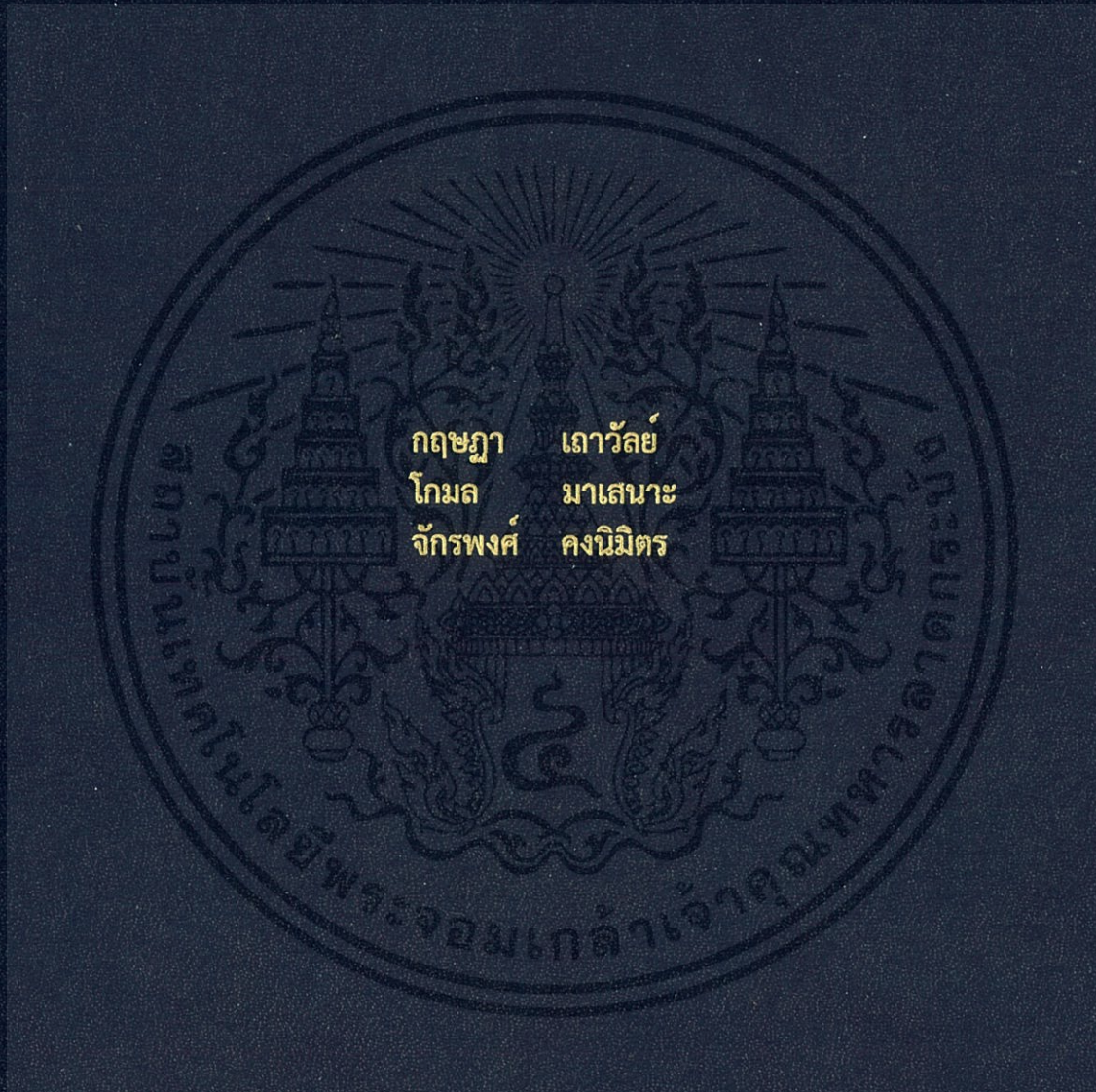


การประยุกต์การควบคุมพีไอดีกับแบบจำลองลูกตุ้มผกผัน
APPLICATION OF PID CONTROL FOR INVERSE PENDULUM MODEL



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมการวัดคุม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

การประยุกต์การควบคุมพีไอดีกับแบบจำลองลูกตุ้มผกผัน
APPLICATION OF PID CONTROL FOR INVERSE PENDULUM MODEL



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมการวัดคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

APPLICATION OF PID CONTROL FOR INVERSE PENDULUM MODEL



THIS PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT
FOR THE BACHELOR DEGREE IN INSTRUMENTATION ENGINEERING
DEPARTMENT OF INSTRUMENTATION AND CONTROL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2559

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

หัวข้อปริญญาานิพนธ์ การประยุกต์การควบคุมพีไอดีกับแบบจำลองลูกตุ้มผกผัน
(APPLICATION OF PID CONTROL FOR INVERSE PENDULUM MODEL)

นักศึกษาผู้จัดทำ นาย กฤษฎา เถาว์ลัย รหัสนักศึกษา 56010029
นาย โกมล มาเสนาะ รหัสนักศึกษา 56010106
นาย จักรพงศ์ คงนิมิตร รหัสนักศึกษา 56010152

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมการวัดคุม
ปีการศึกษา 2559

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์	ลายมือชื่อ
รองศาสตราจารย์ ดร.สุพรรณ กุลพานิชย์	
รองศาสตราจารย์ ดร.เกษตร์ ศิริสันติสัมฤทธิ์	

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การประยุกต์การควบคุมพีไอดีกับแบบจำลองลูกตุ้มผกผัน (APPLICATION OF PID CONTROL FOR INVERSE PENDULUM MODEL)			
นักศึกษาผู้จัดทำ	นาย ฤกษ์ญา	เถาว์ลัย	รหัสนักศึกษา	56010029
	นาย นายโกมล	มาเสนาะ	รหัสนักศึกษา	56010106
	นาย จักรพงษ์	คงนิมิตร	รหัสนักศึกษา	56010152
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.สุพรรณ กุลพานิชย์ รองศาสตราจารย์ ดร.เกษตร์ ศิริสันติสัมฤทธิ์			
ปีการศึกษา	2559			

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เกี่ยวกับระบบลูกตุ้มผกผันซึ่งระบบลูกตุ้มผกผันประกอบด้วยลูกตุ้มที่หมุนได้อย่างอิสระ เป็นระบบไม่เป็นเชิงเส้นและไม่เสถียรภาพจำเป็นต้องอาศัยตัวควบคุม หากตัวแปรที่จะต้องควบคุมเป็น θ ซึ่งคือ ค่าปัจจุบัน (PV) ตัวแปรเอาต์พุตที่เป็นค่าความเร็วของเซอร์โวมอเตอร์ ในรูปของสัญญาณพลัส ซึ่งคือค่า Manipulate (MV) และค่า Setpoint (SV) ที่ 45° ในโหมดแพนดูลัม และที่ 0° ในโหมดอีเวอร์สแพนดูลัม โดยระบบที่ใช้ในการทดลองจะประกอบไปด้วยลูกตุ้มผกผันยึดติดกับรางเลื่อนตัวรางเลื่อนใช้เซอร์โวมอเตอร์ในการขับเคลื่อนและใช้เอ็นโค้ดเดอร์วัดตำแหน่งการเคลื่อนที่แบบจำลองลูกตุ้มผกผันมีความซับซ้อนของระบบมีการควบคุมแบบอินพุตเดียวโดยอินพุตที่ใช้มี angle (θ) โดยอินพุตนี้จะไปควบคุมการแกว่งของลูกตุ้ม ในการออกแบบชุดการทดลองนี้ได้ใช้ตัวควบคุม PLC กับฟังก์ชัน PID CONTROL และ Tuning โดยวิธีการ Try and Error ค่าพารามิเตอร์ให้กับ PID เพื่อในการแกว่งของลูกตุ้มในแนวตั้งและรักษาสมดุลให้สภาพไว้ ผลจากการปรับค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมนั้น สามารถใช้เป็นแบบจำลอง Inverse Pendulum ทำงานได้ตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ

Thesis Title	(APPLICATION OF PID CONTROL FOR INVERSE PENDULUM MODEL)
Authors	Mr. KRITSADA TAOWAN Mr. KOMON MASANOVA Mr. JUGGAPONG KONGNIMIT
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Suphan Kulpanich Assoc. Prof. Dr. Kaset Sirisantisamrid
Year	2016

ABSTRACT

This project presents the design of a PID controller to control an inverted pendulum system. The system consists of a pendulum attached to a servo motor driven electromechanical cart moving on a rail, whose kinematics are controlled by a programmable logic controller. The variable to be controlled is θ which is the current value or the measured value (PV). The output variable is the speed of the servo motor with pulse signals, which are manipulate (MV) and Setpoint (SV) at 45° in Pendulum mode and at 0° in Inverse Pendulum mode. The set of PID tuning gains is then input to the PLC solved by Try and Error to control the inverted pendulum. Results demonstrate that the pendulum is steadily maintained at its vertical position. The result from configuration of parameter is appropriate to use the simulator for Inverse Pendulum is worked on the purpose.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.สุพรรณ กุลพานิชย์, รศ.ดร.เกษตร์ ศิริสันติสัมฤทธิ์ และดร.นภศุล วงษ์วานิช ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาเป็นอย่างสูง ที่ให้ความรู้ความคิดริเริ่มและชี้แนะแนวทางต่างๆ ตลอดจนให้คำปรึกษาแนวทางการค้นคว้า การจัดทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมทั้งเพื่อน ๆ และบิดามารดา ที่คอยให้กำลังใจและให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์จนทำให้ปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี



คณะผู้จัดทำ

นายกฤษฎา	เถาว์ลย์
นายโกมล	มาเสนาะ
นายจักรพงศ์	คงนิมิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
บทที่ 2 ทฤษฎีบทอินเวอร์สเพนดูลัมและระบบควบคุม PID ใน PLC.....	3
2.1 เพนดูลัมผกผัน	3
2.1.1 ระบบเชิงเส้นของเพนดูลัมผกผัน	3
2.2 ระบบควบคุม PID และ PLC กับระบบควบคุม Servo motor	8
2.2.1 ระบบควบคุม PID	8
2.2.2 PLC กับระบบควบคุม Servo Motor.....	11
2.2.3 หลักการควบคุมเบื้องต้น	11
บทที่ 3 การออกแบบและการทดลอง Software และ Hardware.....	13
3.1 การออกแบบขั้นตอนการดำเนินการ	13
3.1.1 อุปกรณ์และโปรแกรม.....	13
3.2 ขั้นตอนการดำเนินการ	16
3.3 ตารางการดำเนินงาน	18
3.4 การทดสอบด้าน Hard Ware.....	23
3.4.1 อินเวอร์สเพนดูลัม ซิสเต็ม คอนฟิเจอร์ชั่น.....	23
3.4.2 ไฟหลัก AC & DC พาวเวอร์ซัพพลาย และ PLC ซัพพลาย.....	24
3.4.3 X-AXIS เซอร์โว พาวเวอร์, มอเตอร์ & เอ็นโค้ดเดอร์	24
3.4.4 PLC ดิจิตอล อินพุท : อินพุท – สวิตช์.....	25
3.4.5 PLC ดิจิตอล เอาท์พุท : เอาท์พุท – เซอร์โวไดรฟ์.....	26

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4.6 PLC ดิจิตอล อินพุท : อินพุท – เซอร์โวไดรฟ์.....	27
3.5 การทดสอบทางด้าน Software.....	28
3.5.1 การเขียนโปรแกรมให้แบบจำลองสามารถทำงานในโหมด Manual.....	28
3.5.2 การเก็บข้อมูลไว้ใน Data Memory ใน PLC.....	31
3.5.3 การทำงานในโหมดอัตโนมัติ (Auto Mode).....	36
บทที่ 4 การวิเคราะห์และผลการทดลอง.....	44
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	59
5.1 สรุปผลการทดลอง	59
5.2 ปัญหาที่เกิดขึ้น.....	59
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	60
บรรณานุกรม.....	61
ภาคผนวก.....	62

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ข้อดีข้อเสียของการควบคุมแบบต่าง ๆ.....	10
3.1 ตารางแผนการดำเนินงานวิชา Project I.....	18
3.2 ตารางแผนการดำเนินงานวิชา Project II.....	19
4.1 แสดงตารางเปรียบเทียบเวลาในการเข้าสู่โหมด Inverse Pendulum.....	45
4.2 แสดงตารางเปรียบเทียบเวลาในการลู่เข้าหา 0 องศา.....	46
4.3 แสดงตารางเปรียบเทียบเวลาในการเข้าสู่โหมด Inverse Pendulum ของจำนวน Pulse	47
4.4 แสดงตารางเปรียบเทียบเวลาในการลู่เข้าหา 0 องศาของจำนวน Pulse	48
4.5 แสดงตารางเปรียบเทียบเวลาในการเข้าสู่โหมด Inverse Pendulum.....	55
4.6 แสดงตารางเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ (Kp , Ti และ Td ตามลำดับ).....	57
4.7 ตารางแสดงการทดสอบการแกว่งของลูกตุ้มจากตำแหน่ง 180 องศาไปจนถึง 0 องศา.....	57
4.8 ตารางแสดงรายละเอียดค่าต่าง ๆ ของอุปกรณ์.....	58

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	แผนผังของระบบ Inverse Pendulum.....3
2.2	แผนภาพบล็อกของการควบคุมแบบพีไอดี.....4
2.3	Free Body Diagrams (ก) รถเข็นและ (ข) ลูกตุ้ม (ค) การกำหนดระยะทางที่ต้องใช้9
2.4	การควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ 2 แกน เหมาะสำหรับงานควบคุมตำแหน่งที่มีความละเอียดสูง ... 11
2.5	หลักการควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ 12
3.1	PLC OMRON CP1H แบบ Block Type..... 13
3.2	Servo Motor G5-Series ของ OMRON..... 14
3.3	แบบจำลอง Inverse Pendulum ที่ทำการเชื่อมต่อเสร็จแล้ว..... 15
3.4	แสดงการติดตั้ง Proximity Sensor ในตำแหน่งต่าง ๆ ภายในแบบจำลอง..... 16
3.5	แสดงการเชื่อมระหว่างอุปกรณ์แต่ละตัว..... 16
3.6	Flow Chart ขั้นตอนการเลือกโหมดการทำงานของแบบจำลอง Inverse Pendulum..... 20
3.7	Flow Chart แสดงขั้นตอนการทำงานในโหมด Inverse Pendulum 21
3.8	Flow Chart แสดงขั้นตอนการทำงานในโหมด Pendulum 22
3.9	การเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ในแบบจำลองเข้ากับ PC..... 23
3.10	การเชื่อมต่อระหว่างไฟ AC 220V เข้าที่ Power Supply ผ่าน Main Circuit Breaker 24
3.11	แสดงการเชื่อมต่อระหว่างไฟ AC 220 V กับ Servo Drive..... 24
3.12	แสดงการเชื่อมต่อไฟ DC 24 V เข้ากับ Switch 25
3.13	แสดงการเชื่อมต่อระหว่าง PLC ทางด้าน Output กับ Input ของ SERVO DRIVE 26
3.14	ทั้ง (ก) และ (ข) แสดงการเชื่อมอินพุตทางด้าน PLC เข้ากับ SERVO DRIVE 27
3.15	Instruction Symbol ของ PULS (886)..... 28
3.16	Instruction Symbol ของ SPED (885)..... 29
3.17	แสดงการสัญญาณ Pulse เมื่อมีการใช้งานฟังก์ชัน SPED (885)..... 29
3.18	ตำแหน่งของการกำหนดตัวเลข 16 bit ให้กับตัวแปร M ในฟังก์ชัน SPED (885) 30
3.19	Instruction Symbol ของ MOV (021)..... 32
3.20	ออกแบบตัวอย่างการใช้งานการเก็บข้อมูลแบบ Indirect Data 32
3.21	ออกแบบตัวอย่างการจัดเก็บข้อมูลเมื่อมีการใช้งาน Indirect Move..... 33
3.22	ออกแบบช่วงค่ามุม เมื่ออ่านจากโปรแกรมและ Voltage 34

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.23 Instruction Symbol ของ TMMH (540).....	36
3.24 แสดงรูปแบบการทำงานเมื่อนำค่ามุมสูงสุดมาเป็นตัวขับโหลดให้เคลื่อนที่กลับทิศทาง	37
3.25 ออกแบบการแบ่งช่วงมุมในส่วนของ Inverse Pendulum และ Pendulum.....	38
3.26 Instruction Symbol ของ PID (190).....	39
3.27 Instruction Symbol ของ SCL (194).....	39
3.28 ออกแบบการ Scaling ค่า ในส่วนของ Inverse Pendulum.....	40
3.29 ออกแบบการ Scaling ค่า ในส่วนของ Pendulum	40
3.30 ออกแบบการแบ่งช่วงของ Step-Speed ที่องศาต่าง ๆ.....	41
3.31 กราฟแสดงความถี่ที่กำหนดให้กับฟังก์ชัน SPED แต่ละช่วงมุมต่าง ๆ.....	42
3.32 แสดงการทำงานของระบบของแบบจำลอง Inverse Pendulum.....	42
4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมและเวลาในโหมด Pendulum	44
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมและเวลาในโหมด Inverse Pendulum	46
4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวน Pulse และเวลาในส่วนของโหมด Pendulum	47
4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวน Pulse และเวลาในโหมด Inverse Pendulum.....	48
4.5 แสดงการแบ่งช่วงมุมในแต่ละ Section.....	49
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์การทำงานจากโหมด Pendulum สู่อะ Inverse Pendulum	50
4.7 การ Set ค่า Analog in ที่อ่านจาก Potentiometer ให้กับ PLC.....	51
4.8 การ Set การทำงานของ Encoder ผ่าน PLC.....	52
4.9 การ Set Parameter ต่างๆให้กับ Servo Drive	53
4.10 กราฟแสดงการทำงานของ PID ในส่วนโหมด Pendulum.....	55
4.11 กราฟแสดงการทำงานของ PID ในส่วนโหมด Inverse Pendulum.....	56
4.12 แผนภูมิแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของการทดลองการแกว่งของลูกตุ้ม.....	58

บทที่ 1

บทนำ

ความสำคัญและที่มาของปัญหา

เพนดูลัมผกผัน (Inverted pendulum) เป็นพื้นฐานที่ใช้ในการเรียนการสอนและในการสาธิตการประยุกต์ทฤษฎีระบบควบคุม เพนดูลัมผกผันเป็นระบบที่มีจุดสมดุลอยู่รอบแกนหมุนด้วยกันสองจุด ได้แก่ จุดที่เพนดูลัมตั้งตรงอยู่ในแนวตั้งและจุดที่เพนดูลัมอยู่ห้อยตัวลงในดิ่ง แต่จุดที่มีเสถียรภาพเมื่อไม่มีตัวควบคุมนั้นจะมีจุดเดียว คือ จุดที่แกนตั้งตัวลงในดิ่ง ไม่ว่าเราจะปล่อยเพนดูลัมที่จุดใดก็ตาม เพนดูลัมจะตกลงสู่จุดนี้เสมอ การที่จะทำให้เพนดูลัมนี้สามารถตั้งตรงในแนวตั้งได้นั้นขึ้นกับการใส่ตัวควบคุมที่เหมาะสมเข้าไปในระบบซึ่งมีได้หลากหลายวิธีและอีกทั้งยังสามารถออกแบบตัวควบคุมให้เป็นเชิงเส้นหรือแบบไม่เชิงเส้นก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ออกแบบและความเหมาะสม

ในการออกแบบชุดการทดลองอินเวอร์สเพนดูลัมผกผันเป็นระบบที่ Unstable โดยมีลักษณะเป็นแกนหมุนได้ในแนวตั้ง ซึ่งแกนหมุนของ Pendulum จะติดอยู่กับฐานที่สามารถเคลื่อนที่ได้ในแกนระบบ เมื่อตั้งให้แกนของ Pendulum อยู่ในแนวตั้ง แกนของ Pendulum จะตกลงมาเองตามธรรมชาติ วิธีที่จะสามารถทำให้ Pendulum สามารถตั้งอยู่ในแนวตั้งตลอดเวลาได้นั้น จะต้องส่งแรงให้ฐานของ Pendulum ให้มีการเคลื่อนที่ด้วยแรงและเวลาที่เหมาะสม ซึ่งเมื่อฐานของ Pendulum มีการเคลื่อนที่ที่กลับไปกลับมา ก็จะเกิดแรงเหวี่ยงของตัว Pendulum แรงเหวี่ยงนี้จะช่วยให้ Pendulum สามารถตั้งอยู่ในแนวตั้งได้ ทั้งหมดนี้ทำได้ด้วยการใช้ฟังก์ชัน PID ของเครื่องควบคุม PLC โดยมี Servo Motor เป็นชุดขับให้กับอินเวอร์สเพนดูลัม ดังนั้นการศึกษาด้านอินเวอร์สเพนดูลัมเป็นการศึกษาเข้าใจหลักการและการทำงานของระบบที่ไม่มีเสถียรภาพ และ ระบบควบคุมแบบย้อนกลับ โดยปกติลูกตุ้มเพนดูลัมจะอยู่จุดสมดุลในทิศทางลง เราต้องคำนวณหา Speed, Distance และ Angle of Pendulum โดยอินพุตเหล่านี้จะเป็นตัวควบคุมการแกว่งเพื่อให้ลูกตุ้มสามารถตั้งตรงขึ้นในแนวตั้งได้ โดยจะใช้ตัวควบคุม PLC PID Control ในการควบคุมการแกว่งของลูกตุ้มให้ตั้งตรงในแนวตั้งและรักษาไม่ให้ลูกตุ้มตกลงมาโดยที่รูปตุ้มจะถูกยึดติดกับรางเลื่อนซึ่งใช้เซอร์โวมอเตอร์ในการขับเคลื่อนและใช้เอ็นโค้ดเดอร์วัดตำแหน่งการเคลื่อนที่

โดยวัตถุประสงค์หลักเพื่อนำความรู้ที่ได้จากวิชา PROGRAMMABLE LOGIC CONTROL SYSTEMS และ CONTROL SYSTEM มาใช้ในการแก้ปัญหาของระบบ Unstable ของอินเวอร์สเพนดูลัมโดยใช้ฟังก์ชัน PID ที่มีอยู่ในเครื่องควบคุม PLC

ในปัจจุบันอินเวอร์สเพนดูลัมเริ่มนำมาประยุกต์ใช้ในด้านอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลายซึ่งเป็นพื้นฐานของการประยุกต์ใช้ทฤษฎีระบบควบคุม ซึ่งมีความจำเป็นอย่างมากในระบบอุตสาหกรรม และสิ่งที่เห็นได้ชัดในตอนนี้คือมีการนำพาหนะเซกเวย์ (Segway) มาใช้กันอย่างแพร่หลายมากขึ้น ทำให้สิ่งนี้เริ่มเป็นเรื่องไม่ไกลตัวอีกต่อไปและจะส่งผลให้ในอนาคตทฤษฎีการควบคุมจะเป็นส่วนหนึ่งของการใช้ชีวิตเราต่อไป จึงเป็นเหตุผลหลักที่ทำให้คณะผู้จัดทำสนใจศึกษาเรื่องนี้

ขอบเขตของการศึกษาแบบจำลองอินเวอร์สเพนดูลัมเพื่อเข้าใจพฤติกรรมการแกว่งของลูกตุ้ม ทั้งในส่วนของเพนดูลัมและอินเวอร์สเพนดูลัมแล้วเขียน Ladder Diagram ให้สามารถควบคุมแบบจำลองได้โดยใช้ PID Control และปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของ PID โดยวิธี Try and Error เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมและให้แบบจำลอง Inverse Pendulum ทำงานได้ตามเงื่อนไขที่กำหนด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับข้อจำกัดของความสามารถของตัวของอุปกรณ์ เช่น Servo Motor, PLC , Resistor ที่อ่านค่ามุมและสายพาน เป็นต้น อีกทั้งยังขึ้นกับตัวของ Software ที่ทำการเขียนขึ้น บันทึกค่าต่าง ๆ ที่จำเป็นต่อการนำไปประยุกต์หรือพัฒนาให้ดียิ่งขึ้นต่อไป



บทที่ 2

ทฤษฎีบทอินเวอร์สเพนดูลัมและระบบควบคุม PID ใน PLC

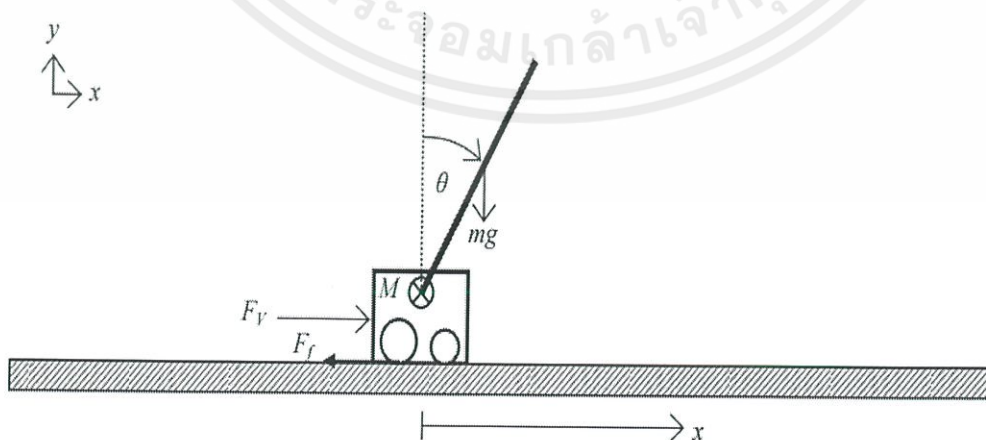
2.1 เพนดูลัมผกผัน

เป็นปัญหาพื้นฐานที่ใช้ในการเรียนการสอนและในการสาธิตการประยุกต์ทฤษฎีระบบควบคุม เพนดูลัมผกผันเป็นระบบที่มีจุดสมดุลอยู่รอบแกนหมุนด้วยกันสองจุด ได้แก่ จุดที่เพนดูลัมตั้งตรงอยู่ในแนวตั้งและจุดที่เพนดูลัมอยู่หัวตั้งในดิ่ง แต่จุดที่มีเสถียรภาพเมื่อไม่มีตัวควบคุมนั้นจะมีจุดเดียวคือ จุดที่แกนตั้งหัวตั้งเท่านั้นไม่ว่าเราจะปล่อยเพนดูลัมที่จุดใดก็ตามเพนดูลัมจะตกลงสู่จุดนี้เสมอการที่จะทำให้เพนดูลัมนี้สามารถตั้งตรงในแนวตั้งได้นั้น ขึ้นกับการใส่ตัวควบคุมที่เหมาะสมเข้าไปในระบบซึ่งมีได้หลากหลายวิธีและอีกทั้งยังสามารถออกแบบตัวควบคุมให้เป็นเชิงเส้น หรือแบบไม่เชิงเส้นก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ออกแบบและความเหมาะสม

2.1.1 ระบบควบคุม PID และ PLC กับระบบควบคุม Servo Motor

ในการทดสอบเพนดูลัมบนรถเข็นเคลื่อนที่จะถูกพิจารณาโดย ก้านลูกตุ้มอิสระที่จะ Oscillate รอบจุดที่แนบกับรถเข็น มอเตอร์ขับเคลื่อนซึ่งจำกัดการเคลื่อนไหว ก้านของลูกตุ้มจะอยู่ในตำแหน่งแนวตั้งตรง ซึ่งมีความไม่แน่นอนที่จุดสมดุล วัตถุประสงค์การควบคุม คือ การใช้แรงที่จะย้ายรถเข็นเพื่อให้ลูกตุ้มที่ยังคงอยู่ในตำแหน่งที่ไม่แน่นอนในแนวตั้ง

ระบบที่น่าสนใจ คือ แสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่ง F คือ แรงในหน่วยนิวตัน, m คือ มวลของก้านลูกตุ้มในหน่วยกิโลกรัม, M คือ มวลของรถเข็นในหน่วยกิโลกรัม, F_r คือ แรงที่ใช้ในรถเข็นในหน่วยนิวตัน, F_f คือ แรงเนื่องจากแรงเสียดทานในหน่วยนิวตัน, g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงในหน่วย m/s^2 และ θ คือ มุมของลูกตุ้มผกผัน วัดจากแกน y แนวตั้งในหน่วยเรเดียน



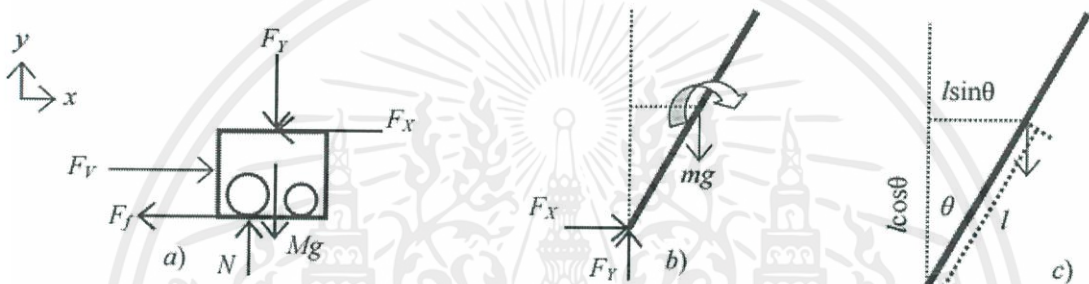
รูปที่ 2.1 แผนผังของระบบ Inverted Pendulum

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ

พิจารณาแผนภาพ Free Body Diagrams ที่แสดงในรูปที่ 2.2 นอกจากนี้สมมติว่า พิกัดของจุดเซนทรอยด์ (ศูนย์กลางของแรงโน้มถ่วง) ของลูกตุ้ม (x_G, y_G) จะได้จาก

$$\begin{aligned}x_G &= x + l \sin \theta \\y_G &= l \cos \theta\end{aligned}\quad (2.1)$$

ที่ l คือ ระยะทางตามลูกตุ้มไปยังศูนย์กลางของแรงโน้มถ่วงและ x เป็น X-coordinate ของตำแหน่งรถเข็น



รูปที่ 2.2 Free Body Diagrams (ก) รถเข็นและ (ข) ลูกตุ้ม (ค) การกำหนดระยะทางที่ต้องใช้

สำหรับการเคลื่อนที่แนวนอนของรถเข็น จากกฎข้อสองของนิวตันการเคลื่อนที่

$$\sum F = M \frac{d^2 x}{dt^2} \quad (2.2)$$

สามารถเขียนเป็น

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} = F_V - F_X - F_f \quad (2.3)$$

จากรูปที่ 2.2 (ก) มีเพียงสามแรงในทิศทาง X สมมติแรงเสียดทานเป็น

$$F_f = \gamma_2 \frac{dx}{dt} \quad (2.4)$$

แทนสมการที่ (2.4) ลงในสมการที่ (2.3) จะได้

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} = F_V - F_X - \gamma_2 \frac{dx}{dt} \quad (2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทำนองเดียวกันจากสมการที่ (2.2) การเคลื่อนไหวในแนวนอนของลูกตุ้มสามารถเขียนเป็น

$$F_x = m \frac{d^2 x_G}{dt^2} \quad (2.6)$$

อนุพันธ์ทางขวาในสมการที่ (2.6) สามารถทำได้ง่ายขึ้นหากกำหนดที่มาของ x_G โดยใช้สมการที่ (2.1) จากอนุพันธ์แรกได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \frac{dx_G}{dt} &= \frac{d(x + l \sin \theta)}{dt} \\ &= \frac{dx}{dt} + l \frac{d(\sin \theta)}{dt} \\ &= \frac{dx}{dt} + l \cos \theta \frac{d\theta}{dt} \end{aligned} \quad (2.7)$$

θ เป็นฟังก์ชันของเวลา ใช้กฎลูกโซ่กับบรรทัดที่สองเพื่อให้ได้รูปสุดท้ายของอนุพันธ์แรก อนุพันธ์ลำดับที่สองสามารถเขียนได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \frac{d^2 x_G}{dt^2} &= \frac{d}{dt} \left(\frac{dx}{dt} + l \cos \theta \frac{d\theta}{dt} \right) \\ &= \frac{d^2 x}{dt^2} + l \frac{d}{dt} \left(\cos \theta \frac{d\theta}{dt} \right) \\ &= \frac{d^2 x}{dt^2} + l \left(\frac{d \cos \theta}{dt} \frac{d\theta}{dt} + \cos \theta \frac{d^2 \theta}{dt^2} \right) \\ &= \frac{d^2 x}{dt^2} + l \left(-\sin \theta \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 + \cos \theta \frac{d^2 \theta}{dt^2} \right) \\ &= \frac{d^2 x}{dt^2} - l \sin \theta \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 + l \cos \theta \frac{d^2 \theta}{dt^2} \end{aligned} \quad (2.8)$$

รวมสมการที่ (2.8) กับสมการที่ (2.6) จะได้

$$F_x = m \left(\frac{d^2 x}{dt^2} - l \sin \theta \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 + l \cos \theta \frac{d^2 \theta}{dt^2} \right) \quad (2.9)$$

การใช้สมการที่ (2.9), สมการที่ (2.5) สามารถประยุกต์ได้ดังต่อไปนี้

$$M \frac{d^2x}{dt^2} = F_V - m \left(\frac{d^2x}{dt^2} - l \sin \theta \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 + l \cos \theta \frac{d^2\theta}{dt^2} \right) - \gamma_2 \frac{dx}{dt} \quad (2.10)$$

$$M \frac{d^2x}{dt^2} = F_V - m \frac{d^2x}{dt^2} + ml \sin \theta \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 - ml \cos \theta \frac{d^2\theta}{dt^2} - \gamma_2 \frac{dx}{dt}$$

สมการรูปแบบสุดท้ายสำหรับการเคลื่อนที่ของรถเข็นในแนวนอนจะได้เป็น

$$(M + m) \frac{d^2x}{dt^2} + \gamma_2 \frac{dx}{dt} = F_V + ml \sin \theta \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 - ml \cos \theta \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (2.11)$$

สำหรับการเคลื่อนที่แนวตั้งของลูกตุ้ม สมการที่ (2.2) สามารถเขียนได้เป็น

$$F_\gamma - mg = m \frac{d^2y_G}{dt^2} \quad (2.12)$$

ในทำนองเดียวกันกับกรณีแนวนอน อนุพันธ์ด้านขวาในสมการที่ (2.12) เขียนได้ดังนี้

$$\frac{dy_G}{dt} = \frac{d(\cos \theta)}{dt} = -l \sin \theta \frac{d\theta}{dt} \quad (2.13)$$

สามารถเขียนเป็น

$$\begin{aligned} \frac{d^2y_G}{dt^2} &= \frac{d}{dt} \left(-l \sin \theta \frac{d\theta}{dt} \right) \\ &= -l \left(\frac{d \sin \theta}{dt} \frac{d\theta}{dt} + \sin \theta \frac{d^2\theta}{dt^2} \right) \\ &= -l \left(\cos \theta \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 + \sin \theta \frac{d^2\theta}{dt^2} \right) \\ &= -l \cos \theta \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 - l \sin \theta \frac{d^2\theta}{dt^2} \end{aligned} \quad (2.14)$$

โดยใช้สมการที่ (2.14), สมการที่ (2.12) สามารถเขียนใหม่ได้

$$F_\gamma - mg = m \left(-l \cos \theta \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 - l \sin \theta \frac{d^2\theta}{dt^2} \right) \quad (2.15)$$

ดังนั้น แรงปฏิกิริยาแนวตั้ง F_γ สามารถเขียนเป็น

$$F_\gamma = mg + m \left(-l \cos \theta \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 - l \sin \theta \frac{d^2\theta}{dt^2} \right) \quad (2.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับวัตถุใด ๆ ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ที่มีผลต่อวัตถุและการเร่งความเร็วเชิงมุมจะได้ความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\sum \bar{M} = I \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (2.17)$$

ที่ \bar{M} คือโมเมนต์เนื่องจากแรง กำหนดให้

$$\bar{M} = \vec{F} \times \vec{r} \quad (2.18)$$

ที่ \vec{F} คือ แรงเวกเตอร์ \vec{r} เป็นเวกเตอร์ตำแหน่งของวัตถุเทียบกับเวลา ณ ตำแหน่งนั้นและ I คือ โมเมนต์เฉื่อยของวัตถุ สมการรวมแรงรอบลูกตุ้ม ณ จุดศูนย์กลางของแรงโน้มถ่วง สมการที่ (2.17) สามารถเขียนเป็น

$$F_y l \sin \theta - F_x l \cos \theta = I \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (2.19)$$

แทนสมการที่ (2.16) สำหรับ F_y และสมการที่ (2.9) สำหรับ F_x เป็นสมการ (2.19) จะได้

$$\left(mg + m \left(-l \cos \theta \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 - l \sin \theta \frac{d^2\theta}{dt^2} \right) \right) l \sin \theta - \left(m \left(\frac{d^2x}{dt^2} - l \sin \theta \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 + l \cos \theta \frac{d^2\theta}{dt^2} \right) \right) l \cos \theta = I \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (2.20)$$

สมการที่ (2.20) ลดความซับซ้อนได้

$$mgl \sin \theta - ml^2 \sin \theta \cos \theta \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 - ml^2 \sin^2 \theta \frac{d^2\theta}{dt^2} - ml \cos \theta \frac{d^2x}{dt^2} + ml^2 \cos \theta \sin \theta \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 - ml^2 \cos^2 \theta \frac{d^2\theta}{dt^2} = I \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (2.21)$$

$$mgl \sin \theta - ml^2 (\sin^2 \theta + \cos^2 \theta) \frac{d^2\theta}{dt^2} - ml \cos \theta \frac{d^2x}{dt^2} = I \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (2.22)$$

แต่

$$\cos^2 \theta + \sin^2 \theta = 1 \quad (2.23)$$

สมการที่ (2.22) สามารถประยุกต์ได้

$$mgl \sin \theta - ml^2 \frac{d^2 \theta}{dt^2} - ml \cos \theta \frac{d^2 x}{dt^2} = I \frac{d^2 \theta}{dt^2}$$

$$mgl \sin \theta - ml \cos \theta \frac{d^2 x}{dt^2} = (I + ml^2) \frac{d^2 \theta}{dt^2}$$

(2.24)

ดังนั้น สมการขั้นสุดท้ายสำหรับตำแหน่งเชิงมุมจะได้เป็น

$$(I + ml^2) \frac{d^2 \theta}{dt^2} = mgl \sin \theta - ml \cos \theta \frac{d^2 x}{dt^2} \quad (2.25)$$

ดังนั้น สมการการเคลื่อนที่สำหรับเพนดูลัมผกผันบนรถเข็นเคลื่อนที่ที่สามารถเขียนได้เป็น

$$\left\{ \begin{array}{l} (M + m) \frac{d^2 x}{dt^2} + \gamma_2 \frac{dx}{dt} = F_V + ml \sin \theta \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 - ml \cos \theta \frac{d^2 \theta}{dt^2} \\ (I + ml^2) \frac{d^2 \theta}{dt^2} = mgl \sin \theta - ml \cos \theta \frac{d^2 x}{dt^2} \end{array} \right. \quad (2.26)$$

