ไฟฟ้าเอาต์พุตที่ผ่านการเพิ่มระดับกระแสไฟฟ้าขึ้นจากเดิมเป็น 1.5 แอมแปร์ โดยการแปลงระดับกระแสไฟฟ้าเริ่มทำงานที่แรงดันไฟฟ้า 2.5 โวลต์ ทำให้ช่วงแรงของกราฟไม่มีการเพิ่มขึ้นหรือลดลงและคงที่ที่ระดับเริ่มต้นทำงานของ IC LM317 โดยเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตเมื่อค่าดิจิตอลมีค่าเป็น 450 และกราฟความสัมพันธ์มีความเป็นเชิงเส้นสูงยืนยันด้วยค่า R-Square ซึ่งเมื่อค่าดิจิตอลมีค่าเป็น 3800 ลักษณะแนวโน้มของกราฟเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงไป โดยเป็นผลมาจากช่วงนี้มีการดึงกระแสไฟฟ้ามากเกิน 1.5 แอมแปร์ มีผลทำให้กราฟแนวโน้มเริ่มลดลง ดังนั้นช่วงใช้งานแรงดันไฟฟ้าควบคุมจึงอยู่ในช่วงเชิงเส้นของกราฟ โดยสมการความสัมพันธ์ดังสมการที่ 5.3 ถูกนำไปปรับแก้ภายในโปรแกรมควบคุมให้มีความถูกต้องแม่นยำขึ้น ซึ่งเมื่อผ่านการปรับเทียบได้ทดลองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าอินพุตกับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตพร้อมเพิ่มระดับกระแสไฟฟ้าที่ 1.5 แอมแปร์ พิจารณาตามภาพที่ 5.8

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าอินพุตกับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตพร้อมเพิ่มระดับกระแสไฟฟ้าสามารถพิจารณาได้ 2 ช่วงเหมือนกับการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าดิจิตอลกับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตพร้อมเพิ่มระดับกระแสไฟฟ้า โดยภาพที่ 5.8 เป็นการศึกษาสมการความสัมพันธ์ในรูปของศักย์ไฟฟ้า ซึ่งช่วงที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าเอาต์พุตคือแรงดันไฟฟ้าอินพุตที่ 2.2 โวลต์ และเริ่มไม้เป็นเชิงเส้นที่แรงดันไฟฟ้าอินพุตที่ 9.7 โวลต์ สมการความสัมพันธ์แสดงดังสมการที่ 5.4 ซึ่งถูกนำไปปรับแก้ภายในโปรแกรมพัฒนาอีกครั้ง ดังนั้นทำให้ได้แรงดันไฟฟ้าควบคุมพร้อมเพิ่มระดับกระแสไฟฟ้าซึ่งพร้อมสำหรับการทดลองกำเนิดความต่างศักย์ไฟฟ้า

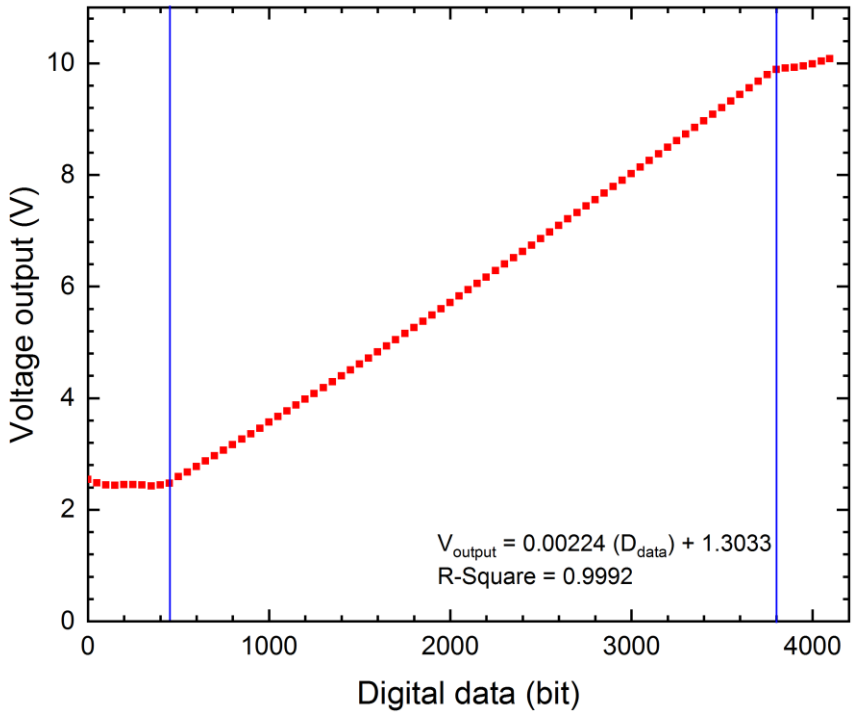
$$D_{data} = \frac{V_{out} - 1.3033}{0.00224} \tag{5.3}$$

$$V_{input} = \frac{V_{out} - 0.125}{0.9941} \tag{5.4}$$

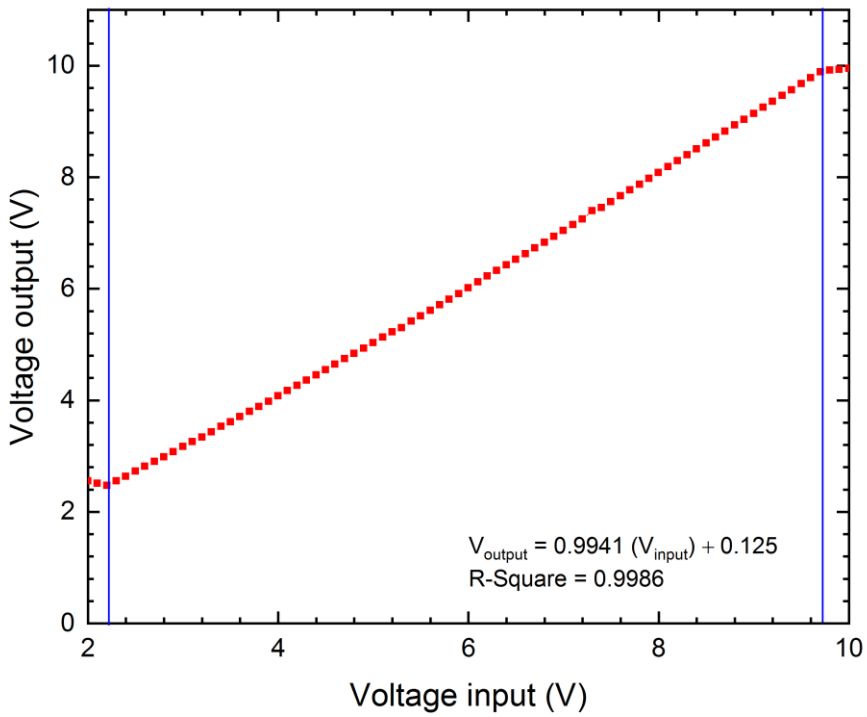
เมื่อ D_{data} คือค่าข้อมูลดิจิตอลโดยสามารถเก็บค่าข้อมูลได้ตั้งแต่ 0 – 4095

V_{out} คือค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจากการแปลงสัญญาณ (โวลต์)

V_{input} คือค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจากการปรับเทียบค่า (โวลต์)



ภาพที่ 5.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดิจิตอลอินพุตกับความต่างศักย์ไฟฟ้าเอาต์พุตของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสูง



ภาพที่ 5.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าอินพุตกับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสูง

5.6 ผลการทดลองการอ่านค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า

ก่อนการทดลองกำเนิดความต่างศักย์ไฟฟ้าสูง ได้มีการทดลองการอ่านค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเพื่อให้ง่ายต่อการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ผลโดยเปรียบเทียบการอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าที่ผ่านการเปลี่ยนแปลงระดับกระแสของวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์กับการอ่านค่าด้วยดิจิตอลมัลติมิเตอร์ ซึ่งการรับค่าสัญญาณอนาลอกเข้ามาด้วยตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลภายในของบอร์ด Arduino MEGA 2560 ขนาด 10 bit พิจารณาตามภาพที่ 5.9 และภาพที่ 5.10 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสูงกับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่อ่านค่าได้จาก ADC ซึ่งปรับเทียบช่วงการอ่านค่าที่ 0 - 5 โวลต์ และช่วงการอ่านค่าที่ 0 - 10 โวลต์ตามลำดับ โดยการปรับเทียบช่วง 0 – 5 โวลต์ ซึ่งใช้ช่วงที่เป็นเชิงเส้นในการปรับเทียบเนื่องจากช่วงแรกของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสูงไม่มีการตอบสนอง ซึ่งเริ่มตอบสนองเมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าควบคุมอยู่ที่ช่วง 2.5 โวลต์ โดยช่วงเชิงเส้นของกราฟถูกนำไปปรับเทียบภายในการพัฒนาโปรแกรมตามสมการที่ 4.5 เช่นเดียวกับภาพที่ 5.10 ซึ่งเป็นการปรับเทียบช่วง 0 – 10 โวลต์และช่วงเชิงเส้นของกราฟถูกนำไปปรับเทียบภายในการพัฒนาโปรแกรมตามสมการที่ 5.6 เพื่อความแม่นยำ พิจารณาตามภาพที่ 5.11 โดยเป็นกราฟการปรับเทียบความถูกต้องของการอ่านค่าของ ADCกับการอ่านค่าของ Agilent multimeter

$$V_{input} = \frac{V_{out} + 0.7131}{0.5499} \quad (5.5)$$

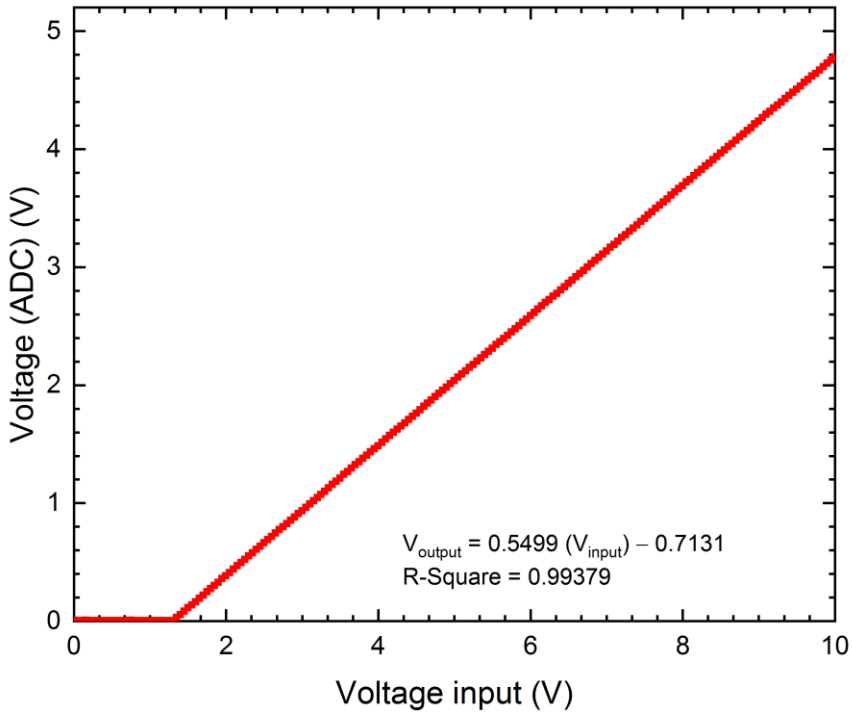
$$V_{input} = \frac{V_{out} + 2.3112}{0.9941} \quad (5.6)$$

$$V_{ADC} = 1.0133(V_{Agilent}) - 2.2749 \quad (5.7)$$

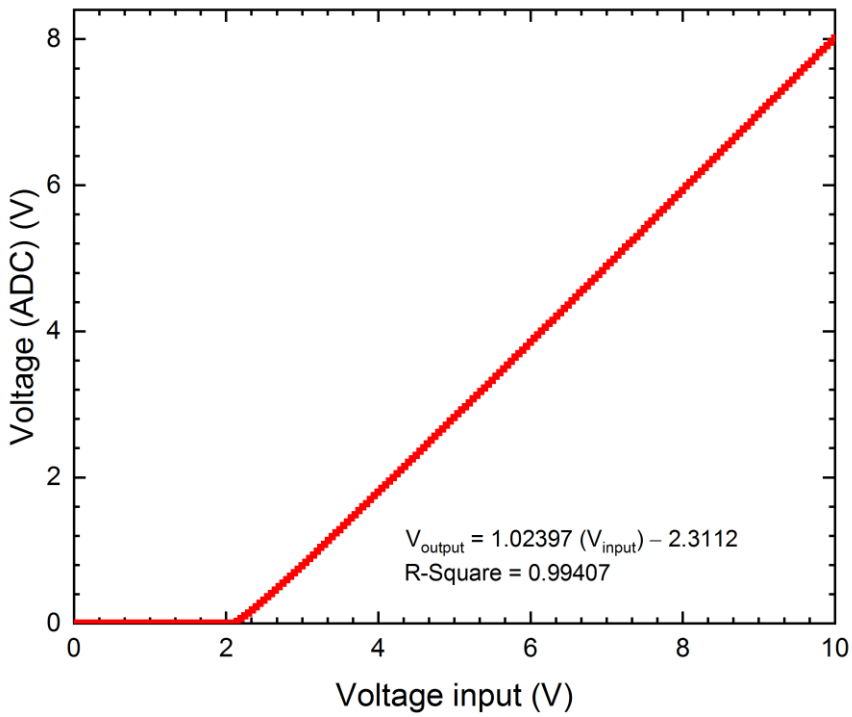
เมื่อ V_{out} คือค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจากการอ่านค่าของ ADC (โวลต์)

V_{input} คือค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจากการควบคุม (โวลต์)

