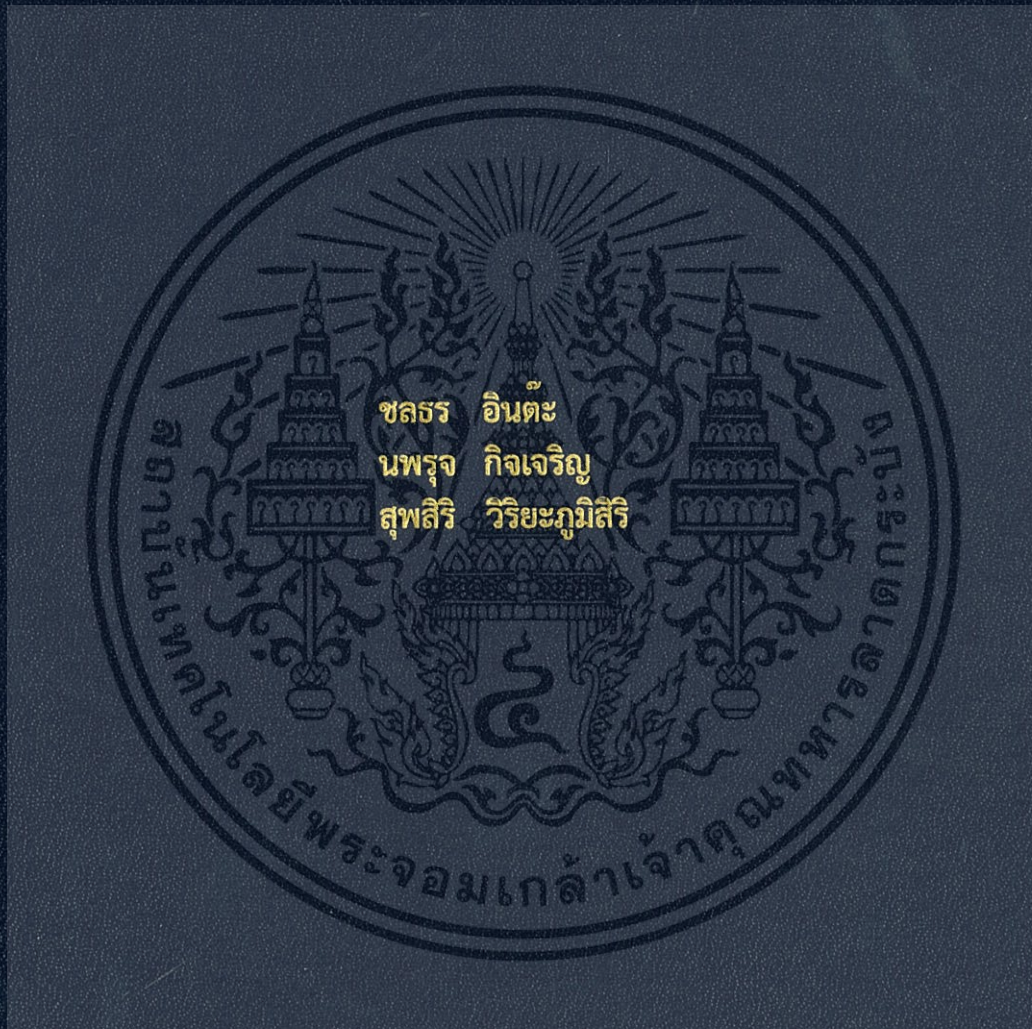


การออกแบบระบบควบคุมขั้นสูงสำหรับควบคุมเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน  
ADVANCED CONTROL DESIGNS OF HEAT EXCHANGER



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิศวกรรมการวัดคุม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2560

การออกแบบระบบควบคุมขั้นสูงสำหรับควบคุมเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน  
ADVANCED CONTROL DESIGNS OF HEAT EXCHANGER



TB00028

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมการวัดคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ADVANCED CONTROL DESIGNS OF HEAT EXCHANGER



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

ACADEMIC YEAR 2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

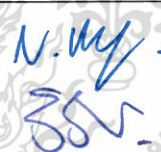
ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2560  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

หัวข้อปริญญาานิพนธ์ การออกแบบระบบควบคุมขั้นสูงสำหรับควบคุมเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

ADVANCED CONTROL DESIGNS OF HEAT EXCHANGER

นักศึกษาผู้จัดทำ นายชลธร อินตะ รหัสนักศึกษา 57010269  
นายนพรุจ กิจเจริญ รหัสนักศึกษา 57010652  
นางสาวสุพลี วิริยะภูมิสิริ รหัสนักศึกษา 57011407

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมการวัดคุม  
ปีการศึกษา 2560

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ดร.นภศูล วงษ์วานิช รองศาสตราจารย์ วิริยะ กองรัตน์	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>หัวข้อปริญญาโท</b>	การออกแบบระบบควบคุมขั้นสูงสำหรับควบคุมเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ADVANCE CONTROL DESIGNS OF HEAT EXCHANGER
<b>นักศึกษาผู้จัดทำ</b>	นายชลธร อินดีะ นายนพรุจ กิจเจริญ นางสาวสุพสิริ วิริยะภูมิสิริ
<b>อาจารย์ที่ปรึกษา</b>	ดร.นภศูล วงษ์วานิช รองศาสตราจารย์วิริยะ กองรัตน์
<b>ปีการศึกษา</b>	2560

### บทคัดย่อ

การออกแบบระบบควบคุมขั้นสูงสำหรับควบคุมเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนี้ เป็นการศึกษาสมการทางคณิตศาสตร์ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และออกแบบระบบให้ได้ตามอุณหภูมิที่ต้องการ โดยการคำนวณหาสมการทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมจากการเจาะจงระบบ (System Identification) บนโปรแกรม (MATLAB) จากนั้นนำค่าที่ได้จากสมการมาออกแบบจำลองระบบควบคุม โดยใช้ตัวควบคุมแบบ PID/LQR แล้วนำระบบที่ได้มาเปรียบเทียบกับระบบปฏิบัติการจริงเพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพ และปรับแต่งค่าตัวแปรที่มีผลต่อระบบให้มีประสิทธิภาพตามเป้าหมายที่เราต้องการ โดยยึดตามระบบปฏิบัติการจริงเป็นหลัก

<b>Thesis Title</b>	ADVANCE CONTROL DESIGNS OF HEAT EXCHANGER	
<b>Author</b>	Mr. Chonlatorn	Inta
	Mr. Noppharuj	Kitcharoun
	Miss Suphasiri	Viriyapomsiri
<b>Thesis Advisor</b>	Dr. Napasool	Wongvanich
	Assoc.Prof. Viriya	Kongrattana
<b>Year</b>	2017	

### ABSTRACT

This thesis develops an LQR based PID controller for temperature control of the heat exchanger system. Specifically, a mathematical model of the heat exchanger unit is firstly obtained through the use of integral based system identification in MATLAB to identify the parameters of the heat exchanger unit. The identified model is then used to design the required PID controller. The LQR architecture is used to obtain the optimal gains for the PID controller. The designed controller was implemented onto the heat exchanger unit, and was found to be efficient for used in real world operating system.

# กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาโทฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีอย่างสมบูรณ์ โดยได้รับความอนุเคราะห์อย่างดีจาก ดร.นภศุล วงษ์วานิช และรองศาสตราจารย์วิริยะ กองรัตน์ ที่ให้คำแนะนำในการทำโครงการขั้นนี้ และให้คำปรึกษาเพื่อเป็นแนวทางในการแก้ไขและดูแลตรวจสอบจนโครงการวิศวกรรมฉบับนี้เสร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี จึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ หากโครงการนี้มีข้อผิดพลาดประการใด ทางคณะผู้จัดทำต้องขออภัยไว้ ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ .....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง .....	VI
สารบัญรูป.....	VII
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญของปริญญาโท.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญาโท.....	1
1.3 ขอบเขตของปริญญาโท.....	1
1.4 ขั้นตอนของการศึกษา.....	1
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>3</b>
2.1 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....	3
2.2 แบบจำลองกระบวนการทางคณิตศาสตร์.....	5
2.3 เครื่องจัดเก็บข้อมูลและแปลงสัญญาณ (Data Acquisition).....	6
2.4 วิธีระบุเอกลักษณ์ของระบบ (System Identification).....	6
2.5 การควบคุมแบบ PID (Proportional Integrated Controller).....	8
2.6 การควบคุมแบบ LQR (Linear Quadratic Regulator).....	8
2.7 ซอฟต์แวร์ที่เกี่ยวข้อง .....	11
2.7.1 MATLAB.....	11
2.7.2 LabVIEW.....	11
2.7.3 Maplesoft Maple 2016.....	12
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน.....</b>	<b>13</b>
3.1 ขั้นตอนในการดำเนิน.....	13
3.2 การดำเนินงาน.....	14

# สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2.1 Hardware.....	14
3.2.1.1 Heater.....	15
3.2.1.2 Solid State Relay.....	15
3.2.1.3 Converter.....	15
3.2.2 Comparison .....	16
3.2.3 Data and Graph.....	17
3.2.4 System Identification and Transfer Function.....	21
3.3.5 Control and Tuning (PID).....	24
3.3.6 Parameter LQR and Control .....	25
<b>บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง.....</b>	<b>28</b>
4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง .....	28
4.2 วิธีการทดลอง .....	28
4.3 ผลการทดลอง.....	29
4.3.1 การทดลองที่ 1.....	29
4.3.3 การทดลองที่ 2.....	30
<b>บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>31</b>
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	31
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	31
<b>บรรณานุกรม .....</b>	<b>32</b>
<b>ภาคผนวก.....</b>	<b>34</b>

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 แสดงข้อมูลของการเก็บข้อมูลที่ได้จากการทดลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน .....	19
3.2 แสดงตัวอย่างค่าที่เก็บเป็นตาราง Excel.....	20



# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....	3
2.2 แสดงเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแผ่น.....	4
2.3 แสดงฮีตเตอร์ (Heater).....	4
2.4 DAQ (Data acquisition).....	6
2.5 แสดงรูปแบบของซอฟต์แวร์ MATLAB.....	11
2.6 แสดงรูปแบบของซอฟต์แวร์ LabVIEW.....	12
2.7 แสดงรูปแบบของซอฟต์แวร์ Maplesoft Maple.....	12
3.1 แสดงแผนผังการดำเนินงาน.....	13
3.2 รูปแสดงการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....	15
3.3 แสดงการต่อวงจรคอนเวอเตอร์.....	16
3.4 แสดงไดอะแกรมของโปรแกรม LABVIEW ที่ใช้ในการเก็บค่าและแสดงผล.....	18
3.5 แสดงตัวอย่างการเก็บค่าโดยพล็อตเป็นกราฟ.....	20
3.6 แสดงสมการ Transfer Function.....	22
3.7 แสดงส่วนของบล็อกคอนโทรล.....	24
3.8 แสดงหน้าจอแสดงผล ของ LABVIEW.....	25
3.9 แสดง Close - Loop system.....	25
4.1 แสดง Block Diagram ของ Close Control Loop.....	28
4.2 กราฟของระบบควบคุมการแลกเปลี่ยนความร้อนแบบPID.....	29
4.3 กราฟของระบบควบคุมการแลกเปลี่ยนความร้อนแบบLQR.....	30

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญของปริญญานิพนธ์

ปัจจุบันมีการพัฒนาวิธีการควบคุมระบบด้วยวิธีการใหม่ๆมากมายในอุตสาหกรรม เพื่อช่วยในการตอบสนองของกระบวนการผลิตให้ได้ตามเป้าหมาย และมีประสิทธิภาพได้ตามความต้องการ ทั้งนี้ระบบจำลองจะช่วยในการออกแบบพัฒนา ช่วยป้องกันการเสียหายก่อนที่ทดลองในระบบปฏิบัติการจริง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมการผลิต

งานวิจัยในหลายบทความได้เสนอวิธีการสร้างระบบควบคุมมากมาย โดยแต่ละงานวิจัยได้มีผลตอบสนองที่คลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง จึงเป็นที่มาในการนำเสนอแนวคิดนี้ เพื่อดำเนินการศึกษาวิธีรูปแบบการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีความซับซ้อนมากขึ้น โดยการเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เมื่อได้สมการที่ต้องการ และทราบค่าตัวแปรต่างๆแล้ว จะมีการดำเนินงานทดลองกับในระบบปฏิบัติการจริง เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของแบบจำลองว่ามีผลตอบสนองที่มีประสิทธิภาพอย่างไรต่อไป

### 1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์

เพื่อที่จะนำความรู้จากการสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์ (Mathematical modeling) มาประยุกต์ใช้ในการสร้างตัวควบคุมของระบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ที่สามารถกำหนดอุณหภูมิให้ เป็นไปได้ตามที่ต้องการ ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนได้ และผลตอบสนองมีความเสถียร โดยใช้วิธีการ PID/LQR ในการสร้างตัวควบคุม

### 1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์

1. ศึกษาการใช้โปรแกรม MatLAB เพื่อหาสมการที่นำไปใช้ในการควบคุมกระบวนการ
2. ศึกษาการควบคุมโดยวิธีการ PID/LQR เพื่อนำมาใช้ในการสร้างตัวควบคุม
3. เพื่อควบคุม Heat Exchanger ให้มีอุณหภูมิตามที่เรารต้องการและมีความเสถียร จะทำการ ศึกษาและออกแบบระบบควบคุมเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ประเภทของเหลวไหลสวนกัน