ความสัมพันธ์สำหรับแรงเนื่องจากแรงดันไฟฟ้าสามารถเขียนเป็น

$$F_V = \gamma_1 V \quad (2.27)$$

ที่ γ_1 คือ Conversion Factor และ V คือ แรงดันไฟฟ้าหน่วยโวลต์ในแบบจำลองใช้การส่งค่า Voltage อยู่ในรูปของ Pulse ดังนั้นจะได้สมการ

$$V = \gamma_P P \quad (2.28)$$

P คือ จำนวน Pulse ที่ส่งให้ฐานรถเข็นและ γ_P คือ Conversion Factor ของ Pulse ดังนั้น

$$F_V = \gamma_P \gamma_1 V \quad (2.29)$$

2.2 ระบบควบคุม PID และ PLC กับระบบควบคุม Servo motor

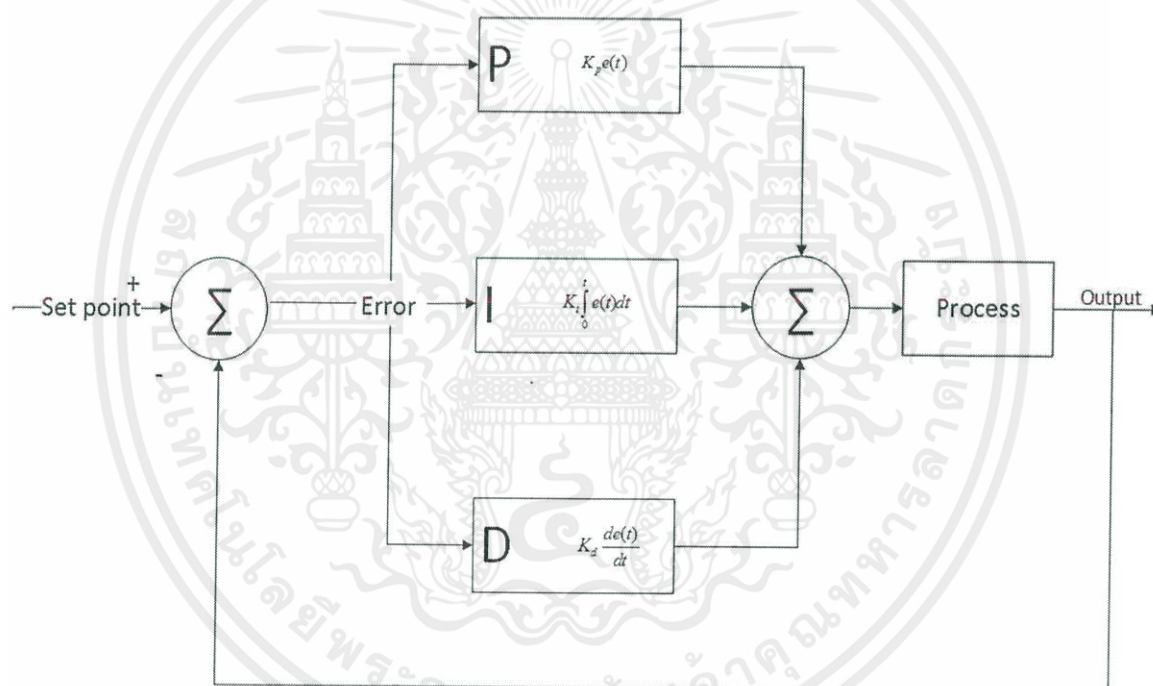
2.2.1 ระบบควบคุม PID

ระบบควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ (PID Controller) เป็นระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง ซึ่งค่าที่นำไปใช้ในการคำนวณเป็นค่าความผิดพลาดที่หามาจากความแตกต่างของตัวแปรในกระบวนการและค่าที่ต้องการ ตัวควบคุมจะพยายามลดค่าผิดพลาดให้เหลือน้อยที่สุดด้วยการปรับค่าสัญญาณขาเข้าของกระบวนการ ค่าตัวแปรของ PID ที่ใช้จะปรับเปลี่ยนตามธรรมชาติของระบบ วิธีคำนวณของ PID ขึ้นอยู่กับสามตัวแปร คือ ค่าสัดส่วน ปริพันธ์และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อนุพันธ์ ค่าสัดส่วนกำหนดจากผลของความผิดพลาดในปัจจุบัน ค่าปริพันธ์กำหนดจากผลบนพื้นฐานของผลรวมความผิดพลาดที่ซึ่งพียงผ่านไปและค่าอนุพันธ์กำหนดจากผลบนพื้นฐานของอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด น้ำหนักที่เกิดจากการรวมกันของทั้งสามนี้จะใช้ในการปรับกระบวนการโดยการปรับค่าคงที่ใน PID ตัวควบคุมสามารถปรับรูปแบบการควบคุมให้เหมาะสมกับที่กระบวนการต้องการได้ การตอบสนองของตัวควบคุมจะอยู่ในรูปของการไหวตัวของตัวควบคุมจนถึงค่าความผิดพลาด ค่าโอเวอร์ชูต (Overshoots) และค่าแกว่งของระบบ (Oscillation) วิธี PID ไม่รับประกันได้ว่าจะจะเป็นระบบควบคุมที่เหมาะสมที่สุดหรือสามารถทำให้กระบวนการมีความเสถียรแน่นอน [1]

การประยุกต์ใช้งานบางครั้งอาจใช้เพียงหนึ่งถึงสองรูปแบบ ขึ้นอยู่กับกระบวนการเป็นสำคัญ PID บางครั้งจะถูกเรียกว่าการควบคุมแบบ PI, PD, P หรือ I ขึ้นอยู่กับว่าใช้รูปแบบใดบ้าง



รูปที่ 2.3 แผนภาพบล็อกของการควบคุมแบบพีไอดี

หลักการของระบบควบคุมแบบ D-Control หรือ Derivative Control จะมีลักษณะการทำงานเหมือนกับ I-Control แต่จะให้ผลตอบสนองการทำงานที่เร็วกว่าระบบควบคุมแบบ D-Control จะให้ในกรณีที่ ระบบมีการรบกวนจากปัจจัยภายนอกและมีผลทำให้ระบบเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้นจึงใช้งานระบบควบคุมแบบ D-Control เพื่อกระตุ้นให้ระบบเข้าสู่เสถียรภาพอย่างรวดเร็ว การควบคุมแบบ D นั้นจะทำงานตามอัตราการเปลี่ยนแปลงของ Error (Error = Sp-Pv) โดยถ้าค่า Error มีค่าที่กำลังเปลี่ยนแปลงไปมา ก็จะทำให้เอาต์พุตออกมาตามการเปลี่ยนแปลงของ Error แต่ถ้า Error หยุดนิ่งเป็นค่าคงที่จะไม่มีเอาต์พุตออกมา [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุมแบบ D มีไว้เพื่อเร่งรัดหรือลดรั้งการควบคุมให้สามารถทำการควบคุมให้ได้ค่าที่ต้องการให้เร็วขึ้น เช่น กรณีที่โหลดของกระบวนการ (Process Load) เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วหรือกะทันหัน การควบคุมแบบ D ก็จะทำให้เอาต์พุตออกมาช่วยสั่งควบคุมกระบวนการให้กลับขึ้นมายังค่าที่ต้องการได้เร็วขึ้น ข้อจำกัดของการควบคุมแบบ D การควบคุมแบบ D นั้นไม่สามารถนำไปใช้ทำเป็นตัวควบคุมได้เพียงลำพัง เนื่องจากจะต้องทำงานตามอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า Error เท่านั้น ถ้า Error หยุดนิ่งอยู่ค่าหนึ่งหรือมีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมาก ตัวควบคุมก็จะไม่ให้เอาต์พุตออกมาทำการควบคุมในทันที โดยปกติถ้าต้องการใช้การควบคุมแบบ D (Derivative) นั้นจะใช้การทำงานควบคู่ไปกับ Proportional หรือ Integral จะได้การทำงานเป็น PD หรือ PID Controller [1]

เนื่องจากการควบคุมแบบ D จะทำงานตามอัตราการเปลี่ยนแปลงของ Error ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของค่า Error นั้นบางครั้งอาจเกิดขึ้นจากสัญญาณรบกวน (Noise) ที่เข้าค่าทางสัญญาณอินพุตที่เป็น Pv ได้หรืออาจเกิดการรบกวนกระบวนการ (Disturbance) เพียงเล็กน้อยซึ่งสิ่งรบกวนพวกนี้ไม่ได้เป็น Error ที่เกิดขึ้นจริงของค่ากระบวนการ แต่ก็สามารถส่งผลให้การควบคุมแบบ D ให้ค่าเอาต์พุตออกมาอย่างไม่ถูกต้องได้

โดยปกติตัวควบคุมแบบ PID ที่ใช้การควบคุมแบบ D นั้นจะมีพารามิเตอร์ให้ตั้งค่าการกรองสัญญาณรบกวนของอินพุตด้วย (Input Noise Filter) ซึ่งพารามิเตอร์ตัวนี้อาจเรียกว่า “Derivative Gain” หรือ “Input Filter Coefficient” เป็นตัวช่วยในการปรับค่าการกรองสัญญาณรบกวนที่เข้ามาทางด้านอินพุตที่เป็นค่ากระบวนการ (Pv) แต่ข้อเสีย คือ ถ้าตั้งค่าพารามิเตอร์นี้มากเกินไปก็จะทำให้การตอบสนองในการทำงานของตัวควบคุมต่อการเปลี่ยนแปลงของอินพุตช้าลงไปด้วยสามารถเปรียบเทียบ ข้อดีข้อเสียของการควบคุมแบบต่าง ๆ ได้ดังนี้

ตารางที่ 2.1 ข้อดีข้อเสียของการควบคุมแบบต่าง ๆ

การควบคุม	ข้อดี	ข้อเสีย
ON-OFF	- ควบคุมง่าย - ไม่มี Off Set เกิดขึ้น	- มีค่า Overshoot และ Hunting เกิดขึ้น
Proportional(P)	- มีค่า Overshoot และ Hunting เกิดขึ้นเล็กน้อย	- ใช้เวลานานกว่าระบบจะเข้าสู่เสถียรภาพ (Stable)
Integrate(I)	- ไม่มีค่า Off Set เกิดขึ้นในระบบ	- ใช้เวลานานกว่าแบบ P ในการเข้าสู่เสถียรภาพ
Derivative(D)	- มีการตอบสนองระบบเร็ว	- มี Off Set เกิดขึ้น - ไม่สามารถใช้งานได้โดยลำพัง
PID	- ควบคุมระบบได้แน่นอนและต่อเนื่อง	- ต้อง Set ค่า PID

2.2.2 PLC กับระบบควบคุม Servo Motor

ปัจจุบันเซอร์โวมอเตอร์ได้เข้ามามีบทบาทในวงการอุตสาหกรรมมากขึ้น โดยสังเกตจากเครื่องจักรใหม่ ๆ ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศหรือแม้แต่เครื่องที่ผลิตขึ้นใช้เองในประเทศก็ตามได้มีการนำเซอร์โวมอเตอร์มาประกอบในเครื่องจักรเพื่อช่วยให้ประสิทธิภาพในการผลิตดียิ่งขึ้น จุดเด่นของการนำเซอร์โวมอเตอร์มาใช้ก็คือ ความเร็วและความแม่นยำในการทำงาน ซึ่งเมื่อมองในมุมของผู้ใช้งานแล้วแต่ต้องการลดของเสียและเพิ่มประสิทธิภาพที่ดีขึ้นย่อมต้องเกิดจากความแม่นยำของเครื่องจักรและถ้าอะไรจะเพิ่มมากขึ้น เมื่อผลผลิตต่อหนึ่งหน่วยเวลานั้นมีค่าเพิ่มขึ้น

จากเหตุผลข้างต้น OMRON จึงได้ออกผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสมกับงานควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ของเครื่องจักร เช่น งานแพคเกจจิ้งความเร็วสูง งานประกอบชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการความแม่นยำสูง เครื่องจักรที่ใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ การใช้งานดังกล่าวข้างต้นนี้สามารถจัดการได้โดยง่ายด้วย “PLC:CP1H” และ “G5 Series Servo Motor” จากรูปที่ 2.5 แสดงตัวอย่างการเชื่อมต่ออุปกรณ์ในลักษณะ Pulse Output 2 แกนที่ 100 kHz สำหรับการควบคุมตำแหน่งที่มีความแม่นยำสูง



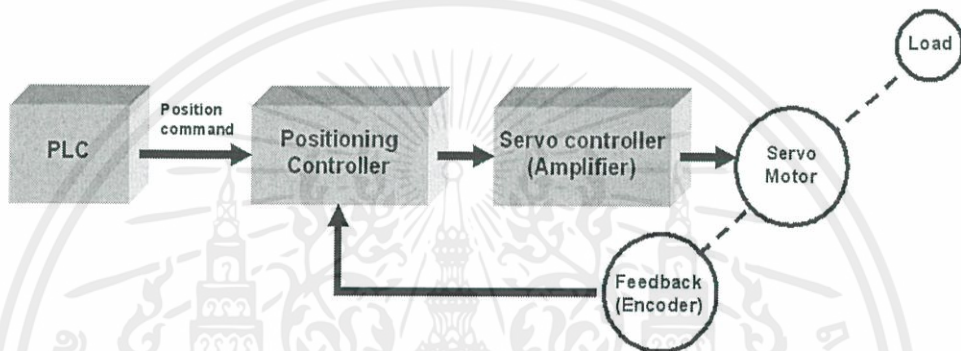
รูปที่ 2.4 การควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ 2 แกน เหมาะสำหรับงานควบคุมตำแหน่งที่มีความละเอียดสูง [8]

2.2.3 หลักการควบคุมเบื้องต้น

ในรูปที่ 2.5 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมเซอร์โวมอเตอร์เบื้องต้น โดยปกติระบบควบคุมเซอร์โวมอเตอร์จะมีองค์ประกอบหลักในการทำงานดังนี้

- มอเตอร์ : ทำหน้าที่ขับเคลื่อนทั้งชนิดที่มีเบรคและไม่มีเบรค
- เอ็นโค้ดเดอร์ : ติดอยู่กับตัวมอเตอร์เพื่อทำหน้าที่ป้อนกลับการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ดังนั้นเราสามารถทราบตำแหน่งและความเร็วของการหมุนได้จากเอ็นโค้ดเดอร์นี้

- Servo Driver : ในปัจจุบันนั้นจะทำการรวมส่วนที่เป็น Servo Controller และ Positioning Controller ไว้ด้วยกันซึ่ง Servo Controller จะทำหน้าที่เป็นตัวจ่ายไฟให้กับมอเตอร์ส่วน Positioning Controller จะทำหน้าที่ควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ของมอเตอร์โดยรับคำสั่งมาจากอุปกรณ์ภายนอก เช่น PLC เป็นต้น
- PLC : จะทำหน้าที่ในการส่งคำสั่งไปยัง Servo Driver ในรูปแบบต่าง ๆ เช่น อะนาล็อก และพัลส์ เป็นต้น จากนั้น Servo Driver จะควบคุมให้มอเตอร์หมุนให้ได้ตำแหน่งและความเร็วตามที่ได้รับคำสั่ง



รูปที่ 2.5 หลักการควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ [2]

จากรูปที่ 2.5 การทำงานจะเริ่มโดย PLC ส่ง Position Command ซึ่งเป็นสัญญาณพัลส์หรืออะนาล็อกให้กับ Position Controller ที่อยู่ใน Servo Driver จากนั้น Position Controller จะสั่งให้ Amplifier จ่ายกระแสไฟให้กับมอเตอร์เพื่อทำให้มอเตอร์หมุนให้ได้ความเร็วและระยะตามคำสั่ง เ็นโค้ดเดอร์ที่ติดอยู่กับมอเตอร์จะทำหน้าที่ป้อนกลับข้อมูลระยะและความเร็วในการหมุนกลับไป Position Controller ซึ่งมันจะมี Counter ทำหน้าที่เปรียบเทียบกับคำสั่งที่ได้รับจาก PLC ถ้าความแตกต่างกัน มันจะส่งสัญญาณไปที่ Amplifier เพื่อสั่งให้มอเตอร์หมุนให้ได้ระยะและความเร็วตามต้องการ

บทที่ 3

การออกแบบและการทดลอง Software และ Hardware

3.1 การออกแบบขั้นตอนการดำเนินการ

โดยในบทนี้ จะกล่าวถึงการออกแบบและขั้นตอนการดำเนินการโดยแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ

1. ทางด้าน Hardware โดยกล่าวถึงรายละเอียดอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่อยู่ในแบบจำลองและการเชื่อมต่อ
2. ทางด้าน Software จะกล่าวถึงขั้นตอนการออกแบบการทดลอง การใช้งานฟังก์ชันต่าง ๆ ใน PLC เพื่อควบคุมแบบจำลอง Inverse Pendulum ให้สามารถทำตามเงื่อนไขได้ โดยมีรายละเอียด ๆ ดังนี้

3.1.1 อุปกรณ์และโปรแกรม

อุปกรณ์และโปรแกรมที่ใช้ในการทดลองหลัก ๆ มีดังต่อไปนี้

3.1.1.1 PLC OMRON CP1H

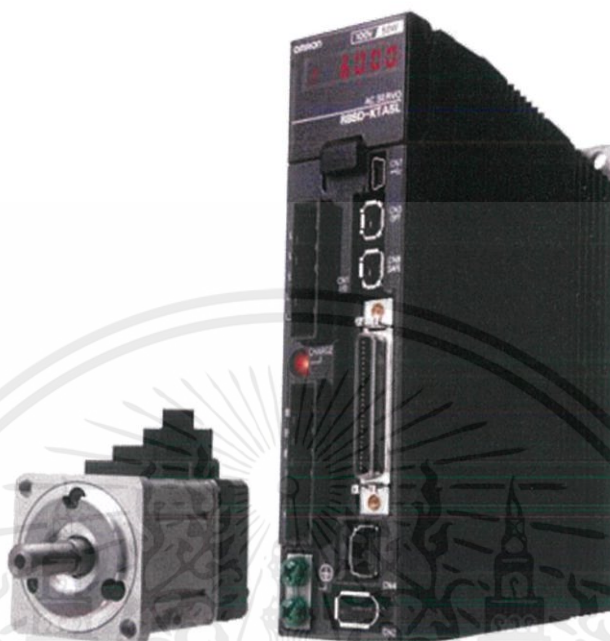


รูปที่ 3.1 PLC OMRON CP1H แบบ Block Type

PLC OMRON เป็นอุปกรณ์ควบคุมการทำงานที่เชื่อมต่อและทำการสั่งงานไปยังเครื่องจักรหรือระบบควบคุมแม่เหล็กที่ต้องการสั่งงานให้ทำงานตามต้องการ โดยมีข้อกำหนดรายละเอียด (Specification) ของ PLC OMRON อยู่ในภาคผนวก ข. ซึ่ง PLC OMRON อาจใช้ในงานระบบคอนโทรลไฟฟ้าหรือคอนโทรลเครื่องจักรของโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1.2 Servo Motor G5-Series



รูปที่ 3.2 Servo Motor G5-Series ของ OMRON

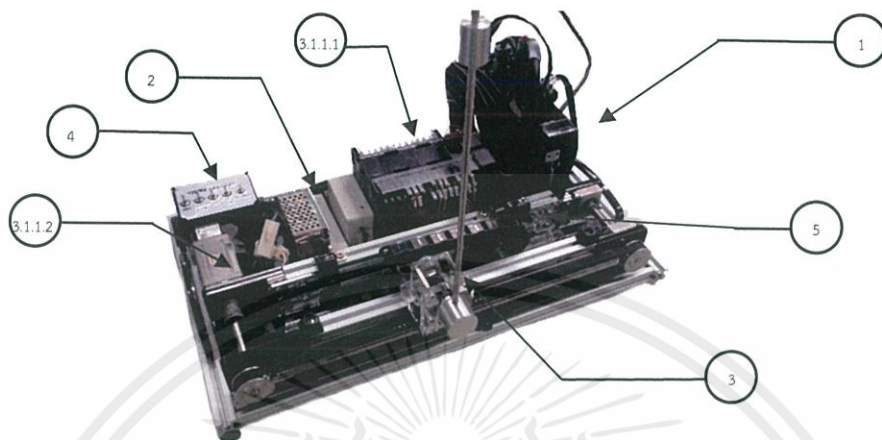
Servo Motor รุ่น G5 Series เป็นมอเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับงานควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ของเครื่องจักร เช่น งานแพคเกจจิ้งความเร็วสูง งานประกอบชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการความแม่นยำสูงเครื่องจักรที่ใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ สามารถใช้งานร่วมกับ PLC CP1H ได้

3.1.1.3 โปรแกรม CX-Program และ CX-Drive

โดย CX-Program จะถูกใช้ในการเขียน Ladder Diagram เพื่อควบคุมแบบจำลอง Inverse Pendulum และ CX-Drive จะถูกใช้ในการ Setting Values พารามิเตอร์ต่างๆ ในตัว G5 Series Servo Motor เพื่อให้สามารถตามที่ต้องการได้ [3]

3.1.1.4 ส่วนอื่นๆ

แสดงรายละเอียดได้ดังนี้



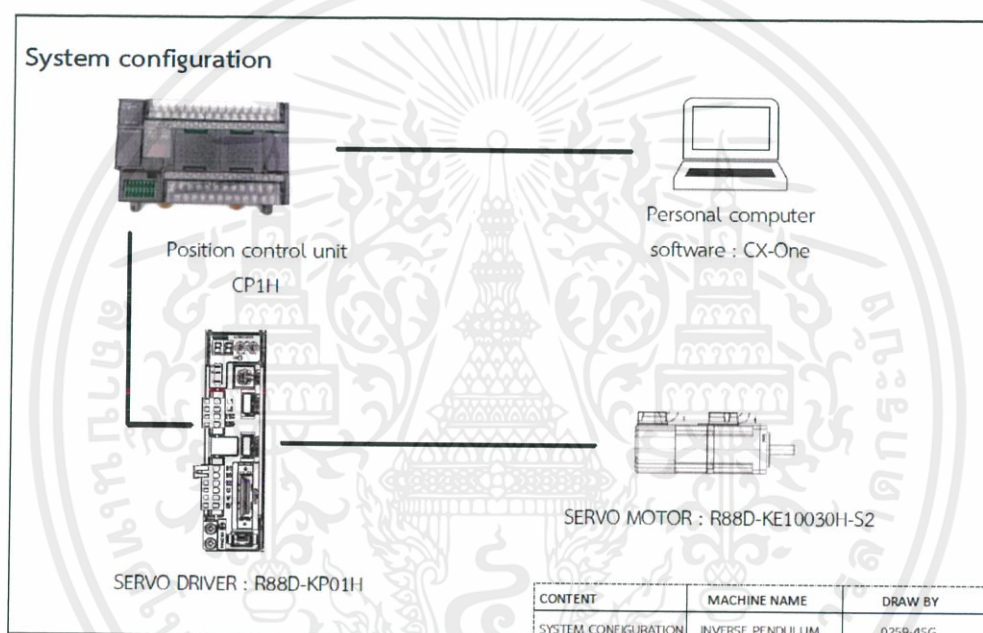
รูปที่ 3.3 แบบจำลอง Inverse Pendulum ที่ทำการเชื่อมต่อเสร็จแล้ว

1. Main Circuit Breaker รับไฟฟ้า 220 V (AC)
2. Power Supply รับไฟฟ้า 220 V (AC) จ่ายไฟฟ้า 24 V (DC)
3. Resistance ทำหน้าที่คล้ายกับ Potentiometer คือ เมื่อมีการหมุนของ แกนเหล็ก ค่าความต่างศักย์จะเปลี่ยนไปตามระยะทางการหมุน ซึ่งจะมีค่าความต่างศักย์ทั้งด้านบวกและด้านลบ (+10 V ถึง -10 V)
4. Switch ต่างมีหน้าที่ดังนี้
 - ON/OFF แบบจำลอง Inverse Pendulum โดยทำการเปิด-ปิดตัว Servo Drive ที่ขับเคลื่อนฐานของแบบจำลอง
 - RESET ทำการหยุดตัวแบบจำลอง Inverse Pendulum โดยทำการ Reset ค่าที่ส่งให้ Servo Drive ที่ขับเคลื่อนฐานของแบบจำลอง
 - LEFT SWITCH เลื่อนตัวฐานจำลองไปทางด้านซ้ายมือ
 - RIGHT SWITCH เลื่อนตัวฐานจำลองไปทางด้านขวามือ
5. Proximity Sensor มีอยู่ด้วยกัน 3 ตัว คือ
 - 1) Proximity Sensor ด้าน CW
 - 2) Proximity Sensor ด้าน CCW และ
 - 3) Proximity Sensor ที่จุด Origin แสดงรูปแบบการต่อ Sensor ในแบบจำลองได้ดังนี้



รูปที่ 3.4 แสดงการติดตั้ง Proximity Sensor ในตำแหน่งต่าง ๆ ภายในแบบจำลอง

โดยการเชื่อมต่ออุปกรณ์ในแบบจำลอง Inverse Pendulum แสดงดังรูปภาพต่อไปนี้



รูปที่ 3.5 แสดงการเชื่อมระหว่างอุปกรณ์แต่ละตัว

โดยรายละเอียดการเชื่อมต่ออุปกรณ์ทางด้าน Hardware จะมีการอธิบายในหัวข้อที่ 3.4 ต่อไป

3.2 ขั้นตอนการดำเนินการ

แบ่งขั้นตอนการดำเนินการ ออกเป็นดังนี้

1. ศึกษาทฤษฎีบทของ Inverse Pendulum โดยศึกษาในเรื่อง Math Model การวิเคราะห์แบบจำลองการวิเคราะห์ทวินส่วนของการออกแบบตัวควบคุมสำหรับ Inverse Pendulum ทั้งในเชิงการควบคุมเชิงเส้น (Linear Control) และการควบคุมแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Control) เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ที่จะสามารถควบคุมแกนหลักที่หมุนได้ซึ่งติดกับฐาน Inverse Pendulum ให้อยู่ในแนวตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ศึกษาการใช้งาน Servo Motor และ Servo Drive ของ OMRON ชนิด G5-Series Type ของ Encoders ที่อยู่ใน Servomotor ศึกษาตัวอย่างการใช้งาน เพื่อนำมาใช้งานในแบบจำลอง Inverse Pendulum

3. ศึกษาการใช้งานโปรแกรมที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมสำหรับ PLC (Programmable Logic Control) ตัวอย่าง เช่น CX-Program ซึ่งในการเขียน Ladder Diagram ให้กับตัว PLC, CX-Drive ที่ใช้ในการติดตั้ง, กำหนดค่า Parameter ให้กับตัว Servo-Drive เป็นต้น โดยศึกษาการใช้งานโหลด Block Diagram และ Function Block ในตัว PLC เพื่อสามารถนำมาประยุกต์, ประดิษฐ์ใช้กับแบบจำลอง Inverse Pendulum

4. ออกแบบโปรแกรมให้สามารถใช้งานแบบลอง Inverse Pendulum ทั้งในโหมดการทำงานแบบควบคุมด้วยมือ (Manual Mode) และโหมดการทำงานแบบควบคุมอัตโนมัติ (Auto Mode)

โดยแบ่งขั้นตอนออกเป็นดังนี้

- ทำการเขียนใน โหมดควบคุมด้วยมือ (Manual Mode)
- ทำการเก็บข้อมูลใน Data Memory ของ PLC เพื่อเก็บค่าต่าง ๆ เช่น
 - มุมของ Pendulum (Angle of Pendulum)
 - จำนวน Pulse ที่นับได้จาก Encoders เมื่อแปลงข้อมูลเป็นระยะทางจริงที่ฐานของ Inverse Pendulum เคลื่อนที่ไปได้
 - ระยะเวลาที่ฐานเคลื่อนที่ไป 1 ครั้ง ต่อ 1 ค่าระยะเวลา เป็นต้น
- ทำการเขียนให้ Inverse Pendulum ทำงานในโหมดอัตโนมัติ (Auto Mode)

5. ทำการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากผลการทดลอง ในโหมดอัตโนมัติ เพื่อหารูปแบบ Math Model ค่า Parameter ที่จำเป็นต่อการเขียนโปรแกรมในการควบคุมแกนหลักของ Pendulum ให้รักษาหรือคงตัวอยู่ในสภาพแนวตั้งตลอดเวลาการทำงานของตัวแบบจำลอง

6. ทำการเขียนโปรแกรมให้กับตัวแบบจำลอง Inverse Pendulum โดยใช้ PID Control โดยนำข้อมูลจากการวิเคราะห์ ใน MATLAB มาปรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในตัวฟังก์ชัน PID เพื่อควบคุมตัวแบบจำลอง Inverse Pendulum

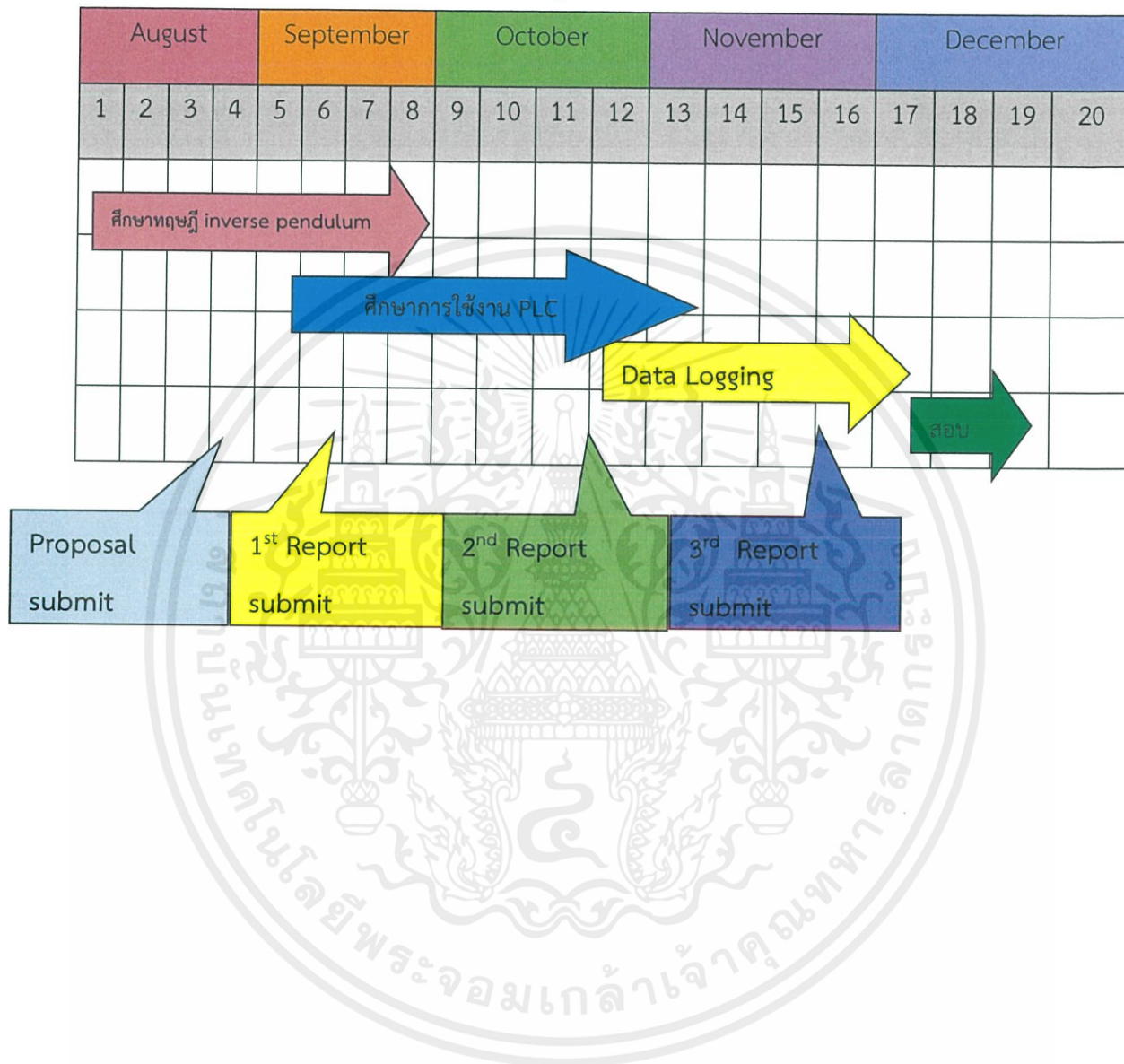
7. ปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ให้กับ Inverse Pendulum ให้เสถียรภาพสูงสุดบันทึกผลการทดลอง

8. สรุปผลการทดลอง ปัญหาที่เกิดขึ้นและข้อเสนอแนะ

3.3 ตารางการดำเนินงาน

แผนการดำเนินการ Project I

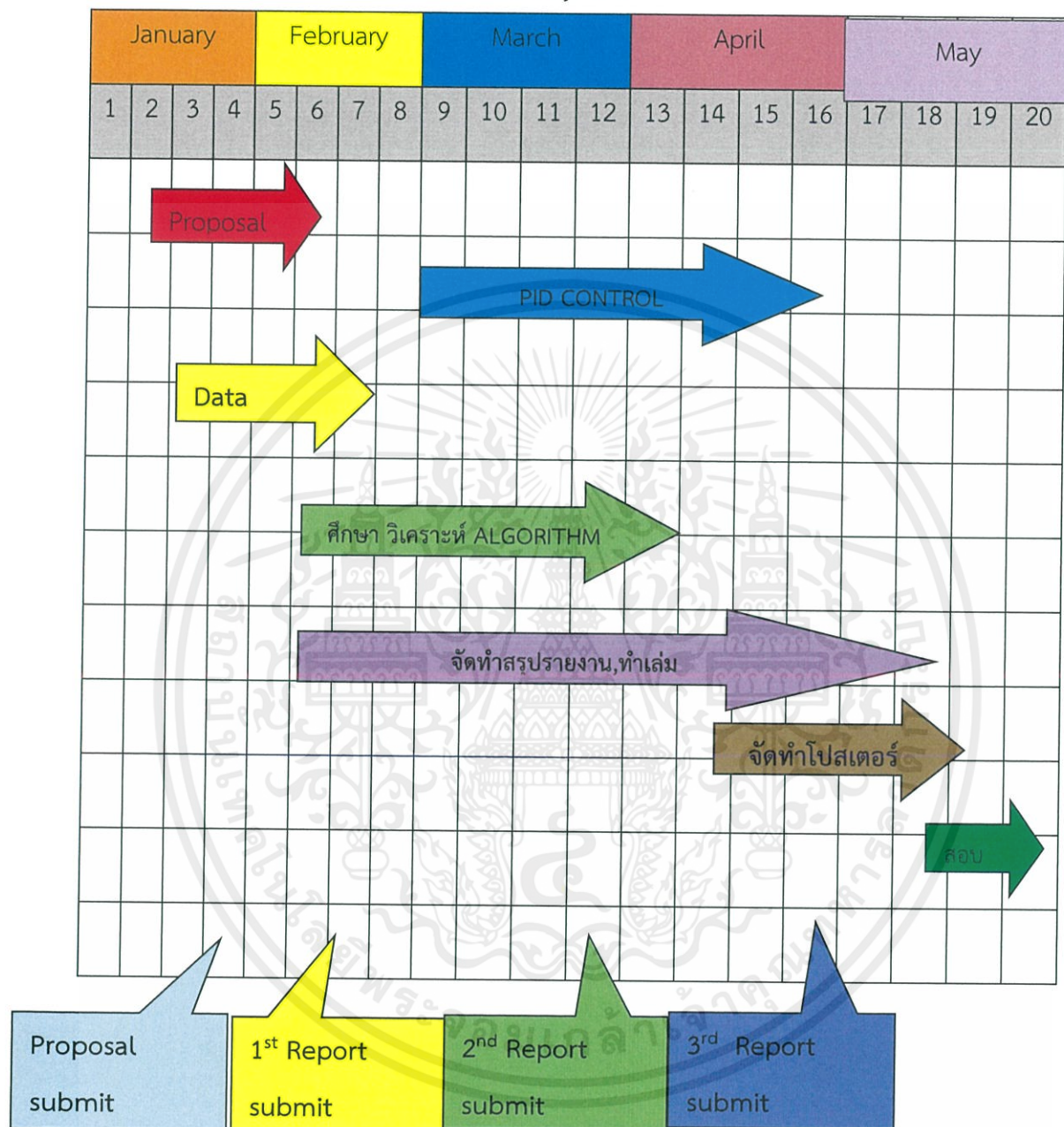
ตารางที่ 3.1 ตารางแผนการดำเนินงานวิชา Project I



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

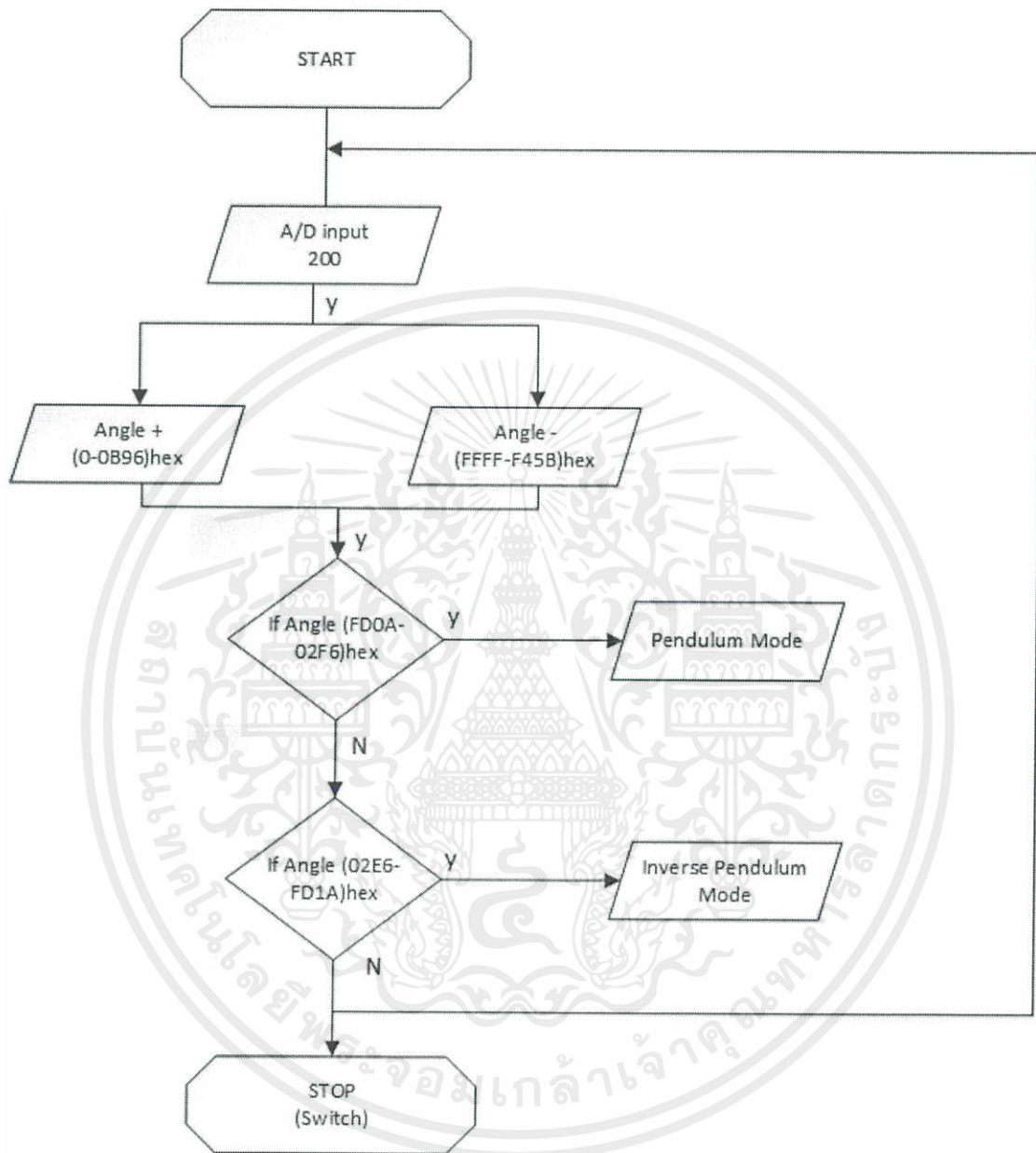
แผนการดำเนินการ Project II

ตารางที่ 3.2 ตารางแผนการดำเนินงานวิชา Project II



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดง Flow Chart ขั้นตอนการออกแบบโปรแกรมให้แก่แบบจำลอง Inverse Pendulum ได้ดังนี้

