

การออกแบบระบบควบคุมระบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
ที่มีความร้อนสะสมโดยวิธีคำนวณทางคณิตศาสตร์
MODEL BASED CONTROLLER DESIGN OF
HEAT EXCHANGER SYSTEM WITH
ACCUMULATIVE HEAT RESERVOIR



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2561

การออกแบบระบบควบคุมระบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
ที่มีความร้อนสะสมโดยวิธีคำนวณทางคณิตศาสตร์

MODEL BASED CONTROLLER DESIGN OF
HEAT EXCHANGER SYSTEM WITH
ACCUMULATIVE HEAT RESERVOIR



ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MODEL BASED CONTROLLER DESIGN OF
HEAT EXCHANGER SYSTEM WITH
ACCUMULATIVE HEAT RESERVOIR



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN INSTRUMENT ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2561
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

หัวข้อปริญญาานิพนธ์ การออกแบบระบบควบคุมระบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีความร้อนสะสมโดยวิธีคำนวณทางคณิตศาสตร์
MODEL BASED CONTROLLER DESIGN OF HEAT EXCHANGER SYSTEM WITH ACCUMULATIVE HEAT RESERVOIR

นักศึกษาผู้จัดทำ นางสาวมลชนก กมลวัฒนา รหัสนักศึกษา 58010011
นายภาณุวัฒน์ อภิชาติพงศ์ชัย รหัสนักศึกษา 58010963
นายวิริยะ อินทฤทธิ์ รหัสนักศึกษา 58011163
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมการวัดคุม
ปีการศึกษา 2561

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์	ลายมือชื่อ
รองศาสตราจารย์วิริยะ กองรัตน์ ดร.นภศุล วงษ์วานิช	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญาานิพนธ์ การออกแบบระบบควบคุมระบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีความร้อน
สะสมโดยวิธีคำนวณทางคณิตศาสตร์
MODEL BASED CONTROLLER DESIGN OF
HEAT EXCHANGER SYSTEM WITH
ACCUMULATIVE HEAT RESERVOIR

นักศึกษาผู้จัดทำ	นางสาวกมลชนก	กมลวัฒนา	รหัสนักศึกษา	58010011
	นายภาณุวัฒน์	อภิชาติพงศ์ชัย	รหัสนักศึกษา	58010963
	นายวิริยะ	อินทฤทธิ์	รหัสนักศึกษา	58011163

อาจารย์ที่ปรึกษา รongศาสตราจารย์วิริยะ กองรัตน์
ดร.นภศุล วงษ์วานิช

ปีการศึกษา 2561

บทคัดย่อ

ในอุตสาหกรรมเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีความสำคัญ และมีการใช้งานอย่างกว้างขวาง ปริญญาานิพนธ์นี้จึงจัดทำขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา ปรับปรุง และออกแบบระบบควบคุมสำหรับ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีความร้อนสะสม โดยใช้การควบคุมด้วยพีไอดี ในการควบคุมซึ่งมีการ นำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบการแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีความร้อนสะสม มาประยุกต์ใช้ โดยมี การนำโปรแกรมแล็บวิว มาใช้สำหรับการเก็บข้อมูลเอาต์พุตของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นที่ถูกวัดด้วย อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (รุ่น LM35) และใช้เครื่องเก็บข้อมูล และแปลงสัญญาณ (DAQ) ในการเก็บค่า เอาต์พุตต่อเข้ากับแล็บวิว เพื่อนำไปหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่อยู่ภายในโมเดลทางคณิตศาสตร์นี้ โดยใช้หลักการของการระบุอัตลักษณ์ของระบบผ่านโปรแกรมเมตแล็บ และนำเสนอการทางคณิตศาสตร์ที่ ได้มาออกแบบระบบควบคุม ใช้หลักการหาค่าพีไอดี โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ตำแหน่งโพลเด่น เพื่อให้ได้ ค่าพีไอดีที่เหมาะสมในการควบคุม และใช้คอมพิวเตอร์ทำการควบคุมระหว่างแล็บวิวไปยังระบบ แลกเปลี่ยนความร้อน ผ่านเครื่องเก็บข้อมูล และแปลงสัญญาณ จากผลการทดลองนี้สามารถนำค่า พีไอดีที่ผ่านการคำนวณได้ มาใช้ในการควบคุมระบบแลกเปลี่ยนความร้อน ให้ผลตอบสนองที่มี เสถียรภาพ และมีประสิทธิภาพ

Thesis Title	MODEL BASED CONTROLLER DESIGN OF HEAT EXCHANGER SYSTEM WITH ACCUMULATIVE HEAT RESERVOIR	
Author	Ms. Kamonchanok	Kamonwattana
	Mr. Panuwat	Ahpitapongchai
	Mr. Wiriya	Intarit
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Viriya	Kongrattan
	Dr. Napasool	Wongvanich
Year	2018	

ABSTRACT

The aim of this project is to design a control system for the heat exchanger system with accumulative heat reservoir. The heat exchanger system was firstly modelled through the set of five differential equations, that also take into account the heat accumulation inside the reservoirs. Temperature data was obtained through the use of a temperature sensor (LM 35) which is connected to LabView through a DAQ. The collected data was then processed using an integral based method in MATLAB to determine the parameters of the heat exchanger system. The appropriate PID gains is attained through the use of the dominant pole from the open loop response. For control, used computer to command by Labview program through the DAQ to the system. The Results show that the set of PID gains that were determined through the use of calculations provided a outperformed and stable response.

กิตติกรรมประกาศ

รายงานผลการปฏิบัติงานปริญญานิพนธ์การออกแบบระบบควบคุมสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีความร้อนสะสมได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ก็ด้วยความกรุณาช่วยเหลือจากผู้เกี่ยวข้อง ทั้งการเตรียมอุปกรณ์ และการปฏิบัติงาน ดังนี้

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุมที่ใช้เป็นสถานที่ในการเตรียมอุปกรณ์และปฏิบัติการศึกษาปริญญานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบคุณ ดร.นภศูล วงษ์วานิช และ รองศาสตราจารย์วิริยะ กองรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่คอยช่วยเหลือ ให้คำแนะนำและคำปรึกษา ทั้งความรู้ การแก้ไขปัญหาในการปฏิบัติงาน การทดลองต่าง ๆ ตลอดจนการเขียนรายงานฉบับนี้ให้เสร็จสมบูรณ์

และสุดท้ายนี้ ผู้จัดทำขอขอบคุณครอบครัวที่คอยช่วยเหลือ ให้กำลังใจ ให้คำปรึกษาในการปฏิบัติงาน ทำให้การทำปริญญานิพนธ์ในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี



คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

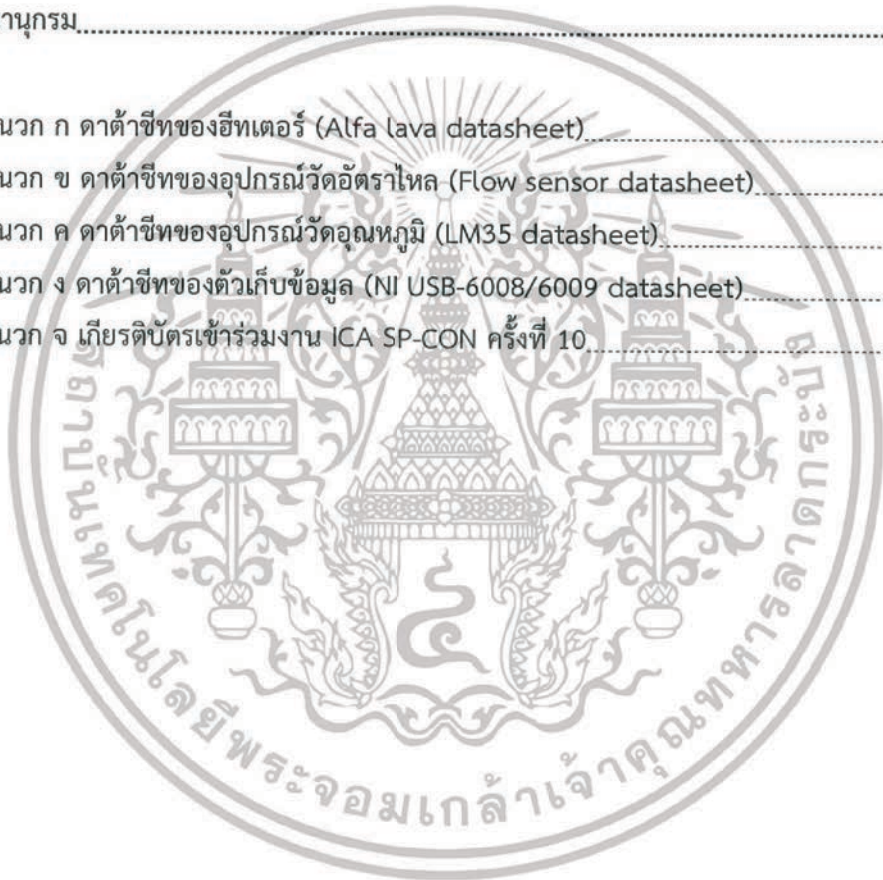
	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของปริญญาโท.....	1
1.2 หลักการและเหตุผล.....	1
1.3 วัตถุประสงค์ของปริญญาโท.....	1
1.4 เป้าหมายและขอบเขตของปริญญาโท.....	1
1.5 ขั้นตอนของการศึกษา.....	2
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง ของระบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....	3
2.1 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....	3
2.2 ฮาร์ดแวร์ (Hardware).....	4
2.2.1 ฮีตเตอร์ (Heater).....	4
2.2.2 โซลิดสเตตรีเลย์ (Solid state relay).....	4
2.2.3 เครื่องระบายความร้อน.....	5
2.2.4 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (รุ่น LM35).....	5
2.2.5 อุปกรณ์วัดอัตราการไหล (Flow meter).....	6
2.2.6 คอนแทครีเลย์ (Contact relay).....	6
2.2.7 ตัวควบคุม (Controller).....	7
2.2.8 เครื่องจัดเก็บข้อมูลและแปลงสัญญาณ DAQ (Data acquisition).....	7
2.2.9 โมดูลแปลงแรงดันไฟฟ้าให้เป็นกระแส (Voltage to current Module).....	8
2.2.10 อุปกรณ์อื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องภายในระบบ.....	8

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3 ซอฟต์แวร์ (Software).....	9
2.3.1 แม็ตแล็บ (MATLAB).....	9
2.3.2 เมเปิ้ล (Maple).....	9
2.3.3 แล็บวิว (LabVIEW).....	9
2.4 สมการทางคณิตศาสตร์ของระบบแลกเปลี่ยนความร้อน.....	10
2.5 วิธีระบุอัตลักษณ์ของระบบ (System identification).....	13
2.6 แบบจำลองปริภูมิสถานะ (State space).....	13
2.7 การควบคุม (Controller).....	16
2.7.1 ผลตอบสนองต่อเวลาของระบบอันดับสอง.....	17
2.7.2 นิยามของการชี้เฉพาะของผลตอบสนองชั่วครู่แบบต่างๆ.....	19
2.7.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบควบคุม.....	25
2.7.4 คุณสมบัติของตัวควบคุม.....	25
2.8 การออกแบบตัวควบคุมด้วยพีไอดี (PID controller).....	29
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน.....	31
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	31
3.2 การดำเนินงาน.....	32
3.2.1 ฮาร์ดแวร์ (Hardware).....	32
3.2.2 สมการทางคณิตศาสตร์ของระบบแลกเปลี่ยนความร้อน.....	32
3.2.3 การเก็บข้อมูล (Data and graph).....	33
3.2.4 การระบุอัตลักษณ์ของระบบ และการทำทรานเฟอร์ฟังก์ชัน.....	38
3.2.4.1 ฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล (Exponential).....	38
3.2.4.2 ฟังก์ชันเชิงเส้น (Linear).....	48
3.2.5 ตัวควบคุม (Controller).....	50
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	59

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	64
5.1 บทสรุปการวิจัย.....	64
5.2 ปัญหาที่พบในระหว่างการค้าเงินงาน และแนวทางแก้ปัญหา.....	64
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	64
บรรณานุกรม.....	65
ภาคผนวก ก ดาต้าชีทของฮีทเตอร์ (Alfa lava datasheet).....	69
ภาคผนวก ข ดาต้าชีทของอุปกรณ์วัดอัตราไหล (Flow sensor datasheet).....	72
ภาคผนวก ค ดาต้าชีทของอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (LM35 datasheet).....	79
ภาคผนวก ง ดาต้าชีทของตัวเก็บข้อมูล (NI USB-6008/6009 datasheet).....	93
ภาคผนวก จ เกียรติบัตรเข้าร่วมงาน ICA SP-CON ครั้งที่ 10.....	120



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ข้อมูลกำลังของฮีตเตอร์.....	34
3.2 การจัดเก็บข้อมูล T_1, T_2, T_3, T_4 และ T_5 ที่ 12 mA.....	36
3.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทำการระบุอัตลักษณ์ของระบบ.....	44
3.4 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทำ การระบุอัตลักษณ์ของระบบในช่วง เอกซ์โพเนนเชียล $t = 8000 \text{ sec}$	48
3.5 ค่าโพลเด่นของแต่ละช่วงค่า mA.....	53
3.6 ค่าพีเอ็ดที่ช่วงค่า 8 mA, 10 mA, 12 mA และ 14 mA.....	58
3.7 ค่าพีเอ็ดที่ช่วงค่าอนุกรมต่าง ๆ.....	58
4.1 ค่าพีเอ็ดที่ช่วงข้อมูลที่ 8 mA, 10 mA, 12 mA, 14 mA และ Set point.....	60



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น.....	3
2.2 ฮีตเตอร์แบบจุ่ม (Immersion heater).....	4
2.3 โซลิดสเตตรีเลย์ (Solid state relay).....	4
2.4 เครื่องระบายความร้อน.....	5
2.5 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (รุ่น LM35).....	5
2.6 อุปกรณ์การวัดอัตราการไหล (รุ่น FS300A).....	6
2.7 การต่อโหลดผ่าน Relay.....	6
2.8 การเชื่อมต่อ Input/output เข้าตัว Controller.....	7
2.9 เครื่องจัดเก็บข้อมูลและแปลงสัญญาณ DAQ (Data acquisition).....	8
2.10 โมดูลแปลงแรงดันไฟฟ้าให้เป็นกระแส (Voltage to current module).....	8
2.11 โปรแกรมเมตแล็บ.....	9
2.12 โปรแกรมเมเบิล.....	9
2.13 โปรแกรมแล็บวิว.....	10
2.14 แผนภาพจำลองของระบบแลกเปลี่ยนความร้อน.....	10
2.15 Element of heat exchanger.....	11
2.16 Element of heater.....	12
2.17 Element of hot storage.....	12
2.18 Element of cool storage.....	12
2.19 แบบจำลองปริภูมิสถานะ (State space).....	13
2.20 อินพุตและเอาต์พุตของระบบ.....	14
2.21 State space representation.....	14
2.22 แผนภาพระบบเปิด (Open-loop control system).....	16
2.23 แผนภาพระบบปิด (Close loop control system).....	16
2.24 Close-loop transfer function ในระบบอันดับสอง.....	17
2.25 ผลตอบสนองของระบบอันดับสองต่ออินพุตที่เป็น Unit step สำหรับค่าต่าง ๆ.....	19
ของ ζ ต่อ Normalized time $\omega_n t$	
2.26 Specification ต่าง ๆ ของระบบ.....	20

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.27 การหาค่าของ β	21
2.28 ความสัมพันธ์ระหว่าง M_p และ ζ	23
2.29 Curve ของผลตอบสนองชั่วครู่ต่ออินพุตที่เป็น Unit step.....	23
2.30 บริเวณความเสถียรภาพของระบบ.....	25
2.31 ลักษณะสมบัติของตัวควบคุมแบบสัดส่วน.....	26
2.32 Close-loop transfer function ที่มีตัวควบคุมพีไอดี.....	29
2.33 Open-loop transfer function ที่มีตัวควบคุมพีไอดี.....	30
3.1 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการดำเนินงานของปริมาณอินพุต.....	31
3.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลัง และกระแสของฮีตเตอร์.....	35
3.3 การเก็บข้อมูลผ่านเครื่องเก็บข้อมูล และแปลงสัญญาณด้วยโปรแกรมแล็บวิว.....	35
3.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา (sec) กับอุณหภูมิ (K) ของข้อมูล 12 mA ที่ T_1	36
3.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา (sec) กับอุณหภูมิ (K) ของข้อมูล 12 mA ที่ T_2	37
3.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา (sec) กับอุณหภูมิ (K) ของข้อมูล 12 mA ที่ T_3	37
3.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา (sec) กับอุณหภูมิ (K) ของข้อมูล 12 mA ที่ T_4	37
3.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา (sec) กับอุณหภูมิ (K) ของข้อมูล 12 mA ที่ T_5	38
3.9 การแบ่งช่วงในการจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ ช่วงเอกซีโพเนนเชียล.....	38
3.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (K) ข้อมูลที่เก็บจาก T_1 กับ การออกแบบโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่ T_1	42
3.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (K) ข้อมูลที่เก็บจาก T_2 กับ การออกแบบโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่ T_2	42
3.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (K) ข้อมูลที่เก็บจาก T_3 กับ การออกแบบโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่ T_3	43
3.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (K) ข้อมูลที่เก็บจาก T_4 กับ การออกแบบโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่ T_4	43
3.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (K) ข้อมูลที่เก็บจาก T_5 กับ การออกแบบโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่ T_5	44
3.15 การทำทรานเฟอร์ฟังก์ชัน.....	45

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.16 ทราจเฟอ์ฟง์กัซนของ T_d	47
3.17 ผลตอบสนองของ T_d	47
3.18 การแบ่งช่วงในการจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ ช่วงเส้นตรง.....	48
3.19 ทราจเฟอ์ฟง์กัซนบล็อกของระบบที่มืความร้อนสะสม.....	49
3.20 ผลการตอบสนองทางเวลาของ T_d ที่มืความร้อนสะสม.....	50
3.21 คำสั่งควบคุมในโปรแกรมแล็บวิว.....	50
3.22 หน้าแสดงผลการควบคุมของโปรแกรมแล็บวิว.....	51
3.23 การหาโพล-ซีโร ในเม็ตแล็บ ที่ 12 mA.....	51
3.24 ค่าของโพลที่ 12 mA.....	52
3.25 ตำแหน่งของโพลเด่น ที่ 12 mA.....	52
3.26 Close-loop transfer function ที่มีตัวควบคุมพีไอดี.....	43
3.27 Open loop test response ที่ 12 mA.....	55
3.28 ผลตอบสนองของ Open loop test ที่ 12 mA.....	55
3.29 การใช้โปรแกรมเมเบิ้ล ในการคำนวณหาค่าพีไอดี.....	56
4.1 ผลการตอบสนองในการใช้ค่าพีไอดี ในตอนแรกเริ่มที่ 306 K.....	59
4.2 ผลการควบคุมพีไอดี ที่ Set point 306 K ของชุดข้อมูลที่ 12 mA.....	60
4.3 ผลการควบคุมพีไอดี ที่ Set point 306 K ของชุดข้อมูลที่ 8 mA.....	61
4.4 ผลการควบคุมพีไอดี ที่ Set point 303 K ของชุดข้อมูลที่ 10 mA.....	61
4.5 ผลการควบคุมพีไอดี ที่ Set point 303 K ของชุดข้อมูลที่ 14 mA.....	62
4.6 ผลการควบคุมพีไอดี ที่ Set point 306 K ของชุดข้อมูลที่ 12 mA ขณะกำหนดค่า.....	62
$t_r = 30 \text{ sec}$ และ $t_s = 140 \text{ sec}$	

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปริญญาโท

ความเป็นมาของปริญญาโทนี้เนื่องจากการแลกเปลี่ยนความร้อนในทางอุตสาหกรรมนั้นมีการใช้งานเป็นอย่างมาก จึงทำให้ระบบการแลกเปลี่ยนความร้อนมีความสำคัญกับทางอุตสาหกรรมทางผู้จัดทำจึงได้ทำการจำลองระบบการแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อที่จะศึกษาการทำงานและปรับปรุงผลตอบสนองให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น แต่เนื่องจากการจำลองระบบนั้นได้เป็นการจำลองระบบแบบปิด กล่าวคือของไหลที่นำมาแลกเปลี่ยนความร้อนไม่มีการระบายออกออกไปนอกระบบ และมีการไหลวนนำกลับมาใช้ในระบบใหม่ จึงทำให้เกิดค่าความร้อนสะสม ทางผู้จัดทำโครงการเลยได้ทำการศึกษาและออกแบบระบบการแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีความเหมาะสม เพื่อให้ได้ผลตอบสนองที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น

1.2 หลักการและเหตุผล

ศึกษาหลักการการออกแบบระบบควบคุมด้วยพีไอดี โดยใช้หลักการจำลองโมเดลทางคณิตศาสตร์ของระบบ และใช้โปรแกรมทางคณิตศาสตร์ในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ ทรานเฟอ์ฟังก์ชัน และค่าพีไอดี ของระบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีความร้อนสะสม โดยเลือกใช้วิธีการหาโพลเด่น เนื่องจากระบบที่ได้จากการทำ System identification มีอันดับสูง โดยการศึกษาการออกแบบระบบควบคุมด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์มีจุดประสงค์เพื่อนำไปแก้ไขและปรับปรุงผลตอบสนองของระบบ รวมถึงสามารถนำแนววิธีการคิดไปประยุกต์ใช้กับระบบอื่น ๆ

1.3 วัตถุประสงค์ของปริญญาโท

1. ออกแบบโมเดลทางคณิตศาสตร์ของระบบการแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีความร้อนสะสม
2. ออกแบบตัวควบคุมพีไอดีที่เหมาะสม สำหรับระบบการแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีความร้อนสะสม
3. ปรับปรุง และแก้ไขตัวควบคุมพีไอดี ของระบบการแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีความร้อนสะสม ให้มีผลตอบสนองที่ดีและมีประสิทธิภาพมากขึ้น

1.4 เป้าหมายและขอบเขตของปริญญาโท

1. ศึกษาทฤษฎีและหลักการทำงานของระบบแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีความร้อนสะสม
2. ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการจำลองระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ศึกษาโปรแกรมแม็ตแล็บ และแล็บVIEW
4. ศึกษาการระบุอัตลักษณ์ของระบบ (System identification)
5. ศึกษาหลักการควบคุมระบบด้วยพีไอดี เพื่อควบคุมระบบการแลกเปลี่ยนความร้อนให้มีประสิทธิภาพ

1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

1. ศึกษาทฤษฎีและหลักการการทำงานของระบบแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีความร้อนสะสม
2. ศึกษาโปรแกรมแม็ตแล็บ และแล็บVIEW
3. ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และออกแบบสมการที่ใช้ในการจำลองระบบ
4. จำลองการทำงานในโปรแกรมแม็ตแล็บ โดยการสมมุติสมการ
5. เก็บข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตจากระบบปฏิบัติการจริง โดยใช้โปรแกรมแล็บVIEW
6. นำสมการที่ได้จากการจำลองระบบและในระบบปฏิบัติการจริงมาเปรียบปรับแต่งสมการด้วยพีไอดี เพื่อให้ระบบปฏิบัติการจริงมีผลตอบสนองที่มีประสิทธิภาพ

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้รับความรู้เกี่ยวกับระบบการแลกเปลี่ยนความร้อน
2. ได้รับความรู้เกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
3. ได้รับความรู้เกี่ยวกับการระบุอัตลักษณ์ของระบบ
4. สามารถใช้แม็ตแล็บ และแล็บVIEW ในการหาค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมระบบ

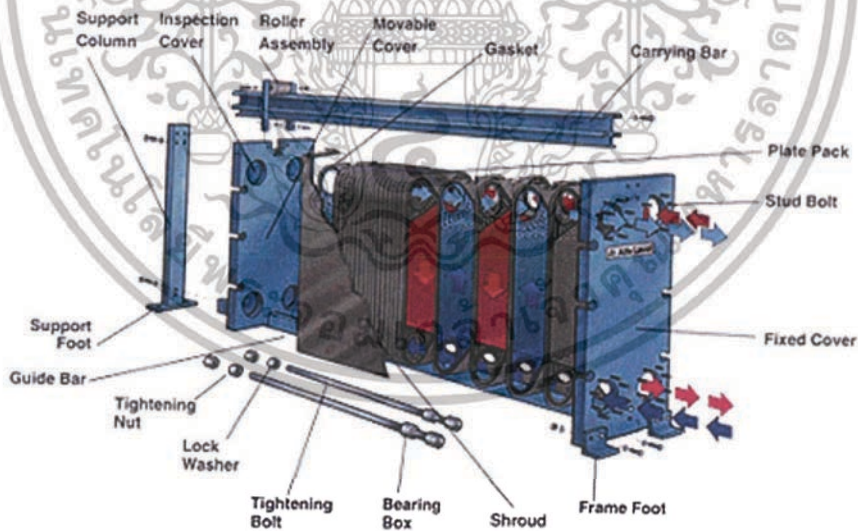
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง ของระบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

2.1 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) คือ เครื่องมือที่ใช้สำหรับถ่ายเทความร้อนจากของไหลชนิดหนึ่งไปยังของไหลอีกชนิดหนึ่ง โดยที่ของไหล 2 ชนิดนี้ไม่จำเป็นต้องผสมกัน ซึ่งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีการจำแนกหลายแบบ ซึ่งในปฏิญญาพนธ์นี้ได้ใช้เครื่องแลกเปลี่ยนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น [1] ประกอบด้วยแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนหลายแผ่น วางเรียงขนานต่อ แผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน เป็นแผ่นโลหะบางพื้นผิวเป็นคลื่น บนแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนจะมีปะเก็น (Gasket) อยู่รอบแผ่น เพื่อป้องกันการรั่วออกและบังคับทิศทางการไหลของของไหล ใช้เป็นตัวกลางที่กั้นระหว่างของไหลสองชนิด ที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันที่เข้ามาทำการแลกเปลี่ยนความร้อน ชุดแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนจะถูกประกอบอยู่ระหว่างเฟรมหน้า (Fixed cover) และเฟรมที่เคลื่อนย้ายได้ (Movable cover) มีท่อเข้า-ออกอยู่บนเฟรมหน้า โดยที่ชุดแผ่นและเฟรมยึดกันให้แน่นด้วยชุดสลักยึด แขนงอยู่บนคานแขวนบน และตั้งอยู่บนคานรับล่าง [2] ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ฮาร์ดแวร์ (Hardware)

2.2.1 ฮีตเตอร์ (Heater)

ฮีตเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม โดยมีชิ้นส่วนชนิดหนึ่งที่มีคุณสมบัติให้ความร้อน หลักการทำงานจะมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าตรงไปยังตัวนำที่เป็นลวด ทำให้ลวดเกิดความร้อน แหล่งจ่ายไฟแรงดัน 220 VAC โดยปริญาณิพนธ์นี้ได้มีการใช้ฮีตเตอร์แบบจุ่ม (Immersion heater) เป็นฮีตเตอร์สำหรับงานให้ความร้อนกับของเหลว [6] ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ฮีตเตอร์แบบจุ่ม (Immersion heater) [6]

2.2.2 โซลิดสเตตรีเลย์ (Solid state relay)

โซลิดสเตตรีเลย์ มีหลักการทำงานคือ เมื่อมีสัญญาณอินพุตของกระแสเข้ามาในช่วงการทำงานของอุปกรณ์คือ 4-20 mA โดยรีเลย์นั้นจะสั่งให้เอาต์พุตส่งสัญญาณ ON ออกไป และเมื่อไม่มีสัญญาณอินพุตเข้ามาหรือมีสัญญาณเข้ามาน้อยกว่า 4 mA รีเลย์จะทำการหยุดส่งเอาต์พุตออกไปซึ่งภายในตัวรีเลย์นั้นจะประกอบไปด้วยเซมิคอนดักเตอร์ (Semiconductor) ทำให้ไม่มีชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่เพื่อลดเสียงรบกวนที่เกิดขึ้น และเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานระยะยาว ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โซลิดสเตตรีเลย์ (Solid state relay)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.5 อุปกรณ์วัดอัตราการไหล (Flow meter)

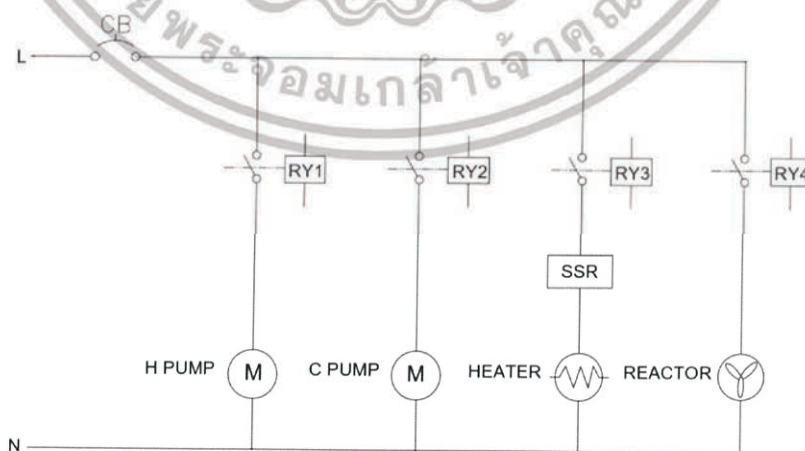
อุปกรณ์วัดอัตราการไหลชนิด Turbine โดยอาศัยหลักการของ Hall effect sensor เกิดจากการตัดกันของสนามแม่เหล็กระหว่างที่ปลายใบพัดและอุปกรณ์ Hall effect sensor ซึ่งจะมีเอาต์พุตเป็นพัลส์ของแรงดันไฟฟ้า [8] ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 อุปกรณ์วัดอัตราการไหล (รุ่น FS300A)

2.2.6 คอนแทครีเลย์ (Contact relay)

อุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานแม่เหล็ก ใช้ในการดึงดูดหน้าสัมผัสของคอนแทคให้เปลี่ยนสภาวะ โดยการป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดให้เกิดการเหนี่ยวนำ เพื่อทำการปิดหรือเปิดหน้าสัมผัสคล้ายกับสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการควบคุมวงจรต่าง ๆ ได้ ดังรูปที่ 2.7 ประกอบไปด้วยส่วนควบคุมของ Hot pump, Cool pump, Radiator และ Heater



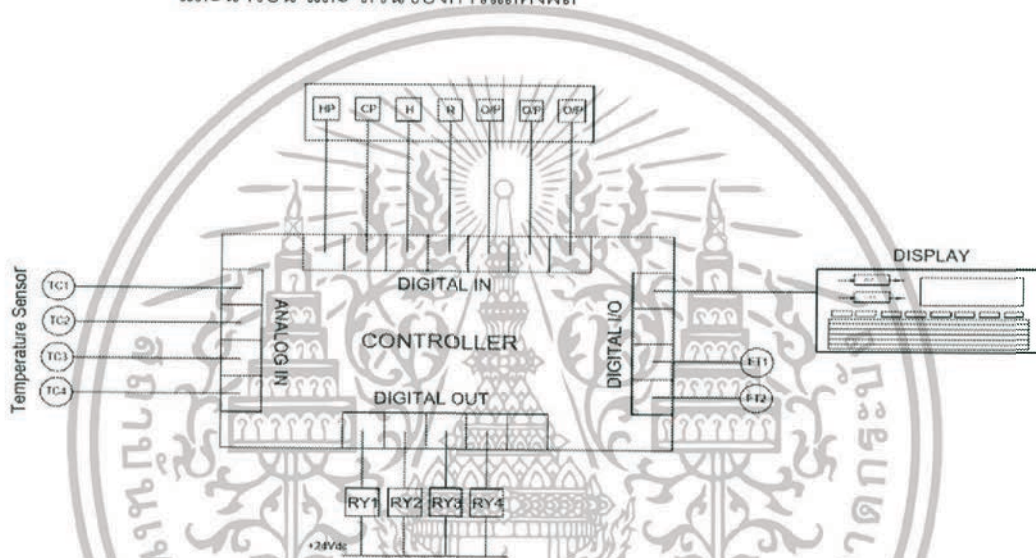
รูปที่ 2.7 การต่อโหลดผ่าน Relay

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.7 ตัวควบคุม (Controller)

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงส่วนควบคุมซึ่งใช้การควบคุมผ่านคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรมแล็บวิว ประกอบไปด้วยด้านอินพุต-ด้านเอาต์พุต และส่วนแสดงผล แสดงดังรูปที่ 2.8

- 1) อนุาล็อกอินพุต เป็นการรับข้อมูลจากอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ TC1, TC2, TC3 และ TC4
- 2) ดิจิตอลอินพุต เป็นการรับสัญญาณอินพุตจากสวิตช์ใช้ในการเปิดหรือปิดอุปกรณ์ Switch heater pump, Switch cool pump, Switch heater และ Switch radiator รวมถึงการรับสัญญาณจากอุปกรณ์วัดอัตราการไหล FT1 และ FT2
- 3) ดิจิตอลเอาต์พุต ใช้สำหรับส่งสัญญาณไปควบคุมรีเลย์ สำหรับควบคุมปั๊มในน้ำเย็น และน้ำร้อน และ ส่วนของการแสดงผล



รูปที่ 2.8 การเชื่อมต่อ Input/output เข้าตัว Controller

- เมื่อ
- HP : Switch heater pump
 - CP : Switch cool pump
 - H : Switch heater
 - R : Switch radiator
 - RY : Contact relay
 - TC : Temperature sensor
 - FT : Flow sensor

2.2.8 เครื่องจัดเก็บข้อมูล และแปลงสัญญาณ DAQ (Data acquisition)

เครื่องจัดเก็บข้อมูล และแปลงสัญญาณ มีหน้าที่ในการเก็บสัญญาณทางกายภาพ เช่น อุณหภูมิ อัตราการไหล ความดันอากาศ เป็นต้น และแปลงเข้าสู่คอมพิวเตอร์เป็นรูปแบบในลักษณะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

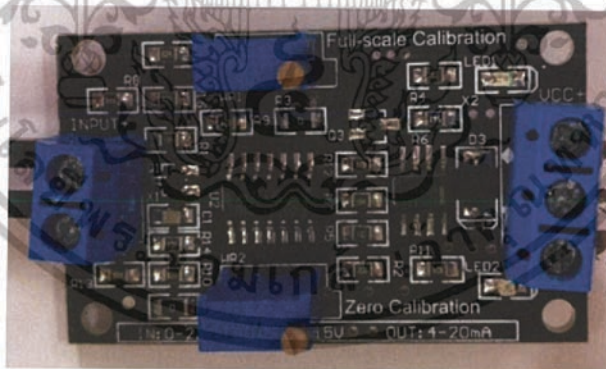
สัญญาณทางไฟฟ้ารวมถึงใช้ในการควบคุมผ่านโปรแกรมแล็บวิว ซึ่งหน้าที่ของบอร์ดเครื่องเก็บข้อมูล และแปลงสัญญาณจะเป็นการอ่านค่า และการสร้างสัญญาณอนาล็อกหรือดิจิทัลเพื่อเชื่อมต่อกับ อุปกรณ์ทรานสดิวเซอร์ ซึ่งในปริญญานิพนธ์นี้ใช้ DAQ ในการรับสัญญาณจากอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ TC1, TC2, TC3 และ TC4 ในรูปของสัญญาณอนาล็อก เข้ามาเพื่อจัดเก็บเป็นข้อมูลสำหรับการใช้ในการระบุอัตลักษณ์ของระบบ และ มีหน้าที่สำหรับเป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์กับแพลน ใช้สำหรับการควบคุมระบบ [9] ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 เครื่องจัดเก็บข้อมูลและแปลงสัญญาณ DAQ (Data acquisition) [10]

2.2.9 โมดูลแปลงแรงดันไฟฟ้าให้เป็นกระแส (Voltage to current module)

ใช้สำหรับแปลงอินพุต คือ 0-5 V เป็นเอาต์พุต คือกระแสขนาด 4-20 mA เพื่อนำสัญญาณที่ได้ไปใช้ควบคุมอุปกรณ์ทางไฟฟ้าต่อไป เช่น Solid state relay



รูปที่ 2.10 โมดูลแปลงแรงดันไฟฟ้าให้เป็นกระแส

2.2.10 อุปกรณ์อื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องภายในระบบ

มีการใช้อุปกรณ์อื่น ๆ ภายในระบบที่เกี่ยวข้อง คือปั๊ม ปั๊มน้ำเย็นจากถังเข้าสู่ระบบมีขนาดกำลัง 90 Watt ใช้แหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ 220 VAC/50 Hz ปริมาณการไหลสูงสุด 2000 L/H และปั๊มน้ำร้อนจากถังเข้าสู่ระบบ ใช้แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงขนาด 12-24 VDC ปริมาณการไหลสูงสุด 700 L/H

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ซอฟต์แวร์ (Software)

2.3.1 แม็ตแล็บ (MATLAB)

เป็นภาษาคอมพิวเตอร์ระดับสูงที่ใช้สำหรับคำนวณเชิงตัวเลข (Numerical computing) แสดงผลกราฟฟิก และเขียนแอปพลิเคชัน แม็ตแล็บประกอบด้วยภาษาคอมพิวเตอร์ ฟังก์ชันสำเร็จรูป และฟังก์ชันพื้นฐานจำนวนมาก สามารถนำแม็ตแล็บไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย เช่น การประมวลผลสัญญาณ (Signal processing) การประมวลผลภาพและวิดีโอ (Image และ Video processing) ระบบควบคุม (Control system) การวัดและควบคุม (Instruments และ Control) สัญลักษณ์โปรแกรมเป็นดังรูปที่ 2.11



2.3.2 เมเปิ้ล (Maple)

เป็นโปรแกรมที่ใช้เพื่อช่วยในการแก้ปัญหาคณิตศาสตร์ มีความสามารถในการคำนวณข้อมูลทางคณิตศาสตร์ และแสดงผลในรูปแบบจำนวน ค่าประมาณหรือข้อความทางคณิตศาสตร์ที่มีสัญลักษณ์หรือตัวแปร สามารถแสดงกราฟ และมียังสามารถสร้างฟังก์ชันต่าง ๆ ได้ รวมถึงมีฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ที่เพียงพอต่อการใช้งาน สัญลักษณ์โปรแกรมเป็นดังรูปที่ 2.12



2.3.3 แล็บวิว (LabVIEW)

