

การปรับปรุงประสิทธิภาพตัวควบคุมอุณหภูมิ
ในกระบวนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมลามีน



นายณรงค์ศักดิ์ สีแก้ว

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2557

**EFFICIENCY IMPROVEMENT OF TEMPERATURE
CONTROLLER IN EXTRUSION PROCESS OF
MELAMINE PRODUCTS**

Narongsak Seekaew



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

Suranaree University of Technology

Academic Year 2014

การปรับปรุงประสิทธิภาพตัวควบคุมอุณหภูมิในกระบวนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมลามีน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.กิริติ สุกัญญ์)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(รศ. น.อ. ดร.วรพจน์ ขำพิศ)

กรรมการ

(อ. ดร.ธีทัต คลวิชัย)

กรรมการ

(อ. ดร.ชโลธร ธรรมแท้)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ณรงค์ศักดิ์ สีแก้ว : การปรับปรุงประสิทธิภาพตัวควบคุมอุณหภูมิในกระบวนการอัดขึ้นรูป
ผลิตภัณฑ์เมลามีน (EFFICIENCY IMPROVEMENT OF TEMPERATURE

CONTROLLER IN EXTRUSION PROCESS OF MELAMINE PRODUCTS)

อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล, 101 หน้า

ในปัจจุบันภาชนะที่ทำจากวัสดุเมลามีนเป็นที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย เพราะมีความสวยงามและแข็งแรงทนทานต่อการใช้งาน จึงทำให้บริษัท ศรีไทยซูเปอร์แวร์ จำกัด (มหาชน) ต้องการเพิ่มประสิทธิภาพและลดต้นทุนของกระบวนการผลิต ซึ่งกระบวนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมลามีนเป็นกระบวนการผลิตที่สำคัญและเป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานไฟฟ้าปริมาณมาก เนื่องจากต้องควบคุมอุณหภูมิของแม่พิมพ์ให้คงที่ที่ 150 – 170 องศาเซลเซียส โดยกระบวนการควบคุมของแม่พิมพ์แบ่งเป็น 2 ช่วง ช่วงแรกเป็นการอุ่นแม่พิมพ์ก่อนเข้าสู่กระบวนการอัดขึ้นรูปจะต้องอุ่นแม่พิมพ์จากอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสให้เป็นอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสใช้เวลาประมาณ 2 ชั่วโมง ช่วงที่สองเป็นช่วงที่ต้องรักษาอุณหภูมิให้คงที่ที่ 150 – 170 องศาเซลเซียส ขึ้นอยู่กับลักษณะภาชนะที่จะขึ้นรูป บริษัทมีเครื่องอัดขึ้นรูปเป็นจำนวน 300 เครื่องและมีอายุการใช้งานนานกว่า 40 ปี เครื่องอัดขึ้นรูปที่ใช้งานมีระบบควบคุมอุณหภูมิแบบป้อนกลับที่มีตัวควบคุมแบบพีไอดี โดยวัดอุณหภูมิป้อนกลับจากแผ่นรองแม่พิมพ์ (T2) จึงมีผลต่อประสิทธิภาพในการควบคุมอุณหภูมิไม่เป็นไปตามความต้องการ งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิแบบพีไอดีของแม่พิมพ์ในกระบวนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมลามีน ซึ่งเราจะสามารถประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการควบคุมอุณหภูมิด้วยวิธีการระบุเอกลักษณ์ของระบบ ผลการตอบสนองของอุณหภูมิแสดงถึงประสิทธิภาพของการควบคุมอุณหภูมิที่เป็นไปตามความต้องการและลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา 2557

ลายมือชื่อนักศึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม _____

NARONGSAK SEEKAEW : EFFICIENCY IMPROVEMENT OF
TEMPERATURE CONTROLLER IN EXTRUSION PROCESS OF
MELAMINE PRODUCTS. THESIS ADVISOR : ASST. PROF.
JIRAPHON SRISERTPOL, Ph.D., 101 PP.

TEMPERATURE CONTROLLER / MELAMINE PRODUCTS / EXTRUSION-
MACHINE / MATHEMATICAL MODEL / PID CONTROLLERS

Nowaday, the melamine is one of the popular utensils which is beautiful and durable, so that Srithai Superware Public Company Limited want to increase the efficiency and reduce the production cost. The extrusion process of melamine is significant and consume large amount of electricity because it is necessary to maintain the mold temperature at 150-170 °C. The mold control process is divided into 2 phases: the first phase, it takes about 2 hours for heating the mold from a temperature of 25 °C to 150 °C before entering to the extrusion process, the second phase is to maintain the mold temperature at 150-170 °C that depends on the characteristics of the utensils to be molded. Srithai Superware Public Company Limited has 300 extrusion-machines that have been used more than 40 years. The temperature of extrusion machines are maintain by PID controllers, the feedback temperature is measured at the mold plate (T2), resulting in overshooting temperature response. Therefore, this research presents the design of the PID temperature controller for the melamine extrusion process.

The mathematical model is established through the method of system identification. The temperature responses show the effectiveness of the temperature control that meets the company requirements.



School of Mechanical Engineering

Academic Year 2014

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

Co-Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ทุกประการ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณและขอขอบคุณบุคคลต่าง ๆ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลืออย่างดียิ่งทั้งด้านวิชาการ ด้านการดำเนินงานวิจัย และด้านอื่น ๆ ดังต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนการศึกษาสำหรับผู้มีศักยภาพ เข้าศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา และทุนอุดหนุนโครงการวิจัยเพื่อทำวิทยานิพนธ์ระดับบัณฑิตศึกษา

ขอขอบพระคุณ บริษัท ศรีไทยซูเปอร์แวร์ จำกัด (มหาชน) ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์และเครื่องมือในการทดลอง

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความรู้ และคำปรึกษาแนะนำในการทำงานวิจัย รวมทั้งให้คำแนะนำในการดำเนินชีวิตด้วยความเมตตาโดยตลอด และสละเวลาตรวจสอบแก้ไขให้วิทยานิพนธ์มีความถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ นาวาอากาศเอก ดร.วรพจน์ จำพิศ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และคำแนะนำด้านวิชาการ ที่เป็นประโยชน์ในการดำเนินงานวิจัยจนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จได้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ทวิช จิตรสมบูรณ์ รองศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์ และคณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่าน ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ด้วยความเมตตากรุณา

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทั้งในอดีตและปัจจุบันทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ผู้ทำวิจัยจนประสบความสำเร็จ

ขอขอบคุณ คุณจริยาพร ศรีวิไลลักษณ์ คุณอาภรณ์พรรณ ศรีอัครวิทยา และบุคลากรประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่อำนวยความสะดวกในด้านเอกสารและงานธุรการต่าง ๆ

ขอขอบคุณ คุณธนวัฒน์ จันท์เมฆนุมาศ วิศวกรบริษัท ศรีไทยซูเปอร์แวร์ จำกัด (มหาชน) ที่ช่วยเหลือ แนะนำข้อมูลต่าง ๆ และอำนวยความสะดวกจนงานวิจัยนี้สำเร็จสมบูรณ์เป็นอย่างดี

ท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ พ่อสาร์วย และคุณแม่อุทร สีแก้ว รวมถึงครอบครัว ที่ให้การอบรมเลี้ยงดูและส่งเสริมการศึกษาเป็นอย่างดี ทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา และจะขาดเสียไม่ได้ ขอขอบคุณที่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ บัณฑิตศึกษาทุกคน ที่มีส่วนทำให้การเรียนในระดับปริญญาโทเป็นช่วงชีวิตที่มีสีสันและน่าจดจำ

ณรงค์ศักดิ์ สีแก้ว

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฐ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 การจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์	2
2 ปรัชษฐ์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ลักษณะเครื่องอัด	3
2.1.1 ระบบขับเคลื่อน	4
2.1.2 ระบบให้ความร้อนและหล่อเย็น	5
2.2 กระบวนการอัด	6
2.3 แม่พิมพ์สำหรับกระบวนการอัด	7
2.3.1 แม่พิมพ์อัดขึ้นงานราบ (Flat Form) หรือแม่พิมพ์ชนิดบาง (Flat Mold)	7
2.3.2 แม่พิมพ์ปิดอัด (Sealed Mold) หรือแม่พิมพ์ชนิดบวก (Fully Positive Mold)	8

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.3	แม่พิมพ์ฝาประกบ (Split mold)	
	หรือแม่พิมพ์ชนิดกึ่งบวก (Semi Positive Mold).....	8
2.4	จินเนติกอัลกอริทึม	9
2.4.1	การคัดเลือกสายพันธุ์	10
2.4.2	ปฏิบัติการทางสายพันธุ์	10
2.4.3	การแทนที่	12
2.5	ตัวสังเกต (Observer).....	13
2.5.1	การออกแบบตัวสังเกตอันดับเต็ม (Full – Order Observer).....	13
2.6	การควบคุมระบบ	17
2.6.1	ระบบควบคุมแบบวงเปิดหรือระบบควบคุมไม่ป้อนกลับ	
	(Open - loop Control Systems, Nonfeedback Control Systems)	17
2.6.2	ระบบควบคุมแบบวงปิดหรือระบบควบคุมแบบป้อนกลับ	
	(Closed – loop Control Systems, Feedback Control Systems).....	18
2.7	คุณสมบัติของตัวควบคุม	19
2.7.1	การควบคุมแบบสัดส่วน	20
2.7.2	การควบคุมแบบอินทิกรัล.....	20
2.7.3	การควบคุมแบบอนุพันธ์	22
2.8	ปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	23
2.9	สรุป.....	24
3	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	25
3.1	การควบคุมอุณหภูมิของกระบวนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมลามีน	25
3.2	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากการวิเคราะห์โดยทฤษฎี	26
3.2.1	สมการการสมดุลทางความร้อน (Heat Balance Equation).....	27
3.2.2	อัตราการถ่ายเทความร้อน (Rate of Heat Transfer)	27
3.2.3	ค่าความต้านทานความร้อน (Thermal Resistance).....	28
3.3	แบบจำลองตัวแปรสแตต (State Variable Models)	33

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4	สรุป	36
4	การระบุเอกลักษณ์และการออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิ	37
4.1	การระบุเอกลักษณ์ของระบบพลวัตแบบวงปิด	37
4.2	การระบุเอกลักษณ์ของระบบพลวัตแบบวงเปิดโดยวิธีปัญญาประดิษฐ์	38
4.3	การระบุเอกลักษณ์ของกระบวนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมลามีน	39
4.4	การจำลองระบบแบบวงปิด	44
4.5	การออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิ	45
4.5.1	การออกแบบตัวสังเกต	46
4.5.2	การออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอดี	49
4.6	การจำลองสถานการณ์ของระบบ	51
4.7	สรุป	55
5	การทดสอบระบบควบคุมอุณหภูมิกับเครื่องอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมลามีน	56
5.1	เครื่องมือทดลอง	56
5.2	การโปรแกรมเพื่อทดสอบระบบควบคุมอุณหภูมิของกระบวนการอัดขึ้นรูป ผลิตภัณฑ์เมลามีน	60
5.3	ผลการทดสอบ	60
5.4	สรุป	63
6	สรุปและข้อเสนอแนะ	64
6.1	สรุป	64
6.2	ข้อเสนอแนะ	65
	รายการอ้างอิง	66
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. โปรแกรมการระบุเอกลักษณ์ของเครื่องอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมลามีน โดย จินเนติกอัลกอริทึม	68
	ภาคผนวก ข. การใช้โปรแกรมจินเนติกอัลกอริทึมของ MATLAB ในการระบุเอกลักษณ์	71

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ก. การติดตั้ง Hardware ของ RAPCON Board.....	78
ภาคผนวก ง. การใช้โปรแกรม Simulink Response Optimization	83
ภาคผนวก จ. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	89
ประวัติผู้เขียน	101



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ความดันของการอัดฟิโนลิเกรซิน 5
4.1	กำหนดตัวแปรสำหรับการระบุเอกลักษณ์ 40
4.2	ขอบเขตของค่าตัวแปรในโปรแกรมจิ้นเนติกอัลกอริทึม 41
4.3	การตั้งค่าในโปรแกรมจิ้นเนติกอัลกอริทึม 41
4.4	แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการประมาณค่า 43
5.1	แสดงรายละเอียดต่าง ๆ ของ RAPCON Board (RAPCON Real – Time Rapid Control Prototyping Platform for MATLAB/SIMULINK) 59
5.2	แสดงการใช้พลังงานไฟฟ้าของกระบวนการอุ่นแม่พิมพ์ 63
6.1	แสดงการใช้พลังงานไฟฟ้าของกระบวนการอุ่นแม่พิมพ์ 65



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 เครื่องอัด (Compression molding machine).....	4
2.2 ขั้นตอนกระบวนการอัด.....	6
2.3 แม่พิมพ์อัดชิ้นงานราบ (Flat form) หรือแม่พิมพ์ชนิดบาง (Flash mold).....	7
2.4 แม่พิมพ์ปิดอัด (Sealed mold) หรือแม่พิมพ์ชนิดบวก (Fully positive mold).....	8
2.5 แม่พิมพ์ผ่าประกบ (Split mold) หรือแม่พิมพ์ชนิดกึ่งบวก (Semi positive mold).....	9
2.6 แผนภาพหลักการทำงานของตัวสังเกต.....	16
2.7 ระบบควบคุมแบบวงเปิด.....	18
2.8 ตัวควบคุมพีไอดีที่ต่อเข้าควบคุมแบบอนุกรม.....	19
2.9 ตัวควบคุมพีไอดีของระบบวงปิด.....	19
3.1 แสดงลักษณะของเครื่องอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมลามีน.....	26
3.2 แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อนของกระบวนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมลามีน.....	26
3.3 แสดงระบบการถ่ายเทความร้อนของโซนที่ 1.....	29
3.4 แสดงระบบการถ่ายเทความร้อนของโซนที่ 2.....	30
3.1 แสดงระบบการถ่ายเทความร้อนของโซนที่ 3.....	31
4.1 แสดงการระบุเอกลักษณ์แบบวงเปิด.....	37
4.2 แสดงการระบุเอกลักษณ์โดยวิธีปัญญาประดิษฐ์.....	38
4.3 แสดงผลการตอบสนองของค่ากระแสไฟฟ้าของระบบ.....	42
4.4 แสดงผลการตอบสนองของอุณหภูมิ T3 ของระบบ.....	42
4.5 แสดงการเปรียบเทียบผลการตอบสนองของอุณหภูมิ T3.....	44
4.6 แสดงหลักการทำงานของระบบวงปิด.....	44
4.7 แสดงการเปรียบเทียบผลการตอบสนองของอุณหภูมิ T3 ของ ระบบจำลองแบบวงปิดกับการทดลอง.....	45
4.8 แสดงแผนภาพการออกแบบระบบควบคุม.....	46
4.9 แสดงแผนภาพแบบจำลองของกระบวนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมลามีน และมีตัวควบคุมแบบพีไอดีในโปรแกรม MATLAB ในส่วนของ Simulation.....	50

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10	แสดงการตอบสนองของแบบจำลองที่ได้จากการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของ ตัวควบคุมพีไอดีโดยใช้ Response Optimization50
4.11	แสดงผลการตอบสนองของอุณหภูมิ Reference ที่ 150 °C51
4.12	แสดงผลการตอบสนองของค่ากระแสไฟฟ้าของแบบจำลอง.....51
4.13	แสดงผลการตอบสนองของอุณหภูมิ T2 ของแบบจำลอง52
4.14	แสดงผลการตอบสนองของอุณหภูมิ T3 ของแบบจำลอง52
4.15	แสดงผลการตอบสนองของอุณหภูมิ Reference ที่มีการเปลี่ยนแปลง.....53
4.16	แสดงผลการตอบสนองของค่ากระแสไฟฟ้าของแบบจำลอง.....53
4.17	แสดงผลการตอบสนองของอุณหภูมิ T2 ของแบบจำลอง54
4.18	แสดงผลการตอบสนองของอุณหภูมิ T3 ของแบบจำลอง54
5.1	แสดงเครื่องอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมลามีน57
5.2	แสดงเครื่องวัดอุณหภูมิ.....57
5.3	แสดงเครื่องวัดกำลังไฟฟ้า58
5.4	แสดง Thermocouple JB – 10 CA Type K.....58
5.5	PCI Serial Card เชื่อมต่อผ่านสาย Serial Crossover Cable และบอร์ด RAPCON59
5.6	แสดงแผนภาพขั้นตอนการทำงานของระบบ60
5.7	แสดงผลการตอบสนองของค่ากระแสไฟฟ้าของการออกแบบพีไอดี61
5.8	แสดงผลการตอบสนองของค่ากระแสไฟฟ้าของพีไอดีเดิม61
5.9	แสดงการเปรียบเทียบผลการตอบสนองของอุณหภูมิ T2.....62
5.10	แสดงการเปรียบเทียบผลการตอบสนองของอุณหภูมิ T3.....62
ข.1	แสดงการดึงข้อมูลสำหรับการระบุเอกลักษณ์72
ข.2	แสดงแผนภาพหน้าต่างของ GAT73
ข.3	แสดงแผนภาพการใส่ฟังก์ชันวัตถุประสงค์และจำนวนตัวแปร73
ข.4	แสดงแผนภาพการระบุจำนวนประชากร (Population Size).....74
ข.5	แสดงแผนภาพการเลือก Selection.....74
ข.6	แสดงแผนภาพการเลือกจำนวนรอบและเงื่อนไขการหยุด75
ข.7	แสดงแผนภาพการเลือกแสดงกราฟของการค้นหา.....75

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ข.8	แสดงแผนภาพการเริ่มโปรแกรมการค้นหา76
ข.9	แสดงกราฟการประมาณค่าของตัวแปร76
ข.10	แสดงแผนภาพการแสดงค่าประมาณตัวแปร77
ง.1	แผนภาพแบบจำลองในโปรแกรม MATLAB ในส่วนของ Simulink84
ง.2	แผนภาพแสดง Signal Constraint window84
ง.3	แผนภาพแสดง Edit Desired Response85
ง.4	แผนภาพแสดง Add Parameters.....85
ง.5	แผนภาพแสดง Add Parameters.....86
ง.6	แผนภาพแสดง Option ของการ Optimize.....86
ง.7	แผนภาพแสดงการตอบสนองของสัญญาณในขอบเขต87
ง.8	แผนภาพแสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้ปรับแต่ง87
ง.9	แผนภาพแสดงการ Save Project.....88

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

C_1	=	ความจุความร้อนของแผ่น Heater ($J/^\circ C$)
C_2	=	ความจุความร้อนของแผ่นรองแม่พิมพ์ ($J/^\circ C$)
C_3	=	ความจุความร้อนของแม่พิมพ์ ($J/^\circ C$)
T_1	=	อุณหภูมิที่แผ่น Heater ($^\circ C$)
T_2	=	อุณหภูมิที่แผ่นรองแม่พิมพ์ ($^\circ C$)
T_3	=	อุณหภูมิที่แม่พิมพ์ ($^\circ C$)
T_i	=	อุณหภูมิของแบบจำลอง ($^\circ C$)
$\hat{T}_i$	=	อุณหภูมิอ้างอิง ($^\circ C$)
Q_{cond}	=	อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน (W)
Q_{conv}	=	อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน (W)
R_{cond}	=	ค่าความต้านทานการนำความร้อน ($W/^\circ C$)
R_{conv}	=	ค่าความต้านทานการพาความร้อน ($W/^\circ C$)
k	=	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ($W/m^\circ C$)
h	=	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($W/m^2^\circ C$)
I	=	ค่ากระแสไฟฟ้า (A)
R	=	ค่าความต้านทานไฟฟ้าของแผ่น Heater (Ω)
N	=	จำนวนของแผ่น Heater
Q_I	=	ค่าพลังงานไฟฟ้า (W)
Q_{dist1}	=	อัตราการถ่ายเทความร้อนที่รวมกันของโซนที่ 1 (W)
Q_{dist2}	=	อัตราการถ่ายเทความร้อนที่รวมกันของโซนที่ 2 (W)
Q_{dist3}	=	อัตราการถ่ายเทความร้อนที่รวมกันของโซนที่ 3 (W)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

กระบวนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมลามีนเป็นกระบวนการผลิตที่สำคัญ เพราะต้องควบคุมอุณหภูมิของแม่พิมพ์ให้คงที่ สำหรับการควบคุมอุณหภูมิจะใช้ระบบควบคุมอุณหภูมิแบบปิดที่มีตัวควบคุมแบบพีไอดีผ่านรีเลย์แบบแม่เหล็ก โดยวัดอุณหภูมิย้อนกลับจากแผ่นรองแม่พิมพ์ (T2) เพื่อใช้ในการควบคุมอุณหภูมิของแม่พิมพ์ให้คงที่ ก่อนเริ่มกระบวนการผลิตทุกครั้งจะต้องผ่านกระบวนการอุ่นแม่พิมพ์ให้แม่พิมพ์มีอุณหภูมิคงที่ที่ $150 - 170^{\circ}\text{C}$ จึงสามารถเริ่มกระบวนการอัดขึ้นรูปได้ ซึ่งกระบวนการอุ่นแม่พิมพ์จะใช้เวลานานประมาณ 2 ชั่วโมง เนื่องจากบริษัทมีจำนวนเครื่องอัดขึ้นรูปภาชนะเมลามีนประมาณ 300 เครื่อง จึงทำให้มีการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าในปริมาณมาก ปัญหาที่พบเครื่องอัดขึ้นรูปภาชนะเมลามีนมีการใช้งานมาเป็นระยะเวลานาน และการควบคุมอุณหภูมิเป็นการควบคุมอุณหภูมิที่แผ่นรองแม่พิมพ์โดยคาดว่าอุณหภูมิของแม่พิมพ์จะได้ตามที่ต้องการ ซึ่งเป็นระบบควบคุมที่ไม่ถูกต้อง เพราะอุณหภูมิที่ต้องการควบคุมจริงเป็นอุณหภูมิของแม่พิมพ์ที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป จึงส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการควบคุมอุณหภูมิไม่เป็นที่ไปตามความต้องการ

ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการอัดขึ้นรูปภาชนะจากวัสดุเมลามีน โดยใช้วิธีระบุเอกลักษณ์ด้วยจินเนติกอัลกอริทึมในการประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และนำไปออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอดีในการควบคุมอุณหภูมิของแม่พิมพ์ให้มีประสิทธิภาพ และลดการใช้พลังงานไฟฟ้า

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อวิเคราะห์และประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมลามีน
2. ออกแบบระบบควบคุมแบบพีไอดีเพื่อควบคุมอุณหภูมิของแม่พิมพ์ให้เป็นที่ไปตามความต้องการ และเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานของเครื่องอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมลามีนที่ใช้งานอยู่

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. วิเคราะห์และประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมลามีน ของบริษัท ศรีไทยซูเปอร์แวร์ จำกัด (มหาชน)
2. ออกแบบระบบควบคุมพีไอดีในกระบวนการอุ่นแม่พิมพ์โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมลามีนที่ได้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบควบคุมอุณหภูมิของกระบวนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมลามีนได้
2. สามารถออกแบบระบบควบคุมพีไอดีให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นเพื่อควบคุมอุณหภูมิของแม่พิมพ์ให้เป็นไปตามความต้องการ และลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้

1.5 การจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 6 บท ซึ่งมีรายละเอียดโดยย่อดังนี้

บทที่ 1 บทนำซึ่งกล่าวถึงความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ และเป้าหมายของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ตลอดจนขอบเขต และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับเมลามีน ลักษณะเครื่องอัด แม่พิมพ์สำหรับกระบวนการอัด การประมาณค่าตัวแปรของระบบ ตัวสังเกต และการควบคุมระบบ รวมถึงปริทรรศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 กล่าวถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมลามีน

บทที่ 4 กล่าวถึงการประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และการออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิของกระบวนการอุ่นแม่พิมพ์

บทที่ 5 กล่าวถึงผลการทดสอบการทำงานของระบบควบคุมที่ได้จากการออกแบบกับระบบจริง

บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

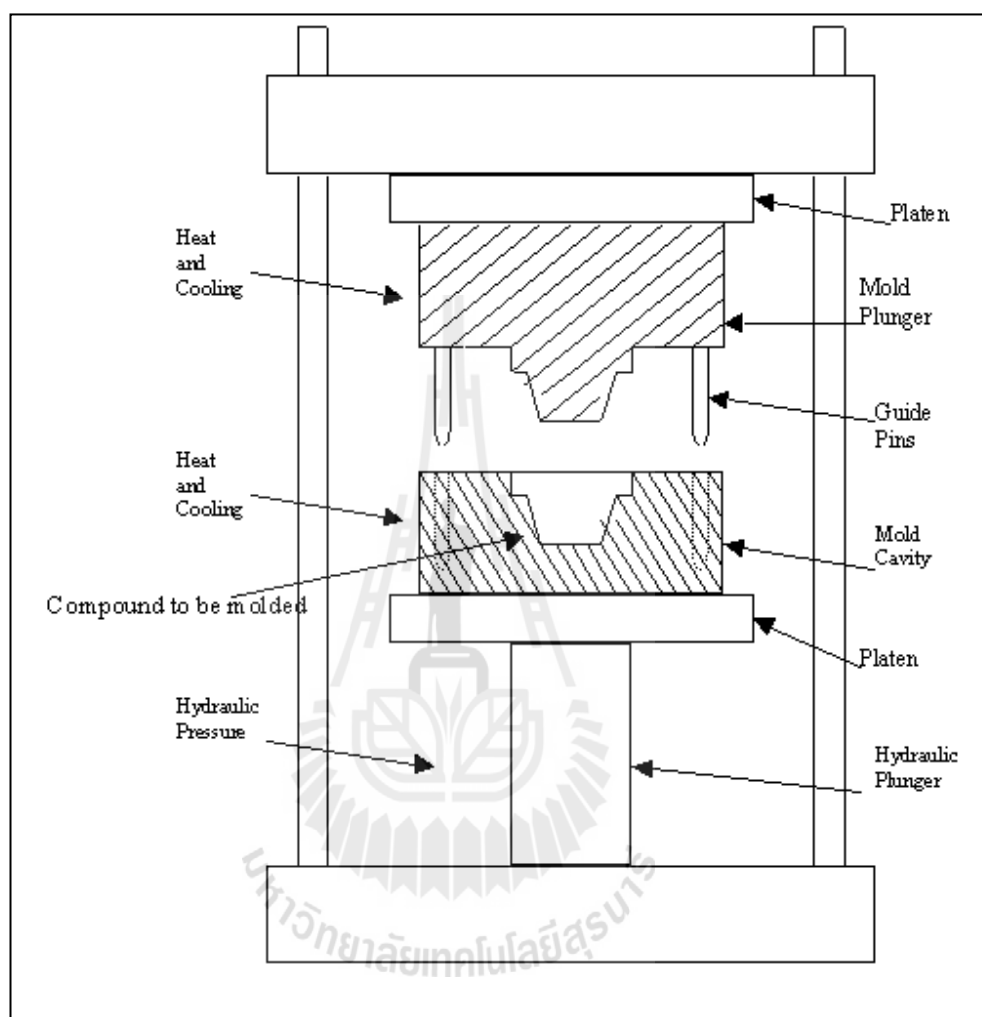
กระบวนการแปรรูปพลาสติกด้วยการอัดเป็นเทคนิคการแปรรูปที่เก่าแก่ที่สุดเทคนิคหนึ่ง โดยเริ่มมีการประยุกต์ใช้ครั้งแรกหลังจากที่ Leo Hendrick Baekeland (1909) นักวิทยาศาสตร์ผู้ค้นพบการสังเคราะห์ฟีนอล ฟอร์มาดิไฮด์เรซิน แต่ในปัจจุบันยังคงมีการใช้เทคนิคนี้ในการแปรรูปพลาสติกอย่างกว้างขวางโดยเฉพาะอย่างยิ่งการแปรรูปยาง และพลาสติกประเภทเทอร์มอเซตติง เช่น ฟีนอลิกเรซิน (Phenolic Resin) อีพอกซีเรซิน (Epoxy Resin) เมลามีน ฟอร์มาลดีไฮด์ (Melamine Formaldehyde) และยูเรีย ฟอร์มาลดีไฮด์ (Urea Formaldehyde) เป็นต้น นอกจากนี้ยังนิยมใช้ในการแปรรูปเทอร์มอพลาสติกที่แปรรูปด้วยเทคนิคอื่นได้ยาก เช่น การแปรรูปเทอร์มอพลาสติกที่ผสมไฟเบอร์ต่างๆ การแปรรูปเทอร์มอพลาสติกอิลาสโตเมอร์ และการแปรรูปพลาสติกไวไฟกับสไตรีน สำหรับทำแผ่นเสียงที่ต้องการความละเอียดแน่นอน เป็นต้น สำหรับชนิดของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแปรรูปด้วยเทคนิคการอัด ได้แก่ ช้อน ชาม จาน ที่เขียนหรือ สวิตช์ไฟ และหม้อ เป็นต้น

ภาชนะเมลามีน เป็นโพลิเมอร์ผสมระหว่างเมลามีนกับฟอร์มาลดีไฮด์ได้เมลามีนเรซินเป็นพลาสติกที่ขึ้นรูปด้วยความร้อน นิยมนำมาใช้ผลิตบรรจุภัณฑ์อาหาร ซึ่งพบเห็นได้ทั่วไปในชีวิตประจำวันเช่น ชาม จาน ถ้วยกาแฟ พลาสติก และช้อน เป็นต้น เพราะมีน้ำหนักเบา มีสีสวย และทนทานสวยงาม ยังสามารถทนความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100°C ได้โดยไม่ก่อให้เกิดอันตรายใด ๆ แต่ถ้าสัมผัสกับอุณหภูมิที่สูงกว่า 100°C จะก่อให้เกิดอันตรายได้

2.1 ลักษณะเครื่องอัด (Compression Molding Machine)

กระบวนการอัดเป็นเทคนิคการแปรรูปพลาสติกที่ไม่ซับซ้อน โดยหลักการทำงานของกระบวนการอัด คือ การนำเม็ดหรือผงพลาสติกมาอัดใน (Mold) ภายใต้ความดันและอุณหภูมิที่เหมาะสม เพื่อให้พลาสติกหลอมและไหลเข้าสู่ช่องว่างภายในแม่พิมพ์ (Cavity) ส่วนประกอบหลักของเครื่อง คือ แผ่นเหล็ก (Platens) จำนวนสองชุด ซึ่งแผ่นหนึ่งสามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงได้ (Movable Platen) ส่วนอีกแผ่นหนึ่งถูกยึดติดกับที่ (Fixed Platen) แม่พิมพ์สำหรับการแปรรูปพลาสติกทั้งตัวผู้และตัวเมียจะถูกยึดติดกับแผ่นเหล็กอัดทั้งสองแผ่นนี้ แสดงดังรูปที่ 2.1 ในปัจจุบัน

เครื่องอัดส่วนใหญ่ได้รับการพัฒนาให้สามารถทำงานอัตโนมัติโดยใช้แรงขับเคลื่อนไฮดรอลิกในการเคลื่อนที่แผ่นเหล็กอัดขึ้นลง



รูปที่ 2.1 เครื่องอัด (Compression Molding Machine)

2.1.1 ระบบการขับเคลื่อน

ในปัจจุบันเครื่องอัดส่วนใหญ่ได้รับการพัฒนาให้สามารถทำงานอัตโนมัติโดยใช้แรงขับเคลื่อนไฮดรอลิกในการเคลื่อนที่แผ่นเหล็กอัดขึ้นลง นอกจากนี้ระบบขับเคลื่อนยังทำหน้าที่ในการให้ความดันในการอัดอีกด้วย เครื่องอัดขนาดเล็กที่ใช้ในห้องปฏิบัติการมีระบบขับเคลื่อนที่ให้ความดันในช่วง 5 – 100 ตัน ส่วนเครื่องอัดที่ใช้ในอุตสาหกรรมมีระบบขับเคลื่อนที่ให้ความดันในช่วง 10 – 4000 ตัน โดยขนาดของความดันขึ้นกับขนาดของแผ่นเหล็กอัด ซึ่งมีขนาดอยู่