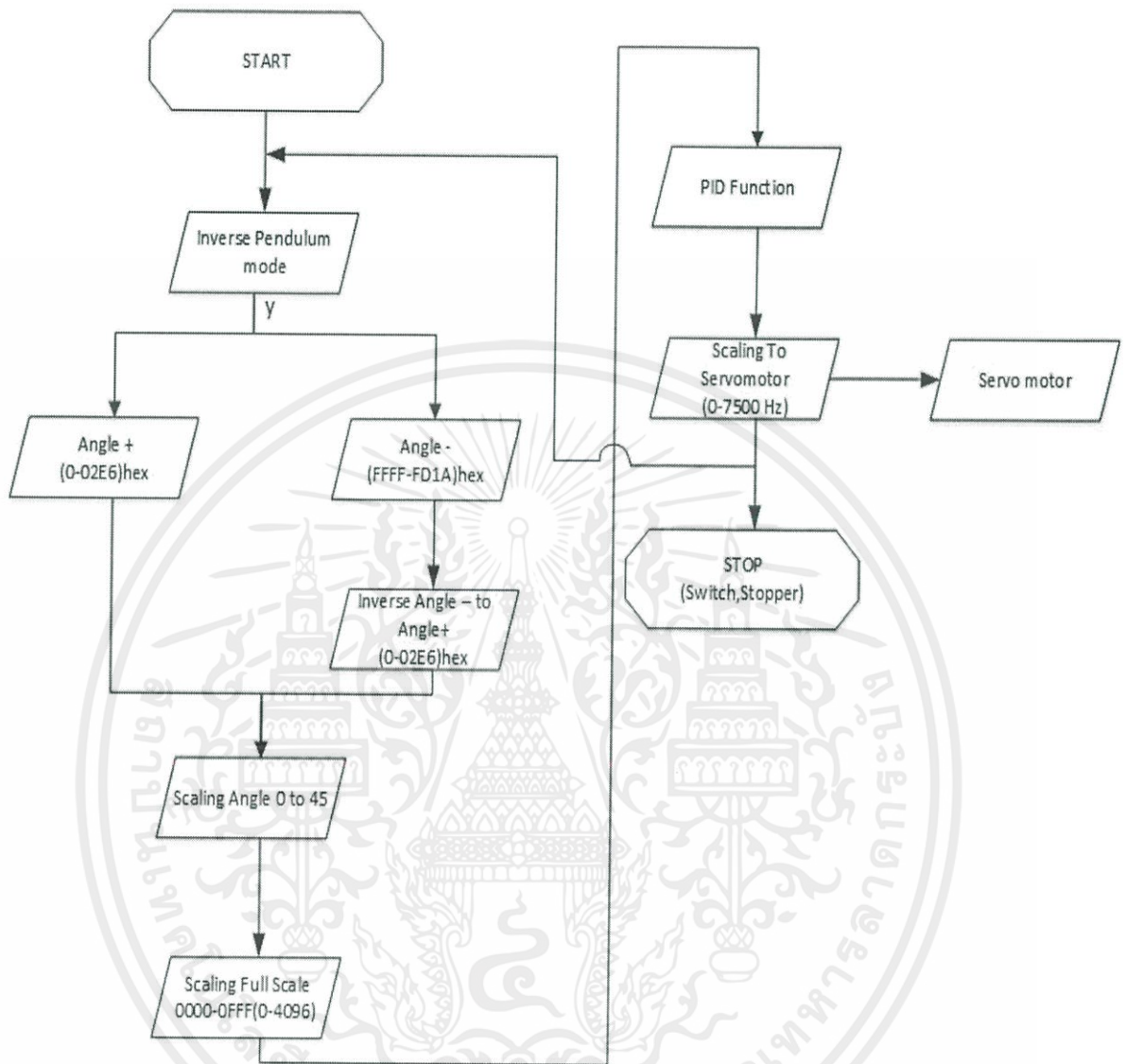


รูปที่ 3.6 Flow Chart ขั้นตอนการเลือกโหมดการทำงานของแบบจำลอง Inverse Pendulum

จากรูปที่ 3.6 แสดงขั้นตอนการทำงานของแบบจำลองโดยข้อมูล จะได้มาจาก A/D ซึ่งเป็น Input ให้กับ PLC ที่ Address 200 ซึ่งแบบจำลองจะแบ่งส่วนของข้อมูลออกเป็น 2 ส่วน คือ ด้านบวกและด้านลบ เมื่อ Input อยู่ในช่วง $(FA0A - 02F6)_{Hex}$ หรือ -46° ถึง 46° (ด้านล่าง) จะทำงานในโหมด Pendulum และถ้าอยู่ในช่วง $(FA1A - 02E6)_{Hex}$ หรือ -45° ถึง 45° (ด้านบน) จะทำงานในโหมด Inverse Pendulum

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดง Flow Chart แสดงขั้นตอนการทำงานในโหมด Inverse Pendulum ได้ดังนี้



รูปที่ 3.7 Flow Chart แสดงขั้นตอนการทำงานในโหมด Inverse Pendulum

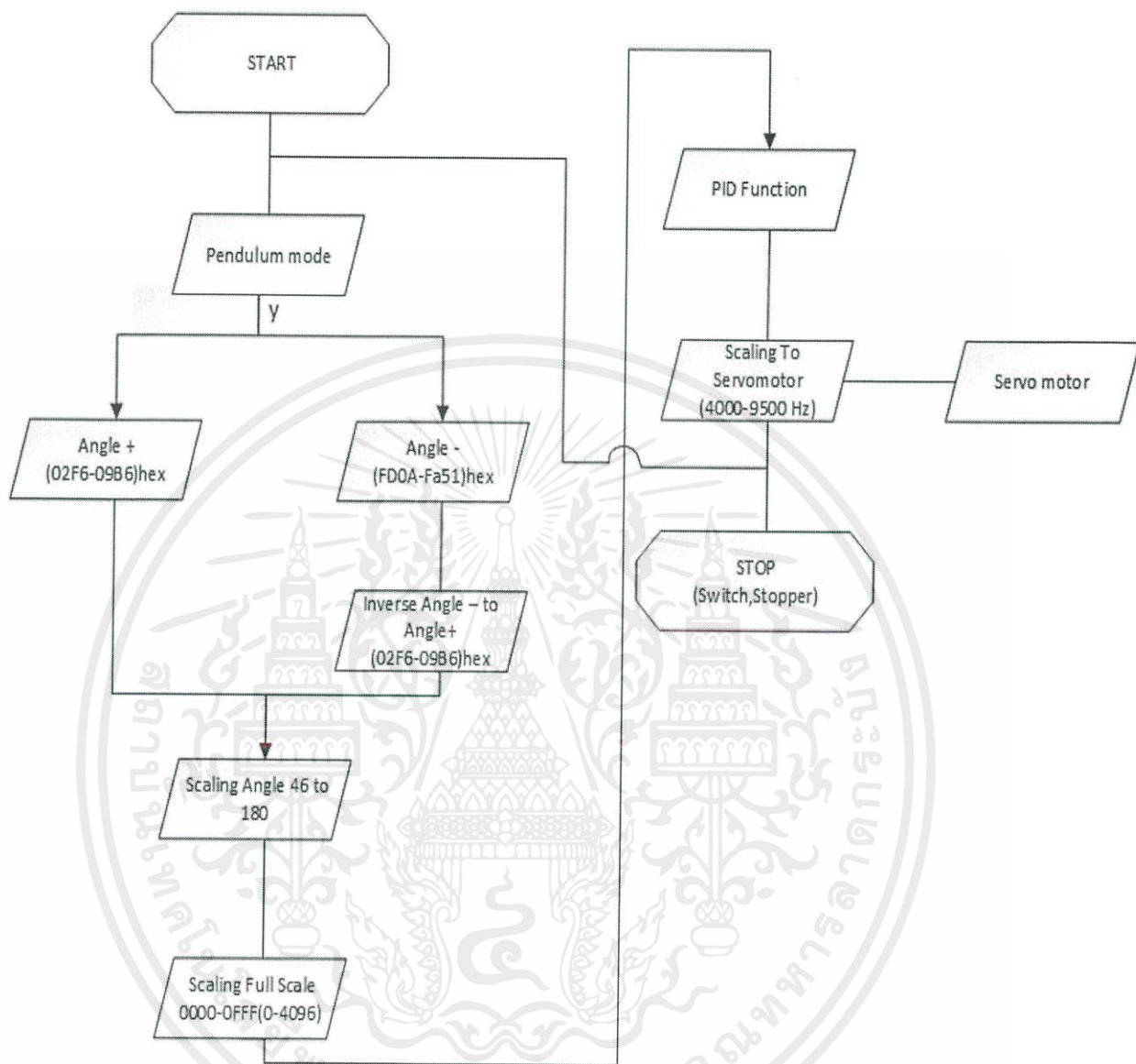
จากรูปที่ 3.7 แสดงการทำงานในโหมด Inverse Pendulum โดยจะแบ่งมุมออกเป็น

1. $(0-02E6)_{Hex}$ หรือ 0° ถึง 45°
2. $(FFFF-FD1A)_{Hex}$ หรือ -1° ถึง -45°

โดยมุมทางด้านลบจำเป็นต้อง Clear Flag ออกก่อน เนื่องจาก PID ใน PLC นั้น จะทำงานก่อน ต่อเมื่อ Input ที่เป็นบวก เมื่อทำการเลือกเงื่อนไขแล้วทำการ Scaling เพื่อเปลี่ยนค่าข้อมูลจาก Hex ให้อยู่ในรูปองศาและทำการ Scaling ให้อยู่ในรูปของ Full Scale 12 Bit (0-4096) เนื่องจาก PID นั้นรับ Input ที่เป็น 12 Bit และเมื่อ PID Function จะได้ Output ออกมา โดยทำการ Scaling ให้อยู่ในรูปความถี่ 0-7500 Hz เพื่อนำไปขับให้กับ Servo Motor ทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดง Flow Chart แสดงขั้นตอนการทำงานในโหมด Pendulum ได้ดังนี้



รูปที่ 3.8 Flow Chart แสดงขั้นตอนการทำงานในโหมด Pendulum

จากรูปที่ 3.8 จะคล้ายคลึงกับรูปที่ 3.4 เพียงแต่เป็นการทำงานในส่วนของ Pendulum ที่มีการแบ่งข้อมูลที่ต่างกันออกไปแสดงได้ดังนี้

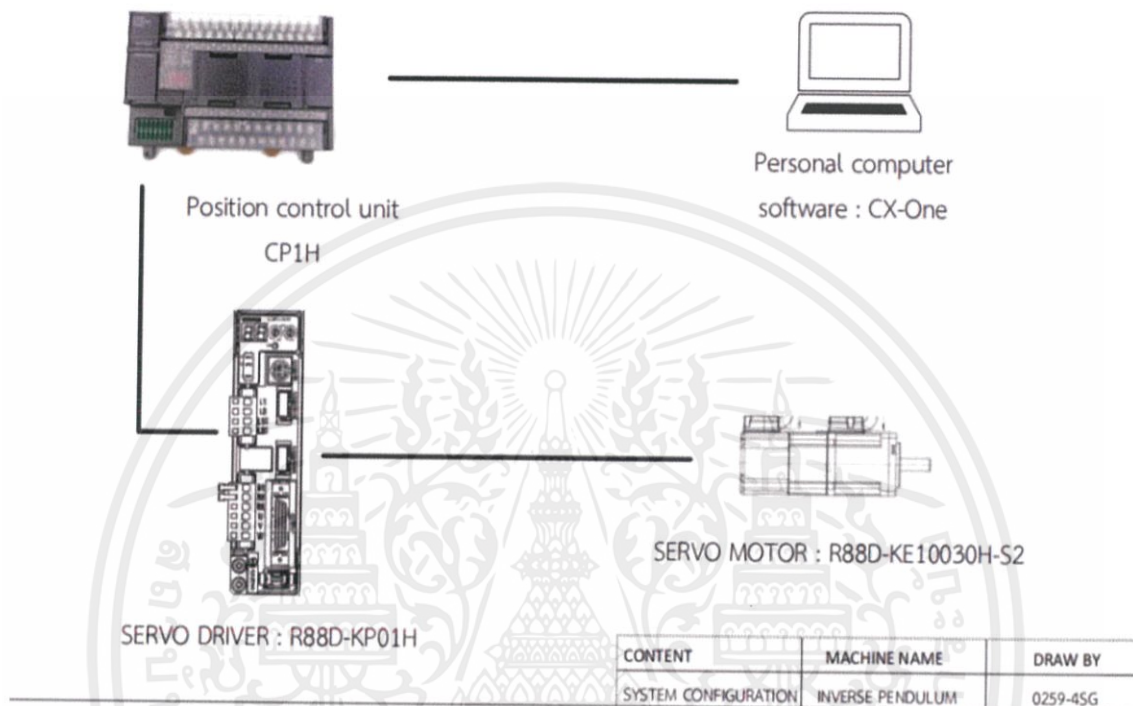
1. ด้านบวก $(02E6-09B6)_{Hex}$ หรือ 46° ถึง 180°
2. ด้านลบ $(FDOA-Fa51)_{Hex}$ หรือ -46° ถึง -180°

และการ Scaling ค่า Output ที่ออกจาก PID Function เพื่อนำค่าความถี่ที่จะส่งให้กับ Servo Motor นั้นจะอยู่ที่ 4000-9500 Hz

3.4 การทดสอบด้าน Hard Ware

3.4.1 อินเวอร์สเพนดูลัม ซิสเต็ม คอนฟิกูเรชั่น

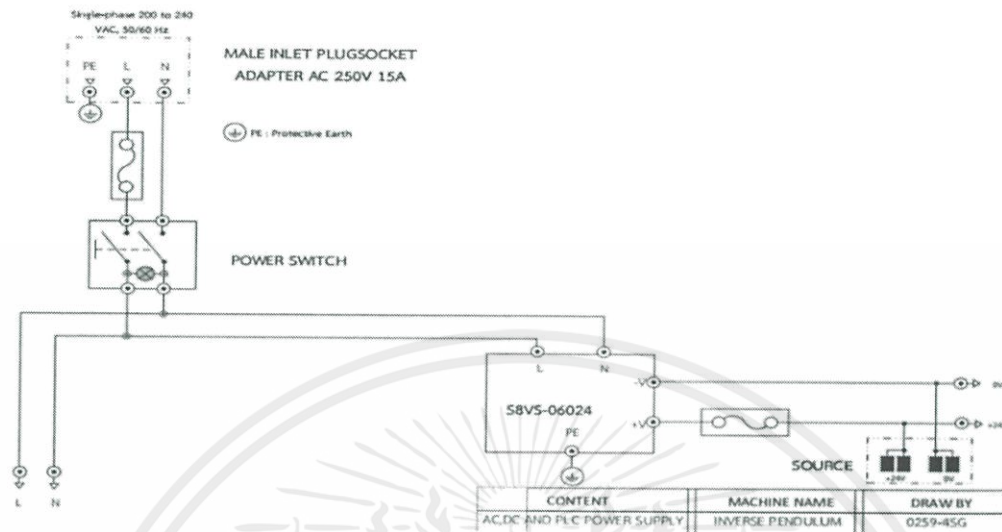
System configuration



รูปที่ 3.9 การเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ในแบบจำลองเข้ากับ PC

การทำงานของระบบโดยรวมของ แบบจำลอง Inverse Pendulum โดยมีอุปกรณ์ที่ทำงานหลัก ๆ อยู่ 4 ส่วนคือ Computer ที่มีซอฟต์แวร์ CX-ONE เชื่อมต่อกับ PLC CP1H และ PLC เชื่อมต่อกับ Servo Driver : R88D-KP01H เพื่อให้ Servo Driver ควบคุมการทำงานของ Servo Driver : R88D-KE10030H-S2

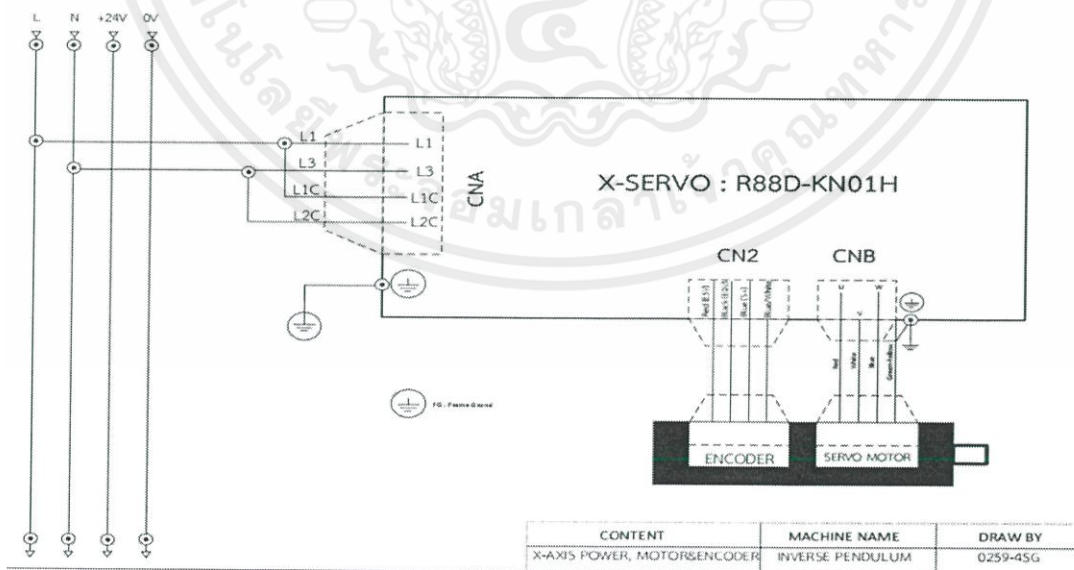
3.4.2 ไฟหลัก AC & DC พาวเวอร์ซัพพลาย และ PLC ซัพพลาย



รูปที่ 3.10 การเชื่อมต่อระหว่างไฟ AC 220V เข้าที่ Power Supply ผ่าน Main Circuit Breaker

ในการทำงานของแบบจำลอง Inverse Pendulum จะใช้ Male Inlet Plugsocket Adapter AC 250V 15A ผ่าน Power Switch และใช้ Power Supply S8VS-06024 แปลงจาก 250V เป็น 24V เป็น Power หลักของ PLC และแบบจำลอง Inverse Pendulum

3.4.3 X-AXIS เซอร์โว พาวเวอร์, มอเตอร์ & เอ็นโค้ดเดอร์

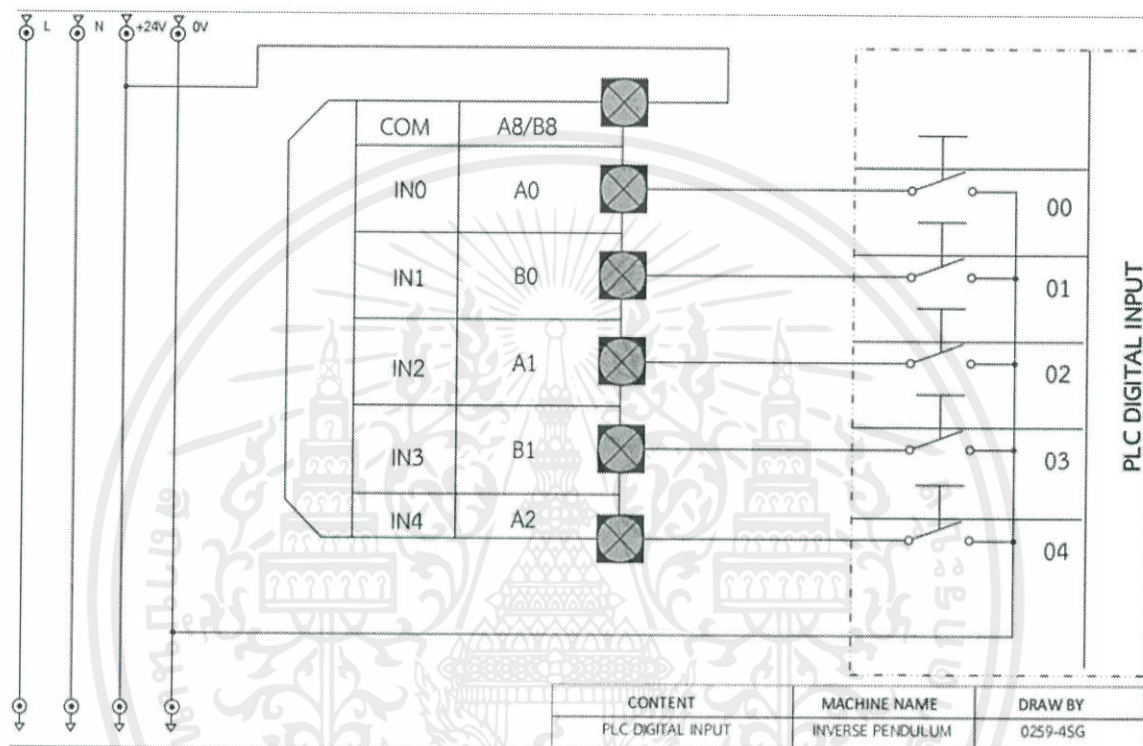


รูปที่ 3.11 แสดงการเชื่อมต่อระหว่างไฟ AC 220 V กับ Servo Drive

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทำงานของ Servo Driver : R88D-KN01H จะใช้ไฟฟ้า 220 V (AC) ในการจ่ายไฟให้กับตัวของ Servo Driver โดยต่อ CNA เข้ากับ Servo Driver และต่อ CN2 เข้ากับ Encoder และ CNB ต่อเข้ากับ Servo Motor

3.4.4 PLC ดิจิตอล อินพุท: อินพุท - สวิตช์

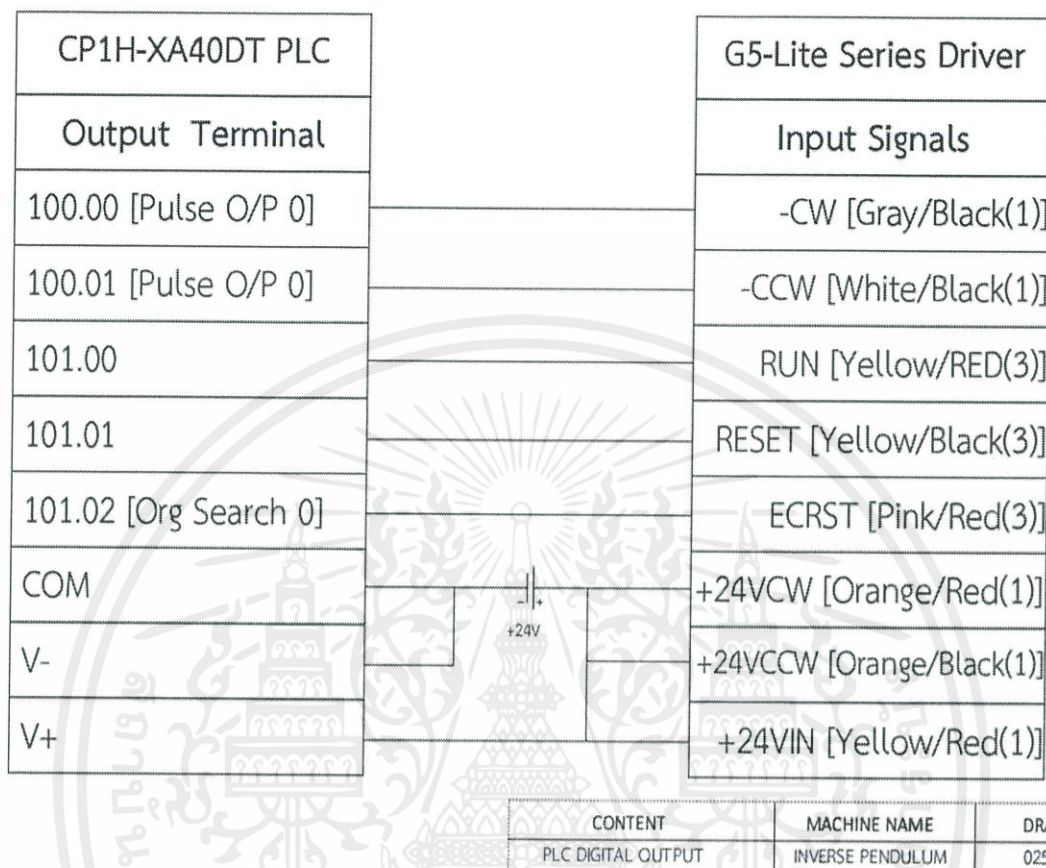


รูปที่ 3.12 แสดงการเชื่อมต่อไฟ DC 24 V เข้ากับ Switch

การทำงานในโหมดการทำงานแบบควบคุมด้วยมือ (Manual Mode) จะใช้ Switch ในการควบคุมแบบจำลอง Inverse Pendulum โดยทำการต่อสวิตช์ทั้งหมด 5 ตัว ดังต่อไปนี้

- 1) ON/OFF Switch ใช้สำหรับเปิดและปิดวงจรภายในระบบ อยู่ที่ Switch 00
- 2) ORIGIN Switch ใช้สำหรับการค้นหาจุดหรือตำแหน่ง Origin เมื่อเริ่มการใช้งานในโหมด Auto อยู่ที่ Switch 01
- 3) RIGHT Switch ใช้สำหรับเคลื่อนที่ฐานจำลองไปทางด้าน CW (Clock Wise) อยู่ที่ Switch 02
- 4) LEFT Switch ใช้สำหรับเคลื่อนที่ฐานจำลองไปทางด้าน CCW (Counter Clock Wise) อยู่ที่ Switch 03
- 5) STOP Switch ใช้สำหรับหยุดวงจร อยู่ที่ Switch 04

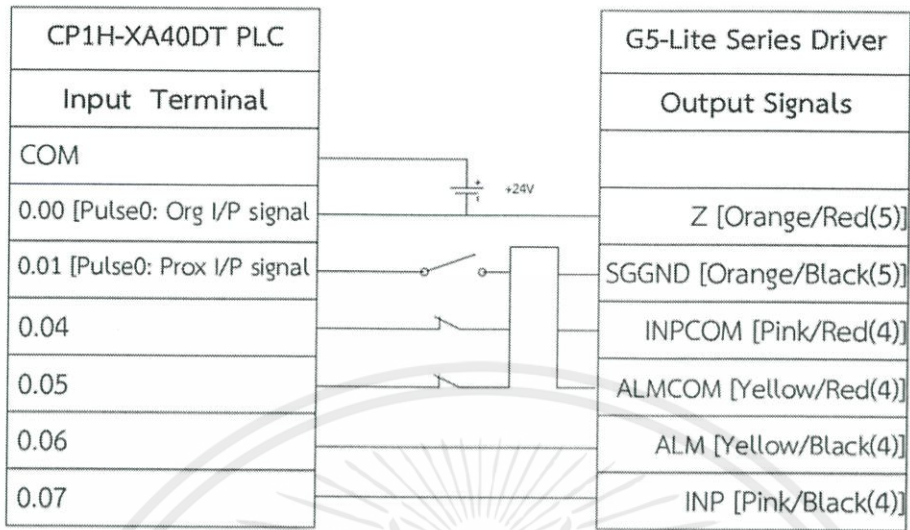
3.4.5 PLC ดิจิตอล เอาท์พุท: เอาท์พุท – เซอร์โวไดรฟ์



รูปที่ 3.12 แสดงการเชื่อมต่อระหว่าง PLC ทางด้าน Output กับ Input ของ Servo Driver

ในการใช้งาน Servo Drive นั้น จะมีการเชื่อมต่อ Output จาก PLD เพื่อสั่งให้ Servo Drive ทำงานเพื่อนำสัญญาณไปจับ Servo Motor จากรูปที่ 3.13 แสดงการเชื่อมต่อภายนอกของ PLC ที่ Output Terminal นำไปเชื่อมต่อกับ Input ของ Servo Drive โดยทำตามแบบจากคู่มือการใช้งาน [4]

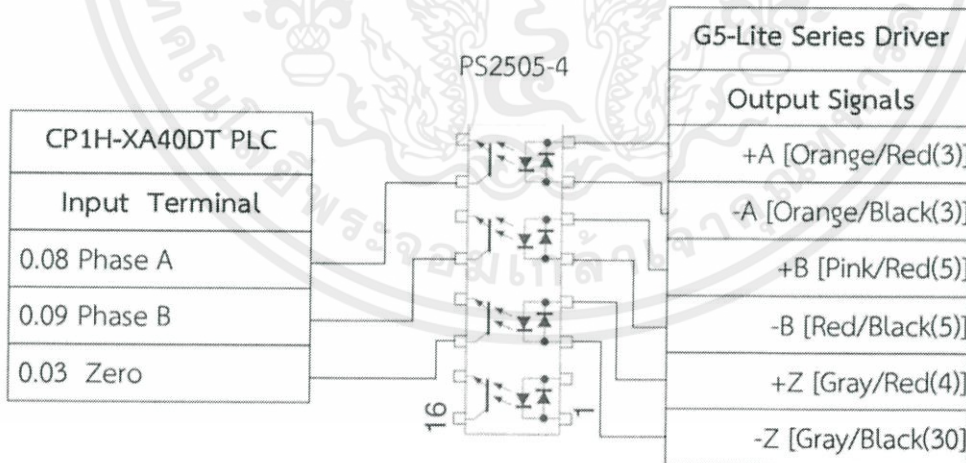
3.4.6 PLC ดิจิตอล อินพุท: อินพุท – เซอร์โวไดรฟ์



CONTENT	MACHINE NAME	DRAW BY
PLC DIGITAL INPUT	INVERSE PENDULUM	0259-4SG

รูปที่ 3.14 (ก.)

จากรูปที่ 3.14 (ก) เป็นการเชื่อมต่อระหว่าง Input ของ PLC และ Output ของ Servo Drive เมื่อ Servo Drive เริ่มทำงานจะมีการแสดงสัญญาณดังต่อไปนี้ 0.04 แสดงสัญญาณ เมื่อ Cart อยู่ที่ตำแหน่ง CW (Proximity Sensor ด้าน CW)



CONTENT	MACHINE NAME	DRAW BY
PLC DIGITAL INPUT	INVERSE PENDULUM	0259-4SG

รูปที่ 3.14 (ข)

รูปที่ 3.14 ทั้ง (ก) และ (ข) แสดงการเชื่อมอินพุททางด้าน PLC เข้ากับ Servo Driver

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพแสดงการเชื่อมระหว่าง PLC ทางด้าน Input กับ Output ของ Servo Driver และในภาพที่ 3.14 (ข.) จะเห็นว่ามีการต่อ IC PS2505-4 ที่ทำหน้าที่เป็นตัวขยายสัญญาณ PLC ให้กับ Servo Driver เนื่องจากสัญญาณทางด้าน Servo Driver จะเป็นสัญญาณที่ค่อนข้างต่ำ จึงใช้ IC PS2505-4 ที่ลักษณะการทำงานคล้ายกับ Opto Isolator ขยายสัญญาณให้กับ Servo Driver

3.5 การทดสอบทางด้าน Software

โดยแบ่งขั้นตอนออกเป็นดังนี้

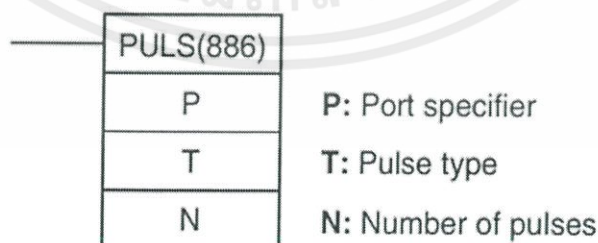
3.5.1 การเขียนโปรแกรมให้แบบจำลองสามารถทำงานในโหมด Manual

ความสำคัญในการเขียนโปรแกรมให้แบบจำลอง Inverse Pendulum ทำงานในโหมด Manual ได้นั้น เพื่อทำการศึกษาและสังเกต Characteristic และกำหนดค่า Speed ของ Inverse Pendulum ให้ตัวของลูกตุ้มที่ตกอยู่ในแนวตั้งนั่นเอง สามารถหมุนขึ้นมาตั้งตรงในทิศทางตรงกันข้ามกับแนวตั้ง และรักษาสมดุลของลูกตุ้มให้ตั้งตรงอยู่ตลอดเวลาเมื่อตัวฐานของลูกตุ้มนั้นมีการเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา โดยค่าพารามิเตอร์ที่ผลต่อตัวแบบจำลอง Inverse Pendulum นั้นมีอยู่ด้วยกัน 3 ตัวแปร ประกอบด้วย

1. ระยะทางและตำแหน่งของฐาน
2. ความเร็วของตัวฐาน
3. มุมองศาของการแกว่งลูกตุ้ม

โดยการเขียนโปรแกรมที่สามารถทำให้แบบจำลอง Inverse Pendulum ทำงานในโหมด Manual ได้นั้นจะประกอบด้วย 2 ฟังก์ชันบล็อกหลัก ๆ คือ 1. ฟังก์ชัน PULS (886) 2. ฟังก์ชัน SPED (885) การออกแบบโปรแกรมจะสอดคล้องกับแบบจำลอง Inverse Pendulum โดยการใช้งานทั้ง 2 ฟังก์ชันเป็นดังต่อไปนี้

- การใช้งานฟังก์ชัน PULS (886)

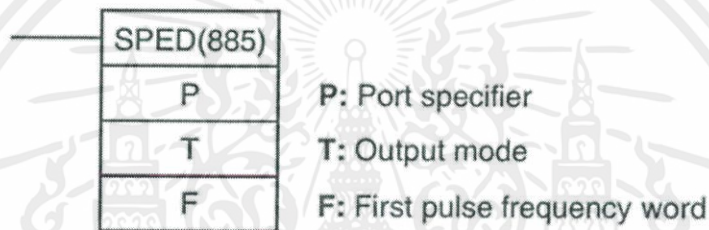


รูปที่ 3.15 Instruction Symbol ของ PULS (886) [3]

ฟังก์ชัน PULS (886) ใช้ในการกำหนดปริมาณ Pulse เอาต์พุตหรือจำนวน Pulse เอาต์พุตเพื่อส่งจำนวน Pulse เอาต์พุต เมื่อมีการเริ่มการใช้งาน โดยฟังก์ชัน PULS (886) จำเป็นจะต้องใช้ร่วมกับฟังก์ชัน SPED (885) หรือ ACC (888) เพื่อให้ตัวฐานของแบบจำลอง Inverse Pendulum สามารถเคลื่อนที่ได้ โดยสามารถกำหนดตัวแปรให้กับฟังก์ชันได้ดังนี้

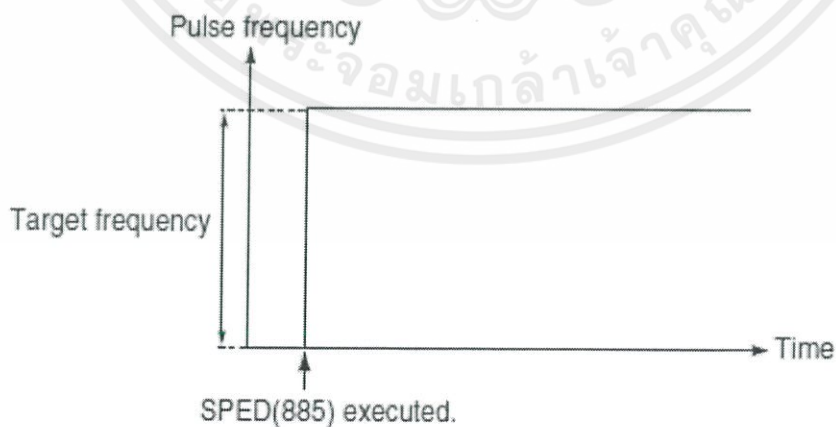
- 1) P = กำหนดตำแหน่งของพอร์ตเอาต์พุต
- 2) T = กำหนดชนิดของ Pulse เอาต์พุตโดยสามารถเลือกได้ทั้งในแบบ Relative หรือ Absolute
- 3) N = กำหนดจำนวน Pulse เอาต์พุต

- การใช้งานฟังก์ชัน SPED (885)



รูปที่ 3.13 Instruction Symbol ของ SPED (885) [3]

ฟังก์ชัน SPED (885) ถูกใช้ในการกำหนดค่าความถี่ของ Pulse เอาต์พุต (Hz) โดยฟังก์ชันนี้เมื่อถูกเริ่มใช้งาน ความเร่ง (Acceleration) และการลดความเร่ง (Deceleration) จะไม่มีผลในการส่งค่าเอาต์พุตแสดงได้ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 3.14 แสดงการสัญญาณ Pulse เมื่อมีการใช้งานฟังก์ชัน SPED (885) [3]

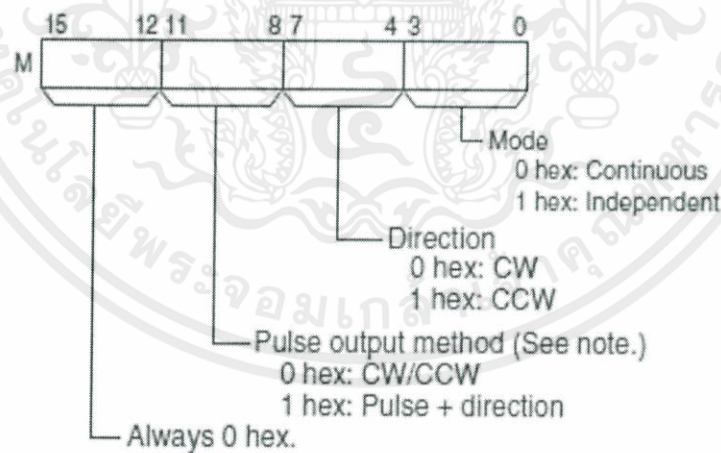
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยฟังก์ชัน SPED (885) สามารถเลือกใช้งานได้ในรูปแบบของ โหมดระบุตำแหน่ง (Independent Mode Positioning) หรือใช้ในโหมดความเร็ว (Continues Mode Speed) แต่ในการใช้งานในโหมดระบุตำแหน่งจำเป็นจะต้องใช้งานร่วมกับฟังก์ชัน PLUS (886) เพื่อให้สามารถใช้งานในโหมดระบุตำแหน่งได้

โดยสามารถกำหนดตัวแปรให้กับฟังก์ชัน SPED (885) ได้ดังนี้

- 1) P = กำหนดตำแหน่งของพอร์ตเอาต์พุต
- 2) M = กำหนดโหมดให้กับตัวฟังก์ชันโดยกำหนดค่าต่างๆลงในตำแหน่งของเลขแต่ละบิตใน 16 Bit สามารถกำหนดได้ดังต่อไปนี้
 - ตำแหน่งที่ 1 (Bit น้อยสุด) เป็นการกำหนดการใช้งานในแบบ Independent หรือแบบ Continues
 - ตำแหน่งที่ 2 เป็นการกำหนดทิศทางในการเคลื่อนที่ในแบบ ทิศทางตามเข็มนาฬิกา (Clock Wise: CW) หรือใช้ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา (Counter Clock Wise: CCW)
 - ตำแหน่งที่ 3 เป็นการกำหนดใช้งานในรูปแบบการไขในส่ว Pulse เอาต์พุต ในกรณีเอาต์พุตไม่เป็นในรูปแบบ Pulse เอาต์พุต
 - ตำแหน่งที่ 4 (Bit มากสุด) กำหนดให้เป็น 0