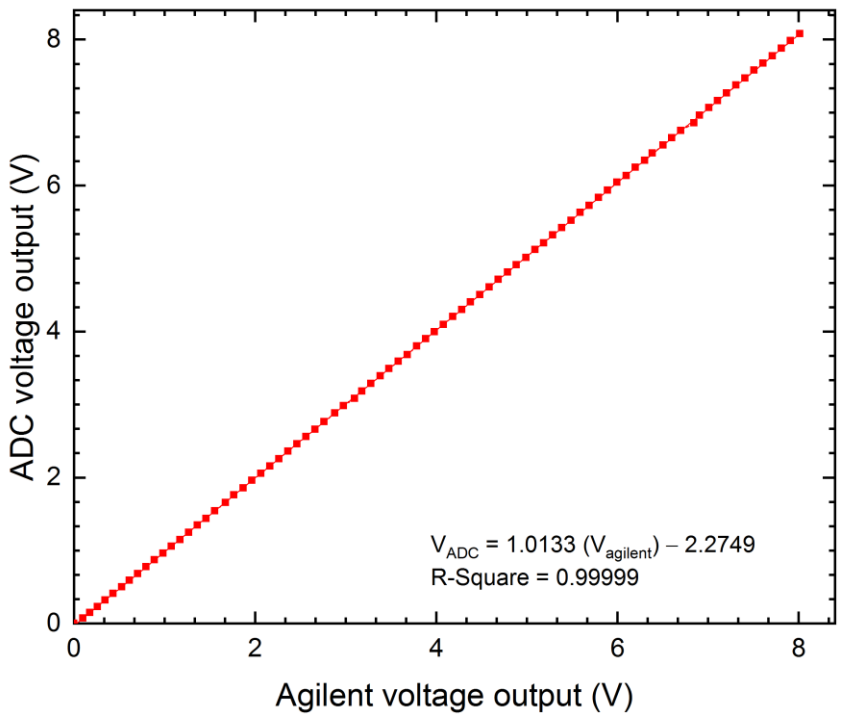
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการอ่านค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจาก ADC และ Agilent multimeter แสดงถึงความแม่นยำยืนยันด้วยค่า R-Square โดยได้สมการปรับเทียบความถูกต้องตามสมการที่ 5.7 ซึ่งการอ่านค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงปกติอ่านด้วย Agilent multimeter และเก็บข้อมูลด้วยการบันทึก แต่เนื่องจากการอ่านค่าสัญญาณไฟฟ้าของ ADC ถูกปรับเทียบและมีความแม่นยำสูง ดังนั้นทำให้ได้แรงดันไฟฟ้าควบคุมพร้อมเพิ่มระดับกระแสไฟฟ้าและการอ่านค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มีความแม่นยำสูง ซึ่งพร้อมสำหรับการทดลองกำเนิดความต่างศักย์ไฟฟ้า



ภาพที่ 5.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการอ่านค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ากับการจ่ายค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าในการปรับเทียบการอ่านค่าช่วง 0–5 V

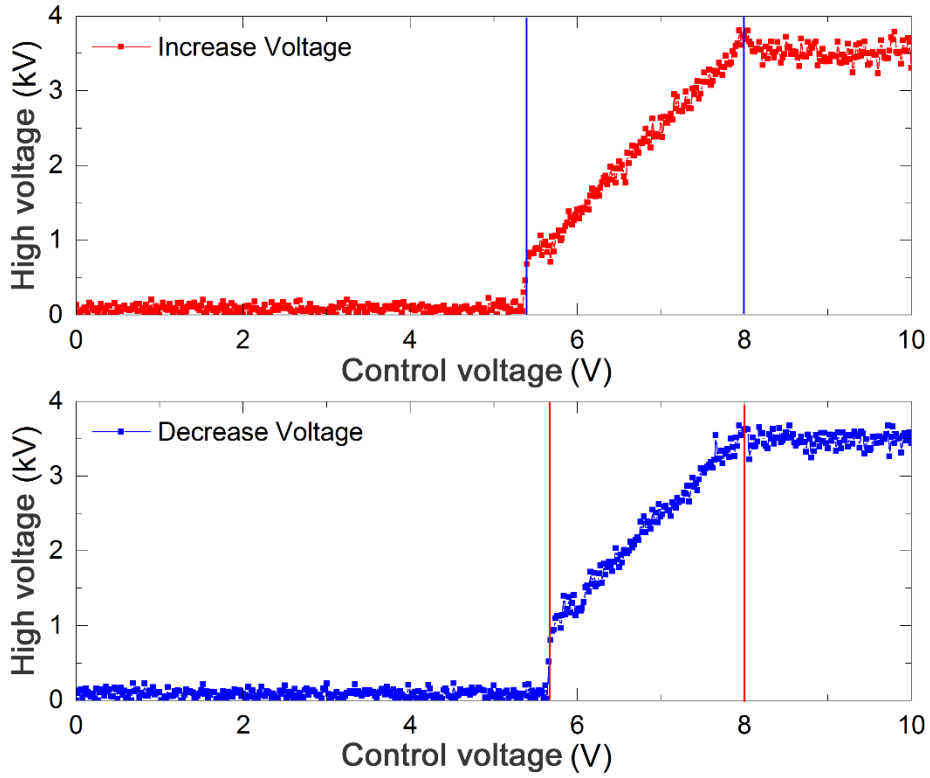


ภาพที่ 5.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการอ่านค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ากับการจ่ายค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าในการปรับเทียบการอ่านค่าช่วง 0 – 10 V



ภาพที่ 5.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการอ่านค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจาก ADC และ Agilent

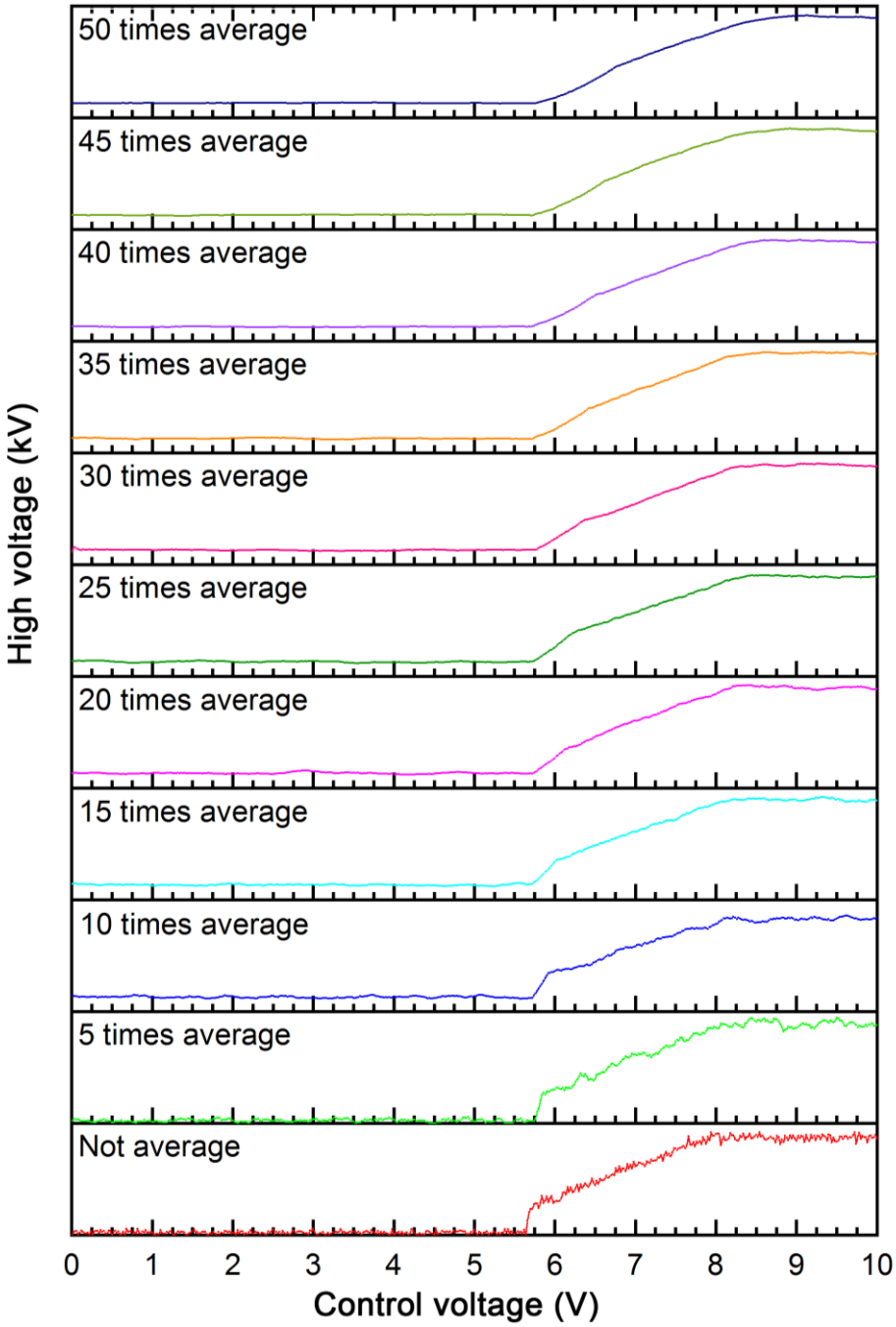
หลังจากปรับเทียบการอ่านค่าของ ADC พิจารณาภาพที่ 5.12 เป็นกราฟการทดสอบการกำเนิดความต่างศักย์ไฟฟ้าสูง โดยอ่านค่าและบันทึกค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงด้วย ADC ซึ่งสามารถบันทึกข้อมูลเก็บเป็นไฟล์ได้ทำให้ง่ายต่อการบันทึกข้อมูลและลดความผิดพลาดจากการเก็บข้อมูล โดยจากกราฟเป็นช่วงในการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจาก 0.0 – 10.0 โวลต์ เห็นได้ว่าช่วงการจ่ายแรงดันไฟฟ้าควบคุม 0.0 – 5.2 โวลต์ ไม่มีการกำเนิดความต่างศักย์ไฟฟ้า เนื่องจากกระแสไฟฟ้าไม่สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กบนแกนของหม้อแปลง Flyback แต่ช่วง 5.2 – 8.0 โวลต์ สามารถกำเนิดความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงได้ตั้งแต่ 1.0 – 3.5 กิโลโวลต์ และหลังจากนั้นไม่สามารถเพิ่มการเหนี่ยวนำได้เนื่องจากกระแสไฟฟ้าไม่เพียงพอสำหรับการเหนี่ยวนำที่แรงดันไฟฟ้าสูงขึ้น เช่นเดียวกันกับช่วงของการลดแรงดันไฟฟ้าควบคุมจาก 10.0 – 0.0 โวลต์ โดยช่วง 8.0 – 5.4 โวลต์ สามารถกำเนิดความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงได้ตั้งแต่ 1.0 – 3.5 กิโลโวลต์ โดยช่วงที่สามารถกำเนิดความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงมีความเป็นเชิงเส้น ซึ่งสามารถนำไปปรับเทียบค่าในการสร้างสนามไฟฟ้าได้ แต่เนื่องจากข้อมูลจากการอ่านค่ามีการกระจ่ายหรือมีการแกว่งของข้อมูล ทำให้การพิจารณาช่วงเชิงเส้นของข้อมูลเป็นไปได้ยากและมีความผิดพลาดเกิดขึ้น ดังนั้นการทำให้ข้อมูลเรียบขึ้นช่วยทำให้การวิเคราะห์ช่วงความเป็นเชิงเส้นของกราฟได้ง่ายขึ้น



ภาพที่ 5.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงที่เกิดขึ้นจากการทดสอบกับหม้อแปลง Flyback บันทึกค่าด้วย ADC

5.7 ผลการจัดการข้อมูลแบบ Moving average

การทำให้ข้อมูลเรียบขึ้นทำได้โดยการเฉลี่ยข้อมูลซึ่งเป็นการจัดการข้อมูลแบบ real-time พิจารณาภาพที่ 5.13 แสดงการจัดการข้อมูลโดยจำนวนข้อมูลในการเฉลี่ยมีการแปรผันตรงต่อความเรียบของสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงจาก ADC



ภาพที่ 5.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าอินพุตกระแสสูงกับความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงที่เกิดขึ้นจากหม้อแปลง Flyback โดยจัดการข้อมูลด้วย Moving average

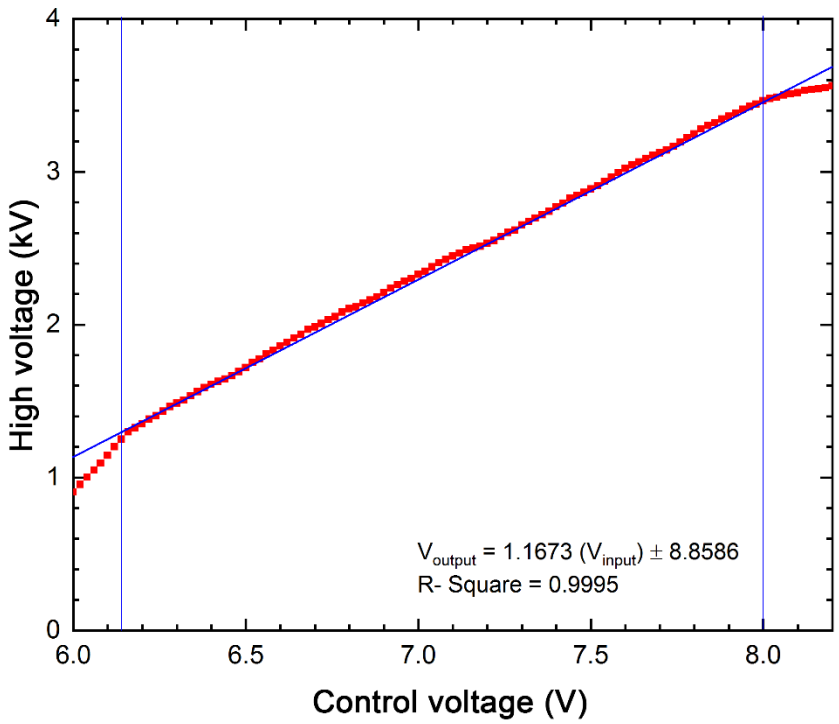
การจัดการข้อมูลท่านค่าแบบ real-time เพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีการแกว่งน้อยที่สุดอาศัยหลักการของ Moving average โดยเป็นการเฉลี่ยข้อมูลเป็นช่วงตามที่อ่านค่าได้ ซึ่งสามารถลดช่วงการแกว่งได้และพิจารณาถึงช่วงการเฉลี่ยข้อมูลที่เหมาะสม ตามภาพที่ 5.13 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าอินพุตกระแสสูงกับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในช่วงการปรับพารามิเตอร์การเฉลี่ยข้อมูลของฟังก์ชัน Moving average ตั้งแต่ค่าเริ่มต้นอ่านค่าข้อมูลแบบไม่มีฟังก์ชันจนถึงการเฉลี่ยข้อมูล 50 ค่า โดยทดลองเพิ่มการเฉลี่ยขึ้นทีละ 5 ตามลำดับ ผลการทดลองทำให้ทราบว่าข้อมูล มีการแกว่งน้อยลงเมื่อมีค่าพารามิเตอร์ในการเฉลี่ยข้อมูลสูงขึ้น แต่ถ้ามีการใช้งานค่าพารามิเตอร์สูงเกินไปทำให้การเปลี่ยนแปลงข้อมูลในการอ่านค่าผิดพลาดได้ ดังนั้นการทดลองสำหรับใช้งานอยู่ในช่วงค่าพารามิเตอร์ 50 – 200 สำหรับฟังก์ชัน Moving average เนื่องจากช่วงในการกำเนิดความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงจากหม้อแปลง Flyback สามารถวิเคราะห์ช่วงเชิงเส้นโดยช่วงที่มีความเป็นเชิงเส้นสูงอยู่ในช่วงของความต่างศักย์ไฟฟ้า 6.1 – 8.0 โวลต์ อ้างอิงจากค่า R-Square ซึ่งสามารถกำเนิดความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงอยู่ในช่วง 1.0 – 3.5 กิโลโวลต์ ดังนั้นสามารถนำช่วงเชิงเส้นนี้ปรับเทียบการกำเนิดความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงได้ พิจารณาตามภาพที่ 5.14 ซึ่งเป็นกราฟแสดงการทดลองศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าอินพุตกระแสสูงกับความต่างศักย์ไฟฟ้าสูง ที่เกิดขึ้นโดยผ่านฟังก์ชันลดการแกว่งของข้อมูลซึ่งพิจารณาเฉพาะช่วงเชิงเส้นของกราฟและได้ความสัมพันธ์ของข้อมูลดังสมการที่ 5.8 ความเป็นเชิงเส้นของข้อมูลค่า R-Sqaure เท่ากับ 0.9995 โดยสมการถูกนำไปปรับเทียบความถูกต้องภายในโปรแกรมควบคุมสำหรับการกำเนิดความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงด้วยหม้อแปลง Flyback