ในช่วง 8 ตารางนิ้วถึง 5 ตารางฟุต ชนิดของพลาสติก ความหนาของผนังชิ้นงานพลาสติก และการให้ความร้อนแก่พลาสติกก่อนการอัด

2.1.2 ระบบให้ความร้อนและหล่อเย็น

ระยะเวลาการทำงานต่อวัฏจักรของการอัดนั้นขึ้นอยู่กับความหนาของผนังชิ้นงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งพลาสติกประเภทเทอร์โมเซตที่เป็นตัวนำความร้อนที่ไม่ดี และในการอัดต้องให้อุณหภูมิถึงจุดที่เกิดการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุลได้ ซึ่งหากเติมเม็ดหรือผงพลาสติกลงในแม่พิมพ์โดยตรงจะทำให้ระยะเวลาในการอัดนานมาก ดังนั้นจึงควรมีการให้ความร้อนแก่พลาสติกก่อนนำเข้าแม่พิมพ์ เพื่อให้พลาสติกสามารถไหลได้ดีขึ้น ลดระยะเวลาในการทำงานต่อกระบวนการให้สั้นลง และยังสามารถลดความดันที่ใช้ในการอัดได้อีกด้วย

ตารางที่ 2.1 ความดันของการอัดพินอลิกเรซิน

ความหนาของชิ้นงาน (นิ้ว)	ความดัน (MPa)	
	ไม่ให้ความร้อนก่อนอัด	อบด้วยตู้อบชนิดความถี่สูงก่อนอัด
0.75 – 1.5	21	7 – 14
0.75 – 1.5	26	9 – 17
2	30	10 – 21
3	35	12 – 24
4	40	13 – 28
5	} ต้องให้ความร้อนแก่ พลาสติกก่อนเติมลง แม่พิมพ์เสมอ	16 – 31
6		17 – 35
7		13 – 28

การให้ความร้อนแก่พลาสติก แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ การให้ความร้อนแก่คอมปาวด์ก่อนอัด และการให้ความร้อนแก่บ่้าโดยตรงขณะที่อัด

2.1.2.1 การให้ความร้อนแก่คอมปาวด์ก่อนอัด เช่น การใช้แผ่นโลหะร้อน การใช้รังสีอินฟราเรด การใช้เตาอบหรือไมโครเวฟ และการใช้ตู้อบชนิดความถี่สูง (High Frequency Oven) เป็นต้น

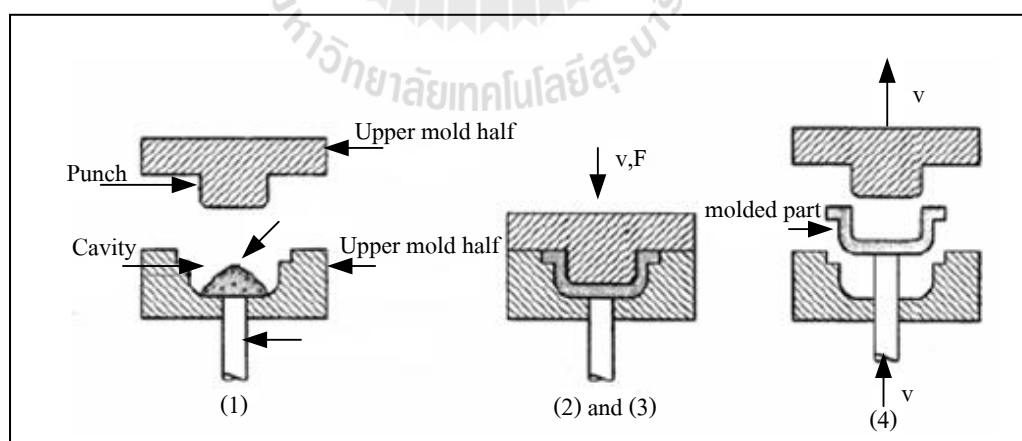
2.1.2.2 การให้ความร้อนในแม่พิมพ์ร้อน เช่น ระบบไฟฟ้า ซึ่งนิยมใช้กันมากเนื่องจากออกแบบ และติดตั้งได้ง่าย และมีความสะดวกในการซ่อมบำรุง ระบบไอน้ำ ซึ่งมีข้อดี คือ การให้ความร้อนที่สม่ำเสมอแต่ไม่สามารถให้ความร้อนเกิน 180 °C ได้ และระบบน้ำร้อนไหลเวียน

ซึ่งเป็นเทคนิคใหม่ที่ได้รับคามนิยมนมากในปัจจุบัน โดยการใ้การเผาทำน้ด้วยเปลวไฟจากก๊าซหุงต้ม แล้วให้น้ร้อนในท้อไหลเวียนใ้ความร้อนแก่แม่พิมพ์

นอกจากระบบใ้ความร้อนแล้วอาจมีระบบหล่อเย็นใ้ให้ชิ้นงานพลาสติกจากการอัดเย็นตัวลง ระบบหล่อเย็นจะไหลเวียนเข้าสู่ระบบท้อใกล้ช่องว่างของเบ้าหรืออาจใ้ระบบน้ร้อนที่สามารรถสลับจากการใ้ความร้อนเป็นการหล่อเย็นก็ได้

2.2 กระบวนการอัด (Compression Molding)

กระบวนการอัดเริ่มจากการยัดแม่พิมพ์ติดกับแผ่นเหล็กอัดทั้งสองแผ่น แล้วใ้ความร้อนแก่แม่พิมพ์ตามชนิดของพลาสติก โดยทั่วไปอุณหภูมิแม่พิมพ์สำหรับการอัดเทอร์โมเซตจะเป็นอุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุล ซึ่งอยู่ในช่วง $140 - 200^{\circ}\text{C}$ หลังจากนั้นจึงเติมเม็ดหรือผงพลาสติก โดยปริมาณการเติมต้องเหมาะสมกับขนาดของชิ้นงาน จากนั้นปิดแม่พิมพ์โดยเคลื่อนแผ่นเหล็กอัดลงด้วยความดันที่เหมาะสม พลาสติกจะเกิดการหลอมหรืออ่อนตัวไหลเข้าสู่ช่องว่าง (Cavity) ของแม่พิมพ์ สำหรับพลาสติกเทอร์โมเซตต้องปล่อยใ้ให้อยู่ภายใต้ความดันและอุณหภูมินี้ระยะหนึ่งตามระยะเวลาสุก (Cure Time) ของพลาสติกเทอร์โมเซตนั้น ๆ จากนั้นจึงเปิดแม่พิมพ์โดยเคลื่อนแผ่นเหล็กอัดขึ้นปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ ซึ่งในการปลดชิ้นงานออกจะต้องเป็นช่วงที่พลาสติกแข็งตัวเรียบร้อยแล้ว เพื่อป้องกันความเสียหายหรือการบิดตัวของชิ้นงาน แล้วเริ่มเติมพลาสติกลงในแม่พิมพ์เพื่อทำงานในรอบต่อไป



รูปที่ 2.2 ขั้นตอนกระบวนการอัด

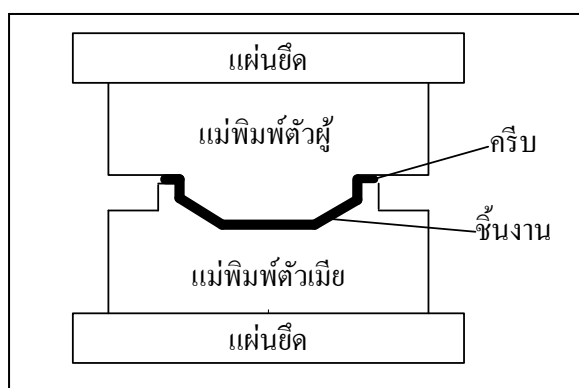
การอัดพลาสติกบางครั้งจะเกิดก๊าซหรือไอน้ำขึ้น ซึ่งอาจทำให้เกิดการฟุ้งตัวของก๊าซได้ผิวของชิ้นงาน ทำให้เกิดรอยบุ๋มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งพลาสติกที่ไม่ได้ให้ความร้อนก่อนการอัด เพื่อแก้ปัญหาจำเป็นต้องมีขั้นตอนการไล่ก๊าซ (Degassing Stage) โดยในขณะทำการอัดต้องมีการยกแม่พิมพ์ตัวผู้ขึ้น จนความดันภายในแม่พิมพ์ลดลงถึงความดันบรรยากาศ เมื่อก๊าซระเหยออกไปแล้วจึงทำการอัดต่อไปจนพลาสติกแข็งตัว นอกจากปัญหาการเกิดก๊าซแล้ว ระยะเวลาของการแข็งตัวก็มีอิทธิพลต่อสมบัติของชิ้นงานพลาสติกเช่นกัน หากระยะเวลาของพลาสติกสั้นเกินไปจะทำให้ผิวของชิ้นงานพอง ชิ้นงานทนความร้อนได้ไม่ดี แต่หากปล่อยให้แข็งตัวเกินไปอาจทำให้เกิดรอยร้าวได้ ดังนั้นผู้ควบคุมเครื่องจึงต้องมีความชำนาญ และประสบการณ์ค่อนข้างสูงในการควบคุมขั้นตอนการทำงานอยู่ตลอดเวลา เพื่อให้สามารถผลิตชิ้นงานพลาสติกได้ตรงตามความต้องการ

2.3 แม่พิมพ์สำหรับกระบวนการอัด

แม่พิมพ์สำหรับกระบวนการอัดพลาสติกนั้นต้องรับการเสียดสีสูงมาจากพลาสติกและสารเติมแต่ง ดังนั้น วัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์ควรทนต่อความดันหรือแรงอัดสูง ทนต่ออุณหภูมิสูง ทนต่อการขัดสี และทนต่อการกัดกร่อน แม่พิมพ์ที่ใช้ในกระบวนการอัดแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ

2.3.1 แม่พิมพ์อัดชิ้นงานราบ (Flat Form) หรือแม่พิมพ์ชนิดบาง (Flat Mold)

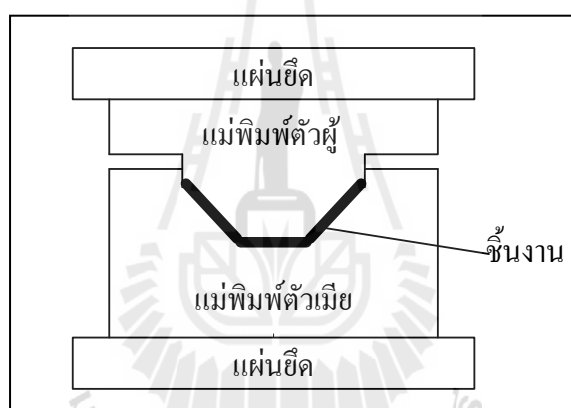
เป็นแม่พิมพ์ชนิดง่ายที่สุด มีความยุ่งยากน้อยที่สุดโดยปกติใช้ผลิตชิ้นงานที่มีลักษณะแบน เช่น จานและชาม เป็นต้น เป็นแม่พิมพ์ที่ยอมให้พลาสติกไหลออกได้เมื่อกดแม่พิมพ์ตัวผู้ลงมาทำให้ไม่ต้องใช้แรงอัดมาก ข้อดีของแม่พิมพ์ประเภทนี้ คือ การออกแบบ และการผลิตสามารถทำได้ง่าย มีน้ำหนักเบา และราคาถูก ข้อเสีย คือ ชิ้นงานที่ได้มีเนื้อไม่แน่น ความแข็งแรงน้อย ความหนาไม่สม่ำเสมอ และมีครีบ (Flash) มากทำให้ต้องขัดแต่งชิ้นงานมาก



รูป 2.3 แม่พิมพ์อัดชิ้นงานราบ (Flat Form) หรือแม่พิมพ์ชนิดบาง (Flash Mold)

2.3.2 แม่พิมพ์ปิดอัด (Sealed Mold) หรือแม่พิมพ์ชนิดบวก (Fully Positive Mold)

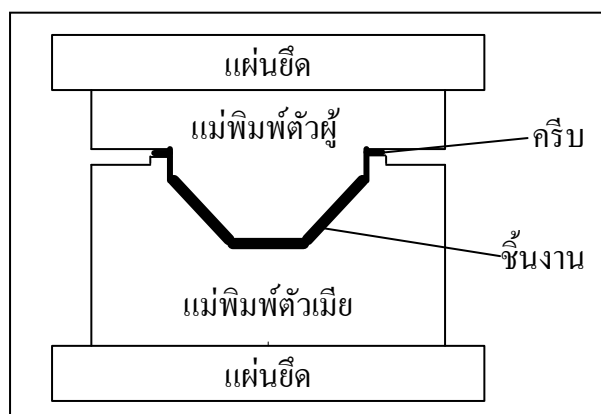
เป็นแม่พิมพ์ชนิดตรงข้ามกับแม่พิมพ์อัดขึ้นงานราบ คือ ขอมให้พลาสติกหลอมละลายให้ออกน้อยหรือไม่ให้ออกเลย เนื่องจากไม่มีร่องให้วัสดุพลาสติกไหลล้นออก โดยในขณะที่ปิดแม่พิมพ์นั้นแม่พิมพ์บนจะลึกลงไปในแม่พิมพ์ล่างประมาณ 2 – 3 มิลลิเมตร หรือจนถึง 20 – 30 มิลลิเมตร เพื่อปิดช่องทางไม่ให้พลาสติกไหลล้นออกมา จึงทำให้สามารถอัดพลาสติกด้วยความดันสูง โดยพลาสติกจะได้รับแรงดันทั้งหมด ทำให้ผลิตภัณฑ์มีเนื้อแน่นและมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น แต่มีข้อเสีย คือ หากใส่วัสดุพลาสติกมากเกินไปแรงอัดจะทำให้แม่พิมพ์แตกร้าวได้ นอกจากนี้แม่พิมพ์ประเภทนี้ไม่ค่อยนิยมใช้กับชิ้นงานที่ต้องการความละเอียด เนื่องจากในการอัดแต่ละครั้งใช้ปริมาณพลาสติกที่ต่างกัน จะทำให้ได้ชิ้นงานที่มีความหนาต่างกัน ทำให้ยากต่อการควบคุมคุณภาพชิ้นงานให้สม่ำเสมอ



รูปที่ 2.4 แม่พิมพ์ปิดอัด (Sealed Mold) หรือแม่พิมพ์ชนิดบวก (Fully Positive Mold)

2.3.3 แม่พิมพ์ผ่าประกบ (Split mold) หรือแม่พิมพ์ชนิดกึ่งบวก (Semi Positive Mold)

แม่พิมพ์ประเภทนี้มีลักษณะผสมผสานอยู่ระหว่างสองประเภทข้างต้น โดยในจังหวะแรกที่แม่พิมพ์ตัวผู้เริ่มอัด พลาสติกส่วนเกินยังสามารถไหลล้นออกมาได้ แต่เมื่อแม่พิมพ์ตัวผู้เคลื่อนลงมาถึงระยะหนึ่ง ปากของแม่พิมพ์ตัวผู้จะปิดช่องว่างไม่ให้พลาสติกไหลล้นออกได้อีกจึงอัดแน่น แม่พิมพ์ชนิดนี้เหมาะสมกับงานทั่วไป ชิ้นงานที่ได้ความแข็งแรงพอสมควร



รูปที่ 2.5 แม่พิมพ์ผ่าประกบ (Split Mold) หรือแม่พิมพ์ชนิดกึ่งบวก (Semi Positive Mold)

การออกแบบลักษณะชิ้นงานและแม่พิมพ์สำหรับการอัดมีความสำคัญมาก เนื่องจากลักษณะของแม่พิมพ์จะมีผลโดยตรงต่อความดันและอุณหภูมิที่ใช้ในการอัด รวมถึงคุณภาพของชิ้นงานอีกด้วย เช่น

- หากชิ้นงานมีความหนามาก จะทำให้พลาสติกไหลเข้าสู่ช่องว่างใน แม่พิมพ์ได้ยากทำให้ต้องใช้ความดันสูง
- หากรูปทรงของชิ้นงานมีเหลี่ยมหรือคม จะทำให้การไหลเข้าสู่ช่องว่างในแม่พิมพ์ของพลาสติกไม่ดี ทำให้ต้องใช้ความดันสูงขึ้น ดังนั้นจึงควรออกแบบให้มีมุมโค้งมน ซึ่งจะช่วยให้พลาสติกไหลได้ดีขึ้น
- หากผิวของแม่พิมพ์มีความขรุขระ ไม่เรียบ จะต้องให้ความดันสูงในการอัด

2.4 จินเนติกอัลกอริทึม

จินเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm, GA) เป็นเทคนิคการค้นหาลำดับทางปัญญาระดับสูงที่ทรงประสิทธิภาพเทคนิคหนึ่งและเป็นวิธีการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด โดยได้รับการพัฒนามาจากการหลักการคัดเลือกแบบธรรมชาติและหลักการทางสายพันธุ์จินเนติกอัลกอริทึม ซึ่งเป็นการคำนวณอย่างหนึ่งที่สามารถกล่าวได้ว่ามีวิวัฒนาการอยู่ในขั้นตอนของการค้นหาคำตอบ และได้รับการจัดให้เป็นวิธีหนึ่งในกลุ่มของการคำนวณเชิงวิวัฒนาการ (Evolutionary Computing) โดยปัจจุบันเป็นที่ยอมรับในประสิทธิภาพ และมีการนำไปประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในการแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด โดย GA เป็นขั้นตอนในการค้นหาคำตอบให้กับระบบ ดังนั้น GA จึงเป็นเครื่องมือในการช่วยคำนวณอย่างหนึ่งที่คอยทำงานอยู่ข้าง ๆ ระบบ โดยที่วัฏจักรของ GA โดยธรรมชาติแล้วประกอบไปด้วย 3 กระบวนการที่สำคัญ ได้แก่ การคัดเลือกสายพันธุ์

(Selection) ปฏิบัติการทางสายพันธุ์ (Genetic Operation, GO) และ การแทนที่ (Replacement) โดยแต่ละกระบวนการมีขั้นตอนดังนี้

2.4.1 การคัดเลือกสายพันธุ์ (Selection) คือขั้นตอนในการคัดเลือกประชากรที่ดีในระบบไปเป็นต้นกำเนิดสายพันธุ์เพื่อให้กำเนิดลูกหลานในรุ่นถัดไป ซึ่งการคัดเลือกสายพันธุ์เป็นขั้นตอนในการคัดเลือกโครโมโซมที่ดีที่สุดจากภายในกลุ่มประชากรทั้งหมด ซึ่งโครโมโซมที่ได้จะถูกนำไปใช้เป็นตัวต้นกำเนิดสายพันธุ์หรือพ่อแม่เพื่อใช้ในการให้กำเนิดลูกหลานในรุ่นถัดไป โดยปกติแล้วเพื่อให้ได้สายพันธุ์ที่ดีต้นกำเนิดของสายพันธุ์จะต้องดีด้วยจึงกลายเป็นปัญหาว่าจะทำการคัดเลือกต้นกำเนิดสายพันธุ์ที่ดีได้อย่างไรการคัดเลือกสายพันธุ์เป็นการจำลองการคัดเลือกโครโมโซมที่จะสามารถอยู่รอดได้ในแต่ละรุ่น สำหรับ GA นั้นจะทำการคัดเลือกโครโมโซมโดยการพิจารณาที่ค่าความเหมาะสมของโครโมโซมนั้น ๆ ดังนั้นโครโมโซมไหนมีค่าความเหมาะสมที่ดีย่อมหมายถึงการเป็นโครโมโซมที่ดีและควรมีโอกาสที่จะให้ลูกหลาน (Offspring) ในจำนวนที่มากกว่าได้ ซึ่งย่อมเป็นการบ่งบอกว่าโอกาสในการอยู่รอดในรุ่นถัดไปก็จะมีเพิ่มมากขึ้นด้วย

2.4.2 ปฏิบัติการทางสายพันธุ์ (Genetic Operation, GO) คือกรรมวิธีการเปลี่ยนแปลงโครโมโซมด้วยวิธีการทางสายพันธุ์เป็นขั้นตอนการนำเอาโครโมโซมที่เป็นต้นกำเนิดสายพันธุ์นั้นมาทำการเปลี่ยนแปลงให้เกิดโครโมโซมใหม่ขึ้นมา กลายเป็นโครโมโซมลูกหลาน ซึ่งขั้นตอนดังกล่าวนี้เป็นขั้นตอนสำคัญอีกขั้นตอนหนึ่งในวัฏจักรของ GA ที่ซึ่งมีการคาดหวังว่าโครโมโซมลูกหลานที่เกิดขึ้นมานั้นจะได้รับส่วนดีของโครโมโซมต้นกำเนิดสายพันธุ์โดยผ่านปฏิบัติการทางสายพันธุ์นี้ถ้าพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากปฏิบัติการทางสายพันธุ์ที่เกิดขึ้นกับประชากรซึ่งเป็นคำตอบของระบบแล้ว เราสามารถเปรียบเทียบปฏิบัติการทางสายพันธุ์ได้กับการก้าวเดินไปสู่คำตอบของระบบนั่นเอง โดยปกติทั่วไปปฏิบัติการทางสายพันธุ์ของ GA จะมีอยู่ 2 วิธีหลัก ๆ คือ การทำครอสโอเวอร์และการทำมิวเทชัน

- ครอสโอเวอร์เป็นวิธีการรวมตัวใหม่ของโครโมโซม (Recombination Operator) โดยทำการรวมส่วนย่อยระหว่างโครโมโซมต้นกำเนิดสายพันธุ์ตั้งแต่สองโครโมโซมขึ้นไป เพื่อให้กลายเป็นโครโมโซมลูกหลาน โครโมโซมลูกหลานที่ได้จากการครอสโอเวอร์จะมีพันธุกรรมจากต้นกำเนิดสายพันธุ์อยู่ในตัว โดยจะมีการกำหนดอัตราการทำครอสโอเวอร์เอาไว้ ส่วนใหญ่จะใช้น่าจะเป็น (P_c) เป็นตัวกำหนดอัตราดังกล่าว การทำครอสโอเวอร์มีวิธีด้วยกัน 3 วิธีคือ

- 1) การทำครอสโอเวอร์แบบจุดเดียว (Single – Point Crossover) การทำครอสโอเวอร์แบบจุดเดียวนี้นั้นโครโมโซมลูกหลานจะมีสายพันธุ์ของแต่ละต้นกำเนิดอยู่อย่างละหนึ่งส่วน จุดตัดในการทำครอสโอเวอร์โดยปกติจะได้มาจากการสุ่มเลือกตัวอย่างของการทำครอสโอเวอร์แบบจุดเดียว

2) การทำครอสโอเวอร์แบบหลายจุด (Multiple - Point Crossover)

การทำครอสโอเวอร์แบบหลายจุด โครโมโซมลูกหลานจะมีสายพันธุ์ของต้นกำเนิดอยู่มากกว่าหนึ่ง ส่วนหลักการเลือกจุดของครอสโอเวอร์นั้นมีอยู่หลายแบบแต่ละแบบจะให้ผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสายพันธุ์ในโครโมโซมลูกหลานที่แตกต่างกันออกไป โดยวิธีที่ง่ายและเป็นที่ยอมรับทั่วไป คือ การสุ่มเลือกจุดครอสโอเวอร์ การทำครอสโอเวอร์แบบหลายจุดจะให้ผลของลูกหลานที่มีความหลากหลายกว่าการทำครอสโอเวอร์แบบจุดเดียวอันจะมีผลให้การเข้าสู่ค่าตอบของระบบสามารถครอบคลุมพื้นที่ของคำตอบได้มากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามการทำครอสโอเวอร์แบบหลายจุด ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครโมโซมลูกหลานได้มากกว่าการทำครอสโอเวอร์แบบจุดเดียวอาจจะทำให้มีโอกาสเบี่ยงเบนของคำตอบที่มีอยู่ในโครโมโซมลูกหลานได้ในอัตราที่สูงกว่าเช่นกัน

3) ครอสโอเวอร์แบบสม่ำเสมอ (Uniform Crossover) การทำครอสโอเวอร์แบบ

จุดเดียวและหลายจุดมีการกำหนดจุดตัดเอาไว้ก่อนที่จะทำการสลับส่วนย่อยของโครโมโซมที่จุดนั้น ๆ วิธีดังกล่าวมีความแตกต่างไปจากการทำครอสโอเวอร์แบบสม่ำเสมอที่ซึ่งถูกออกแบบให้ทุกจุดบนโครโมโซมสามารถเป็นจุดตัดได้ในทางปฏิบัติจะมีการใช้ครอสโอเวอร์แมสก์หรือตัวพราง (Cross Over Mask) ช่วยในการทำครอสโอเวอร์ตัวพรางดังกล่าวจะเป็นชนิดไบนารี และมีขนาดจำนวนบิตเท่ากับความยาวของโครโมโซมค่าของตัวพรางที่ตำแหน่งต่าง ๆ จะเป็นตัวบอกถึงการทำครอสโอเวอร์ระหว่างต้นกำเนิดสายพันธุ์ตำแหน่งที่ตัวพรางมีค่าเป็น 1 โครโมโซมลูกหลานจะได้จากการสลับส่วนย่อยของโครโมโซมต้นกำเนิดสายพันธุ์ ถ้าตำแหน่งที่ตัวพรางมีค่าเป็น 0 โครโมโซมลูกหลานจะยังคงเป็นส่วนย่อยของโครโมโซมต้นกำเนิดสายพันธุ์โดยไม่มีการสลับส่วนแต่อย่างใด

- มิวเทชันเป็นวิธีการแปรผันยีนหรือส่วนย่อยของโครโมโซม ซึ่งสามารถเปรียบเทียบได้กับการกลายพันธุ์ของสิ่งมีชีวิตในทางชีววิทยานั้นเองปกติแล้วอัตราการทำมิวเทชันจะมีค่าค่อนข้างต่ำหรืออาจจะกล่าวได้ว่าความน่าจะเป็นในการทำมิวเทชันนั้นมีค่าน้อยถ้ามิวเทชันคือการเปลี่ยนแปลงยีนในโครโมโซมแล้วมิวเทชันจะเป็นการเปลี่ยนแปลงเชิงตัวเลขของโครโมโซมนั้นเองเพราะในทางปฏิบัติแล้วยีนของโครโมโซมก็คือ บิตในระบบตัวเลขของคอมพิวเตอร์การทำมิวเทชันเปรียบเสมือนกับการก้าวเดินไปสู่คำตอบของระบบเช่นเดียวกับการทำครอสโอเวอร์ นอกเหนือไปจากนั้นแล้วมิวเทชันยังทำให้เกิดความหลากหลายขึ้นในกลุ่มประชากรมีผลให้คำตอบที่เกิดขึ้นในกระบวนการของจินเนติกอัลกอริทึมครอบคลุมพื้นที่การค้นหาคำตอบทั่วถึงยิ่งขึ้น อัตราการทำมิวเทชันเป็นปัจจัยที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงเพราะจะมีผลต่อพฤติกรรมการทำงานของจินเนติกอัลกอริทึมและขนาดของประชากรเพื่อให้การสำรวจพื้นที่ในการค้นหาคำตอบเป็นไปอย่างทั่วถึงดังนั้นการกำหนดอัตราการทำมิวเทชันต้องมีความเหมาะสมที่สุดต่อระบบ

ด้วยเพื่อก่อให้เกิดผลในการค้นหาคำตอบที่มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น สรุปได้ว่าจุดประสงค์หลักของการทำมิวเทชัน คือเพื่อให้จินเนติกอัลกอริทึมสามารถหลุดพ้นออกจากคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น โดยการป้องกันไม่ให้โครโมโซมประชากรเกิดการเปลี่ยนแปลงในทิศทางที่มีความคล้ายคลึงกันทั้งหมด ซึ่งการทำครอสโอเวอร์และมิวเทชันเป็นการสร้างการเปลี่ยนแปลงของต้นกำเนิดสายพันธุ์ซึ่งให้ผลเป็นโครโมโซมลูกหลาน การทำครอสโอเวอร์มีผลให้โครโมโซมลูกหลานได้รับสายพันธุ์จากต้นกำเนิดโดยโครโมโซมลูกหลานจะได้รับส่วนที่ดีจากส่วนย่อยของต้นกำเนิดสายพันธุ์ไปในขณะที่การทำมิวเทชันเป็นการสร้างความแปรผันขึ้นในโครโมโซมลูกหลานเพื่อให้เกิดประชากรใหม่ที่ดีกว่าขึ้นปฏิบัติการทางสายพันธุ์ทั้งสองถูกใช้ในจินเนติกอัลกอริทึมโดยหวังว่าการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจะมีผลทำให้โครโมโซมลูกหลานมีสายพันธุ์ที่ดีขึ้นอันจะนำไปสู่คำตอบที่ดีที่สุดต่อไป

2.4.3 การแทนที่ (Replacement) คือ การที่ลูกหลานกำเนิดใหม่ไปแทนที่ประชากรเก่าในรุ่นก่อน จุดประสงค์ในการแทนที่นั้นค่อนข้างชัดเจนกล่าวคือ การนำโครโมโซมลูกหลานมาแทนที่ประชากรรุ่นก่อน จะทำให้ประชากรรุ่นใหม่ประกอบไปด้วยโครโมโซมใหม่ ๆ ซึ่งเป็นโครโมโซมที่ดีกว่าเพราะได้สืบสายพันธุ์ที่ดีจากต้นกำเนิดสายพันธุ์ที่ผ่านการคัดเลือกแล้วกลยุทธิ์ในการคัดเลือกกว่าโครโมโซมไหนจะถูกแทนที่นั้นสามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธีคือ

1) การแทนที่ประชากรทั้งรุ่น (Generational GA) เป็นการนำประชากรลูกหลานไปแทนที่ประชากรเก่าทั้งหมด ดังนั้นถ้าในระบบหนึ่งมีจำนวนประชากรเท่ากับ N จำนวนของโครโมโซมลูกหลานที่จะมาแทนที่จะต้องมีขนาด N เช่นกัน วิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายเนื่องจากไม่จำเป็นจะต้องมีขั้นตอนของการคัดเลือกว่าประชากรส่วนไหนจะถูกแทนที่ แต่การที่ไม่มีขั้นตอนดังกล่าวกลายเป็นข้อเสีย นั่นคือ โครโมโซมที่ดี ๆ ในรุ่นก่อนจะถูกแทนที่ไปด้วย วิธีแก้ที่ง่าย ๆ คือ ก่อนที่จะทำการแทนที่ให้คัดเลือกเก็บโครโมโซมที่ดีที่สุด 2 – 3 ตัวแรกเอาไว้โดยอาจจะใช้วิธีการคัดเลือกดังที่อธิบายมาแล้วก่อนหน้านี้วิธีดังกล่าวอาจเรียกได้ว่าเป็นกลยุทธิ์คัดเลือกหัวกระทิ (Elitist Strategy) อย่างไรก็ตามประชากรที่เหลืออยู่อาจจะถูกครอบงำด้วยโครโมโซมหัวกระทินี้ได้โดยง่ายกล่าวคือ ถ้าไม่มีโครโมโซมใหม่ที่ดีกว่าเกิดขึ้น โครโมโซมที่ดีที่สุดจากรุ่นก่อนก็จะถูกเก็บไว้อยู่ตลอดไป และไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ขึ้นทำให้ GA ไม่สามารถสร้างวิวัฒนาการโครโมโซมใหม่ ๆ ขึ้นมาได้ ถึงแม้ว่าผลของโครโมโซมหัวกระทิจะมีโอกาสเกิดขึ้นได้แต่วิธีนี้ก็ได้รับการพิสูจน์แล้วว่าทำให้ระบบโดยรวมดีขึ้น

2) การแทนที่ประชากรแบบบางส่วน (Partial GA) เป็นการนำเอาประชากรลูกหลานไปแทนที่ประชากรเดิมเพียงบางส่วนเท่านั้น ดังนั้นจะต้องมีการคัดเลือกประชากรที่จะถูกแทนที่ ซึ่งโดยปกติจะพิจารณาจากค่าความเหมาะสมของโครโมโซมนั้นเองโครโมโซมเก่าจะถูก