โดยค่าต่างๆแสดงได้ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 3.18 ตำแหน่งของการกำหนดตัวเลข 16 Bit ให้กับตัวแปร M ในฟังก์ชัน SPED (885) [3]

- 3) F = กำหนดความถี่ (Hz) ของ Pulse เอาต์พุตโดยกำหนดเป็น 2 word คือ F และ F+1 เพราะความถี่ต้องกำหนดอยู่รูปแบบ 32 Bit เลขฐาน 16 (Hex)

3.5.2 การเก็บข้อมูลไว้ใน Data Memory ใน PLC

ความสำคัญสำหรับขั้นตอนนี้ คือ ในการวิเคราะห์ผล ค่าที่ได้จากการทดลองและในการเขียน Ladder Diagram เพื่อให้แบบจำลอง Inverse Pendulum สามารถทำงานในโหมดอัตโนมัติ (Auto Mode) ได้นั้นจำเป็นต้องมีการเก็บข้อมูลที่ได้จากการอ่านหรือประมวลผลจากตัวแบบจำลองเองเข้าไปในตัว PLC แล้ว นำค่าที่ได้นั้นมาทำการวิเคราะห์หา Math Model และใช้ในการกำหนดค่าต่าง ๆ เพื่อควบคุมแบบจำลอง Inverse Pendulum ให้มีคงที่อย่างมีเสถียรภาพในการทรงตัวในแนวตั้ง

จากการศึกษาทฤษฎีบทของ Inverse Pendulum ทำให้ทราบถึงปัจจัยและค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่จำเป็นต่อการทรงตัวในแนวตั้งได้ มีอยู่ด้วยกัน 2 ปัจจัยหลัก คือ

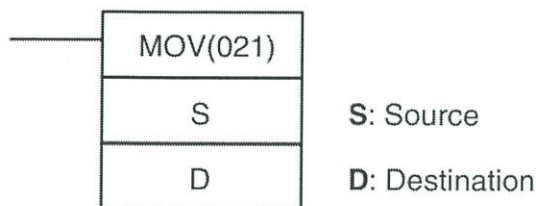
1. การเคลื่อนที่ในแนวระนาบของตัวฐานแบบจำลอง
2. โมเมนต์ของแกนหมุน

ซึ่งทั้งสองปัจจัยนี้จำเป็นต้องทราบค่าพารามิเตอร์ โดยค่าต่าง ๆ นั้นประกอบด้วย

1. มวลของฐานจำลองและมวลของลูกตุ้ม
2. ตำแหน่งและความเร็วของฐานจำลองเมื่อมีการเคลื่อนที่
3. โมเมนต์เฉื่อยของแกนเหล็กที่ใช้ในการหมุน
4. ความยาวของแกนเหล็กจนถึงลูกตุ้ม
5. ความเร่งเชิงมุมของแกนเหล็กเมื่อเกิดการแกว่ง
6. แรงส่ง (Force)
7. แรงต้าน (Friction)
8. มุมของแกนเหล็กเมื่อเกิดการแกว่ง (Angle)

โดยค่าของมวลของฐานจำลอง และมวลของลูกตุ้ม, ความยาวของแกนเหล็กจนถึงลูกตุ้ม, แรงต้าน (Friction) และโมเมนต์เฉื่อยของแกนเหล็กที่ใช้ในการหมุนเป็นค่าคงที่ ดังนั้นสิ่งที่ต้องหาประกอบด้วยหัวข้อที่ 2, 5, 6, และ 8

ในการเก็บข้อมูลนั้นได้ใช้ฟังก์ชัน MOV เป็นหลักเพื่อนำข้อมูลที่อ่านได้จากตัวแบบจำลองไปบันทึกไว้ใน Data Memory ของ PLC ซึ่งในการเก็บข้อมูลถูกเขียนให้อยู่ในรูปแบบ Indirect Data เพื่อให้สามารถบันทึกค่าไว้ ณ ตำแหน่งไหนก็ได้ของ Data Memory ซึ่งสะดวกในการอ่านผล และการนำข้อมูลมาประมวลผลต่อไป ซึ่งการใช้ฟังก์ชัน MOV มีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.19 Instruction Symbol ของ MOV (021) [3]

ฟังก์ชัน MOV (021) ใช้ในการส่งข้อมูลโดยการส่งค่าข้อมูลไปเก็บไว้ที่ตำแหน่งที่ต้องการ โดยการกำหนดค่าคือ 1. S คือ ค่าหรือข้อมูลที่ต้องการจัดเก็บ

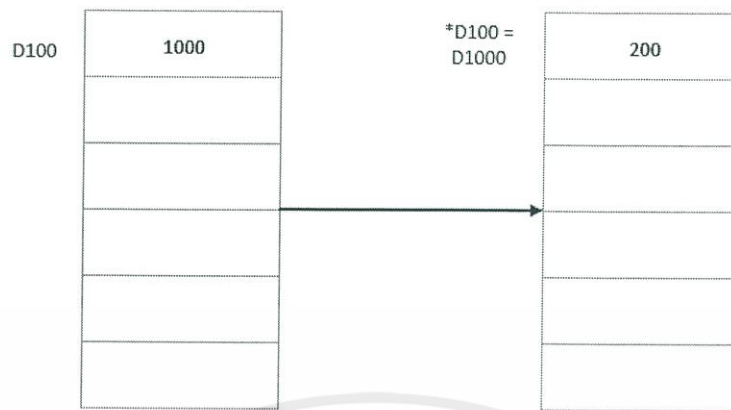
2. D คือ ตำแหน่งที่ต้องการที่นำค่าที่กำหนดไปเก็บไว้ในตำแหน่งนั้น ๆ

ในการใช้ฟังก์ชัน MOV (021) นั้นสามารถใช้งานรูปแบบของ Direct หรือแบบ Indirect Data ก็ได้ซึ่งในการเก็บข้อมูลนี้ได้ในรูปแบบของ Indirect Data แสดงตัวอย่าง Ladder Diagram ในการเขียนออกมาเป็นดังนี้



รูปที่ 3.20 ออกแบบตัวอย่างการใช้งานการเก็บข้อมูลแบบ Indirect Data

จากรูปแสดงตัวอย่างการเขียน Ladder Diagram โดยใช้ฟังก์ชัน MOV ในการส่งข้อมูล โดยจะ Move ค่า 1000 (Hex) ไปไว้ใน D100 ซึ่งเมื่อมีการติดหรือ ON ของ โหลดที่ 1.00 จะส่งค่า 200 (Hex) Indirect ไปที่ *D100 ทำให้ค่า 200 ถูกจัดเก็บไว้ใน D1000 เนื่องจากถ้าต้องการเก็บที่ตำแหน่ง 100 จะมีการอ้าง Address ที่ D100 แต่ถ้ามีการอ้าง Address ที่ *D100 ซึ่งค่าข้อมูลใน #1000 ในตัวอย่าง จะทำให้ตำแหน่ง *D100 ก็คือ ตำแหน่ง D1000 เช่นเดียว แสดงการทำงานออกมาเป็นดังนี้



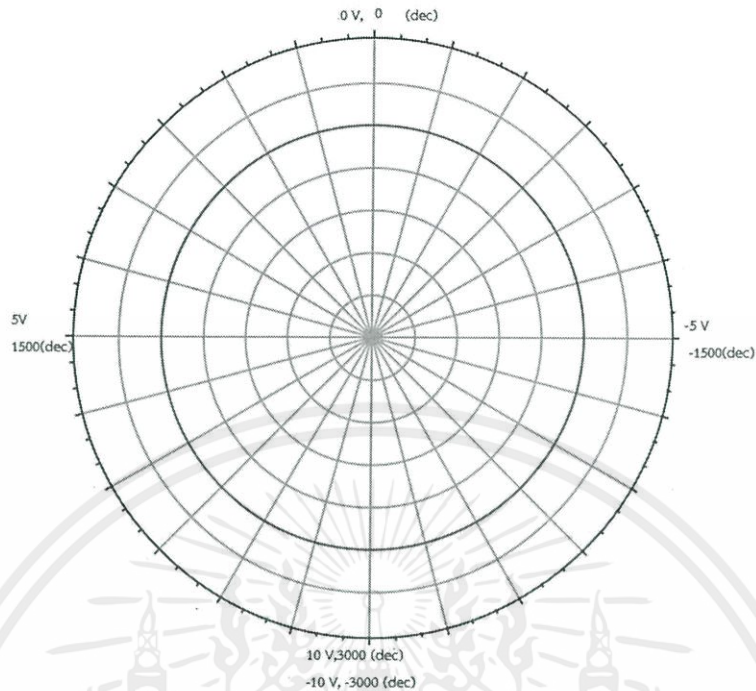
รูปที่ 3.21 ออกแบบตัวอย่างการจัดเก็บข้อมูลเมื่อมีการใช้งาน Indirect Move

ซึ่งในการ Indirect Data นั้นจะเป็นการนำค่าที่กำหนดไว้ในตำแหน่งของ MOV ตัวที่ 1 ไปเป็นตำแหน่งให้กับตัวเก็บข้อมูล (Data Memory) ให้กับฟังก์ชัน MOV ตัวที่ 2 จะเห็นว่าเราสามารถนำค่าของข้อมูลไปเก็บ ณ ตำแหน่งไหนก็ได้ของ Data Memory ใน PLC

ในการออกแบบโปรแกรมได้ทำการเขียน Ladder Diagram ให้สามารถเก็บค่าของข้อมูลที่มีต่อแบบจำลอง Inverse Pendulum เก็บอยู่ด้วยกัน 3 ค่าดังต่อไปนี้

3.5.2.1. มุมองศาที่เปลี่ยนแปลงไป ทางด้าน Hardware ได้ทำการต่อ Resistance เข้าเป็นแกนหมุนให้กับแท่งเหล็ก Pendulum มีลักษณะหน้าที่คล้ายกับ Potentiometer ก็คือ เมื่อมีการเคลื่อนที่ หรือตำแหน่งเปลี่ยนไปจะได้เอาต์พุตที่เปลี่ยนไป ซึ่ง Resistance นี้ก็เช่นกัน เมื่อมีการหมุนของแกนเหล็กตัวของ Resistance เองก็จะมีค่าความต่างศักย์ (Voltage) ที่เปลี่ยนแปลงไป ค่าความต่างศักย์จากการอ่านของ Resistance จะมีทั้งด้าน + และด้าน - ขึ้นอยู่กับทิศทางการหมุนของตัวแท่งเหล็กเอง

ต่อมานำค่าจาก Resistance เข้ามาอ่านใน PLC ซึ่งค่าที่เข้ามา (Input) จะเข้ามาในรูปแบบของสัญญาณ Analog (+10 V ถึง -10 V) การที่นำค่าเข้าไปในตัวใน PLC นั้นจำเป็นต้องแปลงสัญญาณ Analog เป็นสัญญาณ Digital (A/D Converter) ซึ่งใน PLC มีอยู่แล้วสามารถนำไปใช้ได้เลย โดยทำการต่อเข้าที่ A/D Chanel 0 และกำหนดค่า A/D Chanel 0 ในโปรแกรม PLC ให้อ่านค่าเป็น 6000 ทำให้ค่าจากเอาต์พุต Resistance เมื่อนำมาแสดงผลในโปรแกรมจะอ่านค่าได้เป็น -3000 (Dec) ถึง +3000 (Dec) ที่ +10 V ถึง -10 V สามารถแสดงค่ามุมต่างได้ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 3.22 ออกแบบช่วงค่ามม (Dec) เมื่ออ่านจากโปรแกรมและ Voltage ที่อ่านจาก Digital MultiMate

การเก็บข้อมูลของมมได้แบ่งการเก็บออกเป็น 2 ค่าคือ 1) ค่ามมที่เปลี่ยนแปลงไปทุกๆ 0.05 วินาที และ 2) ค่าของมมที่มากที่สุดทางด้าน + และด้าน - ที่ทำได้ในแต่ละรอบ ซึ่งค่าของมมที่อ่านจาก A/D ใน PLC (Auxiliary Relay ของ A/D อยู่ที่ 200 ไนโปรแกรม) จะถูกจัดเก็บไว้ใน Data Memory ซึ่งการจัดเก็บค่าของมมที่เปลี่ยนแปลงไปทุกๆ 0.05 วินาที จะถูกนำไปวิเคราะห์คำนวณหาเวลาที่จับได้จากจุดต่ำสุด (0 องศา) จนถึงมมสูงสุดทางด้าน + หรือ - ด้านใดด้านหนึ่งและการจัดเก็บค่าของมมที่มากที่สุด (Angle MAX) ของด้านในด้านหนึ่งจะถูกนำไปเป็นตัวขับโพลต์ให้กับฐานของแบบจำลอง Inverse Pendulum เคลื่อนที่จนเกิดการแกว่งของลูกตุ้ม โดยเมื่อเราเคลื่อนฐานของแบบจำลองที่มมสูงสุดจะทำให้มุมทางด้านตรงข้ามสูงกว่าค่ามมสูงสุดเดิมที่บันทึกไว้ ทำให้การแกว่ง Pendulum เกิดการเหวี่ยงขึ้นไปด้านบน ณ ตำแหน่งตั้งฉากกับแนวราบ กลายเป็น Inverse Pendulum นั่นเอง

3.5.2.2. จำนวน Pulse ที่ทำได้ในแต่ละรอบการเคลื่อนที่ ความสำคัญของการเก็บจำนวน Pulse นี้เพื่อนำค่าจำนวน Pulse ที่ทำได้ในแต่ละรอบนำไปเปรียบเทียบกับระยะทางจริงที่ตัวฐานเคลื่อนที่ไปได้ ซึ่งการที่จะทราบถึงค่าจำนวน Pulse ได้จะต้องทำการเชื่อมต่อกับ Encoder ที่ติดตั้งอยู่ใน Servo Motor เองเข้ากับทาง PLC แล้วทำการกำหนดค่าให้โปรแกรม CX-Program สามารถอ่านค่าได้ ซึ่งตัวแบบจำลองเองได้กำหนดให้ Encoder ทำงานในลักษณะ Increment Type

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คือ เมื่อมีการเคลื่อนที่ Encoder ก็จะนับจำนวน Pulse ออกมา เมื่อมีการกลับทิศทางการเคลื่อนที่ Encoder ก็ยังนับ Pulse จากค่าเดิมที่ได้จากการเคลื่อนที่ก่อนหน้านี้ (จำนวน Pulse ที่อ่านได้ทั้งหมดโดยไม่นับทิศทางการเคลื่อนที่) เพื่อให้ทราบถึงจำนวน Pulse ในการเคลื่อนที่

โดย Encoder Increment Type นี้ได้ออกแบบโปรแกรมให้เมื่อมีการเคลื่อนที่กลับทิศทางจะทำการ Reset ค่าจำนวน Pulse ให้เริ่มนับจาก 0 ใหม่เพื่อทราบถึงจำนวน Pulse ที่ทำได้ในแต่ละทิศทางการเคลื่อนที่ (Relative Pulse) โดยที่เราจะทราบถึงค่าต่างๆที่มีผลต่อการอ่านค่าจำนวน Pulse จาก Auxiliary Relay ดังต่อไปนี้

- จำนวน Pulse (32 Bit หรือ 2 Word) ที่ Word แรกที่ A270 และ Word สองที่ A271
- Reset bit เมื่อต้องการ Reset ค่าจำนวน Pulse ที่ A531.00

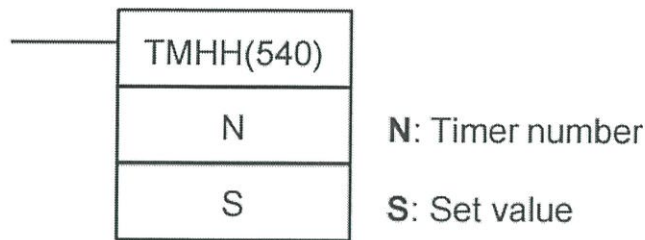
นำ Auxiliary Relay ต่างๆไปใช้ในการเขียน Ladder Diagram ซึ่งออกแบบให้ตัวแบบจำลองเอง

เมื่อต้องการใช้งานจำเป็นจะต้องเคลื่อนที่ไปที่จุด Home (Origin) เพื่อกำหนดให้และทราบถึงจุดเริ่มต้นที่นับค่า Pulse ให้เป็น 0 แล้วทำการนับค่า Pulse ซึ่งการเขียน Ladder Diagram สำหรับการหาตำแหน่งหรือจุด Origin นั้นสามารถเขียนได้ 2 รูปแบบคือ

- ใช้ Load ของ Proxy Sensor ที่จุด Origin ตัดต่อวงจร
- ใช้ Function Block `_NCCP1H051_Home_DINT` สำหรับการ Search หาจุด Origin

ซึ่งได้ทำการออกแบบให้ใช้ Load ของ Proxy Sensor ที่จุด Origin ตัดต่อวงจร เมื่อมีการ Search หาจุด Origin ตัวฐานจะเคลื่อนที่ไปที่จุด Origin โดยจะหยุดที่ตำแหน่งนั้นและ Reset ค่าจำนวน Pulse ให้เป็น 0 เพื่อให้พร้อมสำหรับการเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติ (Auto Mode)

3.5.2.3. ค่าเวลา (Timing) ทำการเก็บเพื่อให้ทราบถึงเวลาที่ทำได้ในแต่ละรอบการเคลื่อนที่ของฐานแบบจำลองแล้วนำไปวิเคราะห์หา Math Model เพราะเวลาเป็นตัวแปรสำคัญในการคำนวณความเร็วของฐานการเคลื่อนที่โดยการเขียน Ladder Diagram ได้ใช้ Instruction Symbol ของ TMMH (540) เพราะมีความละเอียดของเวลาอยู่ที่ 1 ms. (สามารถใช้งานได้ตั้งแต่ 0.001 s ถึง 9.999 s) และมี Accuracy อยู่ที่ 0.001 ถึง 0 เพราะตัวของ TIM นั้นมี Resolution เพียงแค่ 0.1 s เพื่อความละเอียดและจำนวนทศนิยมที่มากขึ้นจึงมีการใช้งาน TMMH (540) โดยรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.23 Instruction Symbol ของ TMMH (540) [3]

เมื่อมีสัญญาณอินพุตเข้ามาตัว TIMER จะเริ่มทำการนับเวลาโดยเมื่อเวลาถึงค่าเวลาที่กำหนดไว้ตัว TIMHH ก็จะมีเริ่มทำงานโดยที่ Symbol ของ TMMH (540) จะมีความละเอียดหรือนับได้ตั้งแต่ 0.000 วินาที ถึง 9.999 วินาที ซึ่งจะมีการกำหนดค่าตัวแปรดังนี้

- N คือ การกำหนดเลขประจำตัวให้กับ TIMER ตั้งแต่ 0 ถึง 15
- S คือ การกำหนดค่าของเวลาโดยกำหนดได้ตั้งแต่ #0000 ถึง #9999 (BCD)

3.5.3 การทำงานในโหมดอัตโนมัติ (Auto Mode)

มีความสำคัญคือเพื่อการควบคุมแกนหลักของ Pendulum หมุนขึ้นไปตั้งตรงในแนวตั้ง (ลักษณะของ Inverse Pendulum) โดยแบ่งการเขียน Ladder Diagram ออกเป็น 2 ขั้นตอนดังนี้

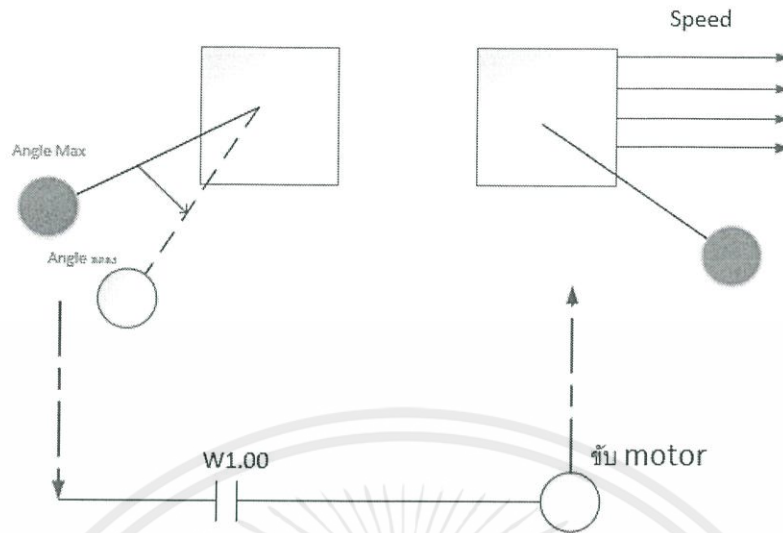
1. การแกว่งของ Pendulum
2. การทรงตัวของ Inverse Pendulum

3.5.3.1 การแกว่งของ Pendulum

ได้ถูกแบ่งการออกแบบออกเป็น 2 แบบ คือ

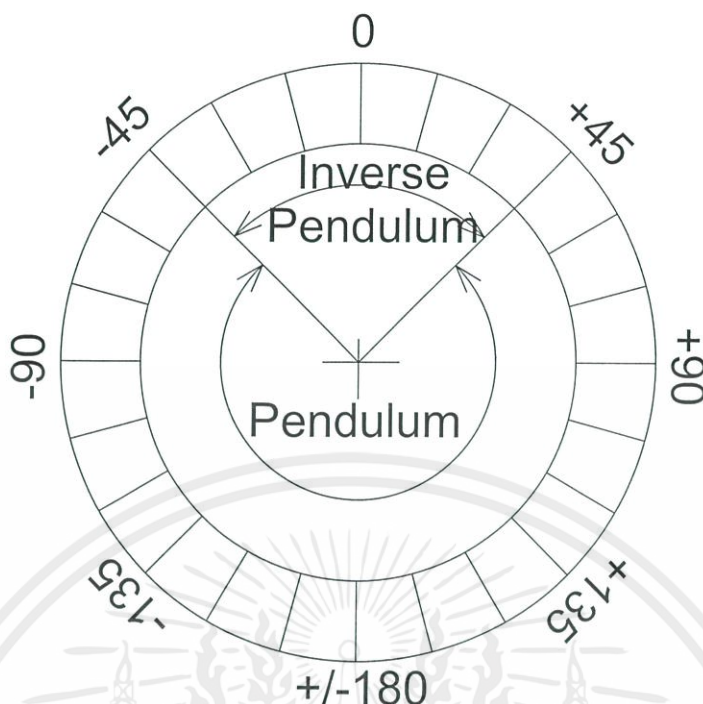
- 1) การแกว่งแบบ Fixed Speed
- 2) การแกว่งแบบอิสระโดยใช้ PD Control

ในการแกว่งของลูกตุ้ม ต้องทราบถึงมุมสูงสุดในแต่ละด้าน เมื่อมีการเคลื่อนที่ของฐานแบบจำลองที่มุมสูงสุด จะทำให้เกิดมุมสูงสุดใหม่ของมุมสูงสุดด้านตรงข้าม โดยการใช้อยู่ Instruction Symbol ของ CMP (ใช้สำหรับการเปรียบเทียบค่า 2 ค่า) เพื่อเปรียบเทียบค่าโดยเมื่อค่าของมุมตกลงจากมุมสูงสุดที่ได้จะทำการ ON Load ตัวหนึ่ง โดยที่ Load ตัวนี้จะทำหน้าที่เป็นตัวขับเคลื่อนเร็วให้กับตัวฐานของแบบจำลอง



รูปที่ 3.24 แสดงรูปแบบการทำงานเมื่อนำค่ามุมสูงสุดมาเป็นตัวขับโพลต์ให้เคลื่อนที่กลับทิศทาง

โดยเมื่อลูกตุ้มจะมีมุมการแกว่งเพิ่มขึ้นจนเหวี่ยงขึ้นไปตั้งตรงในแนวตั้ง (360 องศา) แต่ในทางปฏิบัติจริง มุมจะมีช่วงที่ค่าหายไป (Dead Band) ช่วงหนึ่งจึงทำให้ต้องมีการควบคุมการแกว่งในช่วงๆ นั้น เพื่อให้ลูกตุ้มและแกนของมันเองตั้งตรงในแนวตั้งได้เนื่องจากวิธีการนี้ได้ ออกแบบให้ตั้งค่าความเร็วมอเตอร์อยู่ที่ความถี่ 12000 Hz ตลอดการเคลื่อนที่จึงทำให้ไม่สามารถทราบค่าความเร็วและเวลาที่พอเหมาะสำหรับการแกว่งของลูกตุ้ม ดังนั้นจึงออกแบบโปรแกรมใหม่โดยใช้ PID Control เพื่อที่จะเร่งเวลาให้แกนของลูกตุ้มแกว่งตั้งตรงได้เร็วขึ้นโดยใช้เวลาน้อยที่สุดโดยมีการออกแบบมุมในช่วงของ Pendulum ดังต่อไปนี้

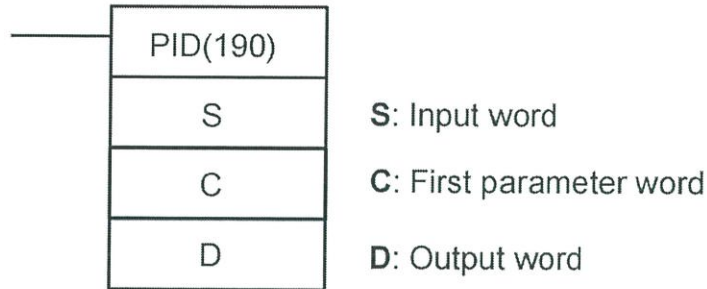


รูปที่ 3.25 ออกแบบการแบ่งช่วงมุมในส่วนของ Inverse Pendulum และ Pendulum โดยจุดอ้างอิงอยู่ที่ 0 (Dec) หรือ 0 องศา

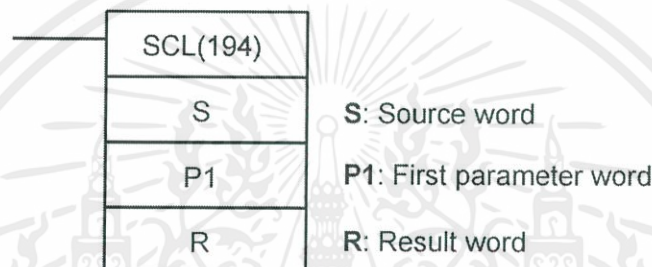
จากรูปที่ 3.25 แสดงการแบ่งช่วงมุมทำให้ในส่วน Pendulum อยู่ที่ 45 องศา ถึง 180 องศา และ -45 องศา ถึง -180 องศา โดยการทำงานคือลูกตุ้มจะอยู่ที่มุม 180 องศา เมื่อเริ่มการใช้งานลูกตุ้มจะแกว่งไปมาในขณะที่ลูกตุ้มแกว่ง ฟังก์ชัน PID ในส่วนของ Pendulum ก็จะร่วมทำงานด้วย โดย PID นี้มีลักษณะของ PD Control ฟังก์ชัน PID มีรูปแบบการใช้งานดังรูปที่ 3.26 ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

3.5.3.2 การทรงตัวของ Inverse Pendulum

จากรูปที่ 3.25 แสดงการแบ่งช่วงมุมทำให้ในส่วน Inverse Pendulum อยู่ที่ 0 องศา ถึง 45 องศา และ 0 องศา ถึง -45 องศา โดยการออกแบบโปรแกรมให้แบบจำลองทำงานในช่วงของ Inverse Pendulum นั้นได้ใช้ฟังก์ชัน PID ใน PLC เพื่อให้แกนของลูกตุ้มสามารถทำงานในช่วงมุมตั้งแต่ 45 องศา ถึง -45 องศาได้ โดยเมื่อการแกว่งของลูกตุ้มแกว่งขึ้นมาในส่วนของ Inverse Pendulum เมื่อใด Inverse Pendulum จะเริ่มทำงานทันที ลักษณะการแกว่งคือ เมื่อแกนลูกตุ้มตกมาทางด้าน 45 องศา ตัวฐานจะเคลื่อนไปทางขวา (CW) และในทางกลับกันเมื่อแกนลูกตุ้มตกมาทางด้าน -45 องศา ตัวฐานจะเคลื่อนไปทางซ้าย (CCW) ทั้งสองรูปแบบการแกว่งจะทำงานร่วมกับ PID โดย PID มีการใช้งานดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.26 Instruction Symbol ของ PID (190) [3]



รูปที่ 3.27 Instruction Symbol ของ SCL (194) [3]

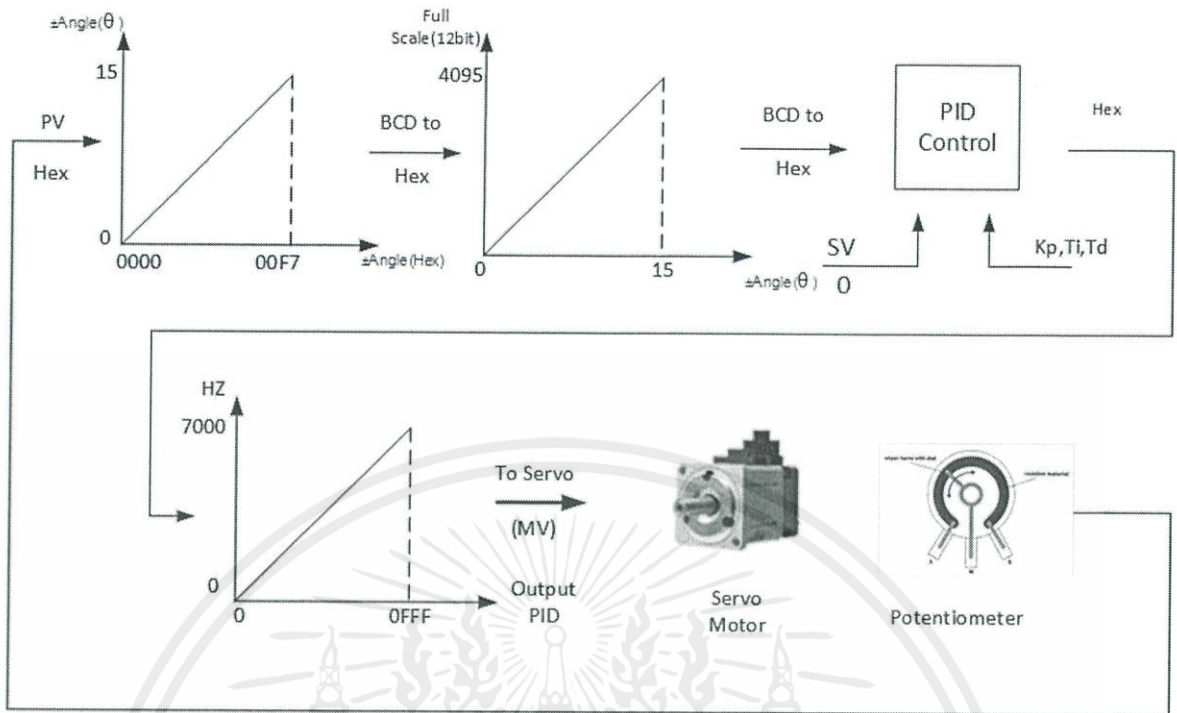
โดยใช้ร่วมกับฟังก์ชัน SCL (194) โดยทำการสเกลค่ามุม (Angle) ที่อ่านจาก Potentiometer เป็น Input ให้กับ PID และเซตค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ใน Data Memory เมื่อ PID ทำงานค่า Output ที่ออกจาก PID จะเป็นค่าที่ส่งให้กับ Servo Drive เพื่อขับ Servo Motor ให้ตัวฐาน (Cart) ทำงาน ซึ่งการกำหนดค่าต่างในฟังก์ชัน PID จะแสดงการกำหนดอยู่ในภาคผนวกต่อไป

ขั้นตอนการ Scaling PV ให้กับ PID และ MV ให้กับ Servo Motor

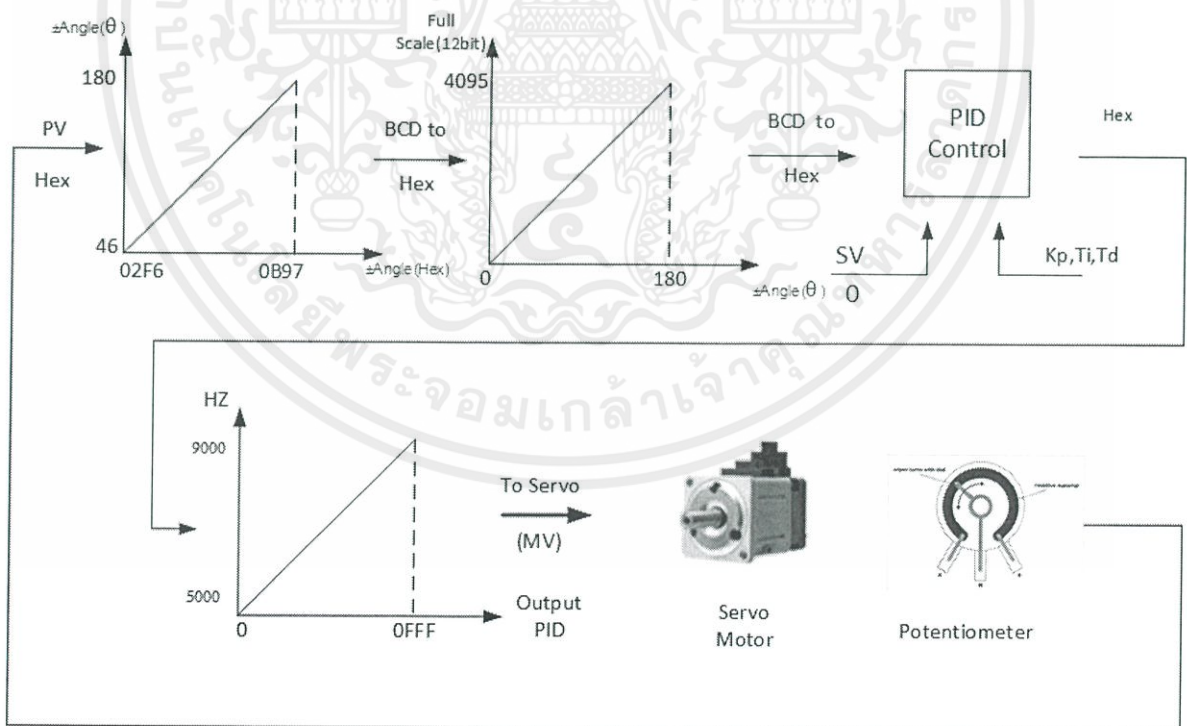
- Scaling ค่ามุมจาก Potentiometer อ่านผ่าน A/D สู่ PLC (Hex) ให้เป็น ค่ามุมในรูปขององศา (BCD)
- Scaling ค่ามุมในรูปขององศา (Hex) ให้เป็น Full Scale ที่ 0 – 4095 (BCD)
- นำค่า Full Scale 0 – 0FFF (Hex) เข้าสู่ PID ซึ่งค่านี้ก็คือค่า Process Variable (PV)
- Scaling ค่า Output จาก PID ให้เป็นค่าความถี่ที่จะส่งให้กับ Servo Motor ซึ่งค่านี้ก็คือค่า Manipulate Variable (MV)

สามารถแบ่งรูปแบบการ Scaling ค่าต่างๆที่ให้กับแบบจำลองทั้งในโหมด Pendulum และ Inverse Pendulum ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.28 ออกแบบการ Scaling ค่า ในส่วนของ Inverse Pendulum

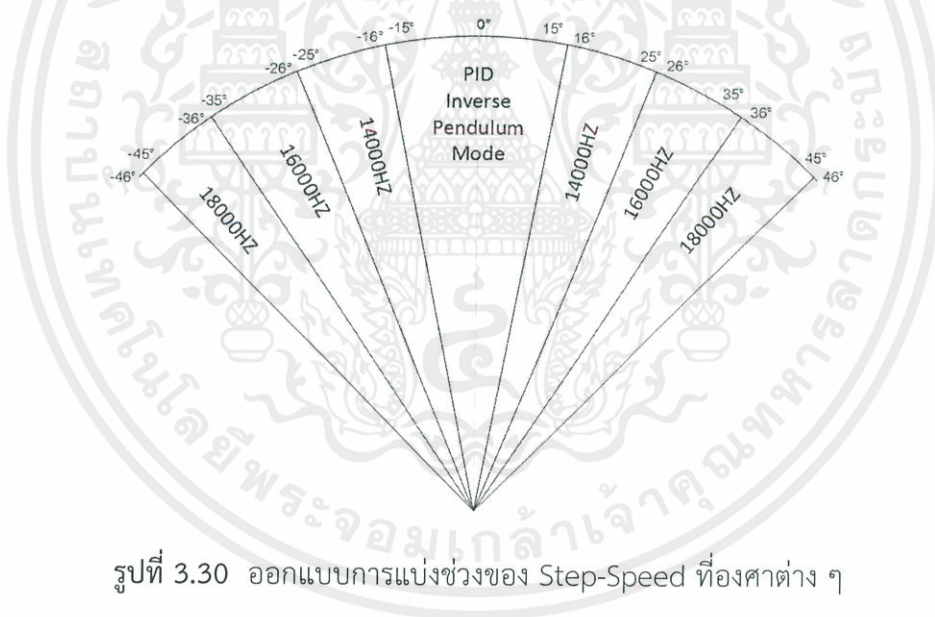


รูปที่ 3.29 ออกแบบการ Scaling ค่า ในส่วนของ Pendulum

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

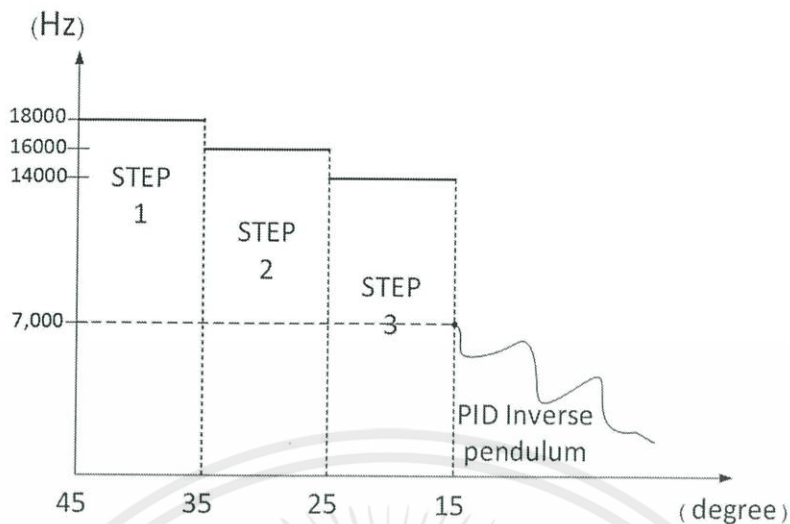
จากรูปที่ 3.28, 3.29 แสดงการนำเข้าออกหรือ Input และ Output ของข้อมูล โดยอ่านการ Scaling เพื่อเปลี่ยนจากค่าข้อมูลหนึ่งไปเป็นอีกค่าข้อมูลหนึ่ง (เปลี่ยนหน่วย) จากรูปที่ 3.28 และ 3.29 นั้น มีขั้นตอนการ Scaling ที่เหมือนกัน แต่ค่าที่ Scaling แตกต่างกันไป โดยมีขั้นตอน คือ ทำการอ่านค่าข้อมูลจาก A/D เข้ามาค่าที่ได้จะมีหน่วยเป็น Hex แล้วทำการแปลง Hex ให้อยู่ในรูปของมุม (องศา) และเปลี่ยนจากองศาให้อยู่ในรูป 0-4096 (Full Scale 12 Bit) เพื่อนำไปป้อนให้กับ PID แล้วนำค่า Output จาก PID มา Scale ให้อยู่ในรูปของความถี่ เพื่อนำไปขับให้กับ Servo Motor ซึ่งค่า A/D นั้น ได้มาจากการเปลี่ยนแปลงของโอห์ม (Ω) ที่ Potentiometer โดยรูปที่ 3.28 แสดงการทำงานในส่วนของ Inverse Pendulum ที่ 0° ถึง 15° และ -1° ถึง -15° และรูปที่ 3.29 แสดงการทำงานในช่วง Pendulum ที่ 46° ถึง 180° และ -46° ถึง -180°