### 1.4 ขั้นตอนของการศึกษา

1. ศึกษาทฤษฎีและหลักการการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
2. ศึกษาโปรแกรม MATLAB, Labview
3. ศึกษาการสร้างสมการทางคณิตศาสตร์ และออกแบบสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. จำลองการทำงานในโปรแกรม Matlab โดยสมมุติสมการ
5. เก็บข้อมูลจากระบบปฏิบัติการจริง โดยใช้โปรแกรม Labview
6. นำสมการที่ได้จากระบบจำลอง และระบบปฏิบัติการจริงมาเปรียบเทียบ
7. ปรับแต่งสมการ เพื่อให้ควบคุมระบบปฏิบัติการจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ความรู้เรื่องการใช้ MATLAB หา Mathematics Modeling ที่สามารถนำไปควบคุมระบบ
2. ทราบหลักการควบคุมแบบย้อนกลับ (Feedback Control)
3. สามารถนำหลักการควบคุมอุณหภูมิของ Heat Exchanger นี้ไปประยุกต์ใช้กับการควบคุมในลักษณะอื่นๆ ได้อย่างถูกต้องเหมาะสม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

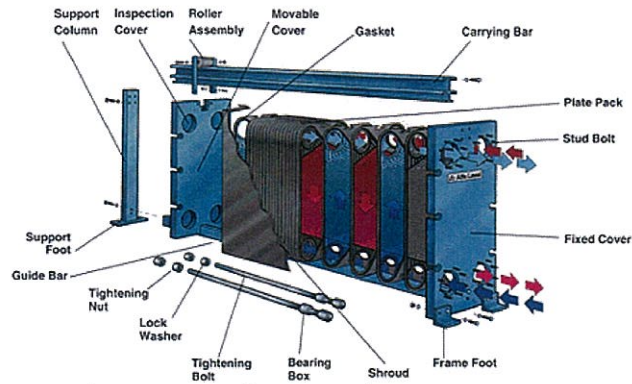
เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน คือ เครื่องมือที่ใช้สำหรับถ่ายเทความร้อนจากของไหลชนิดหนึ่ง ไปยังของไหลอีกชนิดหนึ่ง โดยที่ของไหลไม่จำเป็นต้องผสมกัน โดยส่วนประกอบพื้นฐานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะมีแผ่น โดยอาศัยพื้นผิวของแผ่นเป็นตัวกลางในการถ่ายโอนความร้อนระหว่างของไหลทั้งสองชนิด

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีหลายแบบการจำแนกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนอาจทำได้ โดยอาศัยทิศทางการเคลื่อนที่ของของไหลในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และลักษณะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ในปฏิกิริยานี้คือแบบแผ่น ประกอบด้วยแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนหลายแผ่น วางเรียงกันต่อขนานกันเป็นชุด ชุดแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนจะถูกประกอบอยู่ระหว่างเฟรมหน้า (Fixed Cover) และเฟรมอัด (Movable Cover) มีท่อเข้า-ออกอยู่บนเฟรมหน้า (อาจจะอยู่บนทั้งสองเฟรมก็ได้ ถ้ามีการจัดการไหลในชุดแผ่นมากกว่าหนึ่งรอบ) ชุดแผ่นและเฟรม ยึดกันให้แน่นด้วยชุดสลักยึด (Tightening Bolt and Nut) แขนงอยู่บนคานแขวนบน (Carrying Bar) และตั้งอยู่บนคานรับล่าง มีลักษณะดังรูปที่ 2.1 – 2.2



รูปที่ 2.1 แสดงเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน[1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 แสดงเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแผ่น[1]

### ฮีตเตอร์ (Heater)

เป็นอุปกรณ์ให้ความร้อนแก่ชิ้นงานในโรงงานอุตสาหกรรม โดยใช้หลักการจ่ายกระแสไฟฟ้าไหลผ่านลวดตัวนำ ซึ่งส่งผลให้ลวดตัวนำมีความร้อนเกิดขึ้น โดยแหล่งจ่ายไฟสามารถใช้ได้กับแรงดัน 220VAC และ 380 VAC ทำให้ผู้ใช้สามารถงานฮีตเตอร์ (Heater) ได้ง่ายและสะดวก เนื่องจากการใช้งานฮีตเตอร์นั้น สามารถเข้าใจหลักการทำงานได้ง่าย ซึ่งชนิดของฮีตเตอร์ที่ใช้ในปริญญานิพนธ์นี้เป็นฮีตเตอร์ชนิดจุ่ม (Immersion Heater) หรือฮีตเตอร์ต้มน้ำ สามารถใช้ให้ความร้อนกับของเหลวทุกชนิด ตัวอย่างแสดงฮีตเตอร์อยู่ในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงฮีตเตอร์ (Heater) [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 แบบจำลองกระบวนการทางคณิตศาสตร์

โดยในตัวอย่างการทดลองนี้ จะเป็นการนำความรู้เกี่ยวกับการสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์ มาสร้างตัวควบคุมระบบของ Heat Exchanger ให้ได้คุณสมบัติตามที่ต้องการ สามารถปรับเปลี่ยนได้ และมีความเสถียรภาพ ซึ่งในที่นี้เราจะศึกษาทฤษฎี PID และ LQR ในการออกแบบ เนื่องจากระบบ แลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบกับสมการได้โดยตรง จึงต้องอ้างอิงจากเอกสาร [3] โดยสมการที่นำมาใช้จะอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ 2 สมการ ซึ่งสมการอนุพันธ์แรก จะกล่าวถึงการถ่ายเทความร้อนในด้านร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ส่วนสมการอนุพันธ์สมการที่สองจะ กล่าวถึงการถ่ายเทความร้อนในด้านเย็น แสดงในสมการที่ 2.1 - 2.2

$$\tau_p \frac{dT_p^o}{dt} + T_p^o = \mu_p T_p^i + (1 - \mu_p) T_c^o \quad (2.1)$$

$$\tau_c \frac{dT_c^o}{dt} + T_c^o = \mu_c T_c^i + (1 - \mu_c) T_p^o \quad (2.2)$$

สมการของ Time constants จะแสดงในสมการที่ 2.3

$$\tau_p = \frac{\rho_p C_{p_p} V_p}{\dot{m}_p C_{p_p} + UA} \quad \text{และ} \quad \tau_c = \frac{\rho_c C_{p_c} V_c}{\dot{m}_c C_{p_c} + UA} \quad (2.3)$$

ค่าพารามิเตอร์ของ  $\mu_p$  และ  $\mu_c$  หาได้จาก สมการที่ 2.4

$$\mu_p = \frac{C_{p_p} \dot{m}_p}{C_{p_p} \dot{m}_p + UA} \quad \text{และ} \quad \mu_c = \frac{C_{p_c} \dot{m}_c}{C_{p_c} \dot{m}_c + UA} \quad (2.4)$$

เมื่อ

$T_p^o, T_p^i$	= อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ที่ทางเข้าและทางออกตามลำดับ, K
$T_c^o, T_c^i$	= อุณหภูมิของของเหลวเย็นที่ทางเข้าและทางออกตามลำดับ, K
$\rho_p, \rho_c$	= ความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์และของเหลวเย็นตามลำดับ, Kg/m <sup>3</sup>
$C_{p_p}, C_{p_c}$	= ค่าความจุความร้อนจำเพาะของผลิตภัณฑ์และของเหลวเย็นตามลำดับ, J/kg-K
$V_p, V_c$	= ปริมาตรของผลิตภัณฑ์และของเหลวเย็นตามลำดับ, m <sup>3</sup>
$\dot{m}_p, \dot{m}_c$	= อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์และของเหลวเย็นตามลำดับ, Kg/s
$U$	= ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม, W/K-m <sup>2</sup>
$A$	= พื้นที่ผิวที่มีการส่งผ่านความร้อน, m <sup>2</sup>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 เครื่องจัดเก็บข้อมูลและแปลงสัญญาณ DAQ (Data acquisition)

Data Acquisition ทำหน้าที่ประมวลผลความหมาย หรือ เปลี่ยนสัญญาณในลักษณะ Analog ให้มาอยู่ในรูปของสัญญาณดิจิทัล เพื่อประโยชน์ในการตีความหมายและใช้ในการควบคุมหน้าที่ของ DAQ boards อาจจะเป็นการอ่านสัญญาณ analog (A/D Conversion) การสร้างสัญญาณ อันนาลอก (D/A conversion) เขียนและอ่านสัญญาณ เพื่อเชื่อมต่อกับ Transducer โดยในปริญญา นิพนธ์นี้จะใช้ร่วมกับโปรแกรม LabVIEW ตัวอย่างในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 DAQ (Data acquisition) [4]

## 2.4 วิธีระบุเอกลักษณ์ของระบบ (System Identification)

ถูกพัฒนามาเพื่อใช้หาแบบจำลองกระบวนการทางคณิตศาสตร์ของระบบที่เป็น Block โดยอาศัยข้อมูลความสัมพันธ์ของอินพุตกับเอาต์พุตของระบบนั้นๆ เพื่อหาแบบจำลองกระบวนการทางคณิตศาสตร์ของระบบ โดยทดสอบผลตอบสนองของระบบด้วยอินพุตอย่างใดอย่างหนึ่ง บันทึกผลตอบสนองที่ได้ แล้วนำไปหาสมการความสัมพันธ์[5]

### Linear Least Squares Method

เป็นวิธีที่เหมาะสมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในกรณีที่ค่าในอุดมคติหาจากแบบจำลองเพื่อสร้างกราฟจุดข้อมูลเชิงเส้นในรูปแบบของค่าตัวแปรที่ไม่ทราบค่าของแบบจำลอง ผลลัพธ์จะใช้สรุปข้อมูล และคาดการณ์ค่าที่สังเกตไม่ได้จากระบบเดียวกัน เพื่อทำความเข้าใจกลไกที่เป็นส่วนสำคัญของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการการทำนายล่วงหน้าเป็นดังนี้

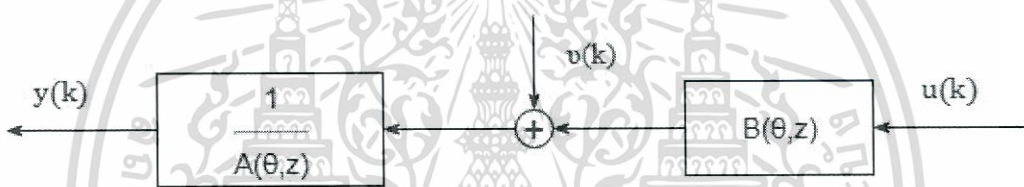
$$\hat{y}(k|\theta) = \varphi^T(k)\theta + u(k) \quad (2.5)$$

สมการฟังก์ชันเริ่มต้น(Cost function) คือ

$$J(\theta|Z_K) = \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} \frac{u(k)^2}{2} \quad (2.6)$$

เกณฑ์ของกำลังสองน้อยสุด

$$\hat{\theta}_{LS} = \underbrace{\left( \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} \varphi(k) \varphi^T(k) \right)^{-1}}_{R_K^{-1} \in R^{d \times d}} \underbrace{\frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} \varphi(k) y(k)}_{f_K \in R^d} \quad (2.7)$$



คุณสมบัติของตัวประมาณกำลังสองน้อยสุด โดยการประมาณกำลังสองสูงสุด สามารถแสดงดังนี้

$$\hat{\theta}_{LS} = R_K^{-1} f_K \quad (2.8)$$

จากกรณีจริง จะได้ว่า

$$y(k) = \varphi^T(k)\theta_o + v(k) \quad (2.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 การควบคุมแบบ PID (Proportional Integrated Controller)

PID control เป็นการควบคุมในระบบวงปิด คือ ระบบควบคุมที่มีการป้อนกลับ ประกอบด้วยส่วนการควบคุมที่สำคัญดังนี้

- Proportional control action (P - Action) การกำหนดการทำงานของ output ให้เป็นสัดส่วนเปอร์เซ็นต์กับค่า error
- Integral control action (I-Action) เป็นสัดส่วนของขนาดความผิดพลาดและระยะเวลาของความผิดพลาด
- Derivative control action (D-Action) อัตราการเปลี่ยนแปลงของความผิดพลาด การรบกวนระบบจากภายนอก

โดยนิยมนำมาใช้ในการควบคุมอุณหภูมิ โดยสามารถแก้ไขปัญหา การเกิด Offset Error ที่สถานะคงตัวของระบบได้ โดยสามารถหาค่าตัวแปรของ PID ได้จากสมการที่ 2.10

$$u(t) = MV(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.10)$$

เมื่อ

- $u(t)$  = สัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุม ที่เวลา  $t$
- $K_p$  = ค่า Proportional Gain
- $K_i$  = ค่า Integral Gain
- $K_d$  = ค่า Derivative Gain
- $e$  = ค่าความผิดพลาดที่เกิดจาก set point value – process value
- $t$  = ค่าเวลาในขณะนั้น
- $\tau$  = ผลรวมของตัวแปรความผิดพลาดตั้งแต่เวลา 0 ถึง  $t$

## 2.6 การควบคุมแบบ LQR (Linear Quadratic Regulator)

การควบคุมแบบ LQR เป็นการใช้ Optimal Control เข้ามาช่วยในการออกแบบระบบควบคุมที่มีการป้อนกลับ โดยการวิเคราะห์ที่ state จากพลวัตของกระบวนการ โดยสามารถกำหนดผลตอบแทนความต้องการที่คาดหวังแทนการลองผิดลองถูกจากค่าความผิดพลาดที่สภาพของตัวระบบควบคุม แทนการวิเคราะห์จากความผิดพลาดระหว่างค่าที่ตั้งไว้ และค่าจากกระบวนการ โดยกระบวนการ LQR จะมีการวิเคราะห์สมการในรูปเมทริกซ์ หรือ เรียกว่า สเตท (state) โดยพิจารณาสมการสเตทของระบบเชิงเส้น (State-space representation of linear system) ดังสมการที่ 2.11

[6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad \text{และ} \quad y = Cx \quad (2.11)$$

เมื่อ

- $x$  = เวกเตอร์สเตต (state vector)
- $A$  = เมตริกซ์การเปลี่ยนแปลงสเตต
- $B$  = เวกเตอร์อินพุต
- $u$  = ตัวแปรอินพุต
- $y$  = ตัวแปรที่ถูกวัดค่ามา
- $C$  = เมตริกซ์เอาท์พุท