แทนที่ด้วยโครโมโซมใหม่เพียง 1 หรือ 2 ตัวเท่านั้น กลวิธีในการแทนที่มีอยู่หลายวิธี เช่น การแทนที่ประชากรที่ด้อยที่สุดหรือการแทนที่ประชากรโดยการสุ่มเลือก เป็นต้น

2.5 ตัวสังเกต (Observer)

การออกแบบตัวควบคุมโดยใช้วิธีการป้อนกลับตัวแปรสแตต (State – Variable Feedback) เช่น วิธีการในการปรับเปลี่ยนค่าโพลของระบบ (Pole Placement Method) การสร้างหรือการทดสอบการทำงานของตัวควบคุมที่ทำการออกแบบมานั้นจะต้องประกอบด้วยข้อมูลจากสัญญาณของสเตตเวกเตอร์ (State Vector) ของระบบทุกค่าซึ่งส่วนมากแล้วการวัดข้อมูลจากตัวแปรสแตตหรือสัญญาณสเตตเวกเตอร์ทุกค่าเป็นไปได้ยาก ถึงแม้ในบางระบบจะสามารถวัดค่าตัวแปรสแตตได้แต่ก็อาจจะต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงในการวัด การควบคุมจึงมีการนำเอาตัวประมาณค่าตัวแปรสแตต (State Estimator) หรือตัวสังเกตมาใช้งานเพื่อประมาณค่าตัวแปรสแตตของระบบที่จะทำการควบคุม วิธีการที่ใช้ในการออกแบบตัวสังเกตเพื่อให้สามารถประมาณค่าตัวแปรสแตตของระบบได้อย่างถูกต้อง และรวดเร็วจึงมีความสำคัญต่อการควบคุมระบบอย่างมาก การออกแบบตัวสังเกตนั้นสามารถแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ ตัวสังเกตอันดับเต็ม (Full – Order Observer) เมื่อต้องการทราบค่าตัวแปรสแตตทุกตัวของระบบ และตัวสังเกตแบบลดอันดับ (Reduce – Order Observer) เมื่อต้องการทราบค่าตัวแปรสแตตที่ไม่สามารถวัดได้บางตัวเท่านั้น ตัวสังเกตอันดับเต็มจะทำการประมาณค่าตัวแปรสแตตทุกตัวใหม่ทั้งหมด โดยการนำค่าของตัวแปรสแตตบางตัวที่สามารถวัดได้กับสัญญาณอินพุตที่ส่งเข้าไปในระบบมาใช้ในการประมาณค่าตัวแปรสแตต ตัวสังเกตแบบลดอันดับ คือ การประมาณค่าตัวแปรสแตตที่ไม่สามารถวัดได้เท่านั้นโดยใช้ค่าของตัวแปรสแตตบางตัวที่สามารถวัดได้กับสัญญาณอินพุตของระบบควบคุมที่ส่งเข้าไปในระบบ ตัวสังเกตที่ใช้ในอุตสาหกรรมมักใช้กับระบบที่สามารถวัดค่าตัวแปรสแตตได้บางสเตตเพื่อที่จะลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการประมาณค่าตัวแปรสแตตของระบบเมื่อใช้ตัวสังเกต

2.5.1 การออกแบบตัวสังเกตอันดับเต็ม (Full – Order Observer)

การออกแบบตัวสังเกตอันดับเต็มจะทำการประมาณค่าตัวแปรสแตตทุกตัวใหม่ทั้งหมดโดยใช้ข้อมูลของเอาต์พุตบางตัวที่สามารถวัดได้และสัญญาณอินพุตที่ส่งเข้าไปในระบบที่จะทำการประมาณค่าสเตต สมการระบบสามารถทำหน้าที่เป็นตัวประมาณค่าสเตตของตัวเองได้แต่เป็นการประมาณในลักษณะแบบเปิด (Open – Loop Observer) พิจารณาระบบเชิงเส้นที่ค่าตัวแปรของระบบไม่ขึ้นกับเวลา (Linear Time Invariant System) ที่ต้องการจะใช้ตัวสังเกตในการประมาณค่าตัวแปรสแตตของระบบเขียนในรูป State Space Form ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx\end{aligned}\tag{2.1}$$

เมื่อ A = เมทริกซ์สเตตของระบบ $[n \times n]$
 B = เมทริกซ์อินพุตของระบบ $[n \times 1]$
 C = เมทริกซ์เอาต์พุตของระบบ $[1 \times n]$
 x = สเตตเวกเตอร์ของระบบ $[n \times 1]$
 u = อินพุตของระบบ $[1 \times 1]$
 y = เอาต์พุตของระบบ $[1 \times 1]$
 n = จำนวนเต็มบวก

ตัวสังเกตของระบบพลศาสตร์ที่ต้องการจะทำการควบคุมมีรูปแบบดังนี้คือ

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L[y - C\hat{x}]\tag{2.2}$$

เมื่อ L = เมทริกซ์อัตราขยายของตัวสังเกต $[n \times 1]$
 $\hat{x}$ = ค่าตัวแปรสเตตของตัวสังเกต $[n \times 1]$

สมการที่ (2.1) ลบด้วยสมการที่ (2.2) จะได้

$$\dot{x} - \dot{\hat{x}} = Ax + Bu - \{A\hat{x} + Bu + L[y - C\hat{x}]\}\tag{2.3}$$

จัดรูปสมการจะได้

$$\dot{x} - \dot{\hat{x}} = [A - LC](x - \hat{x})\tag{2.4}$$

สมการที่ (2.4) สามารถเขียนได้เป็น

$$\dot{e} = [A - LC]e\tag{2.5}$$

เมื่อ $e = x - \hat{x}$

เมื่อค่าความแตกต่างของ $x - \hat{x} \rightarrow 0$ จะทำให้ค่าความผิดพลาดของตัวแปรสเตตซึ่งวัดได้จากระบบจริงและตัวสังเกตหมดไป ผลที่ได้นั้นจะทำให้ตัวสังเกตจะสามารถประมาณค่าของตัวแปรสเตตในระบบที่ต้องการทำการสังเกตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การใช้ตัวสังเกตในการประมาณค่าตัวแปรสเตตของระบบจะต้องมีการตรวจสอบว่าระบบนั้นมีคุณสมบัติในการสังเกตได้หรือไม่ โดยพิจารณาเมทริกซ์ความสังเกตได้

$$\text{Observability matrix} = \mathcal{G} = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

ระบบใด ๆ จะมีคุณสมบัติความสังเกตได้ ก็ต่อเมื่อ ค่าลำดับชั้นของเมทริกซ์ความสังเกตได้เท่ากับ n ($\text{Rank}[\mathcal{G}] = n$) เมื่อ n คือ อันดับของระบบหรือของเมทริกซ์ A สำหรับค่าอัตราขยายของตัวสังเกต (Observer Gain) สามารถหาได้จาก Ackermann's Formula

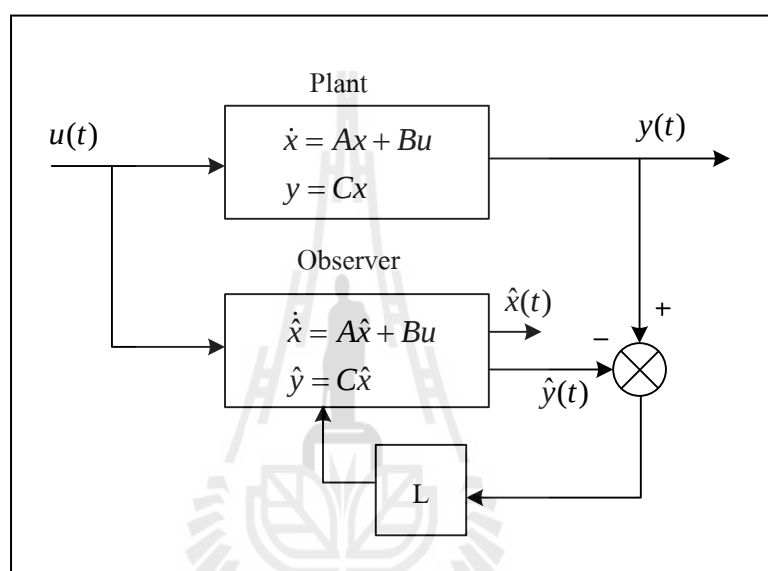
$$L = \phi(A) \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

เมื่อสมการลักษณะเฉพาะ คือ

$$q(\lambda) = \lambda^n + \alpha_1 \lambda^{n-1} + \dots + \alpha_{n-1} \lambda + \alpha_n \quad (2.8)$$

$$q(A) = A^n + \alpha_1 A^{n-1} + \dots + \alpha_{n-1} A + \alpha_n I \quad (2.9)$$

หลักการทำงานของตัวสังเกตก็จะนำอินพุตและเอาต์พุตของระบบที่ต้องการทราบค่าตัวแปรแสดงภายในระบบ รวมทั้งความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างระบบที่จะทำการสังเกตและตัวสังเกต มาประมวลผลโดยผ่านค่าอัตราขยายของตัวสังเกตเพื่อปรับค่าตัวแปรให้ตัวสังเกต เพื่อลดค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจนได้ค่าประมาณของตัวแปรแสดงที่ต้องการภายในระบบที่ไม่สามารถวัดได้ ทั้งนี้การสร้างตัวสังเกตจำเป็นต้องทราบค่าตัวแปรทั้งหมดของระบบที่จะทำการสังเกตเพื่อนำค่าตัวแปรนั้นมาใช้ในโครงสร้าง



รูปที่ 2.6 แผนภาพหลักการทำงานของตัวสังเกต

- เมื่อ L = ค่าเมทริกซ์อัตราขยายของตัวสังเกต $[n \times 1]$
 $u(t)$ = ค่าอินพุตของระบบ $[1 \times 1]$
 $y(t)$ = ค่าเอาต์พุตของระบบ $[1 \times 1]$
 $\hat{y}(t)$ = ค่าเอาต์พุตของตัวสังเกต $[1 \times 1]$
 $\hat{x}(t)$ = ค่าตัวแปรแสดงของตัวสังเกต $[n \times 1]$

ในการออกแบบตัวสังเกตเพื่อใช้งานต้องทำการหาค่าตัวแปรในระบบของตัวสังเกต ซึ่งได้มาจากการระบุเอกลักษณ์ของระบบ (System Identification) ที่ต้องการจะประมาณค่าตัวแปรแสดงเพื่อหาค่าของตัวแปรที่ถูกต้องของระบบเพื่อนำไปใช้งาน ซึ่งจะทำให้การประมาณค่าตัวแปรแสดงของระบบที่ต้องการโดยใช้ตัวสังเกตมีความผิดพลาดลดลง และอีกส่วนหนึ่งที่สำคัญ คือ

การกำหนดตัวแปรของตัวสังเกตในขั้นตอนการหาค่าอัตราขยายของตัวสังเกต เพื่อให้ระบบของตัวสังเกตมีความเสถียรและมีความรวดเร็วในการตอบสนองเพียงพอที่จะทำให้ค่าสัญญาณความผิดพลาดมีค่าน้อยที่สุด นั่นก็คือ สัญญาณประมาณ $\hat{x}(t)$ จะมีค่าเท่ากับสัญญาณสเตตจริง หรือ $x(t)$ ในทางปฏิบัติการออกแบบจะให้โพลของตัวสังเกตอยู่บนแกนจริง (Real Axis) เพื่อที่จะนำไปทำการหาค่าอัตราขยายของตัวสังเกตหากเราสามารถจัดรูปให้ไปอยู่ในรูปแบบที่เรียกว่า รูปแบบบัญญัติของตัวสังเกต (Observer Canonical Form) ได้ จะทำให้การออกแบบมีความสะดวกมากขึ้น โดยสามารถใช้สูตรของแอกเคอร์มันน์ (Ackermann's Formula) ช่วยในการหาค่าอัตราขยายของตัวสังเกตได้

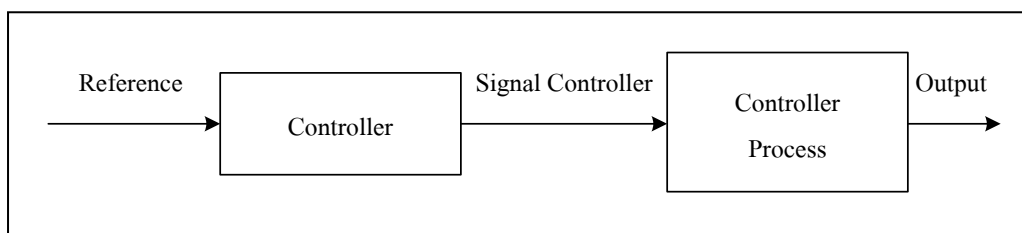
2.6 การควบคุมระบบ

ในปัจจุบันนี้ระบบควบคุมอัตโนมัติได้เข้ามามีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาความเจริญก้าวหน้าทางเทคโนโลยีมากมายนัก ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดในชีวิตประจำวันได้แก่ระบบควบคุมในเครื่องปรับอากาศซึ่งจะคอยควบคุมอุณหภูมิภายในห้องให้คงที่ ในอุตสาหกรรมได้มีการนำระบบควบคุมอัตโนมัติไปใช้ควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ควบคุมการทำงานของเครื่องจักร และอื่น ๆ อีกมากมาย เทคโนโลยีทางด้านอวกาศและการผลิตอาวุธยุทโธปกรณ์ก็ได้มีการนำระบบควบคุมไปใช้ในระบุนำวิถี ระบบควบคุมการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง เป็นต้น

2.6.1 ระบบควบคุมแบบวงเปิดหรือระบบควบคุมแบบไม่ป้อนกลับ

(Open - loop Control Systems, Nonfeedback Control Systems)

ระบบควบคุมพื้นฐานที่กล่าวถึงในหัวข้อที่แล้วเป็นระบบควบคุมแบบวงเปิด ในระบบควบคุมแบบวงเปิดนี้การควบคุมส่วนใหญ่ต้องอาศัยการคาดคะเน และการตัดสินใจของมนุษย์ ตัวอย่างเช่น การควบคุมอุณหภูมิภายในห้องโดยเตาผิง ถ้าเตาผิงที่ใช้มีเพียงอุปกรณ์ตั้งเวลาเปิด - ปิดเท่านั้น ผู้ใช้หรือผู้ควบคุมจะต้องคาดคะเนและตั้งเวลาในการเปิดเตาผิงที่นานพอเหมาะเพื่อให้อุณหภูมิห้องอยู่ในระดับที่ต้องการ แต่การควบคุมโดยมนุษย์เช่นนี้จะไม่แม่นยำ และน่าเชื่อถือนัก เนื่องจากผู้ควบคุมไม่สามารถรู้ถึงคุณสมบัติเฉพาะในการสร้างความร้อนของเตาผิงนี้ อีกทั้งยังมีปัจจัยต่าง ๆ จากภายนอก เช่น อุณหภูมิภายนอกห้องที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในห้อง จะเห็นได้ว่าระบบควบคุมแบบวงเปิดนี้ไม่สามารถปรับตัวตามการเปลี่ยนแปลงของระบบอันเนื่องมาจากปัจจัยจากภายนอกได้



รูปที่ 2.7 ระบบควบคุมแบบวงเปิด

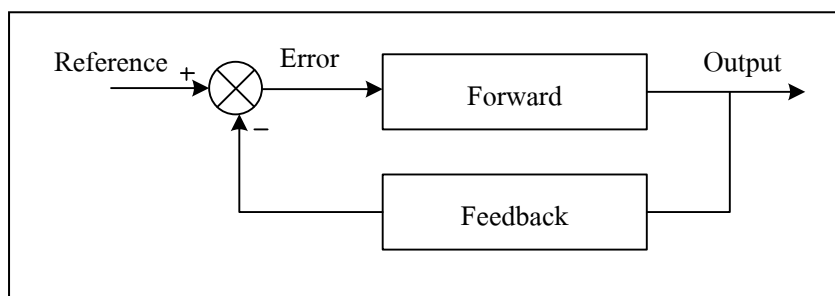
รูปที่ 2.7 แสดงแผนผังของระบบควบคุมแบบวงเปิด โดยสัญญาณอินพุตหรือสัญญาณสั่งการหรือสัญญาณอ้างอิงส่งผ่าน Controller ออกมาเป็นสัญญาณกระตุ้นหรือสัญญาณควบคุมเพื่อสั่งให้ Controlled Process ขับเอาต์พุตที่ต้องการออกมา

2.6.2 ระบบควบคุมแบบวงปิดหรือระบบควบคุมแบบป้อนกลับ

(Closed – loop Control Systems, Feedback Control Systems)

จากหัวข้อที่แล้วจะเห็นว่าเมื่อปัจจัยภายนอกมามีอิทธิพลต่อระบบจะทำให้ผู้ควบคุมไม่สามารถควบคุมเอาต์พุตให้เป็นไปตามต้องการได้ ในหัวข้อนี้ได้แก้ไขโดยการส่งสัญญาณเอาต์พุต $c(t)$ ป้อนกลับมาเปรียบเทียบกับสัญญาณสั่งการหรือสัญญาณอ้างอิงจะทำให้ได้ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างสัญญาณเอาต์พุตกับสัญญาณอ้างอิงทางด้านอินพุตเพื่อนำไปสร้างสัญญาณกระตุ้นและส่งต่อไปแก้ไขค่าความคลาดเคลื่อน (Error) ของเอาต์พุตให้น้อยลง ระบบที่กล่าวมานี้เรียกว่าระบบควบคุมแบบป้อนกลับ กิจกรรมส่วนใหญ่ที่มนุษย์ปฏิบัติในชีวิตประจำวันนั้นเป็นตัวอย่างหนึ่งของระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่ซับซ้อน

ส่วนประกอบพื้นฐานของระบบควบคุมแบบป้อนกลับ จากหลักการพื้นฐานของระบบควบคุมแบบป้อนกลับสามารถกล่าวได้ว่า ระบบควบคุมแบบป้อนกลับประกอบด้วยเส้นทางหรือวงรอบของสัญญาณป้อนกลับซึ่งเป็นสัญญาณเอาต์พุต ตั้งแต่หนึ่งวงรอบขึ้นไป แล้วนำสัญญาณป้อนกลับนี้มาเปรียบเทียบกับสัญญาณสั่งการหรือสัญญาณอ้างอิงจะได้ผลต่างระหว่างสัญญาณทั้งสองเป็น Error เพื่อนำไปควบคุมสัญญาณเอาต์พุตให้มีค่าตามที่กำหนดโดยสัญญาณอ้างอิง

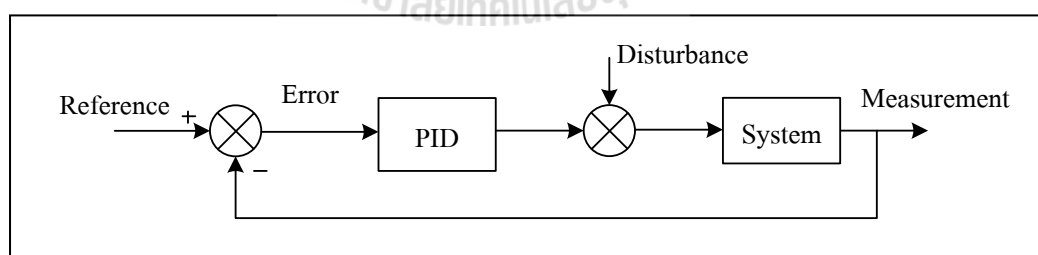


รูปที่ 2.8 ตัวควบคุมแบบพีไอดีที่ต่อเข้าควบคุมแบบอนุกรม

รูปที่ 2.8 แสดงแผนผังของระบบควบคุมแบบป้อนกลับ ระบบควบคุมนี้ประกอบด้วยส่วน Forward (Forward Path) ส่วนป้อนกลับ (Feedback Path) และส่วนตรวจจับค่าความคลาดเคลื่อน (Error – Sensing Device) ส่วนตรวจจับค่าความคลาดเคลื่อนนี้จะเปรียบเทียบค่าสัญญาณอินพุตอ้างอิงกับค่าสัญญาณเอาต์พุตจริง ๆ หรือค่าที่เป็นฟังก์ชันของสัญญาณเอาต์พุต แล้วส่งสัญญาณที่เกิดจากผลต่างของสัญญาณทั้งสองนี้ออกไป

2.7 คุณสมบัติของตัวควบคุม

ในระบบควบคุมมีตัวควบคุมหลายชนิด ตัวควบคุมส่วนใหญ่ที่ใช้ในการควบคุมกระบวนการ เป็นแบบพีไอดีโดยต่ออนุกรมกับระบบที่ต้องการควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 2.9 สัญญาณออกจากตัวควบคุมพีไอดีสามารถบรรยายได้ดังนี้



รูปที่ 2.9 ตัวควบคุมพีไอดีของระบบวงปิด

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2.10)$$

โดยที่ $u(t)$ คือสัญญาณควบคุม $e(t)$ คือค่าความคลาดเคลื่อนของสัญญาณออกจากค่ากำหนด ตัวควบคุมพีไอดีประกอบไปเทคนิคการควบคุมพื้นฐาน 3 แบบ แบบสัดส่วน (Proportional, P) แบบอินทิกรัล (Integral, I) และแบบอนุพันธ์ (Derivative, D) แต่ละแบบสามารถนำมาประกอบกันเพื่อให้ได้ตัวควบคุมที่ต้องการ ตัวควบคุมมีพารามิเตอร์ 3 ตัว คือ ค่าอัตราขยายแบบสัดส่วน (K_p) ค่า Integral Time (T_i) และ Derivative Time (T_d) ซึ่งรายละเอียดของแต่ละแบบมีดังนี้

2.7.1 การควบคุมแบบสัดส่วน

การควบคุมแบบสัดส่วนเป็นเทคนิคที่ง่ายที่สุด หลักการคือสัญญาณควบคุม $u(t)$ จากตัวควบคุมที่ส่งไปปรับกระบวนการมีค่าเป็นสัดส่วนกับความคลาดเคลื่อน ซึ่งสามารถเขียนได้ในรูป

$$u(t) = K_p e(t) \quad (2.11)$$

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

2.7.2 การควบคุมแบบอินทิกรัล

ผลตอบของการควบคุมแบบสัดส่วนรวมกับการควบคุมแบบอินทิกรัล สามารถอธิบายได้ในสมการ

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \right) \quad (2.12)$$

เมื่อ K_p คือค่าอัตราขยายและ $e(t)$ คือความคลาดเคลื่อน และ T_i คือ Integral Time (วินาที)

เมื่อเปรียบเทียบกับสมการของตัวควบคุมแบบสัดส่วน ความแตกต่างอยู่ตรงที่เทอมไบแอส นั่นคือตัวควบคุมแบบสัดส่วนถูกจำกัดด้วยส่วนไบแอสเป็นค่าคงที่ ส่วนการควบคุมแบบอินทิกรัล มีการสะสมความคลาดเคลื่อนในการปรับแต่งไบแอส (นั่นคือ ทำหน้าที่เป็นตัวอินทิกรัล) และจะหยุดสะสมเมื่อความคลาดเคลื่อนของระบบเป็นศูนย์ เมื่อผลตอบเข้าที่สมบูรณ์แล้ว เทอมไบแอสของระบบจะมีค่ามากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับลักษณะของการรบกวน (Disturbance)

การทำงานในลักษณะเช่นนี้มีลักษณะคล้ายกับฟังก์ชันรีเซตด้วยมือ (Manual – Reset Function) ดังนั้นในบางครั้งจึงเรียกตัวอินทิกรัลว่าฟังก์ชันรีเซต (Reset Function)

คุณสมบัติของตัวอินทิกรัลในการกำจัดความคลาดเคลื่อน (หรือออฟเซต) เป็นข้อดีอย่างมาก จึงเป็นที่นิยมใช้กับระบบควบคุมป้อนกลับ อย่างไรก็ตาม ตัวอินทิกรัลก็มีข้อเสีย นั่นคือทำให้เกิดการล่าช้า (Capacity – Like Lag) และทำให้ช่วงเวลาของการแกว่งยาวนานขึ้นโดยทั่วไป ระบบแบบสัดส่วนรวมกับอินทิกรัล จะมีช่วงเวลาของการแกว่งนานกว่าระบบเชิงสัดส่วนอย่างเดียว 50% หรือ $T_{PI} = 1.5T_P$ สำหรับระบบที่มีค่าคงตัวเวลา (Time Constant) น้อย (เช่น ระบบควบคุมอัตราการไหล) ปัญหาจะไม่มีผลมากนัก แต่สำหรับระบบที่มีค่าคงตัวเวลามาก (เช่น ระบบควบคุมระดับ) ปัญหานี้จะมีผลมาก จนทำให้ระบบเข้าสู่จุดวิกฤติที่ไม่สามารถยอมรับได้

การควบคุมแบบอินทิกรัล มีลักษณะเช่นเดียวกับการควบคุมสัดส่วนตรงผลกระทบของการเพิ่มอัตราขยายของตัวควบคุม หากอัตราขยายมีค่ามากเกินไปจะทำให้ผลตอบของระบบมีการแกว่ง โดยทั่วไป Integral Time ($T_i = 1/K_i$ sec โดยที่ $K_i = \text{repeats/sec}$) เป็นตัวแสดงว่าอัตราการตอบสนองของกระบวนการต่อสัญญาณการควบคุมค่า T_i ที่น้อยกว่า จะทำให้ตัวควบคุมมีการตอบสนองที่เร็วกว่าในระยะเริ่มต้น โดยที่ความคลาดเคลื่อนยังเป็นค่าบวกอยู่ ดังนั้นกว่าความคลาดเคลื่อนจะเป็นศูนย์ (ซึ่งทำให้เทอม $\int_0^e(t)dt$ หยุดทำงาน) เทอมไบแอสก็จะมีค่าสูงกว่าที่ต้องการ ดังนั้นผลตอบสนองจึงเกิดส่วนพุ่งเกิน (Overshoot) สูงกว่าค่ากำหนด เป็นผลให้ตัวอินทิกรัลทำหน้าที่ปรับให้ความคลาดเคลื่อนมีค่าลดลง การใช้ตัวอินทิกรัลในการควบคุมควรระวังในเรื่องของความคลาดเคลื่อนขนาดใหญ่ (เช่น เกิดการเปลี่ยนแปลงค่ากำหนดขนาดใหญ่) เพราะจะทำให้เกิดปัญหา Integral Windup ถึงแม้ว่า T_i มีค่าถูกต้องในสภาวะการทำงานธรรมดา แต่สัญญาณควบคุมอาจถึงจุดอิ่มตัวขณะผลตอบเกิดส่วนพุ่งเกิน

ข้อสรุปของตัวควบคุมอินทิกรัล

- ทำหน้าที่คล้ายกับรีเซตด้วยมือ (Manual Reset) เพื่อกำจัดความคลาดเคลื่อน
- มีปัญหาการล่าช้า ยังผลให้เกิดการหักล้างทางเวลาในตัวควบคุม จึงไม่เหมาะสมกับระบบที่มีค่าคงตัวเวลายาวนาน
- ทำให้ช่วงเวลาในการแกว่งยาวนานขึ้น

ในระบบควบคุม ค่าที่วัดได้และค่ากำหนดควรเป็นค่าเดียวกัน หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง ค่าความคลาดเคลื่อนในสภาวะอยู่ตัวควรเป็นศูนย์ ถ้ามีความคลาดเคลื่อนในสภาวะอยู่ตัว สัญญาณที่ออกจากอินทิเกรเตอร์ (เพิ่มขึ้น ด้วยอัตราคงที่ เมื่อสัญญาณเข้ามีค่าคงที่) ส่งต่อไปกับวงจรรขยาย ความคลาดเคลื่อนเป็นสัญญาณเข้าของตัวควบคุมทั้งสัดส่วนและอินทิกรัล โดยสัญญาณออกจะมารวมกันที่วงจรรขยายและส่งสัญญาณไปควบคุมระบบตัวควบคุมจะทำให้ค่าที่วัดได้ เพิ่มขึ้น

จนเท่ากับค่ากำหนด นั่นคือทำให้ความคลาดเคลื่อนในสภาวะอยู่ตัวเป็นศูนย์อย่างไรก็ตาม หาก T_i มีค่าน้อยลง ผลตอบอาจเกิดการแกว่งได้

2.7.3 การควบคุมแบบอนุพันธ์

ตัวควบคุมแบบสัดส่วนและแบบอินทิกรัล ต่างก็มีข้อจำกัดอยู่ที่ความคลาดเคลื่อนขนาดใหญ่ ซึ่งเป็นปัญหาต่อการควบคุมกระบวนการ แต่ความคลาดเคลื่อนขนาดใหญ่นี้ สามารถรู้ได้ล่วงหน้าโดยพิจารณาจากแนวโน้มของความคลาดเคลื่อนหรืออัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณนั่นเอง ตัวอนุพันธ์มีหลักการทำงาน คือ ตัวควบคุมตอบสนองต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของความคลาดเคลื่อนถึงแม้ว่าความคลาดเคลื่อนมียังค่าเล็กน้อย สัญญาณออกของตัวอนุพันธ์ไม่ได้สัมพันธ์กับขนาดของความคลาดเคลื่อนแต่ขึ้นอยู่กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของความคลาดเคลื่อน ถ้าความคลาดเคลื่อนมีค่าคงที่ ตัวอนุพันธ์จะให้สัญญาณออกเป็นศูนย์ คุณลักษณะข้อนี้มีผลคือ ตัวควบคุมจะมีผลตอบสนองที่เกิดก่อนที่ความคลาดเคลื่อนจะเพิ่มมากขึ้น และทำให้ระบบมีผลตอบสนองที่เร็วขึ้น ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์สามารถเขียนได้ดังนี้

$$u(t) = K_p \left(e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2.13)$$

โดยที่ Derivative Time (T_d) เป็นเวลาที่แสดงถึงผลตอบสนองเนื่องจากตัวอนุพันธ์ การเพิ่ม T_d จะทำให้ผลตอบสนองของตัวอนุพันธ์มีค่ามากขึ้น เนื่องจากตัวอนุพันธ์มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงมาก ดังนั้นจึงนิยมใช้กับค่าที่วัดได้เท่านั้น แต่ไม่ใช้กับค่ากำหนด เพราะการเปลี่ยนค่ากำหนดมักจะเป็นแบบขั้น (Step) ทำให้ผลตอบสนองของตัวอนุพันธ์เป็นพัลส์และทำให้เกิดการกระแทก (Bump) ของอุปกรณ์ในกระบวนการ สำหรับค่ากำหนดใช้เฉพาะกับตัวควบคุมสัดส่วนและอินทิกรัลตัวอนุพันธ์คือตัวควบคุมที่ก่อให้เกิดผลตรงข้ามกับตัวอินทิกรัล ดังนั้นจึงใช้ในการปรับปรุงกระบวนการที่มีการล่าช้าทางเวลา (Time Lag) มาก ๆ ทำให้ผลตอบสนองรวดเร็วขึ้น และช่วงเวลาการแกว่งที่สั้นลง ข้อเสียของตัวอนุพันธ์คือ มีความไวต่อสัญญาณรบกวนเป็นอย่างมาก เพราะมีผลตอบสนองโดยตรง ต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่วัดได้ ดังนั้นแม้สัญญาณรบกวนจะมีขนาดเล็ก แต่ก็อาจก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่อสัญญาณออกของตัวควบคุม จึงเป็นไปได้ที่จะใช้ตัวอนุพันธ์ในการควบคุมผลของสัญญาณรบกวน ยิ่งไปกว่านั้นระบบใดที่มีสัญญาณรบกวนมาก จะไม่สามารถใช้ตัวอนุพันธ์ในวงจรอุตสาหกรรมส่วนใหญ่นิยมใช้เพียงตัวควบคุม PI เท่านั้น

ข้อสรุปของตัวควบคุมอนุพันธ์

- เหมาะสำหรับกระบวนการที่ล่าช้าทางเวลามาก ทำให้การควบคุมถึงจุดที่ต้องการเร็วขึ้น
- ถ้า T_d มากเกินไป ผลของตัวอนุพันธ์จะทำให้ผลตอบสนองไวขึ้นจนกระทั่งระบบอาจขาดเสถียรภาพได้
- ไม่เหมาะกับระบบที่มีตัวแปรกระบวนการเปลี่ยนแปลงได้ง่าย หรือมีการล่าช้าทางเวลาน้อย เพราะจะทำให้ระบบขาดเสถียรภาพ
- ไม่ควรใช้กับระบบที่มีสัญญาณรบกวนมาก
- ใช้ชดเชยการล่าช้าที่เกิดจากตัวอินทิเกรตด้วยการนำหน้า (Lead) ในตัวอนุพันธ์

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าที่กำหนดทันที ความคลาดเคลื่อนจะมีค่าเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีและส่งผลกระทบต่อผลตอบสนองของระบบ ถ้านำอนุพันธ์ของความคลาดเคลื่อนนั้นคือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของความคลาดเคลื่อนแล้วไปรวมกับสัญญาณที่ได้จากตัวควบคุมแบบสัดส่วนและอินทิเกรเตอร์ จะทำให้การทำงานของระบบดีขึ้น การควบคุมเชิงอนุพันธ์ไม่มีผลต่อความคลาดเคลื่อนในสภาวะอยู่ตัว แต่จะลดช่วงเวลาเข้าที่ (Settling Time) โดยลดการแกว่งลง

2.8 ปรัชญาวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

Wang (2010) ได้เสนอวิธีการควบคุมอุณหภูมิ โดยใช้หลักการประมาณตัวแปรสัมประสิทธิ์ของตัวควบคุมแบบฟuzzyให้เหมาะสม โดยอ้างอิงข้อมูลจาก Finite Element ซึ่งการใช้การวิเคราะห์แบบ Finite Element เพื่อสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์มีความใกล้เคียงกับการทดลองและสามารถหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมฟuzzyได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Grefenstette (1986) ได้เสนอวิธีการควบคุมตัวแปรให้มีประสิทธิภาพของระบบที่มีความซับซ้อนโดยใช้การระบุเอกลักษณ์ของ Genetic Algorithm.