เนื่องด้วยการแกว่งของลูกตุ้มจาก Pendulum เข้าสู่ Inverse Pendulum นั้น แรงบิดและความเร็วของมอเตอร์นั้นไม่เพียงพอที่จะกระชากแกนลูกตุ้มให้เข้าในส่วน Inverse Pendulum ได้ จึงทำการออกแบบโปรแกรมในรูปแบบของ Step-Speed และปรับค่า Parameter ใน Servo Drive แสดงรูปแบบ Step-Speed ในรูปของมุมและกราฟความถี่ได้ดังนี้



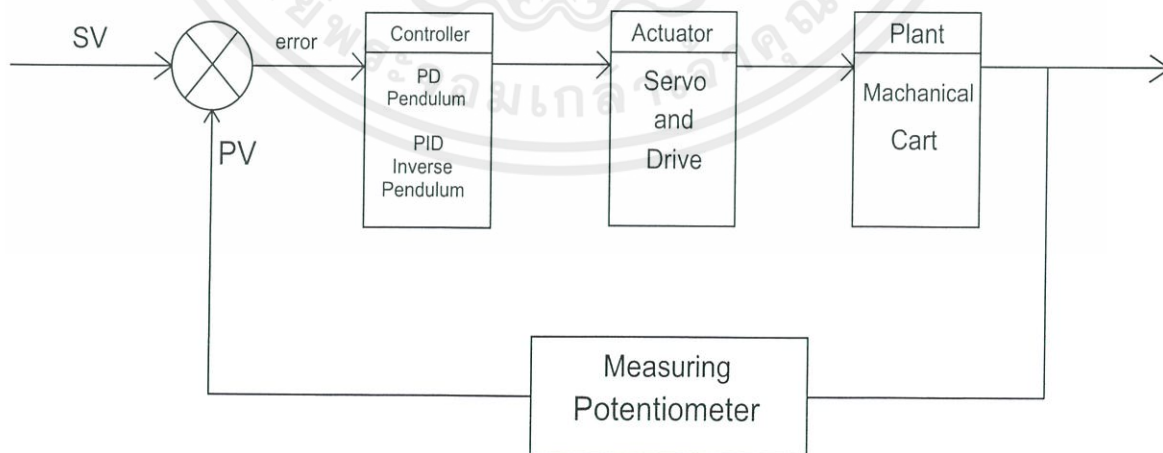
รูปที่ 3.30 ออกแบบการแบ่งช่วงของ Step-Speed ที่องศาต่าง ๆ

จากการทดสอบความถี่ต่าง ๆ เพื่อให้ได้ความถี่ที่เหมาะสมที่จะทำให้ลูกตุ้มแกว่งเข้าสู่โหมด Inverse Pendulum ได้นั้น จะต้องการความถี่ที่มากเพื่อเร่งให้แกนเข้าสู่โหมด Inverse Pendulum และลดความถี่ลง เมื่อกำลังจะเข้าจากทดสอบทำให้ได้ความถี่ออกเป็น 18000, 16000 และ 14000 Hz ตามลำดับ ดังรูปที่ 3.30



รูปที่ 3.31 กราฟแสดงความเร็วที่กำหนดให้กับฟังก์ชัน SPED แต่ละช่วงมุมต่าง ๆ

จากการแบ่งช่วงความเร็วในรูปที่ 3.30 ทำให้ได้กราฟของความเร็วในรูปที่ 3.31 เนื่องจากเพิ่มระดับให้กระชากลูกตุ้มได้เร็วและลดลงเพื่อเข้าสู่โหมด Inverse Pendulum และทำงานในโหมดได้ จึงเรียกรูปแบบนี้ “Step-Speed” จุดประสงค์ เพื่อเร่งความเร็วของมอเตอร์ เหตุผลที่ทำการออกแบบเช่นนี้ เนื่องจากความเร็วและทอร์คของการหมุนของ Servo Motor ไม่เพียงพอที่จะกระชากลูกตุ้มให้ตั้งตรงได้ โดย Step-Speed เป็นขั้นตอนเพิ่มเติมจากการออกแบบระบบโดยรวมสรุป เมื่อรวมทั้งสองส่วนนั้นคือส่วนของ Pendulum และ Inverse Pendulum เข้าด้วยกัน สามารถแสดงการทำงานของระบบได้ดังภาพต่อไปนี้



รูปที่ 3.32 แสดงการทำงานของระบบของแบบจำลอง Inverse Pendulum

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.32 กำหนดค่า Set Point (SV) ให้แก่ PID โดย PID จะทำการเลือกว่าจะทำงานในส่วนไหนระหว่าง Pendulum หรือ Inverse Pendulum เมื่อเลือกได้จะส่งค่า (Output PID) ไปให้แก่ Servo Drive เพื่อนำค่า Speed ไปขับตัวฐาน (Cart) ทำงาน ซึ่งจะวัดมุมจากการทำงานของ Potentiometer ที่ติดกับตัวฐานเป็นค่าที่วัดได้จากกระบวนการ (PV) เพื่อนำไปบวก/ลบ กับ Set Point แล้วได้เป็นค่า Error ที่จะส่งให้ PID ในลำดับถัดไป สาเหตุที่ทำให้ใช้ PID ในโหมด Inverse Pendulum แทนที่จะใช้ PID ในโหมด Pendulum เช่นเดียวกับโหมด Inverse Pendulum เนื่องจากต้องการเร่งให้แกนของลูกตุ้มนั้นแกว่งจากโหมด Pendulum เข้าสู่โหมด Inverse Pendulum ได้เร็วที่สุด จะต้องลดขนาดของค่า I ลง หรือตัด I ทิ้งไปเพื่อจะได้ระยะเวลาที่สั้นที่สุด ในการเข้าสู่ Setpoint แต่ในทางปฏิบัติแล้ว PID ใน PLC OMRON เองนั้น ไม่สามารถทำให้ค่า I นั้นเป็นศูนย์ได้ โดยดูได้จากรายละเอียดการฟังก์ชันในตัวอุปกรณ์เอง [3] ทำให้ค่า I ที่ลดได้ต่ำสุดอยู่ที่ 1 ($T_i = 0.01 \text{ ms}$) และการใช้ PID ในส่วน Inverse Pendulum นั้นเพื่อควบคุมให้แกนของลูกตุ้มตั้งตรงอยู่ในแนวตั้งได้ จึงต้องมีทั้ง P, I และ D ในการทำงานระบบซึ่งค่าต่าง ๆ ที่ทำการปรับจะแสดงรายละเอียดได้ในผลการทดลองต่อไป

บทที่ 4

การวิเคราะห์และผลการทดลอง

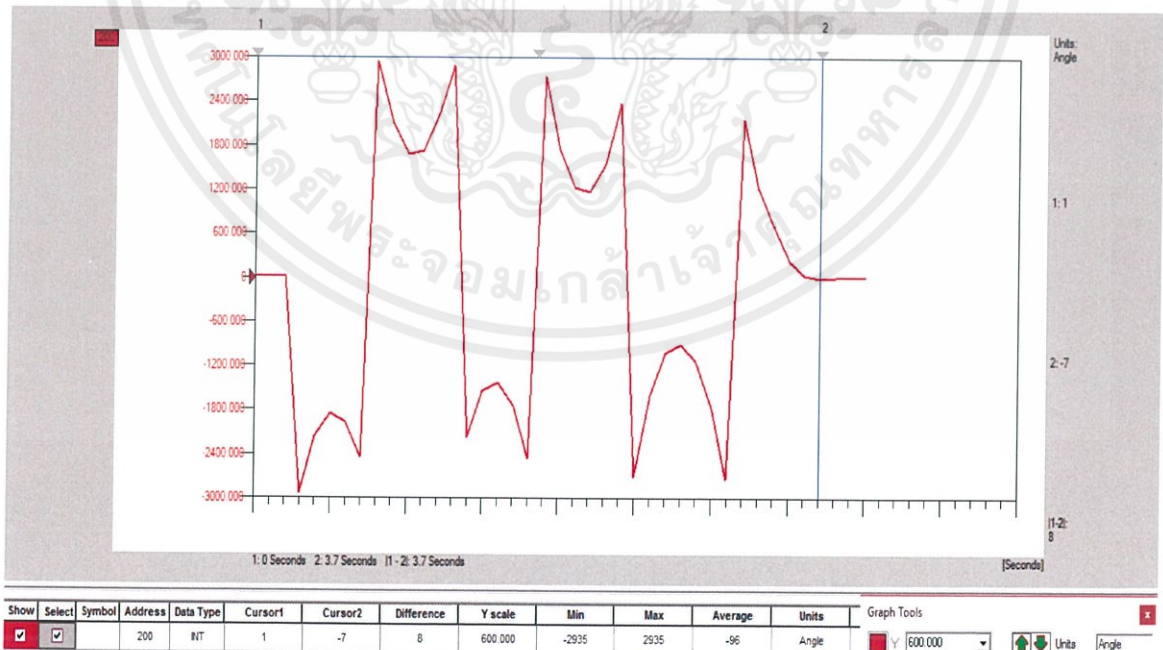
แบ่งขั้นตอนการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ 1. ช่วง Pendulum 2. ช่วง Inverse Pendulum โดยจะทำการเก็บข้อมูลในช่วง Inverse Pendulum เมื่อเริ่มเดินเครื่องจะทำการเก็บค่าในช่วงของ Inverse Pendulum ซึ่งแบ่งการเก็บข้อมูลออกเป็น

1. Angle ทั้ง 2 ช่วง เพื่อดูค่ามุมเปลี่ยนแปลงในการแกว่ง
2. Number of Pulse ทั้ง 2 ช่วง เพื่อดูระยะในการเคลื่อนที่
3. Scantime รวมกันทั้ง 2 ช่วง เพื่อดูว่าการแกว่งนั้นตกเข้าสู่ในช่วงมุมใด
4. PID ใน Pendulum Mode
5. PID ใน Inverse Pendulum Mode

จากการทดลองในการเก็บข้อมูล จากการบันทึกค่าผลการทดลองในการอ่านกราฟจาก PLC ของแบบจำลอง Inverse Pendulum ข้อมูลที่จำเป็นต่อการวิเคราะห์และมีผลต่อตัวแบบจำลองเองได้แก่

- Angle ซึ่งจะประกอบด้วยมุมด้านบวกและด้านลบ

สามารถแสดงการเก็บกราฟข้อมูลค่ามุมได้ดังนี้



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุม (BCD) และเวลา (Second) ในส่วนของโหมด Pendulum

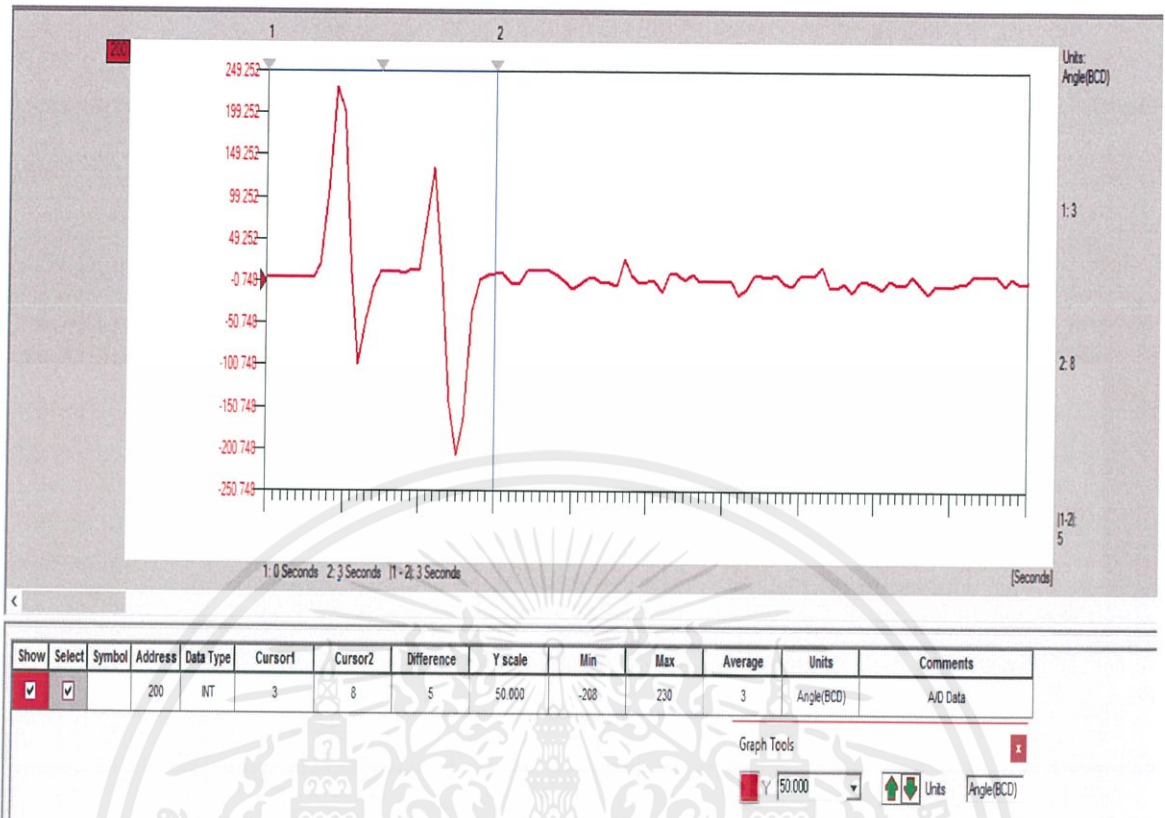
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการทดลองจะแบ่งการบันทึกผลออกเป็น 2 ช่วง คือ 1. ช่วง Pendulum 2. ช่วง Inverse Pendulum โดยการนำ Symbol หรือ Address ที่เกี่ยวข้องนำมาแสดงผลให้อยู่ในรูปแบบของกราฟ โดยในรูปที่ 4.1 และ 4.2 เป็นการนำ Address ที่ 200 ซึ่งค่าดังกล่าวก็คือ มุมที่เปลี่ยนแปลงไปจากการวัดนำมาพล็อตกราฟออกมาโดยเริ่มต้นจะทำการเก็บช่วงมุมที่ Pendulum ทำงานจะได้รูปที่ 4.1 และเมื่อพ้นจาก Pendulum แล้วเข้าสู่ Inverse Pendulum ทำงานจะได้รูปที่ 4.2 แล้วทำการเก็บข้อมูลไปเรื่อย ๆ จนเครื่องหยุดทำงาน ทั้งนี้ได้ทำการทดลองเป็น 5 ครั้ง ในแต่ละช่วงเพื่อดูพฤติกรรม, ความสามารถของแบบจำลองและปรับ Tune พารามิเตอร์ ให้แก่ PLD

จากรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นถึงการแกว่งของลูกตุ้มในส่วนของโหมด Pendulum จากมุมมากที่สุดไปหาน้อยสุดโดยเริ่มเก็บที่วินาทีที่ 0 ไปจนถึงวินาทีที่ 3.7 ซึ่งก็คือ เวลา 3.7 วินาที ในการแกว่งอยู่ภายใต้โหมด Pendulum แล้วมุมจะเป็น 0 เมื่อหลุดออกจากโหมด จะเห็นว่ากราฟมีส่วนเว้าในทุกแอมพลิจูดนั้น เนื่องจากเป็นพฤติกรรมการแกว่งของลูกตุ้ม โดยจะทำการเก็บค่ามากที่สุดก่อนเมื่อการแกว่งสูงขึ้นค่าของมุมจะลดลงนั่นคือ มุมมากที่สุดที่จะทำได้ในแต่ละรอบการแกว่งแล้วทำการแกว่งสลับด้านบวกและลบไปมาทำให้กราฟมีทั้งด้านบวกและลบโดยลู่อูเข้าหา SV ที่ตั้งไว้ที่ 46 องศา เหตุที่ตั้ง SV ไว้ที่ 46° เนื่องจากการทำงานในโหมด Pendulum ซึ่งมีค่ามุมต่ำสุดที่อยู่ที 46° และ -46° เพื่อให้การแกว่งของลูกตุ้มสลับโหมดจาก Pendulum เป็น Inverse Pendulum ได้รวดเร็วจึงตั้ง Setpoint ที่จุดต่ำสุดนั้นก็คือ 46° แสดงตารางเปรียบเทียบเวลาในการเข้าสู่โหมด Inverse Pendulum ของค่ามุมจำนวน 5 ครั้ง โดยในแต่ละครั้งจะเก็บการกราฟออกมาเป็น 1 รูป ซึ่ง 5 ครั้ง ก็คือ 5 รูป แต่นำแสดงให้เห็นเพียง 1 รูปเท่านั้น จากรูปที่ 4.1 จะมีวินาทีสลับโหมดอยู่ที่ 3.7 s ซึ่งจะตรงกับ การ Test ครั้งที่ 1 ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงตารางเปรียบเทียบเวลาในการเข้าสู่โหมด Inverse Pendulum

(Second)\ครั้งที่	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5
วินาทีสลับโหมด	3.7	3.9	3.8	4.1	3.9



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุม (BCD) และเวลา (Second) ในส่วนของโหมด Inverse Pendulum

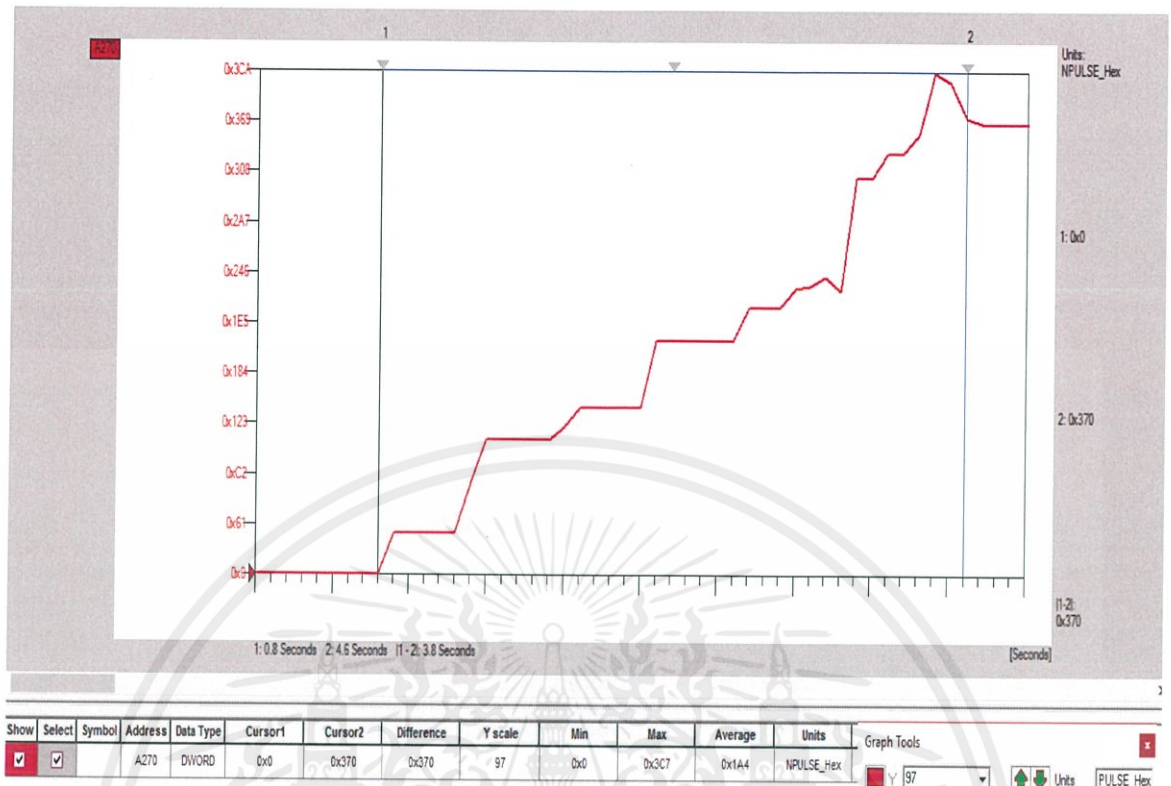
จากรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นถึงการแกว่งของลูกตุ้มภายใต้โหมด Inverse Pendulum โดยมีทิศทางการแกว่งเข้าสู่ 0 องศา โดยใช้เวลาในการเข้าหา 0 ใน 3 วินาที แสดงตารางเปรียบเทียบเวลาในการลู่อู่เข้าหา 0 องศา ของค่ามุมจำนวน 5 ครั้งการทดลอง ได้ดังนี้

ตารางที่ 4.2 แสดงตารางเปรียบเทียบเวลาในการลู่อู่เข้าหา 0 องศา

(Second)\ครั้งที่	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5
วินาทีลู่อู่เข้า 0 องศา	3.15	3.11	2.9	3.0	3.2

- Number of Pulse ที่อ่านจาก Servo Motor เพื่อคำนวณออกมาเป็นระยะทางที่ Cart ทำได้ในแต่ละรอบ

สามารถแสดงการเก็บกราฟข้อมูลจำนวน Pulse จาก Encoder ของ Servo Motor ได้ดังนี้

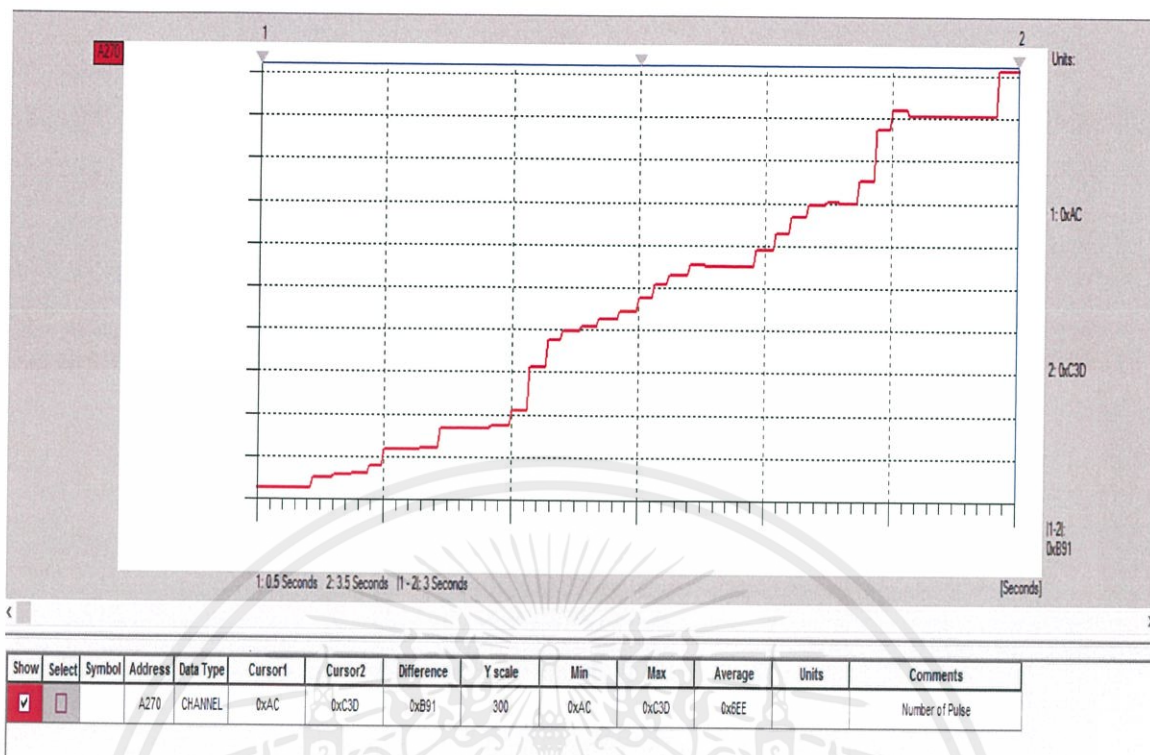


รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวน Pulse (Number of Pulse) และ เวลา (Second) ในส่วนของโหมต Pendulum

จากรูปที่ 4.3 แสดงจำนวน Pulse ที่อ่านจาก Encoder ใน Servo Motor ที่ A270 กราฟมีการเพิ่มจำนวน Pulse มากขึ้นตามเวลาที่เปลี่ยนไป เนื่องจาก Encoder เป็นชนิด Increment Type ทำให้แสดงกราฟออกมาในรูปแบบกราฟด้านบวก โดยเริ่มแสดงการเก็บข้อมูลที่เวลา 0.8 วินาที (ที่ Pointer ที่ 1) จนเข้าสู่โหมต Inverse Pendulum ในวินาทีที่ 3.8 (ที่ Pointer ที่ 2) แสดงตารางเปรียบเทียบเวลาในการเข้าสู่โหมต Inverse Pendulum ของจำนวน Pulse ในการทดลอง 5 ครั้ง ดังนี้

ตารางที่ 4.3 แสดงตารางเปรียบเทียบเวลาในการเข้าสู่โหมต Inverse Pendulum ของจำนวน Pulse

(Second)\ครั้งที่	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5
วินาทีสลับโหมต	3.7	3.9	3.8	4.1	3.9



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวน Pulse (Number of Pulse) และ เวลา (Second) ในส่วนของโหมด Inverse Pendulum

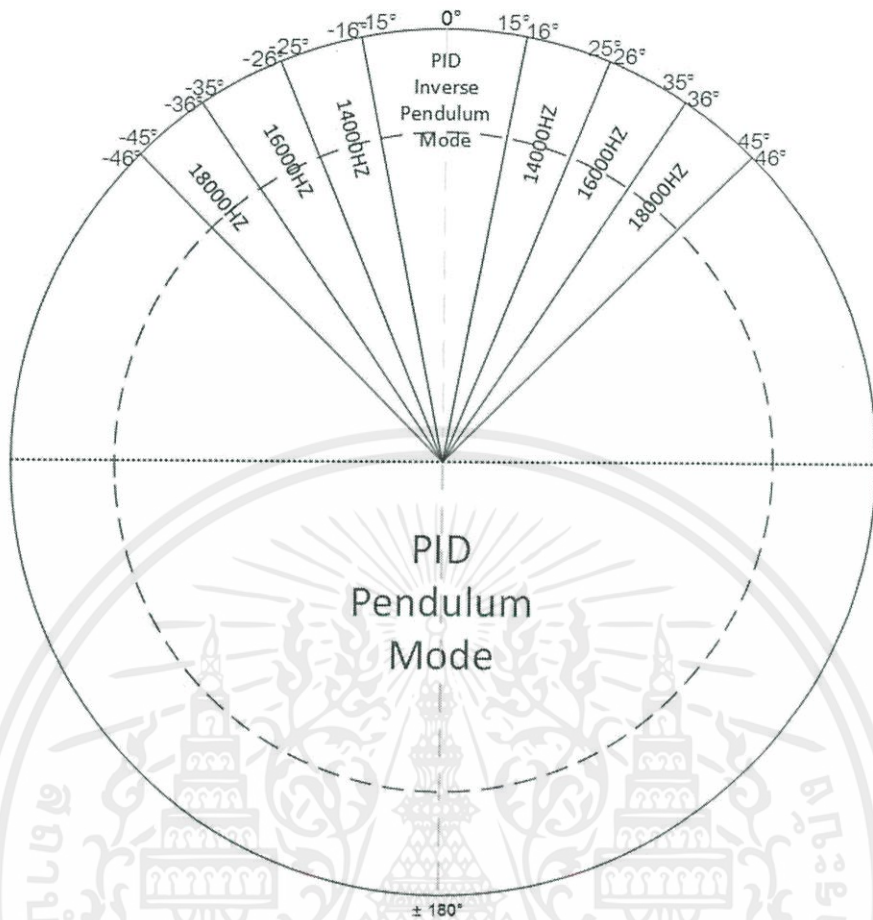
จากรูปที่ 4.4 จะคล้ายคลึงกับรูปที่ 4.3 เพียงแต่เป็นการเก็บข้อมูลจำนวน Pulse ในภายใต้โหมด Inverse Pendulum ลักษณะการเคลื่อนที่ของ Cart นั้น จะเลื่อนสลับซ้าย-ขวา ไปมา จนถึงหยุดนิ่ง โดยเริ่มเก็บค่าที่วินาทีที่ 0.5 ไปจนถึงวินาทีที่ 3 แสดงตารางเปรียบเทียบเวลาในการลู่อเข้าหา 0 องศา ของจำนวน Pulse ในการทดลอง 5 ครั้ง ได้ดังนี้

ตารางที่ 4.4 แสดงตารางเปรียบเทียบเวลาในการลู่อเข้าหา 0 องศาของจำนวน Pulse

(second)\ครั้งที่	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5
วินาทีลู่อเข้าหา 0 องศา	3.15	3.11	2.9	3.0	3.2

จากการออกแบบโปรแกรมสามารถแบ่ง Section ของมุมออกเป็น 10 Section โดยแสดงออกมาเป็นรูปดังต่อไปนี้

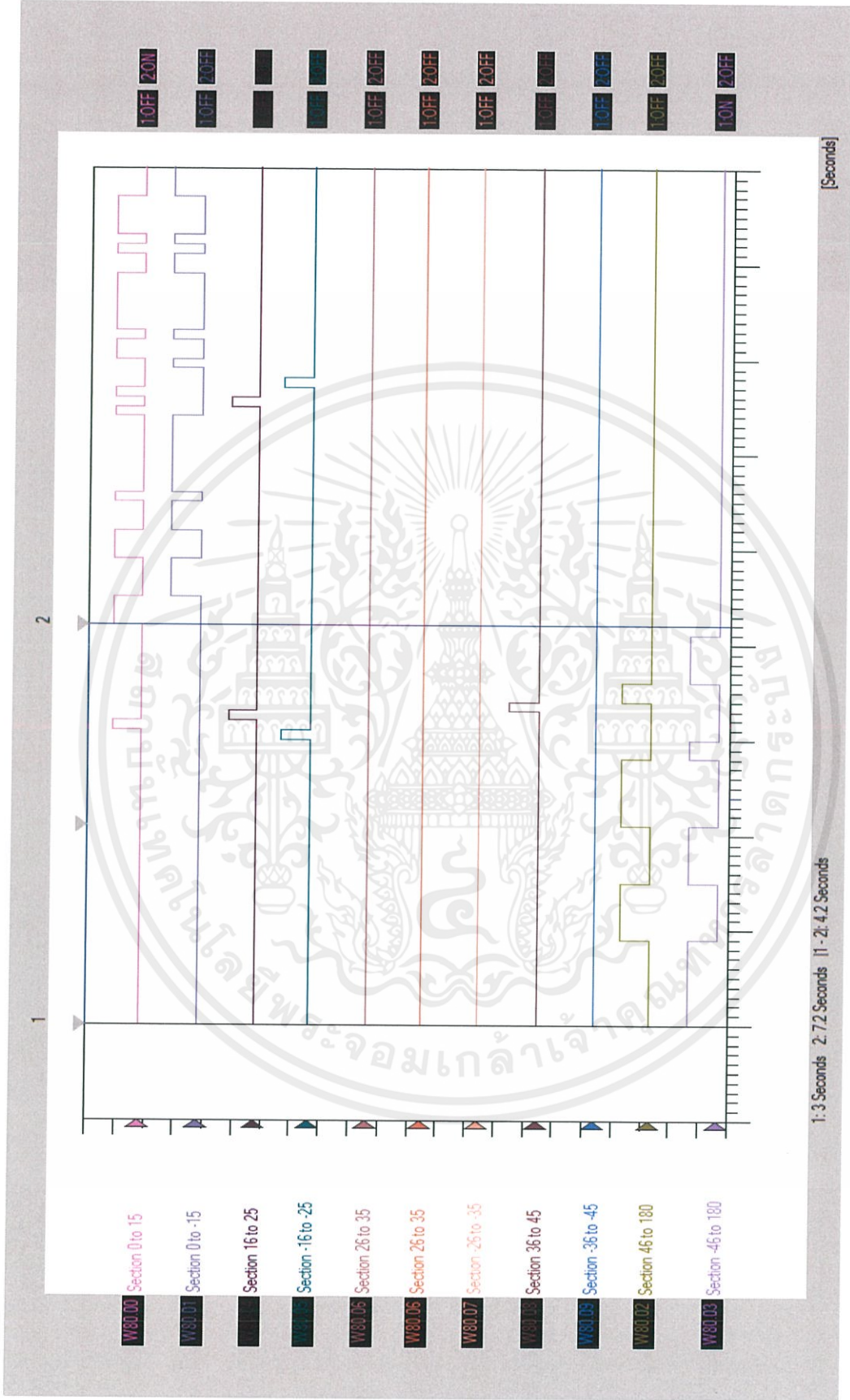
ในการแกว่งช่วงมุมจากการออกในบทที่ 3 ทำให้ได้ช่วงของค่ามุมในรูปที่ 4.5 ซึ่งในหัวข้อนี้ต้องการดูพฤติกรรมการแกว่งของลูกตุ้มว่าตกไปอยู่ที่ในช่วงใดของการแบ่งมุมบ้างและแสดงออกเป็นกราฟ Scantime ของการแกว่งของลูกตุ้มจากการทำงานของแบบจำลอง ตั้งแต่แกว่งจาก Pendulum Mode เข้าสู่ Inverse Pendulum Mode



รูปที่ 4.5 แสดงการแบ่งช่วงมุมในแต่ละ Section

โดยถ้าลูกตุ้มแกว่งไปอยู่ตำแหน่งที่	0 ถึง 15	องศาให้ W80.00	มีสถานะ ON
ที่	0 ถึง -15	องศาให้ W80.01	มีสถานะ ON
ที่	45 ถึง 180	องศาให้ W80.02	มีสถานะ ON
ที่	-45 ถึง -180	องศาให้ W80.03	มีสถานะ ON
ที่	16 ถึง 25	องศาให้ W80.04	มีสถานะ ON
ที่	-16 ถึง 25	องศาให้ W80.05	มีสถานะ ON
ที่	26 ถึง 35	องศาให้ W80.06	มีสถานะ ON
ที่	-26 ถึง -35	องศาให้ W80.07	มีสถานะ ON
ที่	36 ถึง 35	องศาให้ W80.08	มีสถานะ ON
ที่	-36 ถึง -45	องศาให้ W80.09	มีสถานะ ON

บันทึกสถานการณ์แกว่งของลูกใน แต่ละ Section เพื่อดู Scan Time ของการแกว่ง

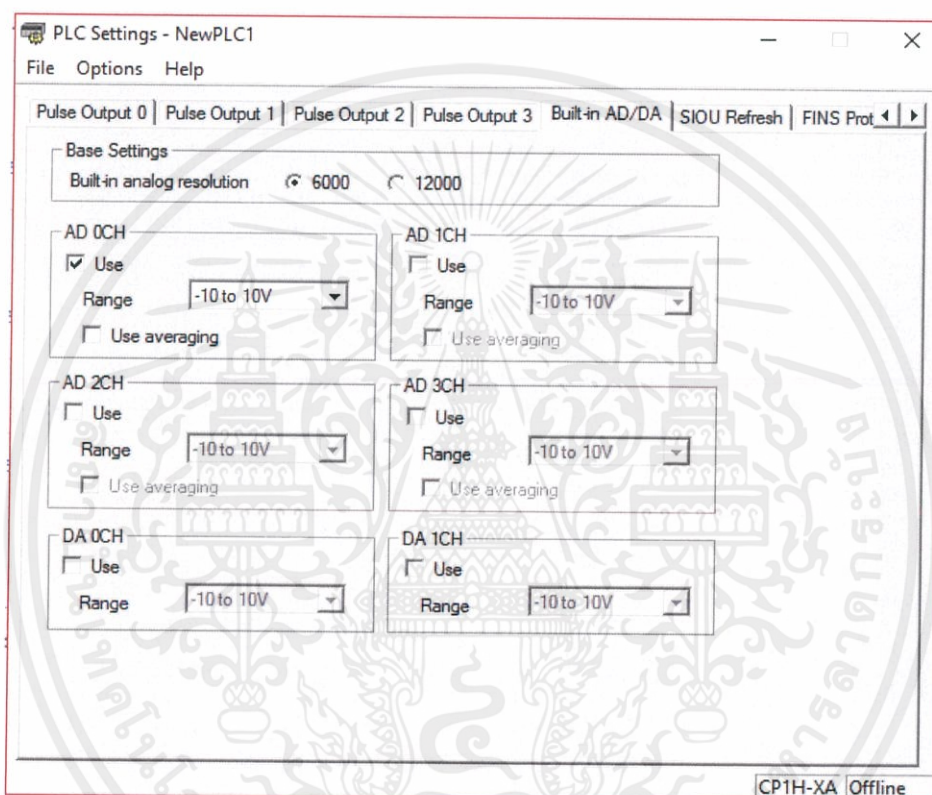


รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการทำงาน (Digital Logic) และเวลา (Second) จากโหมด Pendulum สู่ Inverse Pendulum

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

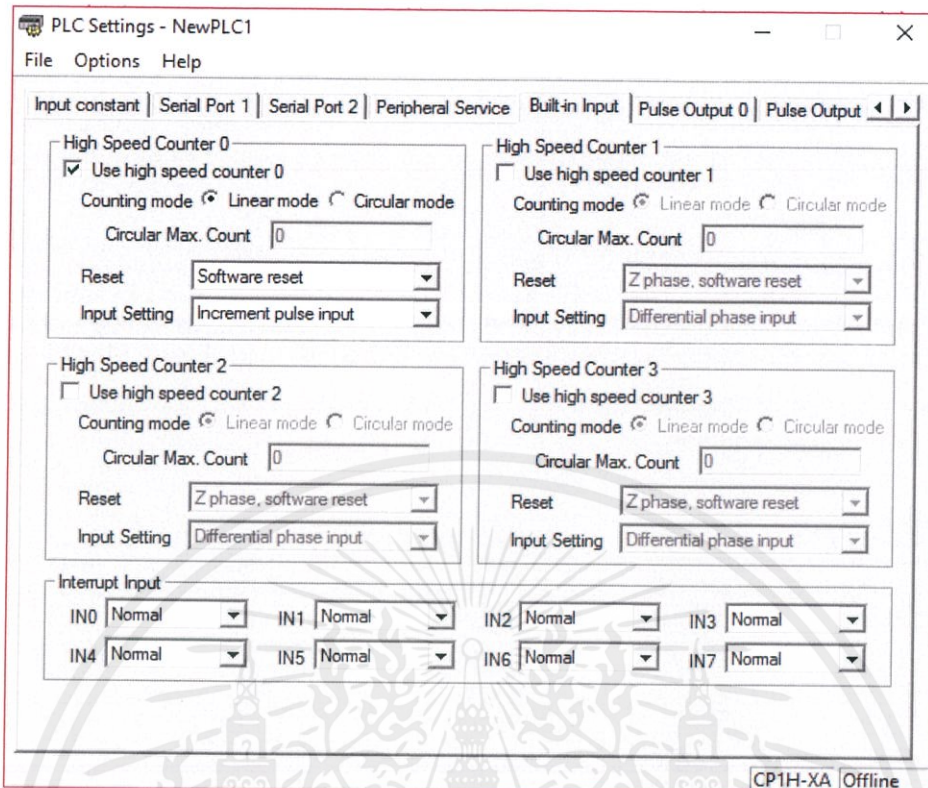
จากรูปที่ 4.6 แสดงช่วงการทำงานเมื่อลูกตุ้มแกว่งเข้าสู่ช่วงของมุมที่ได้ทำการแบ่งไว้ในรูปที่ 4.5 โดยกราฟดังกล่าวจะแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการแกว่งของลูกตุ้มในตัวแบบจำลอง ทั้งนี้สามารถดูได้ว่าลูกตุ้มนั้นแกว่งไปอยู่ในช่วงใดบ้าง วินาทีใดบ้างนั้นดูได้จาก W80.00 ถึง W80.09 ในกราฟโดยตรง