$$V_{input} = \frac{V_{out} - 8.8586}{1.1673} \tag{5.8}$$

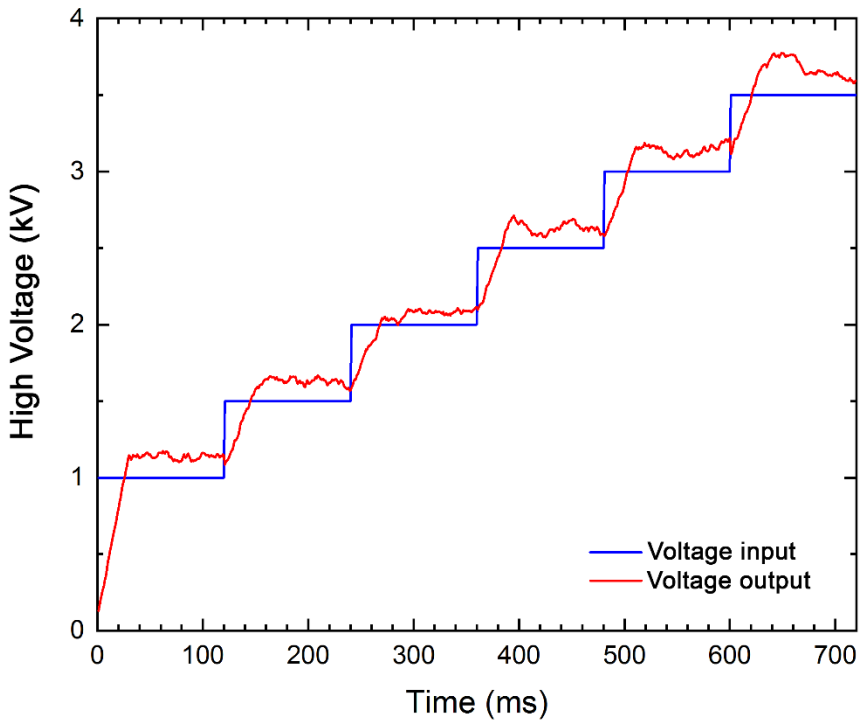
เมื่อ V_{out} คือค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงจากการอ่านค่าของ ADC (โวลต์)

V_{input} คือค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจากการจ่ายผ่านซอฟแวร์ (โวลต์)

โดยการทดลองกำเนิดความต่างศักย์ไฟฟ้าพิจารณาได้ตามภาพที่ 5.15 ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงกับเวลา โดยความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงประกอบด้วย 2 ข้อมูล คือความศักย์ไฟฟ้าสูงอินพุตจากการกำหนดค่าผ่านโปรแกรมควบคุม (สีน้ำเงิน) และความศักย์ไฟฟ้าสูงเอาต์พุตจากการกำเนิดด้วยหม้อแปลง Flyback ที่ผ่านอ่านค่าด้วย High voltage probe (สีแดง) ซึ่งเปรียบเทียบความผิดพลาดของข้อมูล โดยผลการทดลองค่าอินพุตและค่าเอาต์พุตของศักย์ไฟฟ้าสูงมีความแตกต่างกันมากทำให้การกำเนิดสนามไฟฟ้ามีความไม่แม่นยำ ดังนั้นการแก้ปัญหาสามารถทำได้โดยการลดความแตกระหว่างค่าเอาต์พุตให้ตรงกับค่าอินพุตให้มากที่สุด



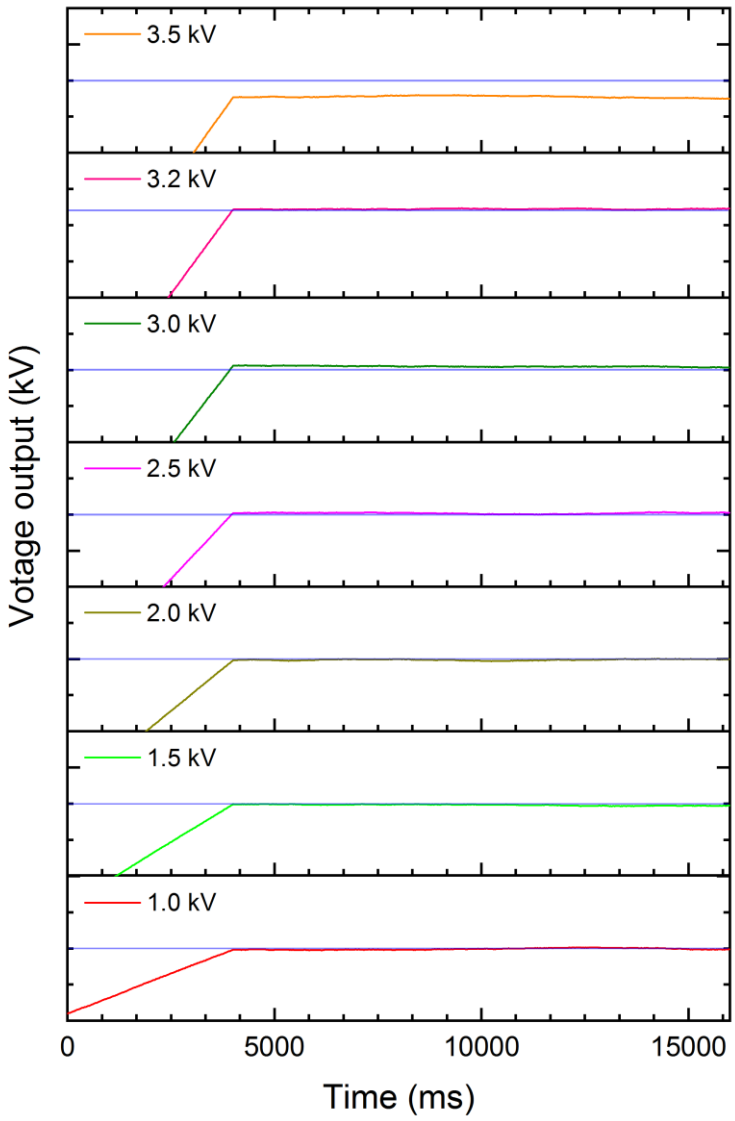
ภาพที่ 5.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าอินพุตกระแสสูงกับความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงที่เกิดขึ้นจากการทดสอบกับหม้อแปลง Flyback โดยการจัดการข้อมูลด้วยฟังก์ชัน Moving average ซึ่งวิเคราะห์ช่วงเป็นเชิงเส้นของกราฟ



ภาพที่ 5.15 กราฟเปรียบเทียบการควบคุมความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงจากหม้อแปลง Flyback

5.8 ผลการควบคุมสนามไฟฟ้าด้วยการควบคุมแบบย้อนกลับ (PID Control)

การแก้ปัญหาเอาต์พุตมีความแตกต่างจากอินพุตของความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงอาศัยหลักการการควบคุมแบบย้อนกลับ (PID, Proportional–integral–derivative controller) ซึ่งช่วยให้ข้อมูลถูกนำกลับมาพิจารณาเทียบกับอินพุตใหม่โดยการกำหนดพารามิเตอร์ PID ในการใช้งานฟังก์ชันทำให้ข้อมูลมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดน้อยลงซึ่งขึ้นอยู่กับการปรับค่าพารามิเตอร์ ตามภาพที่ 5.16 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงอินพุตและเอาต์พุตที่ผ่านการใช้งานฟังก์ชัน PID เทียบกับเวลา โดยทดลองกำเนิดศักย์ไฟฟ้าตั้งแต่ 1.0 – 3.5 กิโลโวลต์ซึ่งผลการทดลองมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างต่ำกว่า 5 % ตั้งแต่ช่วงค่าอินพุต 1.0 – 3.2 กิโลโวลต์



ภาพที่ 5.16 กราฟเปรียบเทียบการควบคุมความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงจากการควบคุมแบบย้อนกลับ

สำหรับการกำหนดศักย์ไฟฟ้าเอาต์พุต 3.5 กิโลโวลต์ ไม่สามารถกำเนิดศักย์ไฟฟ้าได้ ซึ่งเป็นผลมาจากการปรับค่าพารามิเตอร์ PID แสดงตามตารางที่ 5.1 โดยช่วงการกำหนดค่าพารามิเตอร์ PID ถูกแบ่งออกเป็นช่วงเนื่องจากแต่ละช่วงมีการค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมแตกต่างกัน ซึ่งช่วงแรกเหมาะสมกับค่า K_p เท่ากับ 0.960 ช่วงที่ 2 เหมาะสมกับค่า K_p เท่ากับ 0.965 ช่วงที่ 3 เหมาะสมกับค่า K_p เท่ากับ 0.985 และช่วงที่ 4 เหมาะสมกับค่า K_p เท่ากับ 0.990 ตามลำดับโดยได้ผลจากการทดลอง ซึ่งไม่สามารถควบคุมระดับความต่างศักย์ไฟฟ้า 3.5 กิโลโวลต์ได้โดยเป็นผลมาจากช่วงพารามิเตอร์ไม่สามารถดึงค่ากลับมาควบคุมอิพุตได้และเนื่องจากการควบคุมการกำเนิดความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสำหรับการสร้างสนามไฟฟ้านั้นมีความเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของสัญญาณทำให้การควบคุมแบบย้อนกลับที่เหมาะสมเป็นแบบ Proportional control โดยช่วงการกำเนิดศักย์ไฟฟ้ามีค่าความผิดพลาดต่ำกว่า 5 % ของการเปรียบเทียบศักย์ไฟฟ้าอินพุตและเอาต์พุต

ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์ PID สำหรับลดความผิดพลาดในการกำเนิดความต่างศักย์ไฟฟ้า

ความต่างศักย์ฟฟ้า (kV)	K_p Proportional gain	K_i Integral gain	K_d Derivative gain
1.0 - 1.5	0.960	0	0
1.5 - 2.5	0.965	0	0
2.5 - 3.0	0.985	0	0
3.0 - 3.5	0.990	0	0

บทที่ 6
สรุปผลการดำเนินการวิจัย

6.1 สรุปผลการออกแบบ การสร้าง และการทดสอบระบบควบคุม

จากการออกแบบอุปกรณ์จับสารตัวอย่างพร้อมกำเนิดสนามไฟฟ้าความต่างศักย์สูงทำให้ได้อุปกรณ์สามารถจับสารตัวอย่างที่มีขนาดเล็กที่สุดได้ที่ขนาดกว้าง 5 มิลลิเมตร ยาว 5 มิลลิเมตร หนา 1 มิลลิเมตร และสามารถจับสารตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่ที่สุดได้ที่ขนาดกว้าง 20 มิลลิเมตร ยาว 16 มิลลิเมตร หนา 5 มิลลิเมตร โดยเชื่อมต่อกับศักย์ไฟฟ้าสูงจากระบบควบคุมด้วยสายไฟฟ้าความต่างศักย์สูงกระแสต่ำซึ่งสามารถถอดสายเชื่อมต่อได้ ในการเตรียมสารตัวอย่างอุปกรณ์ถูกออกแบบในยึดสารตัวอย่างด้วยการใช้สกรูเทฟลอนซึ่งกดด้วยขั้วไฟฟ้า ด้านบนของสารตัวอย่างถูกติดด้วยเทปทองแดงบาง สำหรับกระจายศักย์ไฟฟ้าให้ทั่วผิวหน้าของสารตัวอย่าง โดยอุปกรณ์บริเวณจับสารตัวอย่างทำจากวัสดุเทฟลอนซึ่งมีคุณสมบัติในการป้องกันสนามไฟฟ้าได้ดี ส่วนอุปกรณ์สำหรับยึดขณะทดลองและฐานจับขณะเตรียมสารตัวอย่างทำจากสแตนเลส เกรด 304 ซึ่งภายในมีช่องสำหรับต่อสายศักย์ไฟฟ้าสูงโดยป้องกันการรั่วของกระแสไฟฟ้าด้วยท่อเซรามิก และบริเวณด้านของฐานจับมีข้อต่อสำหรับเชื่อมสายไฟฟ้าความต่างศักย์สูงเข้าสู่อุปกรณ์จับสารตัวอย่างที่สามารถถอดเข้า – ออกได้

จากการออกแบบอุปกรณ์ระบบควบคุมทำให้ได้กล่องควบคุมขนาดความกว้าง 185 มิลลิเมตร ความยาว 240 มิลลิเมตร ความสูง 125 มิลลิเมตร ซึ่งทำจากวัสดุพลาสติก PLA บริเวณด้านข้างมีช่องดูดอากาศ 4 ช่องโดยอากาศถูกดูดผ่านอุปกรณ์ภายในและระบายออกทางด้านหลังของกล่องด้วยพัดลมขนาดเล็ก 2 ตัว ซึ่งมีช่องเชื่อมต่อกับไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ บริเวณด้านหลังของกล่องโดยสามารถถอดสายไฟออกได้และควบคุมการจ่ายไฟฟ้าให้อุปกรณ์ด้วยสวิตซ์ บริเวณด้านหน้าของกล่องมีช่องสำหรับเชื่อมต่อพอร์ต USB ในการควบคุมและการรับ – ส่งข้อมูลไปยังระบบควบคุมและช่องสำหรับเชื่อมต่อสายไฟฟ้าศักย์สูงไปยังอุปกรณ์จับสายตัวอย่าง