Ebert et al. (2010) ได้เสนอวิธีการควบคุมอุณหภูมิบนแผ่นความร้อน ใช้วิธีการควบคุมแบบฟuzzyในรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อให้ระบบมีการตอบสนองที่ไวขึ้นและมีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งเสนอให้ใช้งานกับระบบ Single – Input Single – Output (SISO) จึงจะได้การตอบสนองที่มีประสิทธิภาพ

Chen et al (2008) ได้ออกแบบครีบบระบายความร้อนของ CPU เพื่อให้มีการกระจายความร้อนที่ดีขึ้น ใช้หลักการทาง finite ในการวิเคราะห์การกระจายตัวของความร้อน

Hashida et al. (2007) ได้ศึกษาการควบคุมอุณหภูมิในกระบวนการความร้อนตามรูปแบบ Back-Box และเสนอวิธีการควบคุมตามรูปแบบความแตกต่างอุณหภูมิ (TDM)

Nerg et al. (1999) ได้สร้างแบบจำลองการออกแบบสำหรับการวิเคราะห์ระบบทำความร้อนเหนี่ยวนำแบบไดนามิก โดยใช้หลักการทาง (FEM) ในการวิเคราะห์ผลความร้อนของระบบเหนี่ยวนำความร้อน ซึ่งสามารถที่จะใช้งานได้จริงเพื่อนำไปออกแบบอุปกรณ์ของเครื่องทำความร้อนต่อไป

Ahmad and Omar (2005) เสนอการใช้พลังงานจากการเหนี่ยวนำความร้อนที่ต่ำ ใช้เทคนิคของเรโซแนนซ์ ได้พัฒนาการควบคุมโดยใช้หลักการการต่อพ่วงอุปกรณ์ PIC และ IGBT ซึ่งเป็นการเปลี่ยนอุปกรณ์ของระบบ ซึ่งประสิทธิภาพที่ได้นั้นสามารถสร้างความร้อนได้เร็วกว่าปกติและมีการสูญเสียพลังงานลดลง

จิระพล ศรีเสริฐผล และคณะ (2553) ได้เสนอวิธีการวิเคราะห์และออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอดีของเตาอบแบบหลอดอินฟราเรด โดยสร้างแบบจำลองกระบวนการเตาอบแบบหลอดอินฟราเรดในระบบปิด (Closed – Loop System) ตัวควบคุมแบบพีไอ ทำการประมาณค่าตัวแปรของระบบ (Parameter Estimation) โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ด้วยวิธี Least Square Error (LSE) และออกแบบตัวควบคุมพีไอโดยใช้วิธี Response Optimization มีการกำหนดรูปแบบการตอบสนองของสัญญาณเอาต์พุตให้เป็นไปตามเงื่อนไขที่ต้องการ

2.9 สรุป

จากงานวิจัยที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น ได้ศึกษาเกี่ยวกับหลักการทำงานของเครื่องอัดขึ้นผลิตภัณฑ์เมลามีน และการให้ความร้อนกับแม่พิมพ์ ซึ่งงานวิจัยที่เกี่ยวข้องนี้ได้วิเคราะห์หาโครงสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบต่างๆ เพื่อใช้ในการพิจารณาผลการตอบสนองของกระบวนการถ่ายโอนความร้อนของระบบ สำหรับงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิของกระบวนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมลามีนให้มีประสิทธิภาพเป็นไปตามความต้องการและประหยัดพลังงานได้

บทที่ 3

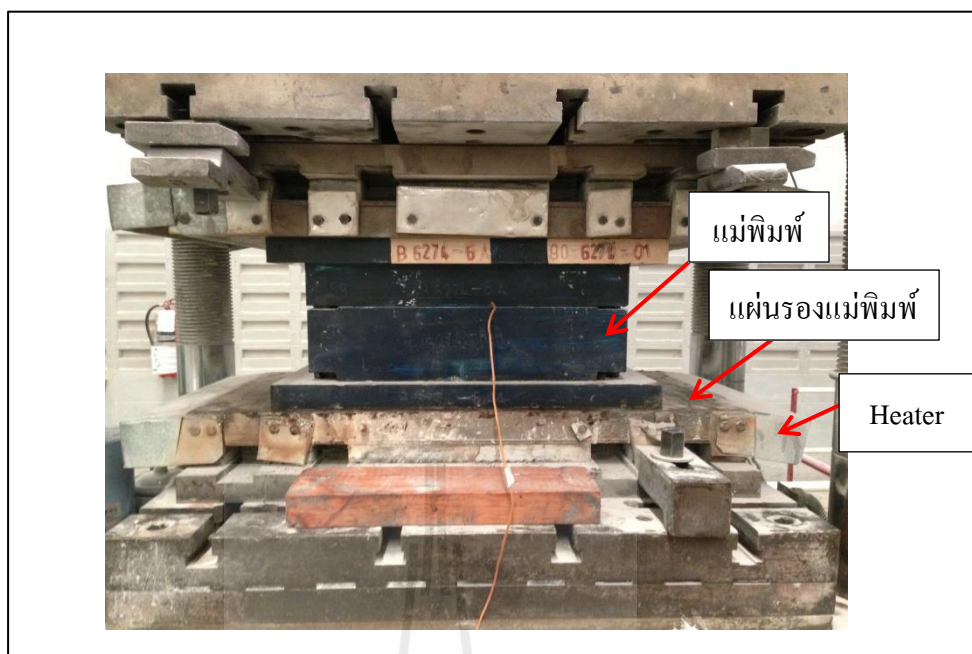
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในการวิเคราะห์ระบบหรือกระบวนการต่าง ๆ นั้นจำเป็นต้องทราบถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบนั้น การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบสามารถหาได้จากการวิเคราะห์โดยทฤษฎีหรือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้เคยมีการศึกษาซึ่งจะทำให้ได้แบบจำลองพื้นฐานของระบบ จากนั้นนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาวิเคราะห์เพื่อทำการทดลองจริง บนขอบเขตหรือข้อจำกัดของการทดลอง ในการทดลองมีตัวแปรที่มีผลกระทบแตกต่างกัน จากนั้นนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พื้นฐานที่ได้มาวิเคราะห์ว่ามีตัวแปรใดบ้างที่มีผลกระทบกับระบบแล้วทำการวิเคราะห์หาความเกี่ยวข้องกับแบบจำลองพื้นฐาน

การประมาณค่าตัวแปร (Parameter Estimation) เป็นวิธีช่วยในการทดสอบประมาณค่าตัวแปรของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบได้ โดยการวัดอินพุตและเอาต์พุตของระบบ แล้วนำข้อมูลเหล่านี้ไปวิเคราะห์หาค่าของตัวแปรที่สำคัญต่าง ๆ เพื่อใช้ในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบโดยระบบที่สนใจที่จะใช้ศึกษา คือ การควบคุมอุณหภูมิของกระบวนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมลามีน

3.1 การควบคุมอุณหภูมิของกระบวนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมลามีน

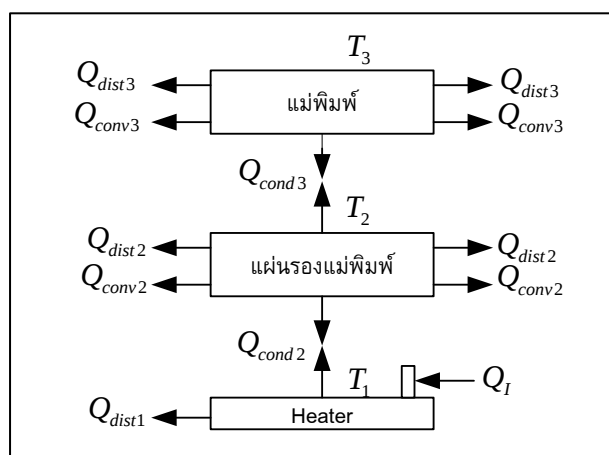
การควบคุมอุณหภูมิในกระบวนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมลามีน จะใช้ระบบควบคุมอุณหภูมิแบบปิดที่มีตัวควบคุมแบบพีไอดีผ่านรีเลย์แบบแม่เหล็ก เพื่อควบคุมอุณหภูมิของแม่พิมพ์ให้คงที่หรือเป็นกระบวนการอุ่นแม่พิมพ์ สำหรับส่วนที่จะศึกษาเพื่อประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ประกอบด้วย แม่พิมพ์ แผ่นรองแม่พิมพ์ และแผ่น Heater แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงลักษณะของเครื่องอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมลามีน

3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากการวิเคราะห์โดยทฤษฎี

การประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมลามีนได้พิจารณาจากโครงสร้างของเครื่องและลักษณะการถ่ายเทความร้อนของกระบวนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมลามีน แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อนของกระบวนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมลามีน

จากลักษณะการถ่ายเทความร้อนของกระบวนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมลามีนจะได้ลักษณะการตอบสนองของอุณหภูมิในแต่ละโซนออกเป็น 3 โซน คือ T_1 , T_2 , T_3 ซึ่งสามารถประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ภายใต้ข้อมูลที่สามารถวัดได้ เพื่อประยุกต์ใช้วิธีการระบุเอกลักษณ์แบบวงเปิดในการประมาณค่าตัวแปรของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อย่างง่าย ซึ่งสามารถนำไปออกแบบวิธีการควบคุมอุณหภูมิของระบบให้มีประสิทธิภาพในการทำงานได้

3.2.1 สมการการสมดุลทางความร้อน (Heat Balance Equation)

สมการการสมดุลทางความร้อนสำหรับกระบวนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมลามีนนั้นคืออัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในระบบ เท่ากับการถ่ายเทความร้อนสุทธิที่ไหลเข้าสู่เครื่อง แสดงดังสมการที่ (3.1)

$$C_i \frac{dT_i}{dt} = \sum (Q_{in} - Q_{out}) \quad (3.1)$$

โดยที่	C_i	คือ	ค่าความจุความร้อนของแต่ละโซน ($J / ^\circ C$)
	T_i	คือ	ค่าอุณหภูมิของแต่ละโซน ($^\circ C$)
	Q_{in}	คือ	อัตราการถ่ายเทความร้อนที่เข้าสู่ระบบ (W)
	Q_{out}	คือ	อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ออกจากระบบ (W)

3.2.2 อัตราการถ่ายเทความร้อน (Rate of Heat Transfer)

อัตราการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิสองจุด โดยในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาอัตราการถ่ายเทความร้อนแบบการนำความร้อนและการพาความร้อนเป็นส่วนหลักซึ่งได้สมการอัตราการถ่ายเทความร้อนแบบการนำความร้อน (Conduction Heat Transfer) แสดงดังสมการที่ (3.2)

$$Q_{cond} = kA \frac{\Delta T}{L} = \frac{1}{R_{cond}} \Delta T \quad (3.2)$$

โดยที่	Q_{cond}	คือ	อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน (W)
	k	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ($W / m^\circ C$)

R_{cond} คือ ค่าความต้านทานความร้อน ($W / ^\circ C$)

ΔT คือ ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ ($^\circ C$)

สมการอัตราการถ่ายเทความร้อนแบบการพาความร้อน (Convection Heat Transfer)
แสดงดังสมการที่ (3.3)

$$Q_{conv} = hA\Delta T = \frac{1}{R_{conv}} \Delta T \quad (3.3)$$

โดยที่ Q_{conv} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน (W)

h คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($W / m^2 ^\circ C$)

R_{conv} คือ ค่าความต้านทานความร้อน ($W / ^\circ C$)

ΔT คือ ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ ($^\circ C$)

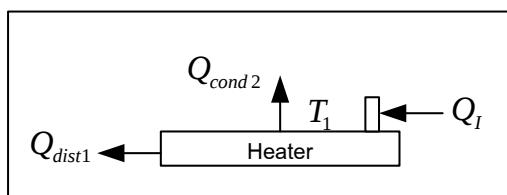
3.2.3 ค่าความต้านทานความร้อน (Thermal Resistance)

ค่าความต้านทานความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างการถ่ายเทความร้อนในแต่ละโซนนั้น
ขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในโซน ดังสมการที่ (3.4) และ (3.5)

$$R_{cond} = \frac{L}{kA} \quad (3.4)$$

และ $R_{conv} = \frac{1}{hA} \quad (3.5)$

● ระบบความร้อนในโซนที่ 1 ได้ทำการพิจารณาการถ่ายเทความร้อนระหว่าง
อุณหภูมิที่แตกต่างกันแสดงดังรูปที่ 3.3 โดยให้อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเท่ากับผลรวมของ
ความร้อนเข้าออกระบบดังสมการที่ (3.1)



รูปที่ 3.3 แสดงระบบการถ่ายเทความร้อนของโซนที่ 1

จะได้สมการควบคุมที่ (3.6)

$$C_1 \frac{dT_1}{dt} = Q_I - Q_{cond\ 2} - Q_{dist\ 1} \quad (3.6)$$

อัตราการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ระบบ โดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับแผ่น Heater ดังสมการที่ (3.7)

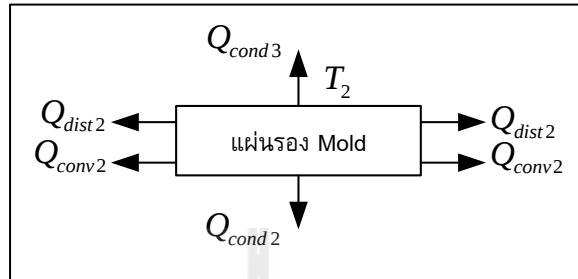
$$Q_I = I^2 RN \quad (3.7)$$

อัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างโซนที่ 1 กับ 2 จะได้ดังสมการที่ (3.8)

$$Q_{cond\ 2} = \frac{T_1 - T_2}{R_{cond\ 2}} \quad (3.8)$$

โดยที่	I	คือ	ค่ากระแสไฟฟ้า (A)
	R	คือ	ค่าความต้านทานไฟฟ้าของแผ่น Heater (Ω)
	N	คือ	จำนวนของแผ่น Heater
	C_1	คือ	ความจุความร้อนของแผ่น Heater ($J / ^\circ C$)
	Q_I	คือ	ค่าพลังงานไฟฟ้า (W)
	$Q_{cond\ 2}$	คือ	อัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างโซนที่ 1 กับ 2 (W)
	$R_{cond\ 2}$	คือ	ค่าความต้านทานความร้อนระหว่างโซนที่ 1 กับ 2 ($W / ^\circ C$)
	$Q_{dist\ 1}$	คือ	อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ถูกบริเวณของโซนที่ 1 (W)

- ระบบความร้อนในโซนที่ 2 ได้ทำการพิจารณาการถ่ายเทความร้อนระหว่างอุณหภูมิที่แตกต่างกันแสดงดังรูปที่ 3.4 โดยให้อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเท่ากับผลรวมของความร้อนเข้าออกระบบดังสมการที่ (3.1)



รูปที่ 3.4 แสดงระบบการถ่ายเทความร้อนของโซนที่ 2

จะได้สมการควบคุมที่ (3.9)

$$C_2 \frac{dT_2}{dt} = -Q_{cond2} - Q_{conv2} - Q_{cond3} - Q_{dist2} \quad (3.9)$$

อัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างโซนที่ 2 กับ 1 จะได้ดังสมการที่ (3.10)

$$Q_{cond2} = \frac{T_2 - T_1}{R_{cond2}} \quad (3.10)$$

อัตราการถ่ายเทความร้อนสู่ภายนอกแบบการพาความร้อนดังสมการที่ (3.11)

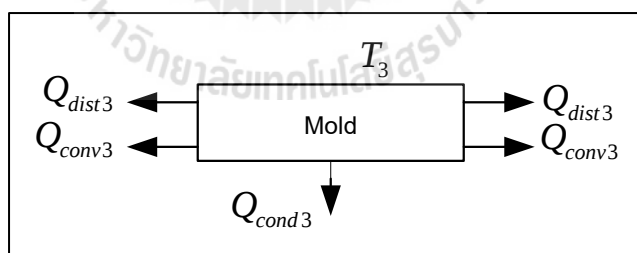
$$Q_{conv2} = \frac{T_2 - T_{air}}{R_{conv2}} \quad (3.11)$$

อัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างโซนที่ 2 กับ 3 จะได้ดังสมการที่ (3.12)

$$Q_{cond3} = \frac{T_2 - T_3}{R_{cond3}} \quad (3.12)$$

โดยที่	C_2	คือ	ความจุความร้อนของแผ่นรองแม่พิมพ์ ($J / ^\circ C$)
	Q_{cond2}	คือ	อัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างโซนที่ 2 กับ 1 (W)
	R_{cond2}	คือ	ค่าความต้านทานความร้อนระหว่างโซนที่ 2 กับ 1 ($W / ^\circ C$)
	Q_{conv2}	คือ	อัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างโซนที่ 2 กับ สิ่งแวดล้อม (W)
	R_{conv2}	คือ	ค่าความต้านทานความร้อนระหว่างโซนที่ 2 กับ สิ่งแวดล้อม ($W / ^\circ C$)
	Q_{cond3}	คือ	อัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างโซนที่ 2 กับ 3 (W)
	R_{cond3}	คือ	ค่าความต้านทานความร้อนระหว่างโซนที่ 2 กับ 3 ($W / ^\circ C$)
	Q_{dist2}	คือ	อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ถูกกวนของโซนที่ 2 (W)

● ระบบความร้อนในโซนที่ 3 ได้ทำการพิจารณาการถ่ายเทความร้อนระหว่างอุณหภูมิที่แตกต่างกันแสดงดังรูปที่ 3.5 โดยให้อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเท่ากับผลรวมของความร้อนเข้าออกระบบดังสมการที่ (3.1)



รูปที่ 3.5 แสดงระบบการถ่ายเทความร้อนของโซนที่ 3

จะได้สมการควบคุมที่ (3.13)

$$C_3 \frac{dT_3}{dt} = -Q_{cond3} - Q_{conv3} - Q_{dist3} \quad (3.13)$$

อัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างโซนที่ 3 กับ 2 จะได้สมการที่ (3.14)

$$Q_{cond3} = \frac{T_3 - T_2}{R_{cond3}} \quad (3.14)$$

อัตราการถ่ายเทความร้อนสู่ภายนอกแบบการพาความร้อนดังสมการที่ (3.15)

$$Q_{conv3} = \frac{T_3 - T_{air}}{R_{conv3}} \quad (3.15)$$

โดยที่	C_3	คือ	ความจุความร้อนของแม่พิมพ์ ($J / ^\circ C$)
	Q_{cond3}	คือ	อัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างโซนที่ 3 กับ 2 (W)
	R_{cond3}	คือ	ค่าความต้านทานความร้อนระหว่างโซนที่ 3 กับ 2 ($W / ^\circ C$)
	Q_{conv3}	คือ	อัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างโซนที่ 3 กับ สิ่งแวดล้อม (W)
	R_{conv3}	คือ	ค่าความต้านทานความร้อนระหว่างโซนที่ 3 กับ สิ่งแวดล้อม ($W / ^\circ C$)
	Q_{dist3}	คือ	อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ถูกรบกวนของโซนที่ 3 (W)

จากสมการที่ (3.7) และ (3.8) แทนค่าในสมการที่ (3.6) จะได้สมการที่ (3.16)

$$C_1 \frac{dT_1}{dt} = I^2 RN - \frac{(T_1 - T_2)}{R_{cond2}} - Q_{dist1} \quad (3.16)$$

จากสมการที่ (3.10), (3.11) และ (3.12) แทนค่าในสมการที่ (3.9) จะได้ดังสมการที่ (3.17)

$$C_2 \frac{dT_2}{dt} = -\frac{(T_2 - T_1)}{R_{cond2}} - \frac{(T_2 - T_{air})}{R_{conv2}} - \frac{(T_2 - T_3)}{R_{cond3}} - Q_{dist2} \quad (3.17)$$

จากสมการที่ (3.14) และ (3.15) แทนค่าในสมการที่ (3.13) จะได้ดังสมการที่ (3.18)

$$C_3 \frac{dT_3}{dt} = -\frac{(T_3 - T_2)}{R_{cond3}} - \frac{(T_3 - T_{air})}{R_{conv3}} - Q_{dist3} \quad (3.18)$$

จากสมการที่ (3.16), (3.17) และ (3.18) สามารถจัดรูปสมการให้อยู่ในเทอมการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ตำแหน่ง T_1 , T_2 และ T_3 ได้ดังนี้

$$C_1 \dot{T}_1 = I^2 RN - \frac{(T_1 - T_2)}{R_{cond2}} - Q_{dist1} \quad (3.19)$$

$$C_2 \dot{T}_2 = -\frac{(T_2 - T_1)}{R_{cond2}} - \frac{(T_2 - T_{air})}{R_{conv2}} - \frac{(T_2 - T_3)}{R_{cond3}} - Q_{dist2} \quad (3.20)$$

$$C_3 \dot{T}_3 = -\frac{(T_3 - T_2)}{R_{cond3}} - \frac{(T_3 - T_{air})}{R_{conv3}} - Q_{dist3} \quad (3.21)$$

3.3 แบบจำลองตัวแปรสแตต (State Variable Models)

แบบจำลองตัวแปรสแตตมีรูปลักษณะเป็นสมการอนุพันธ์สามัญอันดับหนึ่งซึ่งเอื้อประโยชน์ต่อการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ สำหรับตัวแปร $x(t)$ แบบตัวแปรเดียวมีรูปแบบดังสมการที่ (3.22)

$$\frac{d}{dt} x(t) = ax(t) + bu(t) \quad (3.22)$$

ในกรณีหลายตัวแปรสามารถแสดงสมการสเตต (State Equation) ได้ดังสมการที่ (3.23)

$$\frac{d}{dt}x = Ax + Bu \quad (3.23)$$

โดยที่ x คือ ตัวแปรสเตตของระบบ
 u คือ อินพุตของระบบ

รวมทั้งสมการเอาต์พุต (Output Equation) แบบตัวแปรเดียวมีรูปแบบดังสมการที่ (3.24)

$$y(t) = cx(t) + du(t) \quad (3.24)$$

ในกรณีหลายตัวแปรสามารถเขียนแสดง ดังสมการที่ (3.25)

$$y = Cx + Du \quad (3.25)$$

แบบจำลองตัวแปรสเตตที่สมบูรณ์จะประกอบด้วยอินพุตและเอาต์พุตที่เหมาะสม ในงานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์หาแบบจำลองโดยกำหนดให้อินพุตของระบบคือค่ากระแสไฟฟ้า และ เอาต์พุตของระบบคืออุณหภูมิในแต่ละโซน จากสมการที่ (3.19), (3.20) และ (3.21) สามารถจัดให้อยู่ในรูปของสมการสเตตได้ดังสมการที่ (3.26) และสมการเอาต์พุตดังสมการที่ (3.27)

$$\begin{bmatrix} C_1 \dot{T}_1 \\ C_2 \dot{T}_2 \\ C_3 \dot{T}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{R_{cond2}} & \frac{1}{R_{cond2}} & 0 \\ \frac{1}{R_{cond2}} & -\left(\frac{1}{R_{cond2}} + \frac{1}{R_{conv2}} + \frac{1}{R_{cond3}}\right) & \frac{1}{R_{cond3}} \\ 0 & \frac{1}{R_{cond3}} & -\left(\frac{1}{R_{cond3}} + \frac{1}{R_{conv3}}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

$$+ \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{R_{conv2}} \\ \frac{1}{R_{conv3}} \end{bmatrix} T_{air} + \begin{bmatrix} Q_I \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_{dist1} \\ Q_{dist2} \\ Q_{dist3} \end{bmatrix}$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

จากสมการที่ (3.26) สามารถแทนตัวแปรอย่างง่ายได้ดังสมการที่ (3.28)

$$\begin{bmatrix} C_1 \dot{T}_1 \\ C_2 \dot{T}_2 \\ C_3 \dot{T}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a & a & 0 \\ a & -(a+b+c) & c \\ 0 & c & -(c+d) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ b \\ d \end{bmatrix} T_{air} + \begin{bmatrix} Q_I \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_{dist1} \\ Q_{dist2} \\ Q_{dist3} \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

โดยที่	a	คือ	$\frac{1}{R_{cond2}}$
	b	คือ	$\frac{1}{R_{conv2}}$
	c	คือ	$\frac{1}{R_{cond3}}$
	d	คือ	$\frac{1}{R_{conv3}}$

3.4 สรุป

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมลามีนของบริษัท ศรีไทยซูเปอร์แวร์ จำกัด (มหาชน) เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยประมาณที่สร้างขึ้นภายใต้ ข้อมูลและอุปกรณ์เครื่องมือวัดได้แก่อินพุตคือค่ากระแสไฟฟ้าและเอาต์พุตคืออุณหภูมิในโซนที่ 2 และ 3 เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ โดยวิธีการระบุเอกลักษณ์ของแบบจำลอง ทางคณิตศาสตร์ ซึ่งจะกล่าวในบทถัดไป รวมทั้งการออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิแบบพีไอดี และการจำลองสถานการณ์การทำงานของตัวควบคุมที่ได้จากการออกแบบในส่วนของการ อุ่นแม่พิมพ์



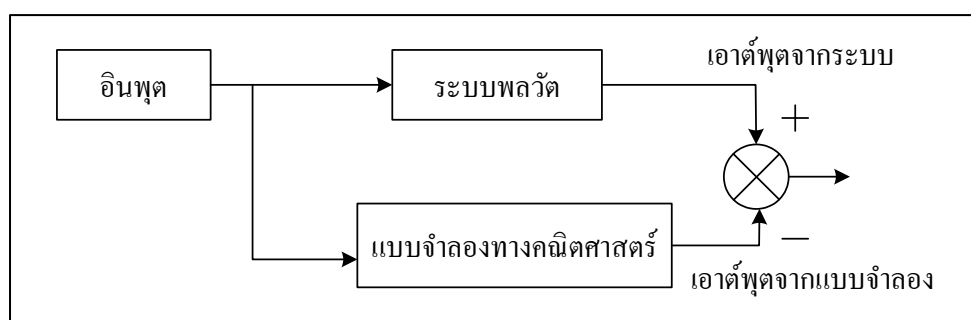
บทที่ 4

การระบุเอกลักษณ์และการออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิ

ในการระบุเอกลักษณ์ของระบบนั้นใช้วิธีการประมาณค่าโดยวิธีผลต่างกำลังสองน้อยที่สุดเป็นตัวบ่งชี้ค่าความเหมาะสมของค่าตัวแปรโดยจินเนติกอัลกอริทึมในการค้นหาค่าตัวแปรโดยประมาณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับกระบวนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมลามีน ซึ่งเป็นระบบพลวัตแบบวงเปิดโดยอาศัยการประมาณค่าตัวแปรที่เหมาะสมที่สุด รวมทั้งการเก็บค่าข้อมูลทั้งอินพุตและเอาต์พุตเพื่อวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีพฤติกรรมการตอบสนองที่สอดคล้องกันกับข้อมูลการทดลอง เพื่อนำแบบจำลองที่ได้ไปออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิต่อไป

4.1 การระบุเอกลักษณ์ของระบบพลวัตแบบวงเปิด

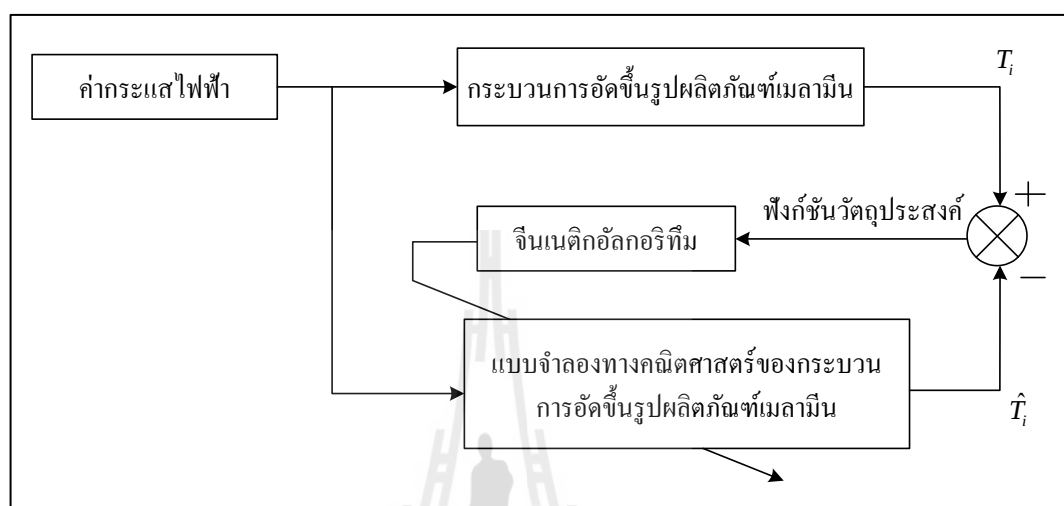
การระบุเอกลักษณ์ระบบพลวัตได้มีการศึกษาวิจัยมาอย่างช้านาน และแตกแขนงออกไปอย่างกว้างขวาง โดยเริ่มต้นศึกษาจากตำราการระบุเอกลักษณ์ระบบพื้นฐาน ซึ่งกล่าวถึงการระบุเอกลักษณ์ระบบพลวัตด้วยวิธีการดั้งเดิมว่าจำเป็นต้องอาศัยข้อมูลเกี่ยวกับอินพุตและเอาต์พุตของระบบจากการทดลองและการตรวจวัดอย่างเหมาะสม โดยการคำนวณหาค่าตัวแปรของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่อาศัยการคำนวณเชิงตัวเลขแบบกำลังสองน้อยที่สุด (Least Squares) เป็นดัชนีบ่งชี้คุณภาพของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ค่าคลาดเคลื่อนระหว่างค่าเอาต์พุตจริงที่ได้จากข้อมูลการทดลองและค่าเอาต์พุตที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงการระบุเอกลักษณ์แบบวงเปิด

4.2 การระบุเอกลักษณ์ของระบบพลวัตแบบวงเปิดโดยวิธีปัญญาประดิษฐ์

การระบุเอกลักษณ์ระบบพลวัตแบบวงเปิด ในงานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้การค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึมเพื่อค้นหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงการระบุเอกลักษณ์โดยวิธีปัญญาประดิษฐ์