ในการทดลองจำเป็นจะต้องปรับค่า Parameter ต่างๆทั้งใน PLC และ Servo Drive แสดงการตั้งค่าได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.7 การ Set ค่า Analog in ที่อ่านจาก Potentiometer ให้กับ PLC

จากรูปที่ 4.7 ทำการปรับตั้งค่าที่ AD 0CH เพื่ออ่านค่า A/D จาก Potentiometer (เหตุที่เลือก AD 0CH เนื่องจากต่อ Potentiometer ที่ A/D ที่ Terminal 0) โดย Potentiometer ที่ขนาดการวัดอยู่ -10 to 10V ก็เลยปรับ Rang การอ่านเป็น -10 to 10V ที่ PLC และแสดงผลใน PLC เป็นช่วง 6000 ที่ Built-in Analog Resotion



รูปที่ 4.8 การ Set การทำงานของ Encoder ผ่าน PLC

จากรูปที่ 4.8 เป็นการปรับตั้งค่าเพื่ออ่านค่าจำนวน Pulse Encoder ใน Servo Motor โดยเลือกใช้ High Speed Counter ที่ 0 (นำ Encoder มีต่อกับ PLC ที่ CHO) เลือกการอ่านค่าเป็นลักษณะ Linear Mode และ Reset ค่า Pulse ผ่าน Software โดยเลือก Input เป็น Increment Pulse เนื่องจาก Encoder เป็นแบบ Increment Type

St	Index	Description	Value	Drive Value	Default	Range	Units	Resta
	Pn000	Rotation Direction Switchi	1: Forward direc	---	1	0 to 1		<input checked="" type="checkbox"/>
	Pn001	Control Mode Selection	0: Position contr	---	0	0 to 6		<input checked="" type="checkbox"/>
	Pn002	Realtime Autotuning Mode	1: Focus on stab	---	1	0 to 6		<input type="checkbox"/>
	Pn003	Realtime Autotuning Mach	13	---	13	0 to 31		<input type="checkbox"/>
	Pn004	Inertia Ratio	1580	---	250	0 to 10000	%	<input type="checkbox"/>
	Pn005	Command Pulse Input Sel	0: Photocoupler	---	0	0 to 1		<input checked="" type="checkbox"/>
	Pn006	Command Pulse Rotation	0: The motor rot	---	0	0 to 1		<input checked="" type="checkbox"/>
	Pn007	COMMAND PULSE mode	1: Reverse puls	---	1	0 to 3		<input checked="" type="checkbox"/>
	Pn008	Electronic Gear Integer Se	10000	---	10000	0 to 1048576	Pulse(s)	<input checked="" type="checkbox"/>
	Pn009	Electronic Gear Ratio (Nu	0	---	0	0 to 1073741		<input type="checkbox"/>
	Pn010	Electronic Gear Ratio (De	20000	---	10000	1 to 1073741		<input type="checkbox"/>
	Pn011	Encoder Dividing Numerat	6500	---	2500	1 to 262144	P/r	<input checked="" type="checkbox"/>
	Pn012	Encoder Output Direction	0: Phase B logic	---	0	0 to 3		<input checked="" type="checkbox"/>
	Pn013	No. 1 Torque Limit	300	---	500	0 to 500	%	<input type="checkbox"/>
	Pn014	Error Counter Overflow Le	100000	---	100000	0 to 1342177	Comman	<input type="checkbox"/>
	Pn016	Regeneration Resistor Sel	3: No Regenerat	---	3	0 to 3		<input checked="" type="checkbox"/>
	Pn017	External Regeneration Re	0: Regeneration	---	0	0 to 4		<input checked="" type="checkbox"/>
	Pn100	Position Loop Gain 1	48.0	---	48.0	0.0 to 3000.0	x 1/s	<input type="checkbox"/>
	Pn101	Speed Loop Gain 1	27.0	---	27.0	0.1 to 3276.7	Hz	<input type="checkbox"/>
	Pn102	Speed Loop Integration Ti	21.0	---	21.0	0.1 to 1000.0	ms	<input type="checkbox"/>
	Pn103	Speed Feedback Filter Ti	0	---	0	0 to 5		<input type="checkbox"/>
	Pn104	Torque Command Filter Ti	0.84	---	0.84	0.00 to 25.00	ms	<input type="checkbox"/>
	Pn105	Position Loop Gain 2	57.0	---	57.0	0.0 to 3000.0	x 1/s	<input type="checkbox"/>
	Pn106	Speed Loop Gain 2	27.0	---	27.0	0.1 to 3276.7	Hz	<input type="checkbox"/>
	Pn107	Speed Loop Integral Time	1000.0	---	1000.0	0.1 to 1000.0	ms	<input type="checkbox"/>
	Pn108	Speed Feedback Filter Ti	0	---	0	0 to 5		<input type="checkbox"/>
	Pn109	Torque Command Filter Ti	0.84	---	0.84	0.00 to 25.00	ms	<input type="checkbox"/>
	Pn110	Speed Feed-forward Amo	30.0	---	30.0	0.0 to 100.0	%	<input type="checkbox"/>
	Pn111	Speed Feed-forward Com	0.50	---	0.50	0.00 to 64.00	ms	<input type="checkbox"/>
	Pn112	Torque Feed-forward Amo	0.0	---	0.0	0.0 to 100.0	%	<input type="checkbox"/>
	Pn113	Torque Feed-forward Com	0.00	---	0.00	0.00 to 64.00	ms	<input type="checkbox"/>
	Pn114	Gain Switching Input Oper	1: Gain 1/gain 2	---	1	0 to 1		<input type="checkbox"/>
	Pn115	Switching mode in Positio	0: Always gain 1	---	0	0 to 10		<input type="checkbox"/>
	Pn116	Gain Switching Delay Tim	5.0	---	5.0	0.0 to 1000.0	ms	<input type="checkbox"/>
	Pn117	Gain Switching Level in P	50	---	50	0 to 20000		<input type="checkbox"/>
	Pn118	Gain Switching Hysteresis	33	---	33	0 to 50		<input type="checkbox"/>
	Pn119	Position Gain Switching Ti	3.3	---	3.3	0.0 to 1000.0	ms	<input type="checkbox"/>
	Pn120	Switching Mode in Speed	0: Always gain 1	---	0	0 to 5		<input type="checkbox"/>

รูปที่ 4.9 การ Set Parameter ต่างๆให้กับ Servo Drive

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.9 แสดงพารามิเตอร์ ใน Servo Driver โดยค่าที่ปรับตั้งจะสัญลักษณ์วงกลมสีแดงซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

- ที่ Pn 004 Inertia Ratio นั้น อัตราความเฉื่อยซึ่งค่าตรงนี้ไม่ได้ปรับตั้ง แต่จะเปลี่ยนแปลงเองเมื่อปรับตั้งค่าความเร็ว Motor ใหม่
- ที่ Pn 010 Electronic Gear Ratio เป็นการปรับตั้งความเร็วของ Servo Motor
- ที่ Pn 011 Encode Dividing Numerator เป็นการกำหนดค่า Pulse ต่อ 1 รอบ การหมุนของ Servo Motor
- ที่ Pn 013 No.1 Toeque Limit เป็นการกำหนด Limit ของการหมุน Servo Motor ซึ่งนี้ปรับไม่ได้ เนื่องจาก Servo Motor รุ่นนี้ ไม่รองรับให้ปรับตั้งได้

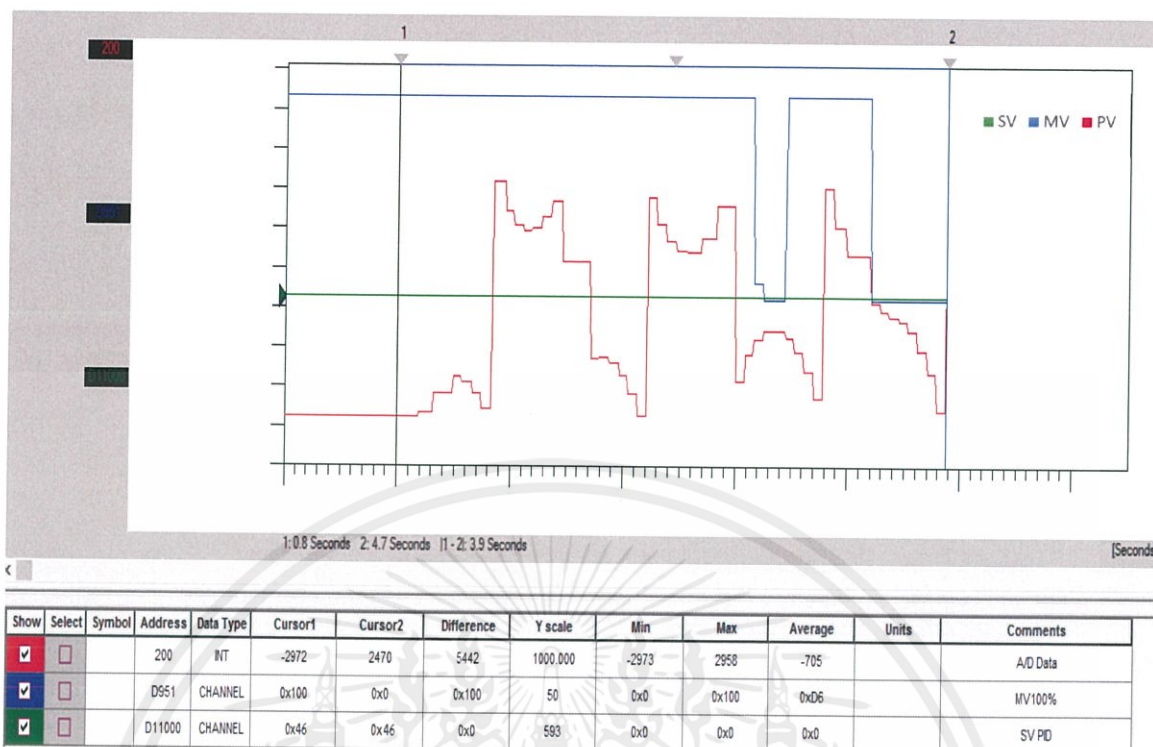
ค่า 3 ค่าที่มีผลต่อ PID ดังต่อไปนี้

- 1) PV ซึ่งค่ามุมของแบบจำลอง Inverse Pendulum ที่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเคลื่อนที่ Cart ที่ CW (ขวา) และ CCW (ซ้าย)
- 2) MV ค่าความเร็วที่ส่งให้ Servo Drive เพื่อขับ Servo Motor
- 3) SV คือค่ามุมที่กำหนดที่ 0 องศา

จากการออกแบบระบบอัตโนมัติ (Auto) โดยใช้ฟังก์ชัน PID ใน PLC จากการแบ่งช่วงการทำงานออกเป็น 2 ส่วนโดยการทดลองพบว่า

- ส่วนของ Pendulum จะใช้ PID (โดย I น้อยที่สุด) เพื่อเร่ง Cart เพิ่มมุมให้แกนลูกตุ้มแกว่งมุมได้มากขึ้นโดยใช้เวลาน้อยที่สุดและทำการลดความเร็วลงเมื่อแกนลูกตุ้มกำลังจะเข้าสู่ช่วงมุมของ Inverse Pendulum
- ส่วนของ Inverse Pendulum จะใช้ PID เพื่อควบคุมแกนของลูกตุ้มให้เลี้ยงหรือแกว่งตั้งตรงในแนวตั้งได้

ทั้งสองส่วนการทำงานนั้นจะทำการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ต่างให้กับ Controller แบบ Try and Error เพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมกับแบบจำลอง สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด บันทึกผลการปรับค่า Parameter ต่างๆให้กับ PID ในส่วนของ Pendulum แสดงได้ดังนี้



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงการทำงานของ PID ในส่วนโหมต Pendulum

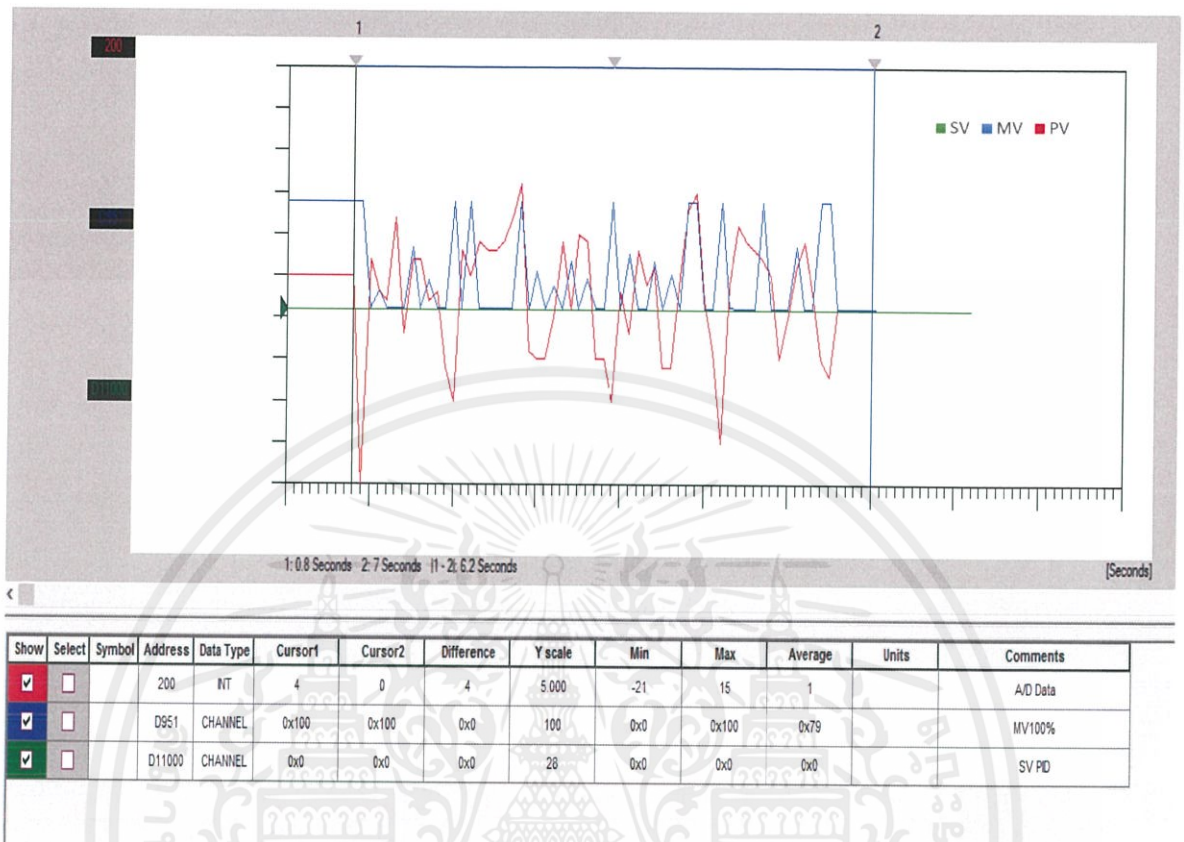
- จากรูปที่ 4.10 – กราฟเส้นสีเขียว แสดงถึงเส้น SV โดยอยู่ที่ 46 องศา Address ที่ D11000
- กราฟเส้นสีน้ำเงิน แสดงถึงเส้น MV ที่ 0 – 100 % Address ที่ D951
 - กราฟเส้นสีแดง แสดงถึงเส้น PV จาก -2973 ถึง 2958 (Hex) Address ที่ 200

จากรูป เส้น PV ที่มีค่าตั้งแต่ -2973 ถึง 2958 (Hex) จะถูกนำไปเป็น Input ให้กับ PID และ Output จาก PID ที่ถูกนำไปส่งให้กับ Servo Drive นั่นก็คือเส้น MV โดย Scaling ให้ค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 100 % ทั้งนี้ทำการตั้ง Set Point ที่ 46 องศา จากนั้นทำการบันทึกค่าช่วงเวลา PV ลู่เข้าหา 46 องศา ใช้เวลาไปกี่วินาทีโดยเริ่มแสดงการเก็บข้อมูลเป็นเวลา 0.8 วินาที (Point ที่ 1) จนเข้าสู่โหมต Inverse Pendulum ในวินาทีที่ 3.9 (Point ที่ |1-2|) ซึ่งจะแสดงได้กราฟ โดยค่า K_p เท่ากับ 20, T_i เท่ากับ 1 และ T_d เท่ากับ 20 แสดงตารางเปรียบเทียบเวลาในการเข้าสู่โหมต Inverse Pendulum ในการทดลอง 5 ครั้งได้ดังนี้

ตารางที่ 4.5 แสดงตารางเปรียบเทียบเวลาในการเข้าสู่โหมต Inverse Pendulum

(Second)\ครั้งที่	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5
วินาทีลู่เข้าหา 46 องศา	3.15	3.11	2.9	3.0	3.9

บันทึกผลการปรับค่า Parameter ต่างๆให้กับ PID ในส่วนของ Inverse Pendulum แสดงได้ดังนี้



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงการทำงานของ PID ในส่วนโหมด Inverse Pendulum

- จากรูปที่ 4.11 – กราฟเส้นสีเขียว แสดงถึงเส้น SV โดยอยู่ที่ 46 องศา
- กราฟเส้นสีน้ำเงิน แสดงถึงเส้น MV ที่ 0 – 100 %
 - กราฟเส้นสีแดง แสดงถึงเส้น PV จาก -15 ถึง 15 (องศา)

จากรูป เส้น PV ที่มีค่าตั้งแต่ -15 ถึง 15 (องศา) จะถูกนำไปเป็น Input ให้กับ PID และ Output จาก PID ที่ถูกนำไปส่งให้กับ Servo Drive นั่นก็คือ เส้น MV โดย Scaling ให้ค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 100 % ทั้งนี้ทำการตั้ง Set Point ที่ 0 องศา ผลที่ได้ คือ เมื่อลูกตุ้มพ้นมาจาก Mode Pendulum แล้วจะเข้าสู่ Mode Inverse Pendulum ซึ่งมีจุดเสถียรภาพอยู่ที่ 0 องศา ดังนั้นเพื่อหาเวลาในการแกว่งของลูกตุ้มเข้าสู่ 0 องศา นั้น ใช้เวลาที่วินาที ในการเข้าสู่จุดเสถียรภาพ จากนั้นทำการบันทึกค่าช่วงเวลา PV โดยเริ่มแสดงการเก็บข้อมูลที่เวลา 0.8 วินาที จนเข้าสู่โหมด Inverse Pendulum ในวินาทีที่ 6.2 กรณีกราฟดังกล่าวถูกตั้งค่า K_p , T_i และ T_d ให้อยู่ที่ 3, 1, 2 ตามลำดับ ทำการแสดงตารางเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ (K_p , T_i และ T_d ตามลำดับ) กับจำนวนครั้งที่ใดๆ ในการทดลองว่าใช้เวลาในการแกว่งมากน้อยเพียงใด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 แสดงตารางเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ (K_p , T_i และ T_d ตามลำดับ)

K_p, T_i, T_d ครั้งที่	1	2	3	4	5
1,1,1 ใช้เวลา (s)	1.2	1.5	1.3	1.8	1.6
3,1,2 ใช้เวลา (s)	6.7	6.4	6.5	6.2	5.9
5,1,1 ใช้เวลา (s)	1.3	1.5	1.5	1.4	1.7
1,5,1 ใช้เวลา (s)	1.9	1.2	1.5	1.8	1.2
1,1,5 ใช้เวลา (s)	2.4	2.2	2.6	2.5	2.3

จากตารางที่ 4.6 แสดงพารามิเตอร์ PID ในช่วงของ Inverse Pendulum โดยมีค่า K_p , T_i , T_d คือ (1, 1, 1), (3, 1, 2), (5, 1, 1), (1, 5, 1) และ (1, 1, 5) ตามลำดับ ซึ่งในแต่ละค่าของพารามิเตอร์ PID จะทำการทดสอบออกเป็น 5 ครั้ง ในแต่ละค่าเพื่อดูว่าแต่ละครั้งใช้เวลาในการแกว่งจากด้านล่างขึ้นด้านบนโดยเริ่มจับเวลา ณ ขณะที่อยู่ในช่วงของ Inverse Pendulum แล้วทำการทรงตัวอยู่ในมุม 0 องศาใช้เวลาเท่าใด (ไม่คำนึงถึงว่าตั้งหรือไม่ตั้ง) ซึ่งค่าที่แสดงในตารางแต่ละครั้ง จะอยู่ในหน่วยของวินาที

ตารางแสดงการทดลองการแกว่งของลูกตุ้มจากตำแหน่ง 180 องศาไปจนถึง 0 องศา และเกิดการสั่นของลูกตุ้ม (Pendulum to Inverse Pendulum) ว่าจำนวนครั้งที่ทำได้กี่ครั้ง ทำไม่ได้กี่ครั้ง ที่ K_p , T_i , T_d ต่าง ๆ

ตารางที่ 4.7 ตารางแสดงการทดสอบการแกว่งของลูกตุ้มจากตำแหน่ง 180 องศาไปจนถึง 0 องศา

K_p, T_i, T_d ครั้งที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1,1,1	P	NP	P	NP	NP	P	NP	NP	P	P
2,1,1	NP	P	NP	P	P	NP	SP	P	NP	P
3,1,2	P	P	NP	SP	SP	P	SP	NP	P	P
1,2,1	P	NP	P	NP	NP	NP	P	NP	P	NP
1,1,2	P	SP	P	P	P	NP	NP	P	P	NP

*หมายเหตุ P = Pass คือผ่านแต่ไม่เกิดการสั่นในช่วง Inverse Pendulum

NP = Not Pass คือไม่ผ่าน

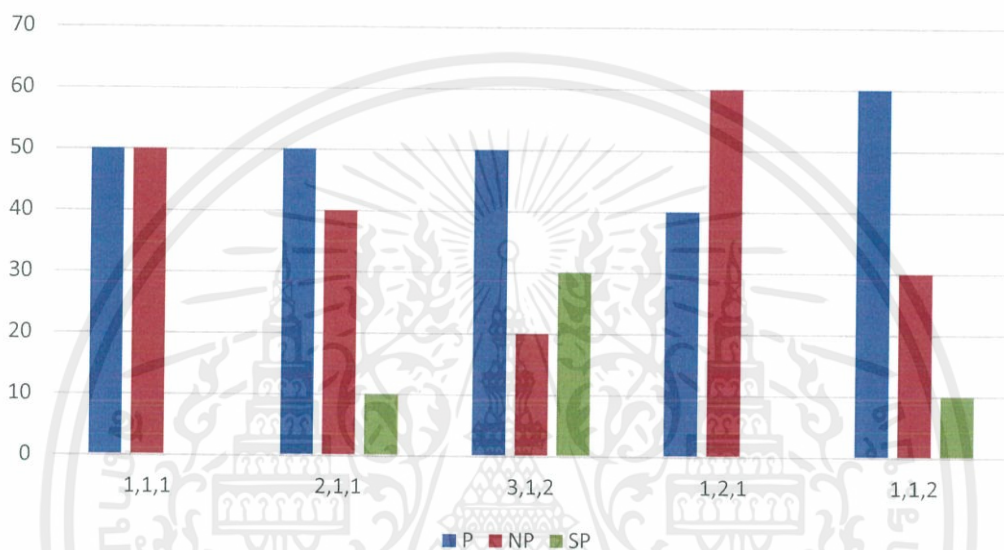
SP = Success Pass คือผ่านและเกิดการสั่นในช่วง Inverse Pendulum

จากตารางที่ 4.7 แสดงลักษณะการแกว่งของลูกตุ้ม โดยการปรับค่าพารามิเตอร์ให้ PID (1, 1, 1), (2, 1, 1), (1, 2, 1), (1, 1, 2) และ (3, 1, 2) K_p, T_i, T_d ตามลำดับ โดยทำการทดลองทั้งหมด 9 ครั้ง โดยแต่ละครั้งจะแสดงอยู่ในรูปแบบของตัวอักษรย่อ คือ

P เท่ากับ Pass ก็คือ แกว่งจากล่างขึ้นบนได้และตั้งตรง แต่ไม่เกิดการเลี้ยงลูกตุ้ม

NP เท่ากับ Not Pass ก็คือ แกว่งจากล่างขึ้นบนได้ แต่ไม่ตั้งตรงและไม่เกิดการเลี้ยงลูกตุ้ม

SP เท่ากับ Success Pass ก็คือ แกว่งจากล่างขึ้นบนได้ ตั้งตรงได้และเกิดการเลี้ยงของลูกตุ้ม



รูปที่ 4.12 แผนภูมิแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของการทดลองการแกว่งของลูกตุ้ม

เมื่อนำตารางที่ 4.7 มาพล็อตในรูปกราฟแท่งจะได้กราฟดังรูปที่ 4.12

ตารางแสดงรายละเอียดค่าต่าง ๆ ของอุปกรณ์ (เช่น ความยาว น้ำหนัก เป็นต้น) ซึ่งรายละเอียดที่แสดงจะเป็นไปตามเงื่อนไขของตารางที่ 4.7 นั่นคือ ด้วย Spec เท่านั้น สามารถปรับตั้งพารามิเตอร์ใน PID ได้ตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.8 แสดงรายละเอียดค่าต่างๆ ของอุปกรณ์

ค่าตัวแปรชิ้นงาน	ลูกตุ้ม	Cart	ฐาน
ความยาว	25 cm	30 cm	50 cm
น้ำหนัก	156 g	≈ 450 g	
ขนาด		50x30x5cm	

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองแบบจำลอง Inverse Pendulum การเก็บข้อมูลและการออกแบบการทำงานในช่วงของมุมที่แตกต่างกันออกไป จะแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการแกว่งของ Inverse Pendulum (Characteristic) ที่เป็นไปได้ของแบบจำลองนี้รวมไปถึงความสามารถหรือความเป็นได้ที่ จะควบคุมแกนของลูกตุ้มให้เลี้ยวอยู่ที่ 0 องศา ซึ่งขึ้นอยู่กับ Software และ Hardware เองว่า สามารถทำได้ขนาดไหนและในการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ให้กับ PID นั้นใช้วิธีการปรับแบบ Try and Error เพื่อทดสอบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ให้เหมาะสมแก่แบบจำลอง

ความสำคัญของการออกแบบแบบจำลอง Inverse Pendulum นี้เพื่อศึกษาการใช้งาน PID ใน PLC เพื่อควบคุมแบบจำลองโดยสามารถนำความรู้ทางด้าน PLC เช่น การเชื่อมต่อระหว่าง อุปกรณ์ PLC (Connection Device PLC) การเขียน Ladder Diagrams การใช้งาน Functions Block ใน PLC และ I/O Input, Output ที่มีทั้ง Analog และ Digital เป็นต้น นำไปประยุกต์ใช้ใน โรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ อาทิ เช่น โรงไฟฟ้า โรงงานการผลิตส่วนประกอบหรือประกอบผลิตภัณฑ์ โรงงานที่ใช้ระบบควบคุมอัตโนมัติใน Line การผลิต เป็นต้น นำไปใช้ในอนาคต อีกทั้งยัง วิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการควบคุมแบบ Nonlinear โดยใช้ PID ควบคุมซึ่งแบบจำลองนี้เป็น ต้นแบบที่สามารถนำการออกแบบการใช้งานโปรแกรมไปประยุกต์ทำตัวควบคุมอื่น ๆ ได้อีกทั้งยัง ศึกษาการใช้งาน Servo Motor การปรับตั้งค่าพารามิเตอร์สำหรับ Servo Drive ผ่าน CX-Drive เพื่อนำไปใช้งานในส่วนของการผลิตที่ใช้ Motor เป็นองค์ประกอบหลักในการทำงาน

5.2 ปัญหาที่เกิดขึ้น

เพื่อให้แกนของลูกตุ้มสามารถตั้งตรงอยู่ในแนวตั้งอย่างมีเสถียรภาพ จึงควรใช้งาน Microcontroller หรือตัวควบคุมชนิดอื่น (อาทิ LQR) นอกเหนือจาก PID เนื่องจาก Inverse Pendulum มี Math Model ในเชิงของ Nonlinear (ไม่เป็นเชิงเส้น) ซึ่ง PID นั้นเหมาะสมกับการ ควบคุมแบบ Linear มากกว่าที่จะมาควบคุมแบบ Nonlinear ดังนั้นประสิทธิภาพในการควบคุมของ PID อาจจะต้องลดลง เมื่อนำมาใช้กับการควบคุมแบบ Nonlinear

เนื่องจากระยะทางของ Cart ที่สามารถทำได้ (ความยาวของแบบจำลอง) นั้นสามารถทำได้ นั้นสั้นเกินไปทำให้ในบางครั้งตัว Cart เคลื่อนที่ไปชนกับ Stopper ทำให้ไม่สามารถทราบระยะที่ แท้จริงและเกิดค่าความผิดพลาด เนื่องจากตัวฐานนั้นไปกระทบกับ Stopper ซึ่งแสดงว่า ถ้าไม่มี

Stoper ตัวฐานอาจจะเคลื่อนที่ไปได้ต่อเพราะไม่ทราบระยะทางที่แน่ชัด เมื่อนำไปพล็อตกราฟทำให้กราฟนั้นผิดไปจากทฤษฎีของตัวแบบจำลองเอง

และปัญหาที่เกิดจากตัว Hardware ที่ทำให้ช่วงการสลับโหมตระหว่าง Pendulum แกว่งลูกตุ้มไปยังโหมต Inverse Pendulum นั้นจำเป็นต้องมีแรงหรือความเร็วของตัว Cart ที่มากพอที่จะสามารถชนะแรงโน้มถ่วงของแกนลูกตุ้มที่กำลังจะตกได้ ซึ่งแรงดังกล่าวคือ แรงบิดชั่วขณะตอนเริ่มต้นทำให้ต้องมีการใช้แรงบิด (Torque) เป็นตัวขับ Cart แต่ Servo Drive รุ่น R88D-KP01H ไม่สามารถทำงานในโหมต Torque Control ได้ ทำให้ความเร็วที่ Cart ไม่มากพอที่จะกระชากให้แกนลูกตุ้มเข้าสู่สมดุลที่ 0 องศา

ปัญหาสุดท้าย คือ การปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ผ่าน CX-Drive เนื่องจากไม่สามารถใช้งานได้ในโหมต Torque Control ทำให้ต้องใช้โหมต Speed Control แทน ซึ่งเมื่อปรับค่าต่าง ๆ แล้วความเร็วเพิ่มขึ้นจริง แต่ก็ไม่มากพอที่จะกระชากแกนลูกตุ้มได้อีกทั้งตัวของ Motor และสายพานเองรับภาระโหลดมากเกินไปทำให้เกิดความร้อนที่อาจนำไปสู่ความเสียหายต่อตัวอุปกรณ์เอง จึงควรใช้ Servo รุ่นอื่นที่มีโหมต Torque Control เพื่อให้ตัวของแบบจำลองทำงานได้เต็มประสิทธิภาพและบรรลุผลในการออกแบบ

5.3 ข้อเสนอแนะ

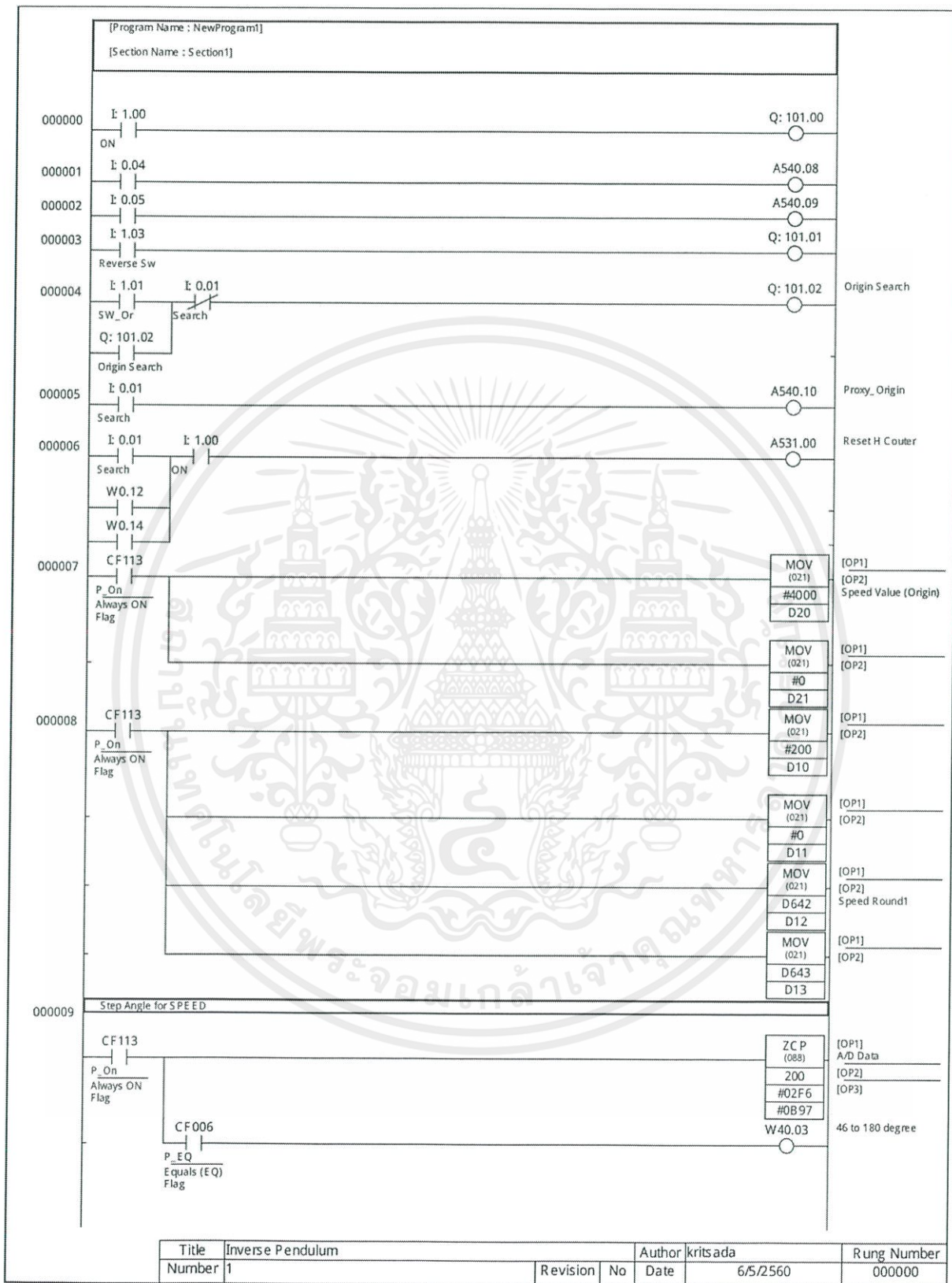
แบ่งออกเป็น 2 ส่วนได้แก่ ส่วนของ Hardware และส่วนของ Software โดยส่วนของ Hardware นั้นอาจมีการปรับเปลี่ยนตัวของ Potentiometer ใหม่หรืออาจใช้เป็น Encoder เพื่ออ่านค่ามุมได้มีประสิทธิภาพสูงกว่า ความยาวของฐานที่สั้นเกินไปทำให้ไม่ทราบระยะของฐานที่เคลื่อนจริง ๆ ได้ น้ำหนักของลูกตุ้มที่มากเกินไปทำให้ควบคุมยากและ Servo Drive ที่ไม่สามารถทำงานในโหมตของ Torque Control ได้และส่วนของ Software อาจมีการปรับแต่งฟังก์ชันการใช้งานใหม่ ยกตัวอย่าง เช่น จากเคยที่ใช้ฟังก์ชัน SCL (Scaling) อาจมีการเปลี่ยนเป็น APR เป็นฟังก์ชันที่ใช้ในการประเมินค่าเชิงเส้น เป็นต้น ค่าพารามิเตอร์ Servo Drive หากมีการปรับแต่งดี ๆ อาจทำให้สามารถใช้งานแบบจำลอง Invers Pendulum ได้เต็มที่ก็เป็นได้

บรรณานุกรม

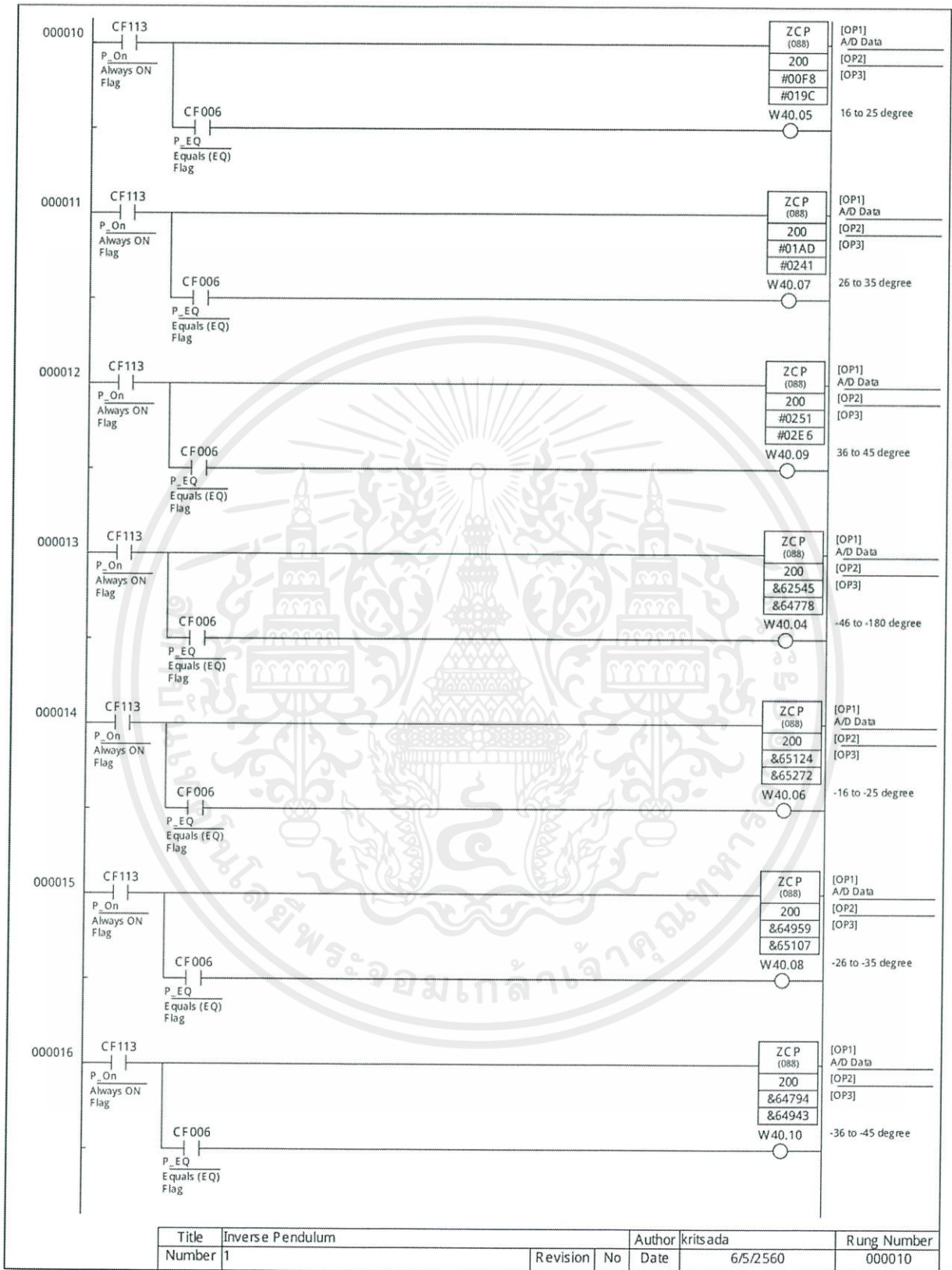
- [1] บริษัท ออมรอน อิเล็กทรอนิกส์จำกัด. “การใช้งาน PLC ระดับ 2”.กรุงเทพมหานคร : บริษัท ออมรอน อิเล็กทรอนิกส์ จำกัด ,2550
- [2] บริษัท ออมรอน อิเล็กทรอนิกส์ จำกัด. “เรียนลัด การควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ สำหรับมือใหม่”. กรุงเทพมหานคร : บริษัท ออมรอน อิเล็กทรอนิกส์ จำกัด
- [3] OMRON. “CP1H/CP1L CPU Unit PROGRAMMING MANUAL”. Japan : Omron ,2007
- [4] OMRON. “USER’S MANUAL OMNUC G5 SERIES”. Japan:Omron,2010
- [5] ญัฐพงษ์ จิตมานะและมนุศักดิ์ จานทอง. “การออกแบบตัวควบคุมแบบปรับตัวได้ชนิดโมเดล อ้างอิงสำหรับระบบลูกตุ้มผกผัน”. ปทุมธานี:ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล,2553
- [6] บริษัท ออมรอน อิเล็กทรอนิกส์จำกัด. “การใช้งาน PLC ระดับ 1”.กรุงเทพมหานคร : บริษัท ออมรอน อิเล็กทรอนิกส์ จำกัด ,2550
- [7] Fu-Kuei Tsai and Jung-Shan Lin. “Nonlinear Control Design of 360-Degree Inverted Pendulum Systems”. Taiwan: National Chi Nan University ,2003.
- [8] OMRON. “AC Servomotors/Drives G5-series Pulse Train Input Type”. Japan : Omron,2010