เป็นโปรแกรมที่ใช้หลักการเขียนโปรแกรมโดย Graphic โดยจะใช้ตัว Module เป็น Function และมีการสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง Module ด้วยการ Wiring สายเหมือนการต่อวงจร ซึ่งทำให้การเขียนโปรแกรมสามารถทำได้รวดเร็ว และแล็บวิว ยังสามารถต่อกับ Hardware ได้อย่างหลากหลาย เช่น DAQ (Data acquisition card) และมีการประยุกต์ใช้งานที่หลากหลาย สัญลักษณ์โปรแกรมเป็นดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 โปรแกรมแล็บวิว [10]

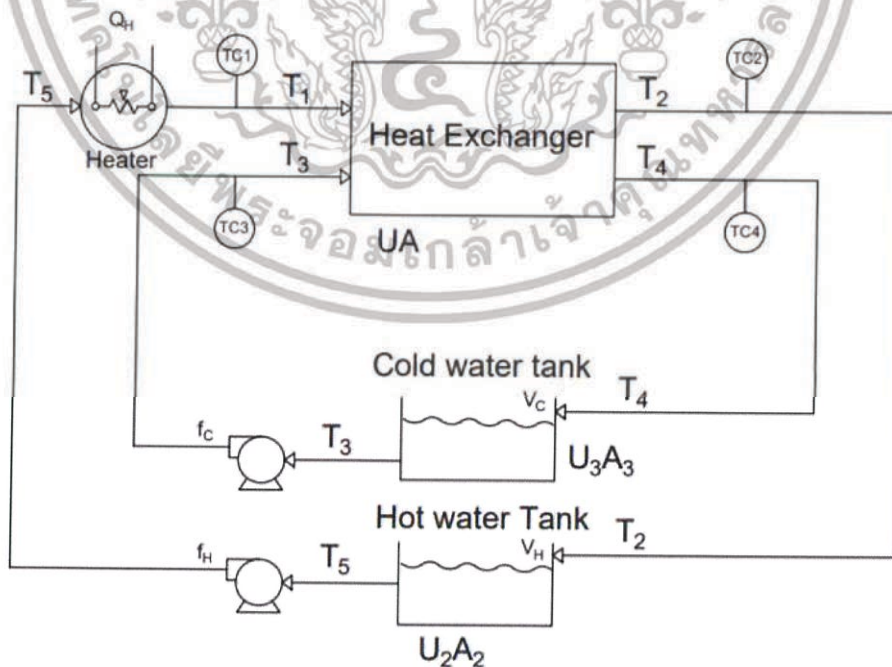
2.4 สมการทางคณิตศาสตร์ของระบบแลกเปลี่ยนความร้อน [14]

ในการศึกษาระบบการแลกเปลี่ยนความร้อน เราจะทำการพิจารณาสมการของระบบโดยใช้หลักการการไหลของพลังงาน โดยอาศัยหลักการของสมการที่ (2.1)

$$Q_{different} = Q_{input} - Q_{output} \pm Q_{accumulate} \tag{2.1}$$

- เมื่อ $Q_{different}$ = Rate of different of energy (W)
- Q_{input} = Rate of energy input (W)
- Q_{output} = Rate of energy output (W)
- $Q_{accumulate}$ = Rate of accumulate (W)

ซึ่งภาพรวมของกระบวนการการแลกเปลี่ยนความร้อนจะแสดงได้ดัง รูปที่ 2.14

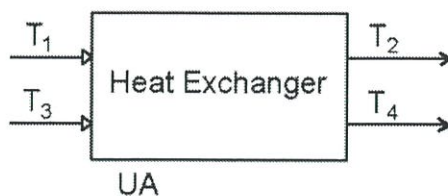


รูปที่ 2.14 แผนภาพจำลองของระบบแลกเปลี่ยนความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ	TC1	=	อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (รุ่น LM35) [7] วัดอุณหภูมิ T_1
	TC2	=	อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (รุ่น LM35) [7] วัดอุณหภูมิ T_2
	TC3	=	อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (รุ่น LM35) [7] วัดอุณหภูมิ T_3
	TC4	=	อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (รุ่น LM35) [7] วัดอุณหภูมิ T_4
	T_1	=	อุณหภูมิของของเหลวร้อนที่ทางเข้า (K)
	T_2	=	อุณหภูมิของของเหลวร้อนที่ทางออก (K)
	T_3	=	อุณหภูมิของของเหลวเย็นที่ทางเข้า (K)
	T_4	=	อุณหภูมิของของเหลวเย็นที่ทางออก (K)
	T_5	=	อุณหภูมิของของเหลวร้อนที่ Heater (K)
	ρ	=	ความหนาแน่นของน้ำ (Kg/m ³)
	c_p	=	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (J/kg-K)
	V_h	=	ปริมาตรของของเหลวร้อน (m ³)
	V_c	=	ปริมาตรของของเหลวเย็น (m ³)
	f_h	=	อัตราการไหลของของเหลวร้อน (Kg/s)
	f_c	=	อัตราการไหลของของเหลวเย็น (Kg/s)
	U	=	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (W/K-m ²)
	U_2	=	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของสแตนเลส (W/K-m ²)
	U_3	=	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของเครื่องระบายความร้อน (W/K-m ²)
	A	=	พื้นที่ผิวที่มีการส่งผ่านความร้อนและของสแตนเลสที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (m ²)
	A_2	=	พื้นที่ผิวที่มีการส่งผ่านความร้อนของสแตนเลส (m ²)
	A_3	=	พื้นที่ผิวที่มีการส่งผ่านความร้อนของเครื่องระบายความร้อน (m ²)

โดยจะแยกพิจารณาเป็นแต่ละส่วนประกอบด้วยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ฮีตเตอร์ (Heater) ถึงเก็บน้ำร้อน (Hot element) ถึงเก็บน้ำเย็น (Cool element) ซึ่งจะแสดงดังสมการที่ (2.2) ถึงสมการที่ (2.6)



รูปที่ 2.15 Element of heat exchanger

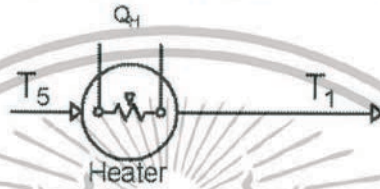
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.15 ภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือส่วนที่ 1 เป็นน้ำร้อน T_1 และ T_2 ส่วนที่ 2 เป็นน้ำเย็น T_3 และ T_4 จึงแบ่งออกเป็น Hot element ดังสมการที่ (2.2)

$$\rho V_h c_p \frac{dT_2}{dt}(t) = \rho f_h c_p T_1(t) - \rho f_h c_p T_2(t) - UA[T_2(t) - T_4(t)] \quad (2.2)$$

ส่วนที่ 2 คือ Cool element ดังสมการที่ (2.3)

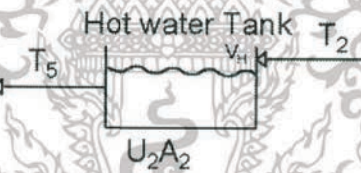
$$\rho V_c c_p \frac{dT_4}{dt}(t) = \rho f_c c_p T_3(t) - \rho f_c c_p T_4(t) + UA[T_2(t) - T_4(t)] \quad (2.3)$$



รูปที่ 2.16 Element of heater

จากรูปที่ 2.16 พิจารณาที่ Heater ดังสมการที่ (2.4)

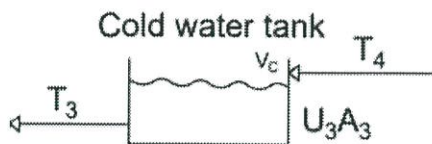
$$\rho V_h c_p \frac{dT_1}{dt}(t) = \rho f_h c_p T_5(t) - \rho f_h c_p T_1(t) + Q_H \quad (2.4)$$



รูปที่ 2.17 Element of hot storage

จากรูปที่ 2.17 และ 2.18 พิจารณาที่ Hot storage และ Cool storage ที่มีการติดตั้งเครื่องระบายความร้อน ดังสมการที่ (2.5) และ สมการที่ (2.6) ตามลำดับ

$$\rho V_h c_p \frac{dT_5}{dt}(t) = \rho f_h c_p T_2(t) - \rho f_h c_p T_5(t) - U_2 A_2 [T_5(t) - T_{Air}(t)] \quad (2.5)$$



รูปที่ 2.18 Element of cool storage

$$\rho V_c c_p \frac{dT_3}{dt}(t) = \rho f_c c_p T_4(t) - \rho f_c c_p T_3(t) - U_3 A_3 [T_4(t) - T_3(t)] \quad (2.6)$$

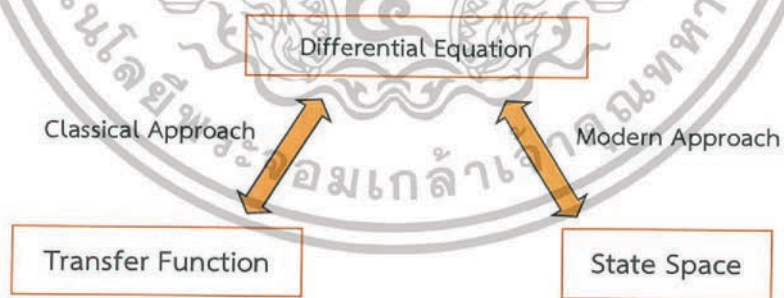
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 วิธีระบุอัตลักษณ์ของระบบ (System identification)

การทำนายเอกลักษณ์ของระบบ (System identification) เป็นวิธีการทำนายเอกลักษณ์ หรือการสร้างรูปสมการของสมการทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model) ให้กับระบบทางกล (Plant) ที่นำมาใช้ทดลอง โดยอาศัยข้อมูลอินพุต-เอาต์พุตที่ได้จากการกระตุ้นระบบ การทำระบุอัตลักษณ์ หรือการสร้างรูปสมการของสมการทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) โดยใช้เทคนิควิธีแบบตัวสังเกตการณ์คาลมาน (Observer Kalman Identification : OKID) นั้นจะใช้ได้ก็แต่กับระบบที่มีเสถียรภาพ กล่าวคือ เป็นระบบที่ทำงานได้ โดยไม่ต้องใช้ ตัวควบคุม หรือระบบที่เป็นระบบเปิด (Open Loop) เท่านั้น แต่ในงานวิจัยนี้เป็นการพัฒนารูปแบบการทำนายเอกลักษณ์ หรือการเจาะจงระบบขึ้นมา เพื่อที่จะให้สามารถใช้ได้กับระบบที่เป็น วงรอบปิด (Closed-Loop Identification : CLID) คือมีตัวควบคุม ดังนั้นตัวระบบที่จะถูกทดลอง (Plant) จะมีเสถียรภาพหรือไม่ก็ได้ สามารถจะนำเอาวิธีทำนายอัตลักษณ์ หรือ การเจาะจงระบบแบบวงรอบปิดไป ทำนายเอกลักษณ์ หรือเจาะจงระบบได้ทั้งสิ้น

2.6 แบบจำลองปริภูมิสถานะ (State space)

ระบบพลวัตส่วนใหญ่ก็มีพฤติกรรมที่สามารถใช้สมการอนุพันธ์อันดับใด ๆ มาอธิบายได้ ในขณะเดียวกันสมการเชิงอนุพันธ์อันดับใด ๆ ก็สามารถลดอันดับให้เหลือเพียงสมการเชิงอนุพันธ์อันดับหนึ่งได้ ซึ่งจะทำให้การวิเคราะห์บนโดเมนเวลาและได้มีการนำแบบจำลองปริภูมิสถานะ (State space) มาใช้ซึ่งจะอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์อันดับหนึ่ง และแตกต่างจากระบบควบคุมแบบดั้งเดิมที่นิยมวิเคราะห์พฤติกรรมของระบบบนโดเมนความถี่ ขั้นตอนจะเป็นดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 แบบจำลองปริภูมิสถานะ (State space)

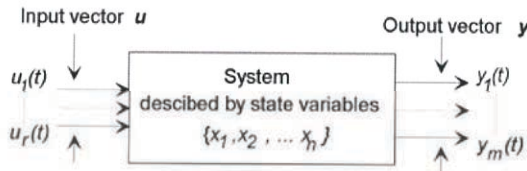
กระบวนการดั้งเดิม (Classical approach)

ใช้ได้แต่เฉพาะระบบเชิงเส้นที่ไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา (Linear time-invariant system) หรือระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นแต่มีการทำให้เป็นเชิงเส้นแล้วเท่านั้น และไม่สามารถวิเคราะห์ระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น และระบบที่มีเงื่อนไขเริ่มต้นที่ไม่ได้เริ่มจากศูนย์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

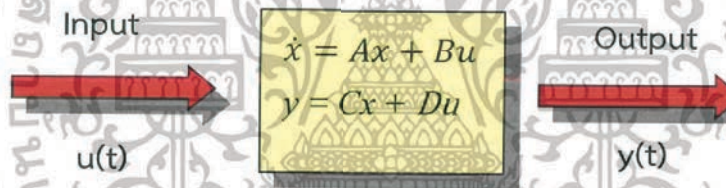
กระบวนการแบบใหม่ (Modern approach)

เป็นกระบวนการที่สามารถประยุกต์ใช้ได้กับการสร้าง วิเคราะห์ และออกแบบระบบโดยทั่วไป ได้ โดยไม่คำนึงว่าระบบจะเป็น Linear time-invariant อีกทั้งยังสามารถกำหนด เงื่อนไขตั้งต้น ให้กับระบบได้อีกด้วย สามารถใช้งานได้กับระบบหลายอินพุต และหลายเอาต์พุต [17]



รูปที่ 2.20 อินพุตและเอาต์พุตของระบบ

ในระบบที่มีจำนวนของตัวแปรสถานะ (State variables) จำนวน n ตัว จำนวนดังกล่าวขึ้นอยู่กับค่าตัวแปรอิสระของระบบ และค่าของ State variables ที่เวลา t ใด ๆ และเวลาที่เปลี่ยนแปลงไปของ State variables จะเป็นตัวกำหนดอัตราการเปลี่ยนแปลงของระบบ [18]



รูปที่ 2.21 State space representation

เมื่อ State equation: $\dot{x} = Ax + Bu$ (2.12)

Output equation: $y = Cx + Du$ (2.13)

- และ
- x = State vector
 - u = Input
 - y = Output
 - A = System matrix
 - B = Input matrix
 - C = Output matrix
 - D = Feedforward matrix

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนด State vector ใน Differential equation ซึ่งจำนวน State vector จะเท่ากับ Order ของจำนวน Differential equation

$$\frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_0 u \quad (2.14)$$

เมื่อ

$$x_1 = y$$

$$x_2 = \frac{dy}{dt} = \dot{x}_1$$

$$x_3 = \frac{d^2 y}{dt^2} = \ddot{x}_1$$

$$\vdots$$

$$x_n = \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} = x_{n-1}$$

$$\dot{x}_n = -a_0 x_1 - a_1 x_2 - \dots - a_{n-1} x_n + b_0 u \quad (2.15)$$

จัดให้อยู่ในรูปของ State equation และ Output equation ได้ดังสมการที่ (2.16) และ สมการที่ (2.17)

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \vdots \\ \dot{x}_{n-1} \\ \dot{x}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ -a_0 & -a_1 & -a_2 & \dots & -a_{n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_{n-1} \\ x_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ b_0 \end{bmatrix} u \quad (2.16)$$

$$y = [1 \ 0 \ \dots \ 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_{n-1} \\ x_n \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

การแปลงรูปจาก State space เป็นทรานเฟอร์ฟังก์ชัน จากสมการที่ (2.16) และ (2.17) ใช้การแปลงลาปลาซได้ดังนี้

$$sX(s) = AX(s) + BU(s) \quad (2.18)$$

$$Y(s) = CX(s) + DU(s) \quad (2.19)$$

จัดรูปของสมการที่ (2.18) และ (2.19) ให้อยู่ในรูป ดังสมการที่ (2.20) และสมการที่ (2.21)

$$X(s) = (sI - A)^{-1}BU(s) \quad (2.20)$$

$$Y(s) = [C(sI - A)^{-1}B + D]U(s) \quad (2.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 การควบคุม (Controller)

การวิเคราะห์ และออกแบบระบบควบคุมมีจุดมุ่งหมายเพื่อให้กระบวนการที่ต้องการควบคุม [19,20] มีลักษณะ 3 อย่างตามข้อกำหนดประกอบด้วย

- 1) การตอบสนองชั่วคราว (Transient response) เป็นการตอบสนองของเอาต์พุตเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอินพุต โดยเป็นช่วงสถานะของการเปลี่ยนแปลงก่อนเข้าสู่สภาวะคงที่
- 2) การตอบสนองในสถานะอยู่ตัว (Steady state response) เป็นสภาวะหลังจาก Transient response เป็นสภาวะที่มีผลการตอบสนองเกือบได้ตามตามความต้องการ สำหรับระบบที่มีความเสถียร
- 3) เสถียรภาพ (Stability) ระบบที่เสถียรคือระบบที่ให้เอาต์พุตที่มีค่าจำกัดเมื่อป้อนอินพุตที่มีค่าจำกัดให้กับระบบ

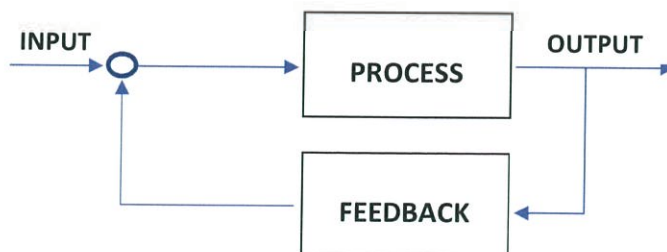
ในระบบควบคุม (Control system) จะสามารถแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ

- 1) ระบบควบคุมแบบเปิด (Open loop control system) เป็นระบบควบคุมที่ไม่มีการนำเอาต์พุตกลับมาเปรียบเทียบกับอินพุตจึงง่ายต่อการสร้าง และค่าเอาต์พุตจะไม่มีผลต่อการควบคุมของการของระบบดังแสดงในรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 แผนภาพระบบเปิด (Open-loop control system)

- 2) ระบบควบคุมแบบปิด (Close loop control system) เป็นระบบควบคุมที่มีการป้อนกลับ (Feedback) โดยนำเอาเอาต์พุตมาเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุต ความแตกต่างที่เกิดขึ้นจะถือเป็นค่าความผิดพลาด เพื่อนำเอาสัญญาณป้อนกลับเข้าสู่ระบบ แล้วตัวควบคุมจะนำไปสร้างสัญญาณควบคุมใหม่ เพื่อลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นกับระบบดังแสดงในรูปที่ 2.23

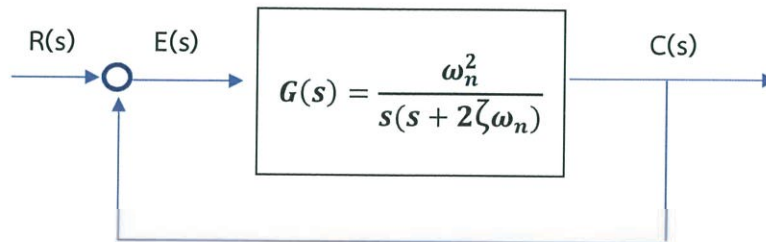


รูปที่ 2.23 แผนภาพระบบปิด (Close loop control system)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.1 ผลตอบสนองต่อเวลาของระบบอันดับสอง [21]

พิจารณาได้จาก Close-loop transfer function ของรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 Close-Loop transfer function ในระบบอันดับสอง

เมื่อ
$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2.22)$$

$R(s)$ คือ อินพุตของ Close loop control system

$C(s)$ คือ เอาต์พุตของ Close loop control system

นั่นคือ พฤติกรรมทางพลศาสตร์ของระบบอันดับสอง ซึ่งสามารถอธิบายได้ในเทอมของพารามิเตอร์ 2 ตัว คือ ζ และ ω_n

ถ้า

$\zeta = 0$ Undamped : Close loop poles จะเป็น Complex conjugate อยู่บนแกนจินตภาพ เอาต์พุตของระบบจะ oscillate ต่อเนื่องกันไป

$0 < \zeta < 1$ Underdamped : Close loop poles จะเป็น Complex conjugate อยู่ทางครึ่งซ้ายของระนาบ S ซึ่งมีผลตอบสนองชั่วคราวของระบบจะเกิดการ Oscillate

$\zeta = 1$ Critically damped : Close loop poles เป็นรากซ้ำอยู่บนแกน x ของระนาบ S

$\zeta > 1$ Overdamped : Close loop poles จะเป็นรากไม่ซ้ำอยู่บนแกน x ของระนาบ S

การคำนวณหาผลตอบสนองของ “ระบบอันดับสอง” ต่ออินพุตที่เป็น Unit step พิจารณาเป็น 3 กรณี

1) กรณี Underdamped ($0 < \zeta < 1$) ในกรณีนี้ Closed-loop transfer function เขียนได้ดังนี้

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{(s + \zeta\omega_n + j\omega_d)(s + \zeta\omega_n - j\omega_d)} \quad (2.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$ และเรียกว่า Damped natural frequency สำหรับอินพุตที่เป็น Unit step

$$C(s) = \frac{\omega_n^2}{s(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)} \quad (2.24)$$

นำสมการที่ (2.24) มาแปลงลาปลาซผกผัน จะได้

$$c(t) = 1 - e^{-\zeta\omega_n t} \left(\cos\omega_d t + \frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin\omega_d t \right) \quad (2.25)$$

$$c(t) = \frac{1 - e^{-\zeta\omega_n t}}{\sqrt{1-\zeta^2}} \left(\sin\omega_d t + \tan^{-1} \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta} \right); t \geq 0 \quad (2.26)$$

จากสมการที่ (2.26) จะเห็นว่าความถี่ของการ Oscillate ชั่วโมงของระบบก็คือ ω_d และแปรค่าตามอัตราการหน่วง ζ

ค่าความคลาดเคลื่อนของระบบนี้คือ

$$e(t) = r(t) - c(t) \quad (2.27)$$

$$e(t) = e^{-\zeta\omega_n t} \left(\cos\omega_d t + \frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin\omega_d t \right); t \geq 0 \quad (2.28)$$

แสดงว่าค่าความคลาดเคลื่อนเป็นรูปการ Oscillate ที่มีการหน่วง ที่ $t = \infty$ นั้น ค่าความคลาดเคลื่อนจะมีค่าเป็น 0 ถ้า ζ มีค่าเท่ากับศูนย์ ผลตอบสนองของระบบจะเป็นแบบ Undamped คือการ Oscillate ต่อเนื่องไปเรื่อย ๆ ไม่สิ้นสุด

เอาต์พุต $c(t)$ ในกรณีนี้ $\zeta = 0$ หาได้จากสมการที่ (2.26) นั่นคือ

$$c(t) = 1 - \cos\omega_n t; t \geq 0 \quad (2.29)$$

ถ้า ζ มีค่าเท่ากับศูนย์ ω_n จะเป็นความถี่ของการ Oscillate ของระบบ

2) กรณี Critically damped ($\zeta = 1$)

กรณีนี้ Closed-loop pole จะมีค่าเท่ากัน สำหรับอินพุตที่เป็น Unit step เอาต์พุต คือ

$$C(s) = \frac{\omega_n^2}{s(s + \omega_n)^2} \quad (2.30)$$

และ
$$c(t) = 1 - e^{-\omega_n t} (1 + \omega_n t); t \geq 0 \quad (2.31)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.31) จะเห็นว่าผลตอบสนอง ของระบบอันดับสองต่ออินพุตที่เป็น Unit step ในกรณี $\zeta = 1$ นั้นไม่มีการ Oscillate

3) กรณี Overdamped ($\zeta > 1$)

ในกรณีนี้ Closed-loop pole ทั้งสองตัวจะเป็นค่าจริงที่ค่าลบและไม่เท่ากัน เอาต์พุต $C(s)$ เมื่ออินพุตเป็น Unit step ในกรณีนี้คือ

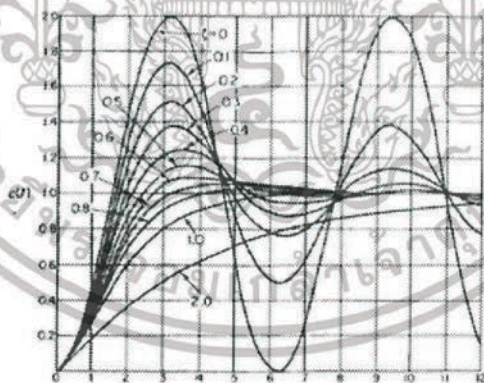
$$C(s) = \frac{\omega_n^2}{s(s+\zeta\omega_n+\omega_n\sqrt{\zeta^2-1})(s+\zeta\omega_n-\omega_n\sqrt{\zeta^2-1})} \quad (2.32)$$

โดยที่

$$c(t) = 1 + \frac{\omega_n}{2\sqrt{\zeta^2-1}} \left(\frac{e^{-s_1 t}}{s_1} - \frac{e^{-s_2 t}}{s_2} \right); t \geq 0 \quad (2.33)$$

นั่นคือ $s_1 = (\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_n$ และ $s_2 = (\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_n$ (2.34)

ผลตอบสนองของระบบอันดับสองต่ออินพุตที่เป็น Unit step ในกรณีนี้จะประกอบไปด้วยเทอม Exponential ที่มีกำลังเป็นลบสองเทอม และการลดลงของ Exponential อันหนึ่งต้องลดลงเร็วกว่าอีกอันหนึ่ง ดังนั้นเทอมของ Exponential ที่ลดค่าลงเร็ว หรือ Time constant ของเทอมที่มีค่าน้อยอาจจะตัดทิ้งได้ ค่าตอบโดยประมาณของสมการที่ (2.33) นั้นสามารถตัดเทอมที่มี s_1 ออกไปได้ และผลตอบสนองกรณีนี้คล้ายกับผลตอบสนองอันดับหนึ่งดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 กราฟแสดงผลตอบสนองของระบบอันดับสองต่ออินพุตที่เป็น Unit step สำหรับค่าต่าง ๆ ของ ζ ต่อ Normalized time ω_n

2.7.2 นิยามของการชี้เฉพาะของผลตอบสนองชั่วคราวแบบต่างๆ

การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบควบคุมนี้ ผลตอบสนองชั่วคราวของระบบต่ออินพุตที่เป็นขั้นบันไดหนึ่งหน่วย (Unit step) โดยพิจารณาดังต่อไปนี้

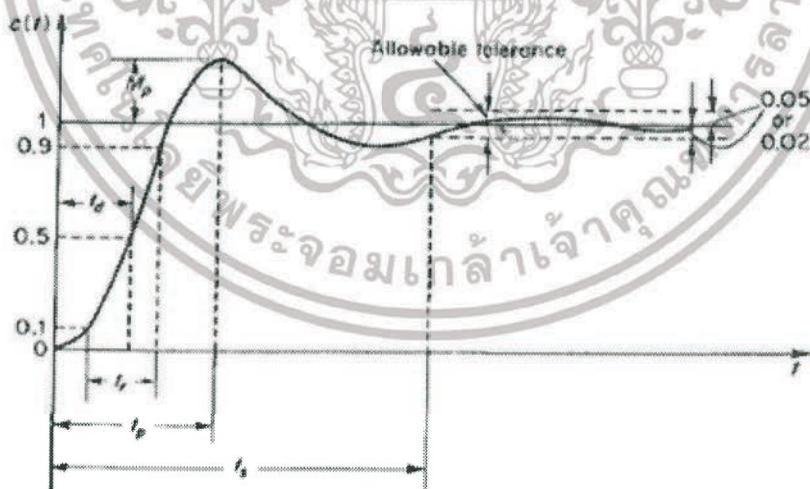
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรณำไปใช้

- 1) เวลาหน่วง (Delay time) t_d : เป็นช่วงเวลาที่ผลตอบสนองของระบบมีค่าเข้าสู่ 50% ของค่าที่ภาวะคงที่
- 2) เวลาขึ้น (Rise time) t_r : เป็นช่วงเวลาที่ผลตอบสนองของระบบมีค่าขึ้นจาก 0% ไปถึง 100% ของค่าที่ภาวะคงที่
- 3) เวลาสูงสุด (Peak time) t_p : เป็นค่าของเวลาที่ผลตอบสนองของระบบต่ออินพุตที่เป็น Unit step เกิด Overshoot สูงสุดเป็นครั้งแรก
- 4) โอเวอร์ชูตสูงสุด (Maximum overshoot) M_p : ในบางครั้งนิยมแสดงในเทอมของเปอร์เซ็นต์ (%) Overshoot เป็นค่าแตกต่างสูงสุดระหว่างอินพุตและเอาต์พุตของระบบ ถ้าผลตอบสนองของระบบ มีค่าที่ภาวะคงที่ไม่เท่ากับหนึ่งแล้วจะได้ว่า

$$\text{Maximum percent overshoot} = \frac{c(t_p) - c(\infty)}{c(\infty)} * 100\% \tag{2.35}$$

เมื่อ $c(t_p)$ คือ เอาต์พุตของระบบที่เวลา t_p
 $c(\infty)$ คือ เอาต์พุตของระบบที่เวลา ∞
 ค่าของ Maximum overshoot นี้จะแสดงถึงเสถียรภาพสัมพัทธ์ของระบบ

- 5) เวลาเข้าที่ (Settling time) t_s : เป็นช่วงเวลาที่ผลตอบสนองของระบบต่ออินพุตที่เป็น Unit step มีค่าเข้าสู่ช่วง 2% หรือ 5% ของค่าที่ภาวะคงที่และมีค่าอยู่ในช่วงนี้ตลอดโดยรูปที่ 2.26 จะกล่าวถึงรายละเอียด (Specification) ต่าง ๆ ของระบบ



รูปที่ 2.26 Specification ต่าง ๆ ของระบบ

ผลตอบสนองชั่วคราวของระบบอันดับสอง ต่อมาจะแสดงถึงการหา Rise time, Peak time, Maximum overshoot, Settling time และ Delay time ของระบบอันดับสองที่มี Closed-loop transfer function

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2.36)$$

1) Rise time t_r : เป็นช่วงเวลาที่ผลตอบสนองของระบบมีค่าขึ้นจาก 0% ไปถึง 100% ของค่าที่ภาวะคงที่

$$c(t) = 1 - e^{-\zeta\omega_n t} \left(\cos\omega_d t + \frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin\omega_d t \right) \quad (2.37)$$

โดยการแทนค่า t ด้วย t_r และให้ $C(t_r) = 1$

$$c(t_r) = 1 = 1 - e^{-\zeta\omega_n t_r} \left(\cos\omega_d t_r + \frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin\omega_d t_r \right) \quad (2.38)$$

เนื่องจาก $e^{-\zeta\omega_n t}$ มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ ดังนั้น

$$\cos\omega_d t_r + \frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin\omega_d t_r = 0 \quad (2.39)$$

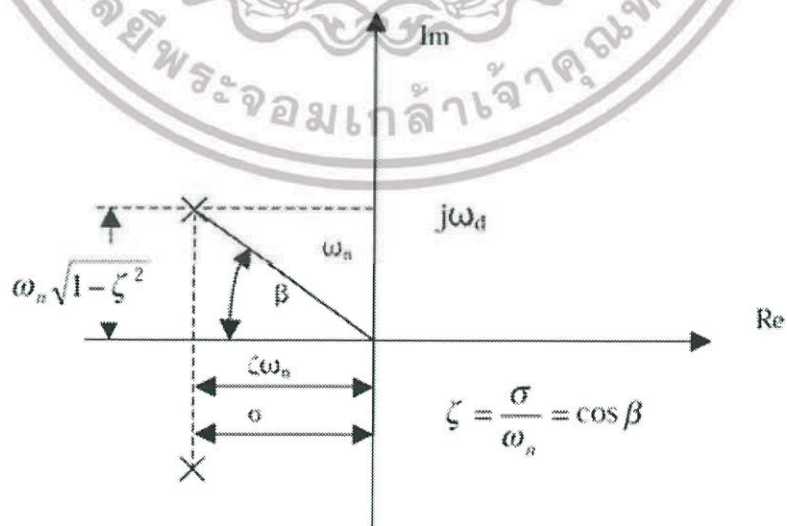
หรือ
$$\tan\omega_d t_r = -\frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta} = -\frac{\omega_d}{\sigma} \quad (2.40)$$

นั่นคือ
$$t_r = \frac{1}{\omega_d} \tan^{-1} \left(-\frac{\omega_d}{\sigma} \right) \quad (2.41)$$

$$t_r = \frac{1}{\omega_d} \tan^{-1} \left(-\frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta} \right) \quad (2.42)$$

$$t_r = \frac{\pi - \beta}{\omega_d} \quad (2.43)$$

โดยที่ค่าของ β แสดงได้ดังรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 การหาค่าของ β

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.27 $\cos\beta = \zeta$ (2.44)

2) Peak time t_p : ค่าของ Peak time สามารถหาได้โดยการนำเอาสมการ มาหาค่าอนุพันธ์ เทียบกับเวลาหนึ่งแล้วให้ค่าอนุพันธ์ที่หาได้มีค่าเท่ากับศูนย์ นั่นคือ

$$\frac{dc(t)}{dt} = (\sin\omega_d t) \frac{\omega_n}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n t} = 0 \quad (2.45)$$

ซึ่งจะได้ว่า

$$\sin\omega_n t = 0 \quad (2.46)$$

เมื่อ $\omega_d t = n\pi; n = 0,1,2,3, \dots$

$$t = \frac{n\pi}{\omega_d} = \frac{n\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}} \quad (2.47)$$

ค่าสูงสุดค่าแรกของผลตอบสนองของระบบต่ออินพุตที่เป็น Unit step เกิดขึ้น เมื่อ $n=1$ นั่นคือ

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_d} = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}} \quad (2.48)$$

3) Maximum overshoot M_p : Maximum overshoot เป็นค่าแตกต่างสูงสุดระหว่าง อินพุตและเอาต์พุตเกิดขึ้นที่ Peak time ดังนั้นจากสมการที่ (2.48) โดยแทนค่า $t = t_p = \pi/\omega_d$

จะได้ว่า

$$M_p = c(t_p) - 1 \quad (2.49)$$

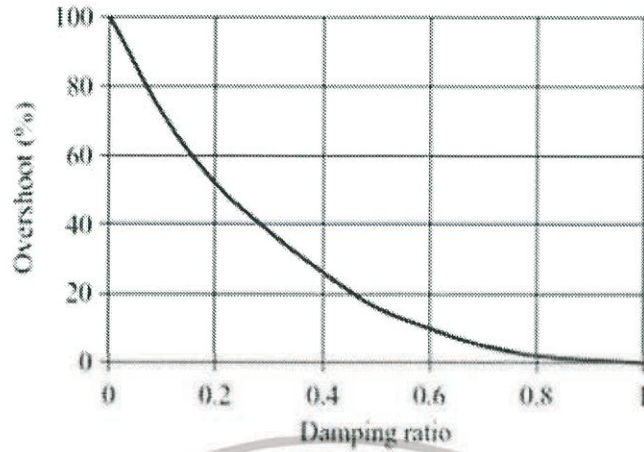
$$M_p = -e^{-\frac{\zeta\omega_n\pi}{\omega_d}} \left(\cos\pi + \frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin\pi \right) \quad (2.50)$$

$$M_p = e^{-\frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}\pi} \quad (2.51)$$

และ Maximum percent overshoot คือ

$$M_p = e^{-\frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}\pi} * 100\% \quad (2.52)$$

จะเห็นว่า Maximum overshoot ของระบบอันดับสองขึ้นอยู่กับอัตราการหน่วง ζ เท่านั้น ดังรูป 2.28

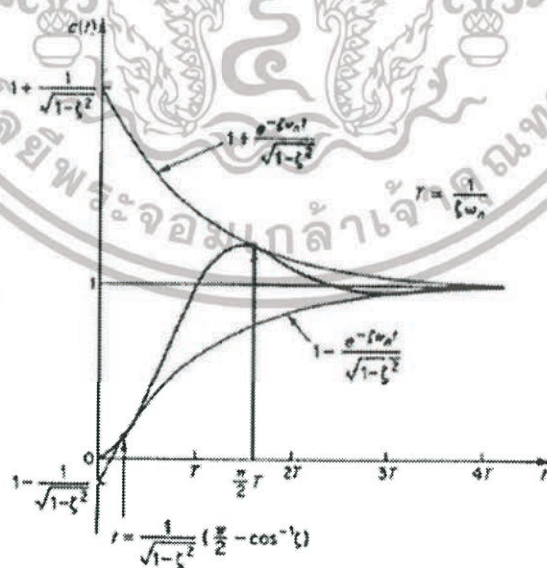


รูปที่ 2.28 ความสัมพันธ์ระหว่าง M_p และ ζ

4) Settling time t_s สำหรับกรณีของระบบอันดับสองแบบ Underdamped ผลตอบสนองชั่วครู่จะอยู่ในรูปของสมการที่ (2.53)

$$c(t) = \frac{1 - e^{-\zeta\omega_n t}}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \left(\sin\omega_d t + \tan^{-1} \frac{\sqrt{1 - \zeta^2}}{\zeta} \right); t \geq 0 \quad (2.53)$$

Curves ของ $\pm \frac{e^{-\zeta\omega_n t}}{\sqrt{1 - \zeta^2}}$ Curves นี้จะเป็น กรอบนอก (Envelope curve) ของผลตอบสนองชั่วครู่ต่ออินพุตที่เป็น Unit step ดังในรูป 2.29 และ Time constant มีค่าเท่ากับ $1/\zeta\omega_n$



รูปที่ 2.29 Curve ของผลตอบสนองชั่วครู่ต่ออินพุตที่เป็น Unit step

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Settling time t_s จะเป็นฟังก์ชันของอัตราการหน่วง ζ โดยที่ Settling time ที่มีค่าเข้าสู่ช่วง $\pm 2\%$ หรือ $\pm 5\%$ ของค่าที่ภาวะคงที่ นั้นสามารถคำนวณได้โดยใช้ Curve กรอบนอกด้านบนหรือล่างก็ได้

สำหรับกรณี $\pm 2\%$

$$c(t) = 1 + \frac{e^{-\zeta\omega_n t}}{\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (2.54)$$