การค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึมเป็นวิธีการค้นหาทางประติมากรรมที่ทรงประสิทธิภาพวิธีหนึ่ง ซึ่งได้รับการพัฒนามาจากหลักการคัดเลือกแบบธรรมชาติและหลักการทางสายพันธุ์จินเนติกอัลกอริทึม (GA) เป็นการคำนวณอย่างหนึ่งที่สามารถกล่าวได้ว่าได้รับการจัดให้เป็นวิธีหนึ่งในกลุ่มของการคำนวณเชิงวิวัฒนาการ (Evolutionary Computing) ซึ่งปัจจุบันเป็นที่ยอมรับในประสิทธิภาพและมีการนำไปประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในการแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยข้อมูลที่ใช้ในการระบุเอกลักษณ์ของระบบนั้นใช้ข้อมูลของค่าพลังงานไฟฟ้าเป็นอินพุตให้กับระบบ ซึ่งการตอบสนองของระบบนั้นจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับชุดข้อมูลอุณหภูมิในแต่ละโซนการทำงาน ซึ่งในขั้นตอนของการระบุเอกลักษณ์นั้นจะทำการกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของโปรแกรมจินเนติกอัลกอริทึม (GA) คือ ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิจากแบบจำลองและข้อมูลอุณหภูมิในแต่ละโซนจากการทดลอง ซึ่งตัว GA จะทำหน้าที่ปรับค่าพารามิเตอร์ของระบบจนกว่าค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิจะลดลงน้อยที่สุดเพื่อให้ค่าพารามิเตอร์ที่ประมาณนั้นทำให้แบบจำลองมีการตอบสนองที่สอดคล้องกับข้อมูลอุณหภูมิของเครื่องอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมลามีนที่สุด

4.3 การระบุเอกลักษณ์ของกระบวนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมลามีน

ในการระบุเอกลักษณ์ของกระบวนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมลามีนนั้น ในส่วนของข้อมูลที่น่ามาทำการระบุเอกลักษณ์ได้จากการเก็บค่ากระแสไฟฟ้า และค่าอุณหภูมิ ซึ่งจะเก็บผลการทดลองแบบวงเปิดโดยใช้การเปิดปิดรีเลย์แบบแม่เหล็กเพื่อตัดต่อกระแสไฟฟ้าที่ได้จ่ายให้กับแผ่น Heater แทนตัวควบคุม และในการระบุเอกลักษณ์ของกระบวนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมลามีนใช้สมการควบคุมของบตที่ 3 ดังนี้

สมการควบคุมโซน 1

$$C_1 \frac{dT_1}{dt} = Q_I - Q_{cond 2} - Q_{dist1} \quad (4.1)$$

$$C_1 \frac{dT_1}{dt} = I^2 RN - \frac{(T_1 - T_2)}{R_{cond 2}} - Q_{dist1} \quad (4.2)$$

สมการควบคุมโซน 2

$$C_2 \frac{dT_2}{dt} = -Q_{cond 2} - Q_{conv2} - Q_{cond 3} - Q_{dist 2} \quad (4.3)$$

$$C_2 \frac{dT_2}{dt} = -\frac{(T_2 - T_1)}{R_{cond 2}} - \frac{(T_2 - T_{air})}{R_{conv2}} - \frac{(T_2 - T_3)}{R_{cond 3}} - Q_{dist 2} \quad (4.4)$$

สมการควบคุมโซน 3

$$C_3 \frac{dT_3}{dt} = -Q_{cond 3} - Q_{conv3} - (Q_{dist3}) \quad (4.5)$$

$$C_3 \frac{dT_3}{dt} = -\frac{(T_3 - T_2)}{R_{cond 3}} - \frac{(T_3 - T_{air})}{R_{conv3}} - (Q_{dist3}) \quad (4.6)$$

โดยกำหนดให้

$$a = \frac{1}{R_{cond2}}, b = \frac{1}{R_{conv2}}, c = \frac{1}{R_{cond3}}, d = \frac{1}{R_{conv3}}$$

โดยตัวแปรที่ต้องการประมาณค่า $C_1, C_2, C_3, a, b, c, d, Q_{dist1}, Q_{dist2}, Q_{dist3}$ ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ของสมการในระบบ และกำหนดตัวแปรเพิ่มสำหรับการระบุเอกลักษณ์แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 กำหนดตัวแปรสำหรับการระบุเอกลักษณ์

ค่าตัวแปรต่างๆ										
พารามิเตอร์	a	C_1	b	C_2	Q_{dist1}	Q_{dist2}	c	d	Q_{dist3}	C_3
ตัวแปร	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}

ในการระบุเอกลักษณ์ค่าตัวแปรต่าง ๆ นั้นเพื่อให้ค่าที่ได้ใกล้เคียงกับระบบของกระบวนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมลามีนนั้นจะต้องมีการกำหนดขอบเขตความเป็นไปได้ของค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่สามารถคำนวณเชิงทฤษฎีได้เช่น ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน และค่าความจุความร้อนเป็นต้น แต่เนื่องจากไม่สามารถใช้ค่าที่ได้จากการคำนวณได้ เพราะเครื่องอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมลามีนมีอายุการใช้งานมาเป็นระยะเวลานาน จึงทำให้ส่วนประกอบต่าง ๆ ของเครื่องเปลี่ยนสภาพไปตามเวลา ส่งผลให้ค่าคุณสมบัติต่าง ๆ เปลี่ยนแปลงไปด้วย เมื่อทราบขอบเขตของตัวแปรบางตัวที่สามารถระบุค่าขอบเขตเหล่านั้นที่ทราบค่าเพื่อนำไปใส่ในโปรแกรมจินเนติกอัลกอริทึมให้โปรแกรมทำการค้นหาค่าตัวแปรที่เหมาะสม ซึ่งได้กำหนดขอบเขตของตัวแปรต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 4.2 และมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ทราบค่าดังนี้ $R = 45 \Omega$, $T_{air} = 32^\circ C$ และ $N = 3$

ตารางที่ 4.2 ขอบเขตของค่าตัวแปรในโปรแกรมจินเนติกอัลกอริทึม

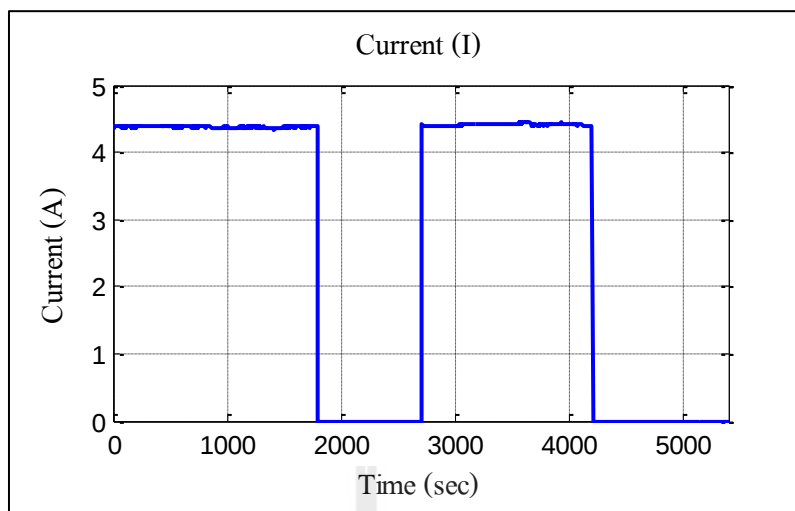
พารามิเตอร์	ตัวแปร	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด
a	X_1	20	30
C_1	X_2	780	850
b	X_3	5	10
C_2	X_4	40,000	42,000
Q_{dist1}	X_5	0	0.01
Q_{dist2}	X_6	0	0.01
c	X_7	30	50
d	X_8	0	1
Q_{dist3}	X_9	0	0.01
C_3	X_{10}	50,000	53,000

ในส่วนของโปรแกรมจินเนติกอัลกอริทึม (Genetic Program) ซึ่งต้องมีการเซตค่าให้กับโปรแกรม แสดงดังตารางที่ 4.3 สำหรับการใช้งานโปรแกรมจินเนติกอัลกอริทึม แสดงไว้ในภาคผนวก ข.

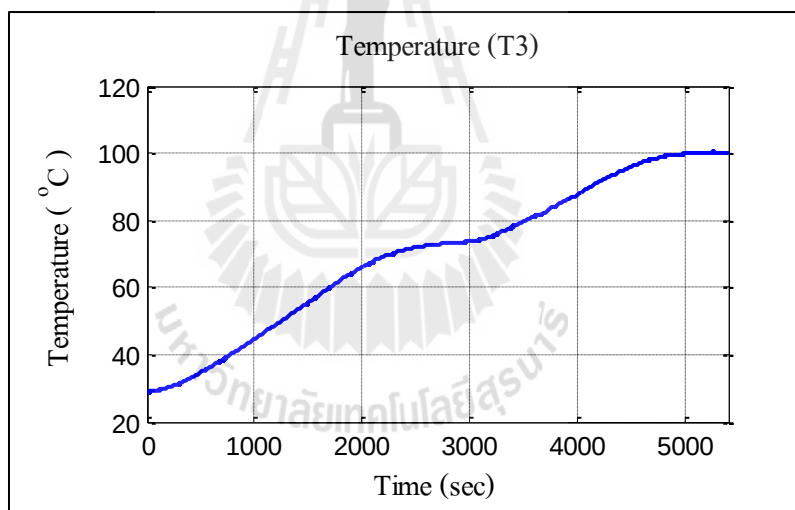
ตารางที่ 4.3 การตั้งค่าในโปรแกรมจินเนติกอัลกอริทึม

จินเนติกอัลกอริทึม	พารามิเตอร์ Toolbox
Population	100
Generation	3000
Stall Gen.	inf
Fitness Func.	error

ในการทดลองจะให้อินพุตของระบบเป็นค่ากระแสไฟฟ้า ซึ่งลักษณะการให้อินพุตกับระบบนั้นจะเป็นลักษณะการเปิดปิดรีเลย์แบบแม่เหล็กเพื่อตัดต่อการจ่ายกระแสให้กับแผ่น Heater ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.3 และเอาต์พุตคือ ค่าอุณหภูมิของระบบแสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.3 แสดงผลการตอบสนองของค่ากระแสไฟฟ้าของระบบ

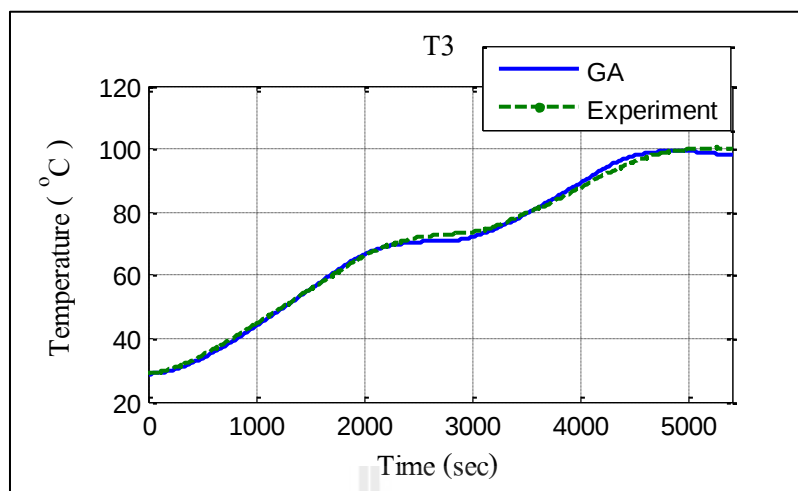


รูปที่ 4.4 แสดงผลการตอบสนองของอุณหภูมิ T3 ของระบบ

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการประมาณค่า

พารามิเตอร์	GA1	GA2	GA3	ค่าเฉลี่ย
a	24.000	24.001	24.000	24.000
b	9.000	9.002	9.001	9.001
c	43.945	43.950	43.943	43.946
d	0.447	0.450	0.449	0.449
C_1	799.995	799.987	799.999	799.994
C_2	41,000.376	41,000.372	41,000.350	41,000.366
C_3	52,250.181	52,250.175	52,249.005	52,249.787
Q_{dist1}	0.00024	0.00031	0.00027	0.00027
Q_{dist2}	0.00275	0.00268	0.00273	0.00272
Q_{dist3}	0.00011	0.00013	0.00012	0.00012

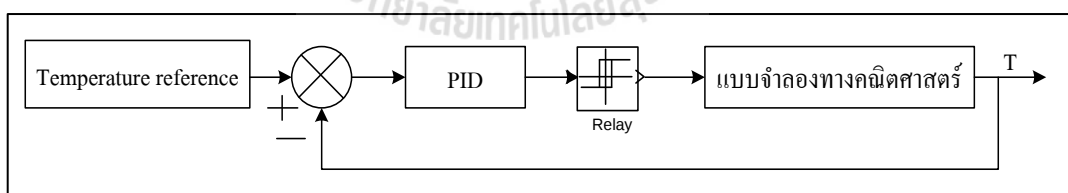
เมื่อนำค่าเฉลี่ยที่ได้จากตารางที่ 4.4 แทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อดูผลการตอบสนองของแบบจำลองเทียบกับผลการทดลองจริง โดยใช้ค่าอินพุตที่ได้จากการทดลอง แสดงดังรูปที่ 4.3 เป็นอินพุตให้กับแบบจำลอง ผลการตอบสนองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.5 จะเห็นว่าผลการตอบสนองมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน มีค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างแบบจำลองกับการทดลองประมาณ 1.41 % แสดงให้เห็นว่าค่าพารามิเตอร์ที่ได้นั้นสามารถทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความถูกต้องสมบูรณ์ในระดับหนึ่งและนำไปประยุกต์ใช้งานได้



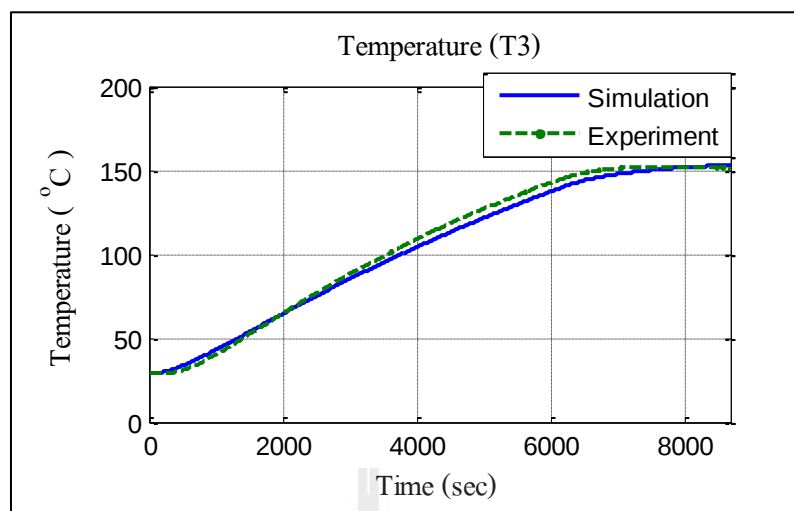
รูปที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบผลการตอบสนองของอุณหภูมิ T3

4.4 การจำลองระบบแบบวงปิด

จากการประมาณแบบจำลองแบบวงเปิดในส่วนของการควบคุมการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมลามีน ซึ่งหลักการทำงานของเครื่องจะมีการควบคุมแบบปิดที่มีตัวควบคุมแบบพีไอดีผ่านรีเลย์แบบแม่เหล็ก โดยมีการวัดอุณหภูมิย้อนกลับที่ตำแหน่งอุณหภูมิที่แผ่นรองแม่พิมพ์ เพื่อเช็คความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบวงเปิดดังนั้นจึงได้ทำการจำลองระบบแบบวงปิดของแบบจำลองที่ได้ แสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 แสดงหลักการทำงานของระบบวงปิด

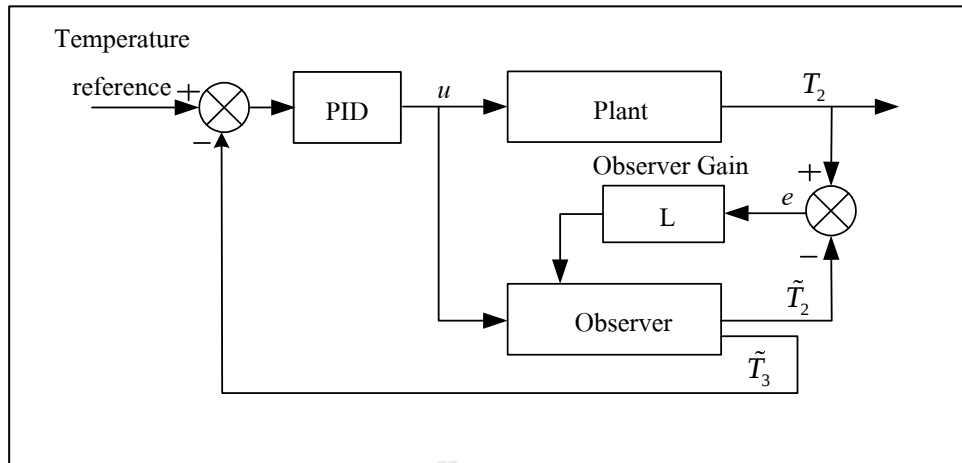


รูปที่ 4.7 แสดงการเปรียบเทียบผลการตอบสนองของอุณหภูมิ T3
ของระบบจำลองแบบวงปิดกับการทดลอง

ผลการตอบสนองของอุณหภูมิ T3 ของแบบจำลองเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ดังแสดง
ดังรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าผลการตอบสนองมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน แสดงให้เห็นว่า
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์แบบวงเปิดนั้นมีความถูกต้องมากในระดับ
หนึ่ง ซึ่งสามารถนำแบบจำลองที่ได้ไปประยุกต์ใช้เพื่อจะทำการออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิ
ต่อไปได้

4.5 การออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิ

จากการศึกษาระบบการทำงานของเครื่องมีระบบควบคุมอุณหภูมิที่แผ่นรองแม่พิมพ์ ซึ่งเป็น
เป็นระบบควบคุมแบบปิดที่มีตัวควบคุมแบบพีไอดีผ่านรีเลย์แบบแม่เหล็กทำหน้าที่ควบคุมการจ่าย
กระแสไฟฟ้าให้กับแผ่น Heater เนื่องจากลักษณะการควบคุมมีผลต่อประสิทธิภาพของอุณหภูมิที่
แม่พิมพ์ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตชิ้นงาน ดังนั้นจึงได้ทำการออกแบบตัวควบคุมใหม่เป็น
แบบพีไอดีโดยจะควบคุมอุณหภูมิที่แม่พิมพ์โดยตรง ซึ่งอุณหภูมิที่แม่พิมพ์ไม่สามารถวัดได้จริง
ในทางปฏิบัติ ดังนั้นได้ออกแบบการประมาณค่าสเตตแบบอันดับเต็มเพื่อใช้ค่าตัวแปรสเตตคือ
อุณหภูมิ T3 ที่ได้จากการประมาณเป็นค่าป้อนกลับให้กับระบบควบคุม แสดงหลักการทำงานดังรูป
ที่ 4.8



รูปที่ 4.8 แสดงแผนภาพการออกแบบระบบควบคุม

4.5.1 การออกแบบตัวสังเกต

ระบบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่จะทำการควบคุมมีรูปแบบดังนี้

$$\begin{aligned}
 \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} C_1 T_1 \\ C_2 T_2 \\ C_3 T_3 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -a & a & 0 \\ a & -(a+b+c) & c \\ 0 & c & -(c+d) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ b \\ d \end{bmatrix} T_{air} \\
 &+ \begin{bmatrix} RN \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} I^2 - \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_{dist1} \\ Q_{dist2} \\ Q_{dist3} \end{bmatrix} \\
 y &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{4.7}$$

สมการของตัวสังเกตอันดับเต็มในรูปแบบของ State Space Form

$$\begin{aligned}
 \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} C_1 \hat{T}_1 \\ C_2 \hat{T}_2 \\ C_3 \hat{T}_3 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -a & a & 0 \\ a & -(a+b+c) & c \\ 0 & c & -(c+d) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{T}_1 \\ \hat{T}_2 \\ \hat{T}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ b \\ d \end{bmatrix} T_{air} \\
 &+ \begin{bmatrix} RN \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} I^2 - \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_{dist1} \\ Q_{dist2} \\ Q_{dist3} \end{bmatrix} \\
 y &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{T}_1 \\ \hat{T}_2 \\ \hat{T}_3 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{4.8}$$

พิจารณาแบบจำลองของกระบวนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมลามีนในรูปแบบของ State Space Form เพื่อออกแบบตัวสังเกตอันดับเต็มมีรูปแบบดังนี้

$$\begin{aligned}
 \dot{\hat{x}} &= A\hat{x} + Bu + Dw + L(T - \hat{T}) \\
 y &= C\hat{x}
 \end{aligned} \tag{4.9}$$

จากการระบุเอกลักษณ์ของระบบ จะได้ค่าตัวแปรต่าง ๆ คือ

$$\begin{aligned}
 a &= 24, \quad b = 9.001, \quad c = 43.946, \quad d = 0.449, \quad C_1 = 799.994, \quad C_2 = 41,000.366 \\
 C_3 &= 52,249.787, \quad Q_{dist1} = 0.00027, \quad Q_{dist2} = 0.00272, \quad Q_{dist3} = 0.00012
 \end{aligned}$$

เมื่อแทนค่าตัวแปรในสมการของระบบสมการ (4.7) จะได้

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -0.03 & 0.03 & 0 \\ 0.000585 & -0.001880 & 0.001070 \\ 0 & 0.000841 & -0.000849 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0.000219 \\ 0.000009 \end{bmatrix} T_{air} \\
&+ \begin{bmatrix} 0.16875 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} I^2 - \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.00027 \\ 0.00272 \\ 0.00012 \end{bmatrix} \\
y &= [0 \quad 1 \quad 0] \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{4.10}$$

การออกแบบตัวสังเกตสำหรับประมาณค่าตัวแปรสเตตของระบบใด ๆ ต้องพิจารณาคุณสมบัติในการสังเกตได้ของระบบ และคุณสมบัติในการควบคุมเพื่อให้ได้ค่าตัวแปรสเตตในการออกแบบระบบควบคุมต่อไป พิจารณาคุณสมบัติในการควบคุมได้ของระบบดังนี้

$$\text{observability matrix} = P = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \end{bmatrix} \tag{4.11}$$

ระบบมีคุณสมบัติในการควบคุมได้ และมีคุณสมบัติความสังเกตได้ของระบบก็ต่อเมื่อค่าลำดับชั้น (Rank) มีค่าเท่ากับอันดับของระบบหรือเมทริกซ์ A ของระบบที่ต้องการความสังเกตคือ

$$\text{rank}(P) = 3$$

การออกแบบ observer Poles จะกำหนดค่า $\zeta = 0.7$ คืออัตราส่วนความหน่วงของตัวสังเกต และคำนวณหา ω_n คือค่าความถี่ธรรมชาติของตัวสังเกต โดยกำหนดเวลาเข้าที่ (setting Time) ของระบบ $t_s = 6,600 \text{ sec}$ ที่ 2% Error จะได้ตำแหน่งโพล S_1 และ S_2 ดังสมการ

$$\begin{aligned}
S_{1,2} &= -\zeta\omega_n \pm \omega_n\sqrt{1-\zeta^2} \\
S_{1,2} &= -0.00061 \pm 0.00062i
\end{aligned} \tag{4.12}$$

ส่วนตำแหน่งโพล S_3 จะกำหนดเป็น 10 เท่าของตำแหน่งโพล S_1 และ S_2 บนแกนจริงได้ดังนี้

$$S_3 = -0.0061$$

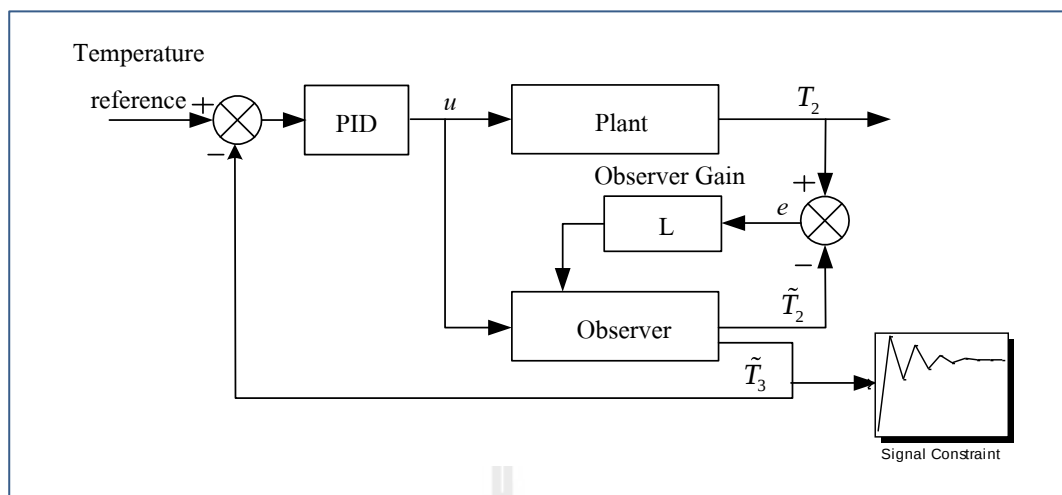
สามารถหาค่าอัตราขยายของตัวสังเกต (L) ได้จากหลักการของแอกเคอร์มันน์ (Ackermann's Formula) เมทริกซ์อัตราขยายตัวสังเกตมีค่าดังนี้

$$L = [-1.0765 \quad 4.2633 \quad -2.8620]^T$$

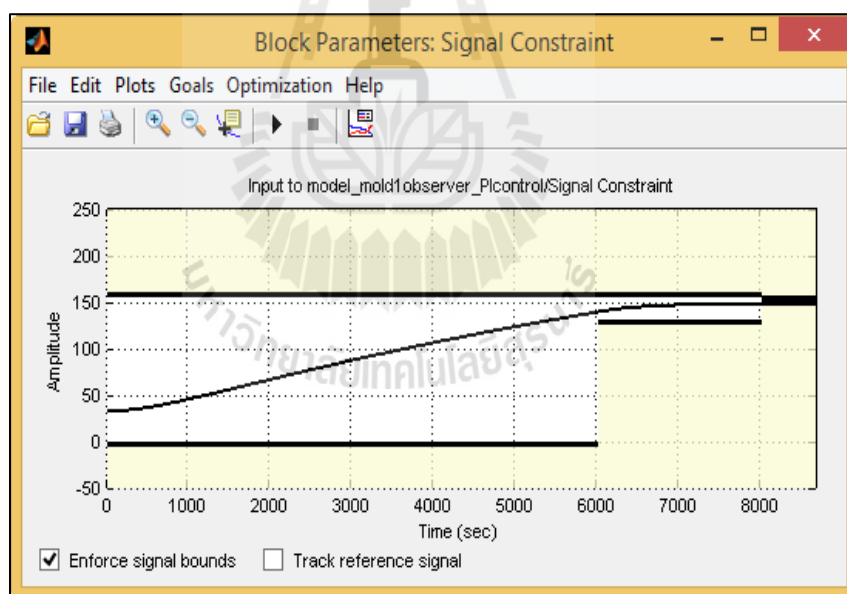
4.5.2 การออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอดี

แบบจำลองที่ประมาณ ได้มีความสำคัญเพราะเป็นตัวกำหนดรูปแบบการตอบสนองของอนุหภูมิในกระบวนการอุ่นแม่พิมพ์ให้มีการตอบสนองตามที่ต้องการ โดยอัลกอริทึมจะทำหน้าที่ปรับค่าสัมประสิทธิ์ของตัวควบคุมพีไอดีของระบบให้มีการตอบสนองตามรูปแบบที่ต้องการ ขั้นตอนการออกแบบระบบควบคุมพีไอดีดังนี้

1. สร้างแบบจำลองของกระบวนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมลามีนในระบบปิด และมีตัวควบคุมแบบพีไอดี ในโปรแกรม MATLAB ในส่วนของ Simulink แสดงดังรูปที่ 4.9
2. กำหนดตัวแปรที่ต้องการออกแบบมีทั้งหมด 3 ตัวแปร คือ K_p , K_i และ K_d
3. สำหรับการออกแบบหาค่าสัมประสิทธิ์ของตัวควบคุมพีไอดีโดยใช้วิธี Response Optimization ของโปรแกรม MATLAB เพื่อคำนวณหาค่าพีไอดีที่เหมาะสม โดยกำหนดรูปแบบการตอบสนองของสัญญาณเอาต์พุตให้มี Percent Overshoot ไม่เกิน 5%, ค่า Rise Time น้อยกว่า 6,000 sec และ ค่า Setting Time น้อยกว่า 8,000 sec ซึ่งข้อกำหนดเหล่านี้จะใช้กำหนด Signal Constrain ในหน้าต่างของโปรแกรมเพื่อกำหนดขอบเขตการตอบสนองของแบบจำลอง ดังรูปที่ 4.10 สำหรับการใช้งาน Response Optimization ได้แสดงไว้ใน ภาคผนวก ก



รูปที่ 4.9 แสดงแผนภาพแบบจำลองของกระบวนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมลามีน
และมีตัวควบคุมแบบพีไอดีในโปรแกรม MATLAB ในส่วนของ Simulink



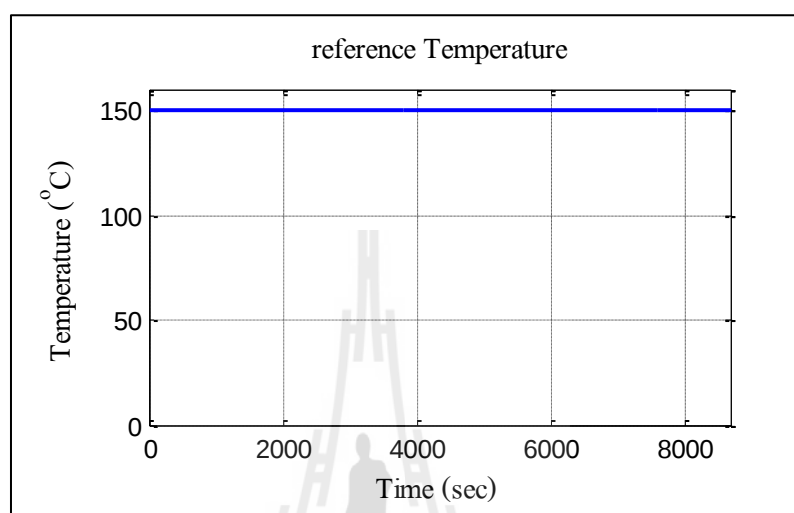
รูปที่ 4.10 แสดงการตอบสนองของแบบจำลองที่ได้จากการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด
ของตัวควบคุมพีไอดีโดยใช้ Response Optimization

ค่าสัมประสิทธิ์ตัวควบคุมพีไอดีที่ได้จากการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแบบจำลองคือ

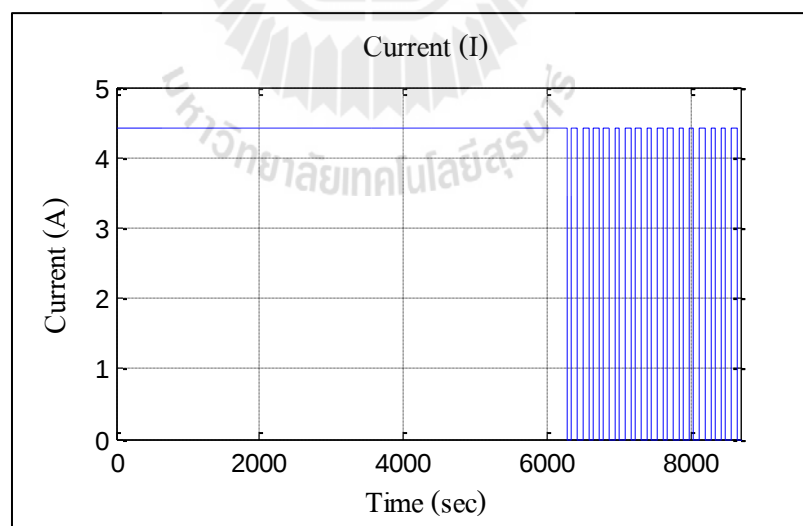
$$K_p = 174.8124, K_i = 0.0091 \text{ และ } K_d = 92328$$