จากการออกแบบวงจรของระบบควบคุมทำให้ได้วงจรกำเนิดสนามไฟฟ้าความต่างศักย์สูงที่ประกอบด้วย วงจรจ่ายแรงดันไฟฟ้า 5 และ 12 โวลต์ วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณอนาลอกด้วย IC MCP4922 วงจรแปลงระดับกระแสไฟฟ้าด้วย IC LM317 วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าสำหรับวัดศักย์ไฟฟ้าสูงและวงจรของหม้อแปลง Flyback โดยวงจรถูกบรรจุและป้องกันการรั่วของศักย์ไฟฟ้าสูงด้วยกล่องควบคุม โดยวงจรแปลงสัญญาณ แปลงระดับกระแสไฟฟ้าและวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าถูกออกแบบและทำแผ่นวงจรด้วยการออกแบบจากโปรแกรม KiCad

6.2 สรุปผลการพัฒนาโปรแกรม

จากการพัฒนาโปรแกรมสำหรับเชื่อมต่อใช้งาน LabVIEW Home Edition 2014 กับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino mega 2560 ผ่านพอร์ตอนุกรม โดยใช้ฟังก์ชัน Digilent LINX ในการควบคุมการเชื่อมต่อ Serial port และ Baud rate override

จากการพัฒนาโปรแกรมสำหรับเชื่อมต่อเพื่อควบคุมค่าดิจิตอลและแปลงเป็นสัญญาณอนาลอก โดยการเชื่อมต่อผ่าน SPI ซึ่งได้ใช้ SPI Channel 0 ในการควบคุม โดยกำหนดพารามิเตอร์รูปแบบการส่งข้อมูลเป็น MSb First โดยส่งบิดข้อมูลแรกไปก่อนและรูปแบบการบันทึกค่าดิจิตอลเป็น Mode 0 โดยการใช้งาน SPI ต้องมีการส่งคำสั่งดิจิตอล LDAC ทุกครั้งซึ่งก่อนส่งข้อมูลผ่าน SPI ค่า LDAC ต้องมีลอจิกเป็น HIGH และหลังส่งข้อมูลผ่าน SPI ค่า LDAC ต้องมีลอจิกเป็น LOW โดยส่งข้อมูล ผ่านขาดิจิตอลที่ 48 บนบอร์ดไมโครคอนโทรเลอร์

จากการพัฒนาโปรแกรมสำหรับจัดการข้อมูลก่อนส่งค่าข้อมูลให้กับ SPI โดยข้อมูลที่ถูกอินพุตเข้ามา ถูกนำไปปรับเทียบความถูกต้องและส่งให้ฟังก์ชัน PID ก่อนส่งต่อเข้าสู่ฟังก์ชันจัดการข้อมูลเมื่อมีความผิดพลาดจากการอินพุตเกินลิมิตของระบบ ซึ่งหลังจากนั้นข้อมูลอินพุตถูกนำไปบวกกับข้อมูลกำหนดรูปแบบการเอาต์พุตจำนวน 4 bit และถูกแบ่งข้อมูลเป็นช่วงละ 8 bit เนื่องจากข้อมูลไม่ได้เป็นข้อมูลประเภท array โดยจัดการข้อมูลและส่งข้อมูลในรูปแบบของ array 1 มิติให้กับ SPI

จากการพัฒนาโปรแกรมสำหรับควบคุมแบบย้อนกลับด้วยฟังก์ชัน PID ซึ่งแบ่งช่วงของการควบคุมเป็น 4 และปรับค่าพารามิเตอร์ Proportional gain K_p เป็น 0.960 ในช่วงการกำเนิดศักย์ไฟฟ้า 1.0 – 1.5 กิโลโวลต์ K_p เป็น 0.965 ในช่วงกำเนิดศักย์ไฟฟ้า 1.5 – 2.5 กิโลโวลต์ K_p เป็น 0.985 ในช่วงกำเนิดศักย์ไฟฟ้า 2.5 – 3.0 กิโลโวลต์และ K_p เป็น 0.990 ในช่วงกำเนิดศักย์ไฟฟ้า 3.0 – 3.5 กิโลโวลต์ โดยฟังก์ชันถูกนำไปปรับค่าอินพุตและเอาต์พุตให้ตรงกันมากที่สุดก่อนถูกส่งไปที่ฟังก์ชันจัดการข้อมูลและส่งต่อไปที่ SPI

จากการพัฒนาโปรแกรมสำหรับการอ่านค่าสัญญาณอนาลอกเพื่อแปลงเป็นสัญญาณดิจิตอล ซึ่งสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงจาก High voltage probe โดยอ่านค่าผ่าน ADC ของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino mega 2560 ซึ่งรับค่าเข้าที่ขาอนาลอก 0 เนื่องจากสัญญาณข้อมูลที่ได้มีการแกว่งทำให้การอ่านค่ามีความผิดพลาด ซึ่งแก้ไขด้วยการใช้งานฟังก์ชันลดการแกว่ง Moving average โดยข้อมูลที่อ่านค่าได้ถูกนำไปเฉลี่ยค่าเพื่อลดการแกว่ง ซึ่งได้เฉลี่ยค่าข้อมูล 200 ค่าในการอ่านค่าสัญญาณ นอกจากนี้การเก็บข้อมูลที่อินพุตและเอาต์พุตสามารถทำได้ ด้วยการบันทึกข้อมูลลงไฟล์ excel ซึ่งสามารถเพิ่มข้อมูลชื่อไฟล์และเพิ่มข้อมูลที่อยู่ไฟล์ได้

6.3 สรุปผลการใช้งานระบบกำเนิดสนามไฟฟ้าความต่างศักย์สูง

จากการทดลองระบบกำเนิดสนามไฟฟ้าความต่างศักย์สูงพบว่า สามารถกำเนิดศักย์ไฟฟ้าสูงได้ที่ช่วง 1.0 – 3.2 กิโลโวลต์ โดยมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดในการกำเนิดศักย์ไฟฟ้าเทียบกับค่าอินพุตมีค่าต่ำกว่า 5 % ซึ่งมีความละเอียดในการแปลงสัญญาณอยู่ที่ 2.5 mV/bit โดยการควบคุมและใช้งานผ่านโปรแกรมควบคุมซึ่งสามารถอินพุตพารามิเตอร์ต่างๆในการควบคุมและแสดงผล ขั้นแรกเป็นการรับค่าการเชื่อมต่อของซอฟต์แวร์ LabVIEW กับบอร์ดไมโคคอนโทรลเลอร์ Arduino ขั้นต่อมาเป็นการรับค่าความต้องการในการกำเนิดศักย์ไฟฟ้าสูง รับค่าความต้องการในการบันทึกข้อมูลลงไฟล์แบบ excel ซึ่งเพิ่มชื่อไฟล์และที่อยู่ไฟล์ได้ ระบบแสดงผลความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงถูกพัฒนาให้แสดงผล 2 รูปแบบคือแสดงผลแบบตัวเลขและแบบกราฟข้อมูล โดยข้อมูลที่ถูกนำมาแสดงผลประกอบด้วย ความต่างศักย์ไฟฟ้าอินพุต ความต่างศักย์ไฟฟ้าเอาต์พุตและเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดในการกำเนิดศักย์ไฟฟ้า นอกจากนี้ระบบควบคุมแบบย้อนกลับถูกออกแบบให้สามารถใช้งานได้ 2 โหมด คือ การใช้งานโหมดอัตโนมัติและโมหดใช้งานด้วยตนเอง ซึ่งสามารถใช้งานได้เมื่อมีความต่างการปรับแก้ไขลดเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดให้ลดลงมากที่สุด

6.4 ข้อเสนอแนะ

การเพิ่มช่วงของความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงให้สูงขึ้นสามารถทำได้ด้วยการศึกษาการพันขดลวดบนแกนหม้อแปลง Flyback และศึกษาแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลดให้มีค่าที่สูงขึ้น สำหรับการออกแบบชุดจับสารตัวอย่างสามารถแก้ไขหรือออกแบบให้ใช้งานง่ายกว่านี้ได้ แต่เนื่องจากข้อจำกัดในการใช้งานของอุปกรณ์นี้จึงถูกออกแบบให้สามารถใช้งานกับระบบเดิมเพื่อลดการใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นโดยไม่จำเป็นได้ สำหรับการพัฒนาโปรแกรมสามารถสร้างฟังก์ชันเพิ่มเติมในการวิเคราะห์ข้อมูลได้ อาทิ เช่น ฟังก์ชันวิเคราะห์แนวโน้มของกราฟ สำหรับอุปกรณ์ควบคุมควรมีการป้องกันอุปกรณ์ที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นเพื่อลดความเสียหายที่เกิดขึ้นได้ โดยปกติแล้วใช้ฉนวนไฟฟ้าช่วยในการป้องกัน

เอกสารอ้างอิง

เอกสารอ้างอิง

[1] แม้น อมรสิทธิ์ และคณะ. **หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ.** กรุงเทพฯ: ชวนพิมพ์ 50, 2558.

[2] เชิดศักดิ์ บุตรจอมชัย. **สมบัติของวัสดุ.** กรุงเทพฯ: เดแน็กซ์อินเตอร์คอร์ปอเรชั่น, 2558.

[3] สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน). **XAS Station Manual.** กรุงเทพฯ: กระทวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2559.

[4] Witchulada Kempet and et al. "Investigation of the Unit Cell Distortion in PZT Ceramic via in-situ XAS Technique", **Ferroelectrics.** 43(453): 106-112; 9 December, 2013.

[5] Witchulada Kempet and et al. "Polarization Switching of PZT under Electrical Field via in-situ Synchrotron X-ray Absorption Spectroscopy", **Ferroelectrics.** 46(492): 35-42; 17 February, 2016.

[6] Aizhi B. and et al. "Biological effects of high voltage electrostatic field on E. coli", **High Voltage Engineering.** 8(42): 2534-2539; August, 2016.

[7] Chen F. and et al. "Study on distribution characteristics of diamond particles under high-voltage electrostatic field", **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.** (96): 1394-1401; 12 February, 2018.

[8] Guibao S. and et al. "Experiment on egg preservation by high voltage electrostatic field", **Transactions of the CSAE.** 10(25): 318-323; October, 2009.

[9] พงษ์ศักดิ์ ชินนาบุญ. **ฟิสิกส์มหาวิทยาลัย 2 เล่ม 1.** กรุงเทพฯ: วิทยพัฒน์, 2554.

[10] ปิยพงษ์ สิทธิคง. **ฟิสิกส์ 2 ระดับอุดมศึกษา.** กรุงเทพฯ: ท้อป, 2559.

[11] John David Jackson. **Classical Electrodynamics.** New York: John Wiley&Sons, 1962.

[12] Microchip Technology Inc. **8/10/12-Bit Dual Voltage Output Digital-to-Analog Converter with SPI Interface.** New York: Microchip Technology Inc., 2010.

[13] Thomas L. Floyd. **Digital Fundamentals.** New York: Courier Kendallville, 2015.

[14] จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. **การทดลองระบบควบคุมป้อนกลับ.** ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2556.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

[15] Seborg D. E. **Process Dynamics and Control**. New York: John Wiley&Sons, 1989.

[16] Stephenapoulos G. **Chemical Process Control.** Prentice-Hall: Englewood Cliffs, 1984.

[17] Microchip Technology Inc. **8/10/12-Bit Dual Voltage Output Digital-to-Analog Converter with SPI Interface.** New York: Microchip Technology Inc., 2010.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
ผลงานการตีพิมพ์วิจัย

Journal of Physics: Conference Series

PAPER • OPEN ACCESS

The controller and monitoring system of 1-10 kV high voltage power supply

To cite this article: B Angmanee *et al* 2018 *J. Phys.: Conf. Ser.* **1144** 012146

View the article online for updates and enhancements.

IOP ebooks™

Bringing you innovative digital publishing with leading voices to create your essential collection of books in STEM research.

Start exploring the collection - download the first chapter of every title for free.

This content was downloaded from IP address 202.28.50.200 on 20/12/2018 at 04:11

Siam Physics Congress 2018 (SPC2018) : A Creative Path to Sustainable Innovation IOP Publishing
IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series **1144** (2018) 012146 doi:10.1088/1742-6596/1144/1/012146

The controller and monitoring system of 1-10 kV high voltage power supply

B Angmanee[1] C Ekwongsa[2] and A Thedsakhulwong[1*]

[1] Department of Physics, Faculty of science, Ubon Ratchathani University, 85, Sathonlamark Rd. Warinchamrab, Ubon Ratchathani, 34190, Thailand
[2] School of Physics, Suranaree University of Technology, 111, University Rd, Muang Nakhon Ratchasima, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

[*]Email: amorn.t@ubu.ac.th

Abstract. The controller and monitoring system of 1-10 kV high voltage power supply was developed. The system composed of an Arduino mega 2560 microcontroller boards, a digital to analog conversion (DAC) part, a high voltage module and the designed software on a personal computer. The software was developed by LabVIEW software for controlled the high voltage module and displayed the high voltage values. The microcontroller board used for the digital data transmission to the DAC part and converted the high voltage value to digital data for monitoring. The DAC part generated the analog signal from a board for adjusting a high voltage value of a module. The completed system can be controlled the high voltage and the real-time monitored the high voltage value of a module with the resolution of 2.5 V. The error of actual high voltage values with the setting one was maximum of 5%

1. Introduction

The high voltage (HV) applications have received a lot of attention over the years. It is well known that high voltage power can cause electric fields [1], [2]. Based on research in biology, the researchers introduced high voltage to study the effects of E. coli bacteria on living under the electric field of 4 kV/cm [3]. In engineering research, high voltage has been used to study the distribution of diamond particles for grinding and abrasive coatings that using a high voltage of 6 kV, which results in a more uniform distribution than the conventional ones [4]. In addition, the research on the agricultural thread has introduced high voltage to study the condition of eggs, which use the electric field from 30 kV/m, 60 kV/m and 90 kV/m [5]. And recently, the study of materials science has studied the properties of materials that change under the power of electric fields in the range of 700 V/mm to 2 kV/mm, which stimulate materials by synchrotron light sources in the energy range of x-ray. Some properties of the material change [6], [7]. However, the inaccuracies and the precision in these researches are the handlings of high voltage control systems. In this paper, we focus on studying and creating high voltage generators that provide precise voltage control that can be controlled and monitored on a computer. In our experiment, we used the Arduino Mega 2560 board for the interface and developed the control system with LabVIEW software. We can control the high voltage generator in the range of 1 kV to 10 kV so that it can be applied to other research. To be more precise. The experimental details are shown in Part 2, the analysis and discussions are shows in part 3, and the summary is shown in Part 4.