โดยการแทน $t = t_s$ และให้ $c(t)$ มีค่า 1.02 ได้ว่า

$$c(t) = 1 + \frac{e^{-\zeta\omega_n t}}{\sqrt{1-\zeta^2}} = 1.02 \quad (2.55)$$

โดยที่

$$\omega_n t_s = -\frac{1}{\zeta} \ln(0.02\sqrt{1-\zeta^2}) \quad (2.56)$$

สำหรับ ζ ที่มีค่าน้อยมาก สมการที่ (2.56) สามารถเขียนใหม่ได้ว่า

$$\omega_n t_s \cong \frac{4}{\zeta} \quad (2.57)$$

หรือ

$$t_s \cong \frac{4}{\zeta\omega_n}; 0 < \zeta < 1 \quad (2.58)$$

สำหรับกรณี $\pm 5\%$

อาศัยวิธีการคำนวณเช่นเดียวกันกับกรณี $\pm 2\%$ จะได้ว่า

$$t_s \cong \frac{3}{\zeta\omega_n}; 0 < \zeta < 1 \quad (2.59)$$

5) Delay time t_d

การหาค่าที่แน่นอนของ Delay time นั้นจะแทนค่าของ $c(t)$ ในสมการที่ (2.37) ให้เท่ากับ 0.5 แล้วหาค่าของ t หรือการนำเอาค่าของ $\omega_n t_d$ ต่อค่าต่าง ๆ ของ ζ มาใช้จะสามารถจะประมาณ Curve นี้ได้ด้วยเส้นตรง นั่นคือ

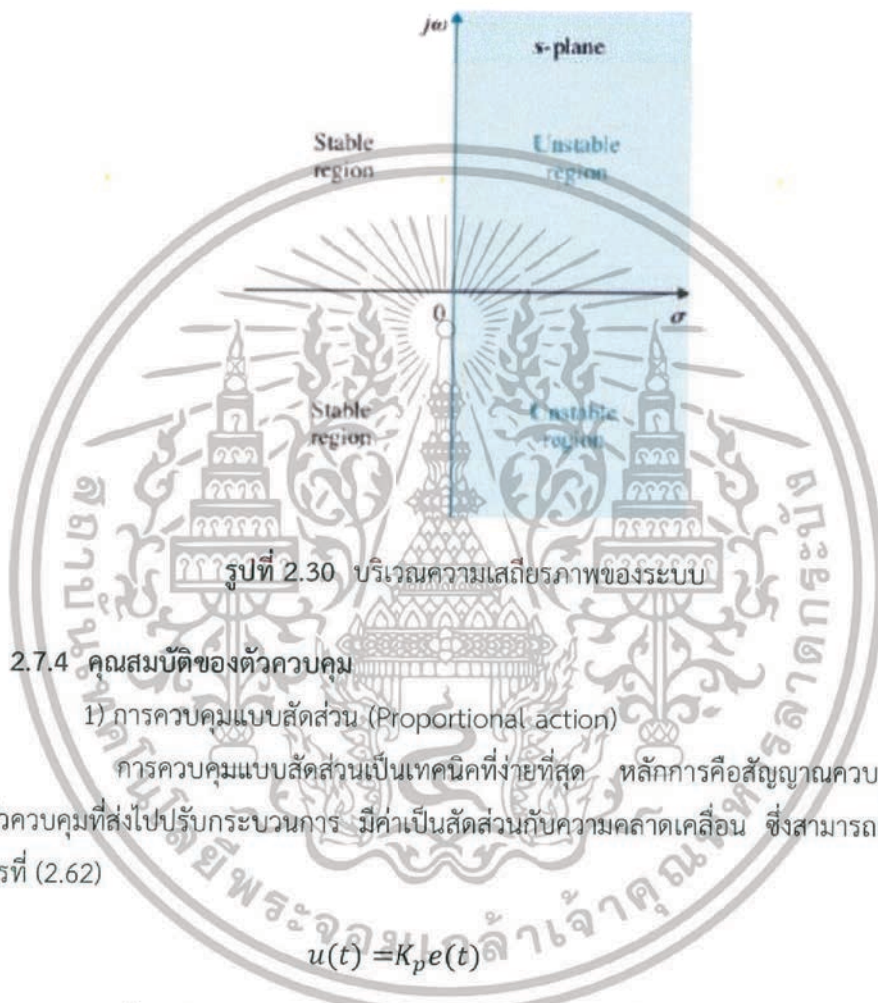
$$\omega_n t_d = 1 + 0.7\zeta \quad (2.60)$$

$$t_d = \frac{1+0.7\zeta}{\omega_n}; 0 < \zeta < 1 \quad (2.61)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบควบคุม

รูปที่ 2.30 จะแสดงบริเวณความเสถียรภาพของระบบ ถ้า s_i เป็นโพลของฟังก์ชัน G แล้ว G จะมีเสถียรภาพ ถ้าค่าจริง $Re(s_i) < 0$ สำหรับทุกค่าจินตภาพ (i) และเกือบจะเสถียรภาพถ้าค่าจริง $Re(s_i) \leq 0$ สำหรับทุกค่าจินตภาพ i และ ค่ารากของค่าจริง $Re(s_i) = 0$ และจะไม่มีเสถียรภาพ ถ้ามีค่าที่อยู่ตรงพื้นที่ที่ไม่เสถียรภาพ ดังรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.30 บริเวณความเสถียรภาพของระบบ

2.7.4 คุณสมบัติของตัวควบคุม

1) การควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional action)

การควบคุมแบบสัดส่วนเป็นเทคนิคที่ง่ายที่สุด หลักการคือสัญญาณควบคุม $u(t)$ จากตัวควบคุมที่ส่งไปปรับกระบวนการ มีค่าเป็นสัดส่วนกับความคลาดเคลื่อน ซึ่งสามารถเขียนได้ในสมการที่ (2.62)

$$u(t) = K_p e(t) \tag{2.62}$$

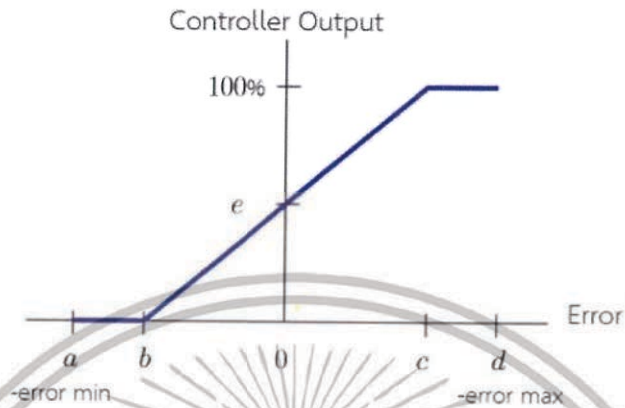
โดยที่ K_p คือค่าอัตราขยายและ $e(t)$ ค่าความคลาดเคลื่อน = ค่ากำหนด - ค่าวัด

สัญญาณเข้าและสัญญาณออกของตัวควบคุมบางตัวอาจมีหน่วยต่างกัน เช่น การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง เพื่อหลีกเลี่ยงการแปลงหน่วยความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณออกและสัญญาณเข้าของอุปกรณ์ควบคุมอาจแสดงเป็นแถบสัดส่วน (Proportional band หรือ %PB) โดยที่แถบสัดส่วนคือ พิสัยของสัญญาณเข้าที่ทำให้ตัวควบคุมปฏิบัติงานเต็มพิสัยการทำงาน หรือถ้ามองจากตัวควบคุมคือช่วงความคลาดเคลื่อนที่ทำให้สัญญาณออกของตัวควบคุมเปลี่ยนแปลง จากค่าสูงสุดไปต่ำสุดโดยแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ของพิสัยสัญญาณเข้าตัวควบคุม ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายและเปอร์เซ็นต์แถบสัดส่วนคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$K_p = \frac{100}{\%PB} \quad (2.63)$$

ลักษณะสมบัติของการควบคุมแบบสัดส่วนแสดงไว้ในรูป 2.31



รูปที่ 2.31 ลักษณะสมบัติของตัวควบคุมแบบสัดส่วน

จากรูป 2.31 ค่าเปอร์เซ็นต์แถบสัดส่วน (%PB) คือระยะ bc แม้ความคลาดเคลื่อนเป็นศูนย์ แต่ยังมีสัญญาณค่าหนึ่งออกจากตัวควบคุมที่ป้อนให้กับกระบวนการ ค่านี้ทำหน้าที่เป็น bias ทำให้ระบบทำงานที่จุดทำงานต่อไปได้ โดยทั่วไปสัญญาณค่านี้มักจะถูกตั้งให้เท่ากับ 50% ของสัญญาณขาออกสูงสุดของตัวควบคุม

$$\text{สัญญาณออก} = \frac{\% \text{ความคลาดเคลื่อน}}{\% \text{แถบสัดส่วน}} + 50\% \quad (2.64)$$

นอกจากนี้ตัวควบคุมมีย่านทำงานที่เป็นเชิงเส้นช่วงหนึ่ง โดยทำหน้าที่เป็นตัวขยาย แต่ถ้าความคลาดเคลื่อนมีมากเกินไปถึงระดับหนึ่ง ตัวขยายจะอ้อมตัวทำให้สัญญาณออกมีค่าคงที่ การควบคุมแบบสัดส่วนนี้สามารถควบคุมระบบได้ดีพอสมควร เหมาะสมกับกระบวนการที่ต้องการผลตอบสนองรวดเร็ว และยอมให้เกิดความคลาดเคลื่อนขนาดคงที่ อย่างไรก็ตามหากในกระบวนการเกิดมีการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์อาจทำให้เกิดปัญหา เช่น มีค่าความคลาดเคลื่อนในสภาวะอยู่ตัว (Steady state error) หรือที่เรียกว่าออฟเซต (Offset) ตัวควบคุมแบบสัดส่วนไม่สามารถแก้ไขให้หมดได้ แนวทางการแก้ไขปัญหที่เกิดขึ้นทำได้ 2 วิธีคือ วิธีแรกคือเพิ่มอัตราขยาย (Gain) ของตัวควบคุมเพื่อเพิ่มผลของความคลาดเคลื่อนที่มีต่อระบบ ถึงแม้ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจะมีค่าน้อยลงแต่การเพิ่มผลของความคลาดเคลื่อนมากเกินไปก็อาจทำให้ระบบแกว่งได้เนื่องจากระบบมีความไว วิธีที่สอง คือปรับค่าไบแอสของตัวควบคุมใหม่ด้วยมือ ซึ่งทำให้ตัวควบคุมเลื่อนจุดทำงานไปยังจุดที่ให้สัญญาณออกที่เหมาะสมกับกระบวนการในขณะนั้นได้ ปัญหาของวิธีหลังอยู่ตรงที่ต้องปรับค่าไบแอสของตัวควบคุมทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของกระบวนการ [22]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) การควบคุมแบบอินทิกรัล (Integral action)

ผลตอบของการควบคุมแบบสัดส่วนรวมกับการควบคุมแบบอินทิกรัลสามารถอธิบายได้ในสมการ

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt \right) \quad (2.65)$$

เมื่อ K_p คืออัตราขยาย $e(t)$ คือความคลาดเคลื่อนและ T_i คือ Integral time (sec) เมื่อเปรียบเทียบกับสมการของตัวควบคุมแบบสัดส่วนความแตกต่างอยู่ตรงที่เทอมไบแอส นั่นคือตัวควบคุมแบบสัดส่วนถูกจำกัดด้วยส่วนไบแอสเป็นค่าคงที่ ส่วนการควบคุมแบบอินทิกรัลมีการสะสมความคลาดเคลื่อนในการปรับแต่งไบแอส ทำหน้าที่เป็นตัวอินทิกรัลและจะหยุดสะสมเมื่อความคลาดเคลื่อนของระบบเป็นศูนย์ เมื่อผลตอบเข้าที่สมบูรณ์แล้วเทอมไบแอสของระบบจะมีค่าน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับลักษณะของการรบกวน (Disturbance) การทำงานในลักษณะเช่นนี้มีลักษณะคล้ายกับฟังก์ชันรีเซตด้วยมือ (Manual-resetfunction) ดังนั้นในบางครั้งจึงเรียกตัวอินทิกรัลว่าฟังก์ชันรีเซต (Reset function)

คุณสมบัติของตัวอินทิกรัลในการกำจัดความคลาดเคลื่อน หรือออฟเซตเป็นข้อดีอย่างมากจึงเป็นที่นิยมใช้กับระบบควบคุมป้อนกลับ อย่างไรก็ตามข้อเสีย นั่นคือทำให้เกิดการล่าช้า (Capacity-lag) และทำให้ช่วงเวลาของการแกว่งยาวนานขึ้นโดยทั่วไป ระบบแบบสัดส่วนรวมกับอินทิกรัลจะมีช่วงเวลาของการแกว่งนานกว่าระบบเชิงสัดส่วนอย่างเดียว 50% หรือ $T_{pi} = 1.5T_p$ สำหรับระบบที่มีค่าคงตัวเวลา (Time constant) น้อย เช่น ระบบควบคุมอัตราการไหล ปัญหานี้จะไม่มีผลมากนักแต่สำหรับระบบที่มีค่าคงตัวเวลามาก เช่น ระบบควบคุมระดับ ปัญหานี้อาจมีผลมากจนทำให้ระบบเข้าสู่จุดวิกฤติที่ไม่สามารถยอมรับได้

การควบคุมแบบอินทิกรัลมีลักษณะเช่นเดียวกับการควบคุมสัดส่วนตรง ผลกระทบของการเพิ่มอัตราขยายของตัวควบคุม หากอัตราขยายมีค่ามากเกินไปจะทำให้ผลตอบสนองของระบบมีการแกว่งโดยทั่วไป Integraltime ($T_i = 1/K_i$ sec โดยที่ $K_i = \text{repeats/sec}$) เป็นตัวแสดงว่าอัตราการตอบสนองของกระบวนการต่อสัญญาณการควบคุม ค่า T_i ที่น้อยกว่าจะทำให้ตัวควบคุมมีการตอบสนองที่เร็วกว่าในระยะเริ่มต้น โดยที่ความคลาดเคลื่อนยังเป็นค่าบวกอยู่ ดังนั้นกว่าความคลาดเคลื่อนจะเป็นศูนย์ ซึ่งทำให้เทอม $\int_0^t e(t) dt$ หยุดทำงาน เทอมไบแอสก็จะมีค่าสูงกว่าที่ต้องการ ดังนั้นผลตอบสนองจึงเกิดส่วนพุ่งเกิน (Overshoot) สูงกว่าค่าที่กำหนด เป็นผลให้ตัวอินทิกรัลทำหน้าที่ปรับให้ความคลาดเคลื่อนมีค่าลดลง การใช้ตัวอินทิกรัลในการควบคุมควรระวังในเรื่องของความคลาดเคลื่อนขนาดใหญ่ เพราะจะทำให้เกิดปัญหา Integral windup ถึงแม้ว่า T_i มีค่าถูกต้องในสภาวะการทำงานธรรมดา แต่สัญญาณควบคุมอาจถึงจุดอิ่มตัวขณะผลตอบเกิดส่วนพุ่งเกิน [22]

ข้อสรุปของตัวควบคุมอินทิกรัล

- ทำหน้าที่คล้ายรีเซตด้วยมือ (Manual reset) เพื่อกำจัดความคลาดเคลื่อน
- มีปัญหาการล่าช้า ทำให้เกิดการหักล้างทางเวลาในตัวควบคุมจึงไม่เหมาะกับระบบที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีค่าคงตัวเวลายาวนาน

- ทำให้ช่วงเวลาในการแกว่งยาวนานขึ้น

3) การควบคุมแบบอนุพันธ์ (Derivative action)

ตัวควบคุมแบบสัดส่วนและแบบอินทิกรัลนั้น ต่างมีข้อจำกัดอยู่ที่ความคลาดเคลื่อนขนาดใหญ่ ซึ่งเป็นปัญหาต่อการควบคุมของกระบวนการ แต่ความคลาดเคลื่อนขนาดใหญ่นี้สามารถรู้ได้ล่วงหน้าโดยพิจารณาจากแนวโน้มของความคลาดเคลื่อน หรืออัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณนั่นเอง ซึ่งตัวของอนุพันธ์มีหลักการการทำงานคือตัวควบคุมตอบสนองต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของความคลาดเคลื่อน ถึงแม้ว่าความคลาดเคลื่อนมีขาค่าเล็กน้อย สัญญาณออกของตัวอนุพันธ์ไม่ได้สัมพันธ์กับขนาดของความคลาดเคลื่อน แต่ขึ้นอยู่กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของความคลาดเคลื่อนถ้าความคลาดเคลื่อนมีค่าคงที่ ตัวอนุพันธ์จะให้สัญญาณออกเป็นศูนย์คุณลักษณะข้อนี้มีผลดีคือ ตัวควบคุมจะมีผลตอบสนองที่เกิดก่อนที่ความคลาดเคลื่อนจะเพิ่มมากขึ้น และทำให้ระบบมีผลตอบสนองที่เร็วขึ้น ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์สามารถเขียนได้ดังนี้

$$u(t) = K_p \left(e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2.66)$$

โดย Derivative time (T_d) เป็นเวลาที่แสดงถึงผลตอบสนองเนื่องจากตัวอนุพันธ์การเพิ่ม T_d จะทำให้ผลตอบสนองของตัวอนุพันธ์มีค่ามากขึ้น เนื่องจากตัวอนุพันธ์มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงมาก ดังนั้นจึงนิยมใช้กับค่าที่วัดได้ในกระบวนการสำหรับค่ากำหนดใช้เฉพาะกับตัวควบคุมสัดส่วนและอินทิกรัล ตัวอนุพันธ์คือตัวควบคุมที่ก่อให้เกิดผลตรงข้ามกับตัวอินทิกรัล ดังนั้นจึงใช้ในการปรับปรุงกระบวนการที่มีการล่าช้าทางเวลา (Time lag) มาก ทำให้ผลตอบสนองรวดเร็วขึ้นและช่วงเวลาการแกว่งที่สั้นลง ข้อเสียของตัวอนุพันธ์คือมีความไวต่อสัญญาณรบกวนเป็นอย่างมาก เพราะมีผลตอบสนองโดยตรงต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่วัดได้ ดังนั้นแม้สัญญาณรบกวนจะมีขนาดเล็กแต่ก็อาจก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่อสัญญาณออกของตัวควบคุม ซึ่งเป็นไปไม่ได้ที่จะใช้ตัวอนุพันธ์ในการควบคุมผลของสัญญาณรบกวน ยิ่งไปกว่านั้นระบบใดที่มีสัญญาณรบกวนมากจะไม่สามารถใช้ตัวอนุพันธ์ได้ ทำให้วงการอุตสาหกรรมส่วนใหญ่นิยมใช้เพียงตัวควบคุม PI เท่านั้น

สรุป Derivative action

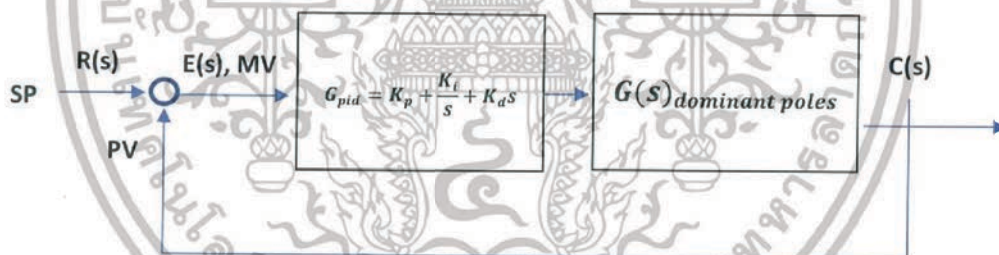
- เหมาะสำหรับกระบวนการที่ล่าช้าทางเวลามากทำให้การควบคุมถึงจุดที่ต้องการเร็วขึ้น
- ถ้า T_d มากเกินไป ผลของตัวอนุพันธ์จะทำให้ผลตอบสนองไวขึ้นจนกระทั่งระบบอาจขาดเสถียรภาพ
- ไม่เหมาะสำหรับระบบที่มีตัวแปรกระบวนการเปลี่ยนแปลงได้ง่ายหรือมีการล่าช้าทางเวลาน้อยเพราะจะทำให้ระบบขาดเสถียรภาพ เช่น ระบบควบคุมอัตราการไหล
- ไม่ควรใช้กับระบบที่มีสัญญาณรบกวนมาก
- ใช้ชดเชยการล่าช้าที่เกิดจากตัวอินทิกรัลด้วยการนำหน้า (Lead) ในตัวอนุพันธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าที่กำหนดทันที ความคลาดเคลื่อนก็จะมีค่าเปลี่ยนแปลงอย่างทันที และส่งผลต่อผลตอบสนองของระบบ ถ้านำอนุพันธ์ของความคลาดเคลื่อนนั้นคืออัตราการเปลี่ยนแปลงของความคลาดเคลื่อนแล้วไปรวมกับสัญญาณที่ได้จากตัวควบคุมแบบสัดส่วน และอินทิเกรเตอร์จะทำให้การทำงานของระบบดีขึ้นการควบคุมเชิงอนุพันธ์ ไม่มีผลต่อความคลาดเคลื่อนในสภาวะอยู่ตัวแต่จะลดช่วงเวลาเข้าที่ (Setting time) โดยลดการแกว่งลง และยังมีปัญหาที่เกิดจากฟังก์ชันการทำงานคือ ตัวควบคุมส่วนมากจะมีโหมดการทำงาน 2 โหมดคือ การควบคุมด้วยมือ (Manual) และการควบคุมอัตโนมัติ (Automatic) ในโหมดการควบคุมด้วยมือ สัญญาณที่ส่งออกจากตัวควบคุมจะขึ้นกับการปรับโดยตรงของผู้ใช้ หากมีการเปลี่ยนโหมดการทำงานกลับมาที่โหมดการควบคุมอัตโนมัติตัวควบคุมทำหน้าที่ส่งสัญญาณออกจากตัวควบคุม อาจเกิดปัญหาการกระแทก (Bump) ขึ้นได้เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสัญญาณควบคุมที่ออกจากตัวควบคุมอย่างเฉียบพลัน ดังนั้นในตัวควบคุมพีไอดี ส่วนมากจึงต้องมีวงจรลดการกระแทก (Bumpless transfer) สำหรับแก้ปัญหานี้ไว้ด้วย [22]

2.8 การออกแบบตัวควบคุมด้วยพีไอดี (PID controller)

การออกแบบตัวควบคุมด้วยพีไอดี ลักษณะของ Close-loop transfer function [23] จะเป็นดังรูปที่ 2.31



รูปที่ 2.31 Close-loop transfer function ที่มีตัวควบคุมพีไอดี

เมื่อ K_p , K_i และ K_d คือ ค่า Gain ของ ตัวควบคุม P, I และ D ตามลำดับ

$$G(s)_{\text{dominant poles}} = \frac{K}{(s-a)(s-b)} \quad (2.67)$$

เมื่อ a และ b คือ Complex conjugate

K คือ Gain ของระบบ

SP คือ Set point

PV คือ Process variable

MV คือ Manipulate variable

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการวิเคราะห์ในระบบนี้มีลักษณะเป็นระบบอันดับสูง จึงต้องทำการเลือกโพลเด่น (Dominant poles) เนื่องจากโพลเด่นที่หาได้จากการทำทรานเฟอร์ฟังก์ชัน จะมีผลตอบสนองต่อระบบมากที่สุดจึงเลือกนำไปใช้ในการควบคุมระบบโดยการเลือกโพลเด่นนี้ จะเลือกจากโพลที่วางอยู่ที่ตำแหน่งใกล้ๆ กับแกนจินตภาพมากกว่า Poles ตัวอื่น ๆ และไม่มี Zero อยู่ใกล้ ๆ กับ Poles ตัวนั้น ซึ่ง Dominant poles นี้จะมีผลต่อการควบคุมภายในระบบมากกว่า Poles จุดอื่น ๆ และการกำหนดวางโพลอีก 1 ตัว จะอยู่ห่างไปทางซ้าย เพื่อดึงเสถียรภาพของระบบให้ดีขึ้น Dominant poles ที่ได้จะเป็น Complex conjugate ของทรานเฟอร์ฟังก์ชันที่อยู่ทางครึ่งซ้ายของระนาบ S เมื่อทำการยุบบล็อก

จะได้สมการดังนี้

$$H(s)_{plant} = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)_{dominant\ poles} G(s)_{pid}}{1 + G(s)_{dominant\ poles} G(s)_{pid}} \quad (2.68)$$

จากรูปที่ 2.31 Close-loop transfer function เมื่อยุบบล็อกจะได้ดังรูปที่ 2.32



รูปที่ 2.32 Open-loop transfer function with PID

จะทำการหาค่าพีไอดี จาก Open-Loop transfer function ดังสมการที่ (2.69)

$$H(s)_{system} = \frac{K_p s + K_d s^2 + K_i}{(s + n\zeta\omega_n)(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)} \quad (2.69)$$

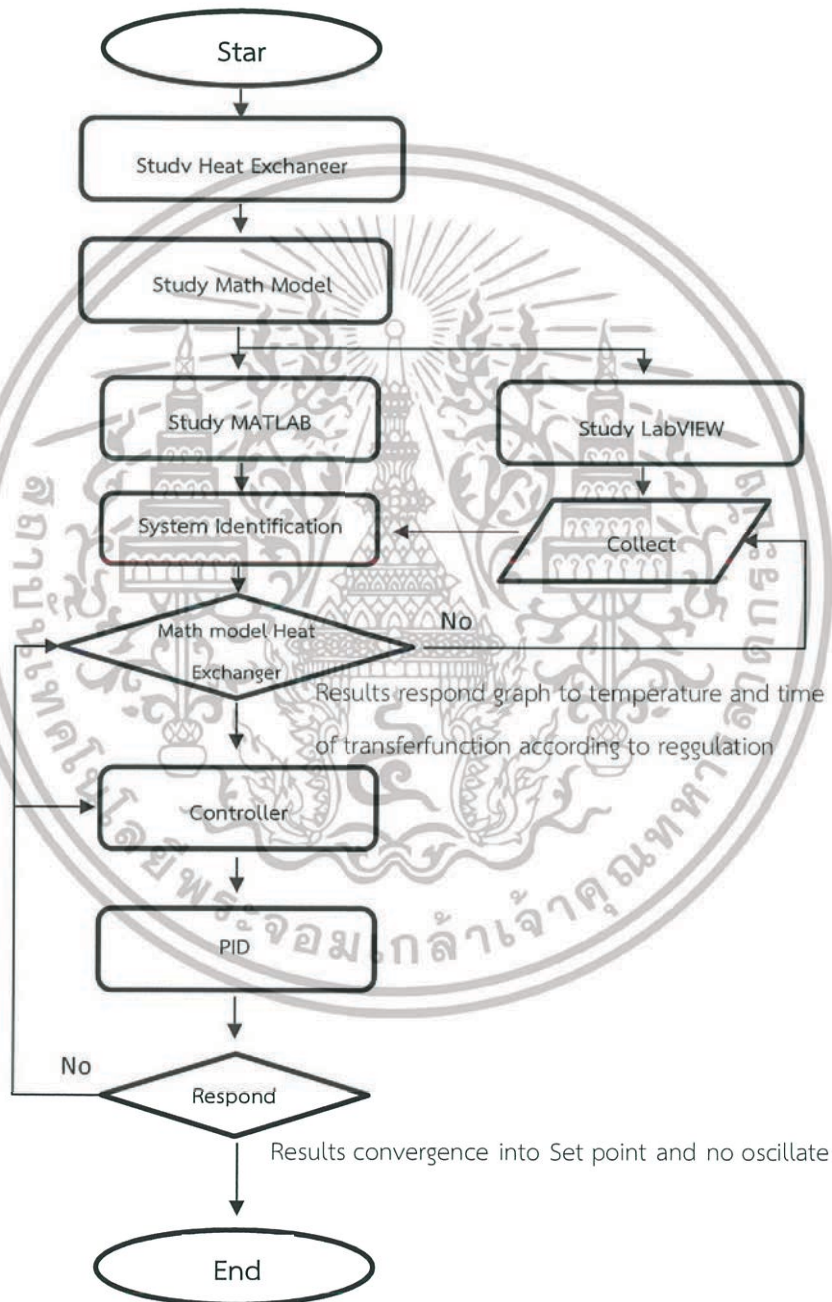
สมการคุณลักษณะจะเท่ากับ

$$(s + n\zeta\omega_n)(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2) \quad (2.70)$$

ซึ่งจะสามารถหาค่า K_p , K_i และ K_d ได้จากสมการคุณลักษณะของสมการที่ (2.70) เทียบสัมประสิทธิ์กับสมการที่ได้จากระบบจริงคือสมการที่ (2.67) ซึ่งค่าของค่าพารามิเตอร์ ζ, ω_n จะรู้ค่าจากการกำหนดค่าผลตอบสนองชั่วคราว Setting time และ Rise time ในการคำนวณหาค่า K_p , K_i และ K_d จะถูกแสดงในบทที่ 3 หัวข้อการหาค่าพีไอดี [24]

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน



รูปที่ 3.1 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการดำเนินงานของปริญญาโท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การดำเนินงาน

จากวัตถุประสงค์ของปฏิญานิพนธ์คือการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาใช้ในการออกแบบระบบควบคุมสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีความร้อนสะสม และควบคุมด้วยพีไอดีของระบบนั้น ในการออกแบบและควบคุมระบบ อันดับแรกจะทำการเก็บค่าข้อมูลที่เกี่ยวข้องในการทดลอง เพื่อหาความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ โดยใช้หลักการของการระบุอัตลักษณ์ของระบบ แล้วนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ไปทำเป็นฟังก์ชันถ่ายโอน หรือ ทรานเฟอร์ฟังก์ชัน ซึ่งจะสามารถหาค่าอัตราขยาย (Gain ของ K_p , K_i และ K_d) เพื่อนำมาควบคุมระบบการแลกเปลี่ยนความร้อนได้ ทั้งนี้ต้องเริ่มศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบแลกเปลี่ยนความร้อน อุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในระบบ วิธีการทางคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้อง รวมถึงหลักการควบคุมด้วยพีไอดี และอื่น ๆ ที่จะกล่าวในหัวข้อถัดไป

การดำเนินงานออกเป็น 5 ขั้นตอนดังนี้

- ฮาร์ดแวร์ (Hardware)
- สมการทางคณิตศาสตร์ของระบบแลกเปลี่ยนความร้อน
- การเก็บข้อมูล (Data และ graph)
- การระบุอัตลักษณ์ของระบบ และ การทำทรานเฟอร์ฟังก์ชัน
- การออกแบบตัวควบคุมด้วยพีไอดี (PID controller)

3.2.1 ฮาร์ดแวร์ (Hardware)

ในการศึกษา และการออกแบบระบบควบคุม สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีความร้อนสะสมนั้น จำเป็นต้องศึกษาอุปกรณ์ภายในระบบว่ามีการทำงาน มีอินพุต-เอาต์พุตอย่างไร จะออกแบบควบคุมอะไรบ้าง และเพื่อเข้าใจข้อจำกัดของอุปกรณ์แต่ละชนิดเพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นในระหว่างการทดลองซึ่งทั้งหมดได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 หัวข้อที่ 2.2 ฮาร์ดแวร์ (Hardware) เมื่อพิจารณาระบบการแลกเปลี่ยนความร้อนพบว่ายังขาดเสถียรภาพในการระบายความร้อนของถังฝั่งน้ำเย็นจึงได้ทำการปรับปรุงระบบการแลกเปลี่ยนความร้อนให้มีเสถียรภาพมากขึ้น โดยการเพิ่มเครื่องระบายความร้อนในฝั่งเย็นเพื่อทำการลดอุณหภูมิของน้ำที่นำกลับไปใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อน เมื่อทำการปรับปรุงระบบเรียบร้อยแล้ว จึงทำการพิจารณาระบบเพื่อหาสมการของระบบ

3.2.2 สมการทางคณิตศาสตร์ของระบบแลกเปลี่ยนความร้อน

ในการพิจารณาระบบจะพิจารณาที่อุปกรณ์ของระบบแต่ละอุปกรณ์ ซึ่งจะได้สมการทั้งหมด 5 สมการ โดยความสัมพันธ์ของ T_1 , T_2 , T_3 , T_4 และ T_5 เป็นดังสมการที่ (2.2) ถึง (2.6) ในบทที่ 2 และภาพรวมของระบบจะมีลักษณะที่แสดงดังรูปที่ 2.13 ในบทที่ 2 โดยเราจะพิจารณาอุณหภูมิ

ที่เข้าไปแลกเปลี่ยนความร้อนที่ T_1 และ T_3 เป็นข้อมูลอินพุต และพิจารณาที่อุณหภูมิน้ำเย็นที่ออกมาจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ T_4 เป็นเอาต์พุตที่ใช้ในการควบคุม

3.2.3 การเก็บข้อมูล (Data and graph)

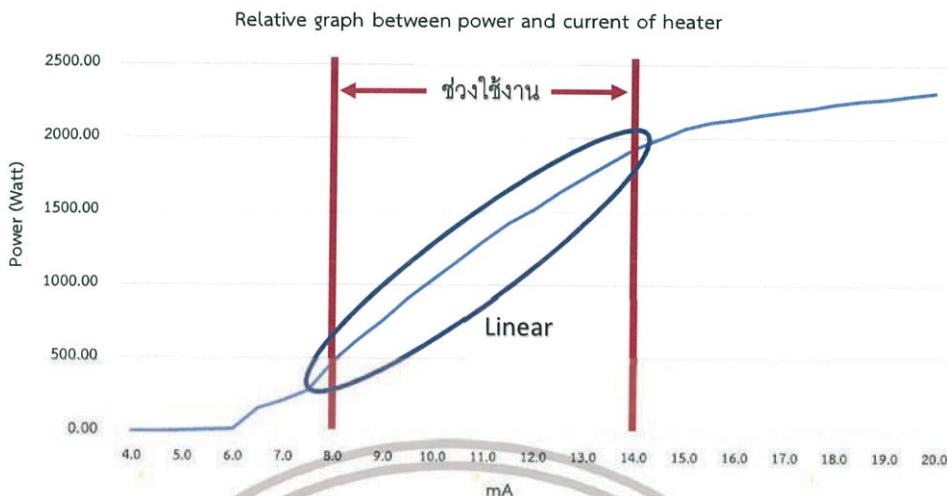
ก่อนทำการเก็บข้อมูลนั้นเราจะทำการหาค่ากำลังของฮีตเตอร์ ก่อนโดยการวัดกระแส (A) และ ค่าความต่างศักย์ (V) ซึ่งเมื่อทำการหาค่ากำลังของฮีตเตอร์ แล้วนำมาสร้างกราฟพบว่าช่วงที่เหมาะสมในการเก็บข้อมูลอยู่ในช่วง 8 mA ถึง 14 mA เนื่องจากมีกราฟค่อนข้างมีความเป็นเชิงเส้น ทำให้เหมาะแก่การนำไปควบคุม และจากข้อจำกัดของอุปกรณ์ที่ปั้มน้ำเข้าระบบทำให้ไม่สามารถทนอุณหภูมิเกิน 60 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิช่วงนี้จะอยู่ที่ 16 mA ขึ้นไป รวมถึงข้อจำกัดของฮีตเตอร์ ซึ่งเป็นฮีตเตอร์ขนาดกำลัง 2400 W จึงมีการกำหนดให้ฮีตเตอร์ทำงานที่ 90% จากตารางที่ 3.1 ที่ 100% ฮีตเตอร์มีขนาดกำลัง 2318.55 W เมื่อกำหนดที่ 90% ทำให้ฮีตเตอร์มีขนาดกำลังอยู่ที่ 2086.695 W เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 3.1 การเลือกรูปแบบการเก็บข้อมูลจึงเลือกได้ถึงช่วงที่ไม่เกิน 16 mA ตารางค่ากำลังไฟฟ้าของฮีตเตอร์จะเป็นดังตารางที่ 3.1 และกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง กำลัง (W) และกระแส (I) ในรูปที่ 3.2 เมื่อเราได้ช่วงที่จะทำการเก็บข้อมูลมาแล้วจะทำการเก็บข้อมูลอุณหภูมิที่ T_1, T_2, T_3, T_4 และ T_5 แต่เนื่องจาก T_5 เราไม่มีอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ แต่สามารถหาค่าอุณหภูมิได้จากสมการ Hot storage ซึ่งค่าตัวแปรต่าง ๆ จะสามารถหาได้จากการระบุอัตลักษณ์ของระบบ ซึ่งอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.2.4 และนำค่าดังกล่าวมาแทนค่าในสมการที่ 3.1

$$T_5(t) = \frac{pf_h c_p T_2(t) + U_2 A_2 T_{Air}(t)}{pf_h c_p + U_2 A_2} \quad (3.1)$$

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลขนาดกำลังของฮีตเตอร์

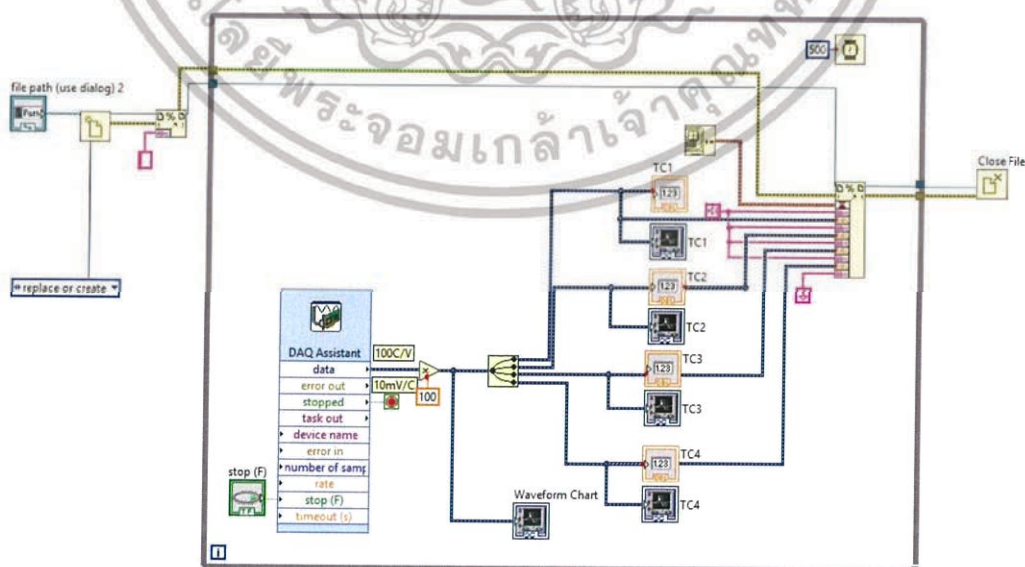
Actuator(mA)	Current(A)	Voltage(V)	Power(W)	Output(%)
4.0	0.20	2.67	0.53	0.00
4.5	0.50	3.72	1.86	3.13
5.0	1.10	4.70	5.17	6.25
5.5	1.80	5.53	9.96	9.38
6.0	2.50	6.20	15.49	12.50
6.5	3.30	47.44	156.55	15.63
7.0	4.00	53.40	213.60	18.75
7.5	4.80	58.60	281.28	21.88
8.0	5.40	87.50	472.50	25.00
8.5	6.10	101.50	619.15	28.13
9.0	6.80	111.10	755.48	31.25
9.5	7.50	121.40	910.50	34.38
10.0	8.00	130.00	1040.00	37.50
10.5	8.50	137.30	1167.05	40.63
11.0	9.00	144.40	1299.60	43.75
11.5	9.40	151.40	1423.16	46.88
12.0	9.70	156.40	1517.08	50.00
12.5	10.10	161.80	1634.18	53.13
13.0	10.40	166.80	1734.72	56.25
13.5	10.70	171.70	1837.19	59.38
14.0	11.00	175.70	1932.70	62.50
14.5	11.20	178.60	2000.32	65.63
15.0	11.40	181.50	2069.10	68.75
15.5	11.50	183.70	2112.55	71.88
16.0	11.60	184.20	2136.72	75.00
16.5	11.70	184.70	2160.99	78.13
17.0	11.80	185.20	2185.36	81.25
17.5	11.90	185.90	2212.21	84.38
18.0	12.00	186.80	2241.60	87.50
18.5	12.10	187.20	2265.12	90.63
19.0	12.10	187.90	2273.59	93.75
19.5	12.20	188.20	2296.04	96.88
20.0	12.30	188.50	2318.55	100.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลัง และกระแสของฮีตเตอร์