ทั้งนี้ในการใช้ทฤษฎีระบบควบคุมเหมาะสมที่สุด (Optimal Control) จำเป็นที่จะต้องนิยามฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective Function) หรือ Cost Function ดังสมการที่ 2.12

$$J = \frac{1}{2} \int_0^T x^T Q x + u^T R u \, dt \quad (2.12)$$

- เมื่อ  $Q$  = เมตริกซ์ขนาด  $n \times n$  ชนิด positive semi definite  
 $R$  = เมตริกซ์ขนาด  $n \times n$  ชนิด positive definite

จากทฤษฎีระบบควบคุมเหมาะสมที่สุด (Optimal Control) ทำการตั้งสมการ Hamiltonian ดังสมการที่ 2.13

$$H = \frac{1}{2} x^T Q x + \frac{1}{2} u^T R u + \lambda^T (Ax + Bu) \quad (2.13)$$

ค่าอินพุตของ  $u$  ที่เหมาะสมที่สุด (Optimal) หรือ  $u^*$  สามารถคำนวณได้จากปัจจัยของความเหมาะสม (Optimality Condition) ดังสมการที่ 2.14 - 2.15

$$\text{เมื่อ} \quad \frac{\partial w}{\partial u} = 0 \quad \text{แล้ว} \quad Ru + B^T \lambda = 0 \quad (2.14)$$

$$\text{จะได้} \quad u^* = -R^{-1} B^T \lambda \quad (2.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อทำการคำนวณหา  $\lambda$  ทำการใช้สมการผูกพัน (Adjoint Equation) ดังสมการที่ 2.16

$$\text{เมื่อ } -\frac{\partial H}{\partial u} = \dot{\lambda} \quad \text{แล้ว} \quad \dot{x} = -Qx - A^T \lambda \quad (2.16)$$

ทำการนิยาม  $\lambda = Px$  เมื่อ  $P$  เป็นเมตริกซ์ชนิด Positive definite และเมื่อใช้ Sweep Method เพื่อหาของเขตของผลลัพธ์ เมื่อ  $P$  เป็นรากของสมการผลต่าง Riccati จะได้สมการที่ 2.17

$$A^T P + PA + Q - PBR^{-1}B^T P = 0 \quad (2.17)$$

ค่าอินพุตควบคุมที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Control Input) ดังสมการที่ 2.18

$$u^* = -R^{-1}B^T P x \quad (2.18)$$

ทั้งนี้ค่า  $R^{-1}B^T P$  สามารถเรียกว่าอัตราขยาย (Gain, K) ดังสมการที่ 2.19

$$K = R^{-1}B^T P \quad (2.19)$$

## 2.7 ซอฟต์แวร์ที่เกี่ยวข้อง

### 2.7.1 MATLAB

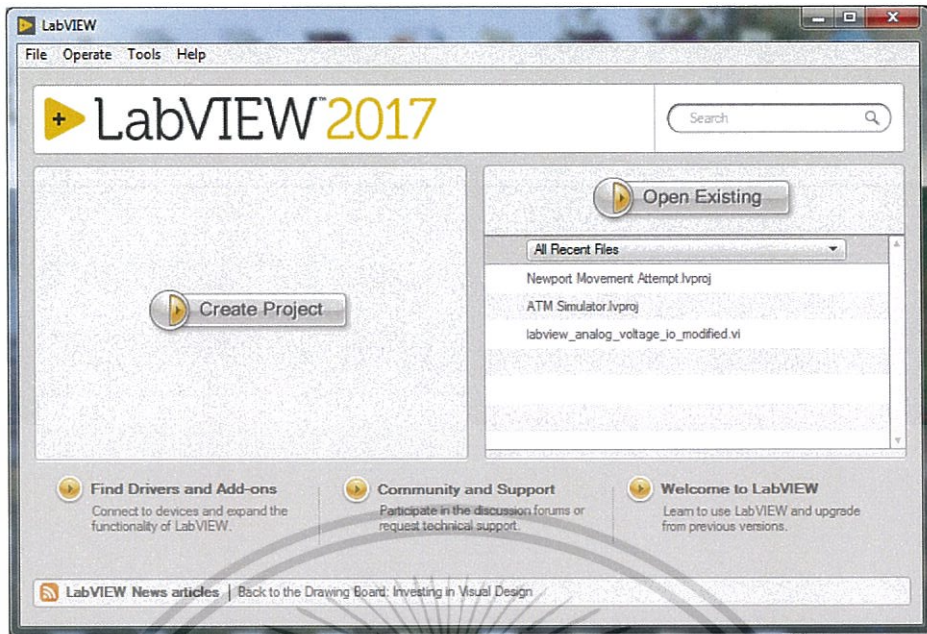
MATLAB เป็นภาษาคอมพิวเตอร์ระดับสูงที่ใช้คำนวณเชิงตัวเลข แสดงผลกราฟฟิก พัฒนาอัลกอริทึม สร้างแบบจำลอง ประกอบไปด้วยฟังก์ชันพื้นฐานจำนวนมาก ทำให้การวิเคราะห์ทำได้หลากหลายวิธี โดยในที่นี้จะใช้ในการหาสมการที่นำไปใช้ในการควบคุมกระบวนการ [7]



รูปที่ 2.5 แสดงรูปแบบของซอฟต์แวร์ MATLAB [7]

### 2.7.2 LabVIEW

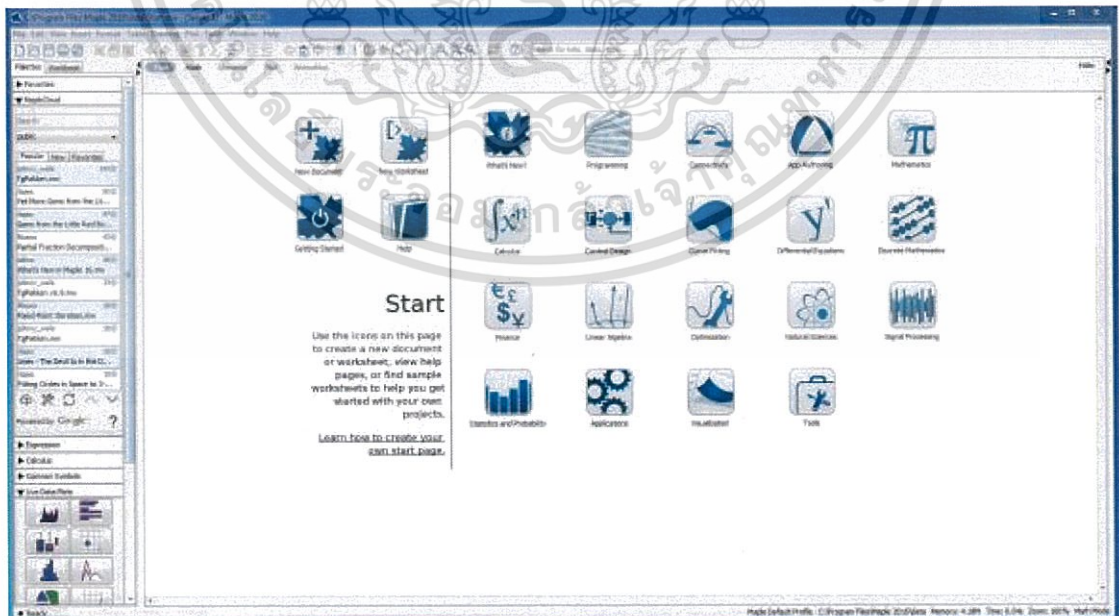
LabVIEW เป็นซอฟต์แวร์ประเภท GUI (Graphical User Interface) ซึ่งเป็นการเขียนโปรแกรมติดต่อระหว่างส่วนเชื่อมต่อกับส่วนผู้ใช้และอุปกรณ์ภายนอก ปัจจุบันนับได้มีการนำเอา LabVIEW มาใช้ในการวัด ทดสอบ และควบคุมเครื่องมือวัดต่างๆ กันอย่างแพร่หลาย ทั้งในห้องวิจัยและห้องปฏิบัติการ โดยสังเกตเห็นจากงานวิจัยในแขนงต่างๆ ที่จำเป็นต้องมีการวัดเพื่อเก็บข้อมูลและนำข้อมูลไปวิเคราะห์ต่อไป โดยในที่นี้จะใช้ในการเก็บค่าจากรูปแบบจำลองจริง เพื่อนำค่าไปวิเคราะห์และพัฒนาต่อไป [8]



รูปที่ 2.6 แสดงรูปแบบของซอฟต์แวร์ LabVIEW [8]

### 2.7.3 Maplesoft Maple 2016

โปรแกรม Maple เป็นโปรแกรมที่นำมาใช้ในการคำนวณทางคณิตศาสตร์ ทำงานได้เสมือนเครื่องคิดเลข และสามารถวาดกราฟจากสมการได้หลายรูปแบบ โดยในที่นี้จะใช้ในการแก้สมการหาของตัวแปรจากสมการหนึ่งให้เป็นสมการอีกรูปหนึ่ง [9]



รูปที่ 2.7 แสดงรูปแบบของซอฟต์แวร์ Maplesoft Maple [9]

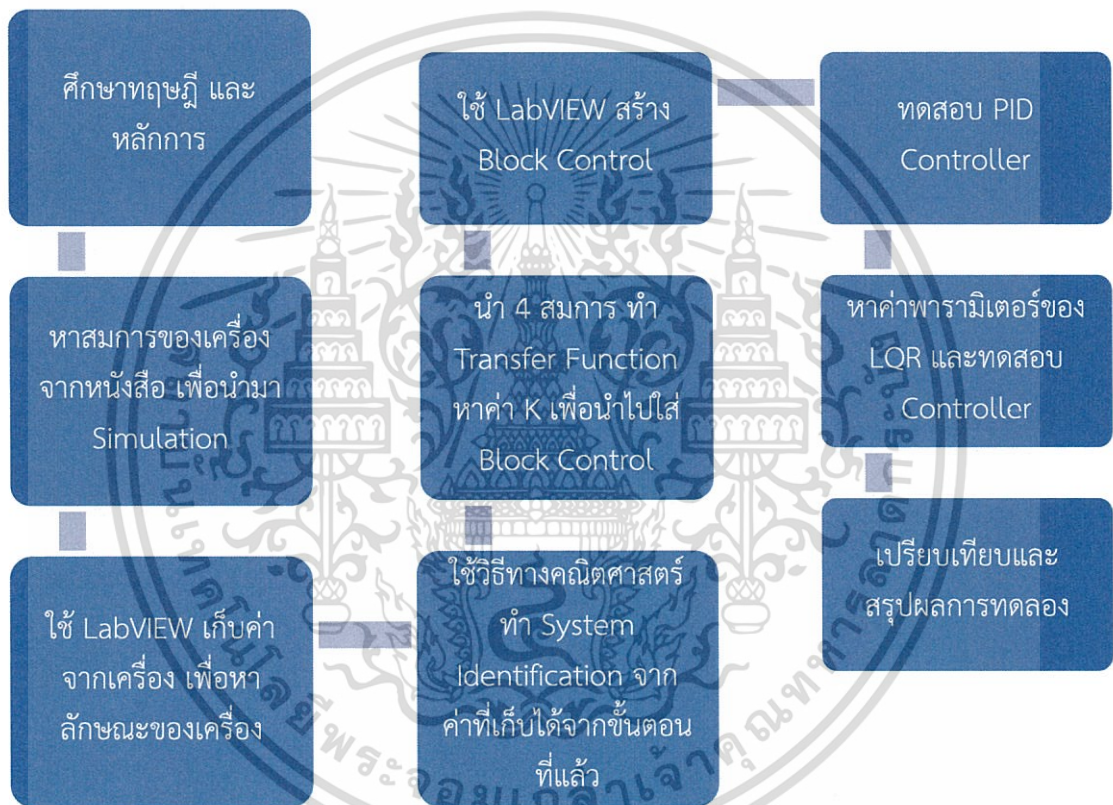
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 3

## วิธีการดำเนินงาน

### 3.1 ขั้นตอนในการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงานเริ่มตั้งแต่ ขั้นตอนการศึกษาทฤษฎีและหลักการ จนไปถึงขั้นตอนเปรียบเทียบและสรุปผลการทดลอง มีขั้นตอนดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงแผนผังการดำเนินงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.2 การดำเนินงาน

จากวัตถุประสงค์ของโครงการการออกแบบตัวควบคุมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ด้วยวิธีการ PID & LQR โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematic Model) เข้ามาช่วยในการออกแบบระบบควบคุม และทำการเก็บค่าจากการทดลอง เพื่อหาความสัมพันธ์ด้วยวิธีการแสดงตัวของระบบ (System Identification) แล้วนำข้อมูลที่ได้ออกไปทำฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function) เพื่อจะได้ค่า Gain ( $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ ) เพื่อนำมาควบคุมระบบ ทั้งนี้ต้องเริ่มต้นจากการศึกษาตัวอุปกรณ์ รวมถึง หลักการคอนโทรล วิธีการทางคณิตศาสตร์ ต่างๆซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