Content from this work may be used under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 licence. Any further distribution of this work must maintain attribution to the author(s) and the title of the work, journal citation and DOI.
Published under licence by IOP Publishing Ltd

Siam Physics Congress 2018 (SPC2018) : A Creative Path to Sustainable Innovation IOP Publishing
IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series **1144** (2018) 012146 doi:10.1088/1742-6596/1144/1/012146

2. Experimental

2.1 The circuit designing

In generating the high voltage, we used the module for high voltage generators and connected to the Arduino mega 2560 control board. The circuit shown in Figure 1 is a circuit specially designed for high voltage generation. Figure 1(a) Show about the Arduino mega 2560 is used to connect to computers and electronic circuits. Figure 1(b) show about the digital to analog converter circuit (DAC) MCP4922 is used to convert the signal from the board. Figure 1(c) are amplifier circuit (non-inverting amplifier circuit) LM358. Figure 1(d) drives the current circuit (P55NF06) and Figure 1(e) is high voltage module.

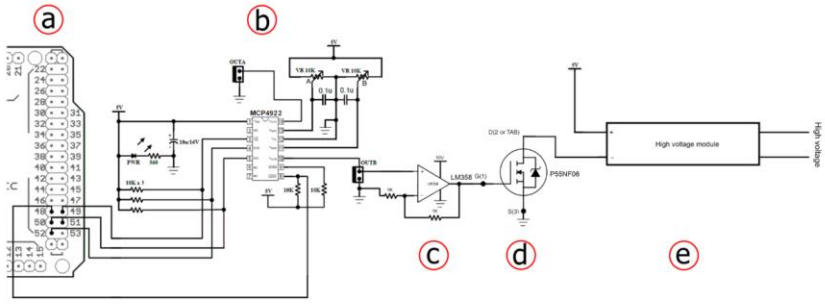


Figure 1. The high voltage circuit parts **a)** an Arduino mega 2560 board **b)** Digital to analog converter circuit (DAC) MCP4922 **c)** an amplifier circuit **d)** a current driver circuit (P55NF06) and **e)** the high voltage module.

The high voltage values were adjusted by varies the digital value in the application on a computer. The Arduino board received the data and transmit to DAC circuits then convert to analog form. The signals were amplified by an amplifier circuit for drives the high voltage module by a driver circuit. The appearance high voltage values were monitored by the high voltage probe and collected by the program on a computer via the Arduino board as shown in Figure 2.

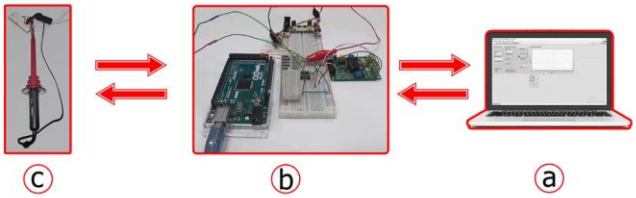


Figure 2. The controller and monitoring system **a)** the computer used for controls and collects the data. **b)** The electronic circuit part. **c)** The high voltage output and the high voltage probe.

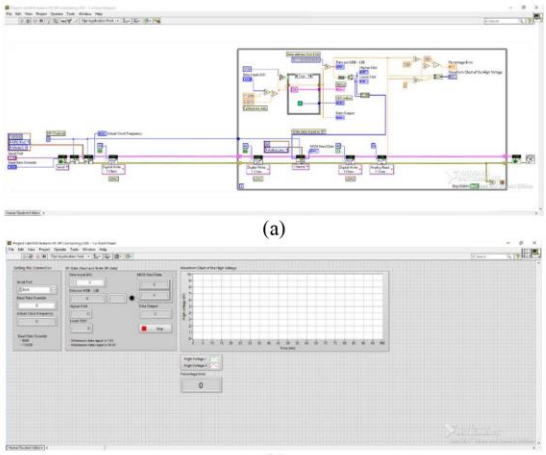
2.2 The software designing

The development of control systems using the LabVIEW software (Home Edition) interface with Arduino board. The control is divided into two parts, as part of the development of the application program for processing LINX applications and part of a window for control, parameter setting, and display in high voltage generators.

Siam Physics Congress 2018 (SPC2018) : A Creative Path to Sustainable Innovation IOP Publishing
IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series **1144** (2018) 012146 doi:10.1088/1742-6596/1144/1/012146

3. Results and Discussion

The program development is divided into the two-part with the part of the controlling panel and the part of the program processing panel. Shown in Figure 3.

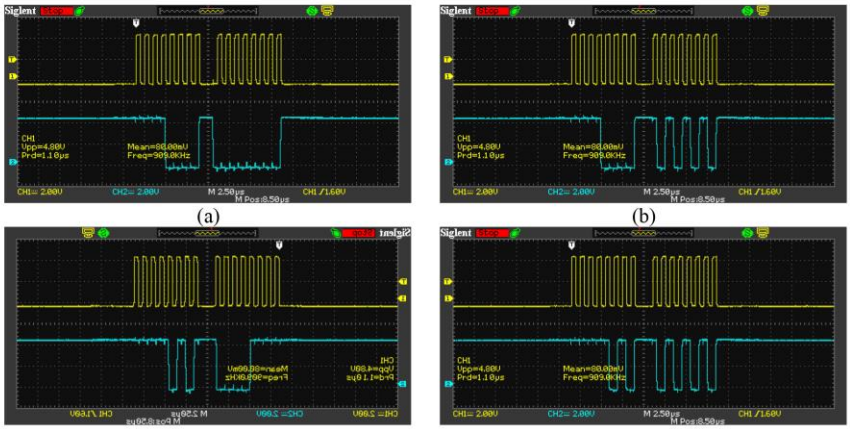


(a)

(b)

Figure 3. Shown about the development program of the panel on the computer control system. a) The panel of the processing program is used to send and receive the data with the electronic circuit part. b) The panel of the monitoring is used to set the parameter to generate the high voltage and to display the data from generating.

The digital data transmission from the Arduino board to DAC via the SPI bus with 16-bit data transfer. Figure 4 shown the comparison of SCLK and MOSI waveform with the various data.



(a) (b)

(c) (d)

Figure 4. characteristics of digital signals, the clock signal is measured by a 16 bit oscilloscope **a)** send digital information to 1111 0000 0000 0000 **b)** Send digital information to 1111 0000 1010 1010 **c)** send digital information to 1111 0000 1010 0000 And **d)** send digital information to 1111 1010 1010 1010.

Siam Physics Congress 2018 (SPC2018) : A Creative Path to Sustainable Innovation IOP Publishing
IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series **1144** (2018) 012146 doi:10.1088/1742-6596/1144/1/012146

Figure 5 shown the relation between the digital values and the DAC output voltage. The analog output was linearity with the R^2 = 1 and 1.22 mV/bit resolution. The results have shown that the analog output can be adjusted by the developed program on a computer.

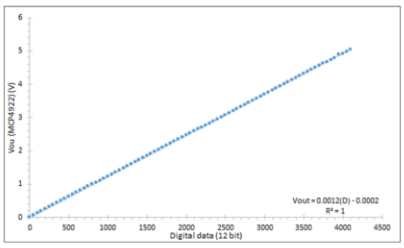


Figure 5. The relation between the digital values and the DAC output voltage.

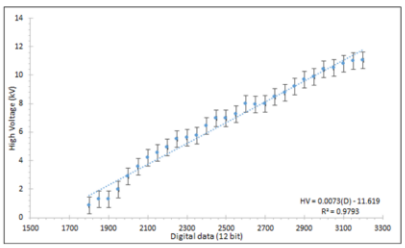


Figure 6. The relation between the digital value and the high voltage output of the high voltage module.

Figure 6 shown the relation between the digital value and the high voltage output of the high voltage module. The high voltage value can be varied in the range of 1 - 10 kV with the input digital values in the range of 0 - 1700. The high voltage output closely linear with the R^2 = 0.9793 and the 2.5 V/bit resolution. The appearance high voltage value can be monitored by the probe and displayed in the developed program on a computer. The error has occurred over this digital range was 5% maximum.

4. Conclusion

In this work, the high voltage is generated from a high voltage module in the range of 1 kV to 10 kV. The error was occurred over this digital range was 5% maximum. In the controller used the developed program on a computer for connection to an Arduino mega 2560 board and an electronic circuit. The high voltage values can be varied and real-time monitoring with the program.

References

[1] Jackson J D 1962 *Classical Electrodynamics* chapter 1 p 1–44
[2] Edminister J A 1993 *Electromagnetics* vol 2 chapter 1-8 p 1–134
[3] Aizhi B, Ruiyun L, Xinyu W, Xiaowei Y and Hongjian Y 2016 *High Voltage Engineering* **42** 2534-2539
[4] Chen F, Zhang L, Yin S, Huang S, Tang Q 2018 *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **96** 1393-1401
[5] Guibao S, Xinxin W and Guodong P 2009 *Transactions of the CSAE* **25** 318-323
[6] Kempet W, Marungsri B, Yimnirun R, Klysubun W, and Pojprapai S 2013 *Ferroelectrics* **453** 106-112
[7] Kempet W, Marungsri B, Yimnirun R, Klysubun W, Fangsuwannarak T, Rattanachan S, Pisitpipathsin N, Promsawat M and Pojprapai S 2016 *Ferroelectric* **492** 35-42

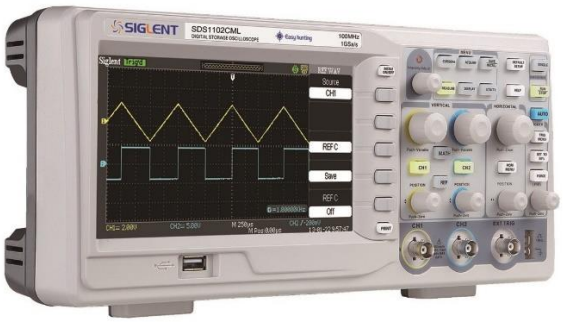
ภาคผนวก ข
วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

ภาพที่ ก.1 High voltage Probe 40kV ยี่ห้อ Testec รุ่น TT-HVP40

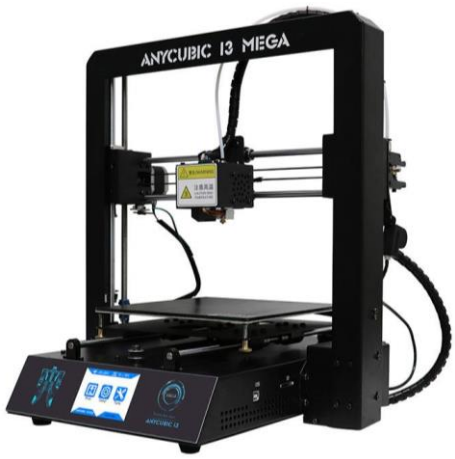
ภาพที่ ก.2 Power supply ยี่ห้อ Agilent รุ่น E3631A

ภาพที่ ก.3 Digital multimeter ยี่ห้อ Agilent รุ่น 34405A

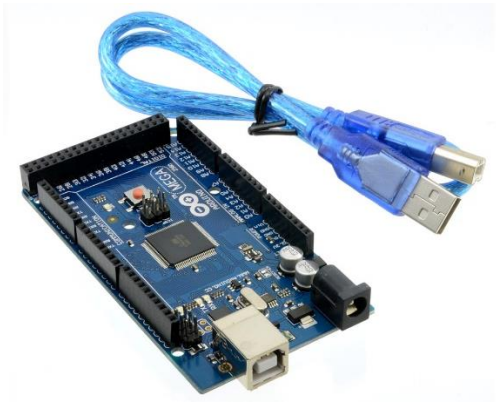
ภาพที่ ก.4 Digital multimeter ยี่ห้อ Kyoritsu รุ่น KEW 1011



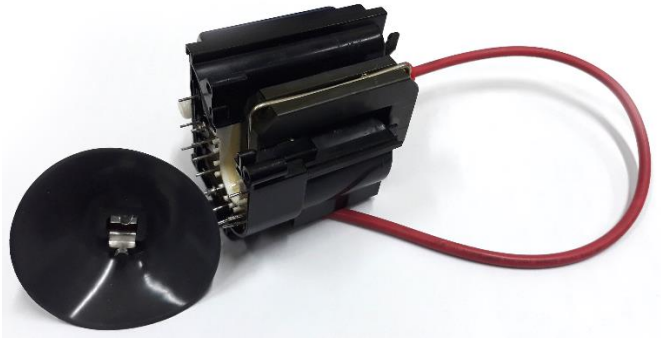
ภาพที่ ก.5 Oscilloscope ยี่ห้อ Siglent รุ่น SDS 1102CML



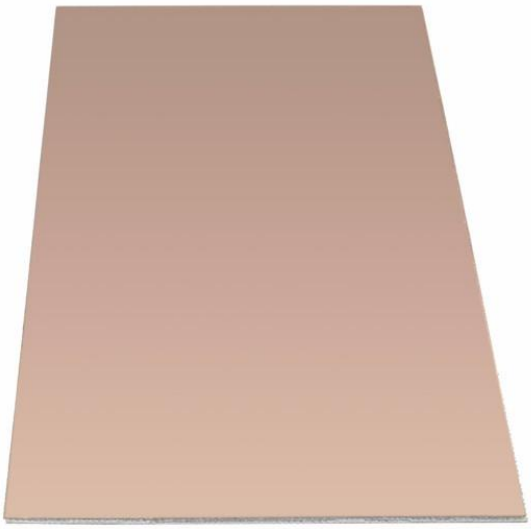
ภาพที่ ก.6 3D Printer ยี่ห้อ Anycubic I3 Mega



ภาพที่ ก.7 ไมโครคอนโทรลเลอร์ ยี่ห้อ Arduino รุ่น MEGA 2560 พร้อมสายเชื่อมต่อ USB



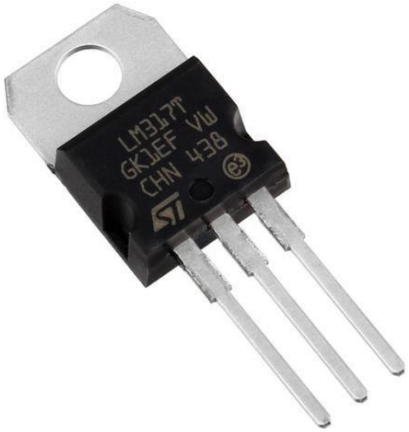
ภาพที่ ก.8 หม้อแปลง High voltage (Flyback) ยี่ห้อ Samsung



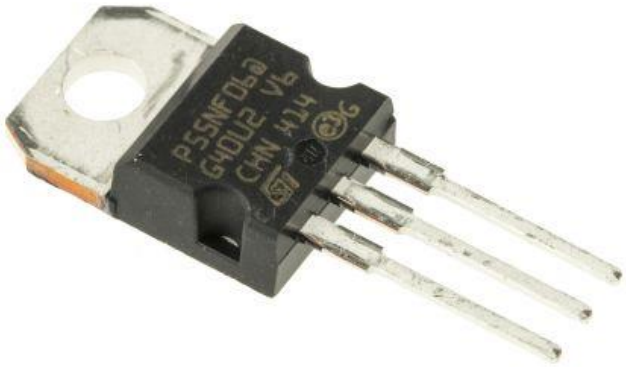
ภาพที่ ก.9 แผ่น Printed circuit board (PCB) สำหรับทำวงจรอิเล็กทรอนิกส์