ในการเก็บข้อมูลจะทำการเก็บข้อมูลที่ 8 mA 10 mA 12 mA และ 14 mA โดยจะทำการเก็บข้อมูลผ่าน เครื่องเก็บข้อมูลและแปลงสัญญาณ เป็นระยะเวลาตั้งแต่ 0 sec ถึง 12,000 sec ด้วยความถี่ข้อมูลละ 1 sec โดยเขียนคำสั่งในแล็บวิว ดังรูปที่ 3.3 แต่ในที่นี้จะยกตัวอย่างตารางแสดงค่าข้อมูลของอุณหภูมิที่เก็บ ซึ่งในช่วงเวลาการเก็บข้อมูลจะแสดงในช่วง 0 sec ถึง 25 sec ดังตารางที่ 3.2 ซึ่งจากการเก็บข้อมูล และ นำมาสร้างกราฟระหว่างอุณหภูมิ และเวลาพบว่าในช่วงแรกมีลักษณะเป็นเอกซ์โพเนนเชียล (Exponential) และเริ่มมีการสะสมของความร้อนที่เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ แล้วจึงเป็นเชิงเส้น (Linear) จึงแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนมีลักษณะแบบเอกซ์โพเนนเชียล และอีกส่วนเป็นเชิงเส้น โดยจะแสดงกราฟดังรูปที่ 3.4 ถึงรูปที่ 3.8

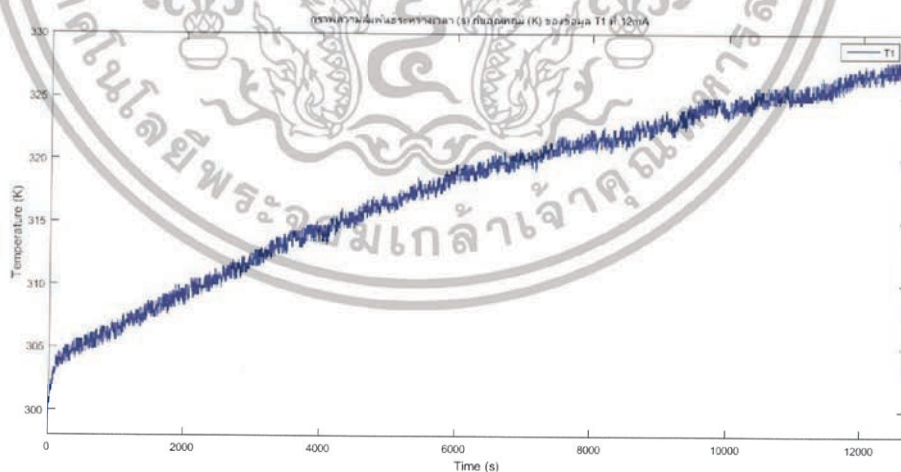


รูปที่ 3.3 การเก็บข้อมูลผ่านเครื่องเก็บข้อมูล และแปลงสัญญาณด้วยโปรแกรมแล็บวิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

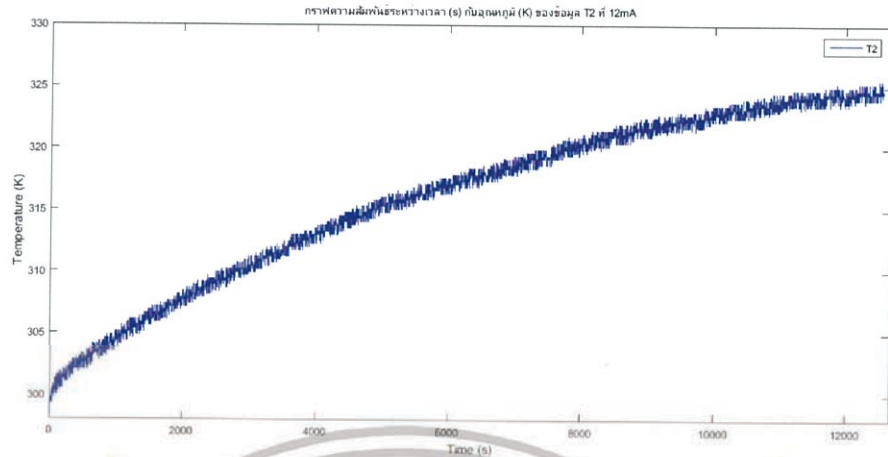
ตารางที่ 3.2 การจัดเก็บข้อมูล T_1 , T_2 , T_3 , T_4 และ T_5 ที่ 12 mA

Time (s)	T1 (K)	T2 (K)	T3 (K)	T4 (K)	T5 (K)
0	301.5065	302.0645	301.6195	302.3327	301.8747
1	300.9966	301.5547	301.6195	302.3327	301.3896
2	301.7615	301.5547	301.1096	302.0777	301.3896
3	300.2318	301.5547	301.3646	302.8427	301.3896
4	301.7615	301.0449	300.8547	301.0576	300.9045
5	300.9966	301.2998	301.6195	302.3327	301.1471
6	302.0164	301.0449	301.1096	301.3126	300.9045
7	301.2516	301.5547	301.6195	302.5877	301.3896
8	300.4867	301.2998	301.3646	302.3327	301.1471
9	300.7417	302.0645	301.1096	302.5877	301.8747
10	300.4867	301.5547	300.3448	302.5877	301.3896
11	300.9966	301.5547	301.1096	302.0777	301.3896
12	301.5065	301.5547	301.1096	301.3126	301.3896
13	300.4867	300.7899	300.3448	302.0777	300.662
14	301.7615	302.0645	301.6195	301.8227	301.8747
15	301.2516	301.2998	301.6195	302.3327	301.1471
16	301.5065	301.2998	300.3448	301.3126	301.1471
17	300.4867	301.5547	301.1096	302.5877	301.3896
18	301.2516	300.7899	300.3448	302.0777	300.662
19	300.4867	300.7899	301.1096	301.8227	300.662
20	301.5065	300.7899	300.5997	301.8227	300.662
21	300.9966	300.7899	300.8547	301.0576	300.662
22	300.4867	300.7899	301.3646	301.8227	300.662
23	300.9966	301.2998	301.8744	302.3327	301.1471
24	300.9966	301.0449	301.6195	302.5877	300.9045
25	300.9966	301.5547	301.6195	302.3327	301.3896

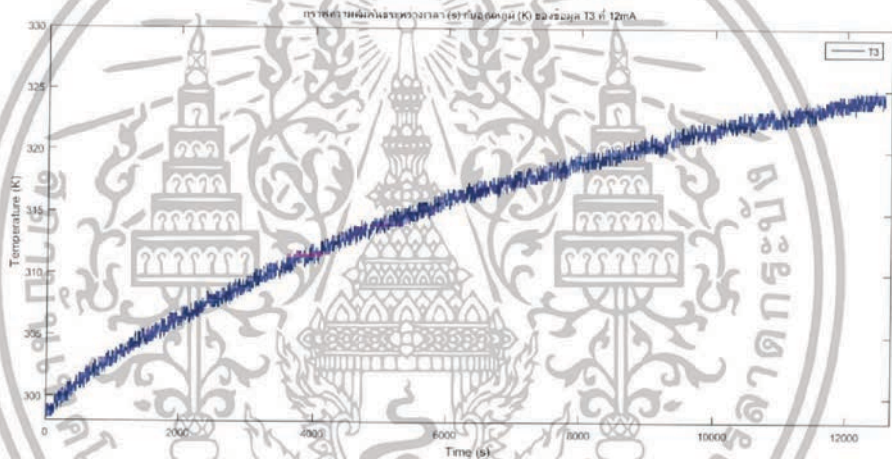


รูปที่ 3.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา (sec) กับอุณหภูมิ (K) ของข้อมูล 12 mA ที่ T_1

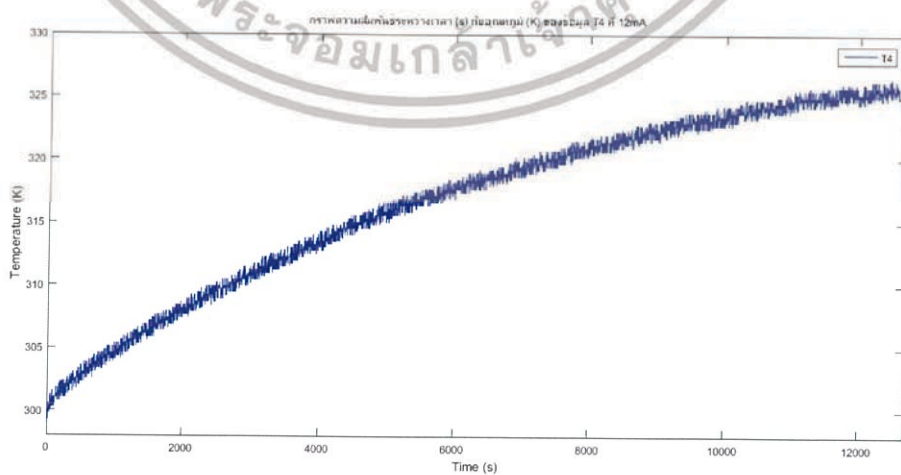
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา (sec) กับอุณหภูมิ (K) ของข้อมูล 12 mA ที่ T_2

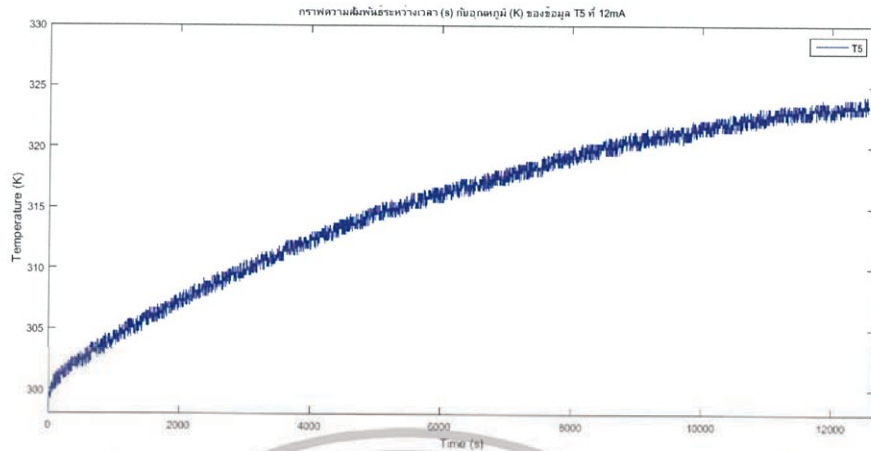


รูปที่ 3.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา (sec) กับอุณหภูมิ (K) ของข้อมูล 12 mA ที่ T_3



รูปที่ 3.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา (sec) กับอุณหภูมิ (K) ของข้อมูล 12 mA ที่ T_4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา (sec) กับอุณหภูมิ (K) ของข้อมูล 12 mA ที่ T_5

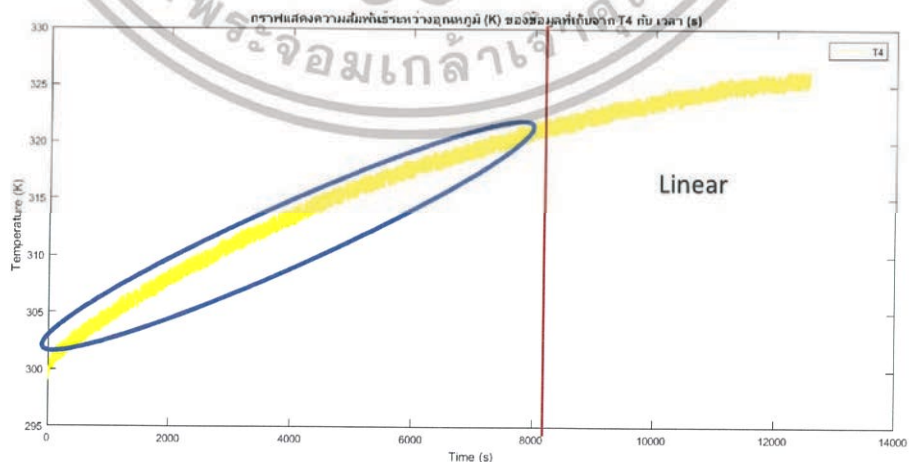
โดยจะแสดงวิธีการคำนวณค่าตัวแปร การทำทรานเฟอร์ฟังก์ชัน และค่าพีเอ็ดี ของช่วงข้อมูลที่เก็บที่ 12 mA ซึ่งในช่วงอื่น ๆ นั้น มีวิธีการดำเนินงานที่เหมือนกัน

3.2.4 การระบุอัตลักษณ์ของระบบ และการทำทรานเฟอร์ฟังก์ชัน

เนื่องจากข้อมูลที่เก็บมาในรูปที่ 3.5 ถึงรูปที่ 3.8 มีลักษณะในช่วงแรก เป็นฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล (Exponential) และช่วงที่สองเป็นช่วงของความร้อนที่เริ่มสะสมจนมีลักษณะเป็นเชิงเส้น (Linear) จึงแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ส่วนดังที่กล่าวในหัวข้อ 3.2.4.1 คือ ฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล และในหัวข้อ 3.2.4.2 คือ ฟังก์ชันเชิงเส้น

3.2.4.1 ฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล (Exponential)

ช่วงเอกซ์โพเนนเชียลจะแสดงดังรูปที่ 3.9 ซึ่งจะเป็นช่วงที่มีการเพิ่มของอุณหภูมิ



รูปที่ 3.9 การแบ่งช่วงในการจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ ช่วงเอกซ์โพเนนเชียล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการวิเคราะห์และการระบุอัตลักษณ์ของระบบ ผ่านโปรแกรมแม็ตแล็บ โดยจำเป็นต้องจัดสมการทั้ง 5 สมการให้อยู่ในรูปของ Differential equation จากสมการที่ (2.2) ถึงสมการที่ (2.6) ในบทที่ 2 จะเป็นดังสมการที่ (3.2) ถึง (3.6)

Heater

$$\frac{dT_1}{dt}(t) = \frac{1}{\tau_1}T_5(t) - \frac{1}{\tau_1}T_1(t) + \frac{1}{\tau_1\rho f_h c_p}Q_H \quad (3.2)$$

Hot element

$$\frac{dT_2}{dt}(t) = \frac{K_2}{\tau_2}T_1(t) + \frac{(1-K_2)}{\tau_2}T_4(t) - \frac{1}{\tau_2}T_2(t) \quad (3.3)$$

Cool storage

$$\frac{dT_3}{dt}(t) = \frac{1}{\tau_3}T_4(t) - \frac{1}{\tau_3}T_3(t) \quad (3.4)$$

Cool element

$$\frac{dT_4}{dt}(t) = \frac{K_4}{\tau_4}T_3(t) + \frac{(1-K_4)}{\tau_4}T_2(t) - \frac{1}{\tau_4}T_4(t) \quad (3.5)$$

Hot storage

$$\frac{dT_5}{dt}(t) = \frac{K_5}{\tau_5}T_2(t) + \frac{(1-K_5)}{\tau_5}T_{Air}(t) - \frac{1}{\tau_5}T_5(t) \quad (3.6)$$

สมการของ Time constants ที่เกิดจากการจัดรูปสมการที่ (3.2) ถึง (3.6) ของแต่ละสมการเป็นดังนี้

$$\tau_1 = \frac{V_h}{f_h}$$

$$\text{และ } \tau_3 = \frac{\rho V_c c_p}{\rho f_c c_p - U_3 A_3}$$

$$\tau_2 = \frac{\rho V_h c_p}{\rho f_h c_p + UA}$$

$$\text{และ } \tau_4 = \frac{\rho V_c c_p}{\rho f_c c_p + UA}$$

$$\tau_5 = \frac{\rho V_h c_p}{\rho f_h c_p + U_2 A_2}$$

ค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละสมการเป็นดังนี้

$$K_2 = \frac{\rho f_h c_p}{\rho f_h c_p + UA}$$

$$K_4 = \frac{\rho f_c c_p}{\rho f_c c_p + UA}$$

$$K_5 = \frac{\rho f_h c_p}{\rho f_h c_p + U_2 A_2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการ Integrating equation สมการที่ (3.2) ถึงสมการที่ (3.6) จะได้ดังนี้

$$T_1(t) - T_{1_0} = -a_1 \int_0^t T_1(t) dt + b_1 \int_0^t T_5(t) dt + c_1 \int_0^t Q_H(t) dt \quad (3.7)$$

$$T_2(t) - T_{2_0} = a_2 \int_0^t T_1(t) dt - b_2 \int_0^t T_2(t) dt + c_2 \int_0^t T_4(t) dt \quad (3.8)$$

$$T_3(t) - T_{3_0} = a_3 \int_0^t T_4(t) dt - b_3 \int_0^t T_3(t) dt \quad (3.9)$$

$$T_4(t) - T_{4_0} = a_4 \int_0^t T_3(t) dt - b_4 \int_0^t T_4(t) dt + c_4 \int_0^t T_2(t) dt \quad (3.10)$$

$$T_5(t) - T_{5_0} = -a_5 \int_0^t T_5(t) dt + b_5 \int_0^t T_2(t) dt + c_5 \int_0^t T_{Air}(t) dt \quad (3.11)$$

เมื่อ $a_1 = \frac{1}{r_1}, b_1 = \frac{1}{r_1}$ และ $c_1 = \frac{1}{r_1 \rho_f h c_p}$

$$a_2 = \frac{K_2}{r_2}, b_2 = \frac{1}{r_2} \text{ และ } c_2 = \frac{(1-K_2)}{r_2}$$

$$a_3 = \frac{1}{r_3} \text{ และ } b_3 = \frac{1}{r_3}$$

$$a_4 = \frac{K_4}{r_4}, b_4 = \frac{1}{r_4} \text{ และ } c_4 = \frac{(1-K_4)}{r_4}$$

$$a_5 = \frac{1}{r_5}, b_5 = \frac{K_5}{r_5} \text{ และ } c_5 = \frac{(1-K_5)}{r_5}$$

และ $T_{1_0}, T_{2_0}, T_{3_0}, T_{4_0}$ และ T_{5_0} เป็นอุณหภูมิเริ่มต้นของแต่ละสมการ สมการที่ (3.7) ถึงสมการที่ (3.11) จัดรูปสมการให้อยู่ในเทอมของ $T_{n,model}(t)$ ได้ดังนี้

$$T_{1,model}(t) = T_{1_0} - a_1 \int_0^t T_1(t) dt + b_1 \int_0^t T_5(t) dt + c_1 \int_0^t Q_H(t) dt \quad (3.12)$$

$$T_{2,model}(t) = T_{2_0} + a_2 \int_0^t T_1(t) dt - b_2 \int_0^t T_2(t) dt + c_2 \int_0^t T_4(t) dt \quad (3.13)$$

$$T_{3,model}(t) = T_{3_0} + a_3 \int_0^t T_4(t) dt - b_3 \int_0^t T_3(t) dt \quad (3.14)$$

$$T_{4,model}(t) = T_{4_0} + a_4 \int_0^t T_3(t) dt - b_4 \int_0^t T_4(t) dt + c_4 \int_0^t T_2(t) dt \quad (3.15)$$

$$T_{5,model}(t) = T_{5_0} - a_5 \int_0^t T_5(t) dt + b_5 \int_0^t T_2(t) dt + c_5 \int_0^t T_{Air}(t) dt \quad (3.16)$$

เมื่อทำการอินทิเกรตแล้วจะนำมาคำนวณด้วยวิธีกฎสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezium rule) ในการวิเคราะห์ข้อมูลก่อนในการทำการระบุอัตลักษณ์ของระบบจะเริ่มการแทนค่า $T_{1,model}(t), T_{2,model}(t), T_{3,model}(t), T_{4,model}(t)$, และ $T_{5,model}(t)$ ด้วย $t \in \{t_0, \dots, t_N\}$ จากสมการที่ (3.12) ถึง (3.16) มีตัวแปรที่ไม่ทราบค่า 19 ตัวแปร ซึ่งสามารถหาได้ผ่านสมการที่ (3.17)

$$A_N x = B \quad (3.17)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned}
 A_1 &= \begin{bmatrix} 1 & \int_{T_0}^{t_1} T_1 dt & \int_{T_0}^{t_1} T_5 dt & \int_{T_0}^{t_1} Q_H dt \\ 1 & \int_{T_0}^{t_2} T_1 dt & \int_{T_0}^{t_2} T_5 dt & \int_{T_0}^{t_2} Q_H dt \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \int_{T_0}^{t_N} T_1 dt & \int_{T_0}^{t_N} T_5 dt & \int_{T_0}^{t_N} Q_H dt \end{bmatrix}_{4 \times 5} \\
 A_2 &= \begin{bmatrix} 1 & \int_{T_0}^{t_1} T_1 dt & \int_{T_0}^{t_1} T_4 dt & - \int_{T_0}^{t_1} T_2 dt \\ 1 & \int_{T_0}^{t_2} T_1 dt & \int_{T_0}^{t_2} T_4 dt & - \int_{T_0}^{t_2} T_2 dt \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \int_{T_0}^{t_N} T_1 dt & \int_{T_0}^{t_N} T_4 dt & - \int_{T_0}^{t_N} T_2 dt \end{bmatrix}_{4 \times 5} \\
 A_3 &= \begin{bmatrix} 1 & \int_{T_0}^{t_1} T_4 dt & \int_{T_0}^{t_1} T_3 dt \\ 1 & \int_{T_0}^{t_2} T_4 dt & \int_{T_0}^{t_2} T_3 dt \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \int_{T_0}^{t_N} T_4 dt & \int_{T_0}^{t_N} T_3 dt \end{bmatrix}_{3 \times 5} \\
 A_4 &= \begin{bmatrix} 1 & \int_{T_0}^{t_1} T_3 dt & \int_{T_0}^{t_1} T_4 dt & - \int_{T_0}^{t_1} T_2 dt \\ 1 & \int_{T_0}^{t_2} T_3 dt & \int_{T_0}^{t_2} T_4 dt & - \int_{T_0}^{t_2} T_2 dt \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \int_{T_0}^{t_N} T_3 dt & \int_{T_0}^{t_N} T_4 dt & - \int_{T_0}^{t_N} T_2 dt \end{bmatrix}_{4 \times 5} \\
 A_5 &= \begin{bmatrix} 1 & \int_{T_0}^{t_1} T_5 dt & \int_{T_0}^{t_1} T_2 dt & - \int_{T_0}^{t_1} T_{Air} dt \\ 1 & \int_{T_0}^{t_2} T_5 dt & \int_{T_0}^{t_2} T_2 dt & - \int_{T_0}^{t_2} T_{Air} dt \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \int_{T_0}^{t_N} T_5 dt & \int_{T_0}^{t_N} T_2 dt & - \int_{T_0}^{t_N} T_{Air} dt \end{bmatrix}_{4 \times 5} \\
 x_n &= \begin{bmatrix} T_{n_0} \\ a_n \\ b_n \\ c_n \end{bmatrix}, n = 1, 2, 3, 4, 5 \\
 B_n &= \begin{bmatrix} T_{n,model}(t_1) \\ \dots \\ T_{n,model}(t_N) \end{bmatrix}, n = 1, 2, 3, 4, 5 \\
 & \quad N \equiv \text{number of data plants}
 \end{aligned}$$

และ

$N = 1, 2, 3, \dots, 5$ ของ $T_{N,model}$

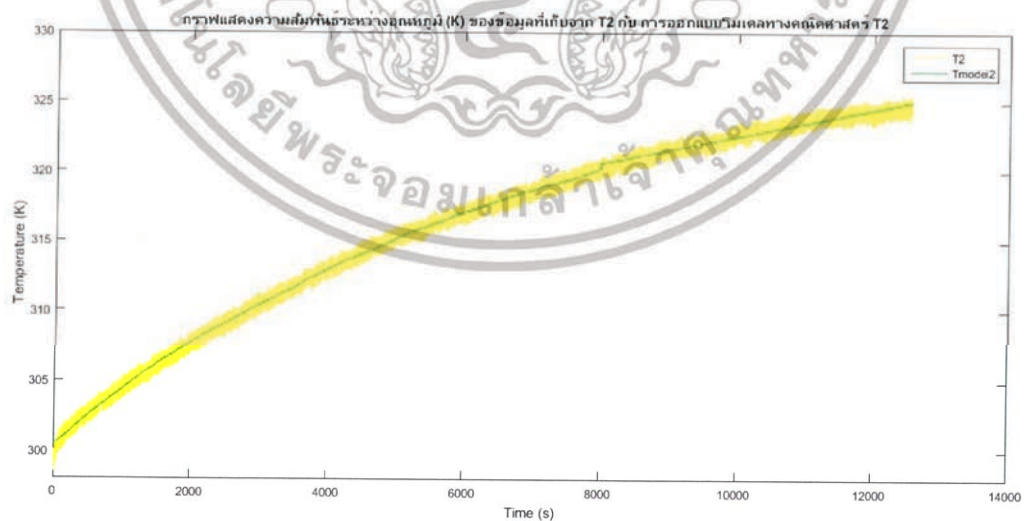
แก้สมการที่ (3.12) ถึงสมการที่ (3.16) ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Linear least squares) ในสมการที่ (3.17) ในการหาพารามิเตอร์ T_{N_0} , a_n , b_n และ c_n โดยขั้นตอนการพิจารณาเพื่อระบุตัวแปรของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการจะใช้ข้อมูลที่เก็บได้จากระบบมาวิเคราะห์ ซึ่งจะได้กราฟการวิเคราะห์ข้อมูลของทุก ๆ อินพุต และเอาต์พุต ที่ T_1, T_2, T_3, T_4 และ T_5 ซึ่งจะเห็นได้ว่าข้อมูลอุณหภูมิที่เก็บมีความสัมพันธ์กับโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่ได้ออกแบบไว้ โดยที่กราฟสีเหลือง คือค่าข้อมูลที่ได้ทำการเก็บมาจากระบบ และเส้นกราฟสีเขียว คือค่าที่ได้จากการทำการระบุอัตลักษณ์ของระบบ มีแนวโน้มไปในทางเดียวกันแสดงถึงความถูกต้องของโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่ได้ออกแบบดังรูปที่ 3.10 ถึง 3.14

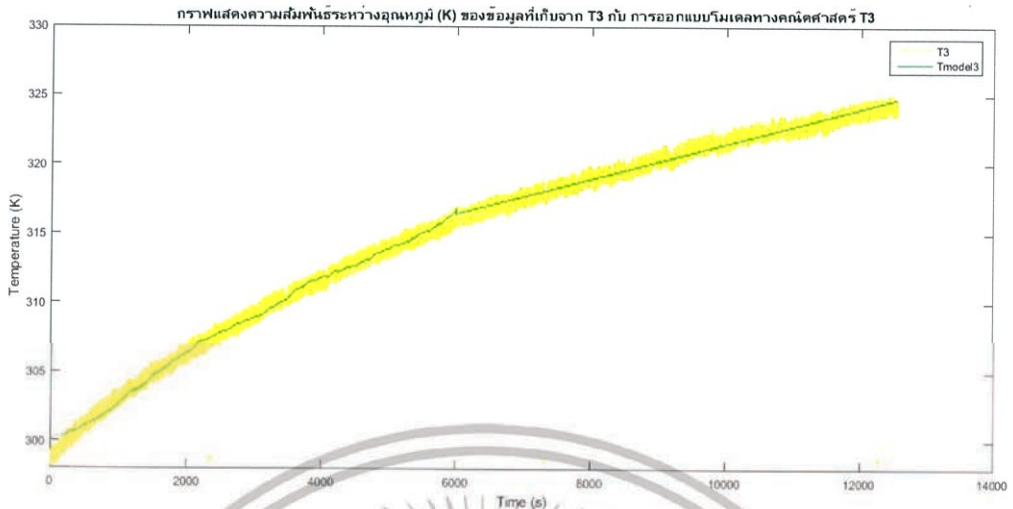


รูปที่ 3.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (K) ข้อมูลที่เก็บจาก T_1 กับการออกแบบโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่ T_1



รูปที่ 3.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (K) ข้อมูลที่เก็บจาก T_2 กับการออกแบบโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่ T_2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

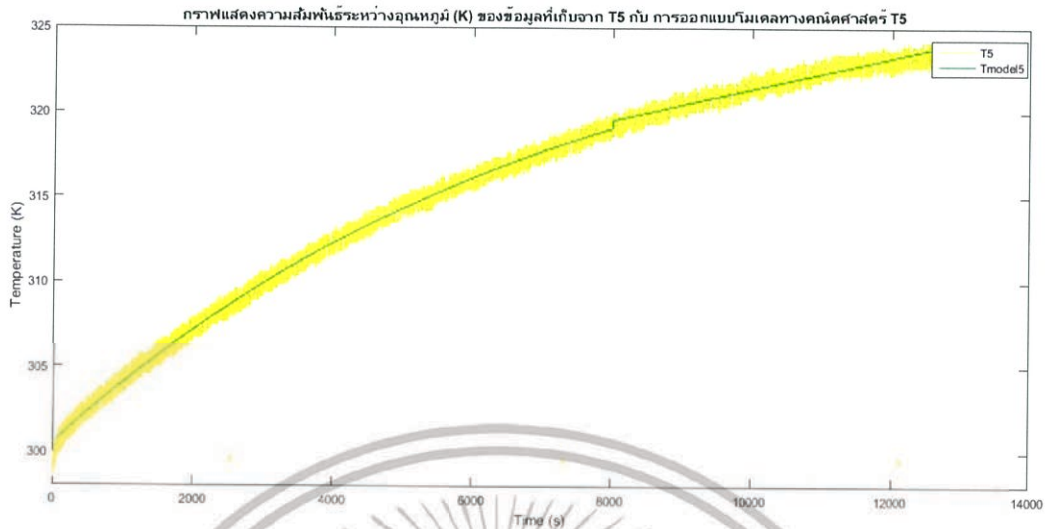


รูปที่ 3.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (K) ข้อมูลที่เก็บจาก T₃ กับ การออกแบบโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่ T₃



รูปที่ 3.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (K) ข้อมูลที่เก็บจาก T₄ กับ การออกแบบโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่ T₄

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (K) ข้อมูลที่เก็บจาก T_5 กับ การออกแบบโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่ T_5

จากการทำการระบุอัตลักษณ์ของระบบจะได้ค่าพารามิเตอร์ประกอบไปด้วย a_n, b_n, c_n ของสมการทั้ง 5 สมการที่ Set point 12 mA ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการระบุอัตลักษณ์ของระบบ

ใส่กำลังให้อีเทอร์ที่ 12 mA				
	Temp0	a_n	b_n	c_n
T1	298.2658	0.0143	-0.0103	1.2375
T2	299.1470	0.0032	0.0208	0.0176
T3	298.4603	0.0079	0.0080	0.0000
T4	299.6525	-0.0008	-0.0046	-0.0038
T5	298.8365	-0.0133	-0.0133	0.0000

ซึ่งเมื่อนำค่าในตารางที่ 3.3 ไปแทนค่าในสมการที่ (3.7) ถึงสมการที่ (3.11) จะได้ค่าพารามิเตอร์ดังนี้

$$\tau_1 = 69.93$$

$$\tau_2 = 48.0769$$

$$\tau_3 = 250$$

$$\tau_4 = 217.3913$$

$$\tau_5 = 75.1879$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ

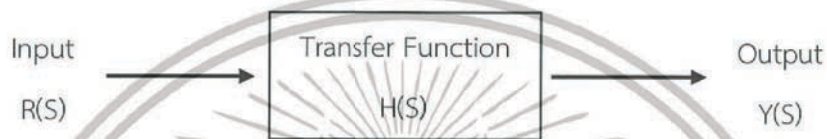
$$K_2 = 0.153846$$

$$K_3 = 0.025$$

$$K_4 = 0.175443$$

$$K_5 = 0.9999$$

เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์จากการระบุอัตลักษณ์ของระบบ สามารถทำให้หาทรานเฟอร์ฟังก์ชันได้จากสมการของระบบทั้ง 5 สมการ ทำให้อยู่ในรูปเอชต์พุดต่ออินพุด ดังรูป 3.15 ซึ่งจะได้สมการที่ 3.18



รูปที่ 3.15 การสร้างทรานเฟอร์ฟังก์ชัน

$$H(s) = \frac{\mathcal{L}[y(t)]}{\mathcal{L}[r(t)]} = \frac{Y(s)}{R(s)} \tag{3.18}$$

เนื่องจากในระบบมี 5 สมการ การคำนวณทรานเฟอร์ฟังก์ชันจาก Differential equation สมการที่ (3.2) ถึง (3.6) จำเป็นต้องใช้วิธีแบบจำลองปริภูมิสถานะ (State space) ซึ่งได้ทำการนิยามค่าของ x_1, x_2, x_3, x_4 และ x_5

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } x_1 &= T_1 \\ x_2 &= T_2 \\ x_3 &= T_3 \\ x_4 &= T_4 \\ x_5 &= T_5 \end{aligned}$$

ดังนั้นสมการ State space ของสมการที่ (3.2) ถึง สมการที่ (3.6) สามารถเขียนได้ว่า

$$\dot{x} = Ax + Bu \tag{3.19}$$

$$y = Cx \tag{3.20}$$

เมื่อ

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\tau_1} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\tau_1} \\ \frac{K_2}{\tau_2} & -\frac{1}{\tau_2} & 0 & \frac{(1-K_2)}{\tau_2} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{\tau_3} & \frac{1}{\tau_3} & 0 \\ 0 & \frac{(1-K_4)}{\tau_4} & \frac{k_4}{\tau_4} & -\frac{1}{\tau_4} & 0 \\ 0 & \frac{K_5}{\tau_5} & 0 & 0 & -\frac{1}{\tau_5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a_1 & 0 & 0 & 0 & b_1 \\ a_2 & -b_2 & 0 & c_2 & 0 \\ 0 & 0 & -b_3 & a_3 & 0 \\ 0 & c_4 & a_4 & -b_4 & 0 \\ 0 & b_5 & 0 & 0 & -a_5 \end{bmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$B = \begin{bmatrix} \frac{Qh}{\tau I_p f C} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c1 \cdot Qh \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ c5 \end{bmatrix}$$

$$C = [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0]$$

จากนั้นสามารถสร้างทรานเฟอร์ฟังก์ชันของ $\frac{x_4}{R(s)}$ โดยใช้สมการที่ (2.21)

เมื่อ $D = 0$

เมื่อได้เมตริกซ์ของ A B และ C แล้วจึงใช้โปรแกรมเมเปิลในการคำนวณ เลือกใช้ในสมการที่ (3.21)

ซึ่งจะได้ทรานเฟอร์ฟังก์ชันของแต่ละอินพุต และเอาต์พุต

$$H(s) = C \cdot (sI - A)^{-1} \cdot B \quad (3.21)$$

แต่เนื่องจาก T_{10} , T_{20} , T_{30} , T_{40} และ T_{50} เป็นอุณหภูมิเริ่มต้นของแต่ละสมการ รูปแบบสมการจึงเป็นดังสมการที่ (3.22)

$$H(s) = C \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} T_{10} \\ T_{20} \\ T_{30} \\ T_{40} \\ T_{50} \end{bmatrix} \cdot s \quad (3.22)$$

เมื่อทำแบบจำลองปริภูมิสถานะ (State space) ที่ 12 mA ของ T_1 , T_2 , T_3 , T_4 และ T_5 จะนำไปสร้าง ทรานเฟอร์ฟังก์ชันในเมทแอสลับ ซึ่งในที่นี้จะแสดงตัวอย่างของ 12 mA สมการที่ (3.23)

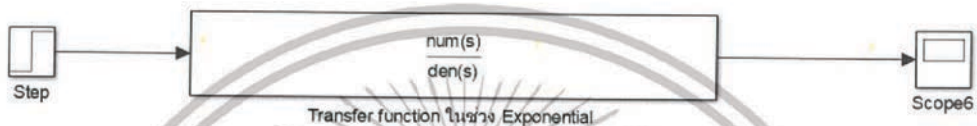
$$H(s) = \frac{N(s)}{D(s)} \quad (3.23)$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } N(s) = & 299.0056s^{14} + 46.25s^{13} + 9.127s^{12} + 0.8372s^{11} + 0.03808s^{10} \\ & + 0.0009179s^9 + 0.00001005s^8 - 3.27 \times 10^{-8}s^7 - 2.3708 \times 10^{-9}s^6 \\ & - 2.828 \times 10^{-11}s^5 - 1.285 \times 10^{-13}s^4 + 1.206 \times 10^{-1} s^3 \\ & + 2.929 \times 10^{-18}s^2 + 5.824 \times 10^{-21}s - 6.255 \times 10^{-24} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$D(s) = s^{14} + 0.1547s^{13} + 0.01045s^{12} + 0.0003988s^{11} + 9.172 \times 10^{-6}s^{10} + 1.183 \times 10^{-7}s^9 + 3.851 \times 10^{-10}s^8 - 1.447 \times 10^{-11}s^7 - 2.867 \times 10^{-1} s^6 - 2.641 \times 10^{-15}s^5 - 1.349 \times 10^{-17}s^4 - 3.424 \times 10^{-2} s^3 - 1.764 \times 10^{-23}s^2 + 5.889 \times 10^{-26}s - 1.353 \times 10^{-29}$$