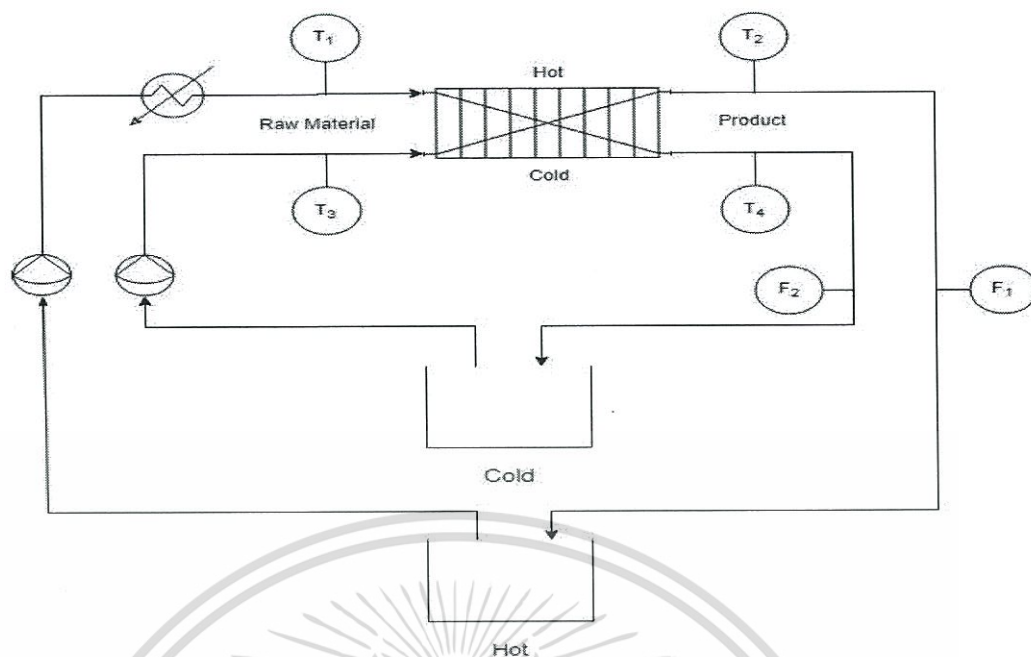
การดำเนินงานแบ่งออกเป็น 6 ขั้นตอน ดังนี้

- Hardware
- Comparison
- Data and Graph
- System Identification and Transfer Function
- Control (PID)
- Parameter LQR and Control

### 3.2.1 Hardware

เริ่มต้นที่การศึกษาตัวอุปกรณ์ ศึกษาเพื่อให้รู้ลักษณะของ Plant ว่ามีการทำงานอย่างไร มีอินพุต/เอาต์พุตอย่างไร เราจะออกแบบมาเพื่อควบคุมอะไร ซึ่งจะกล่าวไปย่อหน้าต่อไป

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) คือ เครื่องมือที่ใช้สำหรับถ่ายเทความร้อนจากของไหลชนิดหนึ่งไปยังของไหล อีกชนิดหนึ่ง โดยที่ของไหลไม่จำเป็นต้องผสมกันโดยส่วนประกอบพื้นฐานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะมีแผ่น โดยอาศัยพื้นผิวของแผ่นเป็นตัวกลางในการถ่ายโอนความร้อนระหว่างของไหลทั้งสองชนิด ซึ่งมีลักษณะ ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

น้ำจากถัง hot ไหลเข้า ฮีตเตอร์ (Heater) จากนั้นไหลเข้า  $T_1$  (Hot in) ผ่าน เพลตแลกเปลี่ยนความร้อนผ่านไป  $T_2$  (Hot out) และไหลลงสู่ถัง hot อีกส่วนคือ น้ำจากถัง Cold ไหลเข้ามาที่  $T_3$  (Cold in) ผ่านเข้าไปแลกเปลี่ยนความร้อนกับที่เพลต และไหลออกเป็น ค่าที่ต้องการ (Product) ที่  $T_4$  (Cold out) ไหลลงสู่ถังต่อไป

### 3.2.1.1 ฮีตเตอร์ (Heater)

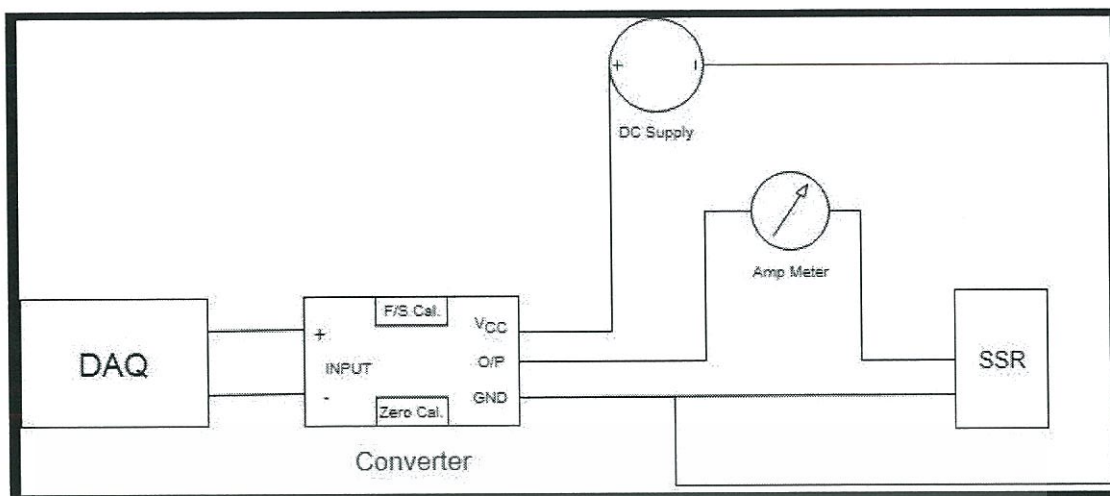
ใช้หลักการจ่ายกระแสไฟฟ้าไหลผ่านลวดตัวนำ ซึ่งส่งผลให้ลวดตัวนำมีความร้อนเกิดขึ้นง่าย ซึ่งชนิดของฮีตเตอร์(Heater)ที่ใช้ในปริมาณนี้พอนั้นเป็นฮีตเตอร์ชนิดจุ่ม (Immersion Heater) หรือฮีตเตอร์ต้มน้ำ สามารถใช้ให้ความร้อนกับของเหลวทุกชนิด

### 3.2.1.2 โซลิดสเตท (Solid State Relay)

จะมีการทำงานเมื่อมีสัญญาณ input ตามย่านของแรงดันควบคุมเข้ามา โดย รีเลย์ จะสั่งให้ output ส่งสัญญาณ on ออกไป และ เมื่อไม่มีสัญญาณ Input ตามย่านแรงดันเข้ามา รีเลย์ จะทำการหยุดส่ง output ออกไป

### 3.2.1.3คอนเวอร์เตอร์ (Converter) เป็นตัวแปลงโวลต์ เป็นกระแส เพื่อส่งเข้า โซลิดสเตท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 การต่อวงจรคอนเวอเตอร์

จากที่ศึกษาตัวฮาร์ดแวร์ (Hardware) การออกแบบตัวควบคุมคือ ออกแบบมาเพื่อควบคุมย่านของแรงดัน (Input) ที่ส่งเข้า คอนเวอเตอร์ แปลงเป็นกระแสแล้วส่งเข้า โซลิดสเตท ไปกระตุ้นขดลวดความร้อนในตัวฮีตเตอร์ ให้มีอุณหภูมิเพิ่ม-ลด เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ตามที่เรากำลังต้องการควบคุม

### 3.2.2 Comparison

เนื่องจากโครงการนี้ใช้การหาเอกลักษณ์ของระบบ (System Identification) เพื่อออกแบบตัวควบคุม จึงต้องมีตัว Simulate Modeling เอาไว้เปรียบเทียบข้อมูลกับตัวสมการที่หาได้จากการทำ System Identification โดยเปรียบเทียบกันในรูปแบบของกราฟว่า ข้อมูลที่ได้จากการทดลองเพื่อหาสมการเอกลักษณ์ของระบบไปในทิศทางเดียวกันหรือไม่

โดยตัว สมการ Simulate Modeling หาได้จากเอกสารของตัวเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีลักษณะเดียวกันหรือใกล้เคียงกัน ในที่นี้ตัวสมการมีที่อ้างอิงจาก [3] แสดงในสมการที่ 2.1 - 2.2

$$\tau_p \frac{dT_p^\circ}{dt} + T_p^\circ = \mu_p T_p^i + (1 - \mu_p) T_c^\circ \quad (2.1)$$

$$\tau_c \frac{dT_c^\circ}{dt} + T_c^\circ = \mu_c T_c^i + (1 - \mu_c) T_p^\circ \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการของ Time constants จะแสดงในสมการที่ 2.3

$$\tau_p = \frac{\rho_p C_{p_p} V_p}{\dot{m}_p C_{p_p} + UA} \quad \text{และ} \quad \tau_c = \frac{\rho_c C_{p_c} V_c}{\dot{m}_c C_{p_c} + UA} \quad (2.3)$$

ค่าพารามิเตอร์ของ  $\mu_p$  และ  $\mu_c$  หาได้จากสมการที่ 2.4

$$\mu_p = \frac{C_{p_p} \dot{m}_p}{C_{p_p} \dot{m}_p + UA} \quad \text{และ} \quad \mu_c = \frac{C_{p_c} \dot{m}_c}{C_{p_c} \dot{m}_c + UA} \quad (2.4)$$

เมื่อ

$T_p^o, T_p^i$	= อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ที่ทางเข้าและทางออกตามลำดับ, K
$T_c^o, T_c^i$	= อุณหภูมิของของเหลวเย็นที่ทางเข้าและทางออกตามลำดับ, K
$\rho_p, \rho_c$	= ความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์และของเหลวเย็นตามลำดับ, Kg/m <sup>3</sup>
$C_{p_p}, C_{p_c}$	= ค่าความจุความร้อนจำเพาะของผลิตภัณฑ์และของเหลวเย็นตามลำดับ, J/kg-K
$V_p, V_c$	= ปริมาตรของผลิตภัณฑ์และของเหลวเย็นตามลำดับ, m <sup>3</sup>
$\dot{m}_p, \dot{m}_c$	= อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์และของเหลวเย็นตามลำดับ, Kg/s
$U$	= ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม, W/K-m <sup>2</sup>
$A$	= พื้นที่ผิวที่มีการส่งผ่านความร้อน, m <sup>2</sup>

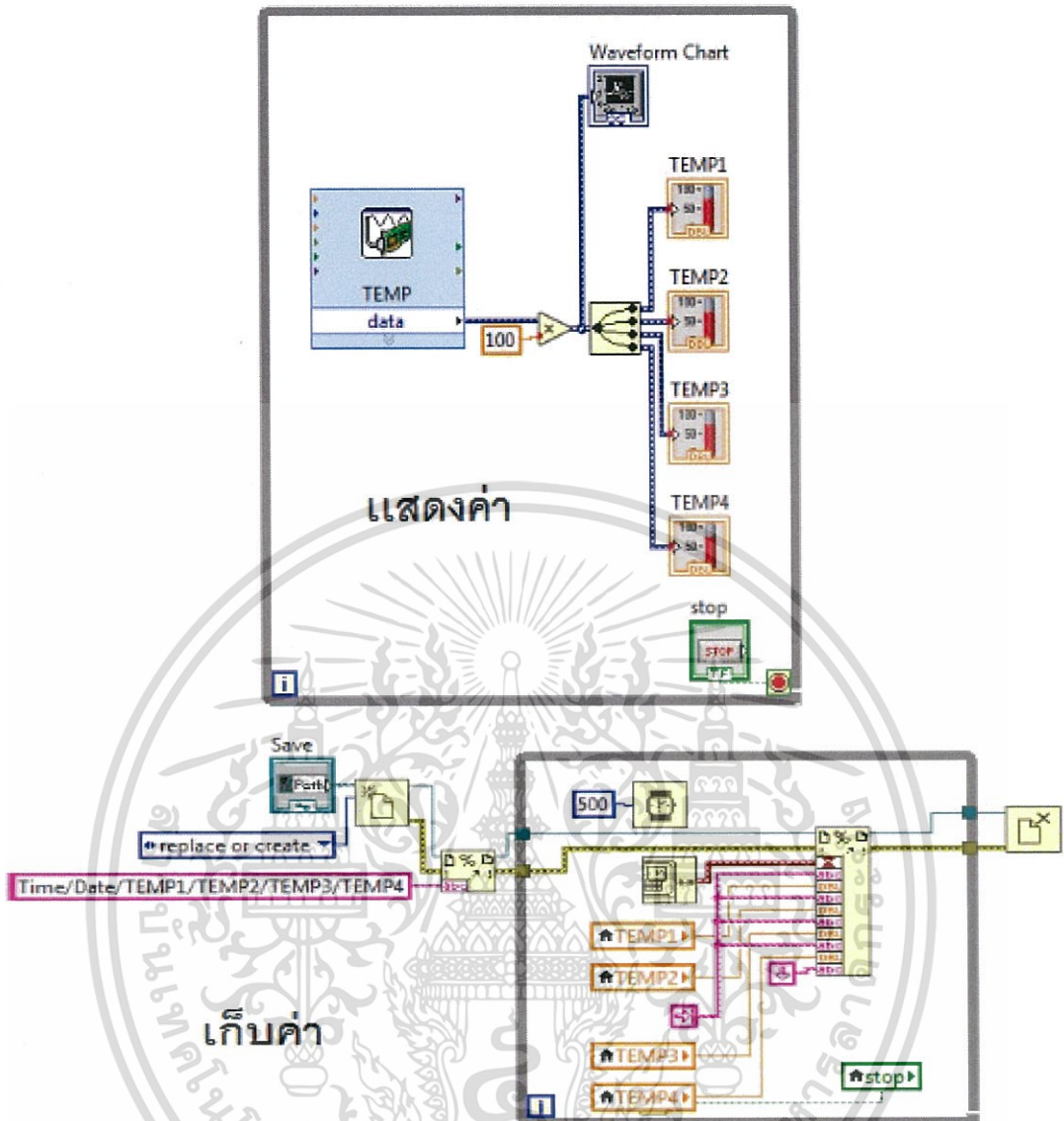
กล่าวคือ Simulate Modeling เป็นสมการที่มีที่มาจากเอกสารของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีลักษณะเดียวกับที่โครงการนี้ใช้ จึงนำมาใช้เป็นต้นแบบในการเปรียบเทียบข้อมูลกราฟที่ได้จากการทดลองเก็บค่าเพื่อทำสมการเอกลักษณ์ของระบบว่าข้อมูลที่เก็บมาสามารถนำไปใช้ได้จริง ถ้ากราฟมีทิศทางไปในแนวเดียวกับกับตัวต้นแบบ