ภาพที่ ก.10 กรดกัดทองแดง (Ferric chloride)

ภาพที่ ก.11 วงจรรวมแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาลอก ขนาด 12 bit (MCP4922)



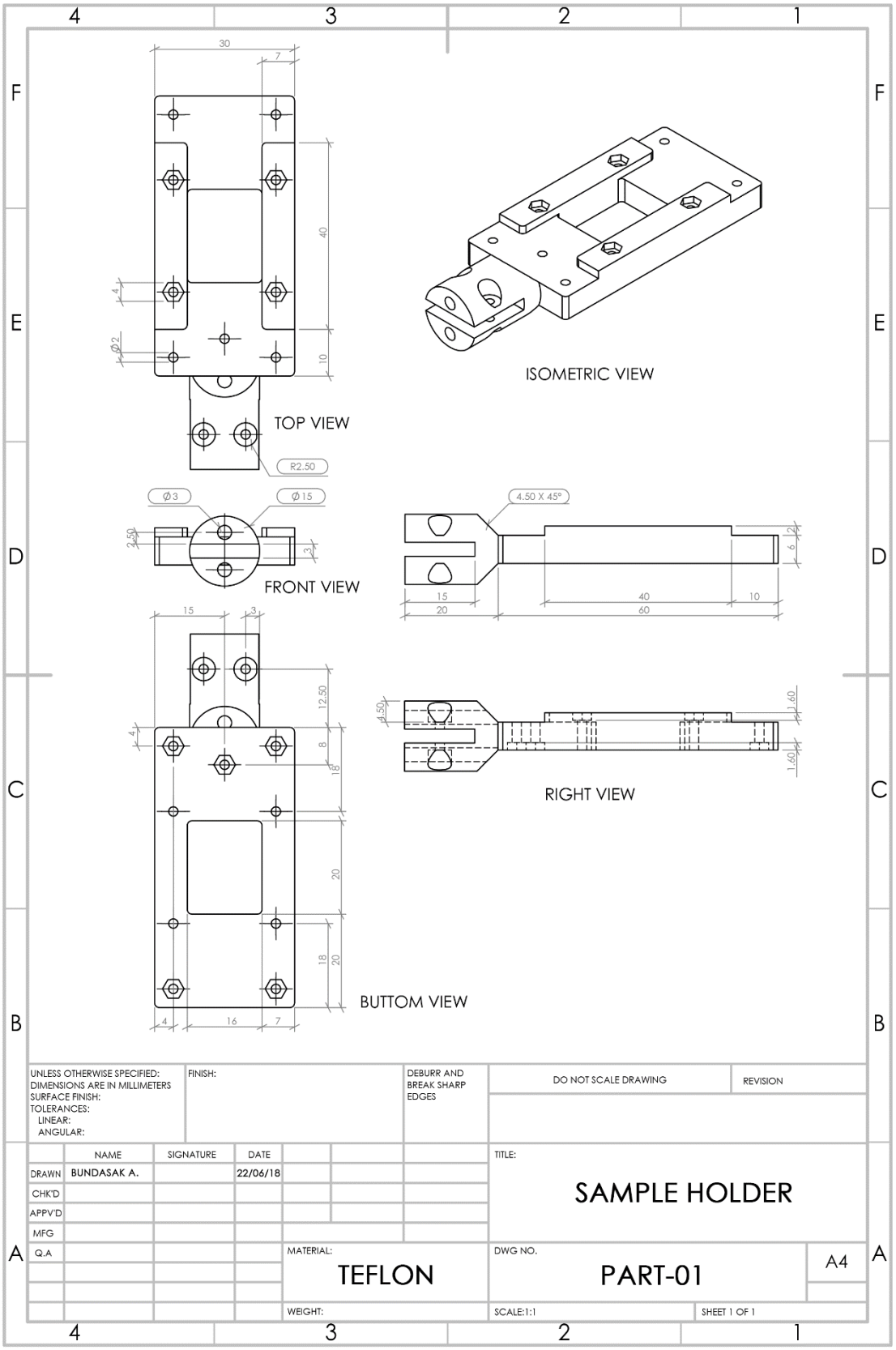
ภาพที่ ก.12 ไอซีสำหรับเพิ่มกระแสไฟฟ้า (LM317)

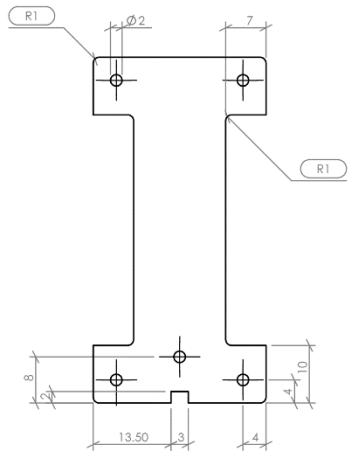


ภาพที่ ก.13 MOSFET N Channel (P55NF06)

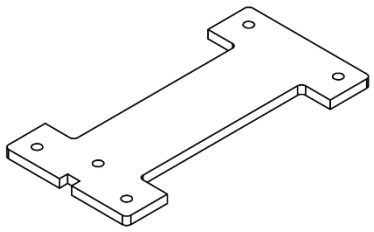
ภาพที่ ก.14 ซอฟต์แวร์ LabVIEW Home Edition 2014

ภาคผนวก ค
ภาพการออกแบบชิ้นส่วนอุปกรณ์สำหรับงานวิจัย


TOP VIEW
ISOMETRIC VIEW
FRONT VIEW
RIGHT VIEW
BUTTOM VIEW
R2.50
Ø3
Ø15
4.50 X 45°
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES:
LINEAR:
ANGULAR:
FINISH:
DEBURR AND BREAK SHARP EDGES
DO NOT SCALE DRAWING
REVISION
NAME
SIGNATURE
DATE
DRAWN
BUNDASAK A.
22/06/18
CHK'D
APPV'D
MFG
Q.A
TITLE:
SAMPLE HOLDER
MATERIAL:
TEFLON
DWG NO.
PART-01
A4
WEIGHT:
SCALE:1:1
SHEET 1 OF 1

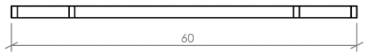


TOP VIEW



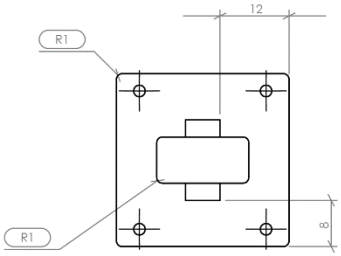
ISOMETRIC VIEW

FRONT VIEW

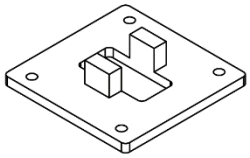


RIGHT VIEW

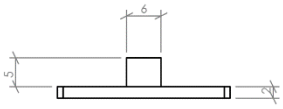
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:	FINISH:			DEBURR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
	NAME	SIGNATURE	DATE		TITLE:	
DRAWN	BUNDASAK A.		22/06/18		ELECTRIC CONDUCTOR PLATE-01	
CHK'D						
APPV'D						
MFG						
Q.A				MATERIAL: COPPER	DWG NO. PART-02	A4
				WEIGHT:	SCALE:1:1	SHEET 1 OF 1



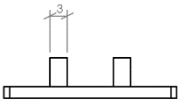
TOP VIEW



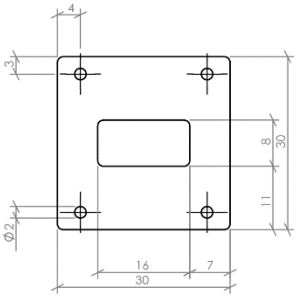
ISOMETRIC VIEW



FRONT VIEW

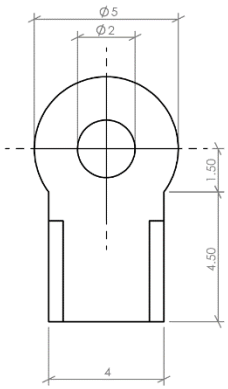


RIGHT VIEW

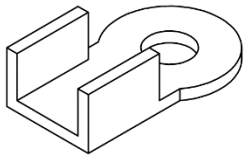


BUTTOM VIEW

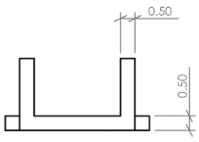
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:	FINISH:			DEBURR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
	NAME	SIGNATURE	DATE		TITLE:	
DRAWN	BUNDASAK A.		22/06/18		ELECTRIC CONDUCTOR PLATE-02	
CHK'D						
APPV'D						
MFG						
Q.A				MATERIAL: COPPER	DWG NO. PART-03	A4
				WEIGHT:	SCALE:1:1	SHEET 1 OF 1



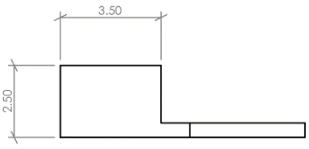
TOP VIEW



ISOMETRIC VIEW

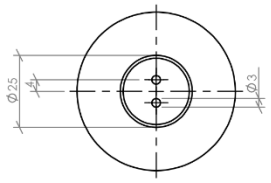


FRONT VIEW

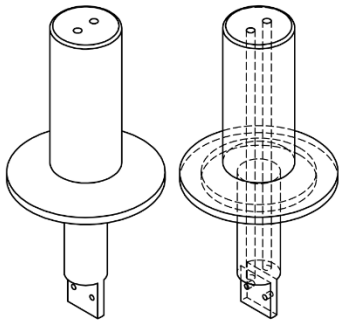


RIGHT VIEW

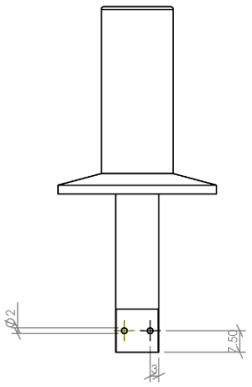
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:	FINISH:		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION	
	NAME	SIGNATURE	DATE	TITLE:		
DRAWN	BUNDASAK A.		25/06/18	ELECTRODE		
CHK'D						
APPV'D						
MFG						
Q.A				MATERIAL: COPPER	DWG NO. PART-04	A4
				WEIGHT:	SCALE:5:1	SHEET 1 OF 1



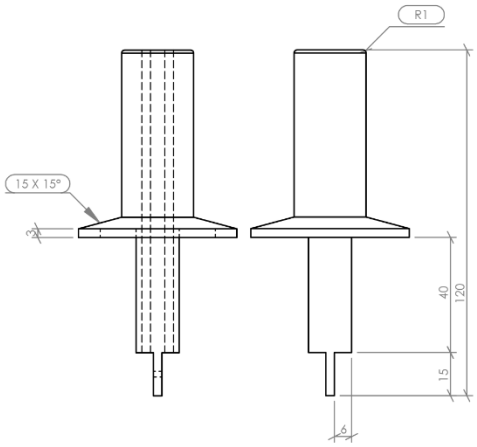
TOP VIEW



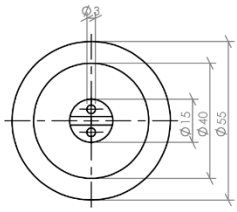
ISOMETRIC VIEW



FRONT VIEW

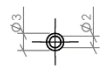


RIGHT VIEW

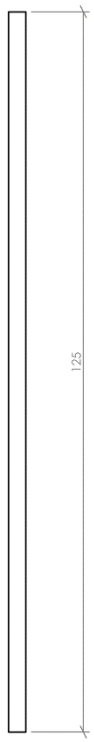


BUTTOM VIEW

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:	FINISH:			DEBURR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
	NAME	SIGNATURE	DATE		TITLE:	
DRAWN	BUNDASAK A.		25/06/18		SAMPLE HOLDER BASE	
CHK'D						
APPV'D						
MFG						
Q.A				MATERIAL: STAINLESS STEEL 304	DWG NO. PART-05	A4
				WEIGHT:	SCALE:1:2	SHEET 1 OF 1