4.6 การจำลองสถานการณ์ของระบบ

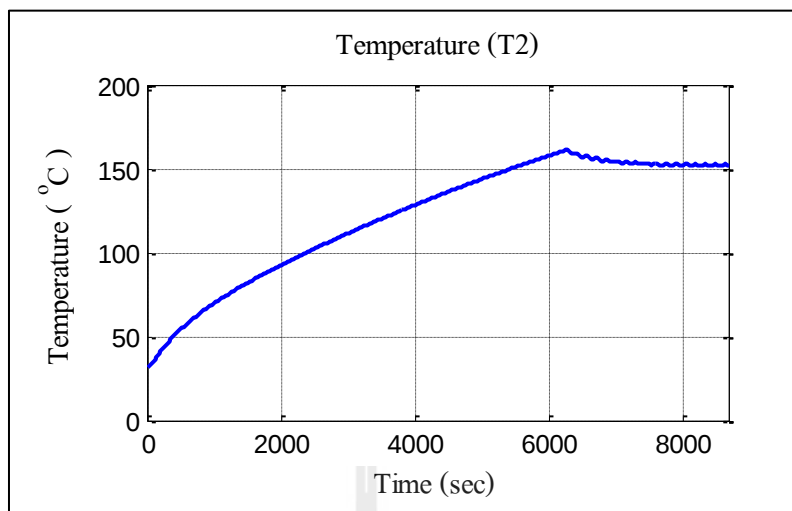
4.6.1 กรณีที่ 1 การจำลองสถานการณ์การควบคุมอุณหภูมิของแม่พิมพ์ให้คงที่ 150°C โดยจะมีการใส่อินพุตให้กับระบบเป็นแบบขั้นบันไดมีค่าคงที่ 150 ดังแสดงดังรูปที่ 4.11



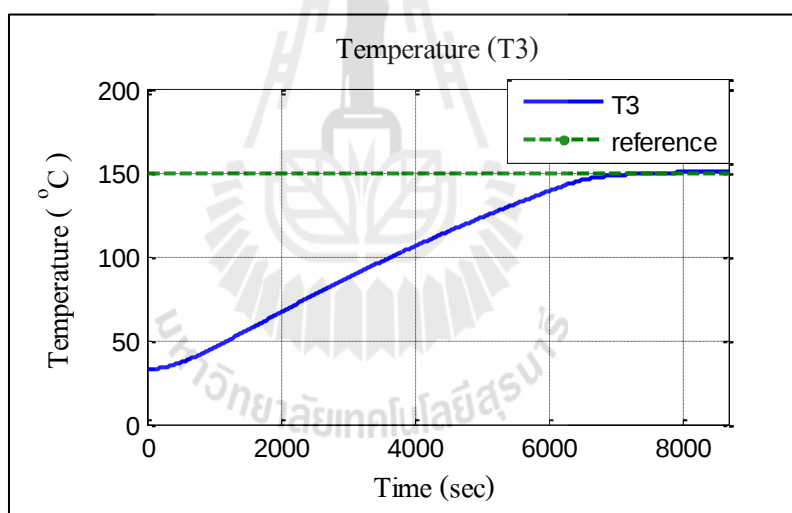
รูปที่ 4.11 แสดงผลการตอบสนองของอุณหภูมิ Reference ที่ 150°C



รูปที่ 4.12 แสดงผลการตอบสนองของค่ากระแสไฟฟ้าของแบบจำลอง



รูปที่ 4.13 แสดงผลการตอบสนองของอุณหภูมิ T2 ของแบบจำลอง

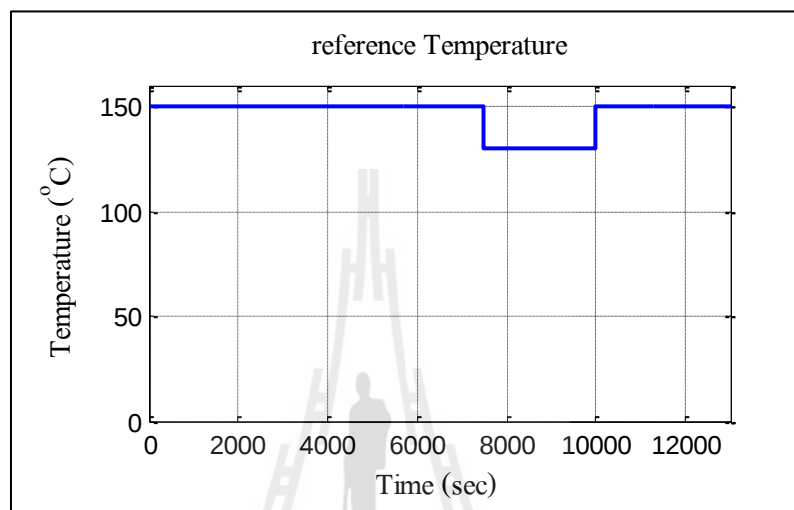


รูปที่ 4.14 แสดงผลการตอบสนองของอุณหภูมิ T3 ของแบบจำลอง

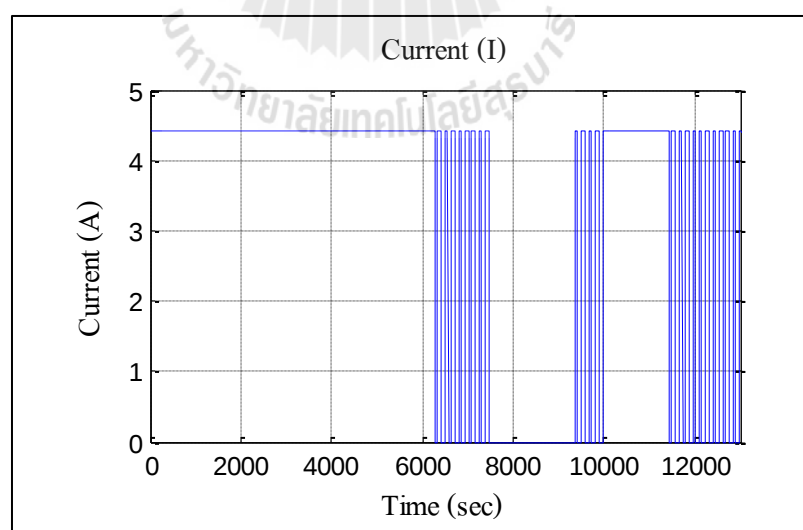
ผลที่ได้จากการจำลองระบบของแบบจำลองเพื่อควบคุมอุณหภูมิของแม่พิมพ์ให้คงที่ 150 °C แสดงดังรูปที่ 4.11 โดยระบบจะใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีที่ได้จากการออกแบบ เพื่อทำการควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับแบบจำลองให้มีผลการตอบสนองตามที่ต้องการแสดงดังรูปที่ 4.12 ส่วนการตอบสนองของอุณหภูมิที่แผ่นรองแม่พิมพ์แสดงดังรูปที่ 4.13 จะเห็นได้ว่าการพุ่ง

เกินของอุณหภูมิไม่สูงมากจึงส่งผลอุณหภูมิที่แม่พิมพ์เข้าสู่จุดสมดุลที่อุณหภูมิ 150°C โดยไม่มีการพุ่งเกินของอุณหภูมิแสดงดังรูปที่ 4.14 ซึ่งผลการตอบสนองเป็นไปตามเงื่อนไขที่ต้องการ

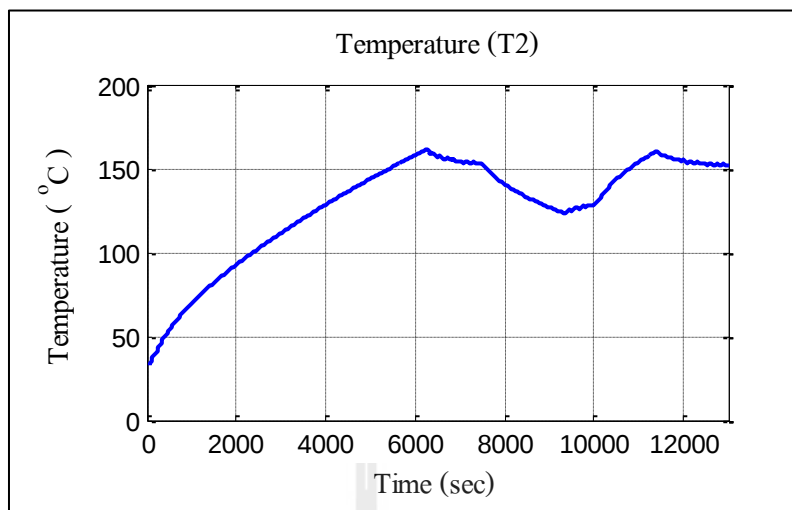
4.6.2 กรณีที่ 2 การจำลองสถานการณ์การควบคุมอุณหภูมิของแม่พิมพ์ที่ไม่คงที่ตลอดเวลา โดยจะมีการใส่อินพุตให้กับระบบเป็นแบบขั้นบันไดที่ไม่คงที่ ดังแสดงดังรูปที่ 4.15



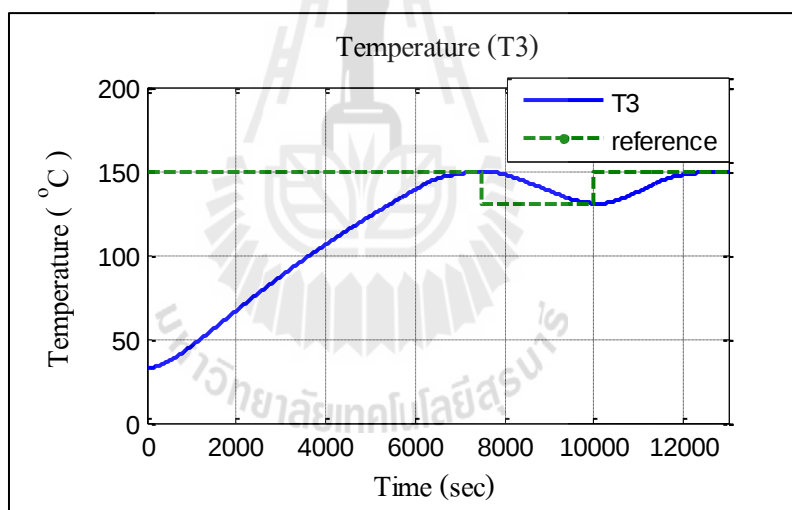
รูปที่ 4.15 แสดงผลการตอบสนองของอุณหภูมิ Reference ที่มีการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 4.16 แสดงผลการตอบสนองของค่ากระแสไฟฟ้าของแบบจำลอง



รูปที่ 4.17 แสดงผลการตอบสนองของอุณหภูมิ T2 ของแบบจำลอง



รูปที่ 4.18 แสดงผลการตอบสนองของอุณหภูมิ T3 ของแบบจำลอง

ผลที่ได้จากการจำลองระบบของแบบจำลองเพื่อควบคุมอุณหภูมิของแม่พิมพ์ที่ไม่คงที่ โดยจะควบคุมอุณหภูมิให้ได้ยินพุดตามรูปที่ 4.15 ซึ่งระบบจะใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีที่ได้จากการออกแบบ เพื่อทำการควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับแบบจำลองให้มีผลการตอบสนองตามที่ต้องการแสดงดังรูปที่ 4.16 ส่วนการตอบสนองของอุณหภูมิที่แผ่นรองแม่พิมพ์แสดงดังรูปที่ 4.17 จะเห็นได้ว่าการพุ่งเกินของอุณหภูมิไม่สูงมากจึงส่งผลให้อุณหภูมิที่แม่พิมพ์เข้าสู่จุดสมดุล

ตามที่ต้องการ โดยไม่มีการพุ่งเกินของอุณหภูมิแสดงดังรูปที่ 4.18 ซึ่งผลการตอบสนองเป็นไปตามเงื่อนไขที่ต้องการ

4.7 สรุป

การประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการควบคุมอุณหภูมิของกระบวนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมลามีนโดยวิธีระบุเอกลักษณ์ของระบบ จะทำให้เราได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สอดคล้องกับช่วงอุณหภูมิที่ใช้งาน ซึ่งสามารถนำไปออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอดีที่เหมาะสมกับระบบได้

การออกแบบเพื่อประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของตัวควบคุมพีไอดี โดยใช้วิธี Response Optimization ของโปรแกรม MATLAB เพื่อคำนวณหาค่าพีไอดีที่เหมาะสมกับระบบ โดยกำหนดรูปแบบการตอบสนองของสัญญาณเอาต์พุตให้เป็นไปตามเงื่อนไขที่ต้องการ ผลการตอบสนองของการจำลองสถานการณ์ของระบบจะเป็นในส่วนการควบคุมอุณหภูมิของกระบวนการอุ่นแม่พิมพ์เท่านั้น ซึ่งระบบควบคุมพีไอดีที่ได้จากการออกแบบมีความเหมาะสมกับระบบและสามารถนำไปทดสอบกับระบบจริงต่อไปได้



บทที่ 5

การทดสอบระบบควบคุมอุณหภูมิกับ เครื่องอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมลามีน

5.1 เครื่องมือทดลอง

การควบคุมโดยใช้คอมพิวเตอร์ ซึ่งโปรแกรมที่ใช้ควบคุมคือ MATLAB/Simulink เชื่อมตัวสัญญาณการควบคุมระหว่างคอมพิวเตอร์ จะใช้ PCI Serial Card ในการเชื่อมผ่านสาย Serial Crossover Cable เข้ากับบอร์ด RAPCON ซึ่งเป็นบอร์ด Controller ในการเชื่อมต่อ MATLAB/Simulink กับ Real – Time Windows Target ภายใน Window และบอร์ดนี้สามารถทำงานได้ทั้งอินพุตและเอาต์พุต เป็นบอร์ดควบคุมแบบ Real Time การทำงานของระบบจะรับค่าสัญญาณอินพุตเข้าที่ Analog Signal และ ส่งสัญญาณเอาต์พุตออกที่ Digital Signal ด้วยบอร์ด RAPCON เพื่อจะควบคุมระบบต่อไป

การทดลองนี้ได้ใช้เครื่องมือและอุปกรณ์เพื่อทำการทดสอบระบบควบคุมอุณหภูมิที่ได้จากการออกแบบดังนี้

1. เครื่องอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมลามีน แสดงดังรูปที่ 5.1
2. เครื่องวัดอุณหภูมิ แสดงดังรูป 5.2
3. เครื่องวัดกำลังไฟฟ้า แสดงดังรูป 5.3
4. Thermocouple JB – 10 CA Type K
5. คอมพิวเตอร์พร้อมระบบปฏิบัติการวินโดวส์และโปรแกรม MATLAB/Simulink โดยมีรายละเอียดต่างๆของ RAPCON Board ดังตารางที่ 5.1



รูปที่ 5.1 แสดงเครื่องอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมลามีน



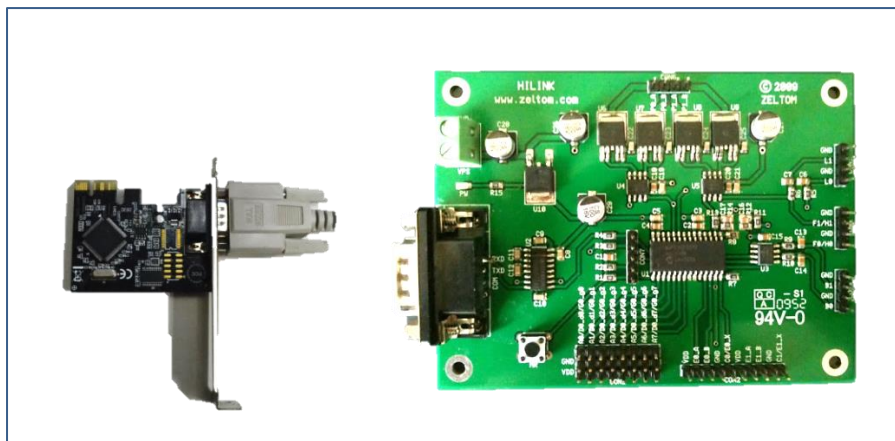
รูปที่ 5.2 แสดงเครื่องวัดอุณหภูมิ



รูปที่ 5.3 แสดงเครื่องวัดกำลังไฟฟ้า



รูปที่ 5.4 แสดง Thermocouple JB – 10 CA Type K



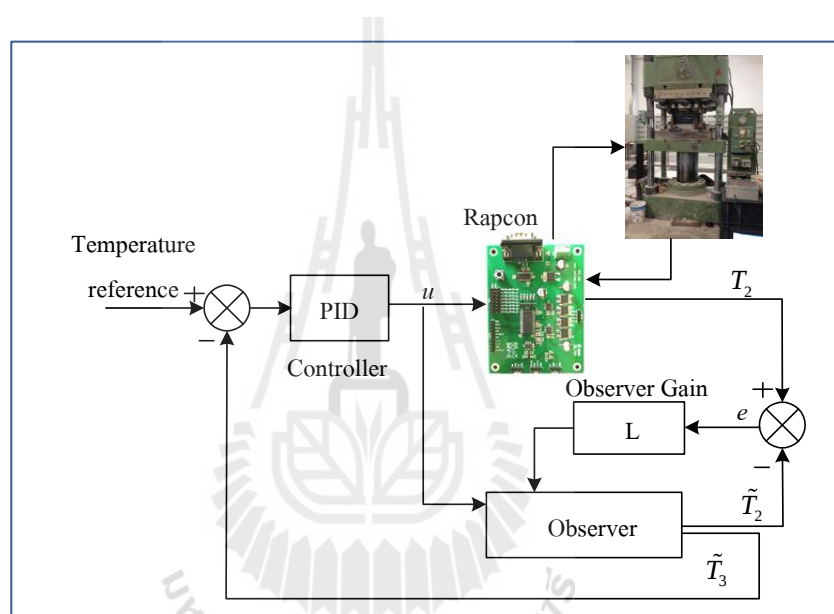
รูปที่ 5.5 PCI Serial Card เชื่อมต่อผ่านสาย Serial Crossover Cable และบอร์ด RAPCON

ตารางที่ 5.1 แสดงรายละเอียดต่าง ๆ ของ RAPCON Board (RAPCON Real – Time Rapid Control Prototyping Platform for MATLAB/SIMULINK)

Meaning	Magnitude	Unit
Power Supply (Minimum Current)	6 – 15 (0.15)	VDC (A)
Analog Input A0 – A7 Analog 12 Bit	0 - 5	V
Capture Input C0 – C1 Digital 16 Bit		
Digital Input D0_d0 – D0_d0 Digital		
Encoder Input E0 – E1 Digital 16 Bit		
Frequency Output F0 – F1 Digital 16 Bit		
Analog Output B0 – B1 Analog 12 Bit		
Digital Output G0_g0 – G0_d7 Digital		
Pulse Output H0 – H1 Digital 16 Bit		
Filtered Pulse Output L0 – L1 Analog		
H – Bridge Output P0 – P1 Digital	0 – Supply Voltage, 5 A	
Voltage Regulator Output	5 (0.25)	V (A)
Ground GND	0	V
Sampling Range	Up to 15.2	kHz

5.2 การเขียนโปรแกรมเพื่อทดสอบระบบควบคุมอุณหภูมิของกระบวนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมลามีน

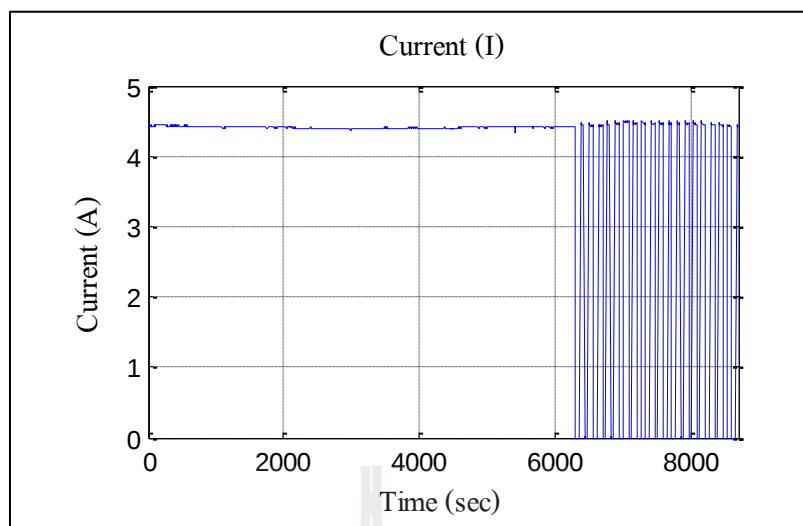
ในการทดสอบการควบคุมอุณหภูมิที่แม่พิมพ์ของกระบวนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมลามีน โดยจะควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับแผ่น Heater เพื่อให้ผลการตอบสนองของอุณหภูมิที่แม่พิมพ์นั้นให้เป็นไปตามความต้องการ การควบคุมการทำงานของระบบจะใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ควบคุมผ่านบอร์ด RAPCON เพื่อทำการควบคุมเครื่องอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมลามีนต่อไป ซึ่งมีขั้นตอนการทำงานดังแสดงดังรูปที่ 5.6



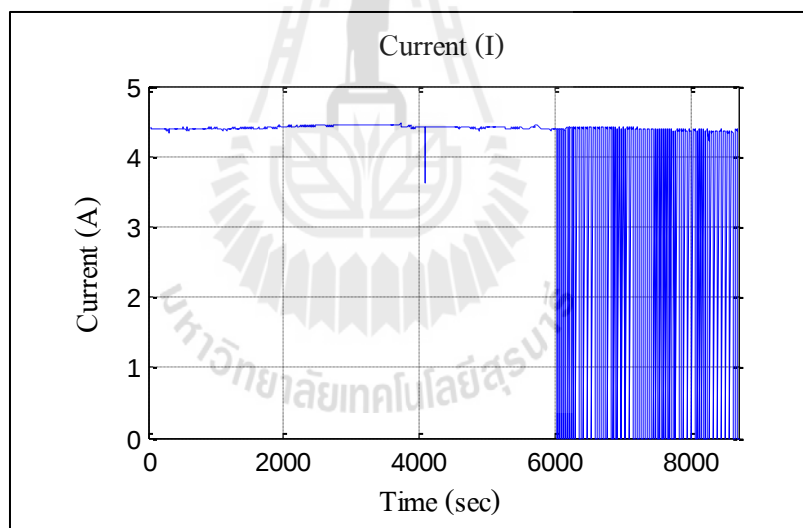
รูปที่ 5.6 แสดงแผนภาพขั้นตอนการทำงานของระบบ

5.3 ผลการทดสอบ

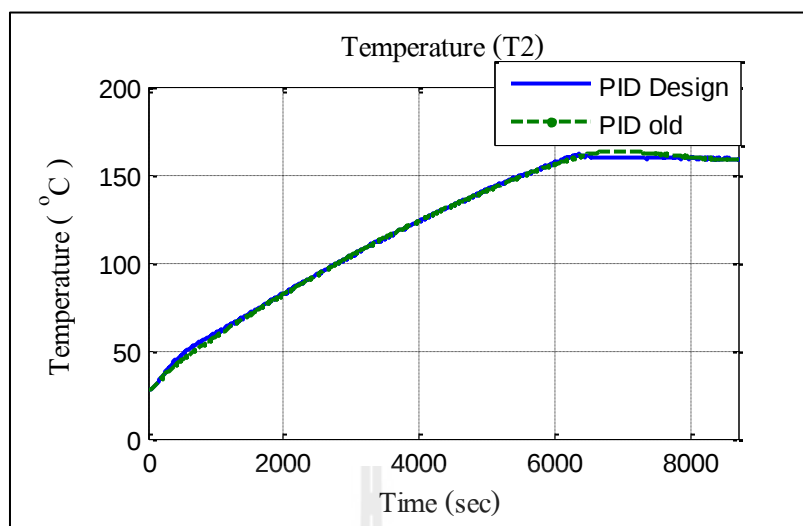
การทดสอบต้องการควบคุมอุณหภูมิที่แม่พิมพ์ให้ได้อุณหภูมิ 150°C ซึ่งเป็นในส่วนของกระบวนการอุ่นแม่พิมพ์ โดยจะทำการเก็บผลการทดลองของระบบควบคุมที่ได้จากการออกแบบเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองของระบบควบคุมแบบพีไอดีเดิมที่บริษัทใช้อยู่ได้แก่เปรียบเทียบผลการตอบสนองของค่ากระแสไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 5.7 และ 5.8 เปรียบเทียบผลการตอบสนองของอุณหภูมิ T_2 แสดงดังรูปที่ 5.9 และเปรียบเทียบผลการตอบสนองของอุณหภูมิ T_3 แสดงดังรูปที่ 5.10



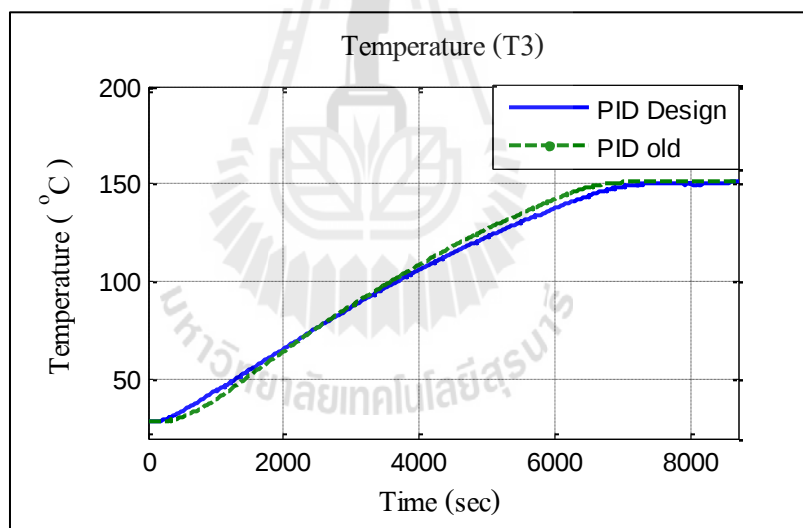
รูปที่ 5.7 แสดงผลการตอบสนองของค่ากระแสไฟฟ้าของการออกแบบพีไอดี



รูปที่ 5.8 แสดงผลการตอบสนองของค่ากระแสไฟฟ้าของพีไอดีเดิม



รูปที่ 5.9 แสดงการเปรียบเทียบผลการตอบสนองของอุณหภูมิ T2



รูปที่ 5.10 แสดงการเปรียบเทียบผลการตอบสนองของอุณหภูมิ T3

จากรูปที่ 5.9 จะเห็นได้ว่าผลการตอบสนองของระบบควบคุมที่ได้จากการออกแบบเป็นไปตามเงื่อนไขที่ต้องการแต่เมื่อเปรียบเทียบกับผลการตอบสนองของระบบควบคุมเดิมที่บริษัทใช้อยู่แสดงให้เห็นว่าระบบเดิมที่บริษัทใช้อยู่มีการพุ่งเกินของอุณหภูมิสูงกว่าระบบควบคุมที่ได้จากการออกแบบ จากรูปที่ 5.10 เห็นได้ว่าผลการตอบสนองของระบบควบคุมเดิมมีค่าอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิที่ต้องการเนื่องจากการพุ่งเกินของอุณหภูมิที่แผ่นรองแม่พิมพ์ (T2) นั่นเอง แต่ผลการ

ตอบสนองของระบบควบคุมที่ได้จากการออกแบบนั้นมีค่าอุณหภูมิตามที่ต้องการ จากผลการทดสอบจะเป็นในส่วนของการอุ่นแม่พิมพ์เท่านั้น เนื่องจากไม่สามารถทดสอบในส่วนของการอัดขึ้นรูปได้เพราะบอร์ดที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมควบคุมถูกรบกวนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของตู้อบชนิดความถี่สูงจึงไม่สามารถทดสอบในส่วนนี้ได้

ตารางที่ 5.2 แสดงการใช้พลังงานไฟฟ้าของกระบวนการอุ่นแม่พิมพ์

การควบคุม	พลังงานไฟฟ้า (kWh)	ค่าไฟฟ้า (บาท)
ระบบเดิม	6.28	25.12
ระบบใหม่	6.14	24.56

จากตารางที่ 5.2 สรุปได้ว่าระบบควบคุมที่ได้จากการออกแบบสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าลงได้ 0.14 kWh ประมาณ 2.23 % สามารถประหยัดค่าไฟฟ้าได้ 0.56 บาทต่อเครื่อง เนื่องจากบริษัทมีเครื่องทั้งหมด 300 เครื่อง ก็จะสามารถประหยัดค่าไฟฟ้าเฉลี่ย 168 บาทต่อวัน รวม 60,480 บาทต่อปี

5.4 สรุป

จากการออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิแบบพีไอดีของแม่พิมพ์ ระบบควบคุมที่ได้จากการออกแบบสามารถควบคุมอุณหภูมิของแม่พิมพ์เป็นไปตามความต้องการได้ เมื่อนำไปทดสอบกับระบบจริง ผลการตอบสนองของระบบควบคุมอุณหภูมิที่ได้จากการออกแบบสามารถควบคุมอุณหภูมิได้ดีกว่าระบบควบคุมเดิมที่บริษัทใช้อยู่ปัจจุบัน ทำให้สามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าลงได้ 2.23 % และสามารถประหยัดค่าไฟฟ้าได้ 0.56 บาทต่อเครื่อง เนื่องจากบริษัทมีเครื่องทั้งหมด 300 เครื่อง สามารถประหยัดค่าไฟฟ้าเฉลี่ย 168 บาทต่อวัน รวม 60,480 บาทต่อปี ซึ่งเป็นค่าไฟฟ้าในส่วนของการอุ่นแม่พิมพ์เท่านั้น เนื่องจากไม่สามารถทดลองในส่วนของการอัดขึ้นรูปได้เพราะมีสัญญาณรบกวนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของตู้อบชนิดความถี่สูงมารบกวนบอร์ดที่ใช้เขียนโปรแกรมควบคุมทำให้ไม่สามารถทำงานได้

บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิแบบฟuzzyของกระบวนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมลามีน ซึ่งมีขั้นตอนของการออกแบบและการทดลองดังนี้

1. ได้ประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบควบคุมอุณหภูมิของกระบวนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมลามีนในรูปแบบสมการปริภูมิสแตต ทำให้เราสามารถประมาณอุณหภูมิของระบบได้ โดยแบ่งออกเป็นอุณหภูมิแผ่น Heater (T1) อุณหภูมิแผ่นรองแม่พิมพ์ (T2) และอุณหภูมิแม่พิมพ์ (T3) ตามลำดับ

2. ได้หาค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในกระบวนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมลามีนโดยการระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธีจิ้นเนติกอัลกอริทึม ภายใต้ขอบเขตความเป็นไปได้ของสัมประสิทธิ์นั้น ๆ โดยมีอินพุตเป็นค่ากระแสไฟฟ้า และเอาต์พุตเป็นค่าอุณหภูมิ

3. สร้างตัวสังเกตเพื่อประมาณอุณหภูมิของกระบวนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมลามีนของแผ่น Heater และแม่พิมพ์ที่ไม่สามารถวัดได้ ทำให้ระบบควบคุมอุณหภูมิของแม่พิมพ์ในการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมลามีนมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

4. ออกแบบตัวควบคุมฟuzzyที่เหมาะสม โดยใช้วิธี Response Optimization เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของตัวควบคุม ซึ่งนำค่าอุณหภูมิ (T3) ที่ประมาณได้จากตัวสังเกต เป็นค่าป้อนกลับสำหรับการควบคุมอุณหภูมิของแม่พิมพ์

5. นำระบบควบคุมอุณหภูมิที่ได้จากการออกแบบไปทดสอบกับเครื่องอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมลามีนในส่วนของการอุ่นแม่พิมพ์ โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ผ่านบอร์ด RABCON ในการควบคุม ซึ่งสามารถควบคุมอุณหภูมิของแม่พิมพ์ให้คงที่ 150°C ได้ตามต้องการ