นำชุดทรานเฟอร์ฟังก์ชันที่ได้ไปหาผลตอบสนองทางเวลาในการจำลองผ่านฟังก์ชัน Simulink โดยการใส่อินพุตเป็นฟังก์ชันขั้นบันได (Step function) ซึ่งหมายถึงการเปิดฮีตเตอร์ จะได้รูปที่ 3.16 และตัวอย่างของผลตอบสนองของ T_4 ดังรูป 3.17



รูปที่ 3.16 ทรานเฟอร์ฟังก์ชันของ T_4

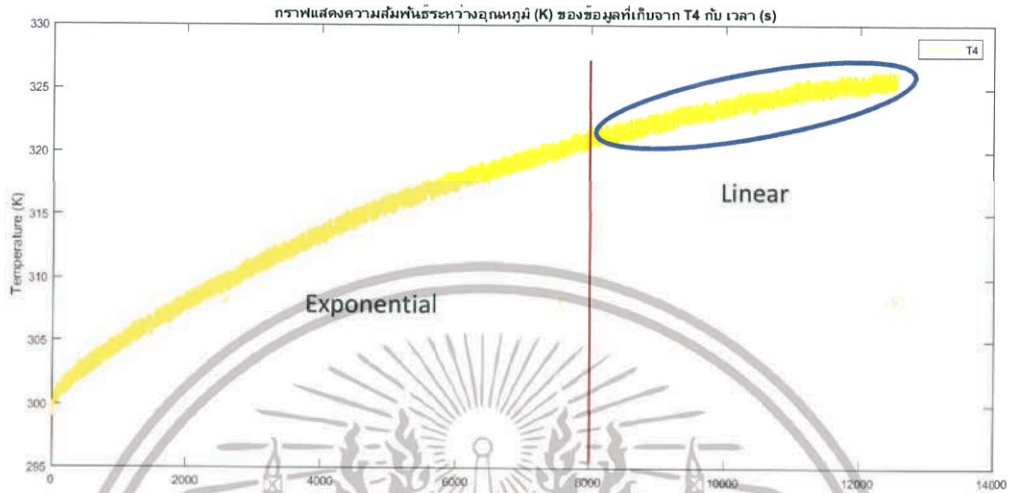


รูปที่ 3.17 ผลตอบสนอง ของ T_4 ที่ 12 mA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4.2 ฟังก์ชันเชิงเส้น (Linear)

เนื่องจากโมเดลที่ได้จากข้อมูลที่เก็บมาในช่วงที่สอง คือช่วงของความร้อนสะสมเป็นเชิงเส้น ดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 การแบ่งช่วงในการจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ ช่วงเส้นตรง

จึงพิจารณาในส่วนของความร้อนสะสมได้ตั้งสมการที่ (3.22)

$$\text{Accumulative heat reservoir} : Y_{n, \text{Accumulate}} = Y_{\text{model}}(t_{\text{linear}}) + \alpha(t_{\text{end}} - t_{\text{linear}}) \quad (3.22)$$

โดยที่ Y_n คือ ค่าอุณหภูมิความร้อนสะสมของสมการที่ (3.7) ถึงสมการที่ (3.11) (K)

$Y_{\text{model}}(t_{\text{linear}})$ คือ ค่าสุดท้ายของช่วงที่เป็นเอ็กโพเนนเชียล (K)

t_{linear} คือ เวลาที่จุดเริ่มเป็นเชิงเส้น (sec)

t_{end} คือ เวลาที่จุดสุดท้ายของข้อมูล (sec)

α คือ ค่าความชันของกราฟอุณหภูมิระหว่างเวลาสุดท้ายกับเวลาเริ่มต้น ($\frac{K}{\text{sec}}$)

ซึ่งค่าพารามิเตอร์ สามารถหาได้จากทำการระบุอัตลักษณ์ของระบบ เช่นเดียวกับในส่วนของเอกซ์โพเนนเชียลซึ่งค่าความชันของช่วงที่มีความร้อนสะสมเป็นเชิงเส้น นำไปบวกในทุกๆสมการตั้งแต่สมการที่ (3.12) ถึงสมการที่ (3.16) จะได้ดังนี้

ตารางที่ 3.4 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทำการระบุอัตลักษณ์ของระบบในช่วงเอกซ์โพเนนเชียล ที่ $t = 8000 \text{ sec}$

α_1	α_2	α_3	α_4	α_5
0.0021	0.0022	0.0022	0.0022	0.0021

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

α_1 = การพิจารณาในส่วน Linear ของโมเดลทางคณิตศาสตร์ ของอุณหภูมิ T_1

α_2 = การพิจารณาในส่วน Linear ของโมเดลทางคณิตศาสตร์ ของอุณหภูมิ T_2

α_3 = การพิจารณาในส่วน Linear ของโมเดลทางคณิตศาสตร์ ของอุณหภูมิ T_3

α_4 = การพิจารณาในส่วน Linear ของโมเดลทางคณิตศาสตร์ ของอุณหภูมิ T_4

α_5 = การพิจารณาในส่วน Linear ของโมเดลทางคณิตศาสตร์ ของอุณหภูมิ T_5

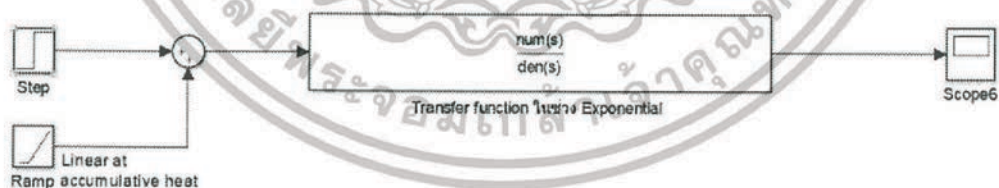
โดยจะนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการระบุอัตลักษณ์กลับไปแทนค่าในสมการที่ (2.2) ถึงสมการที่ (2.6) แล้วนำสมการที่ได้ไปสร้างทรานเฟอร์ฟังก์ชัน เพื่อดูกราฟผลตอบสนองของอุณหภูมิ และลาปลาซทรานสฟอร์มของความร้อนสะสมจะเป็นดังสมการที่ (3.23)

$$Y(s)_{n,Accumulate} = \frac{\alpha}{s^2} \quad (3.23)$$

หรือสามารถพิจารณาให้เป็น Ramp ได้
ดังนั้นจึงได้โมเดลของระบบซึ่งแบ่งตามช่วงเวลาได้ดังนี้

$$y_{total} = \begin{cases} y_{1,model} & 0 \leq t < t_{linear} \\ y_{1,accumulate} & t_{linear} < t < t_{end} \end{cases} \quad (3.24)$$

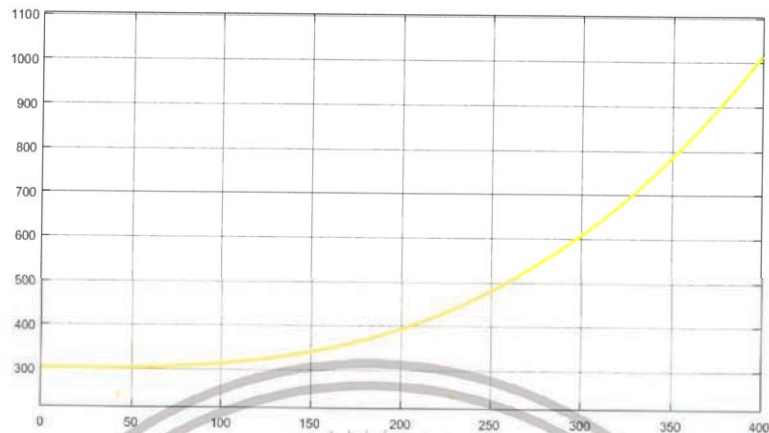
เมื่อพิจารณาในส่วนของเอกซ์โพเนนเชียล และส่วนที่เป็นเชิงเส้นรวมกันแล้วสามารถนำมาสร้างเป็นบล็อกทรานเฟอร์ฟังก์ชัน ได้ดังรูป 3.19



รูปที่ 3.19 ทรานเฟอร์ฟังก์ชันบล็อกของระบบที่มีความร้อนสะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

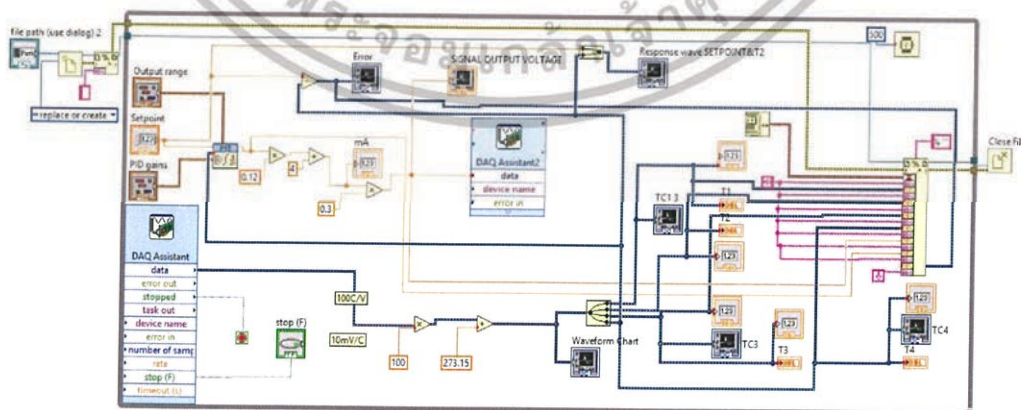
ซึ่งผลตอบสนองทางเวลาของ ทรานเฟอร์ฟังก์ชัน ของ T_d ที่ 12 mA มีลักษณะกราฟดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 ผลการตอบสนองทางเวลาของ T_d ที่มีความร้อนสะสม

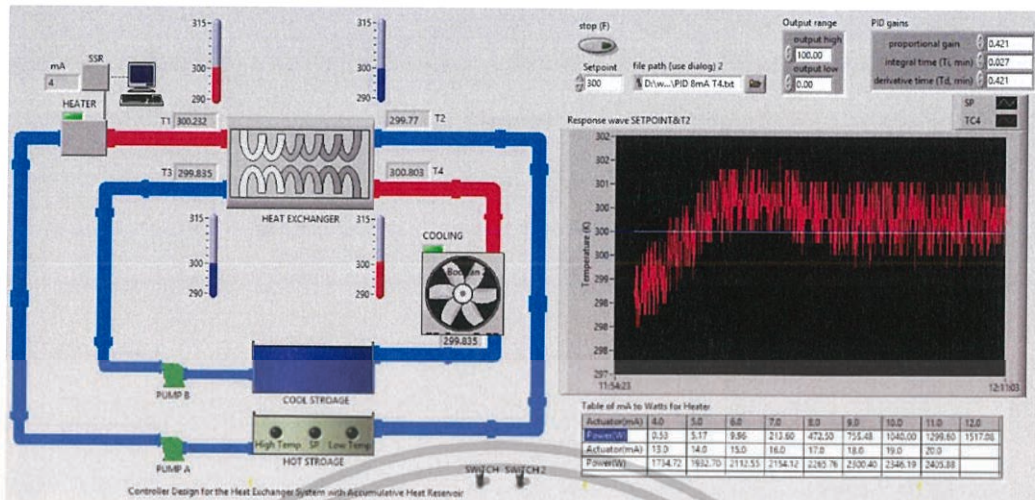
3.2.5 ตัวควบคุม (Controller)

ในส่วนของการควบคุมระบบแลกเปลี่ยนความร้อน จะทำการควบคุมผ่านเครื่องเก็บข้อมูลและแปลงสัญญาณ โดยเขียนคำสั่งผ่านโปรแกรมแล็บวิว ในการสร้างหน้าต่างแสดงผลและเก็บข้อมูลรวมถึงการป้อนค่า Set point และค่าพีเอ็ด ซึ่งเครื่องเก็บข้อมูลและแปลงสัญญาณ จะรับคำสั่งและปรับแรงดันไฟฟ้า ผ่านโมดูลแปลงแรงดันเป็นกระแสไปยังโซลิดสเตตตรีเลย์ เพื่อที่จะได้ทำการปรับกระแสที่ป้อนให้กับฮีตเตอร์ที่ใช้ในการควบคุม ซึ่งเป็นอุปกรณ์ตัวสุดท้าย (Final element) คำสั่งในการเขียนคำสั่งควบคุมผ่านเครื่องเก็บข้อมูลและแปลงสัญญาณ ประกอบด้วยส่วนควบคุม PID, กราฟแสดงผลตอบสนอง, ฟังก์ชันการเก็บข้อมูล, ฟังก์ชันการแปลงสัญญาณ นั้นจะเขียนได้ดังรูปที่ 3.21 และหน้าต่างการควบคุม ประกอบไปด้วยภาพรวมของระบบแลกเปลี่ยนความร้อน, ส่วนแสดงผล, หน้าต่างป้อนข้อมูล PID, Gain, Set point และ Output range จะเป็นดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.21 คำสั่งควบคุมในโปรแกรมแล็บวิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.22 หน้าแสดงผลการควบคุมของโปรแกรมแล็บวิว

หลังจากที่สามารถหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ภายในแพลน (Plant) ซึ่งจะได้สมการของแพลนที่ T_4 และนำสมการที่ได้นี้ไปทำการหาเพอร์ฟังก์ชัน และนำพารามิเตอร์ฟังก์ชันของแพลนคือ $H(S)_{plant}$ ของ T_4 สมการที่ (3.21) ที่เราสนใจไปเข้าโปรแกรมแม็ตแล็บ เพื่อทำการหาค่าโพล-ซีโร (Pole - Zero) ซึ่งในการควบคุมนั้น จะอาศัยหลักการในการหาโพลเด่น (Dominant poles) มาใช้ในการควบคุม ซึ่งสามารถหาได้ด้วยคำสั่งดังรูปที่ 3.23

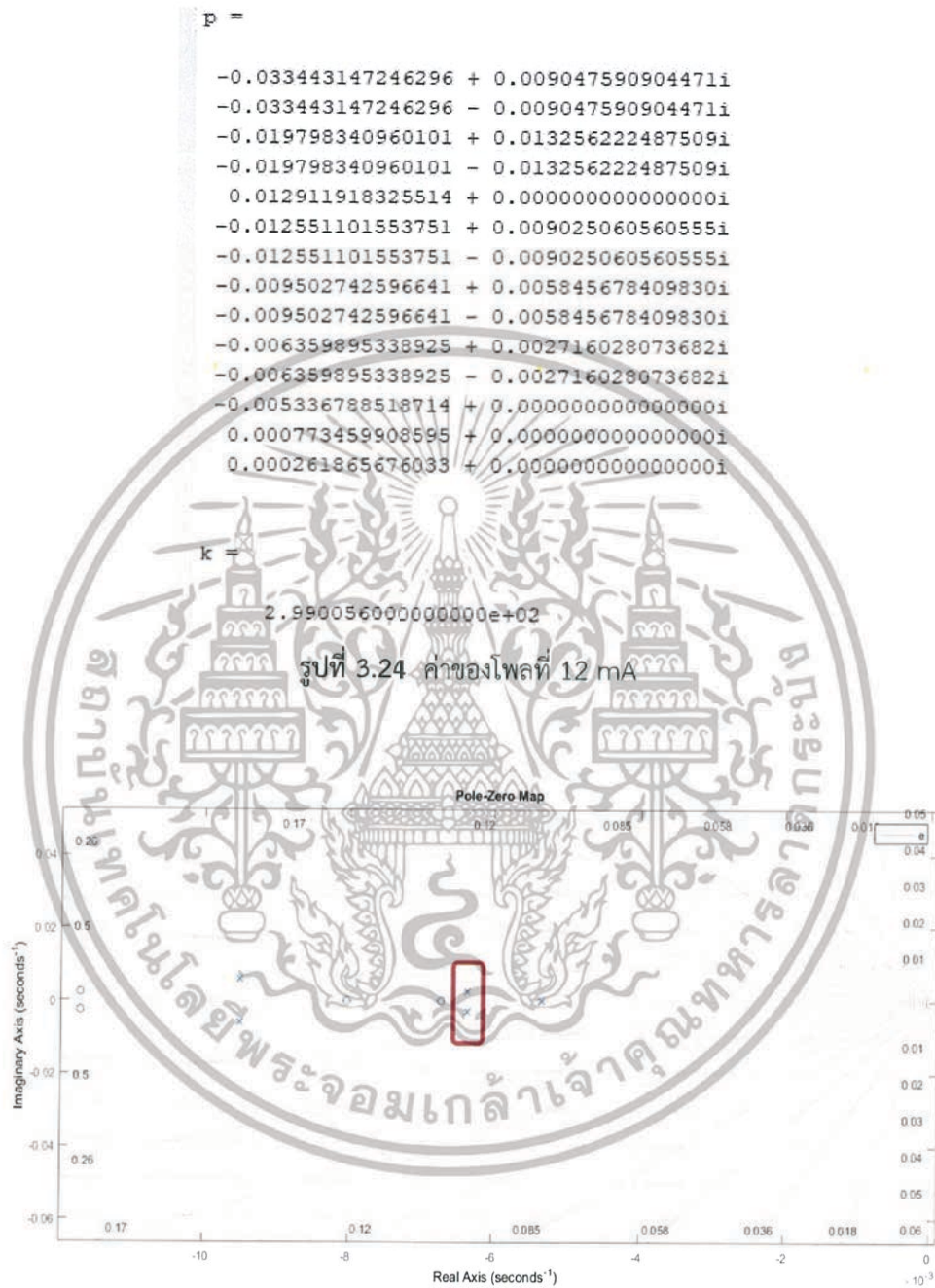
```

polezero10mA.m NUM_DEN2_12mA_T1800.m polezero12mA.m +
1 - clear all ; close all;
2
3 - format long
4 - num = [299.0056 46.25 9.127 0.8372 0.03808 0.0009179 0.00001005 -3.27e-08 -2.3708e-09
5 -2.829e-11 -1.285e-13 1.206e-16 2.929e-18 5.824e-21 -6.255e-24];
6 - den = [1 0.1547 0.01045 0.0003988 9.172e-06 1.183e-07 3.851e-10 -1.447e-11 -2.867e-13
7 -2.641e-15 -1.349e-17 -3.424e-20 -1.764e-23 5.889e-26 -1.353e-29];
8 - e = tf(num,den);
9 - [z,p,k] = tf2zp(num,den);
10
11 - pzmap(e)
12 - grid on
  
```

รูปที่ 3.23 การหาโพล-ซีโร ในแม็ตแล็บ ที่ 12 mA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรณนำไปใช้

ผลที่ได้จากการใช้โปรแกรมแมตแล็บดังรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.25 ตำแหน่งของโพลเด่น

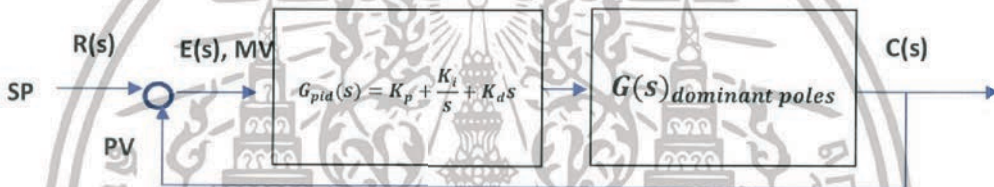
จากทฤษฎีของโพลเด่น คือจุดที่โพลวางอยู่ใกล้ ๆ กับแกนจินตภาพกว่าโพลตัวอื่น ๆ และไม่มีจุดซีโรอยู่ใกล้ ๆ กับโพลตัวนั้น ซึ่งโพลเด่นนี้จะมีผลต่อการควบคุมภายในระบบมากกว่าโพลที่จุดอื่น ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการหาตำแหน่งของโพลเด่น จะได้ดังตารางที่ 3.5
 ตารางที่ 3.5 ค่าโพลเด่นของแต่ละช่วงค่า mA

ช่วงค่า mA ที่ทำการเก็บข้อมูล	Dominant poles
8 mA	-0.00180+0.000200i และ -0.00180-0.000200i
10 mA	-0.00062+0.000018i และ -0.00062-0.000018i
12 mA	-0.00640+0.002700i และ -0.00640-0.002700i
14 mA	-0.00097+0.000410i และ -0.00097-0.000410i

เมื่อได้ค่าโพลเด่นที่จะนำมาใช้ในการควบคุมแล้ว จะทำการหาค่าพีไอดีได้จากนี้ ซึ่งในการควบคุมระบบแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีความร้อนสะสม ได้มีการหาค่าพีไอดีมาจากการทำทรานเฟอร์ฟังก์ชันที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังที่กล่าวไว้ในส่วนที่ 3.2.3 และ 3.2.4



รูปที่ 3.26 Close-loop transfer function ที่มีตัวควบคุมพีไอดี

โดยที่ Close loop transfer function ในทางทฤษฎีหรือระบบ คือ

$$H(s)_{system} = \frac{G(s)_{dominant}G(s)_{pid}}{1+G(s)_{dominant}G(s)_{pid}} = \frac{K_p s + K_d s^2 + K_i}{(s + \eta\omega_n)(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)} \quad (3.25)$$

และ Close loop transfer function ของแพลน คือ

$$H(s)_{plant} = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)_{dominant poles}G(s)_{pid}}{1+G(s)_{dominant poles}G(s)_{pid}} \quad (3.26)$$

จากการหาค่าโพลเด่น ที่ 12 mA จะได้ค่าอัตราขยายของแพลน หรือ $K = 299.0056$ และค่าโพลเด่นที่เลือกใช้ คือ $a = -0.0064 + 0.0027i$ และ $b = -0.0064 - 0.0027i$

$$G(s)_{dominant poles} = \frac{K}{(s-a)(s-b)} \quad (3.27)$$

$$G(s)_{dominant poles} = \frac{299.0056}{(s-0.0064+0.0027i)(s-0.0064-0.0027i)} \quad (3.28)$$

ทำ Close loop transfer function ของแพลนจากสมการที่ (3.26) จะได้

$$H(s)_{plant} = \frac{299.0056(K_p s + K_d s^2 + K_i)}{s^3 + 299.0056K_d s^2 + 0.0128s^2 + 299.0056K_p s + 4.825 \times 10^{-5} + 299.0056K_i s} \quad (3.29)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และสมการคุณลักษณะของแพลนคือ

$$\text{Characteristic} = s^3 + 299.0056K_d s^2 + 0.0128s^2 + 299.0056K_p s + 4.825 \times 10^{-5} + 299.0056K_i s \quad (3.30)$$

เมื่อได้ $H(s)_{plant}$ แล้ว ในขั้นต่อมาจะหา $H(s)_{system}$ ในสมการที่ (3.25) ซึ่งจะหาได้จากการกำหนดผลตอบสนองของของระบบที่คาดว่าจะน่าจะเป็น ซึ่งเกี่ยวข้องกับช่วงขาขึ้น (Rise time) และ ช่วงเวลาที่ระบบจะเข้าสู่สมดุล (Settling time) ซึ่งกำหนดได้ตามสมการที่ (3.33) และสมการที่ (3.34) และสมการคุณลักษณะของระบบ คือ

$$\text{Characteristic} = (s + n\zeta\omega_n) (s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2) \quad (3.31)$$

การออกแบบพารามิเตอร์ค่า n สำหรับการวางตำแหน่งโพลที่จุดใดๆใน Stable region

$$n = \frac{210}{\bar{\alpha}} \quad (3.32)$$

เมื่อ $\bar{\alpha} = \frac{1}{5} \sum_{j=1}^5 \alpha_j$

α_j เป็นค่าที่ได้จากตารางที่ 3.4

The rise time

$$t_r = \frac{\pi - \beta}{\omega_d} \quad (3.33)$$

The setting time

$$t_s = \frac{4}{\omega_n \zeta} \quad (3.34)$$

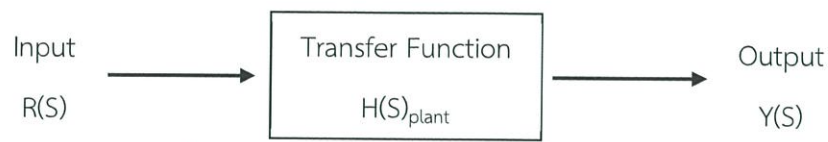
หรือ

$$t_r = \frac{\pi - \arctan\left(\frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta}\right)}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}} \quad (3.35)$$

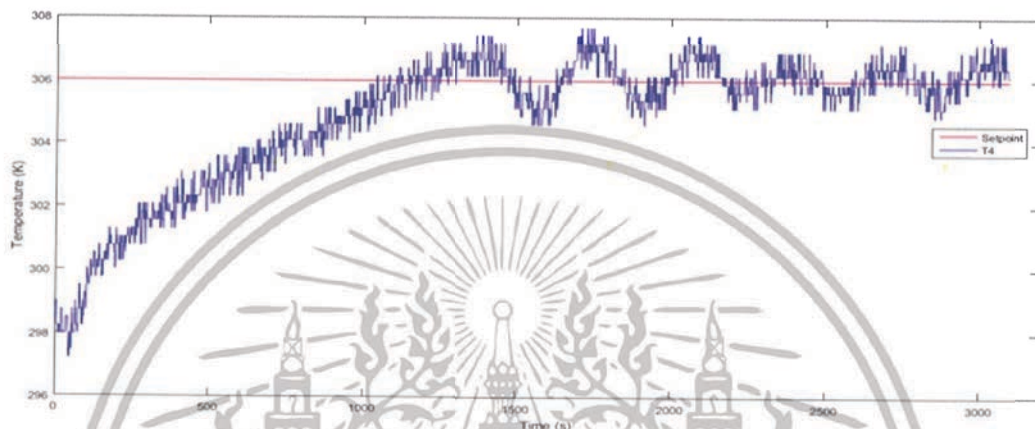
เมื่อ $\beta = \arctan\left(\frac{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}}{\omega_n \zeta}\right)$

ในการการออกแบบ The rise time (t_r) และ The setting time (t_s) สามารถเลือกค่าที่ได้ บนพื้นฐานของการวิเคราะห์ผลตอบสนองของ Open loop test โดยตรง ดังรูปที่ 3.28 โดยใช้วิธีลองผิดลองถูก กำหนดค่า $P = 1$ $I=0.05$ $D=0$ ซึ่งจะเห็นว่าระบบมีการตอบสนองค่อนข้างช้าและการเข้าจุด Set point นั้นใช้เวลานาน ดังรูปที่ 3.28 โดยค่า $t_r = 1200$ sec และ t_s มากกว่า 2500 sec เพื่อให้ได้ผลการตอบสนองที่ดีขึ้นจึงออกแบบให้ค่า t_r และ t_s นั้นมีค่าน้อยกว่าผลการตอบสนองปกติเพื่อให้ระบบเข้าถึงจุด Set point ได้เร็วมากขึ้นโดยทำการกำหนดค่า $t_r = 60$ sec และ $t_s = 160$ sec

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.27 Open loop test response ที่ 12 mA



รูปที่ 3.28 ผลตอบสนองของ Open loop test ที่ 12 mA

สำหรับใช้ทำการคำนวณหาค่าพีไอดี และจากรูปที่ 3.28 พิจารณาการจากวงโพลในตำแหน่งที่สามารถควบคุมได้ (Stable region) ที่ระยะ $\eta = 10^5$ เนื่องจากค่าโพลเด้นที่ได้นั้นมีระยะที่ใกล้กับแกนจินตภาพมากจึงกำหนดระยะ η ค่อนข้างมากเพื่อจะดึงโพลไปยังส่วนที่เสถียรภาพ ซึ่งหาได้จากการออกแบบค่าพารามิเตอร์ สามารถหาได้จากสมการที่ 3.32 และในหัวข้อที่ 3.2.4.2 หลังจากกำหนดค่าของผลตอบสนองชั่วคราวและค่า η แล้วจะหาค่าพารามิเตอร์ ζ, ω_n ของสมการคุณลักษณะ $H(s)_{system}$ และคำนวณหาค่า K_p, K_i และ K_d ที่ได้จากการเทียบสมการคุณลักษณะของแพลน คือสมการที่ (3.30) เทียบสัมพันธ์ของสมการที่ได้จากระบบ คือสมการที่ (3.36) ดังนี้

$$\begin{aligned} s^3 + 299.0056K_d s^2 + 0.0128s^2 + 299.0056K_p s + 4.825 \times 10^{-5} + 299.0056K_i s \\ \equiv (s + n\zeta\omega_n)(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2) \\ \equiv s^3 + 2500.05s^2 + 125.0031974s + 7.99.205698 \end{aligned} \quad (3.36)$$

ในการคำนวณหาค่า K_p, K_i และ K_d จะถูกแสดงดังนี้ โดยจะใช้โปรแกรมเมเปิ้ลในการคำนวณแสดงดังรูปที่ 3.29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} &> \text{restart} \\ &> K := 2.9900560000000000e+02 \\ &\quad\quad\quad K := 299.00560000000000 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} &> a := -0.006359895338925 + 0.002716028073682I \\ &\quad\quad\quad a := -0.006359895338925 + 0.002716028073682I \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} &> b := -0.006359895338925 - 0.002716028073682I \\ &\quad\quad\quad b := -0.006359895338925 - 0.002716028073682I \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} &> Gdom := \frac{K}{(s-a)(s-b)} \\ Gdom := 299.00560000000000 / ((s + 0.006359895338925 \\ &\quad - 0.002716028073682I)(s + 0.006359895338925 \\ &\quad + 0.002716028073682I)) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} &> Gpid := Kp + \frac{Ki}{s} + Kd \cdot s \\ &\quad\quad\quad Gpid := Kp + \frac{Ki}{s} + Kd \cdot s \end{aligned} \quad (5)$$

$$> G := \frac{Gdom \cdot Gpid}{1 + Gdom \cdot Gpid}$$

$$\begin{aligned} G := & \left(299.00560000000000 \left(Kp + \frac{Ki}{s} + Kd \cdot s \right) \right) / \left((s + 0.006359895338925 \right. \\ & + 0.002716028073682I)(s + 0.006359895338925 \\ & + 0.002716028073682I) \left(\left(299.00560000000000 \left(Kp + \frac{Ki}{s} \right. \right. \right. \\ & \left. \left. \left. + Kd \cdot s \right) \right) / \left((s + 0.006359895338925 - 0.002716028073682I)(s \right. \right. \\ & \left. \left. + 0.006359895338925 + 0.002716028073682I) + 1 \right) \right) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} &> B := \text{factor}(G) \\ B := & (299.0056000 (Kd s^2 + Kp s + Ki)) / (299.0056000 Kd s^2 \\ & + 299.0056000 Kp s + 299.0056000 Ki + s^3 + 0.01271979068 s^2 \\ & + 0.00004782507722 s) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} &> A := \text{factor}(299.0056000 Kd s^2 + 299.0056000 Kp s + 299.0056000 Ki + s^3 \\ &\quad + 0.01271979068 s^2 + 0.00004782507722 s) \\ A := & 299.0056000 Kd s^2 + 299.0056000 Kp s + 299.0056000 Ki + s^3 \\ & + 0.01271979068 s^2 + 0.00004782507722 s \end{aligned} \quad (8)$$

รูปที่ 3.29 การใช้โปรแกรมเมเปิ้ลในการคำนวณหาค่าพีโอดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} > \text{coeff}(A, s^2) \\ & 299.0056000 \text{ Kd} + 0.01271979068 \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} > G\text{formula} := (s + 10^5 \zeta \omega) (s^2 + 2 \zeta \omega s + \omega^2) \\ G\text{formula} := s(\omega^2 + s^2 + 2 \zeta \omega s) + 100000 \zeta \omega (\omega^2 + s^2 + 2 \zeta \omega s) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} > G\text{formula} := \text{expand}((s + 10^5 \cdot \zeta a \cdot \omega a) \cdot (s^2 + 2 \zeta a \cdot \omega a \cdot s + \omega a^2)) \\ G\text{formula} := s^3 + 2500.050000 s^2 + 125.0031974 s + 7.993528698 \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} > \text{coeff}(G\text{formula}, s^1) \\ & 200000 \zeta a^2 \omega a^2 + \omega a^2 \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} > \# \text{formula} := s^3 + 3 \zeta \omega s^2 + (\omega^2 + 2 \zeta^2 \omega^2) s + \zeta \omega^3 \\ > tr := 40 \\ & tr := 40 \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} > ts := 160 \\ & ts := 160 \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} > eq1 := ts = \frac{4}{(\text{zetaeta} \cdot \omega)}; \\ eq1 := 160 = \frac{4}{\zeta \omega} \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} > k := \text{sqrt}(1 - \text{zetaeta}^2); \\ k := \sqrt{-\zeta^2 + 1} \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} > eq2 := tr = \frac{(\text{Pi} - \arctan(\frac{k}{\text{zetaeta}}))}{(\omega \cdot k)}; \\ eq2 := 40 = \frac{\pi - \arctan\left(\frac{\sqrt{-\zeta^2 + 1}}{\zeta}\right)}{\omega \sqrt{-\zeta^2 + 1}} \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} > \text{fsolve}(\{eq1, eq2\}); \\ \{\omega = 0.05654565836, \zeta = 0.4421205929\} \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} > \omega a := 0.05654565836 \\ & \omega a := 0.05654565836 \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} > \zeta a := 0.4421205929 \\ & \zeta a := 0.4421205929 \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} > \text{solve}(\{\text{coeff}(A, s, 2) = \text{coeff}(G\text{formula}, s, 1)\}, Kd) \\ \{Kd = 0.4176950391\} \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} > \text{solve}(\{\text{coeff}(A, s, 1) = \text{coeff}(G\text{formula}, s, 1)\}, Kp) \\ \{Kp = 0.4177071009\} \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} > \text{solve}(\{\text{coeff}(A, s, 0) = \text{coeff}(G\text{formula}, s, 0)\}, Ki) \\ \{Ki = 0.02671094705\} \end{aligned} \quad (23)$$

รูปที่ 3.29 (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการคำนวณและเทียบสัมประสิทธิ์ของสมการจะได้ค่าพีไอดี เป็นดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 ค่าพีไอดีที่ช่วงค่า 8 mA, 10 mA, 12 mA และ 14 mA

ช่วงข้อมูลที่เก็บ	Set point	P	I	D
8 mA	300 K	0.1189168326	0.00554432192	0.1189167614
10 mA	303 K	0.4198528102	0.02684815722	0.4198528102
12 mA	306 K	0.4180629044	0.02673370899	0.4180629932
14 mA	310 K	0.4173514827	0.02668820000	0.4173450050

จากตารางที่ 3.6 เป็นเพียงตัวอย่างการกำหนด Set point และเลือกใช้ค่าพีไอดีที่ช่วงต่าง ๆ โดยการเลือกใช้ค่าพีไอดีที่คำนวณได้มานั้น จะพิจารณาจากช่วงอุณหภูมิในแต่ละช่วงที่ทำการเก็บข้อมูล โดยที่ช่วงอุณหภูมิของ Set point ถ้ามีค่าระหว่างช่วงอุณหภูมิที่ 298 K – 301 K จะได้ 300 K จะเห็นได้ว่าอยู่ในช่วงอุณหภูมิของ 8 mA จึงเลือกใช้พีไอดีที่ 8 mA สำหรับค่า Set point อื่น ๆ นั้น สามารถเลือกใช้ค่าพีไอดีตามช่วงอุณหภูมิ ดังตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 ค่าพีไอดีที่ช่วงค่าอุณหภูมิต่าง ๆ

ช่วงข้อมูลที่เก็บ	ช่วงอุณหภูมิ	P	I	D
8 mA	298 K – 301 K	0.1189168326	0.00554432192	0.1189167614
10 mA	302 K – 304 K	0.4198528102	0.02684815722	0.4198528102
12 mA	305 K – 308 K	0.4180629044	0.02673370899	0.4180629932
14 mA	309 K – 312 K	0.4173514827	0.02668820000	0.4173450050

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

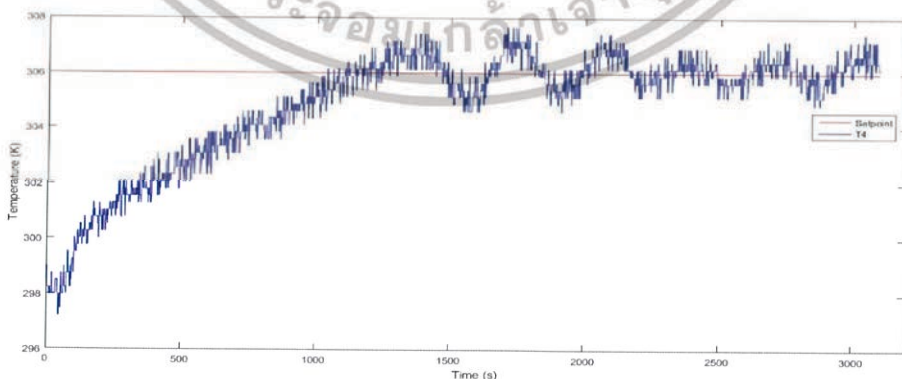
จากการศึกษาการนำสมการทางคณิตศาสตร์ มาประยุกต์ใช้ในการออกแบบระบบควบคุม เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีความร้อนสะสม เพื่อนำมาใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ของสมการและค่าพีไอดี และนำสมการและค่าพีไอดี ที่ได้มาใช้ในการควบคุมระบบโดยคำนึงถึงความร้อนสะสมว่าจะสามารถควบคุมระบบให้เข้าสู่ค่า Set point ซึ่งในการทดลองนี้ได้พบปัญหาการควบคุมในสถานะที่ไม่มีเสถียรภาพ (Unstable) เนื่องจากความร้อนที่สะสมภายในระบบ ซึ่งมักจะถูกใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพตัวควบคุม เช่น Inverted pendulum system ในปริญญาโทนี้ได้ทำการออกแบบระบบควบคุมอย่างง่ายจากการทำ Simplified modeling เพื่อควบคุมระบบที่ทำการศึกษา และเลือกใช้คำสั่ง trapz(T,abs(error)) ในการระบุค่า Integral Absolute Error หรือ IAE ซึ่งสามารถวัดประสิทธิภาพของการควบคุมได้ ดังสมการที่ (4.1)

$$e(t) = \int_{-\infty}^{\infty} |Error|^2 dt \quad (4.1)$$

เมื่อ $Error = Set\ point - T_4\ Steady\ stage$

ผลการทดลองนี้จะแสดงให้เห็นตัวอย่างการควบคุมชุดข้อมูลที่ 12 mA ที่ Set point 306 K ในส่วนของการใช้ค่าพีไอดีเริ่มต้น และค่าพีไอดี ที่ได้จากการคำนวณทางคณิตศาสตร์