### 3.2.3 Data and Graph

ในขั้นตอนนี้เราจะกล่าวถึงขั้นตอนที่ใช้เก็บข้อมูลที่ได้จากการทดลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อที่จะนำไปทำ สมการเอกลักษณ์ของระบบ (System Identification)

เริ่มต้นการเก็บค่านั้น ใช้โปรแกรม LABVIEW เชื่อมต่อกับ ตัว Plant โดยใช้ DAQ (Data acquisition)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 แสดงไดอะแกรมของโปรแกรม LABVIEW ที่ใช้ในการเก็บค่าและแสดงผล

ทำการเก็บค่า โดยค่าที่เก็บได้นั้น มี Input เป็น กระแส (A) และ Output ที่ได้เป็นอุณหภูมิ โดยใช้ เวลา 30 นาทีต่อ 1 ค่าเก็บค่าทุก 500 watt เมื่อเก็บครบทุกค่าแล้ว ใช้โปรแกรม Matlab ในการจัดการ ข้อมูล พล็อตกราฟ เปรียบเทียบกับตัวสมการจำลองค่าของระบบ การเก็บค่านั้นเริ่มต้นที่อุณหภูมิห้อง ที่ 25 c ทุกครั้ง โดยเก็บทุก 500 watt ซึ่งคำนวณมาได้ดังตารางที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 3.1** แสดงข้อมูลของการเก็บข้อมูลที่ได้จากการทดลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

Actuator (mA)	Current (A)	Voltage (V)	Power (W)
4.0	0.3	2.9	0.87
4.5	0.5	4.3	2.15
5.0	1.3	6.2	8.06
5.5	2.5	22.8	57.0
6.0	3.8	32.8	124.64
6.5	5.1	44.0	244.4
7.0	6.4	54.4	348.8
7.5	7.6	64.9	493.24
8.0	8.7	74.2	645.54
8.5	10.0	84.8	848.0
9.0	11.2	95.1	1065.12
9.5	12.2	104.8	1278.56
10.0	13.2	113.0	1491.6
10.5	14.2	121.3	1722.46
11.0	15.2	130.0	1976.0
11.5	15.8	136.1	2150.38
12.0	16.5	141.8	2339.7
12.5	17.1	146.3	2501.7
13.0	17.5	151.5	2651.3
13.5	18.1	156.1	2825.4
14.0	18.6	161.0	2994.6

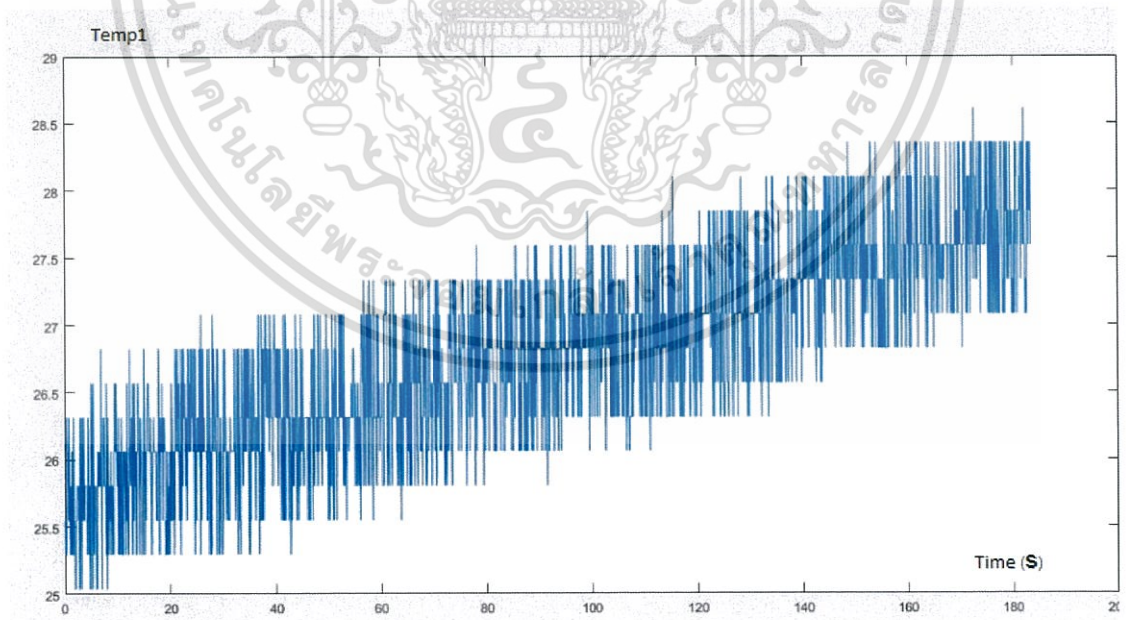
ทำการเก็บค่าที่ 500 , 1000 , 1500 , 2000 , 2500 และ 3000 วัตต์

ยกตัวอย่างการเก็บค่า เช่น เก็บค่าที่ 500 วัตต์ หมุนตัวจ่ายกระแสไปที่ 7.5 A ละดูว่า อุณหภูมิได้เท่าใด ในเวลา 30 นาทีได้ดังตารางที่ 3.2

	A	B	C	D	E
1	0.00	25.55204	24.83593	24.90033	25.61243
2	0.05	25.55204	24.83593	24.90033	25.61243
3	0.10	25.29709	25.09084	24.90033	25.86745
4	0.15	25.29709	25.09084	24.90033	25.86745
5	0.20	25.29709	24.83593	24.1355	26.12247
6	0.25	25.29709	24.83593	24.1355	26.12247
7	0.30	25.55204	25.85557	24.64538	25.10239
8	0.35	25.55204	25.85557	24.64538	25.10239
9	0.40	26.3169	24.83593	23.62562	24.84737
10	0.45	26.3169	24.83593	23.62562	24.84737
11	0.50	26.06195	24.83593	24.1355	24.84737
12	0.55	26.06195	24.83593	24.1355	24.84737
13	0.60	26.06195	24.83593	24.1355	24.84737
14	0.65	26.06195	24.83593	24.1355	24.84737
15	0.70	25.55204	25.09084	24.39044	25.35741
16	0.75	25.55204	25.09084	24.39044	25.35741
17	0.80	26.3169	25.60066	23.37068	25.10239
18	0.85	26.3169	25.60066	23.37068	25.10239
19	0.90	25.55204	24.83593	23.62562	24.84737
20	0.95	25.55204	24.83593	23.62562	24.84737
21	1.00	25.29709	24.58102	23.62562	25.10239

A=Time  
B=Temp1  
C=temp2  
D=temp3  
E=temp4

ตารางที่ 3.2 แสดงตัวอย่างค่าที่เก็บเป็นตาราง Excel



รูปที่ 3.5 แสดงตัวอย่างการเก็บค่าโดยพล็อตเป็นกราฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.4 System Identification and Transfer Function

ขั้นตอนการทำเอกลักษณ์ของระบบ (System Identification) คือ การหาพารามิเตอร์เฉพาะของตัวเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งหาได้จากสมการต้นแบบที่ใช้ในการจำลองระบบและจากค่าที่เก็บได้จากการทดลองที่ค่าที่กำหนดต่างๆ นำมาทำวิธีการทางคณิตศาสตร์ Linear Least Square จะได้เป็นค่าพารามิเตอร์ดังสมการที่ 3.1 – 3.2

สมการต้นแบบ

$$\tau_p \frac{dT_p^\circ}{dt} + T_p^\circ = \mu_p T_p^i + (1 - \mu_p) T_c^\circ \quad (3.1)$$

$$\tau_c \frac{dT_c^\circ}{dt} + T_c^\circ = \mu_c T_c^i + (1 - \mu_c) T_p^\circ \quad (3.2)$$

เพื่อทำการโมเดลการสะสมความร้อนในถัง hot และถัง cold จึงทำการเพิ่มสมการอีก 2 สมการ จากสมการที่ (3.1) และ (3.2) จะได้เป็นสมการที่ 3.3 – 3.6

$$\frac{dT_1}{dt} = \frac{f_H}{V_H} T_2(t) - \frac{f_H}{V_H} T_1(t) + Q_H \quad (3.3)$$

$$\frac{dT_2}{dt} = -\frac{1}{\tau_1} T_2(t) + \frac{\mu_1}{\tau_1} T_1(t) + \frac{(1-\mu_1)}{\tau_1} T_4(t) \quad (3.4)$$

$$\frac{dT_3}{dt} = \frac{f_C}{V_C} T_4(t) - \frac{f_C}{V_C} T_3(t) \quad (3.5)$$

$$\frac{dT_4}{dt} = -\frac{1}{\tau_1} T_4(t) + \frac{\mu_2}{\tau_2} T_3(t) + \frac{(1-\mu_2)}{\tau_2} T_2(t) \quad (3.6)$$

เมื่อทำการใส่ค่า  $T_1(t), T_2(t), T_3(t)$  และ  $T_4(t)$  สำหรับ  $\{t \in t_1, \dots, t_N\}$  แล้วจะได้ N สมการใน 6 ตัวแปร ซึ่งเมื่อทำการแก้สมการด้วยวิธี Linear least square จะได้ค่าพารามิเตอร์ดังสมการที่ 3.7 – 3.10

$$k_1 = 0.3766 \quad (3.7)$$

$$k_2 = 0.9542 \quad (3.8)$$

$$\tau_1 = 6.4569 \quad (3.9)$$

$$\tau_2 = 0.8928 \quad (3.10)$$

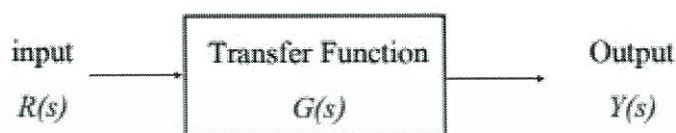
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งนี้ ปริมาตรของทั้งสองถัง มีค่า ดังสมการที่ 3.11 – 3.12

$$V_H = 27.72 \text{ m}^3 \quad (3.11)$$

$$V_C = 31.161 \text{ m}^3 \quad (3.12)$$

หลังจากที่ได้ค่าพารามิเตอร์ จาก System Identification มา ให้นำไปแทนค่าในสมการ Transfer Function ที่ได้จากสมการของระบบทั้ง 4 สมการ ทำให้อยู่ในรูปของ output/input ดังรูปที่ 3.6



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

รูปที่ 3.6 แสดงสมการ Transfer Function

เนื่องจากมี 4 สมการ ดังนั้นการคำนวณ transfer function จาก  $T_4(t)$  ไปยัง  $T_1(t)$  จึงต้องทำผ่านระบบเมทริกซ์โดยใช้สูตร ในสมการที่ 3.13 – 3.16

$$H(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = (sI - A)^{-1}B \quad (3.13)$$

เมื่อ

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{fH}{VH} & \frac{fH}{VH} & 0 & 0 \\ \frac{k1}{\tau1} & -\frac{1}{\tau1} & 0 & \frac{1-k1}{\tau1} \\ 0 & 0 & -\frac{fC}{VC} & \frac{fC}{VC} \\ 0 & \frac{1-k2}{\tau2} & \frac{k2}{\tau2} & -\frac{1}{\tau2} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{QH}{VH} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

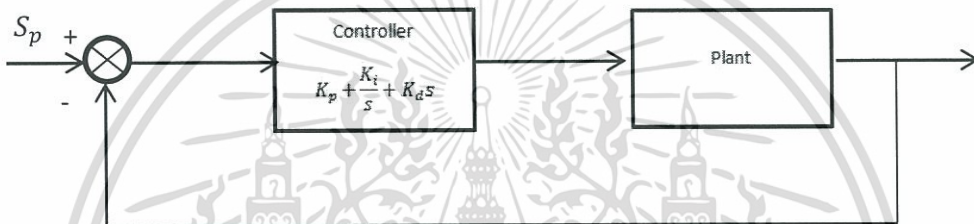
$$C = [0 \ 0 \ 0 \ 1] \quad (3.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งสามารถใช้โปรแกรม Maple ในการคำนวณได้ดังสมการที่ 3.17

$$\begin{bmatrix} s + \frac{fH}{VH} & -\frac{fH}{VH} & 0 & 0 \\ -\frac{k1}{\tau1} & s + \frac{1}{\tau1} & 0 & -\frac{1-k1}{\tau1} \\ 0 & 0 & s + \frac{fC}{VC} & -\frac{fC}{VC} \\ 0 & -\frac{1-k2}{\tau2} & -\frac{k2}{\tau2} & s + \frac{1}{\tau2} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

การออกแบบตัวควบคุม PID อย่างง่าย ๆ สามารถทำการใช้ Direct Design โดยขั้นแรก ทำการพิจารณา Closed Loop plant



จาก Closed Loop Transfer Function เราสามารถเขียน Characteristic Polynomial ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} & (s(-V_C V_H s^3 \tau_1 \tau_2 - V_C f_H s^2 \tau_1 \tau_2 - V_H f_C s^2 \tau_1 \tau_2 + V_C V_H k_1 k_2 s - V_C V_H s^2 \tau_1 - \\ & V_C V_H s^2 \tau_2 + V_C f_H k_1 s \tau_2 + V_H f_C k_2 s \tau_1 - f_C f_H s \tau_1 \tau_2 - V_C V_H k_1 s - V_C V_H k_2 s + \\ & V_C f_H k_1 k_2 - V_C f_H s \tau_1 - V_C f_H s \tau_2 + V_H f_C k_1 k_2 - V_H f_C s \tau_1 - V_H f_C s \tau_2 - f_C f_H k_1 \tau_2 + \\ & f_C f_H k_2 \tau_1 - V_C f_H k_2 - V_H f_C k_1 - f_C f_H \tau_1) \end{aligned} \quad (3.18)$$