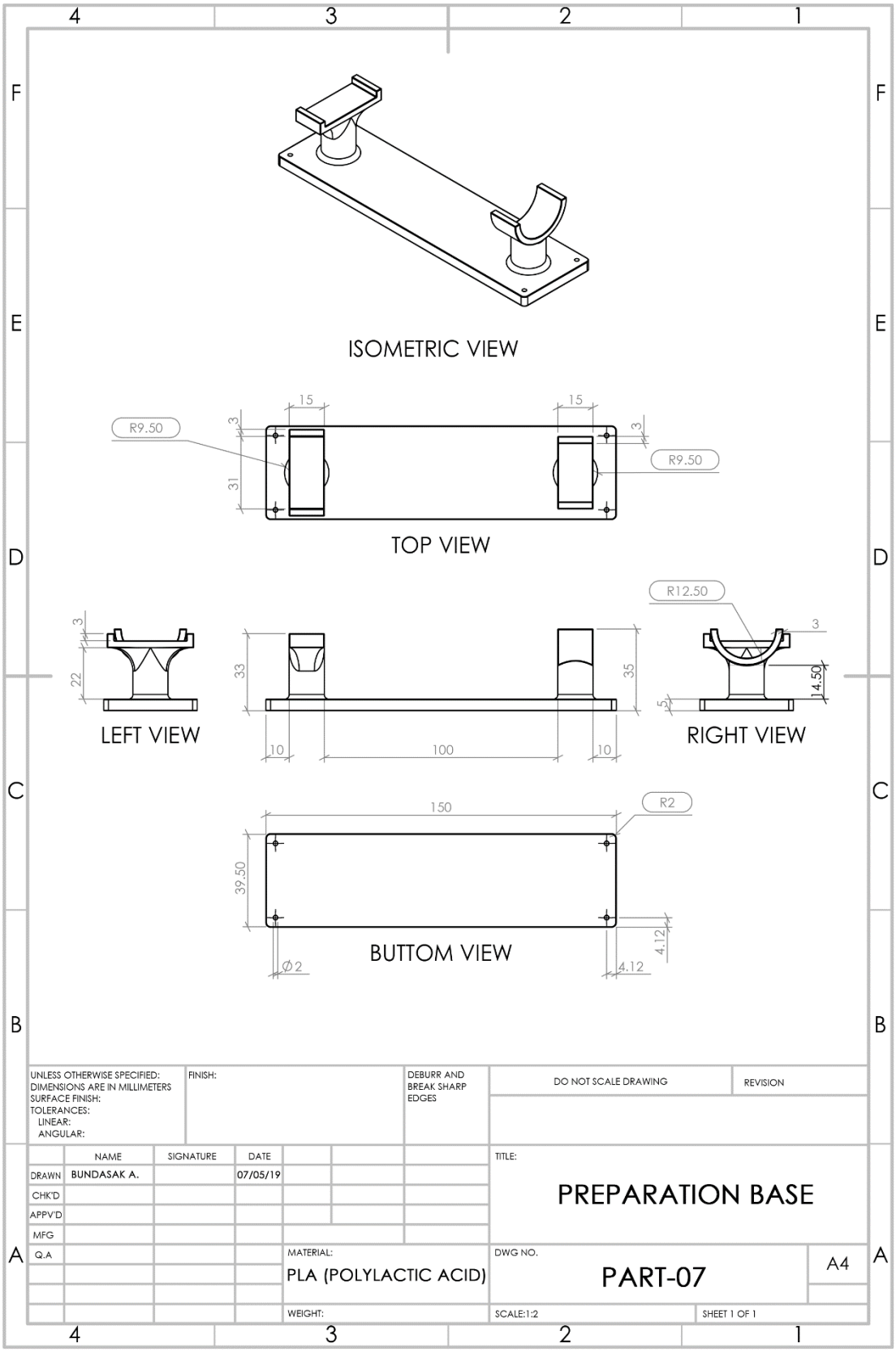
TOP VIEW

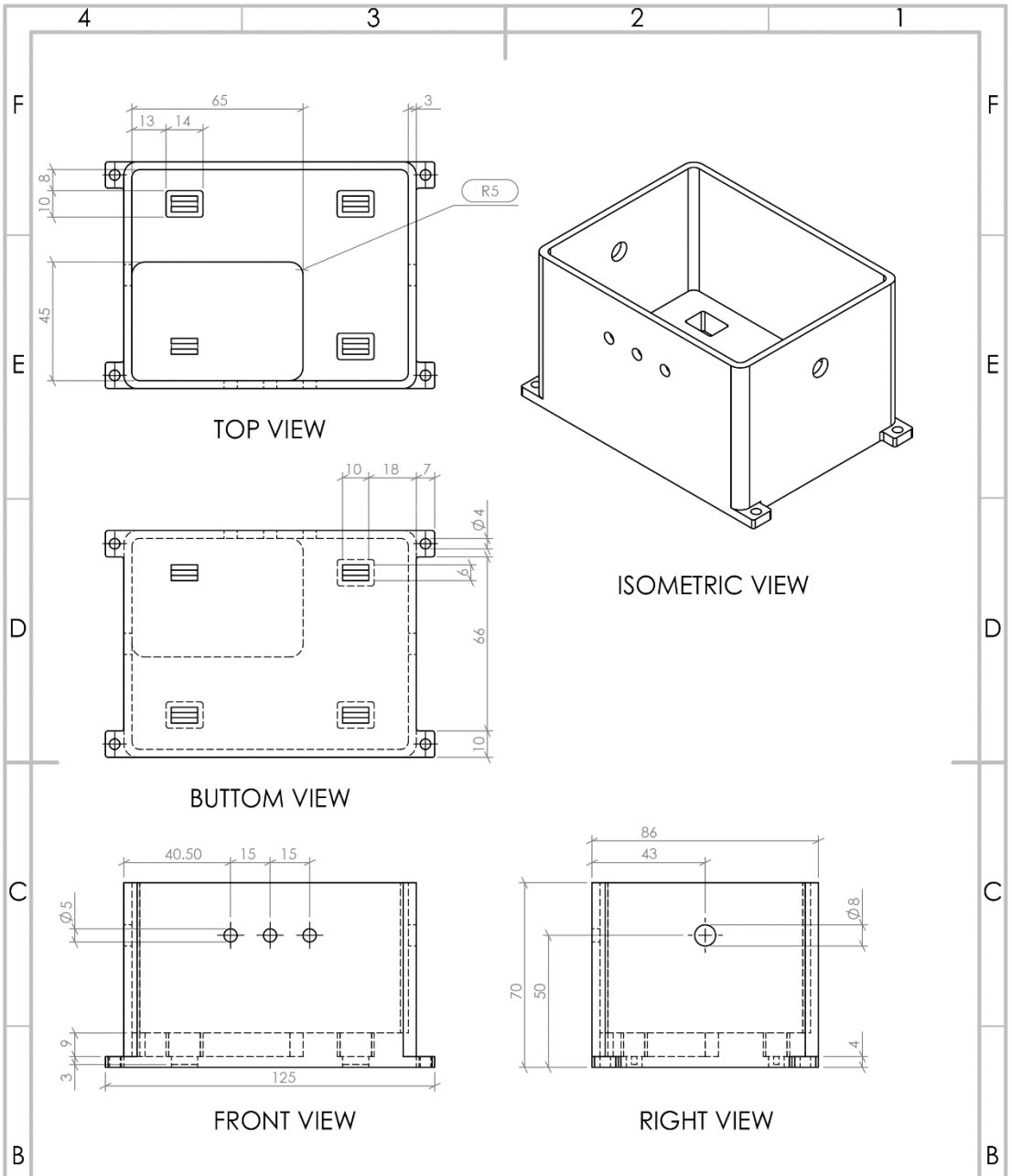


FRONT VIEW

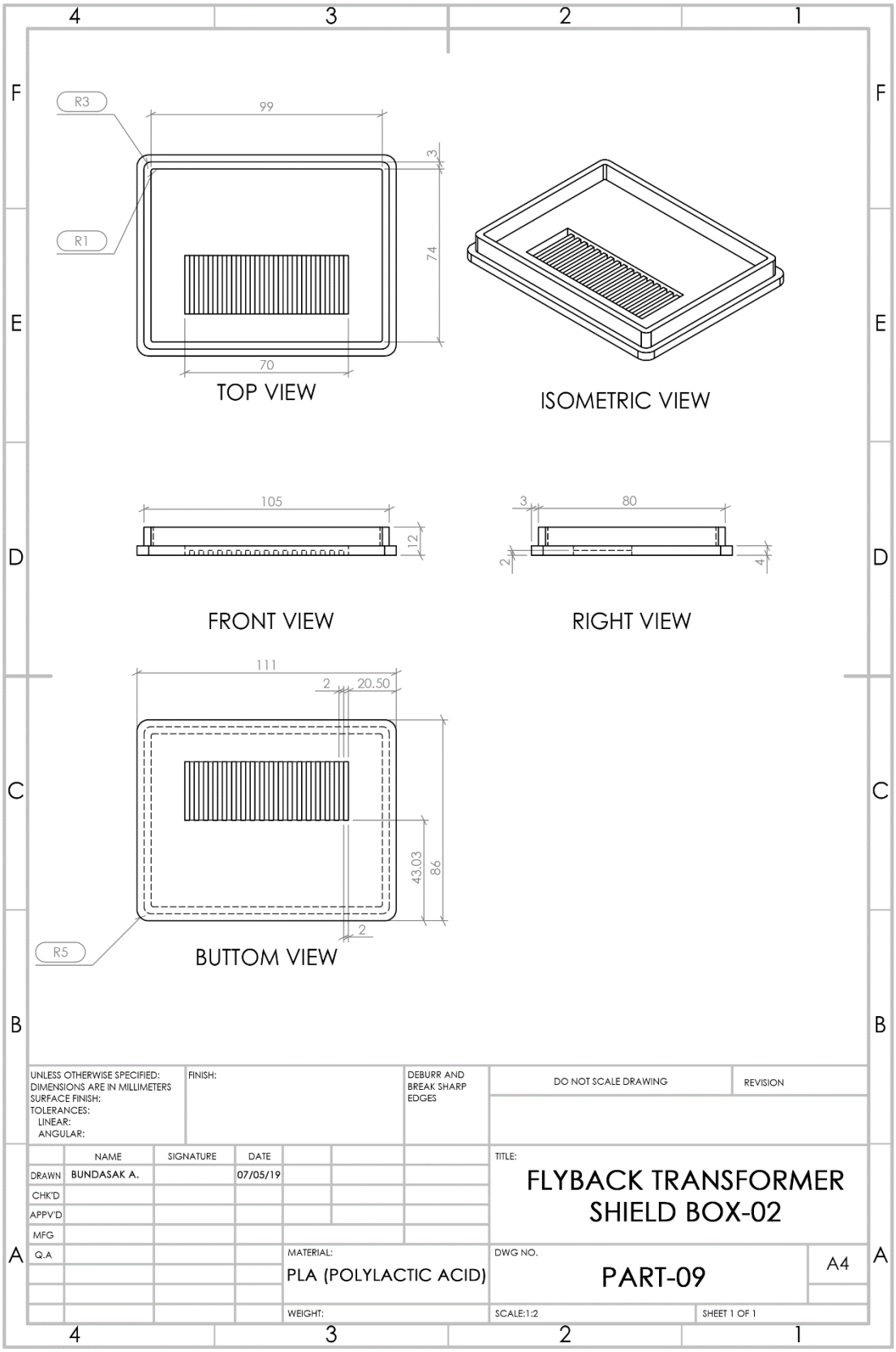
RIGHT VIEW

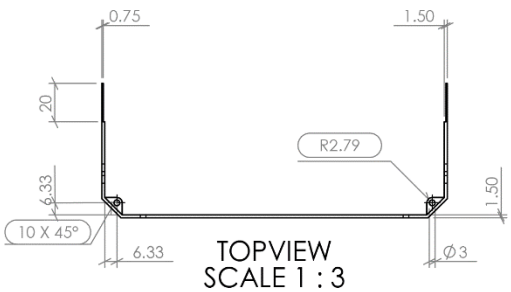
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:	FINISH:			DEBURR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION	
	NAME	SIGNATURE	DATE		TITLE:		
DRAWN	BUNDASAK A.		25/06/18		INSULATED PIPE		
CHK'D							
APPV'D							
MFG							
Q.A				MATERIAL: CERAMIC (ALUMINA)	DWG NO. PART-06	A4	
				WEIGHT:	SCALE:1:1	SHEET 1 OF 1	


ISOMETRIC VIEW
TOP VIEW
R9.50
R9.50
15
15
3
3
31
LEFT VIEW
22
3
33
35
10
100
10
RIGHT VIEW
R12.50
3
14.50
5
BUTTOM VIEW
150
R2
39.50
4.12
4.12
Ø2
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES:
LINEAR:
ANGULAR:
FINISH:
DEBURR AND BREAK SHARP EDGES
DO NOT SCALE DRAWING
REVISION
NAME
SIGNATURE
DATE
DRAWN
BUNDASAK A.
07/05/19
CHK'D
APPV'D
MFG
Q.A
TITLE:
PREPARATION BASE
MATERIAL:
PLA (POLYLACTIC ACID)
DWG NO.
PART-07
A4
WEIGHT:
SCALE:1:2
SHEET 1 OF 1

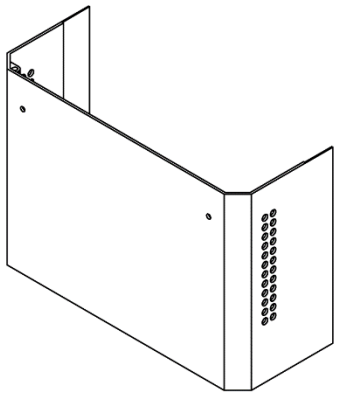


UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:	FINISH:	DEBURR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION	
	NAME	SIGNATURE	DATE	TITLE: FLYBACK TRANSFORMER SHIELD BOX-01	
DRAWN	BUNDASAK A.		07/05/19		
CHK'D					
APPV'D					
MFG					
Q.A				MATERIAL: PLA (POLYLACTIC ACID)	DWG NO. PART-08 A4
				WEIGHT:	SCALE:1:2 SHEET 1 OF 1

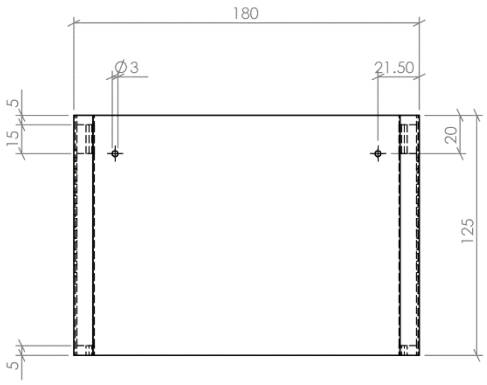

R3
R1
99
3
74
70
TOP VIEW
ISOMETRIC VIEW
105
12
FRONT VIEW
3
80
2
4
RIGHT VIEW
111
2
20.50
43.03
86
2
R5
BUTTOM VIEW
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES:
LINEAR:
ANGULAR:
FINISH:
DEBURR AND BREAK SHARP EDGES
DO NOT SCALE DRAWING
REVISION
NAME
SIGNATURE
DATE
DRAWN
BUNDASAK A.
07/05/19
CHK'D
APPV'D
MFG
Q.A
TITLE:
FLYBACK TRANSFORMER SHIELD BOX-02
MATERIAL:
PLA (POLYLACTIC ACID)
DWG NO.
PART-09
A4
WEIGHT:
SCALE:1:2
SHEET 1 OF 1



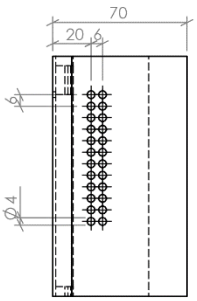
TOPVIEW
SCALE 1 : 3



ISOMETRIC VIEW
SCALE 1 : 3

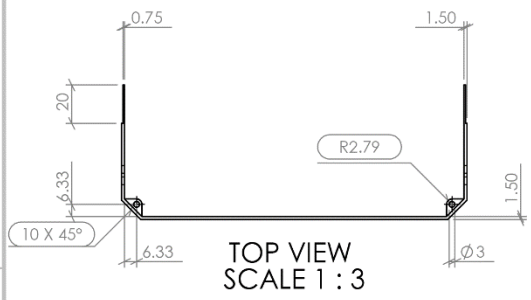


FRONT VIEW
SCALE 1 : 3

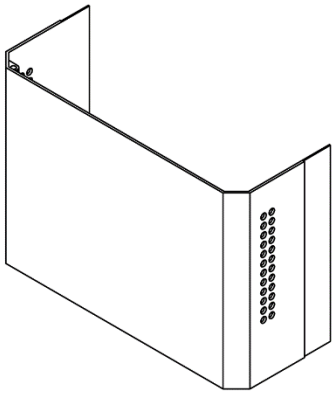


RIGHT VIEW
SCALE 1 : 3

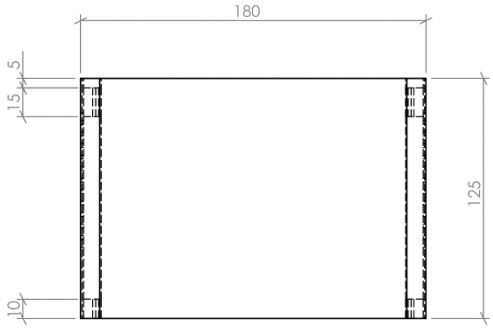
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:	FINISH:			DEBURR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
	NAME	SIGNATURE	DATE		TITLE:	
DRAWN	BUNDASAK A.		07/05/19		CONTROL BOX-01	
CHK'D						
APPV'D						
MFG						
Q.A				MATERIAL: PLA (POLYLACTIC ACID)	DWG NO. PART-10	A4
				WEIGHT:	SCALE:1:3	SHEET 1 OF 1