ในตอนตั้งต้นนั้นใช้ค่าพีไอดีจากวิธีลองผิดลองถูก คือ $P = 1, I = 0.05$ และ $D = 0$ เมื่อกำหนดเป็น Open loop test โดยควบคุมผ่านโปรแกรมแล็บวิว และส่งคำสั่งผ่านเครื่องเก็บข้อมูล และแปลงสัญญาณเข้าสู่ระบบเพื่อดูผลตอบสนองของระบบในตอนแรกเริ่ม จะได้ผลดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 กราฟผลการควบคุมโดยใช้ค่าพีไอดีในตอนแรกเริ่มที่ 306 K

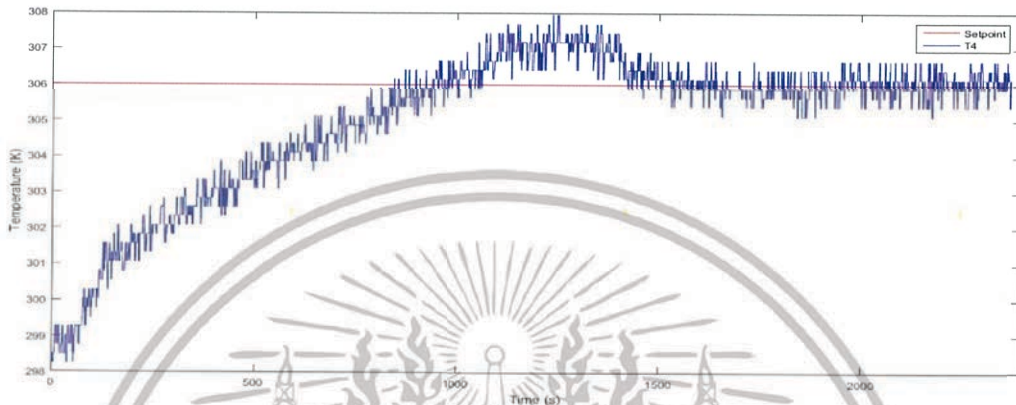
จากรูปที่ 4.1 พบว่ามีการ Oscillate ของข้อมูล และมีค่า IAE = 399.6302

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจากการคำนวณพีไอดี ด้วยกระบวนการทางคณิตศาสตร์ที่ $t_r = 40$ s และ $t_s = 160$ s

มี $P = 0.4180629044$, $I = 0.02673370899$ และ $D = 0.4180629932$

เมื่อมีการนำค่าพีไอดี ที่ได้จากการคำนวณมาใช้ในการควบคุมที่ Set point 306 K จะได้ผลตอบสนองดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 กราฟผลการควบคุมด้วยพีไอดีที่ Set point 306 K ของชุดข้อมูลที่ 12 mA

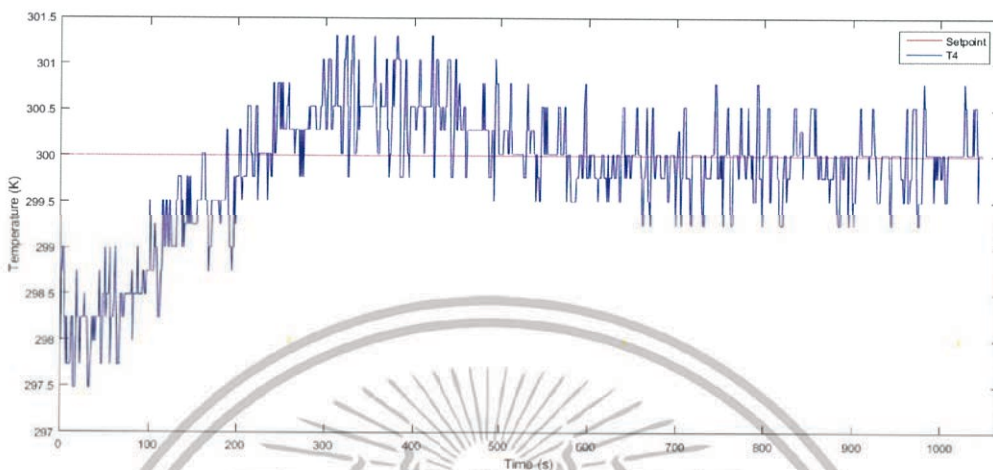
จากรูปที่ 4.2 พบว่ามีการลู่เข้าสู่ Set point ตามกำหนด ค่า IAE = 46.2535 และค่า Gains ที่ได้จากการคำนวณพบว่าให้ค่า IAE น้อยกว่า เนื่องจากไม่มีการ Oscillate หลัง $t > 1700$ sec และจากขั้นตอนการดำเนินงานในบทที่ 3 ค่าพีไอดีในแต่ละช่วงข้อมูล (mA) หรือที่ Set point (K) อื่น ๆ ที่ $t_r = 40$ sec และ $t_s = 160$ sec จะแสดงได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าพีไอดีที่ช่วงข้อมูลที่ 8 mA, 10 mA, 12 mA, 14 mA และ Set point

ช่วงข้อมูลที่เก็บ	Set point	P	I	D
8 mA	300 K	0.1189168326	0.00554432192	0.1189167614
10 mA	303 K	0.4198528102	0.02684815722	0.4198528102
12 mA	306 K	0.4180629044	0.02673370899	0.4180629932
14 mA	310 K	0.4173514827	0.02668820000	0.4173450050

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

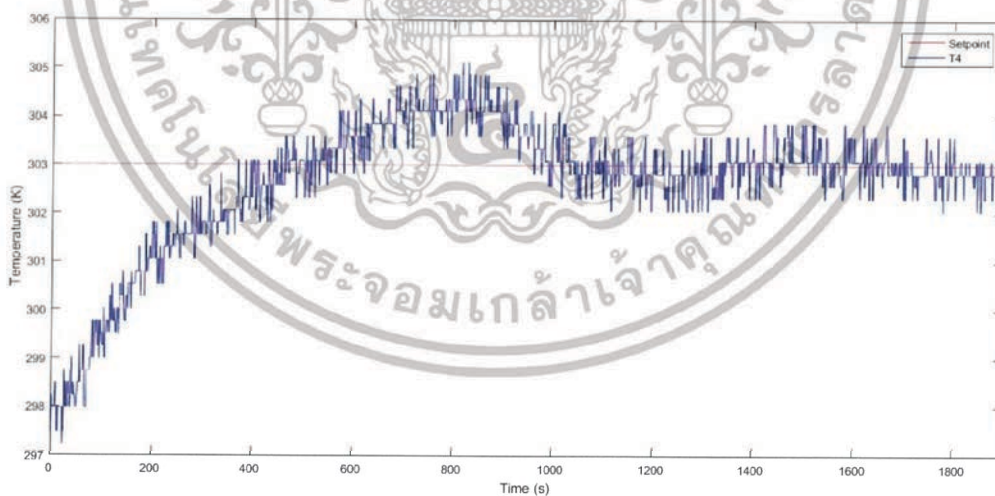
และกราฟผลตอบสนองของระบบที่ค่า Set point ต่าง ๆ จะแสดงดังรูปที่ 4.3 ถึงรูปที่ 4.5
เมื่อกำหนด Set point ที่ 300 K หรือช่วงข้อมูลที่ 8 mA จะได้ผลตอบสนองดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 กราฟผลการควบคุมด้วยพีไอดีที่ Set point 300 K ของชุดข้อมูลที่ 8 mA

จากรูปที่ 4.3 พบว่ามีการลู่เข้าสู่ Set point ตามกำหนด และมีค่า IAE = 34.0854

กำหนด Set point ที่ 303 K หรือช่วงข้อมูลที่ 10 mA จะได้ผลตอบสนองดังรูปที่ 4.4

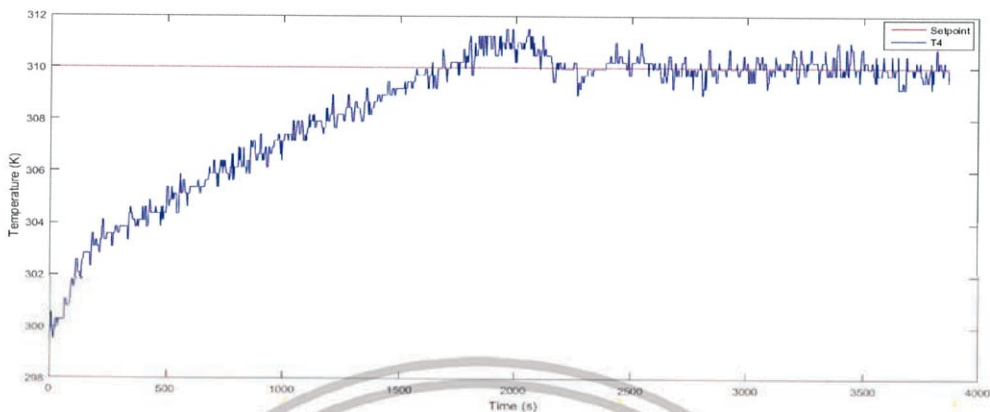


รูปที่ 4.4 กราฟผลการควบคุมด้วยพีไอดีที่ Set point 303 K ของชุดข้อมูลที่ 10 mA

จากรูปที่ 4.4 พบว่ามีการลู่เข้าสู่ Set point ตามกำหนด และมีค่า IAE = 41.0956

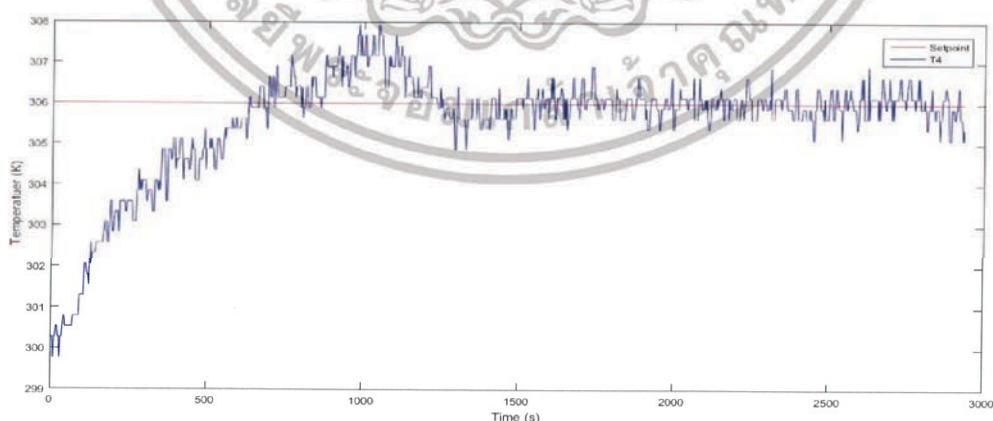
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนด Set point ที่ 310 K หรือช่วงข้อมูลที่ 14 mA จะได้ผลตอบสนองดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ผลการควบคุม พีโอดี ที่ Set point 310 K ของชุดข้อมูลที่ 14 mA

จากรูปที่ 4.5 พบว่ามีการเข้าสู่ Set point ตามกำหนด และมีค่า $IAE = 80.5601$ จะสังเกตได้ว่าการกำหนดค่า $t_r = 40$ sec และ $t_s = 160$ sec ในช่วงของการกำหนดค่า Set point ที่สูงขึ้น จะมีการใช้เวลานานขึ้นก่อนเข้าสู่สภาวะคงตัว เมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างรูปที่ 4.3 ที่ Set point 300 K และรูปที่ 4.4 ที่ Set point 303 K จะมีการใช้เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวที่เร็วกว่า รูปที่ 4.5 ที่มี Set point 310 K อาจเป็นเพราะข้อจำกัดของ Heater รวมถึงการใช้ค่าที่เหมาะสมในการคำนวณค่า พีโอดี และถ้าหากกำหนดค่า t_r หรือ t_s โดยพยายามให้ใช้เวลาเข้า Steady state น้อยลงจะพบว่าการาฟที่แสดงจะเกิดการ Oscillate ในบางค่า ดังตัวอย่างเช่นที่ Set point ที่ 306 K ของชุดข้อมูลที่ 12 mA กำหนด $t_r = 30$ sec และ $t_s = 140$ sec ค่า $P = 0.5460447$, $I = 0.049400634$ และ $D = 0.049400634$ จะได้ผลตอบสนองดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ผลการควบคุมพีโอดีที่ Set point 306 K ของชุดข้อมูลที่ 12 mA

ขณะกำหนดค่า $t_r = 30$ sec และ $t_s = 140$ sec

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.6 พบว่ายังมีการ Oscillate ของข้อมูลอยู่เล็กน้อย ในช่วงเวลาดั้งแต่ 1500 sec ถึง 3000 sec และมีค่า IAE = 210.1090

จากผลของ Integral Absolute Error (IAE) จะพบว่าค่า IAE มีความสัมพันธ์กับการ Oscillate ของกราฟตอบสนองในช่วงเข้า Steady state ซึ่งจากข้อมูลจะเห็นได้ว่าที่รูป 4.1 กราฟผลตอบสนองมี Oscillate ซึ่งจะมีค่า IAE = 399.6302 ซึ่งค่า IAE ค่อนข้างสูง ต่างจากรูปที่ 4.2 กราฟผลตอบสนองมี Oscillate น้อย ค่า IAE = 46.2535 จะมีค่าน้อยลงตามไปด้วย จึงสามารถมองเป็นตัวช่วยในการชี้วัดได้ และเนื่องจากข้อมูลที่เก็บได้มีสัญญาณรบกวน (เช่น Encoder noise และ Quantization ของอุปกรณ์ A/D) ค่า IAE จึงมีค่าค่อนข้างสูง แต่ก็ยังคงใช้ในการเปรียบเทียบได้และจากผลที่ได้จะทำการวิเคราะห์ สรุปผล และทำการเสนอแนะต่อไปในบทที่ 5



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองจะเห็นว่า การนำคณิตศาสตร์มาประยุกต์ใช้ ในการออกแบบระบบควบคุม สามารถนำเอาวิธี การระบุอัตลักษณ์ของระบบ หรือการระบุเอกลักษณ์ของระบบ มาช่วยในการหาค่าพารามิเตอร์ในสมการคณิตศาสตร์ของระบบได้และนำสมการที่ได้ไปทำการหาค่าพีไอดี ได้โดยใช้วิธีการหาโพลเด่น เนื่องด้วยระบบเป็น Higher order ซึ่งในความเป็นจริงแล้วการทำ Fine tuning ยังจำเป็น แต่การทดลองปรับค่าพีไอดี ด้วยการสุ่มอาจจะใช้เวลานาน ซึ่งนานมากกว่าการคำนวณที่จะได้ค่าพีไอดี ที่จะทำให้มีความใกล้เคียงความจริงกว่าวิธีการสุ่ม ค่าพีไอดีที่ได้จากตารางที่ 4.1 สามารถนำมาใช้ในการควบคุมระบบให้ระบบมีผลตอบสนองให้มีเสถียรภาพ และมีประสิทธิภาพมากขึ้น

5.2 ปัญหาที่พบในระหว่างการดำเนินงาน และแนวทางแก้ปัญหา

ปัญหาที่พบคือระบบแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีความร้อนสะสม ที่ในปริศยานิพนธ์นี้ใช้ทำการทดสอบ อาจจะแตกต่างไปจากระบบแลกเปลี่ยนความร้อนแบบปกติที่พบได้ทั่วไป (Conventional heat exchanger plant) ในแง่ที่มีการสะสมความร้อน ซึ่งทำให้เกิดสถานะที่ไม่มีเสถียรภาพ (Unstable) ในปริศยานิพนธ์นี้จึงได้เสนอทำการออกแบบระบบควบคุมอย่างง่ายจากการลดความซับซ้อนจากการสร้างแบบจำลอง (Simplified modeling) เพื่อระบบในสภาวะแบบนี้

5.3 ข้อเสนอแนะ

1) การใช้การระบุอัตลักษณ์ของระบบ ยังพบข้อจำกัดในการนำมาประยุกต์ใช้ เนื่องจากถ้าระบบมีการเปลี่ยนวัสดุอุปกรณ์ หรือมีการเปลี่ยนแปลงกับระบบเกิดขึ้น จะต้องทำการเก็บค่าข้อมูล และนำมาวิเคราะห์ใหม่ตั้งแต่เริ่มต้น และการใช้การระบุอัตลักษณ์ของระบบ ควรมีการตรวจสอบค่าที่ได้ออกมาว่าถูกต้องหรือไม่ ก่อนที่จะทำการควบคุมกับระบบจริง ซึ่งอาจจะตรวจสอบได้ยากถ้าระบบมีตัวแปรค่อนข้างมาก แต่ก็สามารถช่วยลดเวลาในการปรับค่าพีไอดีในการควบคุมได้

2) สามารถเขียนคำสั่งให้ระบบปรับค่าพีไอดีอัตโนมัติได้ โดยอาจเลือกใช้วิธีการโดยการเลือกใส่ Fuzzy rule เข้าไปเพิ่ม ซึ่งเรียกว่า Fuzzy supervisory control โดยที่การทำงานคือจะพิจารณาจากเอาต์พุตว่าอยู่ในช่วงใดที่กำหนดแล้วแล้วทำการปรับค่าพีไอดีให้เหมาะสม เช่น เมื่อ Error ที่เข้าใกล้ Set point ไม่เกินค่าที่กำหนด จะทำให้ค่า K_i หรือ K_d ลดหรือเพิ่มตามความเหมาะสมของค่าที่กำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และ ศาสตราจารย์เกียรติคุณ ดร.นิธิยา รัตนูปนนท์, “เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น / Plate heat exchanger”, [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา : <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0929/เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น-plate-heat-exchanger> (สืบค้นเมื่อ 28 สิงหาคม 2561)
- [2] T.Darure, J.Mallet J. Richalet, “Predictive Functional Control of counter current heat exchangers”, 2014.
- [3] “บทที่7 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchangers)”, 11 September 2555. [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา : http://www.completesengineering.com/style/article_heat%20xchanger1.pdf (สืบค้นเมื่อ 3 กันยายน 2561)
- [4] “Datasheet : Brazed Plate Heat Exchanger”, 2552. [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา : <https://www.alfataval.com/globalassets/documents/industries/refrigeration/brazed-plate-heat-exchangers.pdf> (สืบค้นเมื่อ 4 กันยายน 2561)
- [5] หจก.เชียงใหม่แอร์แคร์เอ็นจิเนียริง, “ฮีตเตอร์ (Heater) คืออะไร และเจ้าสิ่งนี้มีหน้าที่เอาไว้ใช้ทำอะไรได้อะไรบ้าง”, [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา : <http://www.chiangmaiaircare.com/ฮีตเตอร์-heater-คืออะไร-และเจ้าสิ่งนี้มีหน้าที่เอาไว้ใช้ทำอะไรได้อะไรบ้าง/> (สืบค้นเมื่อ 10 กันยายน 2561)
- [6] สุพริ้มไลนส์, “ฮีตเตอร์ต้มน้ำ (Immersion Heater)”, [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา : <http://ฮีต-เตอร์.com/ฮีตเตอร์ต้มน้ำ.html> (สืบค้นเมื่อ 11 กันยายน 2561)
- [7] P. Marian, “LM35 Datasheet”, 2012. [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา : <https://www.electroschematics.com/6393/lm35-datasheet/> (สืบค้นเมื่อ 11 กันยายน 2561)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [8] “G1 Water Flow Sensor”, [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา :
https://www.openhacks.com/uploads/productos/g1__water_flow_sensor_-_wiki.pdf (สืบค้นเมื่อ 11 กันยายน 2561)
- [9] Embedded Control, “รู้จักกับ DAQ (Data Acquisition)”, 2555 [ระบบออนไลน์]
 แหล่งที่มา : <http://embeddedcontrol.blogspot.com/2012/08/daq-system.html>
 (สืบค้นเมื่อ 12 กันยายน 2561)
- [10] พิพัฒน์, “โปรแกรม Labview คืออะไร” [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา :
<http://www.labview-developer.com/Article/Detail/62495>
 (สืบค้นเมื่อ 17 กันยายน 2561)
- [11] “Matlab for Thai people”, 5 APRIL 2013. [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา :
<http://matabthai.blogspot.com/2013/04/matlab.html>
 (สืบค้นเมื่อ 17 กันยายน 2561)
- [12] รองศาสตราจารย์ ดำรง ทิพย์โยธา, “คู่มือโปรแกรมสำเร็จรูป”, กรุงเทพฯ :
 โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2546.
- [13] Technical Communications, “USER GUIDE DAQ NI USB-6008/6009”, 2558
 [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา : <http://www.ni.com/pdf/manuals/371303n.pdf>
 (สืบค้นเมื่อ 12 กันยายน 2561)
- [14] Armando Corripio, Carlos A. Smith, “Principles and Practice of
 Automatic Process Control”, United States : Wiley Publishing, Inc. 2006.
- [15] Napasool Wongvanich, Viriya Kongratana, “Integral based Algorithm for
 Parameter Identification of the Heat Exchanger”, 2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [16] ME KMUTT, “System identification”, 3 APRIL 2010. [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา : <http://mechanic-top.blogspot.com/2010/04/system-identification.html> (สืบค้นเมื่อ 2 ตุลาคม 2561)
- [17] “Modeling in StateSpace”, 21 JANUARY 2009. [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา : http://eng.sut.ac.th/me/meold/3_2551/425308/new%20425308/ACS10-51.pdf (สืบค้นเมื่อ 26 พฤศจิกายน 2561)
- [18] “Mathematical Modeling of Dynamics System”, [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา : <https://www.tcithaijo.org/index.php/parichartjournal/article/download/69967/56830/> (สืบค้นเมื่อ 27 พฤศจิกายน 2561)
- [19] kthanate, “Introduction to control systems”, 2547 [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา : <http://fivedots.coe.psu.ac.th/Software.coe/240-209/vcrcontrol.pdf> (สืบค้นเมื่อ 10 ธันวาคม 2561)
- [20] สุชาติ จันทร์จรมานิตย์, “ระบบควบคุม Control Systems”, 19 กันยายน 2555 [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา : <https://chantra2560.files.wordpress.com/2018/04/001253.pdf> (สืบค้นเมื่อ 20 ธันวาคม 2561)
- [21] G. F. Franklin, J. D. Powell, A. Emami-Naeini, “Feedback Control of Dynamic Systems”, Prentice Hall, 2016.
- [22] National Instruments (Thailand), “พีไอดี Theory Explained”, 29 MAR 2011 [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา : <http://www.ni.com/white-paper/3782/en/> (สืบค้นเมื่อ 7 มกราคม 2562)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [23] "การทดลองระบบควบคุมป้อนกลับ", [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา :
<http://www.itkomut.eng.chula.ac.th/ee331/lab6.pdf> (สืบค้นเมื่อ 20 ธันวาคม 2561)
- [24] Nasser M. Abbasi, "Determination of PID controller parameters", 30 JUNE 2015
 [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา : http://www.12000.org/my_notes/PID_ode/index.htm
 (สืบค้นเมื่อ 21 มกราคม 2562)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



omd ■ 800-648-3331
oliver m. dean, inc. ■ www.omdean.com

CB27/CBH27

Brazed Plate Heat Exchanger

General information

Alfa Laval introduced its first brazed plate heat exchanger (BHE) in 1977 and has since continuously developed and optimized its performance and reliability.

Brazing the stainless steel plates together eliminates the need for gaskets and thick frame plates. The brazing material seals and holds the plates together at the contact points ensuring optimal heat transfer efficiency and pressure resistance. The plate design guarantees the longest possible life.

The design options of the brazed heat exchanger are extensive. Different plate patterns are available for various duties and performance specifications. You can choose a standard configuration BHE, or a unit designed according to your own specific needs. The choice is entirely yours.

Typical applications

- HVAC heating/cooling
- Refrigerant applications
- Industrial cooling/heating
- Oil cooling

Working principles

The heating surface consists of thin corrugated metal plates stacked on top of each other. Channels are formed between the plates and corner ports are arranged so that the two media flow through alternate channels, usually in counter-current flow for the most efficient heat transfer process.

Standard design

The plate pack is covered by cover plates. Connections are located in the front or rear cover plate. To improve the heat transfer design, the channel plates are corrugated.

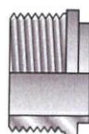


Particulars required for quotation

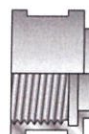
To enable Alfa Laval's representative to make a specific quotation, specify the following particulars in your enquiry:

- required flow rates or heat load
- temperature program
- physical properties of liquids in question
- desired working pressure
- maximum permitted pressure drop

Examples of connections



Outside threaded



Inside threaded



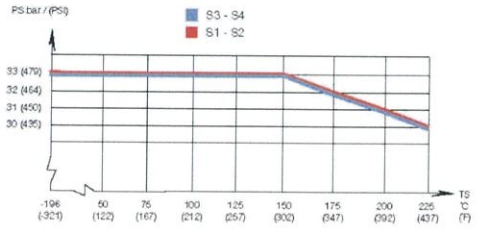
Soldering



Welding

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CB27 – PED approval pressure/temperature graph*

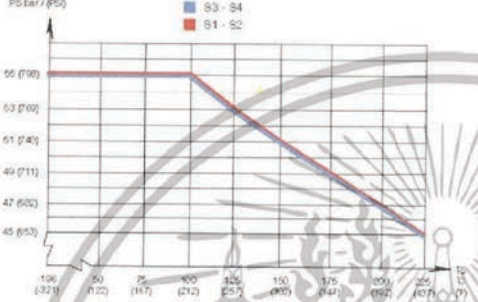


Standard data

Min. working temperature	see graph
Max. working temperature	see graph
Min. working pressure	Vacuum
Max. working pressure	see graph
Volume per channel, litres (ga)	0.05 (0.013)
Max. particle size mm (inch)	1.2 (0.05)
Max. flowrate m ³ /h (gpm)*	14.5 (64)
Min. no. of plates	6
Max. no. of plates	150

* Water at 6 m/s (16.4 ft/s) (connection velocity)

CBH27 – PED approval pressure/temperature graph*



Standard materials

Cover plates	Stainless steel
Connections	Stainless steel
Plates	Stainless steel
Brazing material	Copper

Standard dimension and weight*

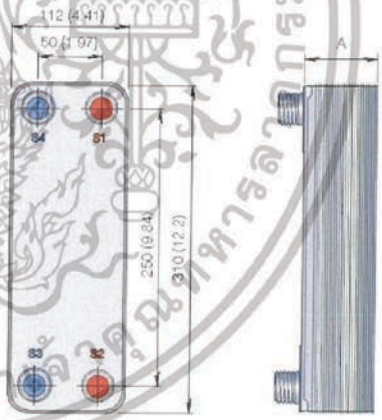
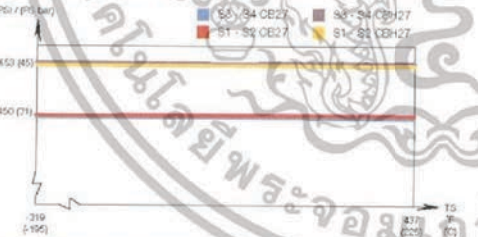
CB27	
A measure mm	= 9 + (n x 2.4) ± 3
A measure inch	= 0.35 + (n x 0.094) ± 0.12
Weight** kg	= 1 + (n x 0.13)
Weight** lb	= 2.2 + (n x 0.28)
CBH27	
A measure mm	= 13 + (n x 2.4) ± 3
A measure inch	= 0.51 + (n x 0.09) ± 0.12
Weight** kg	= 1.7 + (n x 0.13)
Weight** lb	= 3.75 + (n x 0.29)

** excluding connections
n = number of plates

CB27 – KHK approval pressure/temperature graph*



CB27 and CBH27 – UL approval pressure/temperature graph*



* For exact values please contact your local Alfa Laval representative

Alfa Laval reserves the right to change specifications without prior notification.

How to contact Alfa Laval
Up-to-date Alfa Laval contact details for all countries are always available on our website at www.alfalaval.com.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

G1" Water Flow Sensor

From Wiki

Contents

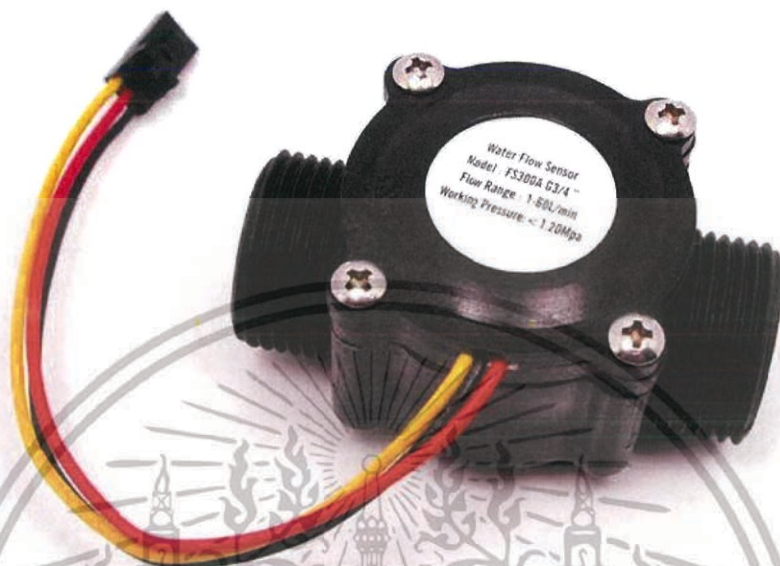
- 1 Introduction
- 2 Specification
- 3 Mechanic Dimensions
 - 3.1 Sensor Components
- 4 Usage Example
 - 4.1 Reading Water Flow rate with Water Flow Sensor
 - 4.1.1 Hardware Installation
 - 4.1.2 Programming
- 5 Wiring Diagram
- 6 Output Table
- 7 FAQ
- 8 Support
- 9 Version Tracker
- 10 Resource
- 11 See Also
- 12 Licensing
- 13 External Links

Introduction

Water flow sensor consists of a plastic valve body, a water rotor, and a hall-effect sensor. When water flows through the rotor, rotor rolls. Its speed changes with different rate of flow. The hall-effect sensor outputs the corresponding pulse Signal.

Model:SEN02141B (http://www.seeedstudio.com/depot/g34-water-flow-sensor-p-1083.html?cPath=144_151)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Specification

Mini Working Voltage	DC 4-5V
Max. Working Current	15mA(DC 5V)
Working Voltage	5V~24V
Flow Rate Range	1~60L/min
Load Capacity	≤10mA(DC 5V)
Operating Temperature	≤80°C
Liquid Temperature	≤120°C
Operating Humidity	35%~90%RH
Water Pressure	≤1.75MPa
Storage Temperature	-25°C~+80°C
Storage Humidity	25%~95%RH

Mechanic Dimensions

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sensor Components

No.	Name	Quantity	Material	Note
1	Valve body	1	PA66+33%glass fiber	
2	Stainless steel bead	1	Stainless steel SUS304	
3	Axis	1	Stainless steel SUS304	
4	Impeller	1	POM	
5	Ring magnet	1	Ferrite	
6	Middle ring	1	PA66+33%glass fiber	
7	O-seal ring	1	Rubber	
8	Electronic seal ring	1	Rubber	
9	Cover	1	PA66+33%glass fiber	
10	Screw	4	Stainless steel SUS304	
11	Cable	1	1007 24AWG	

Usage Example

Note: This example is abstracted from the forum, which was done by Charles Gantt. Thanks for his contribution. Let's see how it works.

Reading Water Flow rate with Water Flow Sensor

This is part of a project I have been working on and I thought I would share it here since there have been a few threads on how to read water flow rate in liters per hour using the Water Flow Sensor found in the Seeed Studio Depo. It uses a simple rotating wheel that pulses a hall effect sensor. By reading these pulses and implementing a little math, we can read the liquids flow rate accurate to within 3%. The threads are simple G3/4 so finding barbed ends will not be that hard.

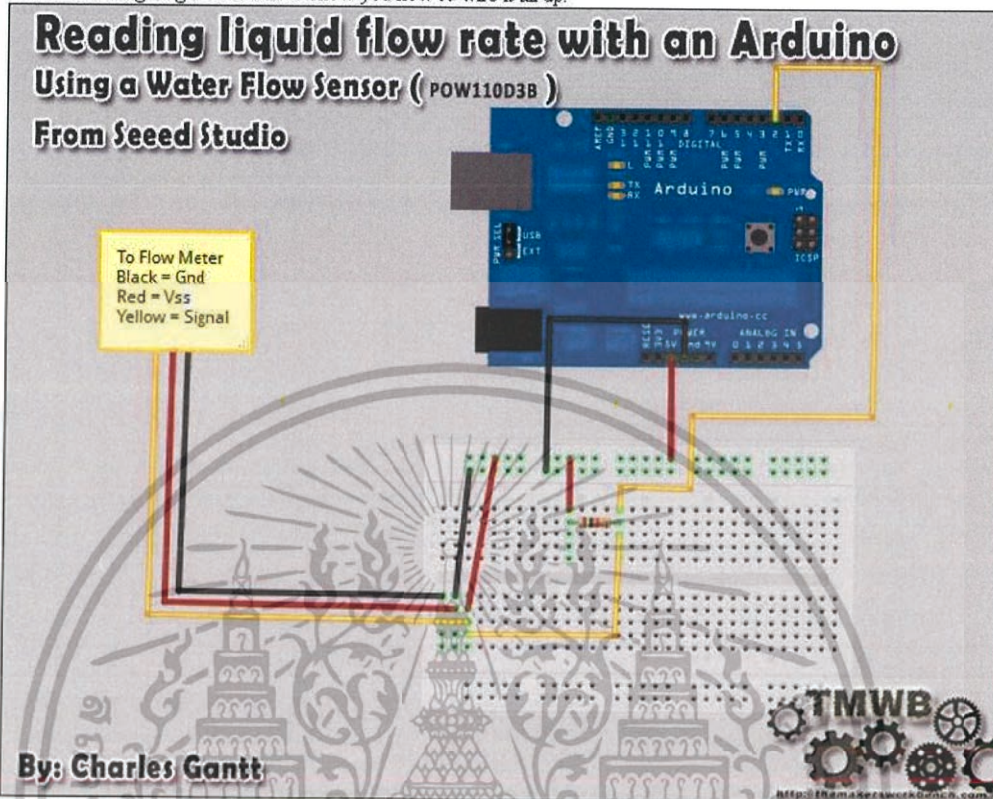
Hardware Installation

You will need Seeeduino / Arduino, Water-Flow Sensor, 10K resistor, a breadboard and some jumper wires.

Wiring up the Water Flow Sensor is pretty simple. There are 3 wires: Black, Red, and Yellow. Black to the Seeeduino's ground pin Red to Seeeduino's 5v pin The yellow wire will need to be connected to a 10k pull up resistor and then to pin 2 on the Seeeduino.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Here is a fritzing diagram I made to show you how to wire it all up.



Once you have it wired up you will need to upload the following code to your Seeeduno. Once it is uploaded and you have some fluid flowing through the Water Flow Sensor, you can open the serial monitor and it will display the flow rate, refreshing every second.

Programming

```
// reading liquid flow rate using Seeeduno and Water Flow Sensor from Seeedstudio.com
// Code adapted by Charles Gantt from PC Fan RPM code written by Crenn @thebestcasescenar
// http://themakersworkbench.com http://thebestcasescenario.com http://seeedstudio.com

volatile int NbTopsFan; //measuring the rising edges of the signal
int Calc;
int hallsensor = 2; //The pin location of the sensor

void rpm () //This is the function that the interrupt calls
{
  NbTopsFan++; //This function measures the rising and falling edge of the
  hall effect sensors signal
}

// The setup() method runs once, when the sketch starts
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

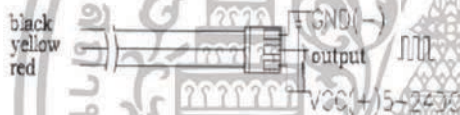
void setup() //
{
  pinMode(hallsensor, INPUT); //initializes digital pin 2 as an input
  Serial.begin(9600); //This is the setup function where the serial port is
  initialised,
  attachInterrupt(0, rpm, RISING); //and the interrupt is attached
}
// the loop() method runs over and over again,
// as long as the Arduino has power
void loop ()
{
  NbTopsFan = 0; //Set NbTops to 0 ready for calculations
  sei(); //Enables interrupts
  delay (1000); //Wait 1 second
  cli(); //Disable interrupts
  Calc = (NbTopsFan * 60 / 5.5); //(Pulse frequency x 60) / 5.5Q, = flow rate
  in L/hour
  Serial.print (Calc, DEC); //Prints the number calculated above
  Serial.print (" L/hour\r\n"); //Prints "L/hour" and returns a new line
}

```

You can refer our forum for more details about Reading Water Flow rate with Water Flow Sensor (<http://www.seeedstudio.com/forum/viewtopic.php?f=4&t=989&p=3632#p3632>) .

Wiring Diagram

The external diameter of thread the connections use is 1.4mm

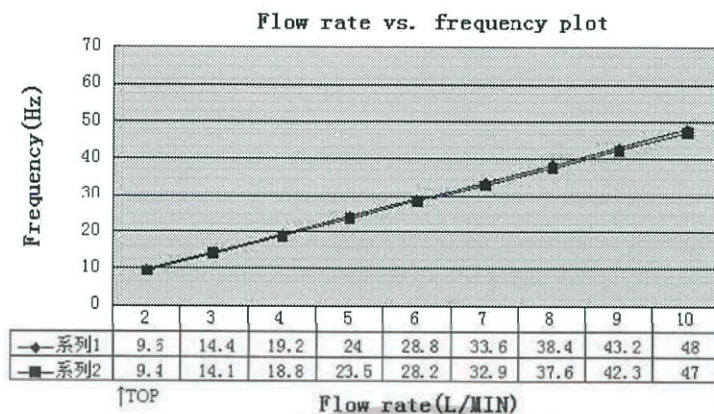


Output Table

Pulse frequency (Hz) in Horizontal Test=4.8Q, Q is flow rate in L/min. (Results in +/- 3% range)

Output pulse high level	Signal voltage >4.5V (input DC 5V)
Output pulse low level	Signal voltage <0.5V (input DC 5V)
Precision	3% (Flow rate from 1L/min to 10L/min)
Output signal duty cycle	40%~60%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



FAQ

Here is the Sensors FAQ, people can go here to find questions and answers for this kind of products.