ทั้งนี้ ผลตอบสนองที่ต้องการ (Desired Response) คือ

Rise time = 90 วินาที

Setting time = 150 วินาที

ดังนั้น

$$\delta = 5.0930 \quad (3.19)$$

$$\omega = 0.0087 \quad (3.20)$$

ทั้งนี้ พหุนาม Characteristic Polynomial ของผลตอบสนองที่ต้องการคือ

$$2\omega^3 s \delta^3 + \omega^4 \delta^2 + 5\omega^2 s^2 \delta^2 + 2\omega^3 s \delta + 4\omega s^3 \delta + \omega^2 s^2 + s^4 \quad (3.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการเทียบ Coefficients ระหว่างสมการ Characteristic Polynomial กับสมการ(3.17) สามารถคำนวณ  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  ได้เป็น

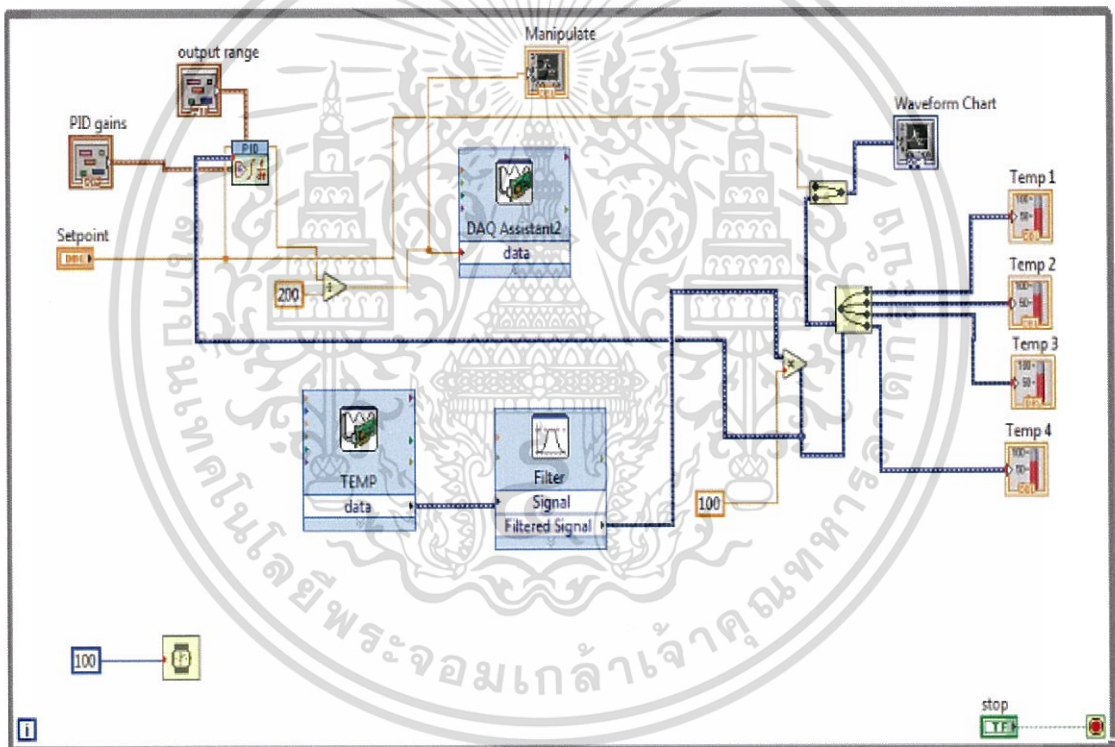
$$K_p = 9.0381 \times 10^4 \quad (3.22)$$

$$K_i = 1.1896 \times 10^3 \quad (3.23)$$

$$K_d = 128.3201 \quad (3.24)$$

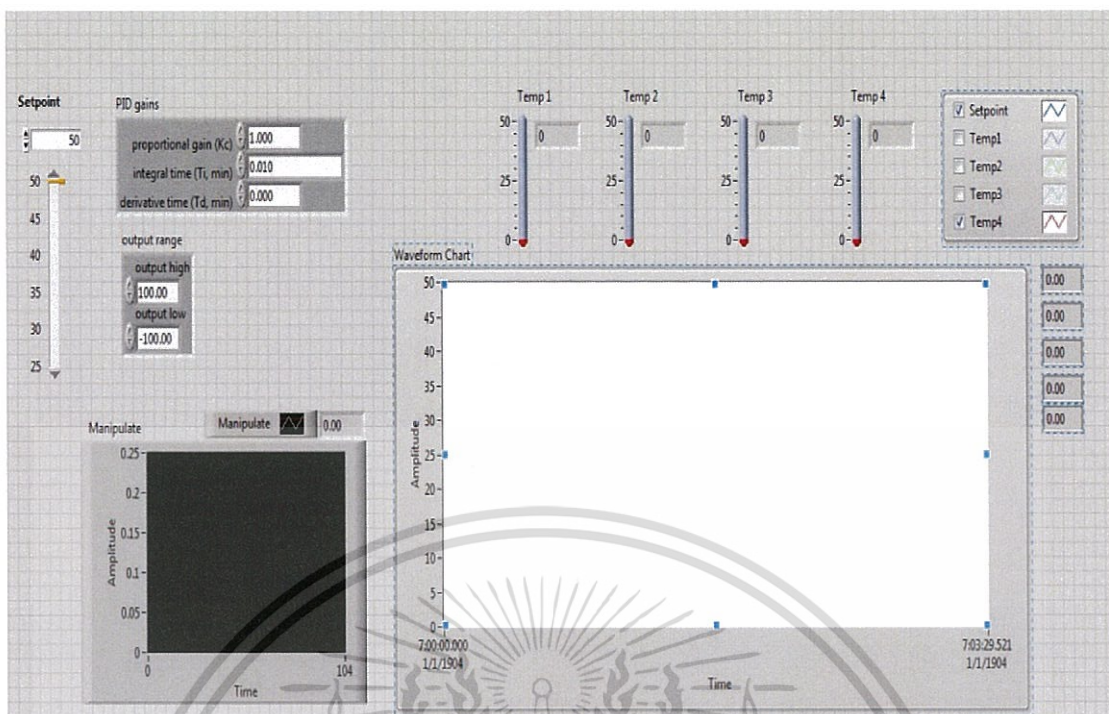
### 3.2.5 Control and Tuning (PID)

กระบวนการใส่ค่า PID ใน plant ทำโดยใช้โปรแกรม Labview สร้างบล็อกคอนโทรลขึ้นมา ทำการเชื่อมต่อระหว่าง Plant และโปรแกรมด้วย ตัว DAQ (Data acquisition) โดยบล็อกคอนโทรลมีลักษณะดังรูปที่ 3.7 – 3.8



รูปที่ 3.7 แสดงส่วนของบล็อกคอนโทรล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

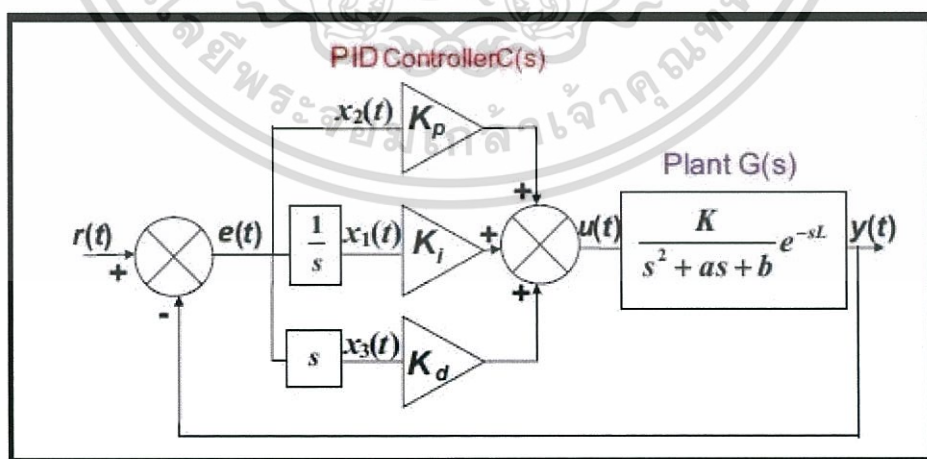


รูป 3.8 แสดงหน้าจอแสดงผล ของ LABVIEW

ทำการใส่ค่า PID ( $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ ) และค่าที่กำหนด แล้วดูผลการทดลอง

### 3.2.6 Parameter LQR and Control

ขั้นตอนในการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวคอนโทรล LQR หาได้จากสมการในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แสดง Close – Loop system [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก Transfer Function ตามสมการ (3.11) สามารถเขียนสมการอนุพันธ์ได้ดังสมการที่ 3.25

$$e'' + ae' + be(t) = -ku(t) \quad (3.25)$$

เพื่อทำการออกแบบ PID โดยใช้ทฤษฎีบทของ LQR , เราสามารถนิยามตัวแปรสเตรตได้ดังสมการที่ 3.26 – 3.28

$$x_1(t) = \int e(t)dt \quad (3.26)$$

$$x_2(t) = e \quad (3.27)$$

$$x_3(t) = \frac{de(t)}{dt} \quad (3.28)$$

ดังนั้น จึงสามารถเขียนในรูปของสมการสเตตได้โดยแสดงในสมการที่ 3.29 – 3.31

$$G(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = \frac{Ke^{-sL}}{s^2+as+b} = \frac{-e(s)}{u(s)} \quad (3.29)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -b & -a \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -K \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

ค่า a, b, K คือค่าที่ได้จากสมการของระบบซึ่งมาจากการเจาะจงระบบดังแสดงในรูปที่ 3.12 สำหรับระบบ heat exchanger ที่ทำการศึกษานี้ มีค่าในสมการที่ 3.32 - 3.33

$$a = 5.403597208 \quad (3.32)$$

$$b = 5.100383446 \quad (3.33)$$

ทั้งนี้ค่า a , b ที่เลือกเป็นค่าที่มาจาก dominant pole ของระบบซึ่งสามารถลดจำนวน order ลงได้ โดยที่ผลตอบสนองยังใกล้เคียงของเดิม

$$Q = \begin{bmatrix} q_1 & 0 & 0 \\ 0 & q_2 & 0 \\ 0 & 0 & q_3 \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

$$R = [r] \quad (3.35)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} \\ p_{12} & p_{22} & p_{23} \\ p_{13} & p_{23} & p_{33} \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

$$p_{11} = \frac{m\zeta_d\omega_d^5(1+2m\zeta_d^2)}{\eta} \quad (3.37)$$

$$p_{12} = \frac{(2+m)m\zeta_d^2\omega_d^4}{\eta} \quad (3.38)$$

$$p_{13} = \frac{m\zeta_d\omega_d^3}{\eta} \quad (3.39)$$

$$p_{23} = \frac{\omega_d^2+2m\zeta_d^2\omega_d^2-b}{\eta} \quad (3.40)$$

$$p_{22} = \frac{2\omega_d^3(\zeta_d+2m\zeta_d^3+m^2\zeta_d^3)-ab}{\eta} \quad (3.41)$$

$$p_{33} = \frac{(2+m)\zeta_d\omega_d-a}{\eta} \quad (3.42)$$

สมการด้านบน สามารถ กำหนด Overshoot , Setting Time , Rise Time ได้  
สมการแสดงค่าพารามิเตอร์ของ LQR

$$K = r^{-1}BP \quad (3.43)$$

เมื่อ

$K$  = ค่า gain ของ LQR

$B$  = เมตริกซ์ของ  $K$  ที่ได้จาก plant จากรูปที่ 3.12

$P$  = เมตริกซ์ที่สามารถกำหนด Overshoot, Setting Time, Rise Time

$r$  = เมตริกซ์ที่สามารถกำหนดได้

หาค่าพารามิเตอร์ของ LQR จากสมการด้านบน โดยใช้ โปรแกรม MATLAB และ MAPLE จึงได้ค่า

$$K_i = 0.7614 \quad (3.44)$$

$$K_p = 53.2392 \quad (3.45)$$

$$K_d = 4.4744 \quad (3.46)$$

จากนั้นนำค่าไปใส่บล็อกคอนโทรล ของ LABVIEW ตั้งค่าตามต้องการ แล้วดูผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่4

### การทดลองและผลการทดลอง

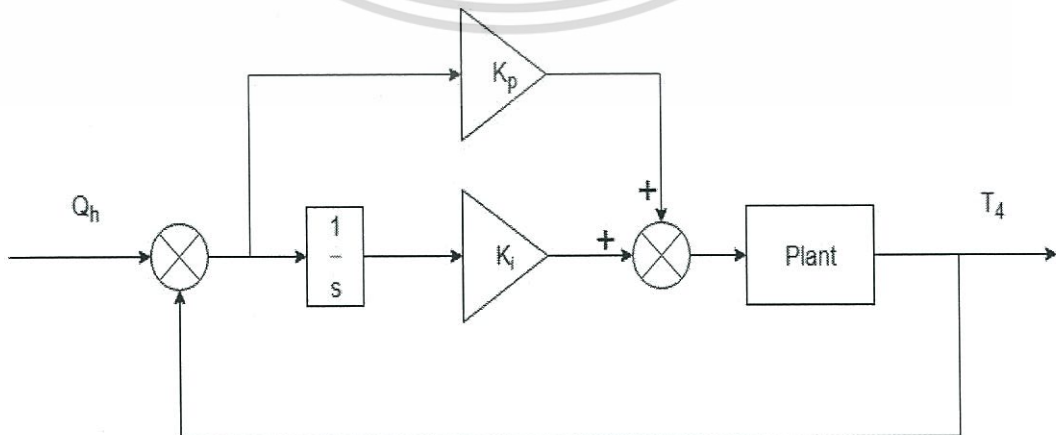
ในส่วนของบทนี้เราจะกล่าวถึงขั้นตอนการทดลองและผลการทดลองประสิทธิภาพการควบคุมกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนแบบPIDและLQRซึ่งตัวแปรควบคุมประกอบไปด้วยแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้เครื่องให้ความร้อน(volt)เพื่อเป็นการเปรียบเทียบว่าการควบคุมแบบใดมีประสิทธิภาพที่ดีที่สุดซึ่งคือมีผลตอบสนองการควบคุมอยู่ในเกณฑ์ที่ดีอุณหภูมิสามารถเข้าสู่เป้าหมายตามที่กำหนดไว้