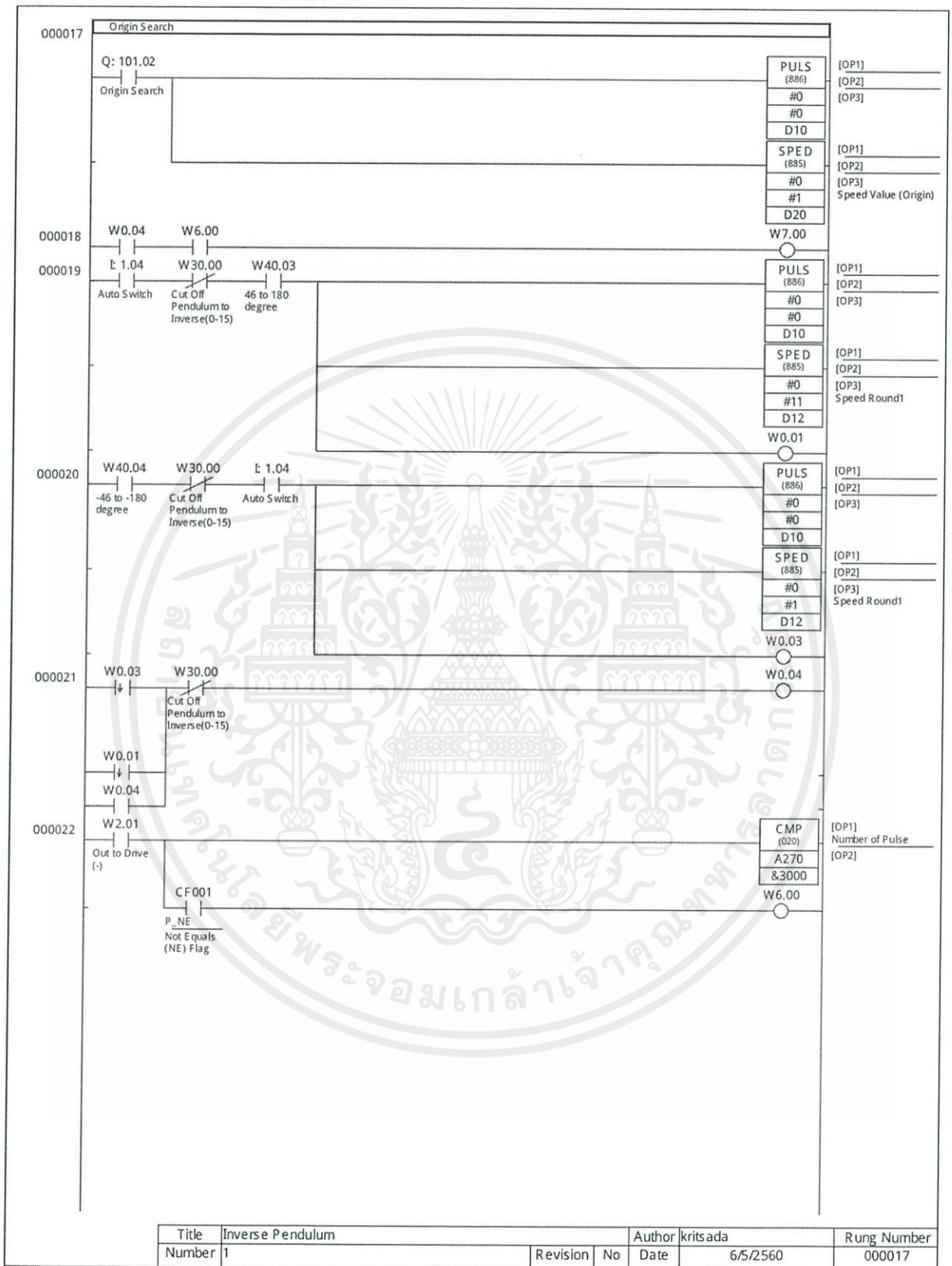
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



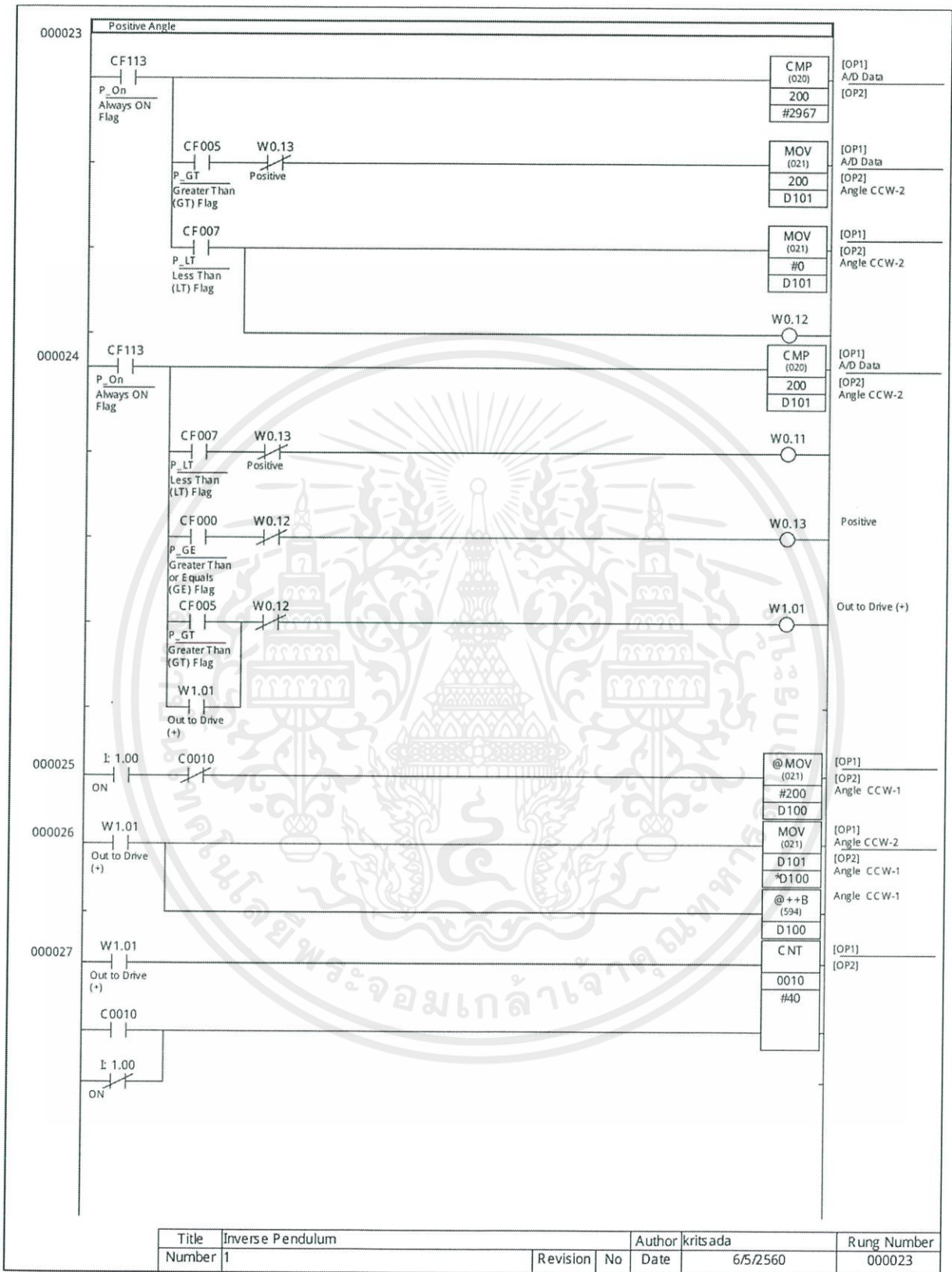
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใด * ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

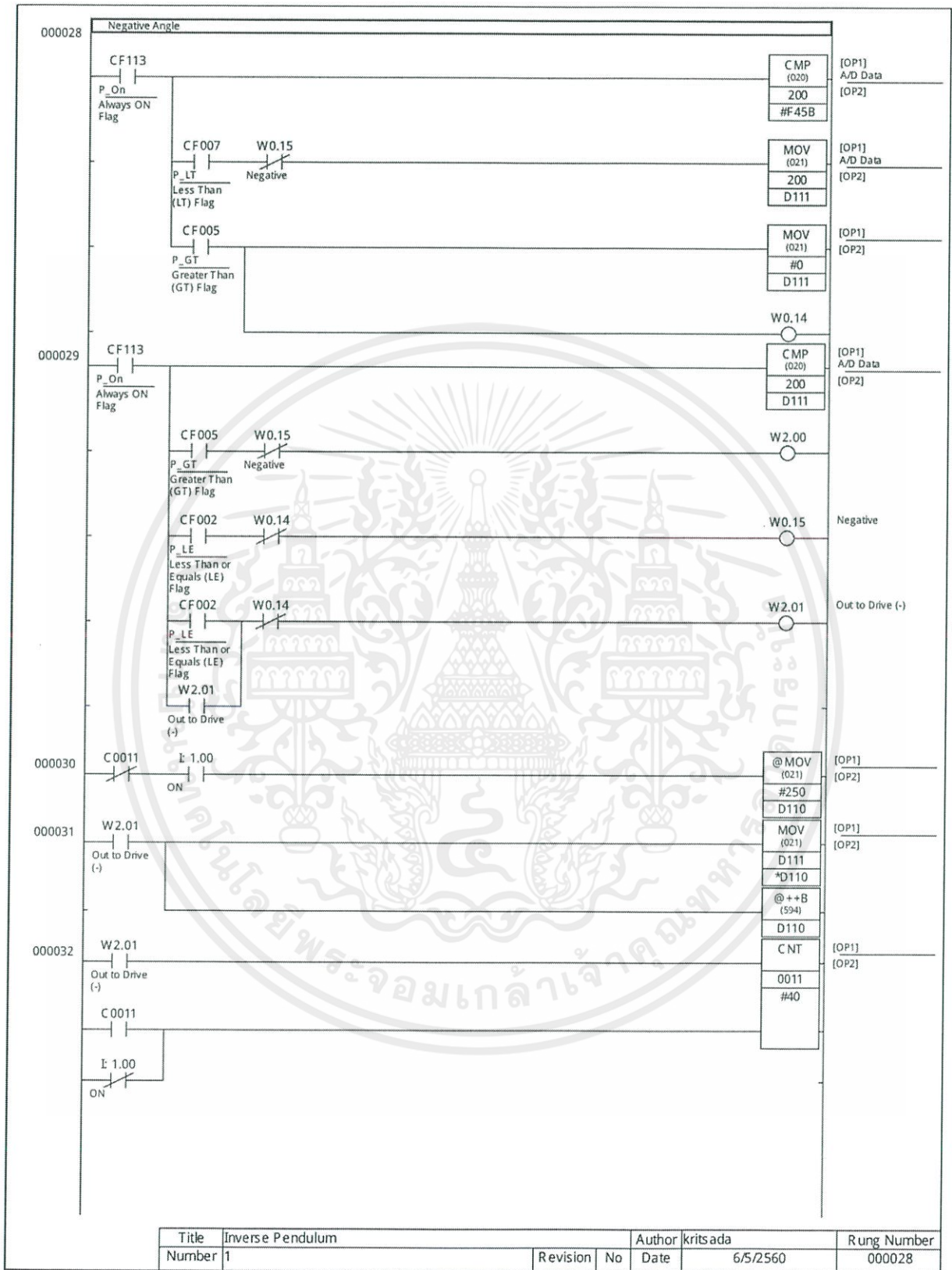


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



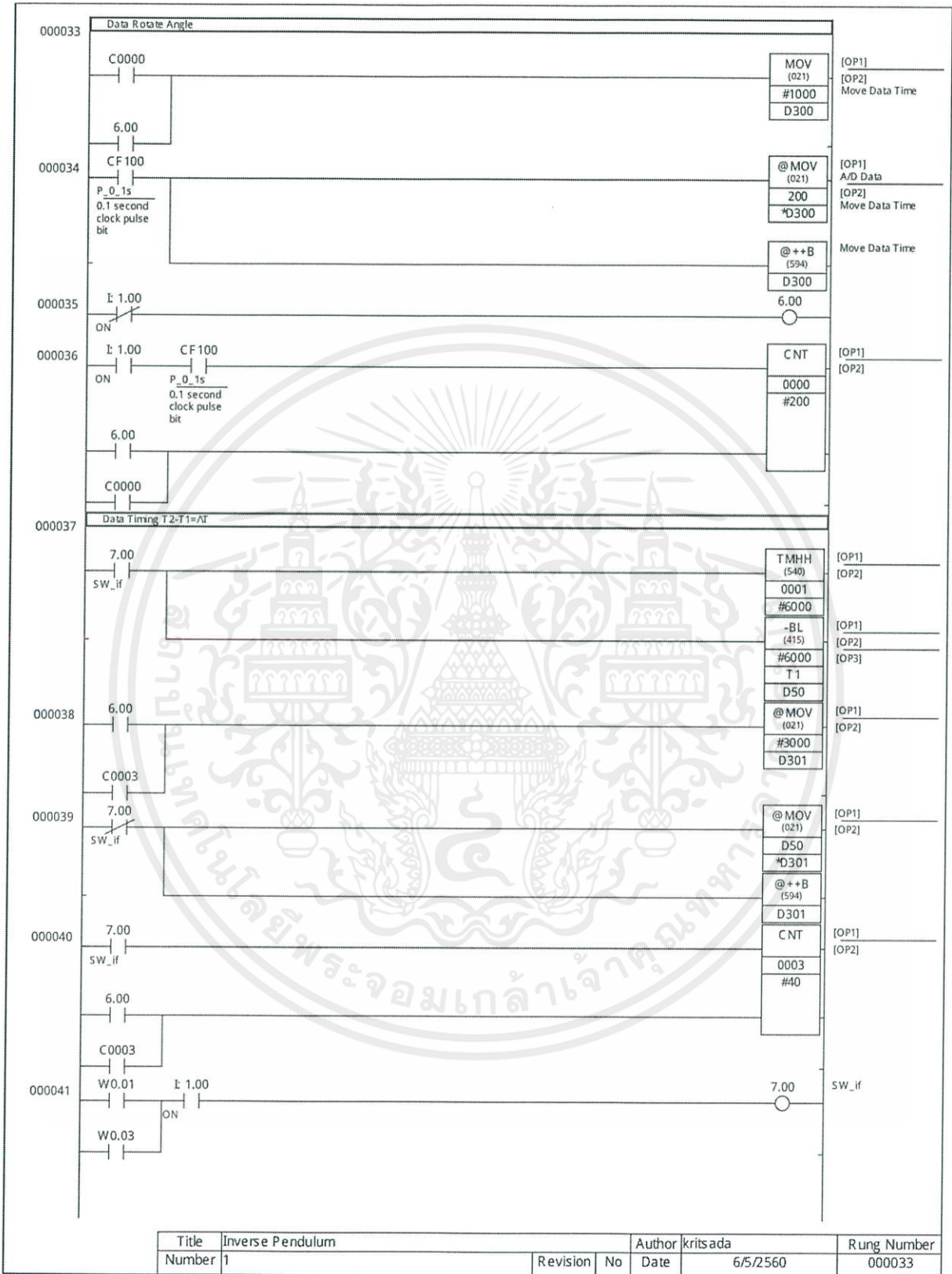
Title	Inverse Pendulum	Author	kritsada	Rung Number
Number	1	Revision	No	Date
			6/5/2560	000023

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด * ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



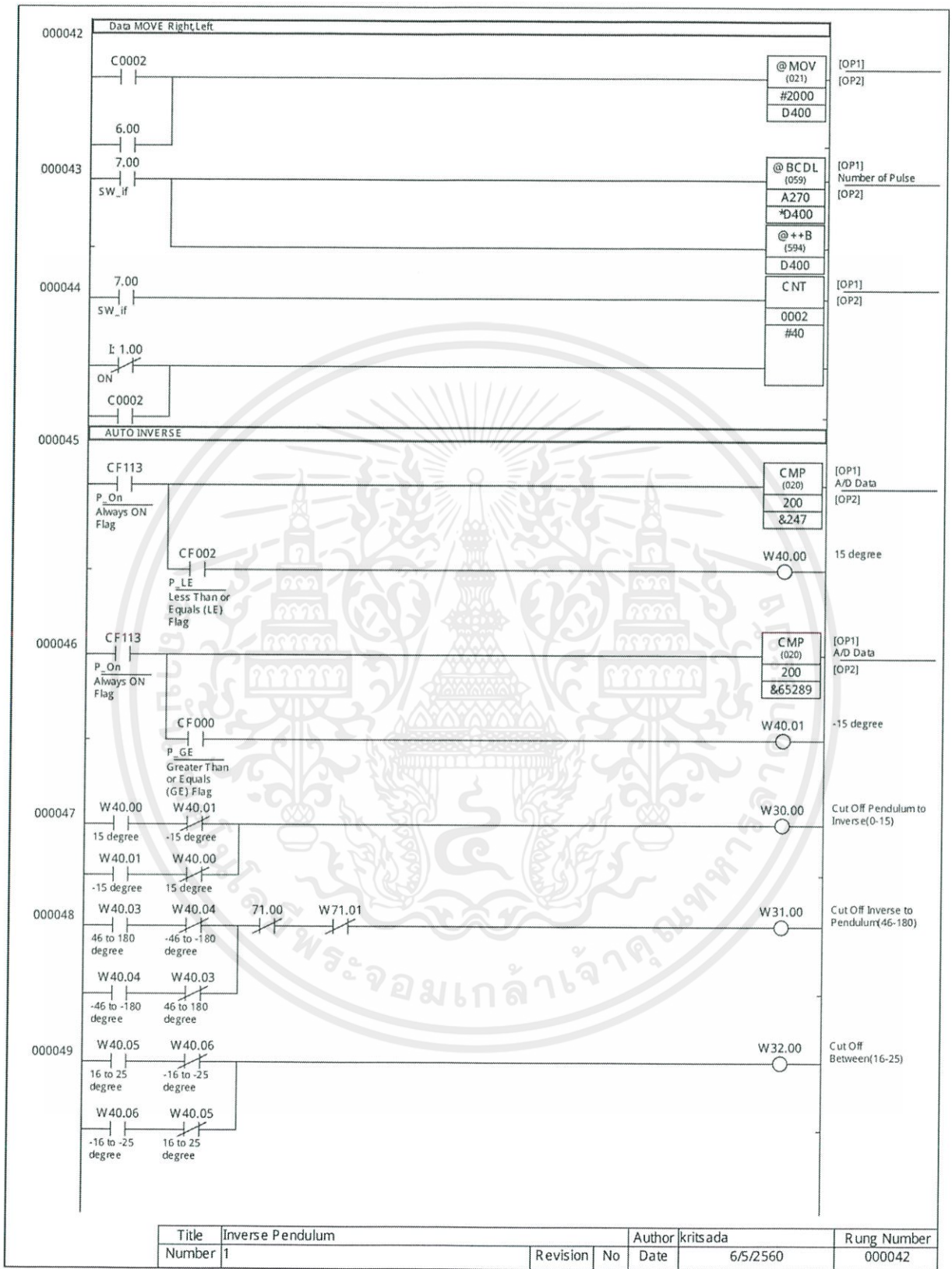
Title	Inverse Pendulum	Author	kritsada	Rung Number
Number	1	Revision	No	Date
				6/5/2560
				000028

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

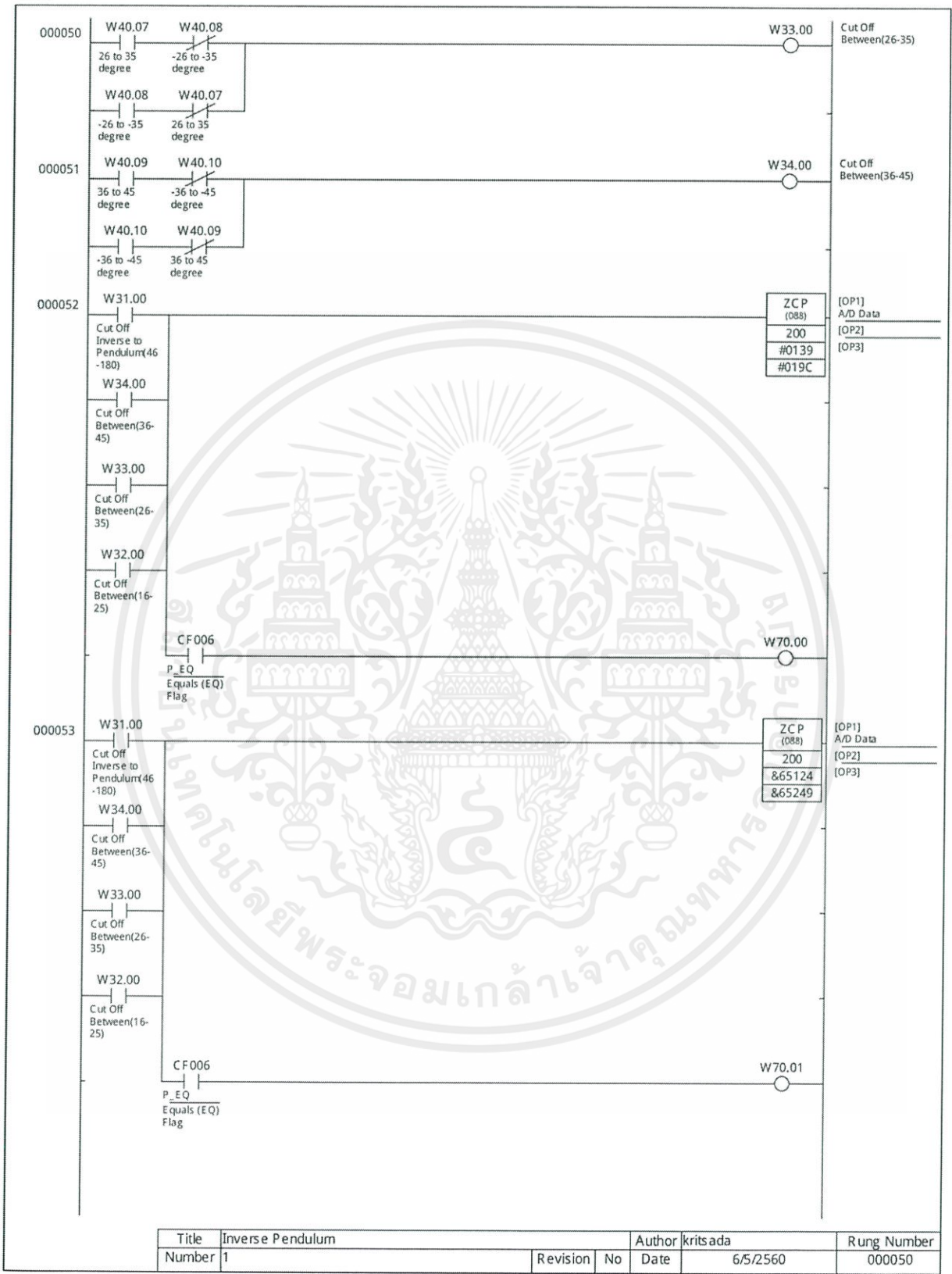


Title	Inverse Pendulum	Author	kritsada	Rung Number
Number	1	Revision	No	Date
				6/5/2560
				000033

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

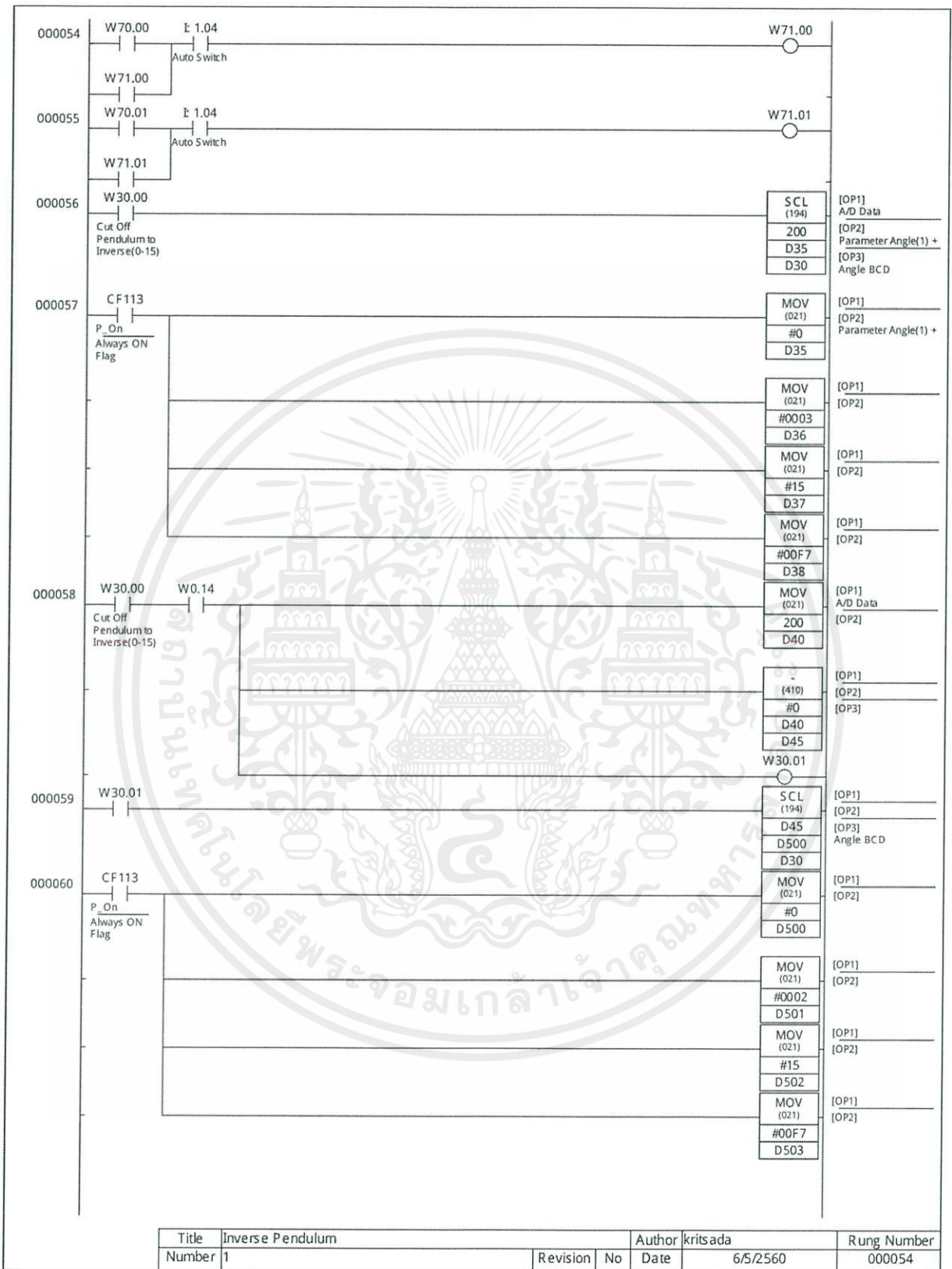


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใด * ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

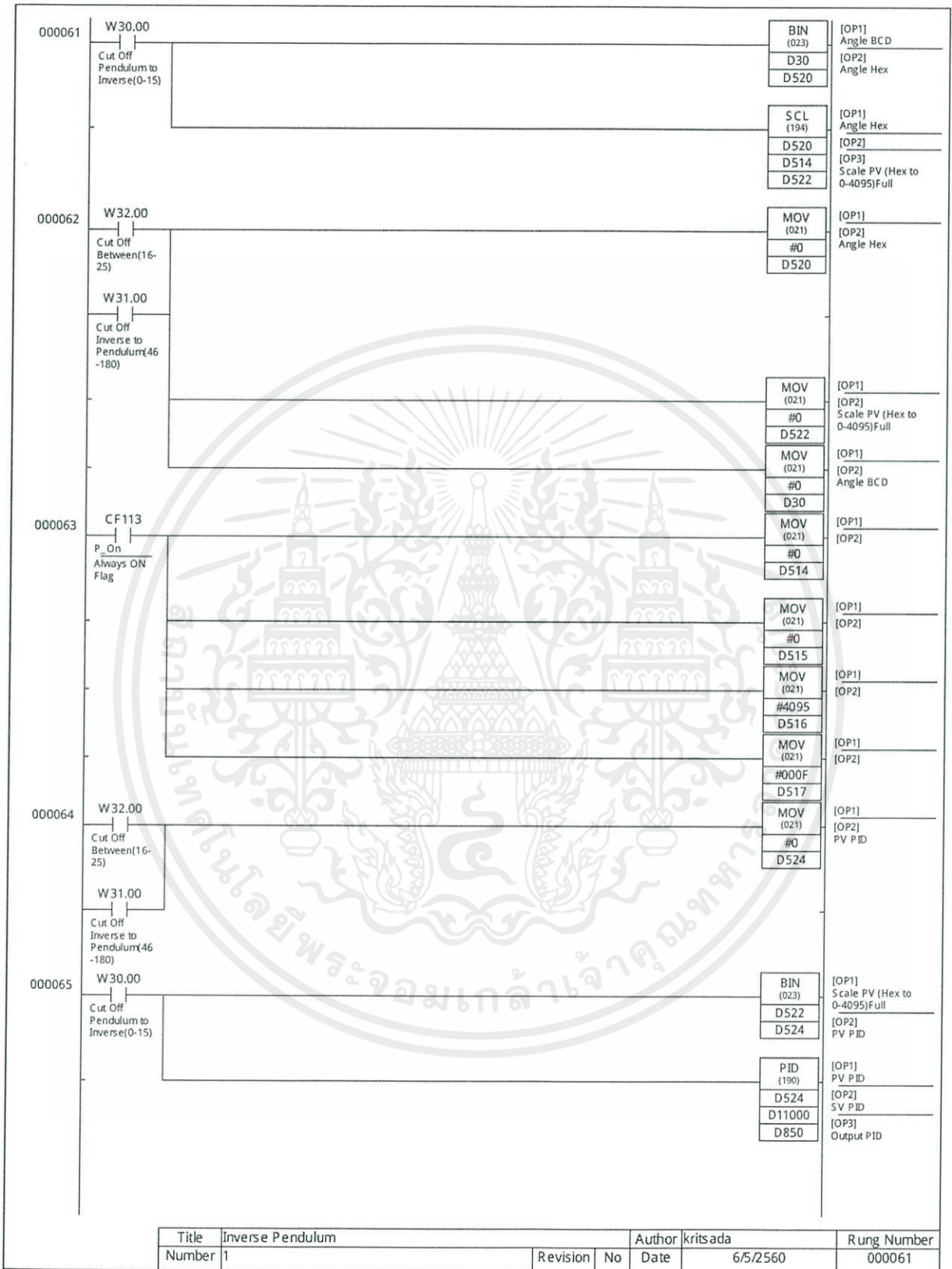


Title	Inverse Pendulum	Author	kritsada	Rung Number	
Number	1	Revision	No	Date	6/5/2560
					000050

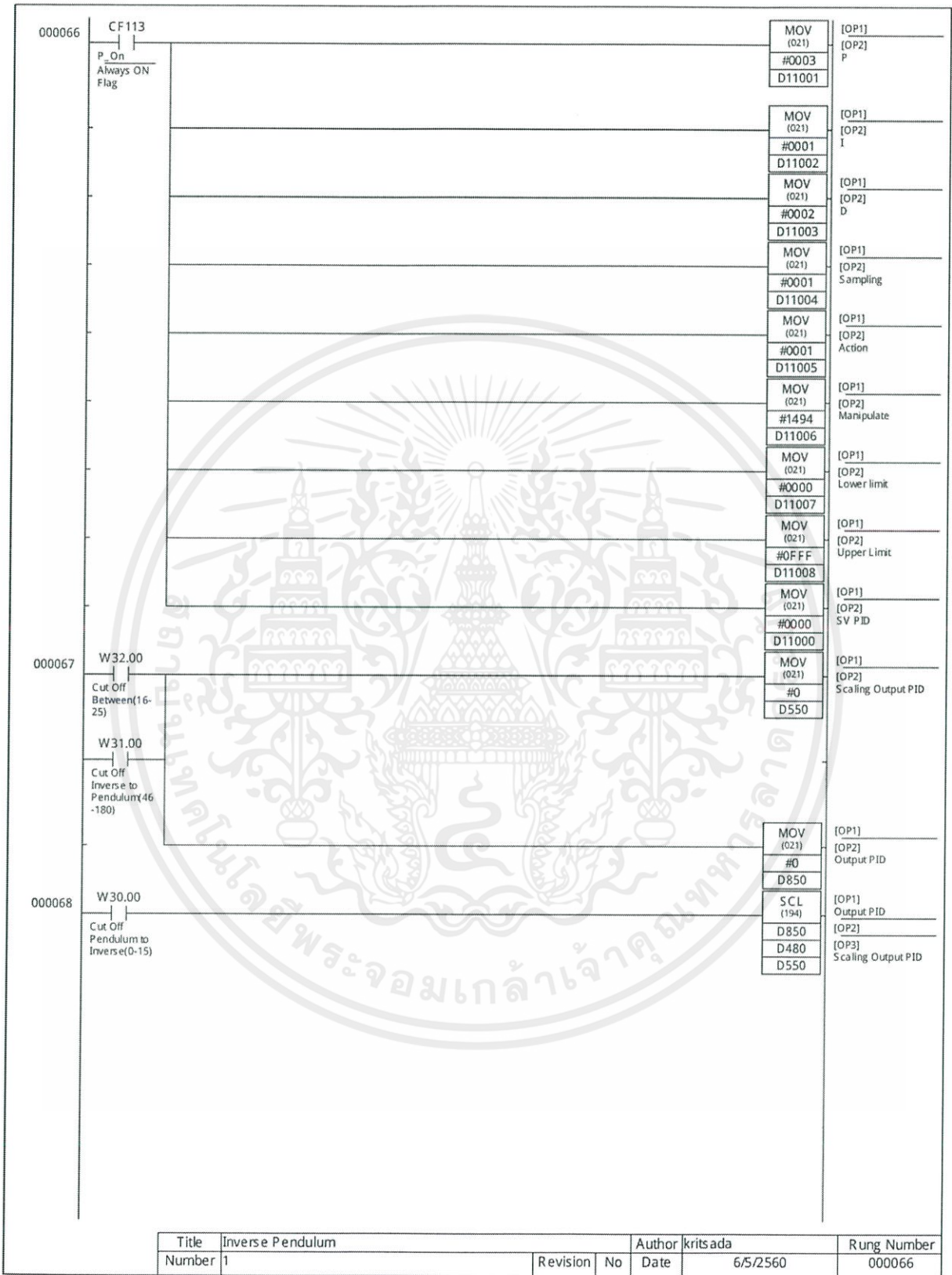
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