What materials is water flow sensor made of?

Nylon with fiber, avoiding strong acid and strong base.

Is the water flow sensor safe for drinking water?

Yes, it's usage is safe for human consumption. It is frequently used on drinking machines.

Support

If you have questions or other better design ideas, you can go to our forum (<http://www.seeedstudio.com/forum>) or wish (<http://wish.seeedstudio.com>) to discuss.

Version Tracker

Revision	Descriptions	Release
v1.0	Initial public release	Feb 14, 2012

Resource

- Reading Water Flow rate with Water Flow Sensor (<http://www.seeedstudio.com/forum/viewtopic.php?f=4&t=989&p=3632#p3632>)
- Water Flow rate display on LCD (<http://www.practicalarduino.com/projects/water-flow-gauge>)
- datasheet for the material (<http://garden.seeedstudio.com/images/4/4e/YEE70G30HSLNC.pdf>)

See Also

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors

General Description

The LM35 series are precision integrated-circuit temperature sensors, whose output voltage is linearly proportional to the Celsius (Centigrade) temperature. The LM35 thus has an advantage over linear temperature sensors calibrated in ° Kelvin, as the user is not required to subtract a large constant voltage from its output to obtain convenient Centigrade scaling. The LM35 does not require any external calibration or trimming to provide typical accuracies of $\pm 1/4^\circ\text{C}$ at room temperature and $\pm 3/4^\circ\text{C}$ over a full -55 to $+150^\circ\text{C}$ temperature range. Low cost is assured by trimming and calibration at the wafer level. The LM35's low output impedance, linear output, and precise inherent calibration make interfacing to readout or control circuitry especially easy. It can be used with single power supplies, or with plus and minus supplies. As it draws only $50\ \mu\text{A}$ from its supply, it has very low self-heating, less than 0.1°C in still air. The LM35 is rated to operate over a -55 to $+150^\circ\text{C}$ temperature range while the LM35C is rated for a -40 to $+110^\circ\text{C}$ range (-10 with improved accuracy). The LM35 series is available pack-

aged in hermetic TO-46 transistor packages, while the LM35C, LM35CA, and LM35D are also available in the plastic TO-92 transistor package. The LM35D is also available in an 8-lead surface mount small outline package and a plastic TO-220 package.

Features

- Calibrated directly in ° Celsius (Centigrade)
- Linear $+ 10.0\ \text{mV}/^\circ\text{C}$ scale factor
- 0.5°C accuracy guaranteeable (at $+25^\circ\text{C}$)
- Rated for full -55 to $+150^\circ\text{C}$ range
- Suitable for remote applications
- Low cost due to wafer-level trimming
- Operates from 4 to 30 volts
- Less than $50\ \mu\text{A}$ current drain
- Low self-heating, 0.08°C in still air
- Nonlinearity only $\pm 1/4^\circ\text{C}$ typical
- Low impedance output, $0.1\ \Omega$ for $1\ \text{mA}$ load

Typical Applications

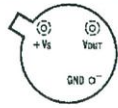


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LM35

Connection Diagrams

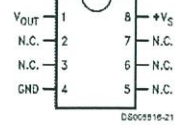
TO-46
Metal Can Package*



*Case is connected to negative pin (GND)

Order Number LM35H, LM35AH, LM35CH, LM35CAH or LM35DH
See NS Package Number H03H

SO-8
Small Outline Molded Package



N.C. = No Connection

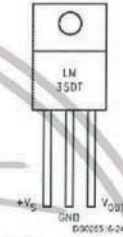
Top View
Order Number LM35DM
See NS Package Number M08A

TO-92
Plastic Package



Order Number LM35GZ, LM35CAZ or LM35DZ
See NS Package Number Z03A

TO-220
Plastic Package*



*Tab is connected to the negative pin (GND)

Note: The LM35DT pinout is different than the discontinued LM35DP

Order Number LM35DT
See NS Package Number TA03F

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Absolute Maximum Ratings (Note 10)

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications.

Supply Voltage	+35V to -0.2V
Output Voltage	+6V to -1.0V
Output Current	10 mA
Storage Temp.:	
TO-46 Package,	-60°C to +180°C
TO-92 Package,	-60°C to +150°C
SO-8 Package,	-65°C to +150°C
TO-220 Package,	-65°C to +150°C
Lead Temp.:	
TO-46 Package,	
(Soldering, 10 seconds)	300°C

TO-92 and TO-220 Package, (Soldering, 10 seconds)	260°C
SO Package (Note 12)	
Vapor Phase (60 seconds)	215°C
Infrared (15 seconds)	220°C
ESD Susceptibility (Note 11)	2500V
Specified Operating Temperature Range: T_{MIN} to T_{MAX} (Note 2)	
LM35, LM35A	-55°C to +150°C
LM35C, LM35CA	-40°C to +110°C
LM35D	0°C to +100°C

Electrical Characteristics

(Notes 1, 6)

Parameter	Conditions	LM35A			LM35CA			Units (Max.)
		Typical	Tested Limit (Note 4)	Design Limit (Note 5)	Typical	Tested Limit (Note 4)	Design Limit (Note 5)	
Accuracy (Note 7)	$T_A = +25^\circ\text{C}$	± 0.2	± 0.5		± 0.2	± 0.5		$^\circ\text{C}$
	$T_A = -10^\circ\text{C}$	± 0.3			± 0.3		± 1.0	$^\circ\text{C}$
	$T_A = T_{MAX}$	± 0.4	± 1.0		± 0.4	± 1.0		$^\circ\text{C}$
	$T_A = T_{MIN}$	± 0.4	± 1.0		± 0.4		± 1.5	$^\circ\text{C}$
Nonlinearity (Note 8)	$T_{MIN} \leq T_A \leq T_{MAX}$	± 0.18		± 0.35	± 0.15		± 0.3	$^\circ\text{C}$
Sensor Gain (Average Slope)	$T_{MIN} \leq T_A \leq T_{MAX}$	+10.0	+9.9, +10.1		+10.0		+9.9, +10.1	mV/ $^\circ\text{C}$
Load Regulation (Note 3) $0 \leq I_L \leq 1 \text{ mA}$	$T_A = +25^\circ\text{C}$	± 0.4	± 1.0		± 0.4	± 1.0		mV/mA
	$T_{MIN} \leq T_A \leq T_{MAX}$	± 0.5		± 3.0	± 0.5		± 3.0	mV/mA
Line Regulation (Note 3)	$T_A = +25^\circ\text{C}$	± 0.01	± 0.05		± 0.01	± 0.05		mV/V
	$4\text{V} \leq V_{CC} \leq 30\text{V}$	± 0.02		± 0.1	± 0.02		± 0.1	mV/V
Quiescent Current (Note 9)	$V_{CC} = +5\text{V}, +25^\circ\text{C}$	56	67		56	67		μA
	$V_{CC} = +5\text{V}$	105		131	91		114	μA
	$V_{CC} = +30\text{V}, +25^\circ\text{C}$	56.2	68		56.2	68		μA
	$V_{CC} = +30\text{V}$	105.5		133	91.5		116	μA
Change of Quiescent Current (Note 3)	$4\text{V} \leq V_{CC} \leq 30\text{V}, +25^\circ\text{C}$	0.2	1.0		0.2	1.0		μA
	$4\text{V} \leq V_{CC} \leq 30\text{V}$	0.5		2.0	0.5		2.0	μA
Temperature Coefficient of Quiescent Current		+0.39		+0.5	+0.39		+0.5	$\mu\text{A}/^\circ\text{C}$
Minimum Temperature for Rated Accuracy	In circuit of Figure 1, $I_L = 0$	+1.5		+2.0	+1.5		+2.0	$^\circ\text{C}$
Long Term Stability	$T_{CC} = T_{MAX}$, for 1000 hours	± 0.08			± 0.08			$^\circ\text{C}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LM35

Electrical Characteristics

(Notes 1, 6)

Parameter	Conditions	LM35			LM35C, LM35D			Units (Max.)
		Typical	Tested Limit (Note 4)	Design Limit (Note 5)	Typical	Tested Limit (Note 4)	Design Limit (Note 5)	
Accuracy, LM35, LM35C (Note 7)	$T_A = +25^\circ\text{C}$	± 0.4	± 1.0		± 0.4	± 1.0	± 1.5	$^\circ\text{C}$
	$T_A = -10^\circ\text{C}$	± 0.5			± 0.5		± 1.5	$^\circ\text{C}$
	$T_A = T_{\text{MAX}}$	± 0.8	± 1.5		± 0.8		± 1.5	$^\circ\text{C}$
	$T_A = T_{\text{MIN}}$	± 0.8		± 1.5	± 0.8		± 2.0	$^\circ\text{C}$
Accuracy, LM35D (Note 7)	$T_A = +25^\circ\text{C}$				± 0.6	± 1.5		$^\circ\text{C}$
	$T_A = T_{\text{MAX}}$				± 0.9		± 2.0	$^\circ\text{C}$
	$T_A = T_{\text{MIN}}$				± 0.9		± 2.0	$^\circ\text{C}$
Nonlinearity (Note 8)	$T_{\text{MIN}} \leq T_A \leq T_{\text{MAX}}$	± 0.3		± 0.5	± 0.2		± 0.5	$^\circ\text{C}$
Sensor Gain (Average Slope)	$T_{\text{MIN}} \leq T_A \leq T_{\text{MAX}}$	$+10.0$	$+9.8$, $+10.2$		$+10.0$		$+9.8$, $+10.2$	mV/ $^\circ\text{C}$
Load Regulation (Note 3) $0 \leq I_L \leq 1 \text{ mA}$	$T_A = +25^\circ\text{C}$ $T_{\text{MIN}} \leq T_A \leq T_{\text{MAX}}$	± 0.4 ± 0.5	± 2.0	± 5.0	± 0.4 ± 0.5	± 2.0	± 5.0	mV/mA mV/mA
Line Regulation (Note 3)	$T_A = +25^\circ\text{C}$	± 0.01	± 0.1		± 0.01	± 0.1		mV/V
	$4\text{V} \leq V_S \leq 30\text{V}$	± 0.02		± 0.2	± 0.02		± 0.2	mV/V
Quiescent Current (Note 9)	$V_S = +5\text{V}$, $+25^\circ\text{C}$	56	80		56	80		μA
	$V_S = +5\text{V}$	105		158	91		138	μA
	$V_S = +30\text{V}$, $+25^\circ\text{C}$	56.2	82		56.2	82		μA
	$V_S = +30\text{V}$	105.5		161	91.5		141	μA
Change of Quiescent Current (Note 3)	$4\text{V} \leq V_S \leq 30\text{V}$, $+25^\circ\text{C}$	0.2	2.0		0.2	2.0		μA
	$4\text{V} \leq V_S \leq 30\text{V}$	0.5		3.0	0.5		3.0	μA
Temperature Coefficient of Quiescent Current		$+0.39$		$+0.7$	$+0.39$		$+0.7$	$\mu\text{A}/^\circ\text{C}$
Minimum Temperature for Rated Accuracy	In circuit of Figure 1, $I_L = 0$	$+1.5$		$+2.0$	$+1.5$		$+2.0$	$^\circ\text{C}$
Long Term Stability	$T_A = T_{\text{MAX}}$, for 1000 hours	± 0.08			± 0.08			$^\circ\text{C}$

Note 1: Unless otherwise noted, these specifications apply: $-55^\circ\text{C} \leq T_A \leq +150^\circ\text{C}$ for the LM35 and LM35A; $-40^\circ\text{C} \leq T_A \leq +100^\circ\text{C}$ for the LM35C and LM35CA; and $0^\circ\text{C} \leq T_A \leq +100^\circ\text{C}$ for the LM35D. $V_S = +5\text{Vdc}$ and $I_{\text{LOAD}} = 50 \mu\text{A}$, in the circuit of Figure 2. These specifications also apply from $+2^\circ\text{C}$ to T_{MAX} in the circuit of Figure 1. Specifications in boldface apply over the full rated temperature range.

Note 2: Thermal resistance of the TO-46 package is 400°C/W junction to ambient, and 24°C/W junction to case. Thermal resistance of the TO-92 package is 180°C/W junction to ambient. Thermal resistance of the small outline molded package is 220°C/W junction to ambient. Thermal resistance of the TO-220 package is 90°C/W junction to ambient. For additional thermal resistance information see table in the Applications section.

Note 3: Regulation is measured at constant junction temperature, using pulse testing with a low duty cycle. Changes in output due to heating effects can be computed by multiplying the internal dissipation by the thermal resistance.

Note 4: Tested Limits are guaranteed and 100% tested in production.

Note 5: Design Limits are guaranteed (but not 100% production tested) over the indicated temperature and supply voltage ranges. These limits are not used to calculate outgoing quality levels.

Note 6: Specifications in boldface apply over the full rated temperature range.

Note 7: Accuracy is defined as the error between the output voltage and $10\text{mV}/^\circ\text{C}$ times the device's case temperature, at specified conditions of voltage, current, and temperature (expressed in $^\circ\text{C}$).

Note 8: Nonlinearity is defined as the deviation of the output-voltage-versus-temperature curve from the best-fit straight line, over the device's rated temperature range.

Note 9: Quiescent current is defined in the circuit of Figure 1.

Note 10: Absolute Maximum Ratings indicate limits beyond which damage to the device may occur. DC and AC electrical specifications do not apply when operating the device beyond its rated operating conditions. See Note 1.

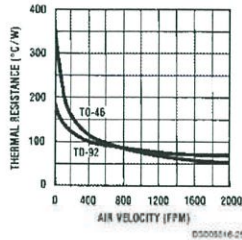
Note 11: Human body model, 100 pF discharged through a $1.5 \text{ k}\Omega$ resistor.

Note 12: See AN-450 "Surface Mounting Methods and Their Effect on Product Reliability" or the section titled "Surface Mount" found in a current National Semiconductor Linear Data Book for other methods of soldering surface mount devices.

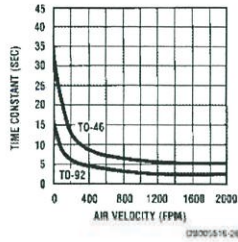
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Typical Performance Characteristics

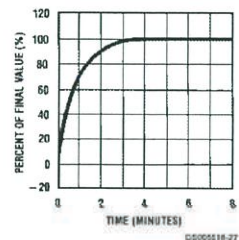
Thermal Resistance Junction to Air



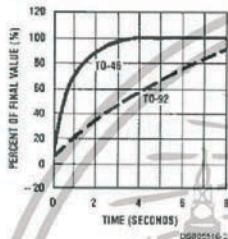
Thermal Time Constant



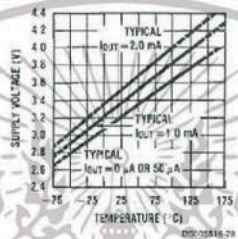
Thermal Response in Still Air



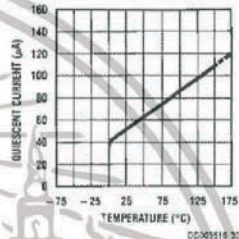
Thermal Response in Stirred Oil Bath



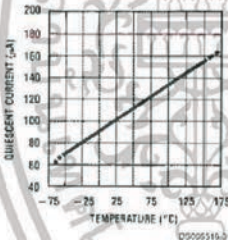
Minimum Supply Voltage vs. Temperature



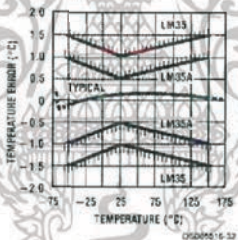
Quiescent Current vs. Temperature (In Circuit of Figure 1.)



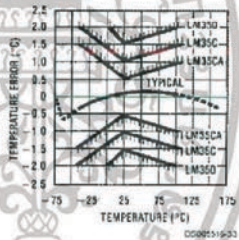
Quiescent Current vs. Temperature (In Circuit of Figure 2.)



Accuracy vs. Temperature (Guaranteed)



Accuracy vs. Temperature (Guaranteed)

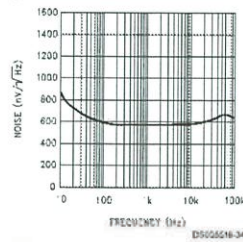


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

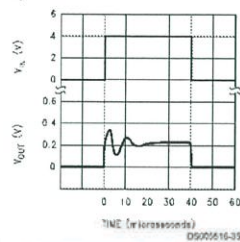
LM35

Typical Performance Characteristics (Continued)

Noise Voltage



Start-Up Response



Applications

The LM35 can be applied easily in the same way as other integrated-circuit temperature sensors. It can be glued or cemented to a surface and its temperature will be within about 0.01°C of the surface temperature.

This presumes that the ambient air temperature is almost the same as the surface temperature; if the air temperature were much higher or lower than the surface temperature, the actual temperature of the LM35 die would be at an intermediate temperature between the surface temperature and the air temperature. This is especially true for the TO-92 plastic package, where the copper leads are the principal thermal path to carry heat into the device, so its temperature might be closer to the air temperature than to the surface temperature.

To minimize this problem, be sure that the wiring to the LM35, as it leaves the device, is held at the same temperature as the surface of interest. The easiest way to do this is to cover up these wires with a bead of epoxy which will insure that the leads and wires are all at the same temperature as the surface, and that the LM35 die's temperature will not be affected by the air temperature.

The TO-18 metal package can also be soldered to a metal surface or pipe without damage. Of course, in that case the V- terminal of the circuit will be grounded to that metal. Alternatively, the LM35 can be mounted inside a sealed-end metal tube, and can then be dipped into a bath or screwed into a threaded hole in a tank. As with any IC, the LM35 and accompanying wiring and circuits must be kept insulated and dry, to avoid leakage and corrosion. This is especially true if the circuit may operate at cold temperatures where condensation can occur. Printed-circuit coatings and varnishes such as Humiseal and epoxy paints or dips are often used to insure that moisture cannot corrode the LM35 or its connections.

These devices are sometimes soldered to a small light-weight heat fin, to decrease the thermal time constant and speed up the response in slowly-moving air. On the other hand, a small thermal mass may be added to the sensor, to give the steadiest reading despite small deviations in the air temperature.

Temperature Rise of LM35 Due To Self-heating (Thermal Resistance, θ_{JA})

	TO-18 no heat sink	TO-18* small heat fin	TO-92 no heat sink	TO-92** small heat fin	SO-8 no heat sink	SO-8** small heat fin	TO-220 no heat sink
Still air	420°C/W	100°C/W	180°C/W	140°C/W	220°C/W	110°C/W	90°C/W
Moving air	150°C/W	48°C/W	59°C/W	70°C/W	105°C/W	90°C/W	28°C/W
Sol. oil	100°C/W	40°C/W	59°C/W	70°C/W			
Stirred oil	50°C/W	39°C/W	45°C/W	43°C/W			
(Clamped to metal, infinite heat sink)		24°C/W			155°C/W		

*Wires soldered type 201, or 1" disc of 0.020" sheet brass, soldered to case, or similar.

**TO-92 and SO-8 packages glued and leads soldered to 1" square of 1/16" printed circuit board with 2 oz./in. or similar.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Typical Applications

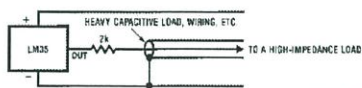


FIGURE 3. LM35 with Decoupling from Capacitive Load

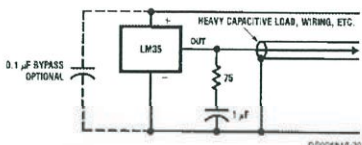


FIGURE 4. LM35 with R-C Damper

CAPACITIVE LOADS

Like most micropower circuits, the LM35 has a limited ability to drive heavy capacitive loads. The LM35 by itself is able to drive 50 pF without special precautions. If heavier loads are anticipated, it is easy to isolate or decouple the load with a resistor; see Figure 3. Or you can improve the tolerance of capacitance with a series R-C damper from output to ground; see Figure 4.

When the LM35 is applied with a 200Ω load resistor as shown in Figure 5, Figure 6 or Figure 8 it is relatively immune to wiring capacitance because the capacitance forms a bypass from ground to input, not on the output. However, as with any linear circuit connected to wires in a hostile environment, its performance can be affected adversely by intense electromagnetic sources such as relays, radio transmitters, motors with arcing brushes, SCR transients, etc. as its wiring can act as a receiving antenna and its internal junctions can act as rectifiers. For best results in such cases, a bypass capacitor from V_{IN} to ground and a series R-C damper such as 75Ω in series with 0.2 or 1 μF from output to ground are often useful. These are shown in Figure 13, Figure 14, and Figure 16.

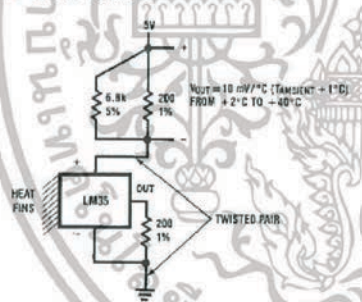


FIGURE 5. Two-Wire Remote Temperature Sensor (Grounded Sensor)

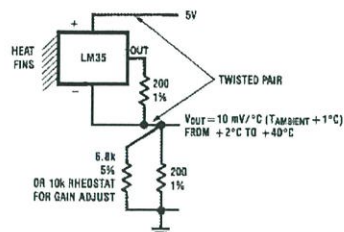


FIGURE 6. Two-Wire Remote Temperature Sensor (Output Referred to Ground)

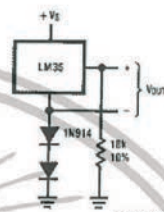


FIGURE 7. Temperature Sensor, Single Supply, -55° to +150°C

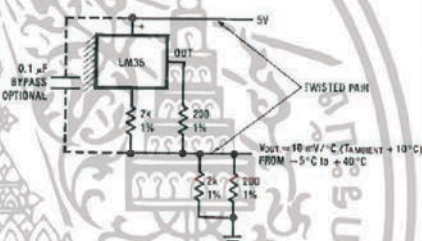


FIGURE 8. Two-Wire Remote Temperature Sensor (Output Referred to Ground)

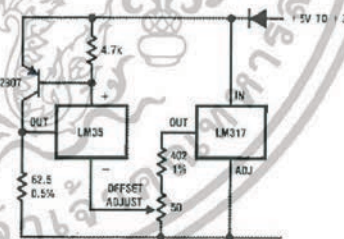
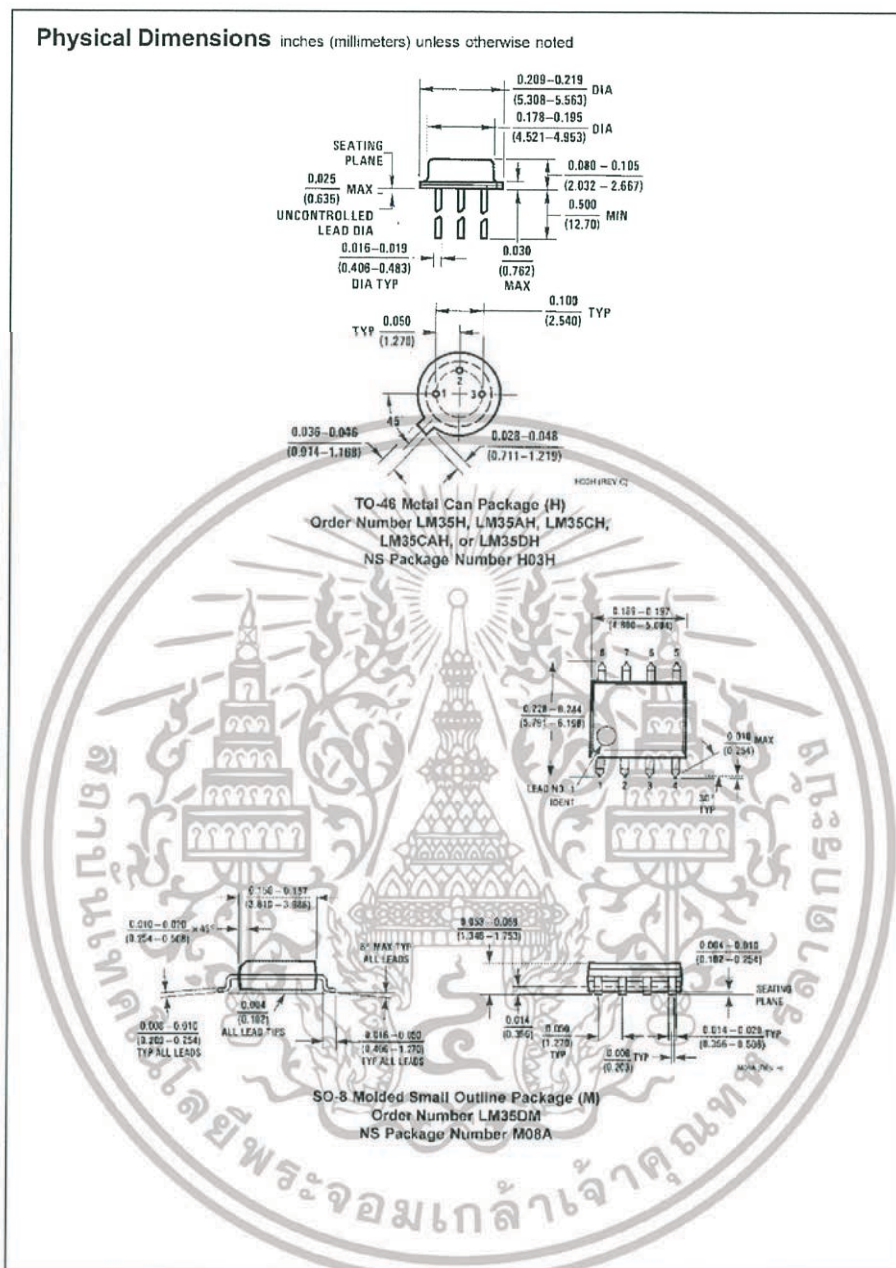


FIGURE 9. 4-To-20 mA Current Source (0°C to +100°C)

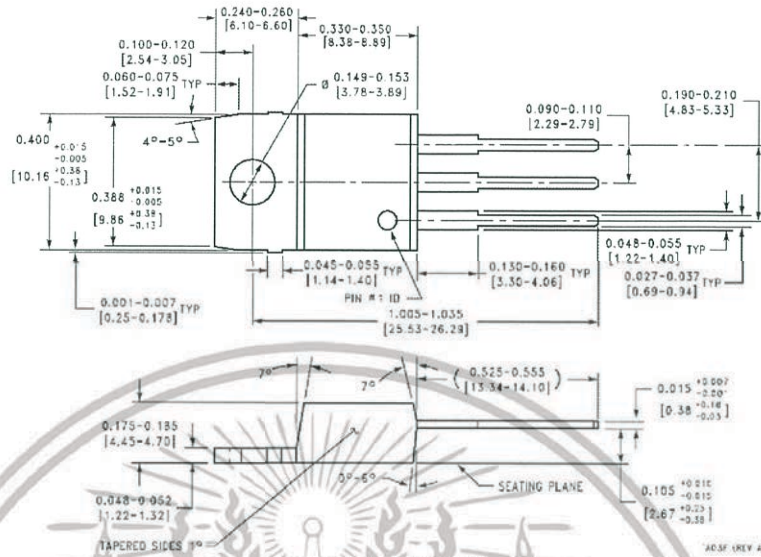
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LM35

Physical Dimensions inches (millimeters) unless otherwise noted (Continued)



Power Package TO-220 (T)
 Order Number LM35DT
 NS Package Number TA03F

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Physical Dimensions inches (millimeters) unless otherwise noted (Continued)

TO-92 Plastic Package (Z)
Order Number LM35CZ, LM35CAZ or LM35DZ
NS Package Number Z03A

LIFE SUPPORT POLICY

NATIONAL'S PRODUCTS ARE NOT AUTHORIZED FOR USE AS CRITICAL COMPONENTS IN LIFE SUPPORT DEVICES OR SYSTEMS WITHOUT THE EXPRESS WRITTEN APPROVAL OF THE PRESIDENT AND GENERAL COUNSEL OF NATIONAL SEMICONDUCTOR CORPORATION. As used herein:

1. Life support devices or systems are devices or systems which, (a) are intended for surgical implant into the body, or (b) support or sustain life, and whose failure to perform when properly used in accordance with instructions for use provided in the labeling, can be reasonably expected to result in a significant injury to the user.
2. A critical component is any component of a life support device or system whose failure to perform can be reasonably expected to cause the failure of the life support device or system, or to affect its safety or effectiveness.

<p>National Semiconductor Corporation Americas Tel: 1-800-272-9259 Fax: 1-800-737-7016 Email: support@nsc.com www.national.com</p>	<p>National Semiconductor Europe Fax: +49 (0) 180 530 95 95 Email: europe.support@nsc.com Deutsch Tel: +49 (0) 69 950 5206 English Tel: +44 (0) 876 24 0 2171 Français Tel: +33 (0) 1 41 91 8750</p>	<p>National Semiconductor Asia Pacific Customer Response Group Tel: 65-2544493 Fax: 65-2544466 Email: ap.support@nsc.com</p>	<p>National Semiconductor Japan Ltd. Tel: 81-3-6639-7500 Fax: 81-3-6639-7507</p>
---	---	---	---

National does not assume any responsibility for use of any circuitry described; no circuit patent licenses are implied and National reserves the right at any time without notice to change said circuitry and specifications.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

USER GUIDE

NI USB-6008/6009

Bus-Powered Multifunction DAQ USB Device

Français	Deutsch	日本語	한국어	简体中文
ni.com/manuals				

The National Instruments USB-6008/6009 devices provide eight single-ended analog input (AI) channels, two analog output (AO) channels, 12 DIO channels, and a 32-bit counter with a full-speed USB interface. This user guide describes how to use these devices.

For specifications, refer to the *NI USB-6008 Device Specifications* and the *NI USB-6009 Device Specifications* available at ni.com/manuals.

The following table compares the NI USB-6008 and NI USB-6009 devices.

Table 1. NI USB-6008 and NI USB-6009 Comparison

Feature	NI USB-6008	NI USB-6009
AI resolution	12 bits differential, 11 bits single-ended	14 bits differential, 13 bits single-ended
Maximum AI sample rate, single channel ¹	10 kS/s	48 kS/s
Maximum AI sample rate, multiple channels (aggregate) ¹	10 kS/s	48 kS/s
DIO configuration	Open collector ²	Each channel individually programmable as open collector or active drive ²

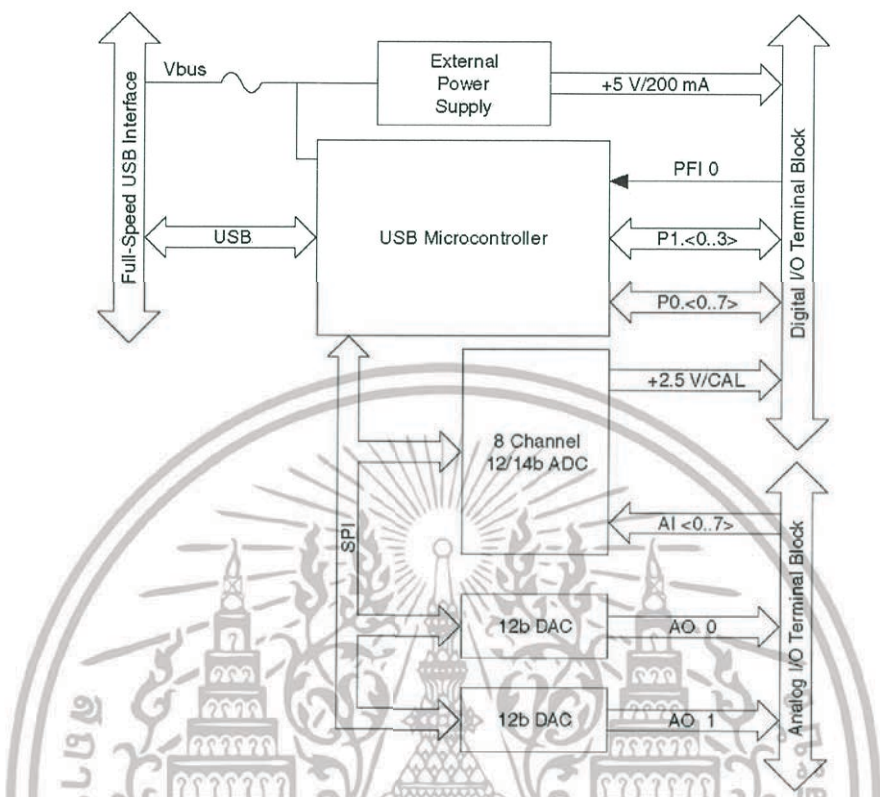
The following figure shows key functional components of the NI USB-6008/6009.

¹ System-dependent.

² This document uses NI-DAQmx naming conventions. Open-drain is called open collector and push-pull is called active drive.



Figure 1. NI USB-6008/6009 Block Diagram



Safety Guidelines

The following section contains important safety information that you must follow when installing and using the NI USB-6008/6009.

Caution Operate the NI USB-6008/6009 only as described in these operating instructions. Misuse of the device can result in a hazard. You can compromise the safety protection built into the device if the device is damaged in any way. If the device is damaged, contact National Instruments for repair.

Caution Do not substitute parts or modify the device except as described in this user guide. Use the device only with the accessories specified in the installation instructions.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Caution Do not operate the device in an explosive atmosphere or where there may be flammable gases or fumes. If you must operate the device in such an environment, it must be in a suitably rated enclosure.

Electromagnetic Compatibility Guidelines

This product was tested and complies with the regulatory requirements and limits for electromagnetic compatibility (EMC) stated in the product specifications. These requirements and limits provide reasonable protection against harmful interference when the product is operated in the intended operational electromagnetic environment.

This product is intended for use in industrial locations. However, harmful interference may occur in some installations, when the product is connected to a peripheral device or test object, or if the product is used in residential or commercial areas. To minimize interference with radio and television reception and prevent unacceptable performance degradation, install and use this product in strict accordance with the instructions in the product documentation.

Furthermore, any changes or modifications to the product not expressly approved by National Instruments could void your authority to operate it under your local regulatory rules.



Caution To ensure the specified EMC performance, operate this product only with shielded cables and accessories.



Caution This product may become more sensitive to electromagnetic disturbances in the operational environment when test leads are attached or when the product is connected to a test object.



Caution Emissions that exceed the regulatory requirements may occur when this product is connected to a test object.



Note Changes or modifications to the product not expressly approved by National Instruments could void your authority to operate the product under your local regulatory rules.

Unpacking the Kit



Caution To prevent electrostatic discharge (ESD) from damaging the device, ground yourself using a grounding strap or by holding a grounded object, such as your computer chassis.

1. Touch the antistatic package to a metal part of the computer chassis.
2. Remove the device from the package and inspect the device for loose components or any other sign of damage.



Caution Never touch the exposed pins of connectors.



Note Do not install a device if it appears damaged in any way.

- Unpack any other items and documentation from the kit.

Store the device in the antistatic package when the device is not in use.

Setting Up the NI USB-6008/6009

Complete the following steps to get started with the NI USB-6008/6009.



Note For information about non-Windows operating support, refer to the *Getting Started with NI-DAQmx Base* document available from ni.com/manuals.

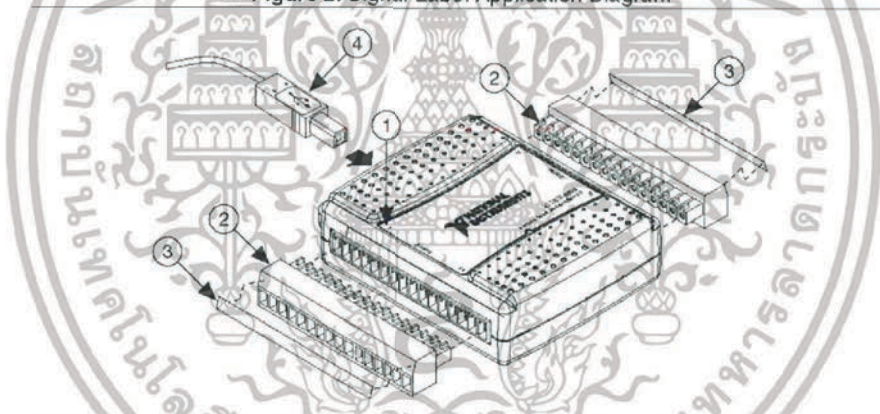
- Install the application software (if applicable), as described in the installation instructions that accompany your software.
- Install NI-DAQmx³.



Note The NI-DAQmx software is included on the disk shipped with your kit and is available for download at ni.com/support. The documentation for NI-DAQmx is available after installation from **Start»All Programs»National Instruments»NI-DAQmx**. Other NI documentation is available from ni.com/manuals.

- Install the 16-position screw terminal plugs by inserting them into the connector jacks, as shown in the following figure.

Figure 2. Signal Label Application Diagram



1. Overlay Label with Pin Orientation Guides

2. Screw Terminal Connector Plug

3. Signal Label

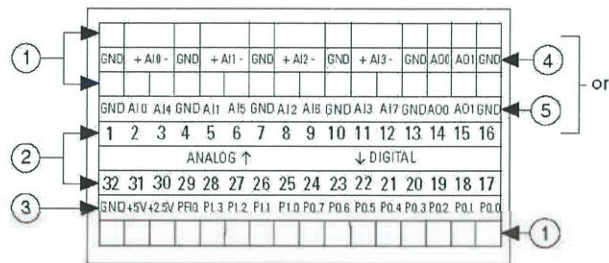
4. USB Cable

- Affix the provided signal labels to the screw terminal connector plugs. You can choose labels with pin numbers, signal names, or blank labels, as shown in the following figure.

³ NI USB-6008/6009 devices are supported by NI-DAQmx 7.5 and later.

Choose one of the labels, align the correct label with the terminals printed on the top panel of your device and apply the label, as shown in the previous figure.

Figure 3. NI USB-6008/6009 Signal Labels



- | | |
|------------------------------|--|
| 1. User-Defined Custom Label | 4. Analog Input Differential Signal Name Label |
| 2. Terminal Number Label | 5. Analog Input Single-Ended Signal Name Label |
| 3. Digital I/O Label | |



Note After you label the screw terminal connector plugs, you must only insert them into the matching connector jack, as indicated by the overlay label on the device.

- Plug one end of the USB cable into the NI USB-6008/6009 and the other end into an available USB port on the computer.
- Double-click the **NI MAX** icon on the desktop to open Measurement & Automation Explorer (MAX).
- Expand **My System > Devices and Interfaces** and verify that the NI USB-6008/6009 is listed. If your device does not appear, press <F5> to refresh the view in MAX. If your device is still not recognized, refer to ni.com/support/dagmax for troubleshooting information.
- Self-test your device in MAX by right-clicking **NI USB-6008** or **NI USB-6009** and selecting **Self-Test**. Self-test performs a brief test to determine successful device installation. When the self-test finishes, a message indicates successful verification or if an error occurred. If an error occurs, refer to ni.com/support/dagmax.