#### 4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. ชุดการทดลองกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน
2. อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ LM35
3. อุปกรณ์เชื่อมต่อระหว่างชุดการทดลองกับคอมพิวเตอร์
4. MATLAB
5. LABVIEW

#### 4.2 วิธีการทดลอง

1. ทำการเชื่อมต่ออุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมชุดการทดลองเข้ากับกราฟฟิก เพื่อให้อุปกรณ์สามารถรับคำสั่งจากมอนิเตอร์ได้
2. ตั้งค่า Set Point และค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมลงในโปรแกรมLABVIEW
3. เริ่มโปรแกรม LABVIEW
4. บันทึกผลการทดลอง



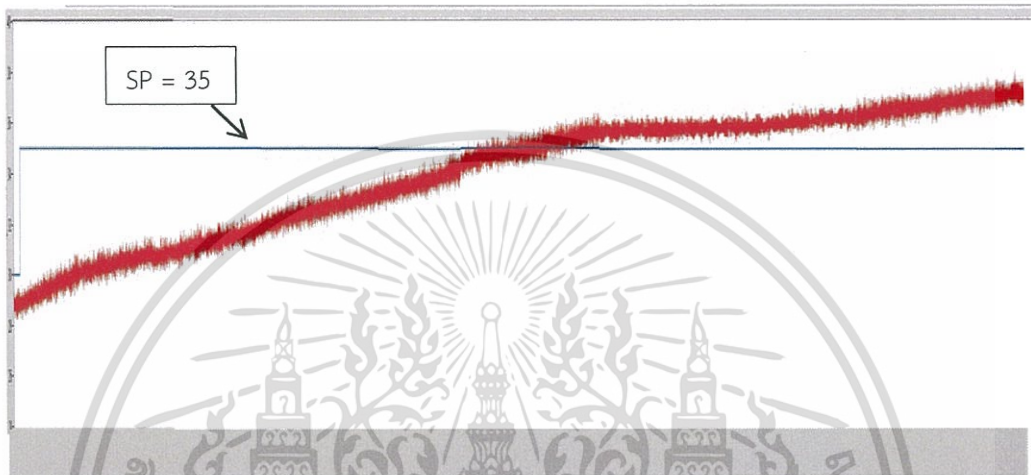
รูปที่4.1 แสดง Block Diagram ของ Close Control Loop

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.3 ผลการทดลอง

### 4.3.1 การทดลองที่ 1

การทดลองนี้เป็นการควบคุมกระบวนการการแลกเปลี่ยนความร้อนแบบPID และค่าพารามิเตอร์ที่นำมาใช้เกิดจากการคำนวณทางคณิตศาสตร์



รูปที่ 4.2 กราฟของระบบควบคุมการแลกเปลี่ยนความร้อนแบบPID

กำหนดให้

สีแดง คือ ค่า PV (Process Value)

สีน้ำเงิน คือ ค่า SP (Set Point)

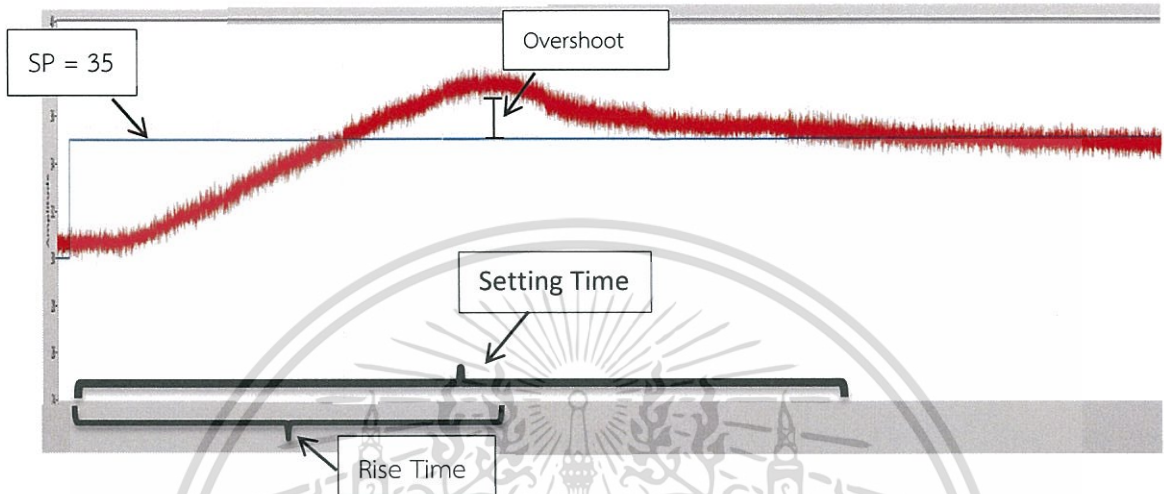
ผลการทดลองจากกราฟ

สรุปได้ว่าการควบคุมการแลกเปลี่ยนความร้อนแบบPID ไม่สามารถนำมาควบคุมกับชุดการทดลองนี้ได้ โดยกำหนดอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 30 c  $K_p = 90381$   $K_i = 1189.6$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.3 การทดลองที่ 2

การทดลองนี้เป็นการควบคุมกระบวนการการแลกเปลี่ยนความร้อนแบบLQR และค่าพารามิเตอร์ที่นำมาใช้เกิดจากการคำนวณทางคณิตศาสตร์ นำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับกระบวนการก่อนปรับค่าพารามิเตอร์ในกรณีก่อนหน้า



รูปที่4.3 กราฟของระบบควบคุมการแลกเปลี่ยนความร้อนแบบLQR

กำหนดให้

สีแดง คือ ค่า PV (Process Value)

สีน้ำ คือ ค่า SP (Set Point)

ผลการทดลองจากกราฟ

สรุปได้ว่าใช้เวลา Setting time ประมาณ 13 นาที

ค่าพารามิเตอร์คือ  $P= 53.2392$   $TI=0.7614$

Rise time ใช้เวลา 11 นาที

Steady State errors  $\pm 1\%$

Overshoot 2.5%

Valve เปิดเมื่อเข้าสู่จุดสมดุลที่  $35\% \pm 2\%$  และใช้เวลา 25 นาที ในการเข้าสู่จุดสมดุล

โดยกำหนดอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 30 c

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองจะเห็นได้ว่าโครงการนี้แสดงให้เห็นว่า การควบคุมกระบวนการการแลกเปลี่ยนความร้อนแบบPID ไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้กับชุดการทดลองนี้ เนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของชุดการทดลองนี้เป็นแบบ Fourth Order และเทอมของสมการ Characteristic Polynomial มีค่าน้อยมาก ทำให้ค่า gain นั้นมีค่าสูง ส่วนการควบคุมกระบวนการการแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ LQR สามารถนำมาใช้งานกับชุดการทดลองนี้ได้ เนื่องจากตัวแปรที่เราต้องการควบคุมสามารถเข้าสู่ Set Point ได้ และกระบวนการมีเสถียรภาพ

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรศึกษาการออกแบบกระบวนการควบคุม และทำความเข้าใจลักษณะของกระบวนการนั้นๆ ที่ต้องการควบคุมเพื่อเป็นทิศทางที่ถูกต้องในการออกแบบระบบควบคุมกระบวนการ

การคำนวณค่าพารามิเตอร์ควรใช้โปรแกรมในการหาค่าพารามิเตอร์ ไม่ควรคำนวณเอง เนื่องจากการใช้ โปรแกรม จะได้ค่าที่ถูกต้องมากกว่าและประหยัดเวลามากกว่า

## บรรณานุกรม

- [1] [http://www.completesengineering.com/style/article\\_heat%20exchanger1.pdf](http://www.completesengineering.com/style/article_heat%20exchanger1.pdf) , “บทที่ 7 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchangers)”
- [2] <https://www.heater-heater.com/>, “ฮีตเตอร์ คือ อะไร”
- [3] M.A. Abdelghani-Idrissi, M.A. Arbaoui, L. Estel, J. Richalet, Predictive functional control of a counter current heat exchanger using convexity property, 2000
- [4] <http://mechanic-top.blogspot.com/2010/09/daq-gpib-and-serial-communication.html>, “DAQ, GPIB and Serial Communication”
- [5] Lennart Ljung. System Identification: Theory for the User : Pearson Education Canada, 1987
- [6] Saurabh Srivastava, Anuraag Misra, S.K.Thakur, V.S.Pandit. An optimal PID controller via LQR for standard second order plus time delay systems, 2015
- [7] <http://www.w3ii.com/th/matlab/default.html>, “MatLAB”
- [8] อติศักดิ์ ร่มพุดตาล.  
“LabVIEWสำหรับงานควบคุมฮาร์ดแวร์.” 2555
- [9] รองศาสตราจารย์ ดำรงค์ ทิพย์โยธา, คณิตศาสตร์ปรนัย เล่มที่ 28

คู่มือโปรแกรมสำเร็จรูป Mathcad Mathematica MATLAB Maple, 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[10] NI USB-6008/6009 User Guide - National Instruments



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## USER GUIDE

# NI USB-6008/6009

## Bus-Powered Multifunction DAQ USB Device

Français	Deutsch	日本語	한국어	简体中文
<a href="http://ni.com/manuals">ni.com/manuals</a>				

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](http://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 <sup>1</sup>	10 kS/s	48 kS/s
Maximum AI sample rate, multiple channels (aggregate) <sup>1</sup>	10 kS/s	48 kS/s
DIO configuration	Open collector <sup>2</sup>	Each channel individually programmable as open collector or active drive <sup>2</sup>

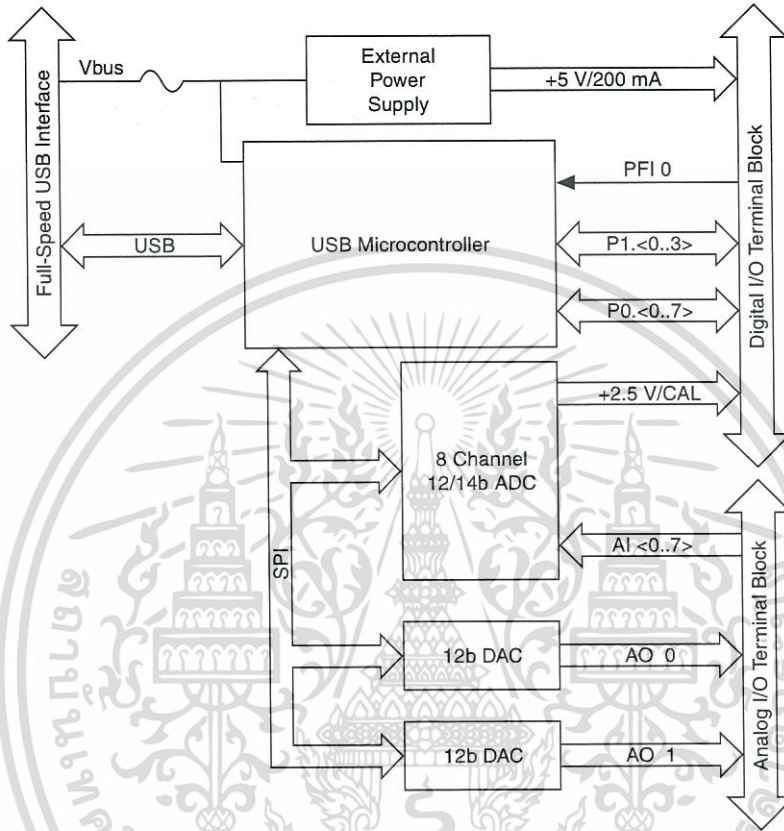
The following figure shows key functional components of the NI USB-6008/6009.

<sup>1</sup> System-dependent.

<sup>2</sup> 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.



**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.

3. 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](http://ni.com/manuals).

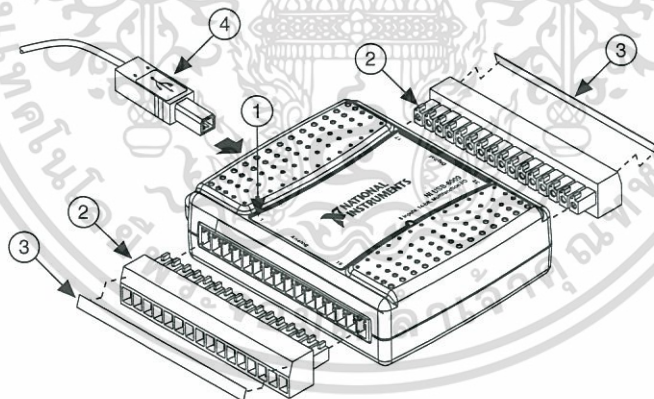
1. Install the application software (if applicable), as described in the installation instructions that accompany your software.
2. Install NI-DAQmx<sup>3</sup>.



**Note** The NI-DAQmx software is included on the disk shipped with your kit and is available for download at [ni.com/support](http://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](http://ni.com/manuals).

3. 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



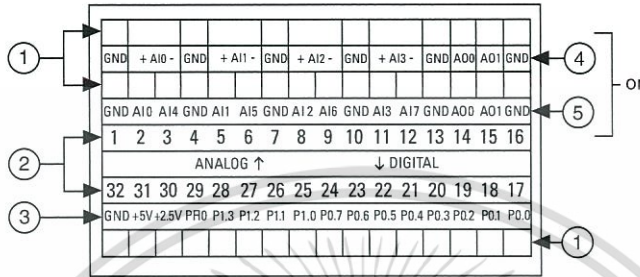
- |  |                 |
|--|-----------------|
| 1. Overlay Label with Pin Orientation Guides | 3. Signal Label |
| 2. Screw Terminal Connector Plug             | 4. USB Cable    |

4. 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.