จากการศึกษาและวิเคราะห์ผลการตอบสนองของกระบวนการอัดขึ้นรูปอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมลามีนเพื่อประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ ทำให้สามารถนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไปออกแบบระบบควบคุมแบบฟuzzyได้ จากการทดสอบควบคุมอุณหภูมิในกระบวนการอุ่นแม่พิมพ์นั้น ผลการทดลองของระบบควบคุมที่ได้จากการออกแบบมาเปรียบเทียบกับระบบควบคุมเดิมที่บริษัทใช้อยู่ปัจจุบัน แสดงดังตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 แสดงการใช้พลังงานไฟฟ้าของกระบวนการอุ่นแม่พิมพ์

การควบคุม	พลังงานไฟฟ้า (kWh)	ค่าไฟฟ้า (บาท)
ระบบเดิม	6.28	25.12
ระบบใหม่	6.14	24.56

จากผลการเปรียบเทียบการใช้พลังงานไฟฟ้าของตัวควบคุมทั้งสองระบบ จะเห็นได้ว่าระบบควบคุมที่ได้จากการออกแบบใช้พลังงานไฟฟ้าลดลง 2.23 % จากระบบควบคุมเดิมที่ใช้อยู่ปัจจุบัน ซึ่งสามารถประหยัดค่าไฟฟ้าได้ 0.56 บาทต่อเครื่อง เนื่องจากบริษัทมีเครื่องทั้งหมด 300 เครื่อง ก็จะสามารถประหยัดค่าไฟฟ้าเฉลี่ย 168 บาทต่อวัน รวม 60,480 บาทต่อปี

6.2 ข้อเสนอแนะ

1. การควบคุมอุณหภูมิของแม่พิมพ์ จะควบคุมได้เฉพาะแม่พิมพ์ที่นำมาประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เท่านั้น เนื่องจากรูปร่างของชิ้นงานที่มีความหลากหลายทำให้ขนาดของแม่พิมพ์มีความแตกต่างกัน ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆของแบบจำลองมีค่าเปลี่ยนไป

2. จากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของตู้อบชนิดความถี่สูง ทำให้เกิดสัญญาณรบกวนการควบคุมสัญญาณจากบอร์ดทั้งรีเลย์ในการเปิด/ปิดการป้อนกระแสและจากเซ็นเซอร์ในการวัดค่าอุณหภูมิ ส่งผลให้ต้องทดลองในช่วงเวลาวันหยุดแทนหรือนอกช่วงเวลาที่ไม่มีการใช้งานตู้อบชนิดความถี่สูง ดังนั้น การควบคุมในส่วนของการอัดขึ้นรูปนั้นจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ป้องกันการรบกวนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

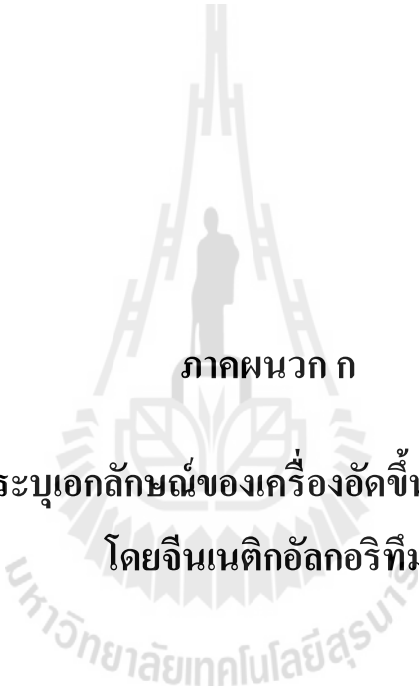
3. การระบุเอกลักษณ์ของระบบหากไม่กำหนดขอบเขตให้กับตัวแปรที่ทำการประมาณค่าให้อยู่ในขอบเขตกับความเป็นไปได้ของตัวแปรนั้น ๆ จะทำให้โปรแกรมประมาณค่าตัวแปรได้ช้าและมีค่าความผิดพลาดของตัวแปรที่ได้ค่อนข้างมาก ซึ่งทำให้ค่าที่ได้จะผิดไปจากความเป็นจริง แต่ถ้ากำหนดขอบเขตของตัวแปรที่ต้องการประมาณค่าให้มีความใกล้เคียงกับค่าความเป็นจริงหรือความเป็นไปได้ของตัวแปรนั้น ๆ โปรแกรมจะคำนวณได้อย่างรวดเร็วและค่าที่ได้จะมีความถูกต้องมากขึ้น

รายการอ้างอิง

- จิระพล ศรีเสริฐผล สุพจน์ ปลั่งพิมาย และ ภาวิน จาวชล (2553). การวิเคราะห์และออกแบบตัวควบคุมแบบปรับตัวได้สำหรับเตาอบหลอดอินฟราเรดในกระบวนการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ปีที่ 33 ฉบับที่ 3 กรกฎาคม – กันยายน 2553. หน้า 235–248
- วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ (2548). การควบคุมระบบพลศาสตร์. (พิมพ์ครั้งที่ 2). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 848 หน้า.
- สรารุณี สุจิตจร (2546). การควบคุมอัตโนมัติ. (พิมพ์ครั้งที่ 1). เพียร์สัน เอ็ดดูเคชั่น อินโดไชน่า. 456 หน้า.
- Ahmad, F.R., and Omar, A.M. (2005). The Low Power Induction Heating Using Resonant Technique. **International Conference on Power Electronics and Drives Systems**, October 28-November 1; vol.2: pp.1190-1193.
- Chen, C.T., Wu, C.K., and Hwang, C. (2008). Optimal Design and Control of CPU Heat Sink Processes. **IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies**, March; vol.31(1): pp.184-195.
- Ebert, J. L., van der Linden, G.W., de Roover, D., Porter, L.L., Kosut, K.L., and Emami-Naeini, A. (2010). Model-Based Temperature Control of Heated Plates. The 18th **IEEE Conference on Advanced Thermal Processing of Semiconductors (RTP)**.
- Grefenstette, J.J. (1986). Optimization of Control Parameters for Genetic Algorithms. **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics**, January-February; vol.16(1): pp.122-128.
- Hashida, S., Nanno, I., Matsunaga, N., and Kawaji, S. (2007). Experimental Study on Uniform Temperature Control for Two-Dimensional Heating Plate Control. **International Conference on Control, Automation and Systems**, October; pp.1450-1455.
- Nerg, J., Tolsa, K., Silventoinen, P., Partanen, J., and Pyrhonen, J. (1999). A Dynamic Model for The Simulation of Induction Heating Devices. **IEEE Transactions on Magnetics**, September; vol.35(5): pp.3592-3594

- Ogata, K. (2002). **Modern Control Engineering**. (4th Edition), USA, Prentice Hall PTR. 964 pp.
- Wang, Z.J, Yin, Z.P., Xiong, Y.L. (2010). Temperature Control and PID Parameters Optimization Based on Finite Element Model. **The 2010 International Conference on Electrical and Control Engineerin, June 25-27**; pp.2241-2244.





ภาคผนวก ก

โปรแกรมการระบุเอกลักษณ์ของเครื่องอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมลามีน

โดยจินเนติกอัลกอริทึม

```

*****

% These Program is used to Open-loop Identification for Melamine Products
    in Extrusion machine

% Program with Narongsak Seekaew

% Write on Matlab

% November 2014

*****Start Program*****

%Objective Function

function f=iden2(X)

clc

clear all

%Initial temperature zone

t1(1)=30;

t2(1)=30;

t3(1)=28.8;

%Load data output and input

load T3

load I

%Initial set zero

sum_error1=0;

sum_error2=0;

sum_error3=0;

%Parameter constant set

h=1;

N=3;

ta=32;

R=50;

```

```

*****MODEL*****

%Numerical model of Melamine Products in Extrusion machine
for i=1:1:5400

    k11=(-t1(i)*(X(1)/(X(2)*1000))) + (t2(i)*(X(1)/(X(2)*1000))) +
    (I(i)^2*R*N/(X(2)*1000))-(X(5));

    k12=(t1(i)*(X(1)/(X(4)*1000))) - (t2(i)*((X(1)+X(3)+
    X(7))/(X(4)*1000))) + (t3(i)*(X(7)/(X(4)*1000))) + (ta*((X(3))/(X(4)*1000)))-(X(6));

    k13=(t2(i)*(X(7)/(X(10)*1000))) - (t3(i)*((X(7)
    +X(8))/(X(10)*1000))) + (ta*((X(8))/(X(10)*1000)))-(X(9));

    y11=t1(i)+k11*h;
    y12=t2(i)+k12*h;
    y13=t3(i)+k13*h;

    k21=(-y11*(X(1)/(X(2)*1000)))+(y12*(X(1)/(X(2)*1000)))+
    (I(i)^2*R*N/(X(2)*1000))-(X(5));

    k22=(y11*(X(1)/(X(4)*1000))) - (y12*((X(1)+X(3)+
    X(7))/(X(4)*1000))) + (y13*(X(7)/(X(4)*1000))) + (ta*((X(3))/(X(4)*1000)))-(X(6));

    k23=(y12*(X(7)/(X(10)*1000))) - (y13*((X(7)+
    X(8))/(X(10)*1000))) + (ta*((X(8))/(X(10)*1000)))-(X(9));

*****ERROR*****

%Error of model

    t1(i+1)=t1(i)+h*(0.5*k11+0.5*k21);
    t2(i+1)=t2(i)+h*(0.5*k12+0.5*k22);
    t3(i+1)=t3(i)+h*(0.5*k13+0.5*k23);

    sum_error2=sum_error2+(t3(i)-T3(i))^2;

end

sum_error=sum_error2;

%Fitness function of GA

    f=sqrt(sum_error/5401);

return

```

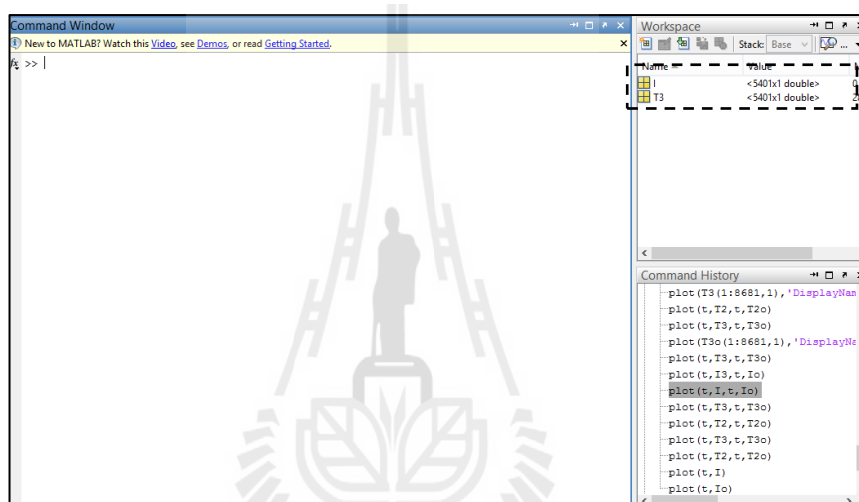


ภาคผนวก ข

การใช้โปรแกรมจินเนติกอัลกอริทึมของ MATLAB ในการระบุเอกลักษณ์

ข.1 การใช้โปรแกรมจินเนติกอัลกอริทึมของ MATLAB

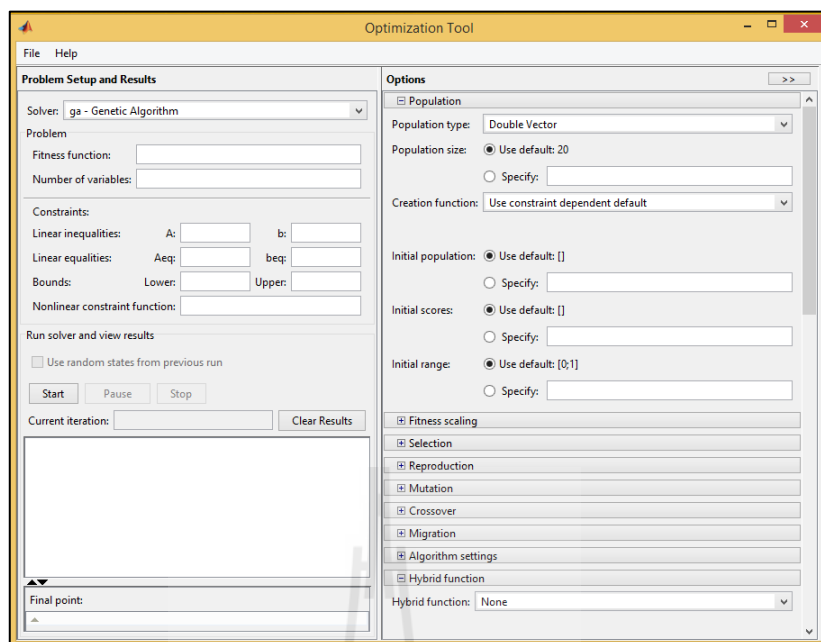
ข.1.1 นำข้อมูลจากการทดลอง (Import Data) ไว้ใน Work Space ของโปรแกรม MATLAB แต่ในการแสดงตัวอย่างการใช้งานจะสร้างแบบจำลองของระบบโดยใช้ M-file ในภาคผนวก ก ทำการกำหนดตัวแปรและค่าของตัวแปรของระบบลงไป โดยข้อมูลที่ได้จากการรันโปรแกรมเทียบว่าเป็นข้อมูลจากการทดลอง โปรแกรมนี้เป็นการจำลองระบบของเครื่องอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมลามีนแบบวงเปิด โดยมีอินพุตเป็นค่ากระแสไฟฟ้าและเอาต์พุตเป็นค่าอุณหภูมิ แสดงดังรูปที่ ข.1



รูปที่ ข.1 แสดงการดึงข้อมูลสำหรับการระบุเอกลักษณ์

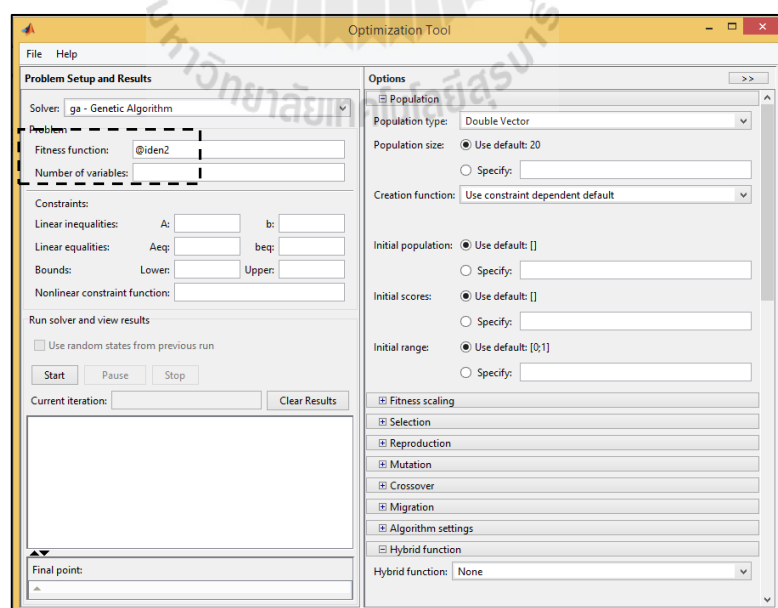
ข.1.2 สร้างสมการวัตถุประสงค์ ใน M-file ของโปรแกรม MATLAB ในที่นี้คือฟังก์ชัน `iden2` แสดงในภาคผนวก ก ซึ่งฟังก์ชันวัตถุประสงค์นี้มีค่าตัวแปรที่ต้องการหาค่าทั้งหมด 10 ตัวแปรคือ $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8, X_9, X_{10}$

ข.1.3 การเรียกใช้ Genetic Algorithm tool หรือ GAT เป็น GUI (Graphic User Interface) ที่ช่วยให้สามารถใช้ GA ได้โดยไม่ต้องใช้คำสั่งจากตัวพร้อมรับคำสั่ง (Command Line) ในการเปิดใช้งาน GAT ทำได้โดยการเรียกคำสั่งในหน้าต่าง Command Window จะปรากฏหน้าต่าง GA แสดงดังรูปที่ ข.2 ลักษณะหน้าต่างโปรแกรมสามารถตั้งค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ เงื่อนไขเริ่มต้น จำนวนประชากรหรือจำนวนรุ่นของสายพันธุ์ ซึ่งรายละเอียดการตั้งค่าในแต่ละส่วนจะแสดงในข้อถัดไป



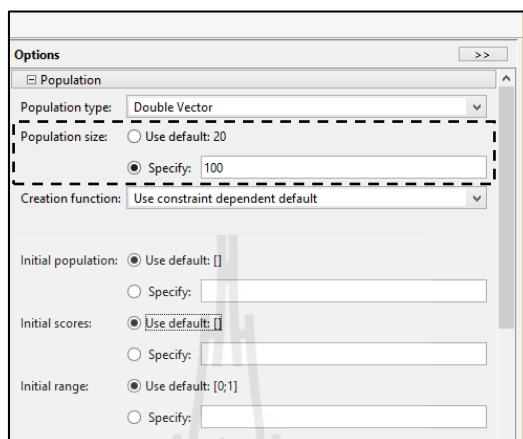
รูปที่ ข.2 แสดงแผนภาพหน้าต่างของ GAT

ข.1.4 การใส่ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Fitness Function) พิมพ์คำสั่ง @iden2 ในช่อง Fitness Function และจำนวนตัวแปรในช่อง Number of variables แสดงดังรูปที่ ข.3



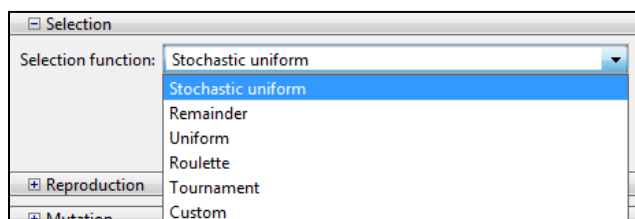
รูปที่ ข.3 แสดงแผนภาพการใส่ฟังก์ชันวัตถุประสงค์และจำนวนตัวแปร

ข.1.5 การใส่จำนวนประชากร (Population Size) โดยไปที่ Option => Population โปรแกรมจะกำหนดค่าพื้นฐานจำนวนประชากรของการค้นหาให้เท่ากับ 20 ถ้าต้องการปรับทำได้โดยเลือก Population Size => Specify แล้วระบุจำนวน แสดงดังรูปที่ ข.4



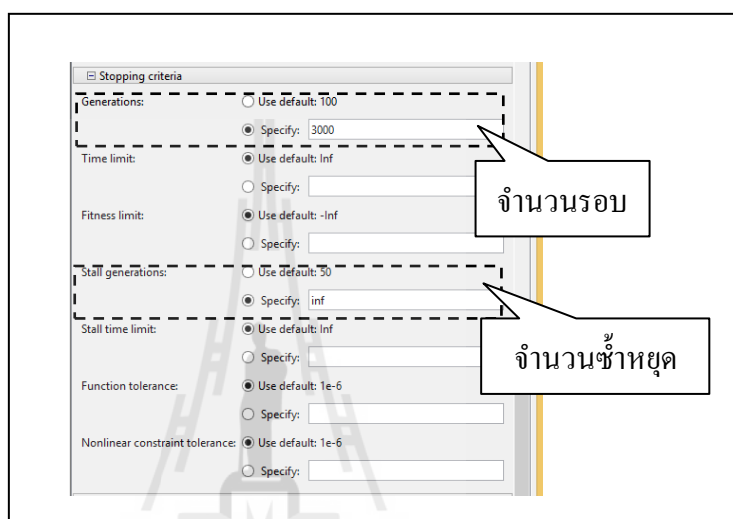
รูปที่ ข.4 แสดงแผนภาพการระบุจำนวนประชากร (Population Size)

ข.1.6 การกำหนดวิธีการคัดเลือกสายพันธุ์ (Selection) โดยไปที่ Option => Selection มีวิธีการเลือกประชากรลูกหลานมีหลายวิธีเช่น วิธีการจัดอันดับ (Rank) วิธีเป็นรูปแบบ (Uniform) วิธีจัดการแข่งขัน (Tournament) วิธีของวงล้อรูเล็ต (Roulette) และ วิธีการสุ่มเฟ้นครอบจักรวาล (Stochastic universal) แสดงดังรูปที่ ข.5



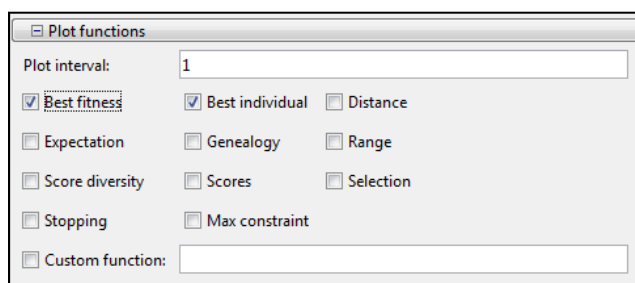
รูปที่ ข.5 แสดงแผนภาพการเลือก Selection

ข.1.7 การกำหนดจำนวนรอบของการค้นหาและกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนทำได้โดยไปที่ Option => Stopping criteria => Generations เพื่อกำหนดจำนวนรอบ กำหนดช่วงเวลาในการค้นหาโดย Option => Stopping criteria => Time limit กำหนดจำนวนรอบที่มีคำตอบเท่าเดิมแล้วหยุดทำงานโดย Option => Stopping criteria => Stall Generations กำหนดค่าความคลาดเคลื่อนของคำตอบโดย Option => Stopping criteria => Function tolerance แสดงดังรูปที่ ข.6



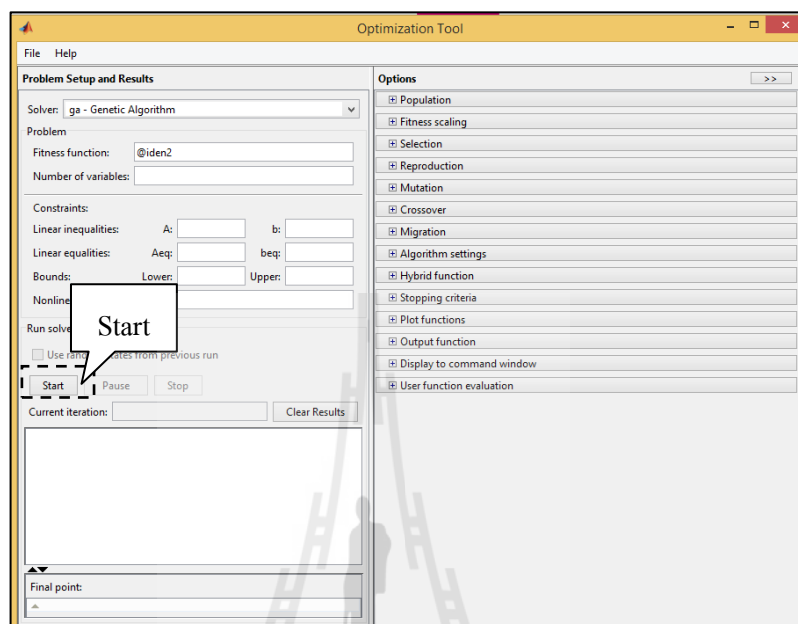
รูปที่ ข.6 แสดงแผนภาพการเลือกจำนวนรอบและเงื่อนไขการหยุด

ข.1.8 การแสดงกราฟของค่าตัวแปรและค่าของฟังก์ชัน โดยเลือก Option => Plot Function => Best fitness และ Best individual แสดงดังรูปที่ ข.7

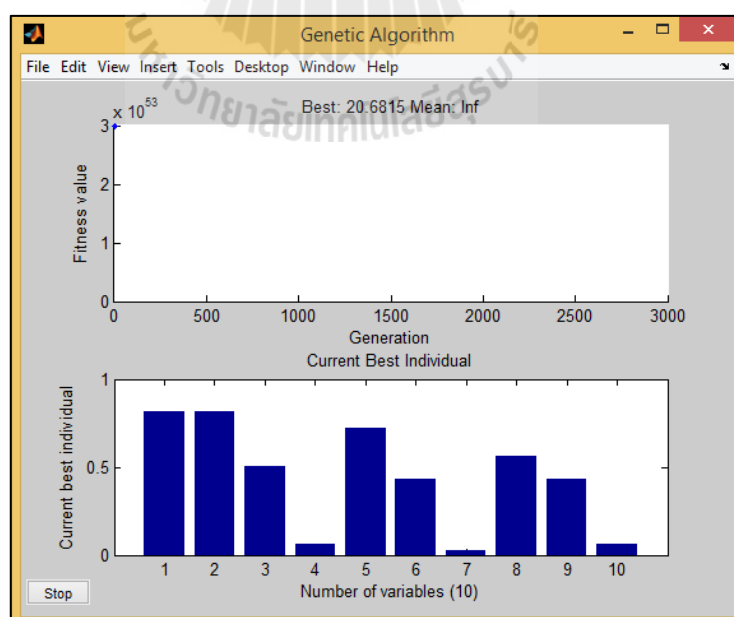


รูปที่ ข.7 แสดงแผนภาพการเลือกแสดงกราฟของการค้นหา

ข.1.9 Click Start เพื่อทำการเริ่มโปรแกรมการค้นหา แสดงดังรูปที่ ข.8 โดยจะแสดงกราฟการประมาณค่าของตัวแปร แสดงดังรูปที่ ข.9

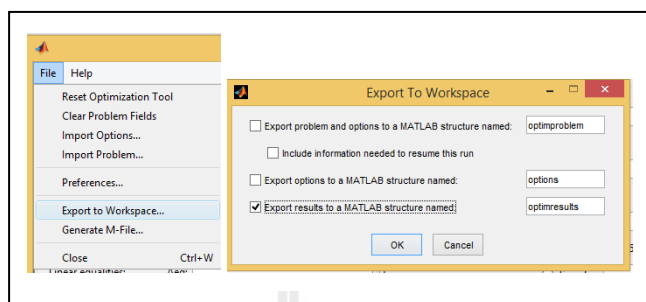


รูปที่ ข.8 แสดงแผนภาพการเริ่มโปรแกรมการค้นหา



รูปที่ ข.9 แสดงกราฟการประมาณค่าของตัวแปร

ข.1.10 การแสดงค่าประมาณตัวแปร โดยไปที่ File => Export to Workspace จะปรากฏหน้าต่าง แสดงดังรูปที่ ข.10



รูปที่ ข.10 แสดงแผนภาพการแสดงค่าประมาณตัวแปร



ภาคผนวก ก
การติดตั้ง Hardware ของ RABCON Board

ค.1 ข้อมูลทางเทคนิคของ RABCON Board

1. INTRODUCTION

The RAPCON platform offers a seamless interface between physical plants and Matlab/Simulink for implementation of hardware-in-the-loop real-time control systems. It is fully integrated into Matlab/Simulink and has a broad range of inputs and outputs. The platform is a complete and low-cost real-time control system development package for both educational and industrial applications.

The RAPCON platform consists of the real-time control board (hardware) and the associated Matlab interface (software). The hardware of the RAPCON platform has 8×12 bit analog inputs, 2×16 bit capture inputs, 2×16 bit encoder inputs, 1×8 bit digital input, 2×12 bit analog outputs, 2×16 bit frequency outputs, 2×16 bit pulse outputs and 1×8 bit digital output. The board also contains 2 H-bridges with 5 A capability to drive external heavy loads. Some inputs and outputs are multiplexed to simplify the hardware. The board is interfaced to the host computer that runs Matlab through a serial port. The software of the RAPCON platform is fully integrated into Matlab/Simulink/Real-Time Windows Target and comes with Simulink library blocks associated with each hardware input and output. The library contains Analog Input Block, Capture Input Block, Encoder Input Block, Digital Input Block, Analog Output Block, Frequency Output Block, Digital Output Block and Pulse Output Block. The platform achieves real-time operation with sampling rates up to 15.2 kHz.

The RAPCON platform has been developed to extend and optimize the real-time operation of Matlab, Simulink and Real-Time Windows Target. The developed platform is uniquely integrated into Matlab to achieve real-time operation in Matlab under Windows. The salient features of the RAPCON platform make it ideal for implementation of hardware-in-the-loop real-time control systems in both educational and industrial applications.

1.1. Specifications

- Power supply: 6 – 15 V, minimum 0.15 A, regulated
- Interface: 460800 baud, 8 bit data, no parity, 1 stop bit
- Analog inputs: A0–A7, 0 – 5 V analog, 12 bit resolution
- Capture inputs: C0–C1, 0 – 5 V digital, 16 bit resolution
- Digital inputs: D0_d0–D0_d7, 0 – 5 V digital, 8 lines
- Encoder inputs: E0–E1, 0 – 5 V digital, 16 bit resolution
- Frequency outputs: F0–F1, 0 – 5 V digital, 16 bit resolution

- Analog outputs: B0–B1, 0 – 5 V analog, 12 bit resolution
- Digital outputs: G0_g0–G0_g7, 0 – 5 V digital, 8 lines
- Pulse outputs: H0–H1, 0 – 5 V digital, 16 bit resolution
- Filtered pulse outputs: L0–L1, 0 – 5 V analog
- H-bridge outputs: P0–P1, 0–(supply voltage) V digital, 5 A
- Voltage regulator output: VDD, 5 V, 0.25 A, regulated power supply
- Ground: GND, 0 V
- Sampling rate: up to 15.2 kHz

1.2. Requirements

- PC with Windows XP or later and an expansion slot for a serial card
- Serial crossover (null modem) cable
- Matlab R2007b or later with Simulink, Real-Time Workshop and Real-Time Windows Target
- RAPCON hardware (real-time control board) 1.5 or later
- RAPCON software 1.5 or later
- Power supply (regulated, 6 – 15 V and at least 0.15 A without any load)

1.3. Absolute Maximum Ratings

- Power supply voltage: minimum 3 V, maximum 16 V
- Each analog, digital, capture and encoder input: minimum –0.3 V, maximum +5.3 V
- Each analog, digital, frequency and pulse output: minimum –25 mA, maximum +25 mA
- Each filtered pulse output: minimum –25 mA, maximum +25 mA
- Each H-bridge output: minimum –5 A, maximum +5 A
- Total current from/into all inputs and outputs (except power supply, voltage regulator and H-bridges): minimum –200 mA, maximum +200 mA
- Voltage regulator output: maximum 0.5 A (total)
- Operating ambient temperature: minimum 10 °C, maximum 50 °C

2. HARDWARE

The real-time control board is based on a dsPIC30F2012 digital signal controller. It has a total number of 8×16 bit inputs and 8×16 bit outputs capability. The inputs and outputs can be selected among the inputs and outputs listed above. The board is interfaced to the main computer that runs Matlab through a serial port. Two pulse-width modulation driven H-bridges with 5 A drive capability are included on the board to drive external actuators or loads. The functional block diagram of the board is shown in Figure 1, where A0–A7 are the analog inputs, B0–B1 are the analog outputs, C0–C1 are the capture inputs, D0_d0–D0_d7 are the digital inputs, E0–E1 are the encoder inputs, F0–F1 are the frequency outputs, G0_g0–G0_g7 are the digital outputs and H0–H1 are the pulse outputs; ADC represents the analog-to-digital converter, DAC represents the digital-to-analog converter, ICM represents the input-capture module, OCM represents the output-compare module, DIP represents the digital-input port, DOP represents the digital-output port, QEM represents the quadrature-encoder module and PWM represents the pulse-width modulator; FLs are the lowpass filters with outputs L0–L1 and HBs are the H-bridges with outputs P0–P1; and μC is the central microcontroller, UART is the universal-asynchronous-receiver-transmitter unit and PC is the host computer.