Caution To ensure the specified EMC performance, operate this product only with shielded cables and accessories.

- Connect the wires (16 AWG to 28 AWG) of a shielded, multiconductor cable to screw terminals by stripping 6.35 mm (0.25 in) of insulation, inserting the wires into the screw terminals, and securely tightening the screws with the flathead screwdriver to a torque of 0.22 N · m to 0.25 N · m (2.0 lb · in. to 2.2 lb · in.). Refer to the *Pinout and Signal Descriptions* section for an image of the NI USB-6008/6009 pinout.

If using a shielded cable, connect the cable shield to a nearby GND terminal.



Note For information about sensors, go to ni.com/sensors. For information about IEEE 1451.4 TEDS smart sensors, go to ni.com/teds.

- Run a Test Panel in MAX by right-clicking **NI USB-6008** or **NI USB-6009** and selecting **Test Panels**.

Click **Start** to test the device functions, or **Help** for operating instructions. Click **Close** to exit the test panel.

Using the NI USB-6008/6009 in an Application

You can use the DAQ Assistant through many NI application software programs to configure virtual and measurement channels. The following table lists DAQ Assistant tutorial locations for NI applications.

Table 2. DAQ Assistant Tutorial Locations

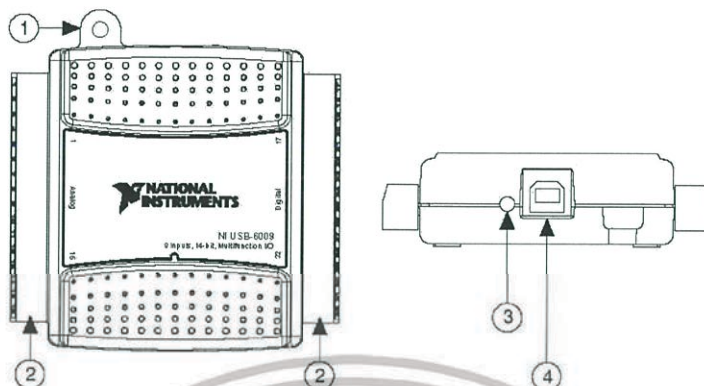
NI Application	Tutorial Location
LabVIEW	Go to Help»LabVIEW Help . Next, go to Getting Started with LabVIEW»Getting Started with DAQ»Taking an NI-DAQmx Measurement in LabVIEW .
LabWindows™/CVI™	Go to Help»Contents . Next, go to Using LabWindows/CVI»Data Acquisition»Taking an NI-DAQmx Measurement in LabWindows/CVI .
Measurement Studio	Go to NI Measurement Studio Help»Getting Started with the Measurement Studio Class Libraries»Measurement Studio Walkthroughs»Walkthrough: Creating a Measurement Studio NI-DAQmx Application .
LabVIEW SignalExpress	Go to Help»Taking an NI-DAQmx Measurement in SignalExpress .

Refer to the *Where to Go from Here* section for information about programming examples for NI-DAQmx and NI-DAQmx Base.

Features

The NI USB-6008/6009 features a USB connector, USB cable strain relief, two screw terminal connector plugs for I/O, and an LED indicator, as shown in the following figure.

Figure 4. NI USB-6008/6009 Top and Back Views

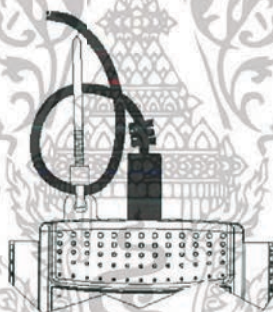


- | | |
|----------------------------------|------------------|
| 1. USB Cable Strain Relief | 3. LED Indicator |
| 2. Screw Terminal Connector Plug | 4. USB Connector |

USB Connector and USB Cable Strain Relief

The NI USB-6008/6009 features a USB connector for full-speed USB interface. You can provide strain relief for the USB cable by threading a zip tie through the USB cable strain relief ring and tightening around a looped USB cable, as shown in the following figure.

Figure 5. NI USB-6008/6009 Strain Relief



LED Indicator

The NI USB-6008/6009 device has a green LED indicator that indicates device status, as listed in the following table. When the device is connected to a USB port, the LED blinks steadily to indicate that the device is initialized and is receiving power from the connection.

Table 3. LED State/Device Status

LED State	Device Status
Not lit	Device not connected or in suspend
On, not blinking	Device connected but not initialized, or the computer is in standby mode. In order for the device to be recognized, the device must be connected to a computer that has NI-DAQmx installed on it.
Single-blink	Operating normally

Screw Terminal Connector Plugs

The NI USB-6008/6009 ships with one detachable screw terminal connector plug for analog signals and one detachable screw terminal connector plug for digital signals. These screw terminal connectors provide 16 connections that use 16 AWG to 28 AWG wire. Refer to step 4 of the *Setting Up the NI USB-6008/6009* section for information about selecting labels for the screw terminal connector plugs. Refer to the *Pinout and Signal Descriptions* section for the device pinout and signal descriptions.

You can order additional connectors and labels for your device. Refer to the *Cables and Accessories* section for ordering information.

Firmware

The firmware on the NI USB-6008/6009 refreshes whenever the device is connected to a computer with NI-DAQmx. NI-DAQmx automatically uploads the compatible firmware version to the device. The firmware version may be upgraded when new versions of NI-DAQmx release.

Cables and Accessories

The following table contains information about cables and accessories available for the NI USB-6008/6009. For a complete list of accessories and ordering information, refer to the pricing section of the NI USB-6008 or NI USB-6009 product page at ni.com.

Table 4. NI USB-6008/6009 Cables and Accessories

Accessory	Part Number	Description
USB-6008/6009 Accessory Kit	779371-01	Four additional screw-terminal connectors, connector labels, and a screwdriver
USB-6000 Series Prototyping Accessory	779511-01	Unshielded breadboarding accessory for custom-defined signal conditioning and prototyping. You can use up to two accessories per device.
Hi-Speed USB Cable	184125-01, 184125-02	1 m and 2 m lengths



Caution For compliance with Electromagnetic Compatibility (EMC) requirements, this product must be operated with shielded cables and accessories. If unshielded cables or accessories are used, the EMC specifications are no longer guaranteed unless all unshielded cables and/or accessories are installed in a shielded enclosure with properly designed and shielded input/output ports.

Pinout and Signal Descriptions

The following figure shows the pinout of the NI USB-6008/6009. Analog input signal names are listed as single-ended analog input name, AI x , and then differential analog input name, (AI x +/-). Refer to the following table for a detailed description of each signal.



Figure 6. NI USB-6008/6009 Pinout

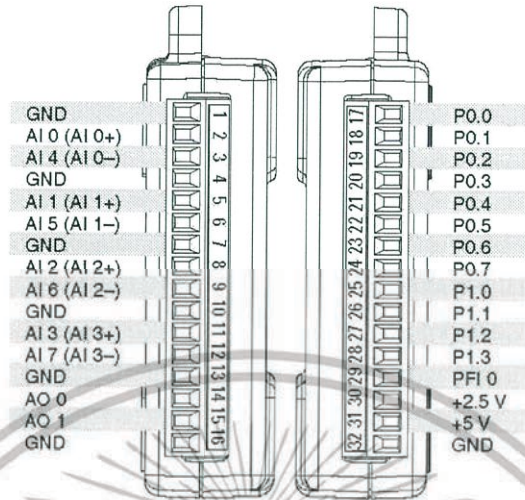


Table 5. Signal Descriptions

Signal Name	Reference	Direction	Description
GND	—	—	Ground —The reference point for the single-ended analog input measurements, analog output voltages, digital signals, +5 VDC supply, and +2.5 VDC at the I/O connector, and the bias current return point for differential mode measurements.
AI <0..7>	Varies	Input	Analog Input Channels 0 to 7 —For single-ended measurements, each signal is an analog input voltage channel. For differential measurements, AI 0 and AI 4 are the positive and negative inputs of differential analog input channel 0. The following signal pairs also form differential input channels: AI <1, 5>, AI <2, 6>, and AI <3, 7>. Refer to the <i>Analog Input</i> section for more information.

Table 5. Signal Descriptions (Continued)

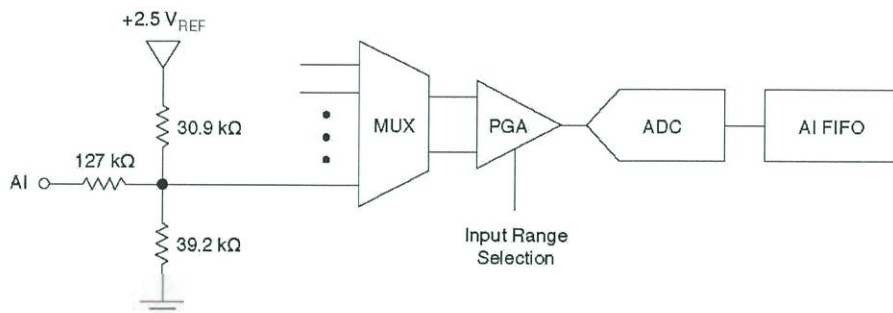
Signal Name	Reference	Direction	Description
AO <0, 1>	GND	Output	Analog Output Channels 0 and 1 —Supplies the voltage output of AO channel 0 or AO channel 1. Refer to the <i>Analog Output</i> section for more information.
P0.<0..7>	GND	Input or Output	Port 0 Digital I/O Channels 0 to 7 —You can individually configure each signal as an input or output. Refer to the <i>Digital I/O</i> section for more information.
P1.<0..3>	GND	Input or Output	Port 1 Digital I/O Channels 0 to 3 —You can individually configure each signal as an input or output. Refer to the <i>Digital I/O</i> section for more information.
PFI 0	GND	Input	PFI 0 —This pin is configurable as either a digital trigger or an event counter input. Refer to the <i>PFI 0</i> section for more information.
+2.5 V	GND	Output	+2.5 V External Reference —Provides a reference for wrap-back testing. Refer to the <i>+2.5 V External Reference</i> section for more information.
+5 V	GND	Output	+5 V Power Source —Provides +5 V power up to 200 mA. Refer to the <i>+5 V Power Source</i> section for more information.

Analog Input

The NI USB-6008/6009 has eight analog input channels that you can use for four differential analog input measurements or eight single-ended analog input measurements.

The following figure shows the analog input circuitry of the NI USB-6008/6009.

Figure 7. NI USB-6008/6009 Analog Input Circuitry



The main blocks featured in the NI USB-6008/6009 analog input circuitry are as follows:

- **MUX**—The NI USB-6008/6009 has one analog-to-digital converter (ADC). The multiplexer (MUX) routes one AI channel at a time to the PGA.
- **PGA**—The programmable-gain amplifier provides input gains of 1, 2, 4, 5, 8, 10, 16, or 20 when configured for differential measurements and gain of 1 when configured for single-ended measurements. The PGA gain is automatically calculated based on the voltage range selected in the measurement application.
- **ADC**—The analog-to-digital converter (ADC) digitizes the AI signal by converting the analog voltage into digital code.
- **AI FIFO**—The NI USB-6008/6009 can perform both single and multiple analog-to-digital conversions of a fixed or infinite number of samples. A first-in-first-out (FIFO) buffer holds data during AI acquisitions to ensure that no data is lost.

Analog Input Modes and Signal Sources

You can configure the AI channels on the NI USB-6008/6009 to take differential or referenced single-ended (RSE) measurements. The following table summarizes the recommended analog input mode(s) for floating signal sources and ground-references signal sources. Refer to the table in the *Pinout and Signal Descriptions* section for more information about I/O configurations for single-ended or differential measurements.

Table 6. Analog Input Configurations

Analog Input Mode	Floating Signal Sources (Not Connected to Building Ground)	Ground-Referenced Signal Sources
Examples	<ul style="list-style-type: none"> Ungrounded thermocouples Signal conditioning with isolated outputs Battery devices 	Plug-in instruments with non-isolated outputs
Differential (DIFF)		
Referenced Single-Ended (RSE)		<p>NOT RECOMMENDED</p> <p>Ground-loop potential ($V_A - V_B$) are added to measured signal</p>

Floating Signal Sources

A floating signal source is not connected to the building ground system, but has an isolated ground-reference point. Some examples of floating signal sources are outputs of transformers, thermocouples, battery-powered devices, optical isolators, and isolation amplifiers. An instrument or device that has an isolated output is a floating signal source.

Refer to *Field Wiring and Noise Considerations for Analog Signals* for more information. To access this document, go to ni.com/info and enter the Info Code `rd.fwn3`.

When to Use Differential Connections with Floating Signal Sources

Use DIFF input connections for any channel that meets any of the following conditions:

- Your application requires input ranges other than ± 10 V.
- The input signal is low level and requires greater accuracy.

- The leads connecting the signal to the device are greater than 3 m (10 ft).
- The input signal requires a separate ground-reference point or return signal.
- The signal leads travel through noisy environments.
- Two analog channels, AI+ and AI-, are available for the signal.

DIFF signal connections reduce noise pickup and increase common-mode noise rejection. DIFF signal connections also allow input signals to float within the working voltage of the device.

Refer to the *Taking Differential Measurements* section for more information about differential connections.

When to Use Referenced Single-Ended (RSE) Connections with Floating Signal Sources

Only use RSE input connections if the input signal meets all of the following conditions:

- The input signal can share a common reference point, GND, with other signals that use RSE.
- Your application permits the use of the ± 10 V input range.
- The leads connecting the signal to the device are less than 3 m (10 ft).

DIFF input connections are recommended for greater signal integrity for any input signal that does not meet the preceding conditions.

In the single-ended modes, more electrostatic and magnetic noise couples into the signal connections than in DIFF configurations. The coupling is the result of differences in the signal path. Magnetic coupling is proportional to the area between the two signal conductors. Electrical coupling is a function of how much the electric field differs between the two conductors.

With this type of connection, the PGA rejects both the common-mode noise in the signal and the ground potential difference between the signal source and the device ground.

Refer to the *Taking Referenced Single-Ended Measurements* section for more information about RSE connections.

Ground-Referenced Signal Sources

A ground-referenced signal source is a signal source connected to the building system ground. It is already connected to a common ground point with respect to the device, assuming that the computer is plugged into the same power system as the source. Non-isolated outputs of instruments and devices that plug into the building power system fall into this category.

The difference in ground potential between two instruments connected to the same building power system is typically between 1 mV and 100 mV, but the difference can be much higher if power distribution circuits are improperly connected. If a grounded signal source is incorrectly measured, this difference can appear as measurement error. Follow the connection instructions

for grounded signal sources to eliminate this ground potential difference from the measured signal.

Refer to *Field Wiring and Noise Considerations for Analog Signals* for more information. To access this document, go to ni.com/info and enter the Info Code `rdfwn3`.

When to Use Differential Connections with Ground-Reference Signal Sources

Use DIFF input connections for any channel that meets any of the following conditions:

- Your application requires input ranges other than ± 10 V.
- The input signal is low level and requires greater accuracy.
- The leads connecting the signal to the device are greater than 3 m (10 ft).
- The input signal requires a separate ground-reference point or return signal.
- The signal leads travel through noisy environments.
- Two analog channels, AI+ and AI-, are available for the signal.

DIFF signal connections reduce noise pickup and increase common-mode noise rejection. DIFF signal connections also allow input signals to float within the working voltage of the device.

Refer to the *Taking Differential Measurements* section for more information about differential connections.

When to Use Referenced Single-Ended (RSE) Connections with Ground-Referenced Signal Sources

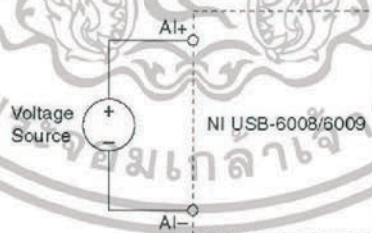
Do not use RSE connections with ground-referenced signal sources. Use differential connections instead.

As shown in the table in the *Analog Input Modes and Signal Sources* section, there can be a potential difference between GND and the ground of the sensor. In RSE mode, this ground loop causes measurement errors.

Taking Differential Measurements

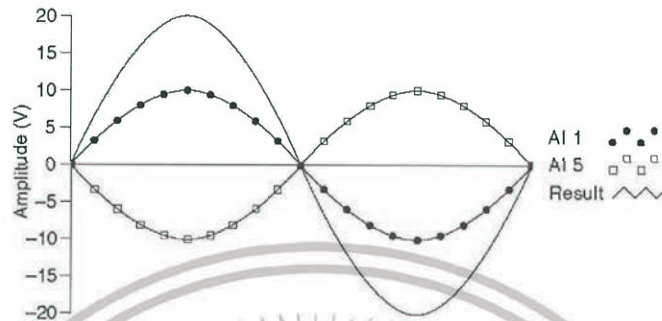
For differential signals, connect the positive lead of the signal to the AI+ terminal, and the negative lead to the AI- terminal.

Figure 8. Connecting a Differential Voltage Signal



The differential input mode can measure ± 20 V signals in the ± 20 V range. However, the maximum voltage on any one pin is ± 10 V with respect to GND. For example, if AI 1 is $+10$ V and AI 5 is -10 V, then the measurement returned from the device is $+20$ V.

Figure 9. Example of a Differential 20 V Measurement



Connecting a signal greater than ± 10 V on either pin results in a clipped output.

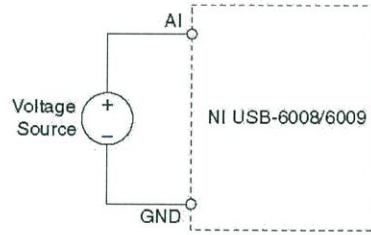
Figure 10. Exceeding ± 10 V on AI Returns Clipped Output



Taking Referenced Single-Ended Measurements

To connect referenced single-ended (RSE) voltage signals to the NI-USB-6008/6009, connect the positive voltage signal to an AI terminal, and the ground signal to a GND terminal, as shown in the following figure.

Figure 11. Connecting a Referenced Single-Ended Voltage Signal



When no signals are connected to the analog input terminal, the internal resistor divider may cause the terminal to float to approximately 1.4 V when the analog input terminal is configured as RSE. This behavior is normal and does not affect the measurement when a signal is connected.

Digital Trigger

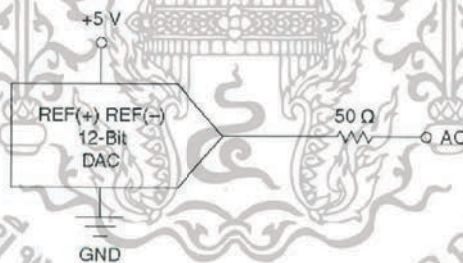
You can configure PFI 0 as a digital trigger input for analog input tasks. Refer to the *Using PFI 0 as a Digital Trigger* section for more information.

Analog Output

The NI USB-6008/6009 has two independent analog output channels that can generate outputs from 0 V to 5 V. All updates of analog output channels are software-timed. GND is the ground-reference signal for the analog output channels.

The following figure shows the circuitry of one analog output channel on the NI USB-6008/6009.

Figure 12. Circuitry of One Analog Output Channel

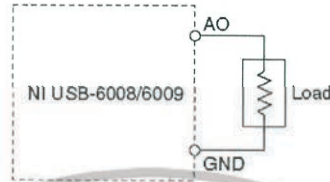


The main block featured in the NI USB-6008/6009 analog output circuitry is the digital-to-analog converter (DAC), which converts digital codes to analog voltages. There is one DAC for each analog output line.

Connecting Analog Output Loads

To connect loads to the NI USB-6008/6009, connect the positive lead of the load to the AO terminal, and connect the ground of the load to a GND terminal, as shown in the following figure.

Figure 13. Connecting a Load



Minimizing Glitches on the Output Signal

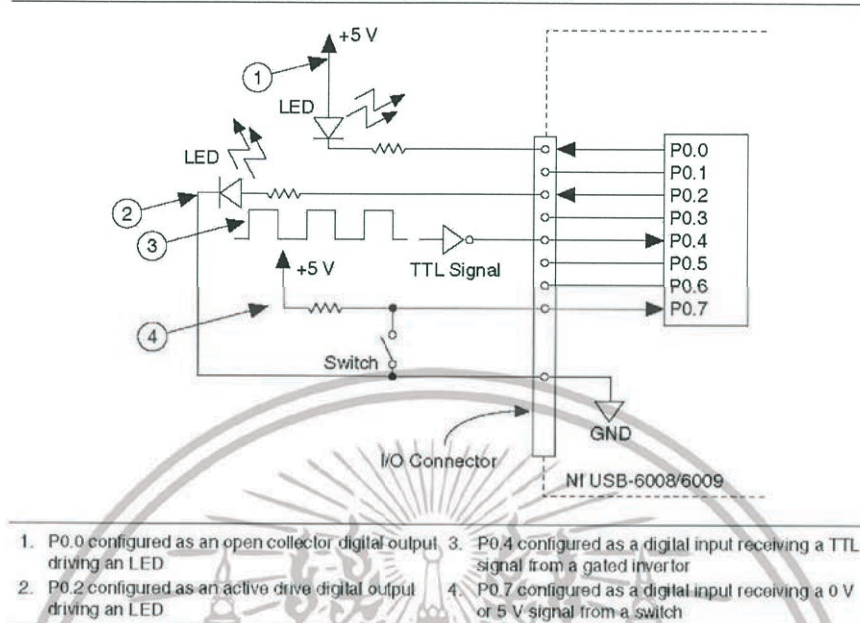
When you use a DAC to generate a waveform, you may observe glitches in the output signal. These glitches are normal; when a DAC switches from one voltage to another, it produces glitches due to released charges. The largest glitches occur when the most significant bit of the DAC code changes. You can build a lowpass deglitching filter to remove some of these glitches, depending on the frequency and nature of the output signal. For more information about minimizing glitches, refer to the KnowledgeBase document, *Reducing Glitches on the Analog Output of MIO DAQ Devices*. To access this document, go to ni.com/info and enter the Info Code `exszek`.

Digital I/O

The NI USB-6008/6009 has 12 digital lines on two ports, Port 0 has eight lines, P0.<0..7>, and Port 1 has four lines, P1.<0..3>. GND is the ground-reference signal for the digital I/O ports. You can individually program all lines as inputs or outputs.

The following figure shows P0.<0..7> connected to example signals configured as digital inputs and digital outputs. You can configure P1.<0..3> similarly.

Figure 14. Example of Connecting a Load



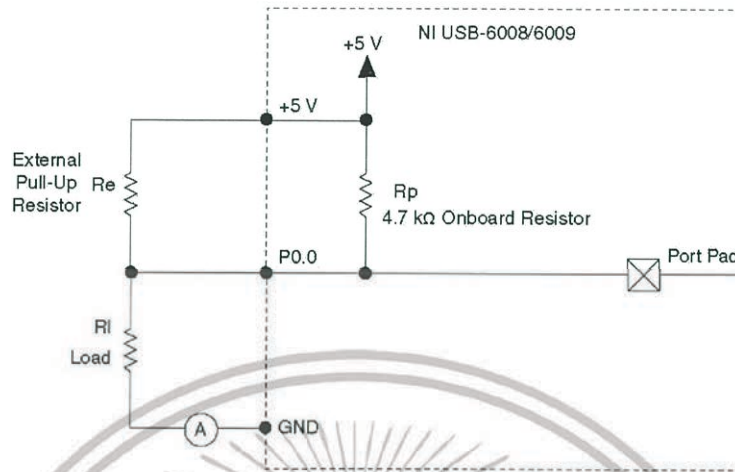
Caution Exceeding the maximum input voltage ratings or maximum output ratings can damage the device and the computer. National Instruments is not liable for any damage resulting from such signal connections. Refer to the *NI USB-6008 Device Specifications* or *NI USB-6009 Device Specifications* for more information.

Source/Sink Information

The default configuration of the NI USB-6008/6009 digital I/O ports is open collector, allowing 5 V operation, with an onboard 4.7 k Ω pull-up resistor. An external user-provided pull-up resistor can be added to increase the source current drive up to a 8.5 mA limit per line, as shown in the following figure.⁴

⁴ This document uses NI-DAQmx naming conventions. Open-drain is called open collector and push-pull is called active drive.

Figure 15. Example of Connecting an External User-Provided Resistor



The NI USB-6009 ports can also be configured as active drive using the NI-DAQmx API, allowing 3.3 V operation with a source/sink current limit of ± 8.5 mA. For more information about how to set the DIO configuration, refer to the KnowledgeBase document, *How Do I Configure My NI Device to be Open-Drain (Open Collector) or Push-Pull (Active Drive)?*. To access this document, go to ni.com/info and enter the Info Code `ex52sp`.

Determining the Value of the User-Provided Pull-Up Resistor

Complete the following steps to determine the value of the user-provided pull-up resistor:

1. Place an ammeter in series with the load.
2. Place a variable resistor between the digital output line and the +5 V supply.
3. Set P0.0 to high.
4. Adjust the variable resistor until the ammeter current reads as the intended current. The intended current must be less than 8.5 mA.
5. Remove the ammeter and variable resistor from your circuit.
6. Measure the resistance of the variable resistor. The measured resistance is the ideal value of the pull-up resistor.
7. Select a static resistor value for your pull-up resistor that is greater than or equal to the ideal resistance.
8. Reconnect the load circuit and the pull-up resistor.

I/O Protection

To protect the NI USB-6008/6009 against overvoltage, undervoltage, and overcurrent conditions, as well as ESD events, you should avoid these fault conditions by using the following guidelines:

- If you configure a DIO line as an output, do not connect it to any external signal source, ground signal, or power supply.
- If you configure a DIO line as an output, understand the current requirements of the load connected to these signals. Do not exceed the specified current output limits of the DAQ device.
National Instruments has several signal conditioning solutions for digital applications requiring high current drive.
- If you configure a DIO line as an input, do not drive the line with voltages outside of its normal operating range. The DIO lines have a smaller operating range than the AI signals.
- Treat the DAQ device as you would treat any static-sensitive device. Always properly ground yourself and the equipment when handling the DAQ device or connecting to it.

Power-On States

At system startup and reset, the hardware sets all DIO lines to high-impedance inputs. The DAQ device does not drive the signal high or low. Each line has a weak pull-up resistor connected to it.

Static DIO

Each of the NI USB-6008/6009 DIO lines can be used as a static DI or DO line. You can use static DIO lines to monitor or control digital signals. All samples of static DI lines and updates of DO lines are software-timed.

PFI 0

PFI 0 is configurable as either a digital trigger input or an event counter input.

Using PFI 0 as a Digital Trigger

When an analog input task is defined, you can configure PFI 0 as a digital trigger input. When the digital trigger is enabled, the AI task waits for a rising or falling edge on PFI 0 before starting the acquisition. To use AI Start Trigger (ai/StartTrigger) with a digital source, specify PFI 0 as the source and select a rising or falling edge.

Using PFI 0 as an Event Counter

You can configure PFI 0 as a source for counting digital edges. In this mode, falling-edge events are counted using a 32-bit counter. For more information about event timing

requirements, refer to the *NI USB-6008 Device Specifications* and *NI USB-6009 Device Specifications* documents available on ni.com/manuals.

External Reference and Power Source

The NI USB-6008/6009 creates an external reference and supplies a power source. All voltages are relative to ground (GND).

+2.5 V External Reference

The NI USB-6008/6009 creates a high-purity reference voltage supply for the ADC using a multi-state regulator, amplifier, and filter circuit. You can use the resulting +2.5 V reference voltage as a signal for self-test.

+5 V Power Source

The NI USB-6008/6009 supplies a 5 V, 200 mA output. You can use this source to power external components.



Note When the device is in USB suspend, the output is disabled.

Where to Go from Here

This section lists where you can find example programs for the NI USB-6008/6009 and relevant documentation.

Example Programs

NI-DAQmx and NI-DAQmx Base software include example programs to help you get started programming with the NI USB-6008/6009. Modify example code and save it in an application, or use examples to develop a new application, or add example code to an existing application.

NI-DAQmx

To locate NI software examples, go to ni.com/info and enter the Info Code `daqmxexp`.

To run examples without the device installed, use an NI-DAQmx simulated device. For more information, in Measurement & Automation Explorer (MAX), select **Help»Help Topics»NI-DAQmx»MAX Help for NI-DAQmx** and search for simulated devices.

NI-DAQmx Base

NI-DAQmx Base examples are accessible from **Start»All Programs»National Instruments»NI-DAQmx Base Examples**.

Related Documentation

Each application software package and driver includes information about writing applications for taking measurements and controlling measurement devices. The following references to documents assume you have NI-DAQmx 9.3 or later, and where applicable, version 8.5 or later of the NI application software.

NI USB-6008/6009

The *NI USB-6008/6009 Quick Start* included with the NI USB-6008/6009 describes how to install NI-DAQmx software, install the device, and confirm that your device is operating properly.

The *NI USB-6008 Device Specifications* and *NI USB-6009 Device Specifications* contain device specifications and are available at ni.com/manuals.

NI-DAQmx

The *NI-DAQmx Readme* is available from the Windows Start menu and lists which application software, devices, and ADEs are supported by this version of NI-DAQmx.

The *NI-DAQmx Help* is available from the Windows Start menu and contains API overviews, general information about measurement concepts, key NI-DAQmx concepts, and common applications that are applicable to all programming environments.

NI-DAQmx Base (Linux/Mac OS X/LabVIEW PDA 8.x)

The *Getting Started with NI-DAQmx Base* document describes how to install the NI-DAQmx Base software, the NI-DAQmx Base-supported DAQ device, and how to confirm that the device is operating properly on your Windows, Linux, or Mac machine. In Windows, select **Start»All Programs»National Instruments»NI-DAQmx Base»Documentation»Getting Started with NI-DAQmx Base**.

The *NI-DAQmx Base Readme* lists devices supported in different versions of NI-DAQmx Base. In Windows, select **Start»All Programs»National Instruments»NI-DAQmx Base»DAQmx Base Readme**.

The *NI-DAQmx Base VI Reference Help* contains VI reference and general information about measurement concepts. In LabVIEW, select **Help»NI-DAQmx Base VI Reference Help**.

The *NI-DAQmx Base C Function Reference Help* contains C reference and general information about measurement concepts. In Windows, select **Start»All Programs»National Instruments»NI-DAQmx Base»Documentation»C Function Reference Help**.



Note All NI-DAQmx Base documentation for Linux is installed at `/usr/local/natinst/nidaqmxbase/documentation`.



Note All NI-DAQmx Base documentation for Mac OS X is installed at / Applications/National Instruments/NI-DAQmx Base/documentation.

LabVIEW

Refer to ni.com/gettingstarted for more information about LabVIEW.

Use the *LabVIEW Help*, available by selecting **Help»LabVIEW Help** in LabVIEW, to access information about LabVIEW programming concepts, step-by-step instructions for using LabVIEW, and reference information about LabVIEW VIs, functions, palettes, menus, and tools. Refer to the following locations on the **Contents** tab of the *LabVIEW Help* for information about NI-DAQmx:

- **VI and Function Reference»Measurement I/O VIs and Functions»DAQmx - Data Acquisition VIs and Functions**—Describes the LabVIEW NI-DAQmx VIs and functions.
- **Property and Method Reference»NI-DAQmx Properties**—Contains the property reference.
- **Taking Measurements**—Contains the conceptual and how-to information you need to acquire and analyze measurement data in LabVIEW, including common measurements, measurement fundamentals, NI-DAQmx key concepts, and device considerations.

LabWindows/CVI

The **Data Acquisition** section of the *LabWindows/CVI Help* contains *Taking an NI-DAQmx Measurement in LabWindows/CVI*, which includes step-by-step instructions for creating a measurement task using the DAQ Assistant. In LabWindows/CVI, select **Help»Contents**, and then select **Using LabWindows/CVI»Data Acquisition**. This book also contains information about accessing detailed information through the *NI-DAQmx Help*.

The **NI-DAQmx Library** section of the *LabWindows/CVI Help* contains API overviews and function reference for NI-DAQmx. Select **Library Reference»NI-DAQmx Library** in the *LabWindows/CVI Help*.

Measurement Studio

If you program your NI-DAQmx-supported device in Measurement Studio using Visual C# or Visual Basic .NET, you can interactively create channels and tasks by launching the DAQ Assistant from MAX or from within Visual Studio. You can use Measurement Studio to generate the configuration code based on your task or channel. Refer to the *DAQ Assistant Help* for additional information about generating code.

The *NI Measurement Studio Help* is fully integrated with the Microsoft Visual Studio help. To view this help file in Visual Studio, select **Measurement Studio»NI Measurement Studio**

Help. For information related to developing with NI-DAQmx, refer to the following topics within the *NI Measurement Studio Help*:

- For step-by-step instructions on how to create an NI-DAQmx application using the Measurement Studio Application Wizard and the DAQ Assistant, refer to *Walkthrough: Creating a Measurement Studio NI-DAQmx Application*.
- For help with NI-DAQmx methods and properties, refer to *National Instruments.DAQmx Namespace* and *National Instruments.DAQmx.ComponentModel Namespace*.
- For conceptual help with NI-DAQmx, refer to *Using the Measurement Studio NI-DAQmx .NET Library* and *Developing with Measurement Studio NI-DAQmx*.
- For general help with programming in Measurement Studio, refer to *Getting Started with the Measurement Studio Class Libraries*.

To create an application in Visual Basic .NET or Visual C#, follow these general steps:

1. In Visual Studio, select **File»New»Project** to launch the New Project dialog box.
2. In the Project types pane, expand the **Visual Basic** or **Visual C#** node, depending on which language you want to create the project in, and select **Measurement Studio**.
3. Choose a project type. You add DAQ tasks as a part of this step.

ANSI C without NI Application Software

The *NI-DAQmx Help* contains API overviews and general information about measurement concepts. Select **Start»All Programs»National Instruments»NI-DAQmx»NI-DAQmx Help**.

The *NI-DAQmx C Reference Help* describes the NI-DAQmx Library functions, which you can use with National Instruments data acquisition devices to develop instrumentation, acquisition, and control applications. Select **Start»All Programs»National Instruments»NI-DAQmx»Text-Based Code Support»NI-DAQmx C Reference Help**.

.NET Languages without NI Application Software

With the Microsoft .NET Framework, you can use NI-DAQmx to create applications using Visual C# and Visual Basic .NET without Measurement Studio. Refer to the *NI-DAQmx Readme* for specific versions supported.

Training Courses

If you need more help getting started developing an application with NI products, NI offers training courses. To enroll in a course or obtain a detailed course outline, refer to ni.com/training.

Technical Support on the Web

For additional support, refer to ni.com/support or ni.com/examples.



Note You can download these documents at ni.com/manuals.

Many DAQ specifications and user guides/manuals are available as PDFs. You must have Adobe Reader 7.0 or later (PDF 1.6 or later) installed to view the PDFs. Refer to the Adobe Systems Incorporated website at www.adobe.com to download Adobe Reader. Refer to the National Instruments Product Manuals Library at ni.com/manuals for updated documentation resources.

Worldwide Support and Services

The National Instruments website is your complete resource for technical support. At ni.com/support, you have access to everything from troubleshooting and application development self-help resources to email and phone assistance from NI Application Engineers.

Visit ni.com/services for NI Factory Installation Services, repairs, extended warranty, and other services.

Visit ni.com/register to register your National Instruments product. Product registration facilitates technical support and ensures that you receive important information updates from NI.

A Declaration of Conformity (DoC) is our claim of compliance with the Council of the European Communities using the manufacturer's declaration of conformity. This system affords the user protection for electromagnetic compatibility (EMC) and product safety. You can obtain the DoC for your product by visiting ni.com/certification. If your product supports calibration, you can obtain the calibration certificate for your product at ni.com/calibration.

National Instruments corporate headquarters is located at 11500 North Mopac Expressway, Austin, Texas, 78759-3504. National Instruments also has offices located around the world. For telephone support in the United States, create your service request at ni.com/support or dial 1 866 ASK MYNI (275 6964). For telephone support outside the United States, visit the *Worldwide Offices* section of ni.com/niglobal to access the branch office websites, which provide up-to-date contact information, support phone numbers, email addresses, and current events.

Refer to the *NI Trademarks and Logo Guidelines* at ni.com/trademarks for information on National Instruments trademarks. Other product and company names mentioned herein are trademarks or trade names of their respective companies. For patents covering National Instruments products/technology, refer to the appropriate location: **Help>Patents** in your software, the `patents.txt` file on your media, or the *National Instruments Patent Notice* at ni.com/patents. You can find information about end-user license agreements (EULAs) and third-party legal notices in the readme file for your NI product. Refer to the *Export Compliance Information* at ni.com/legal/export-compliance for the National Instruments global trade compliance policy and how to obtain relevant HTS codes, ECCNs, and other import/export data. NI MAKES NO EXPRESS OR IMPLIED WARRANTIES AS TO THE ACCURACY OF THE INFORMATION CONTAINED HEREIN AND SHALL NOT BE LIABLE FOR ANY ERRORS. U.S. Government Customers: The data contained in this manual was developed at private expense and is subject to the applicable limited rights and restricted data rights as set forth in FAR 52.227-14, DFAR 252.227-7014, and DFAR 252.227-7015.

© 2004–2015 National Instruments. All rights reserved.

371303N-01 Jul15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เข้าร่วมงาน ICA SP-CON 2019 ครั้งที่ 10 ณ สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร

เป็นงานที่นำปริญญานิพนธ์ของนักศึกษาชั้นปีที่ 4 คณะวิศวกรรมศาสตร์ของสาขาวิชาที่เกี่ยวข้องกัน
อันได้แก่ สาขาวิชาวิศวกรรมควบคุม และอัตโนมัติ มานำเสนอในงานในที่ประชุม



This is to certify that

Kamonchanok Kamonwattana, Panuwat Ahpichitpongchai, Wiriya Intarit

has successfully completed the presentation of the project entitled

Controller Design for the Heat Exchanger System with Accumulative Heat Reservoir

at the Tenth Instrumentation, Control, and Automation Senior Project Conference
(ICA SP-CON 2019) on April 30, 2019 at Sirindhorn International Institute of Technology,
Thammasat University, Thailand.

Assoc. Prof. Dr. Witree Komprawechnon
SIT, Thammasat University
ICA SP-CON 2019 General Chair

Assoc. Prof. Dr. Pittawat Nakhathang
SIT, Thammasat University
ICA SP-CON 2019 Technical Program Chair

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้