<sup>3</sup> 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/daqmx](http://ni.com/support/daqmx) 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/daqmx](http://ni.com/support/daqmx).



**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](http://ni.com/sensors). For information about IEEE 1451.4 TEDS smart sensors, go to [ni.com/teds](http://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

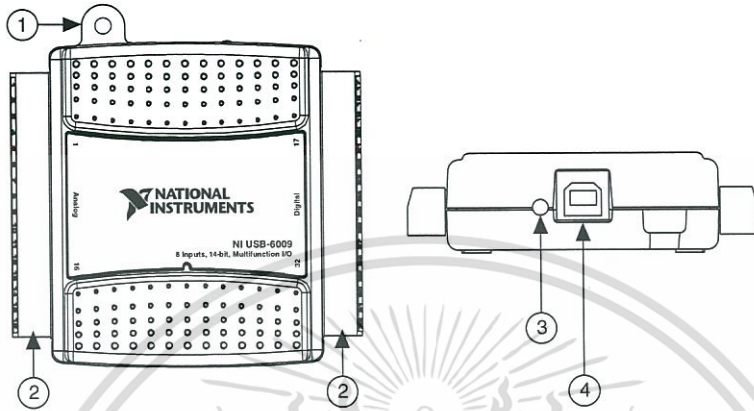
NI Application	Tutorial Location
LabVIEW	Go to <b>Help»LabVIEW Help</b> . Next, go to <b>Getting Started with LabVIEW»Getting Started with DAQ»Taking an NI-DAQmx Measurement in LabVIEW</b> .
LabWindows™/CVI™	Go to <b>Help»Contents</b> . Next, go to <b>Using LabWindows/CVI»Data Acquisition»Taking an NI-DAQmx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

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

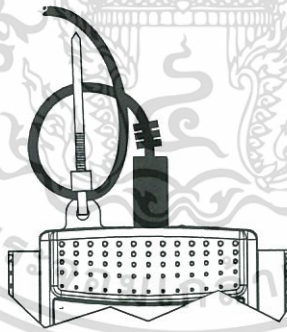


- |                                  |                  |
|----------------------------------|------------------|
| 1. USB Cable Strain Relief       | 3. LED Indicator |
| 2. Screw Terminal Connector Plug | 4. USB Connector |

## 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.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**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](http://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

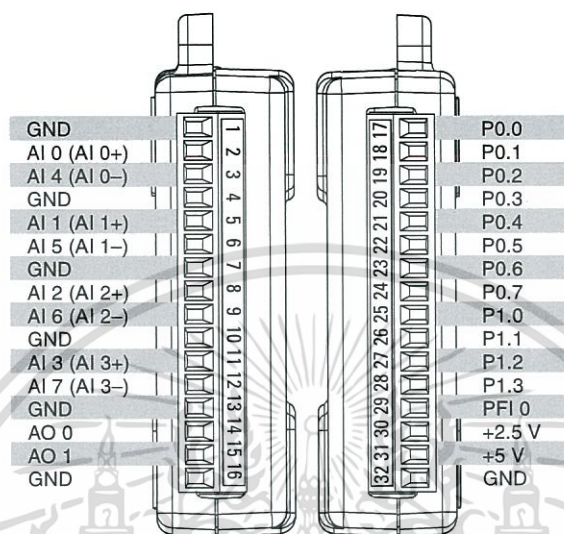


**Caution** For compliance with Electromagnetic Compatibility (EMC) requirements, this product must be operated with shielded cables and accessories. If unshielded cables or accessories are used, the EMC specifications are no longer guaranteed unless all unshielded cables and/or accessories are installed 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	—	—	<b>Ground</b> —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	<b>Analog Input Channels 0 to 7</b> —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.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Table 5. Signal Descriptions (Continued)**

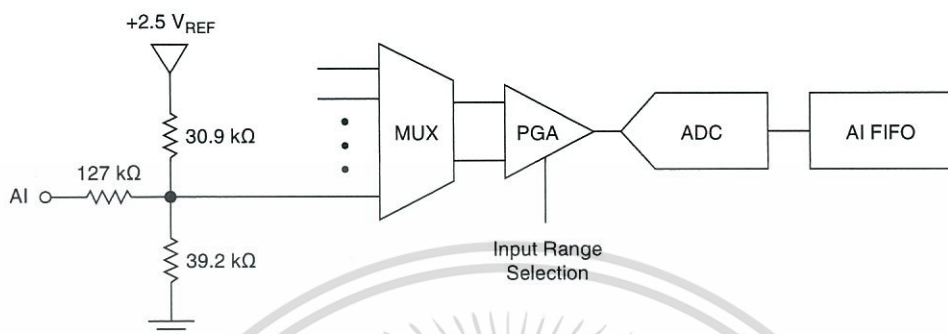
Signal Name	Reference	Direction	Description
AO <0, 1>	GND	Output	<b>Analog Output Channels 0 and 1</b> —Supplies the voltage output of AO channel 0 or AO channel 1. Refer to the <i>Analog Output</i> section for more information.
P0.<0..7>	GND	Input or Output	<b>Port 0 Digital I/O Channels 0 to 7</b> —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	<b>Port 1 Digital I/O Channels 0 to 3</b> —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	<b>PFI 0</b> —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	<b>+2.5 V External Reference</b> —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	<b>+5 V Power Source</b> —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"> <li>• Ungrounded thermocouples</li> <li>• Signal conditioning with isolated outputs</li> <li>• Battery devices</li> </ul>	Plug-in instruments with non-isolated outputs
Differential (DIFF)		
Referenced Single-Ended (RSE)		<p><b>NOT RECOMMENDED</b></p> <p>Ground-loop potential (<math>V_A - V_B</math>) 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](http://ni.com/info) and enter the Info Code `rdfwn3`.

### 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  $\pm 10$  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  $\pm 10$  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](http://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  $\pm 10$  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

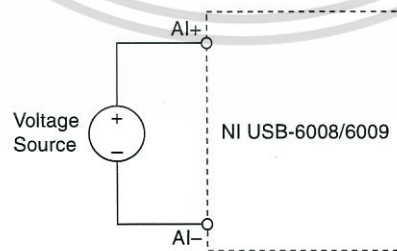
Do not use RSE connections with ground-referenced signal sources. Use differential connections instead.

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

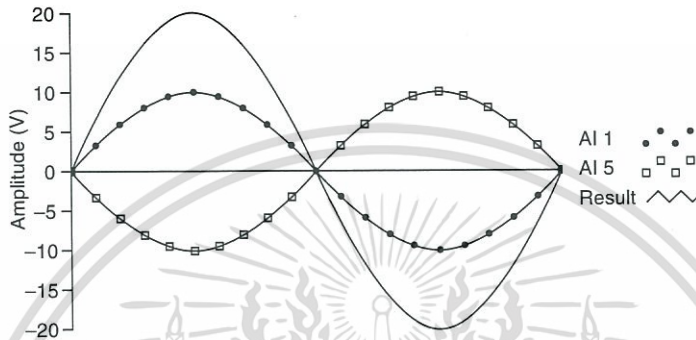
For differential signals, connect the positive lead of the signal to the AI+ terminal, and the negative lead to the AI- terminal.

**Figure 8.** Connecting a Differential Voltage Signal



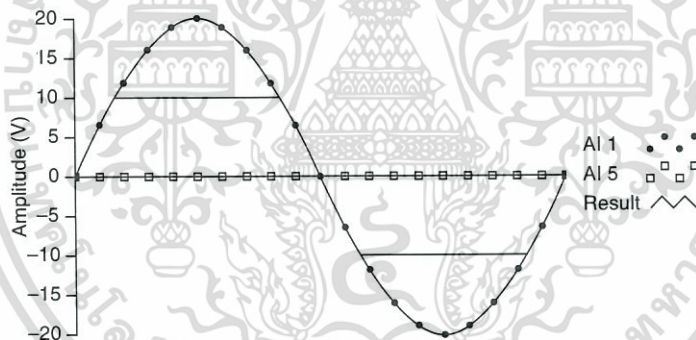
The differential input mode can measure  $\pm 20$  V signals in the  $\pm 20$  V range. However, the maximum voltage on any one pin is  $\pm 10$  V with respect to GND. For example, if AI 1 is  $+10$  V and AI 5 is  $-10$  V, then the measurement returned from the device is  $+20$  V.

**Figure 9.** Example of a Differential 20 V Measurement



Connecting a signal greater than  $\pm 10$  V on either pin results in a clipped output.

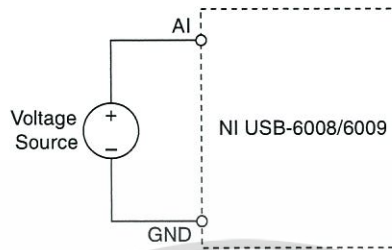
**Figure 10.** Exceeding  $\pm 10$  V on AI Returns Clipped Output



### 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

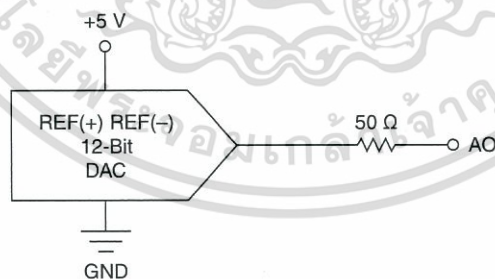
You can configure PFI 0 as a digital trigger input for analog input tasks. Refer to the *Using PFI 0 as a Digital Trigger* section for more information.

## 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

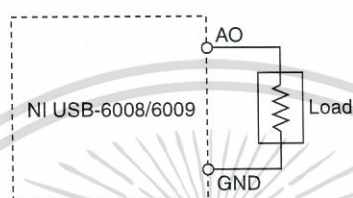


The main block featured in the NI USB-6008/6009 analog output circuitry is the digital-to-analog converter (DAC), which converts digital codes to analog voltages. There is one DAC for each analog output line.

## 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

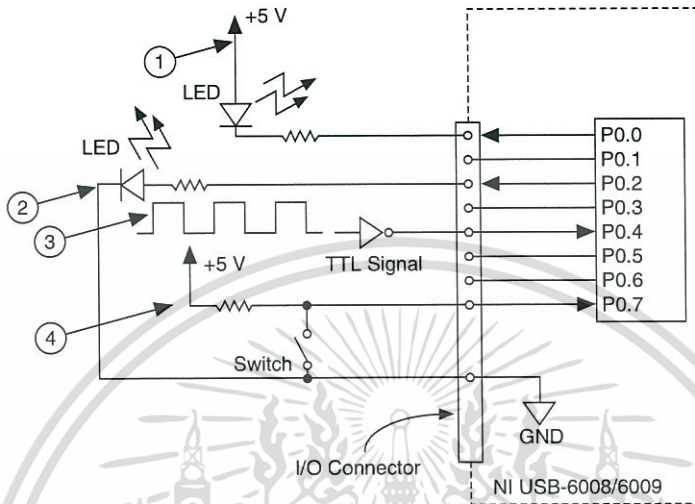
When you use a DAC to generate a waveform, you may observe glitches in the output signal. These glitches are normal; when a DAC switches from one voltage to another, it produces glitches due to released charges. The largest glitches occur when the most significant bit of the DAC code changes. You can 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](http://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



- |   |  |
|---|--|
| 1. P0.0 configured as an open collector digital output driving an LED | 3. P0.4 configured as a digital input receiving a TTL signal from a gated inverter |
| 2. P0.2 configured as an active drive digital output driving an LED   | 4. P0.7 configured as a digital input receiving a 0 V or 5 V signal from a switch  |



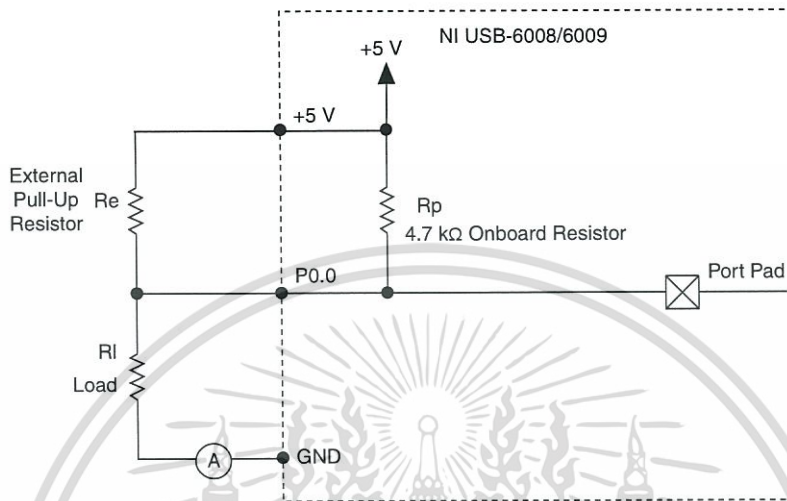
**Caution** Exceeding the maximum input voltage ratings or maximum output ratings can damage the device and the computer. National Instruments is not liable for any damage resulting from such signal connections. Refer to the *NI USB-6008 Device Specifications* or *NI USB-6009 Device Specifications* for 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 $\Omega$  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.<sup>4</sup>

<sup>4</sup> 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  $\pm 8.5$  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](http://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](http://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](http://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](http://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](http://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 *NationalInstruments.DAQmx Namespace* and *NationalInstruments.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](http://ni.com/training).

## Technical Support on the Web

For additional support, refer to [ni.com/support](http://ni.com/support) or [ni.com/examples](http://ni.com/examples).



**Note** You can download these documents at [ni.com/manuals](http://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](http://www.adobe.com) to download Adobe Reader. Refer to the National Instruments Product Manuals Library at [ni.com/manuals](http://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](http://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](http://ni.com/services) for NI Factory Installation Services, repairs, extended warranty, and other services.

Visit [ni.com/register](http://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](http://ni.com/certification). If your product supports calibration, you can obtain the calibration certificate for your product at [ni.com/calibration](http://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](http://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/global](http://ni.com/global) 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](http://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](http://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](http://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  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้