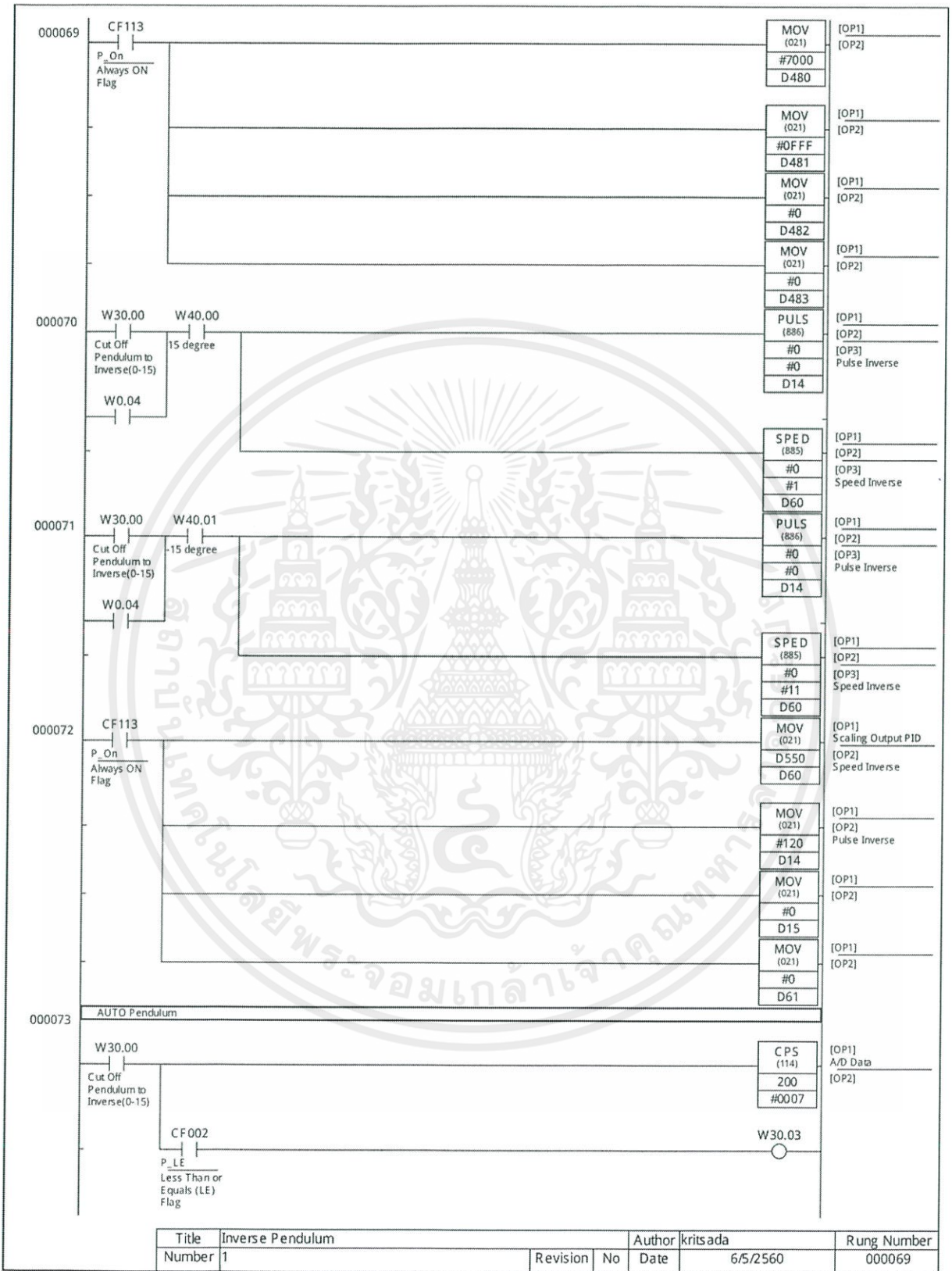


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

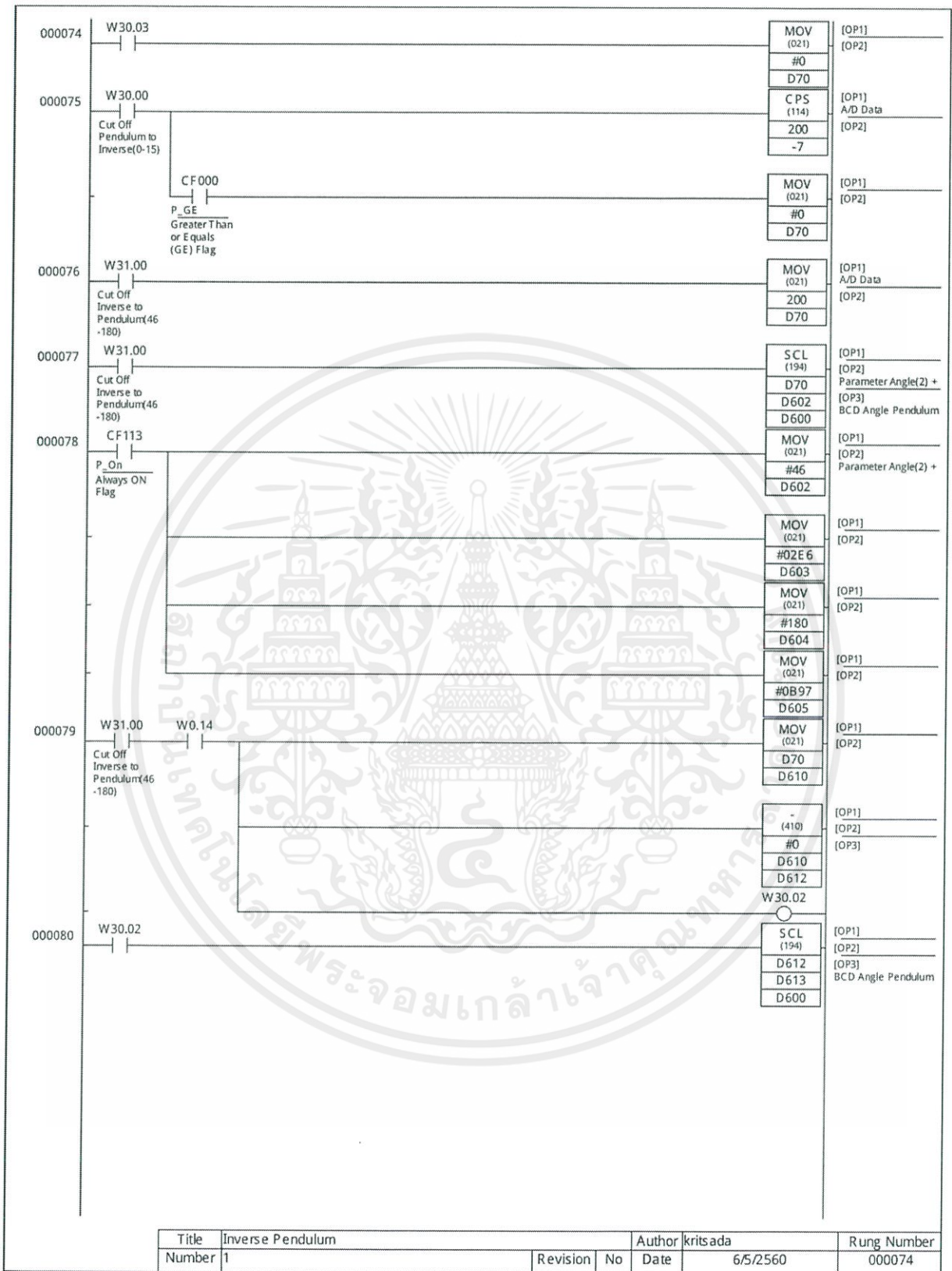


Title	Inverse Pendulum	Author	kritsada	Rung Number
Number	1	Revision	No	Date
				6/5/2560
				000066

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด * ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด * ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Title	Inverse Pendulum	Author	kritsada	Rung Number
Number	1	Revision	No	Date
				6/5/2560
				000074

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

000081	CF113 P_On Always ON Flag	MOV (021)	[OP1]
		#46	[OP2]
		D613	
		MOV (021)	[OP1]
		#02E6	[OP2]
		D614	
		MOV (021)	[OP1]
		#180	[OP2]
		D615	
		MOV (021)	[OP1]
		#0B97	[OP2]
		D616	
000082	W31.00 Cut Off Inverse to Pendulum(46 -180)	BIN (023)	[OP1]
		D600	[OP2]
		D606	HexAngle Pendulum
		SCL (194)	[OP1]
		D606	HexAngle Pendulum
		D620	[OP2]
		D618	[OP3]
		MOV (021)	Fullscale(2)
		#0	[OP1]
000083	W30.00 Cut Off Pendulum to Inverse(0-15)	D600	[OP2]
		MOV (021)	BCD Angle Pendulum
		#0	[OP1]
		MOV (021)	[OP1]
		#0	[OP2]
		D606	Hex Angle Pendulum
		MOV (021)	[OP1]
		#0	[OP2]
		D618	Fullscale(2)
000084	CF113 P_On Always ON Flag	CM (020)	[OP1]
		#3780	[OP2]
		D600	BCD Angle Pendulum
	CF006 P_EQ Equals (EQ) Flag	MOV (021)	[OP1]
		#0	[OP2]
		D600	BCD Angle Pendulum
000085	CF113 P_On Always ON Flag	MOV (021)	[OP1]
		#0	[OP2]
		D620	
		MOV (021)	[OP1]
		#002E	[OP2]
		D621	
		MOV (021)	[OP1]
		#4096	[OP2]
		D622	
		MOV (021)	[OP1]
		#00B4	[OP2]
		D623	
Title Inverse Pendulum		Author kritsada	Rung Number
Number	1	Revision No	Date 6/5/2560
			000081

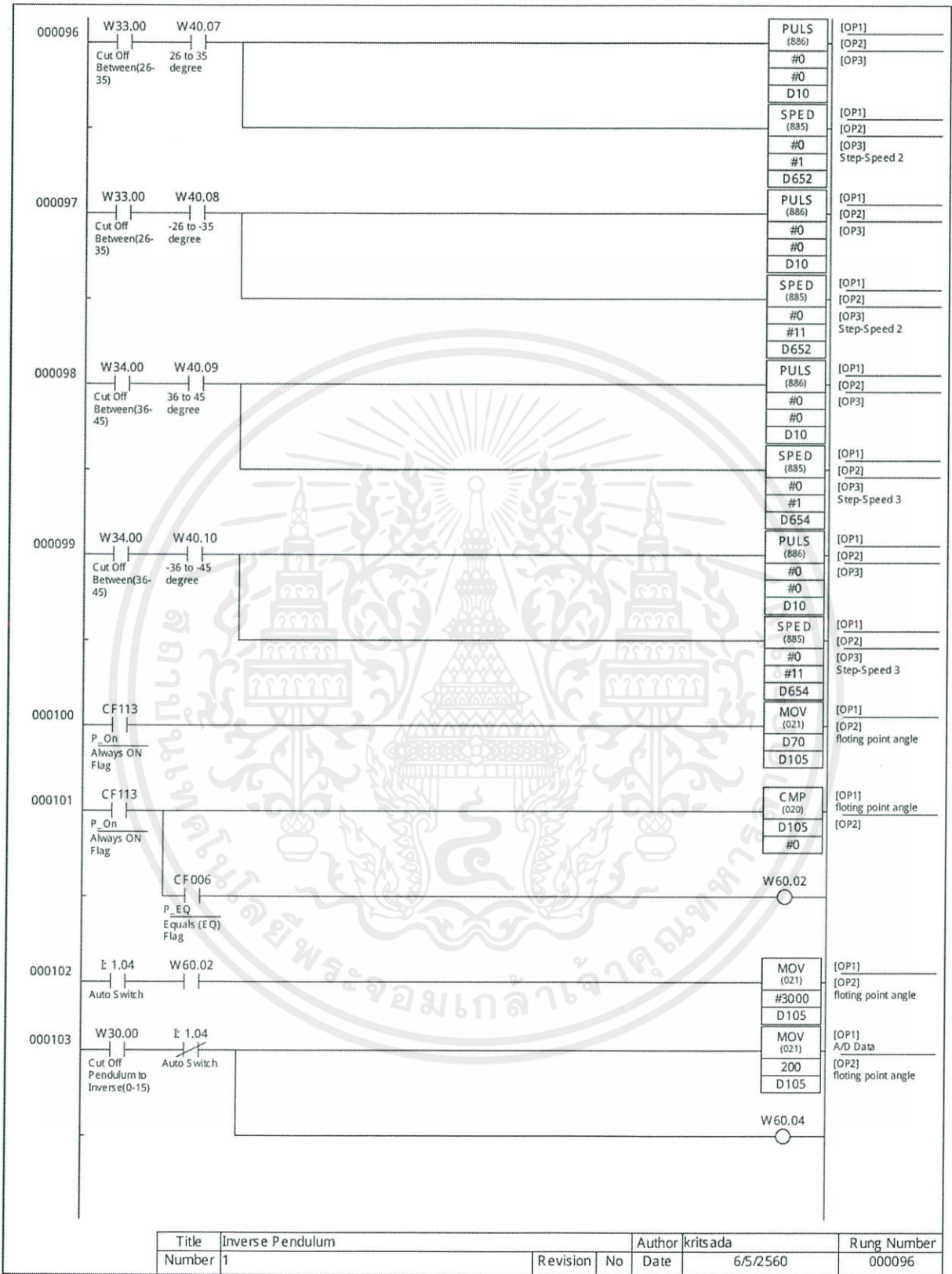
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

000086	W30.00 Cut Off Pendulum to Inverse(0-15)	MOV (021) #0 D625	[OP1] [OP2] PV PID(2)
000087	W31.00 Cut Off Inverse to Pendulum(46 -180)	BIN (023) D618 D625	[OP1] Fullscale(2) [OP2] PV PID(2)
		PID (190) D625 D10000 D630	[OP1] PV PID(2) [OP2] SV PID(2) [OP3] Output PID(2)
000088	CF113 P_On Always ON Flag	MOV (021) #0020 D10001	[OP1] [OP2] P(2)
		MOV (021) #0001 D10002	[OP1] [OP2] I(2)
		MOV (021) #0010 D10003	[OP1] [OP2] D(2)
		MOV (021) #0001 D10004	[OP1] [OP2] Sampling(2)
		MOV (021) #0003 D10005	[OP1] [OP2] Action(2)
		MOV (021) #1494 D10006	[OP1] [OP2] Manipulate(2)
		MOV (021) #0000 D10007	[OP1] [OP2] Lower Limit(2)
		MOV (021) #FFFF D10008	[OP1] [OP2] Upper Limit(2)
		MOV (021) #002E D10000	[OP1] [OP2] SV PID(2)
000089	CF113 P_On Always ON Flag	BCD (024) D630 D666	[OP1] Output PID(2) [OP2]
000090	W31.00 Cut Off Inverse to Pendulum(46 -180)	SCL (194) D666 D632 D640 *B (424) D640 #2 D642	[OP1] [OP2] [OP3] To Servo (2) [OP1] To Servo (2) [OP2] [OP3]
Title Inverse Pendulum		Author kritsada	Rung Number
Number	1	Revision No Date 6/5/2560	000086

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด * ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

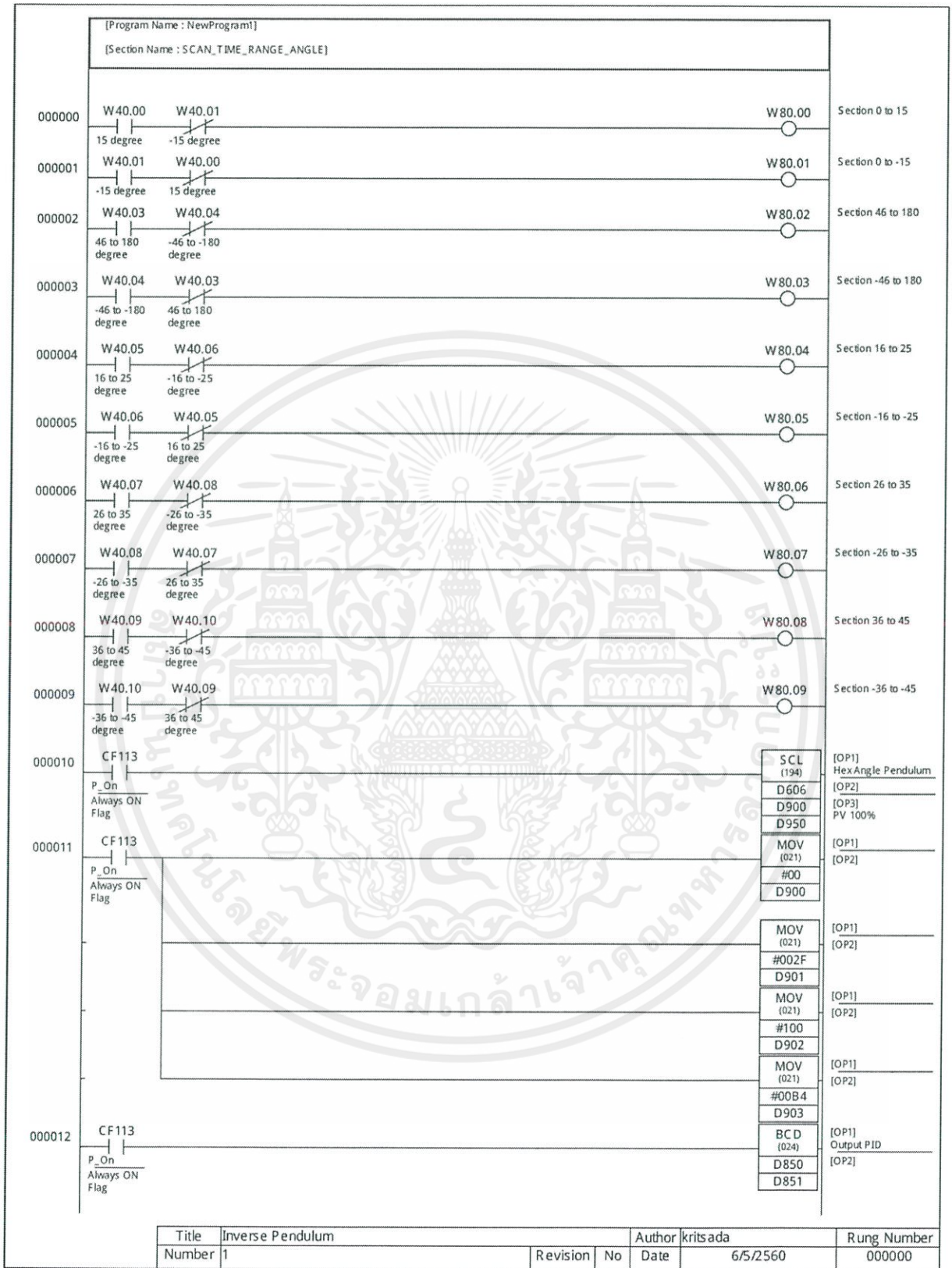
000091	W30.00 Cut Off Pendulum to Inverse(0-15)	MOV (021) #0 D642	[OP1] [OP2]
000092	CF113 P_On Always ON Flag	MOV (021) #2500 D632	[OP1] [OP2]
		MOV (021) #0 D633	[OP1] [OP2]
		MOV (021) #4500 D634	[OP1] [OP2]
		MOV (021) #4096 D635	[OP1] [OP2]
000093	Step-Speed 16-25,26-35,35-45 CF113 P_On Always ON Flag	MOV (021) #1 D651	[OP1] [OP2]
		MOV (021) #6000 D652	[OP1] [OP2] Step-Speed 2
		MOV (021) #1 D653	[OP1] [OP2]
		MOV (021) #8000 D654	[OP1] [OP2] Step-Speed 3
		MOV (021) #1 D655	[OP1] [OP2]
		MOV (021) #2000 D650	[OP1] [OP2] Step Speed 1
000094	W32.00 W40.05 Cut Off Between(16- 25) 16 to 25 degree	PULS (886) #0 #0 D10	[OP1] [OP2] [OP3]
		SPE D (885) #0 #1 D650	[OP1] [OP2] [OP3] Step Speed 1
000095	W32.00 W40.06 Cut Off Between(16- 25) -16 to -25 degree	PULS (886) #0 #0 D10	[OP1] [OP2] [OP3]
		SPE D (885) #0 #11 D650	[OP1] [OP2] [OP3] Step Speed 1
Title Inverse Pendulum		Author kritsada	Rung Number
Number 1	Revision No	Date 6/5/2560	000091

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

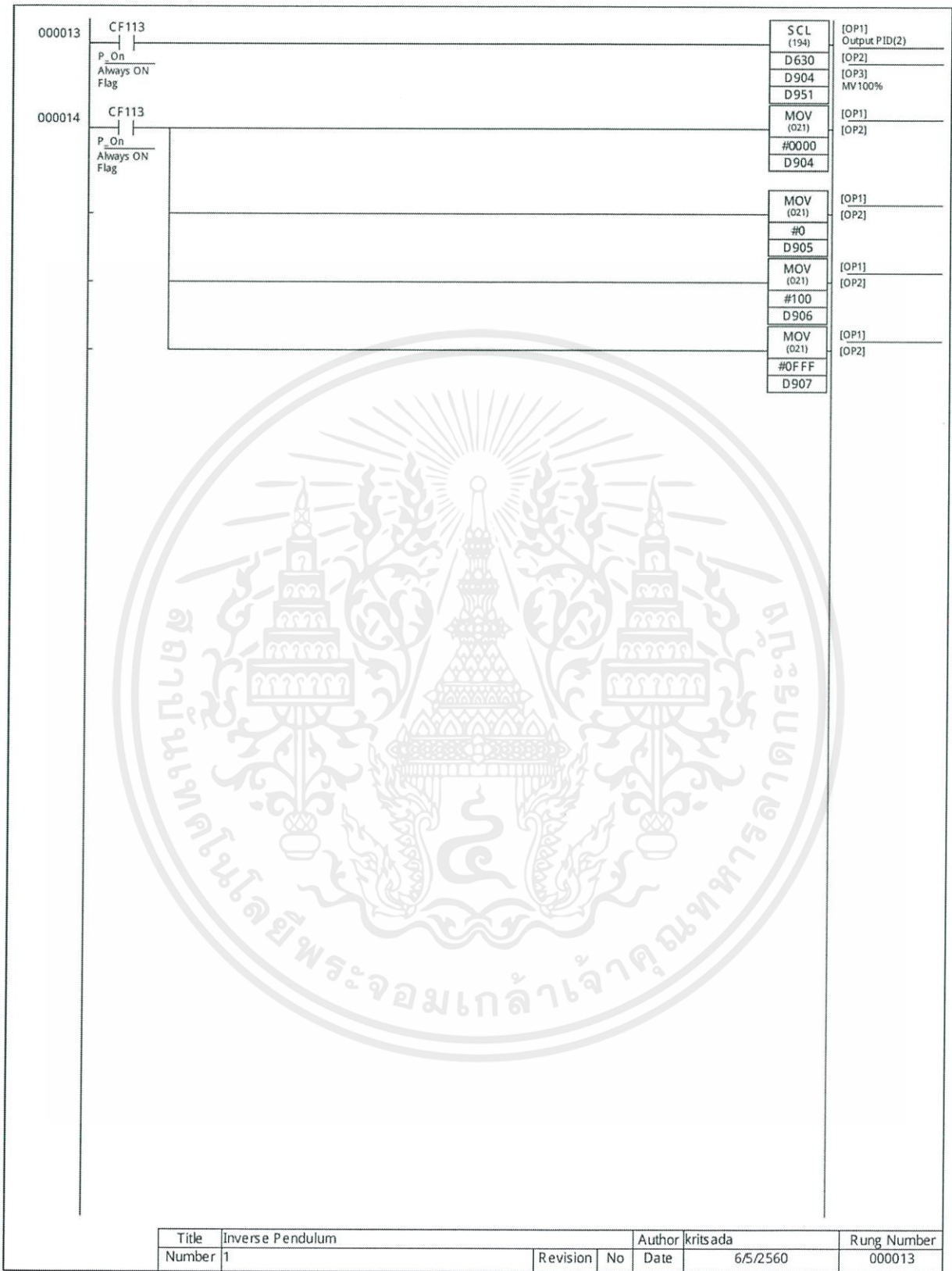


Title	Inverse Pendulum	Author	kritsada	Rung Number
Number	1	Revision	No	Date
			6/5/2560	000096

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใด * ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด * ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Title	Inverse Pendulum	Author	kritsada	Rung Number	
Number	1	Revision	No	Date	6/5/2560
					000013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด * ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



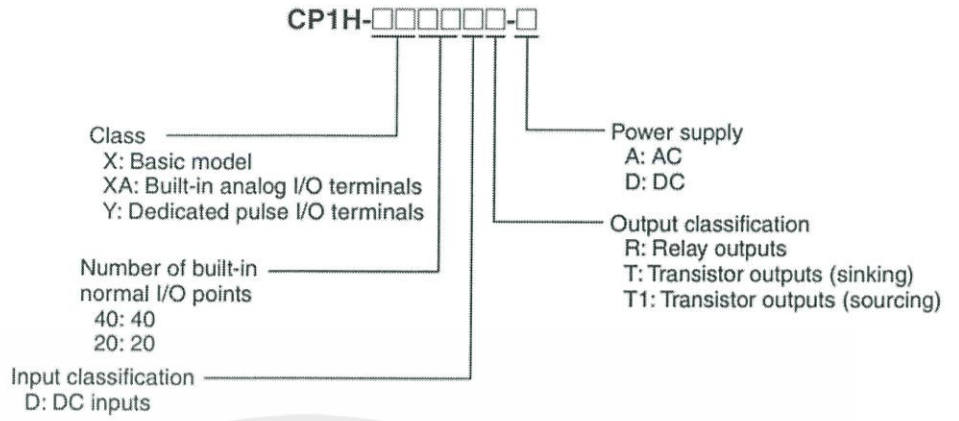
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CPIH CPU Unit Models

Model	X CPU Units		XA CPU Units		Y CPU Units	
	CP1H-X40DR-A (relay outputs)	CP1H-X40DT-D (transistor outputs, sinking) CP1H-X40DT1- D (transistor outputs, sourcing)	CP1H-XA40DR- A (relay outputs)	CP1H-XA40DT- D (transistor outputs, sinking) CP1H- XA40DT1-D (transistor outputs, sourcing)	CP1H-Y20DT-D (transistor outputs, sinking) (to be released soon)	
Power supply	100 to 240 VAC 50/60 Hz	24 VDC	100 to 240 VAC 50/60 Hz	24 VDC	24 VDC	
Program capacity	20K steps					
Max. number of I/O points (See note.)	320				300	
Normal I/O	I/O points	40			20	
	Input points	24			12	
	Input specifications	24 VDC				
	Interrupt or quick-response inputs	8 max.			6 max.	
	Output points	16			8	
	Output specifications	Relay output	Transistor out- put	Relay output	Transistor out- put	Transistor out- put
High-speed counter inputs	High-speed counter inputs	4 axes, 100 kHz (single phase)/50 kHz (differential phases)			2 axes, 1 MHz (single phase)/ 50 kHz (differen- tial phases)	
	Dedicated high-speed counter input terminals	None			2 axes, 1 MHz (single phase)/ 500 kHz (differen- tial phases)	
Pulse outputs	Built-in I/O terminal allocation	2 axes, 100 kHz 2 axes, 30 kHz		2 axes, 30 kHz		
	Dedicated pulse output terminals	None			2 axes, 1 MHz	
Built-in analog I/O	None		Analog voltage/current inputs: 4 Analog voltage/current outputs: 2		None	

Note When CPM1A Expansion I/O Units are used.

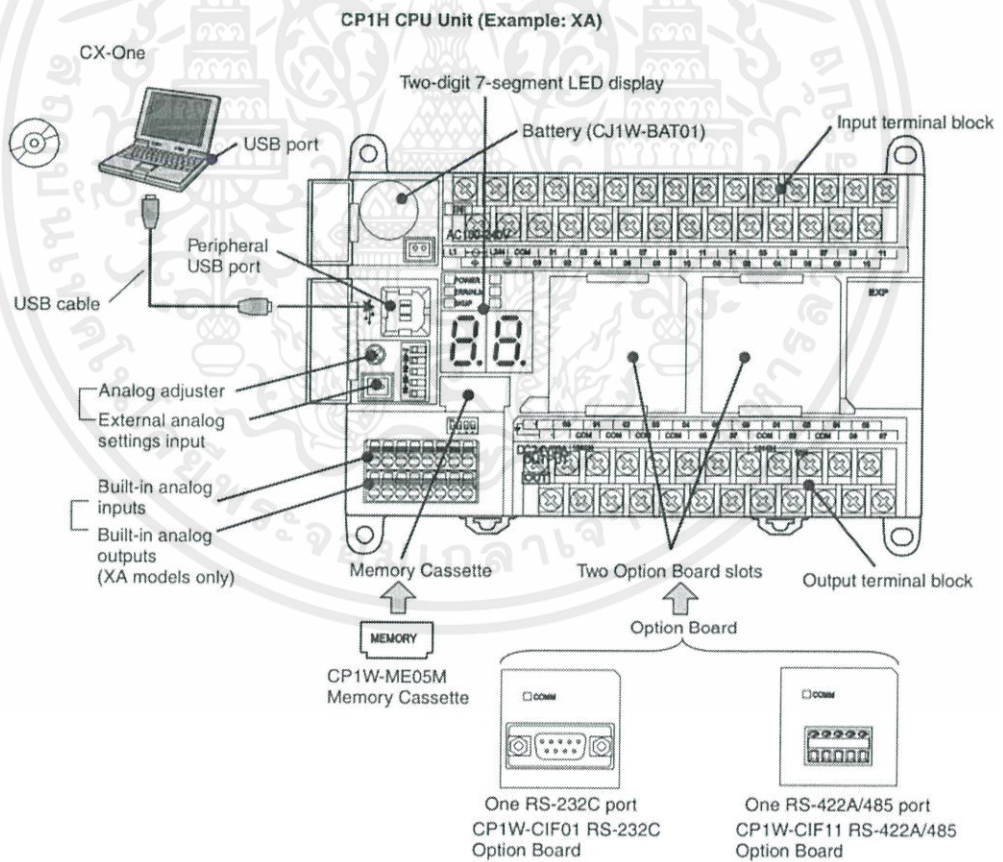
Interpreting CP1H CPU Unit Model Numbers



Features

This section describes the main features of the CP1H.

Basic CP1H Configuration



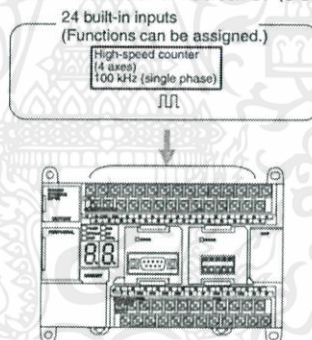
Faster Processing Speed (All Models)

- Top-class performance has been achieved in a micro PLC, with an instruction processing speed equivalent to the CJ1M.
- Approximately 500 instructions are processed at high speed.
- Program creation and control are simplified by using function blocks (FB) and tasks.

Full Complement of High-speed Counter Functions (All Models)

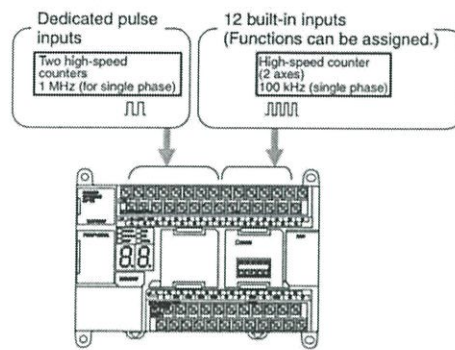
High-speed counter inputs can be enabled by connecting rotary encoders to the built-in inputs. The ample number of high-speed counter inputs makes it possible to control a multi-axis device with a single PLC.

- X and XA CPU Units Four 100-kHz (single phase)/50-kHz (differential phases) high-speed counter inputs are provided as a standard feature. (See note.)



Note Settings in the PLC Setup determine whether each input point is to be used as a normal input, interrupt input, quick-response input, or high-speed counter.

- Y CPU Units Along with two 100-kHz (single phase)/50-kHz (differential phases) highspeed counter inputs, two 1-MHz (single phase)/500-kHz (differential phases) dedicated high-speed counter terminals are provided.



Note Settings in the PLC Setup determine whether each input point is to be used as a normal input, interrupt input, quick-response input, or high-speed counter.

Full Complement of Highspeed Counter Functions (All Models) High-speed Processing for High-speed Counter Present Value (PV) Target Values or Range Comparison Interrupts

An interrupt task can be started when the count reaches a specified value or falls within a specified range.

Functions (All Models)

High-speed Counter Input Frequency (Speed)

Monitoring The input pulse frequency can be monitored using the PRV instruction (one point only).

High-speed Counter PV Holding/Refreshing

It is possible to toggle between holding and refreshing the high-speed counter PV by turning ON and OFF the High-speed Counter Gate Flag from the ladder program.

Versatile Pulse

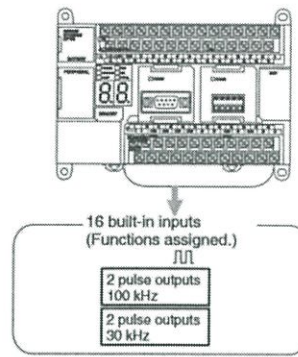
Control (All

Models)

Positioning and speed control by a pulse-input servo driver is enabled by outputting fixed duty ratio pulse output signals from the CPU Unit's built-in outputs.

Four axes (X, Y, Z, and θ) can be controlled. A 1-MHz speed pulse rate is also possible for Y CPU Units.

- X and XA CPU Units Pulse outputs for two axes at 100 kHz maximum and two axes at 30 kHz maximum are provided as standard features. (See note.)



Note The instruction used to control each output point determines whether it is used as a normal output, pulse output, or PWM output.



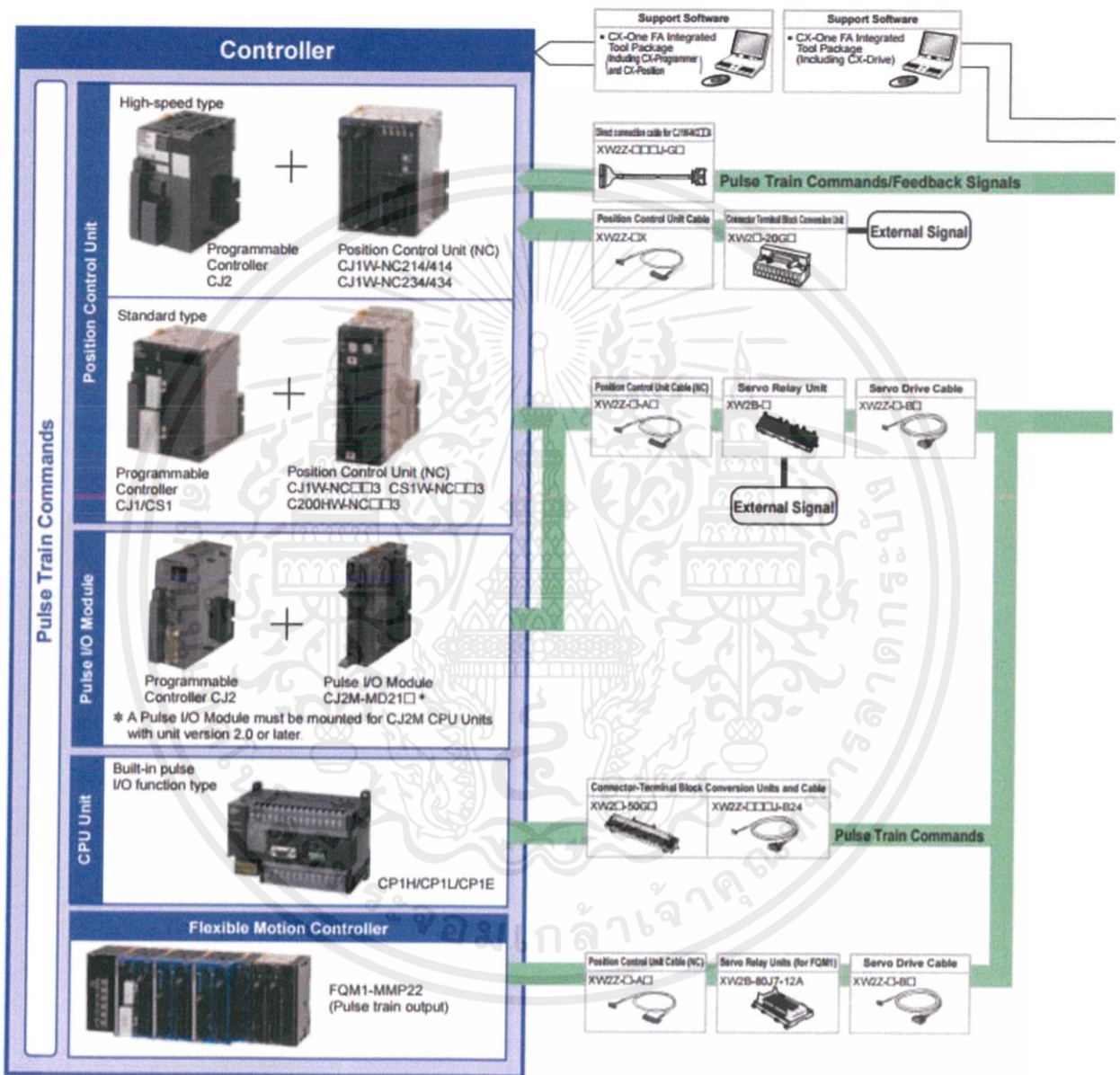


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SERVOMOTOR

G5-series Pulse Train Input Type AC Servomotors/Servo Drives R88M-KE/R88D-KP

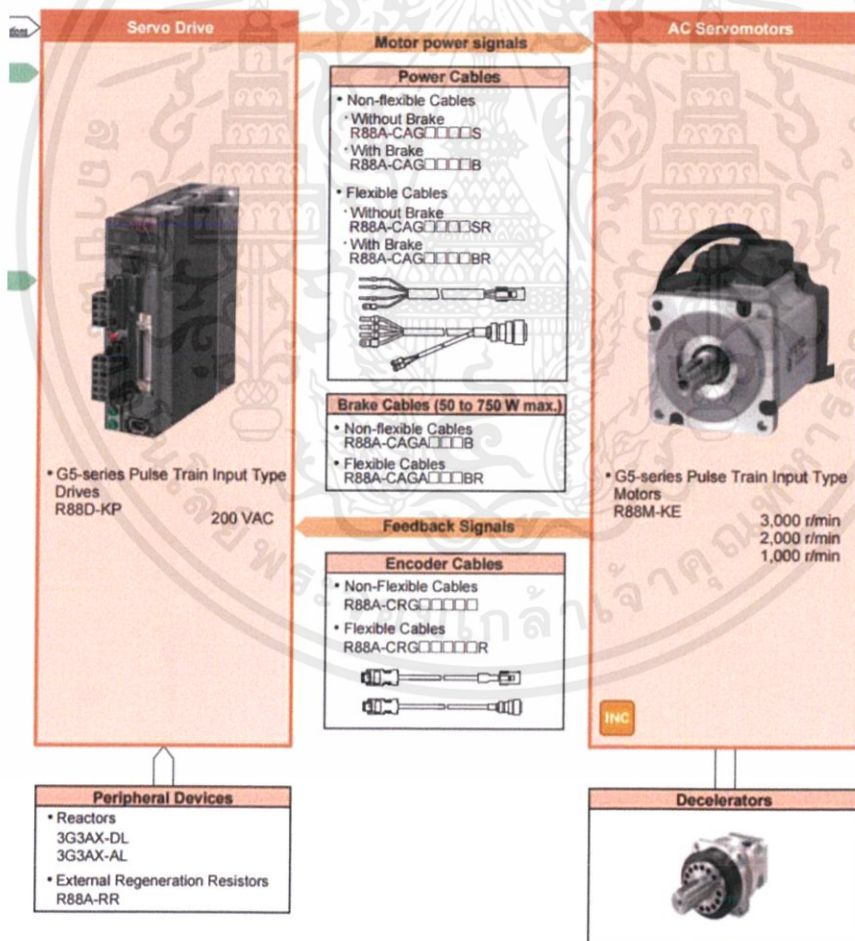
System Configuration



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด * ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

High-performance Servo Optimal for positioning Application.

- Industry Top-class Tracking Performance.
Speed Response Frequency of 2 kHz.
- Outstanding Positioning Accuracy. Featuring a 20-bit high-resolution incremental encoder.
- Easy Adjustment with Autotuning Function.
- Ideal for Applications That Require High Accuracy.
Improved vibration control function.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด * ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

G5-series Pulse Train Input Type AC Servo Drives R88D-KP

- Ordering Information
- Specifications General Specifications Characteristics
 - Servo Drives with Single-phase or three-phase 200 VAC Input Power
 - Servo Drives with Three-phase 200 VAC Input Power
- Components and Functions Servo Drive Part Names Functions
- Dimensions



Specifications General Specifications

Item		Specifications	
Ambient operating temperature and operating humidity		0 to +50°C, 20 to 85%RH max. (with no condensation)	
Storage ambient temperature and humidity		-20 to +65°C, 20 to 85%RH. (with no condensation) Maximum allowable temperature: 80°C for 72 hours maximum (with no condensation)	
Operating and storage atmosphere		No corrosive gases	
Vibration resistance		10 to 60 Hz and at an acceleration of 5.88 m/s ² or less (Not to be run continuously at the resonance point)	
Insulation resistance		Between power supply/power line terminals and FG terminal: 0.5 MΩ min. (at 500 VDC Megger)	
Dielectric strength		Between power supply/power line terminals and FG terminal: 1,500 VAC for 1 min at 50/60 Hz	
Protective structure		Built into panel	
International standard	EC directives	EMC directive	EN55011, EN61000-6-2, IEC61800-3
		Low voltage directive	EN61800-5-1
	UL standards		UL508C
	CSA standards		CSA22.2 No.14

Note: 1. The above items reflect individual evaluation testing. The results may differ under compound conditions.

Note: 2. Never perform dielectric strength or other megameter tests on the Servo Drive. Failure to follow this guideline may result in damaging the internal elements.

Note: 3. Depending on the operating conditions, some Servo Drive parts will require maintenance. For details, refer to the G5-series Pulse Train Input Type USER'S MANUAL. Man.No. I584