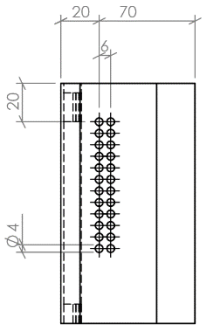
TOP VIEW
SCALE 1 : 3



ISOMETRIC VIEW
SCALE 1 : 3

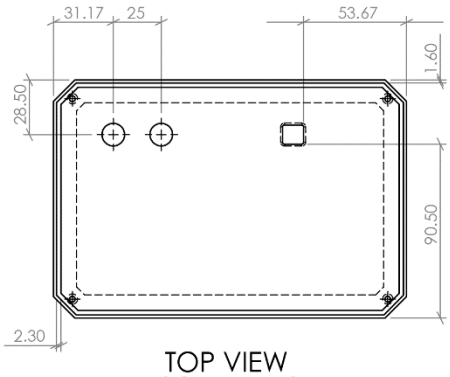


FRONT VIEW
SCALE 1 : 3

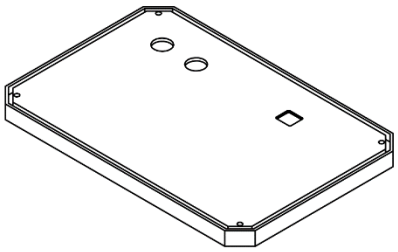


RIGHT VIEW
SCALE 1 : 3

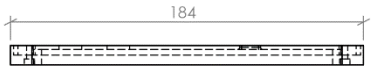
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:	FINISH:			DEBURR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
	NAME	SIGNATURE	DATE		TITLE:	
DRAWN	BUNDASAK A.		07/05/19		CONTROL BOX-02	
CHK'D						
APPV'D						
MFG						
Q.A				MATERIAL: PLA (POLYLACTIC ACID)	DWG NO. PART-11	A4
				WEIGHT:	SCALE:1:3	SHEET 1 OF 1



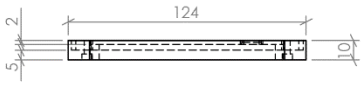
TOP VIEW
SCALE 1 : 3



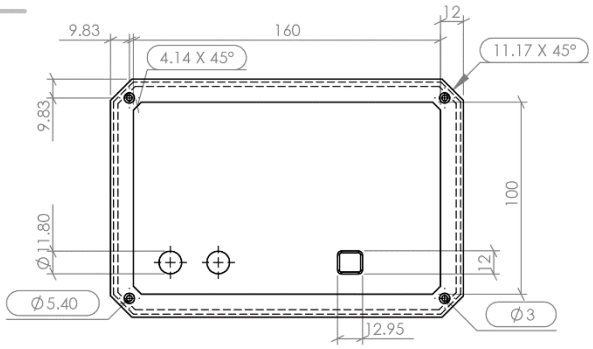
ISOMETRIC VIEW
SCALE 1 : 3



FRONT VIEW
SCALE 1 : 3

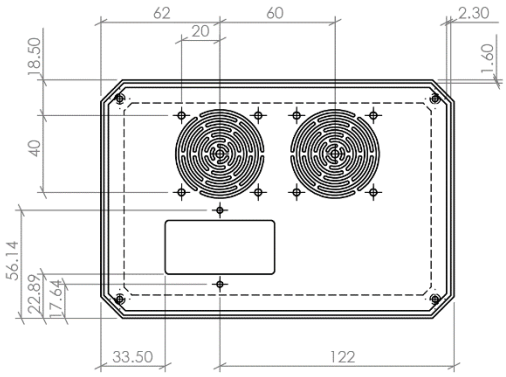


RIGHT VIEW
SCALE 1 : 3

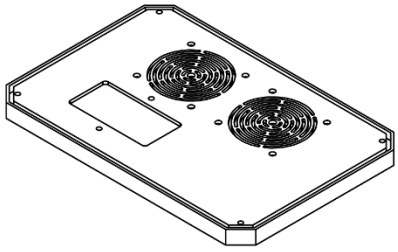


BUTTOM VIEW
SCALE 1 : 3

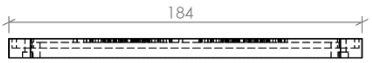
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:	FINISH:			DEBURR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
	NAME	SIGNATURE	DATE		TITLE:	
DRAWN	BUNDASAK A.		07/05/19		CONTROL BOX-03	
CHK'D						
APPV'D						
MFG						
Q.A				MATERIAL: PLA (POLYLACTIC ACID)	DWG NO. PART-12	A4
				WEIGHT:	SCALE:1:3	SHEET 1 OF 1



TOP VIEW
SCALE 1 : 3

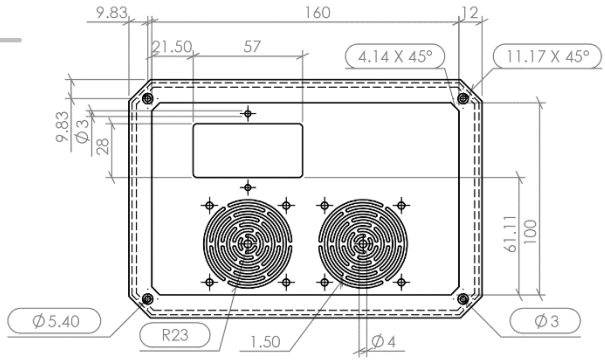


ISOMETRIC VIEW
SCALE 1 : 3



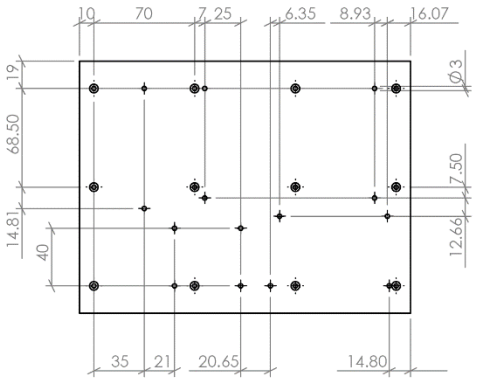
FRONT VIEW
SCALE 1 : 3

RIGHT VIEW
SCALE 1 : 3

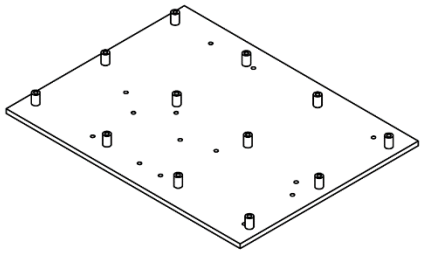


BUTTOM VIEW
SCALE 1 : 3

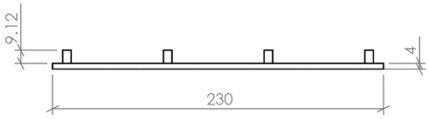
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:	FINISH:			DEBURR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
	NAME	SIGNATURE	DATE		TITLE:	
DRAWN	BUNDASAK A.		07/05/19		CONTROL BOX-04	
CHK'D						
APPV'D						
MFG						
Q.A				MATERIAL: PLA (POLYLACTIC ACID)	DWG NO. PART-13	A4
				WEIGHT:	SCALE:1:3	SHEET 1 OF 1



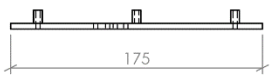
TOP VIEW
SCALE 1 : 4



VIEW
SCALE 1 : 4

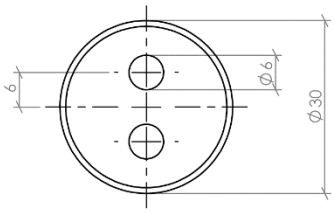


FRONR VIEW
SCALE 1 : 4

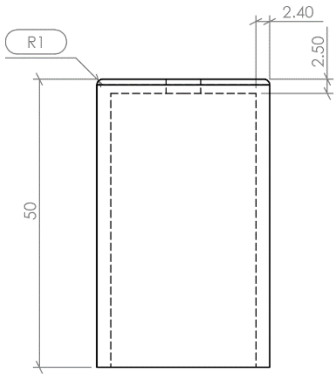


RIGHT VIEW
SCALE 1 : 4

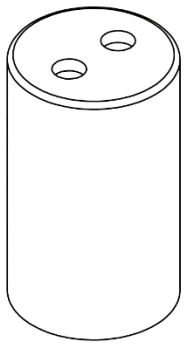
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:	FINISH:			DEBURR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
	NAME	SIGNATURE	DATE		TITLE:	
DRAWN	BUNDASAK A.		07/05/19		ELECTRONICS BASE	
CHK'D						
APPV'D						
MFG						
Q.A				MATERIAL: PLA (POLYLACTIC ACID)	DWG NO. PART-14	A4
				WEIGHT:	SCALE:1:4	SHEET 1 OF 1



TOP VIEW

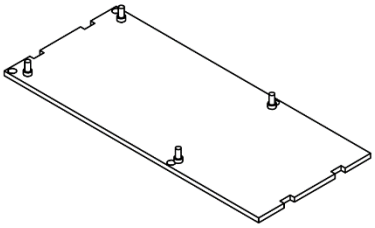


FRONT VIEW

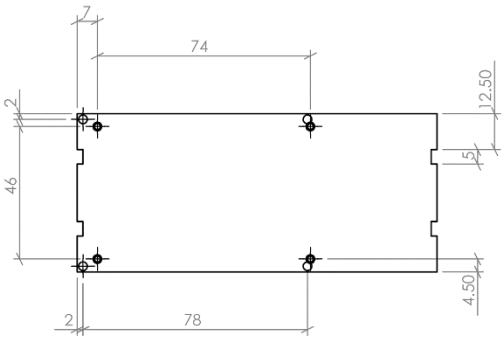


ISOMETRIC VIEW

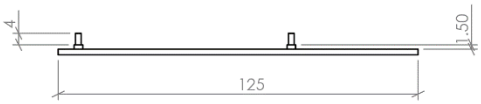
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:	FINISH:			DEBURR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
	NAME	SIGNATURE	DATE		TITLE:	
DRAWN	BUNDASAK A.		07/05/19		ELECTRICAL CONNECTOR	
CHK'D						
APPV'D						
MFG						
Q.A				MATERIAL: PLA (POLYLACTIC ACID)	DWG NO. PART-15	A4
				WEIGHT:	SCALE:1:1	SHEET 1 OF 1



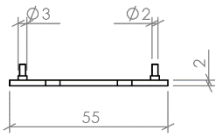
ISOMETRIC VIEW



TOP VIEW

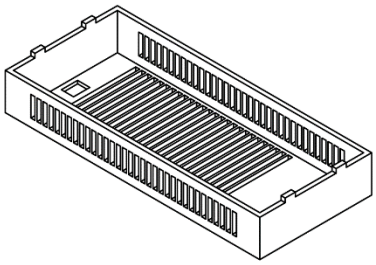


FRONT VIEW

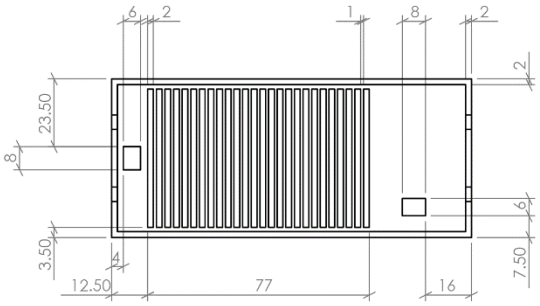


RIGHT VIEW

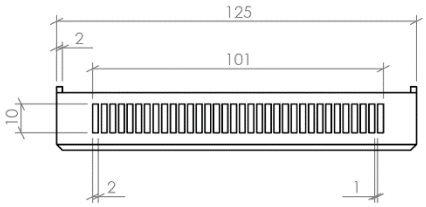
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
	NAME	SIGNATURE	DATE			TITLE: HIGH VOLTAGE PROBE SHIELD BOX-01	
DRAWN	BUNDASAK A.		07/05/19				
CHK'D							
APPV'D							
MFG							
Q.A				MATERIAL: PLA (POLYLACTIC ACID)		DWG NO. PART-16	A4
				WEIGHT:		SCALE:1:2	SHEET 1 OF 1



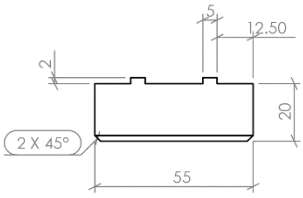
ISOMETRIC VIEW



TOP VIEW



FRONT VIEW



RIGHT VIEW

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:	FINISH:			DEBURR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
	NAME	SIGNATURE	DATE		TITLE: HIGH VOLTAGE PROBE SHIELD BOX-02	
DRAWN	BUNDASAK A.		07/05/19			
CHK'D						
APPV'D						
MFG						
Q.A				MATERIAL: PLA (POLYLACTIC ACID)	DWG NO. PART-17	A4
				WEIGHT:	SCALE:1:2	SHEET 1 OF 1

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ นายบรรดาศักดิ์ อ่างมณี

ที่อยู่ เลขที่ 140 หมู่ 14 ตำบลคำเขื่อนแก้ว อำเภอสิรินธร จังหวัดอุบลราชธานี 34350

E-mail: bundasak.10@hotmail.com

ประวัติการศึกษา พ.ศ. 2551 - 2553 มัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนบ้านคันไร่ ตำบลคันไร่อำเภอสิรินธร จังหวัดอุบลราชธานี 34350

พ.ศ. 2553 - 2555 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนพิบูลมังสาหาร ตำบล ในเมือง อำเภอพิบูลมังสาหาร จังหวัดอุบลราชธานี 34110

พ.ศ. 2555 - 2559 ปริญญาตรี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

ประวัติการได้รับทุน ทุนเรียนดีวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทย (Science Achievement Scholarship of Thailand)

ประวัติการวิจัย บรรดาศักดิ์ อ่างมณี ชิณวัฒน์ เอกวงษา อมร เทศสกุลวงศ์ The controller and monitoring system of 1-10 kV high voltage power supply ในงานจัดการประชุมวิชาการ SPC 2018 Siam Physics Congress 2018 ณ พิษณุโลก ประเทศไทย วันที่ 21-23 พฤษภาคม 2561