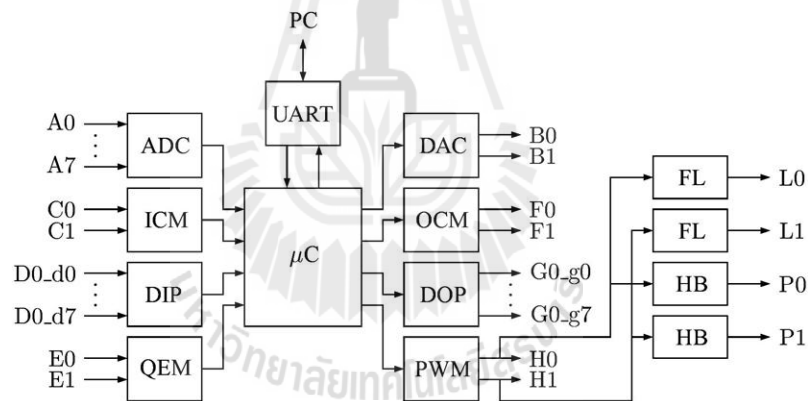


Figure 1. Functional block diagram of the board.

The layout of the board is shown in Figure 2. The inputs and outputs are connected to the board through standard pin header type connectors. The pins of all connectors are clearly indicated on the board for convenience. Access to the on-board 5 V, 0.25 A voltage regulator output is also provided for external light power supply requirements.

ค.2 การติดตั้ง Hardware กับโปรแกรม

1. ติดตั้งโปรแกรม MATLAB 2009a กับ Windows 7 32 Bit
2. ติดตั้ง Driver ของ PCI Serial Card ด้วยการเชื่อมต่อผ่านสาย Serial Crossover Cable
3. ติดตั้ง Real – Time Workshop และ Real – Time Windows Target
4. ติดตั้งโปรแกรมเสริมเพื่อใช้งานอุปกรณ์ Rapcon ด้วยไฟล์ rapcon2009a.exe ซึ่งในที่นี้

ใช้ MATLAB เวอร์ชัน 2009a สำหรับ Windows 7 32 Bit และจะมีไฟล์ rtwt_2009b_win7_fix.zip สำหรับการแก้ไข BUG สำหรับ Windows 7 มาด้วย ซึ่งการติดตั้ง ต้องทำทีละขั้นตอน ด้วยวิธีการดังนี้

5. เข้าไปหาไฟล์ที่ชื่อว่า rtwin_main.c ภายในคอมพิวเตอร์ เช่น

“C:\Program Files\MATLAB\R2009a\toolbox\rtw\targets\rtwin\src” แล้วเปลี่ยนชื่อไฟล์ rtwin_main.c เป็น rtwin_main.org และ copy ไฟล์ rtwin_main.c ในโฟลเดอร์ติดตั้งของ Rapcon มาใส่ไว้ใน Directory นี้

6. เข้าไปที่ Control Panel -> Device Manager เพื่อทำการเปลี่ยน Base Address และตรวจสอบ Comport Number ของ Serial Port หลังจากนั้นดูที่ Base Address ตัวแรกว่ามี I/O Range เท่าไร เช่น I/O Range EC80 - EC87, Base Address คือ EC80 ในเลขฐาน 16 ซึ่งมีค่าเท่ากับเลขฐานสองคือ 60544 แล้วเข้าโปรแกรม MATLAB ไปในโฟลเดอร์ไฟล์ติดตั้งของ Rapcon เปิดไฟล์ชื่อ rtwinpi.tlc และ rtwinpo.tlc แล้วทำการแก้ไขใน m.file ดังนี้

```
if DrvAddress == 5
    assign ::com = 1016
endif
```

สำหรับ DrvAddress คือ Comport Number และ assign ::com คือเลขฐานสองของ I/O Range ที่อ่านมาจาก Device Manager ดังที่กล่าวมาในข้างต้น

7. สำหรับ Windows 7 Real-Time Windows Target จะถูกป้องกันไว้ดังนั้นจะต้อง copy ไฟล์ rtwtkrnl.sys ใน rtwt_2009b_win7_fix.zip ที่โหลดมา ไปไว้ที่

“C:\Program Files\MATLAB\R2009b\toolbox\rtw\targets\rtwin\kernel\win32”

8. พิมพ์ “rtwintgt -install” ใน Command Window ของโปรแกรม MATLAB เพื่อติดตั้ง RTWT kernel เป็นอันเสร็จสมบูรณ์



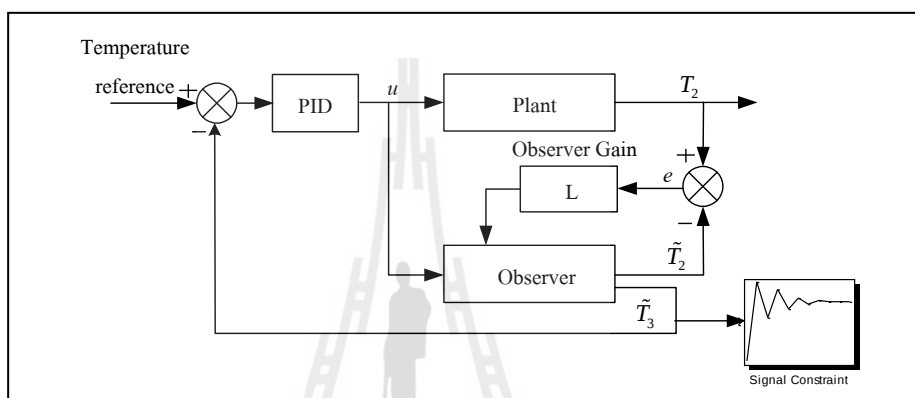
ภาคผนวก ง

การใช้โปรแกรม Simulink Response Optimization

ง.1 การใช้โปรแกรม Simulation Response Optimization

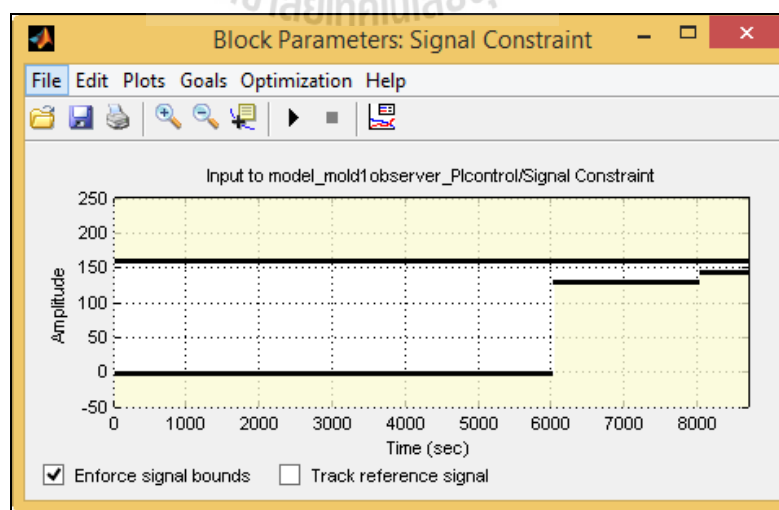
ง.1.1 สร้างแบบจำลองของระบบโดยใช้ Simulink โดยกำหนดตัวแปรและค่าเริ่มต้นของตัวแปรที่ต้องการให้โปรแกรมประมาณที่ทำให้ได้การตอบสนองที่ดีที่สุดตามขอบเขตที่กำหนด

ง.1.2 ติดตั้งตัวบังคับสัญญาณ Signal Constraint ที่ตำแหน่งของสัญญาณที่ต้องการบังคับในแบบจำลองที่สร้างขึ้น โดยตัว Signal Constraint block จะอยู่ใน Simulink Library ที่ชื่อว่า Simulink Response Optimization



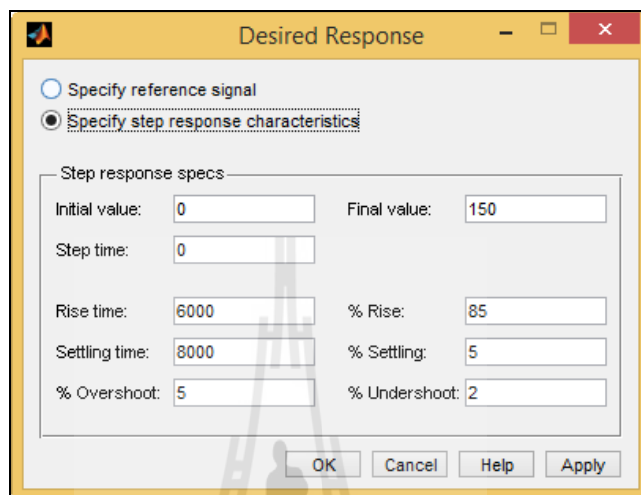
รูปที่ ง.1 แผนภาพแบบจำลองในโปรแกรม MATLAB ในส่วนของ Simulink

ง.1.3 Double – click ที่ตัว Signal Constraint block เพื่อแสดง Signal Constraint window



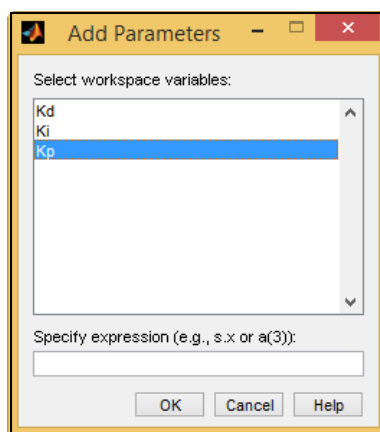
รูปที่ ง.2 แผนภาพแสดง Signal Constraint window

ง.1.4 กำหนดรูปแบบการตอบสนองของสัญญาณ Output ที่ต้องการบังคับ ซึ่งสัญญาณจะถูกบังคับให้อยู่ในขอบเขต ของสัญญาณ จากการเลือกที่เมนู Goals -> Desired Response... -> Specify step response characteristics จากนั้นก็ใส่ค่าต่างๆได้ตามต้องการ



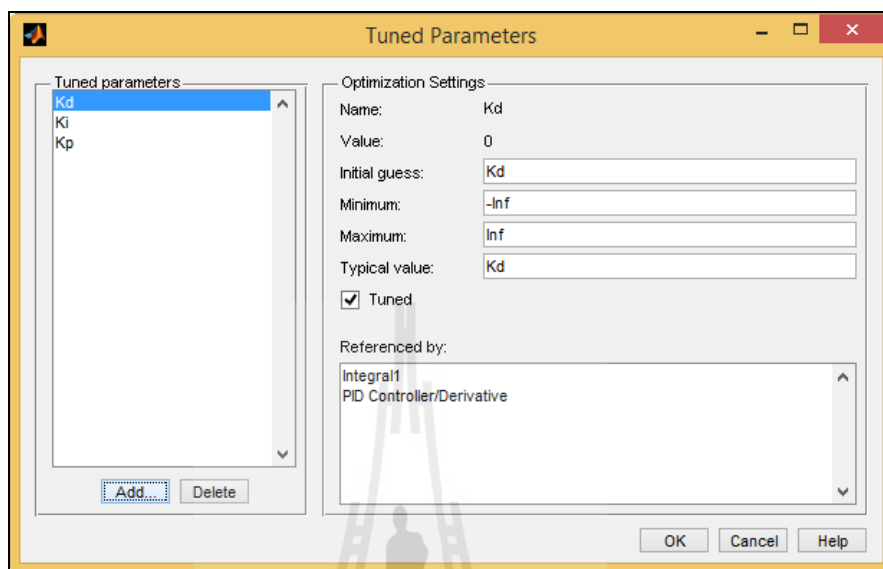
รูปที่ ง.3 แผนภาพแสดง Edit Desired Response

ง.1.5 เปิด Tuned Parameters Dialog Box จากการเลือก Optimization -> Tuned Parameters ในหน้าจอของ Signal Constraint Window จากนั้น Click เลือกพารามิเตอร์ที่ต้องการปรับแต่ง



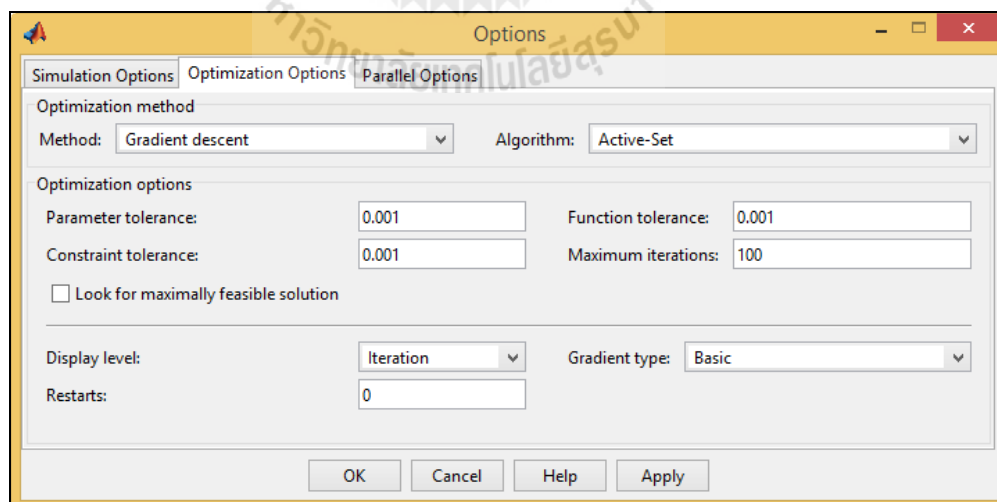
รูปที่ ง.4 แผนภาพแสดง Add Parameters

ง.1.6 ต้องกำหนดค่าเริ่มต้นของพารามิเตอร์แต่ละตัวด้วย รวมถึงขอบเขตที่ใช้ในการปรับค่า



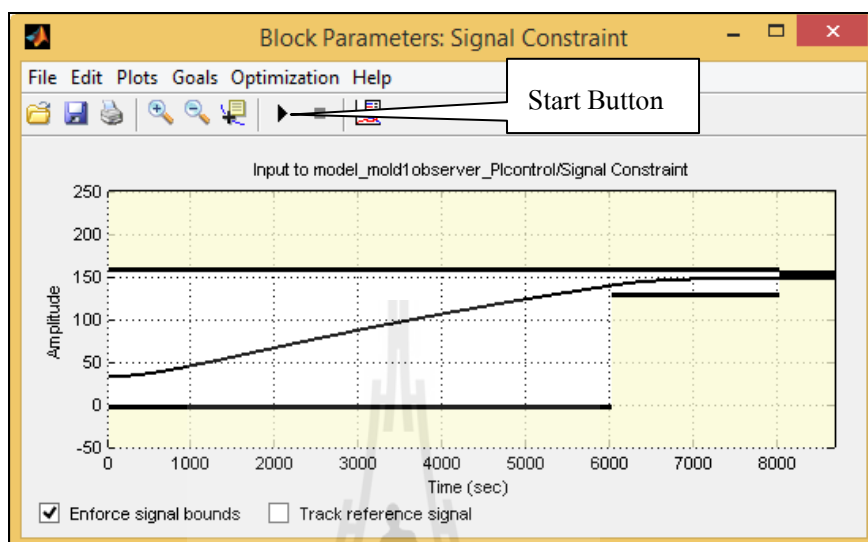
รูปที่ ง.5 แผนภาพแสดง Add Parameters

ง.1.7 เลือก Optimization Option บน Signal Constraint เพื่อกำหนดวิธีการ Optimization



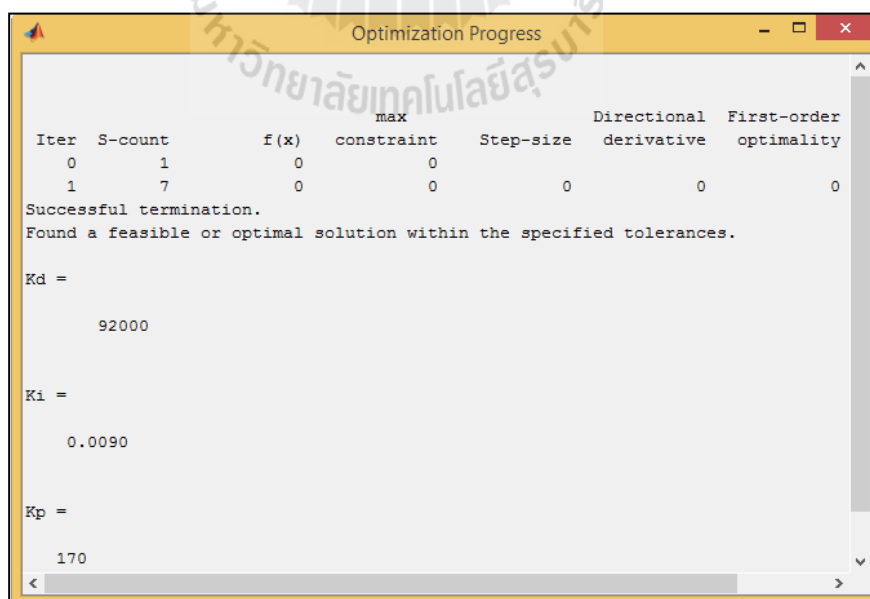
รูปที่ ง.6 แผนภาพแสดง Option ของการ Optimize

ง.1.8 Click ที่ Start Button ที่ Optimization menu เพื่อเริ่มการปรับแต่งพารามิเตอร์ เพื่อให้ได้สัญญาณที่อยู่ในขอบเขตบังคับ



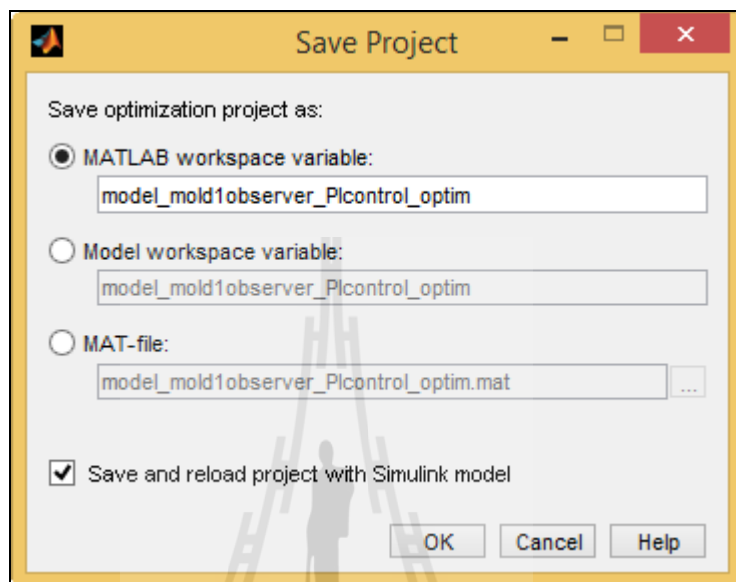
รูปที่ ง.7 แผนภาพแสดงการตอบสนองของสัญญาณในขอบเขต

จากนั้นจะแสดงความก้าวหน้าของการทำงานของโปรแกรม และแสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้ปรับแต่ง



รูปที่ ง.8 แผนภาพแสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้ปรับแต่ง

ง.1.9 ทำการ Save Project ซึ่งรวมถึงการตั้งค่าต่าง ๆ เช่น Constraints, Tuned Parameters, Uncertain Parameters และแบบจำลองด้วย โดยไปที่ File ในหน้าจอ Signal Constraint Window จากนั้นทำการเปิด Save Project Dialog Box ดังรูปข้างล่าง



รูปที่ ง.9 แผนภาพแสดงการ Save Project





ภาคผนวก จ

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

ณรงค์ศักดิ์ สีแก้ว วรพจน์ จำพิศ และ จิระพล ศรีเจริญผล. (2557). การออกแบบระบบควบคุม
อุณหภูมิในกระบวนการผลิตก๊าซอะซิโตน. การประชุมวิชาการเครือข่าย
วิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 28 (ME-NETT 28, DRC60) 10 หน้า 15 – 17
ตุลาคม. ขอนแก่น



DRC-60

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 28 ME NETT28
15-17 ตุลาคม 2557 จังหวัดขอนแก่น

การออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิในกระบวนการผลิตภาชนะเมลามีน

Temperature Control System Design in Melamine Container Production Process

ณรงค์ศักดิ์ สักแก้ว^{1*}, วรพจน์ ขำพิศ¹ และ จิระพล ศรีเสริฐผล¹

¹สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000
*ติดต่อ: E-mail: rong_pet@hotmail.com, เบอร์โทรศัพท์: 088-466-9703

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันภาชนะที่ทำจากวัสดุเมลามีนเป็นที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย เพราะมีความสวยงามและแข็งแรงทนทานต่อการใช้งาน ซึ่งกระบวนการอัดขึ้นรูปภาชนะเมลามีนเป็นกระบวนการผลิตที่สำคัญ ซึ่งจำเป็นต้องควบคุมอุณหภูมิของแม่พิมพ์ให้คงที่ โดยระบบควบคุมอุณหภูมิของแม่พิมพ์เป็นระบบควบคุมแบบปิดที่มีตัวควบคุมแบบ PID ผ่านรีเลย์แบบแม่เหล็ก เครื่องจักรที่ใช้ในกระบวนการอัดขึ้นรูปภาชนะจากวัสดุเมลามีนของบริษัทไทยซูเปอร์แวร์ จำกัด มหาชน มีจำนวนมากและอายุการใช้งานหลายปี ส่งผลให้อุณหภูมิของแม่พิมพ์ไม่เป็นไปตามความต้องการ ดังนั้นบทความนี้ได้นำเสนอการประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนของแม่พิมพ์ที่ใช้อัดขึ้นรูปภาชนะโดยใช้วิธีระบบปรับตัวได้ในการประมาณแบบจำลอง และออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอให้มีความเหมาะสมกับระบบ และควบคุมอุณหภูมิให้เป็นไปตามความต้องการ

คำหลัก: ระบบปรับตัวได้, แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอัดขึ้นรูปภาชนะเมลามีน, การระบุเอกลักษณ์ของระบบ

Abstract

Nowadays, the melamine is one of the most thermosetting plastic used for tableware such as plate, dishes and cup etc., because of the excellent hardness and high thermal resistance properties. In the manufacturing process, melamine is compressed and heated to form into the desire shape that the temperature control of compression mold is required. The temperature control system of mold in Sriithai Superware Public Company Limited (Thailand) has the close loop control system with PID controller. It has overshoot in the temperature response. Therefore, this paper presented the mathematical model of heat transfer in melamine extrusion machine using adaptive system and design PI controller for control the mold temperature.

Keywords: Adaptive system, Mathematical models of melamine container in extrusion machine, System Identification

DRC-60

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 28
15-17 ตุลาคม 2557 จังหวัดขอนแก่น



1. บทนำ

กระบวนการอัดขึ้นรูปภาชนะที่ทำจากวัสดุเมลามีน ซึ่งกระบวนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมลามีนเป็นกระบวนการผลิตที่สำคัญ สำหรับการควบคุมอุณหภูมิจะใช้ระบบควบคุมอุณหภูมิแบบปิดที่มีตัวควบคุมแบบ PID ผ่านรีเลย์แบบแม่เหล็ก เพื่อใช้ในการควบคุมอุณหภูมิของแม่พิมพ์ให้คงที่ ก่อนจะเริ่มกระบวนการผลิตทุกครั้งจะต้องผ่านกระบวนการอุ่นแม่พิมพ์ให้แม่พิมพ์มีอุณหภูมิที่ 150 – 170 องศาเซลเซียส จึงจะสามารถเริ่มกระบวนการอัดขึ้นรูปได้ เนื่องจากกระบวนการอุ่นแม่พิมพ์ของเครื่องอัดขึ้นรูปภาชนะเมลามีน จะใช้เวลาในกระบวนการอุ่นแม่พิมพ์นานประมาณ 2 ชั่วโมง ซึ่งบริษัทมีจำนวนเครื่องอัดขึ้นรูปภาชนะเมลามีนประมาณ 300 เครื่อง จึงทำให้มีการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้ามาก ปัญหาที่พบเครื่องอัดขึ้นรูปภาชนะเมลามีนมีการใช้งานมาเป็นระยะเวลานาน และปราศจากวิธีการปรับค่าตัวแปรของตัวควบคุมที่เหมาะสม จึงส่งผลต่อประสิทธิภาพในการควบคุมอุณหภูมิไม่เป็นไปตามความต้องการ

บทความที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย การศึกษาวิเคราะห์โครงสร้างและการตอบสนองของกระบวนการทำงานในรูปแบบเชิงความร้อนเพื่อนำไปสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้หลักการการถ่ายเทความร้อนที่ศึกษาเกี่ยวกับการพาความร้อนและการนำความร้อน [1] อย่างไรก็ตาม การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการทำงานเชิงความร้อนโดยวิธีการระบุเอกลักษณ์ระบบ ในการตอบสนองทางความร้อน [2-6] เพื่อหาสัมประสิทธิ์ของตัวแปรในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการออกแบบระบบควบคุมแบบฟuzzyที่เหมาะสมกับระบบ [7-10]

บทความนี้ได้นำเสนอการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอัดขึ้นรูปภาชนะจากวัสดุเมลามีน โดยใช้หลักการแลกเปลี่ยนความร้อนร่วมกับวิธีระบุเอกลักษณ์ที่มีเงินเนติกอัลกอริทึมในการประมาณค่าตัวแปรของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และนำไป

ออกแบบตัวควบคุมแบบ PI ในการควบคุมอุณหภูมิของแม่พิมพ์ ให้มีประสิทธิภาพตามความต้องการ

2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

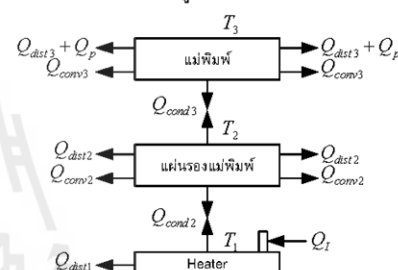
กระบวนการอัดขึ้นรูปภาชนะผลิตภัณฑ์เมลามีนเป็นการให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์ให้มีอุณหภูมิคงที่ตามรูปร่างของภาชนะนั้น โดยสามารถแบ่งเป็น 3 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 การจ่ายกระแสไฟฟ้าให้ผ่าน Heater

ส่วนที่ 2 แผ่นรองแม่พิมพ์

ส่วนที่ 3 แม่พิมพ์ (Mold)

ดังนั้นจึงใช้กฎอนุรักษพลังงานพิจารณาการถ่ายเทความร้อนของระบบในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนภาพการถ่ายเทความร้อนของระบบ

เมื่ออัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเท่ากับพลังงานความร้อนที่ไหลเข้าในระบบจะตามกฎการอนุรักษ์พลังงานดังนี้

$$mC_{p1} \frac{dT_1}{dt} = Q_I - Q_{cond2} - Q_{dist1} \quad (1)$$

$$mC_{p2} \frac{dT_2}{dt} = -Q_{cond2} - Q_{conv2} - Q_{cond3} - Q_{dist2} \quad (2)$$

$$mC_{p3} \frac{dT_3}{dt} = -Q_{cond3} - Q_{conv3} - (Q_{dist3} + Q_p) \quad (3)$$

จากสมการที่ (1), (2) และ (3) สามารถจัดรูปสมการให้อยู่ในเทอมการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ตำแหน่ง T_1 , T_2 และ T_3 ได้ดังนี้

DRC-60

$$C_1 \dot{T}_1 = I^2 RN - \frac{(T_1 - T_2)}{R_{cond2}} - Q_{dis1} \quad (4)$$

$$C_2 \dot{T}_2 = -\frac{(T_2 - T_1)}{R_{cond2}} - \frac{(T_2 - T_{sp})}{R_{conv2}} - \frac{(T_2 - T_3)}{R_{cond3}} - Q_{dis2} \quad (5)$$

$$C_3 \dot{T}_3 = -\frac{(T_3 - T_2)}{R_{cond3}} - \frac{(T_3 - T_{sp})}{R_{conv3}} - (Q_{dis3} + Q_p) \quad (6)$$

กำหนดให้ $C_1 = mC_{p1}$, $C_2 = mC_{p2}$ และ $C_3 = mC_{p3}$

เมื่อ

m คือ มวลของชิ้นงาน

I คือ ค่ากระแสไฟฟ้า

R คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าของแผ่น Heater

N คือ จำนวนแผ่น Heater

T_1 คือ อุณหภูมิที่แผ่น Heater

T_2 คือ อุณหภูมิที่แผ่นรองแม่พิมพ์

T_3 คือ อุณหภูมิที่แม่พิมพ์

$C_{p1,p2,p3}$ คือ ความจุความร้อนจำเพาะของแผ่น Heater, แผ่นรองแม่พิมพ์ และ แม่พิมพ์

C_1, C_2, C_3 คือ ความจุความร้อนของแผ่น Heater, แผ่นรองแม่พิมพ์ และ แม่พิมพ์

Q คือ พลังงานที่ได้จากการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับแผ่น Heater

Q_{cond} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนแบบการนำ

Q_{conv} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนแบบการพา

Q_{dis1}, Q_{dis2} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนจากการ

Q_{dis3} ระบายภายนอกที่แผ่น Heater, แผ่นรองแม่พิมพ์ และ แม่พิมพ์

Q_p คือ การสูญเสียความร้อนของกระบวนการผลิตภาชนะเมลามีน

ในการพิจารณาหาค่าประมาณตัวแปรของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะจัดสมการที่ (4), (5) และ (6) ให้อยู่ในรูปสมการปริภูมิสแตต จึงได้กำหนดอุณหภูมิเป็นตัวแปรสแตตในแต่ละส่วนคือ T_1 , T_2 และ T_3 โดยมีอินพุตของระบบคือ Q , ดังสมการที่ (7)

$$\begin{bmatrix} C_1 \dot{T}_1 \\ C_2 \dot{T}_2 \\ C_3 \dot{T}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a & a & 0 \\ a & -(a+b+c) & c \\ 0 & c & -(c+d) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ b \\ d \end{bmatrix} T_{sp} + \begin{bmatrix} Q_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_{dis1} \\ Q_{dis2} \\ (Q_{dis3} + Q_p) \end{bmatrix} \quad (7)$$

โดยที่

$$a = \frac{1}{R_{cond2}}, b = \frac{1}{R_{conv2}}, c = \frac{1}{R_{cond3}}, d = \frac{1}{R_{conv3}}$$

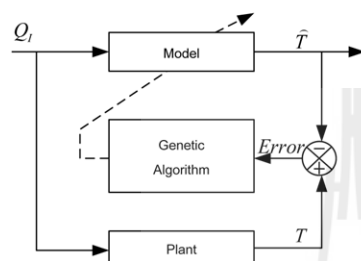
3. การประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยวิธีจิ้นเนติกอัลกอริทึม

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีตัวแปรของโครงสร้างที่ไม่ทราบค่า จึงใช้เทคนิคการระบุเอกลักษณ์ระบบ (System Identification) เป็นการระบุเอกลักษณ์ระบบพลวัตแบบวงเปิด จำเป็นต้องอาศัยข้อมูลความรู้เกี่ยวกับอินพุตและเอาต์พุตของระบบจากการทดลองและการตรวจสอบวัดอย่างเหมาะสม ที่อาศัยการคำนวณเชิงตัวเลขแบบกำลังสองที่น้อยที่สุด (Least Squares) เป็นดัชนีบ่งชี้คุณภาพของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าเอาต์พุตจริงที่ได้จากข้อมูลการทดลองและค่าเอาต์พุตที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อค้นหาตัวแปรที่ทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สมบูรณ์ที่สุด การระบุเอกลักษณ์ระบบพลวัตแบบวงเปิดจะใช้วิธีการค้นหาแบบจิ้นเนติกอัลกอริทึม ซึ่งเป็นวิธีการค้นหาทางปัญญาประดิษฐ์ที่ทรงประสิทธิภาพ ปัจจุบันเป็นที่ยอมรับในประสิทธิภาพและมีการนำไปประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในการแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด จิ้นเนติกอัลกอริทึมหรือเรียกโดยย่อว่า "GA" ดังนั้นจึงใช้วิธีการจิ้นเนติกอัลกอริทึมเพื่อประมาณค่าตัวแปรของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากรูปที่ 2 จะเก็บข้อมูล อินพุต คือ ค่ากระแสไฟฟ้า (Q) และ เอาต์พุตคือค่าอุณหภูมิ (T) แบบวงเปิดเพื่อนำมาเป็น plant ให้กับระบบ ส่วน

DRC-60

แบบจำลอง (Model) จะใช้ค่าอินพุตเดียวกับ Plant ซึ่ง
จะนำค่าเอาต์พุตของ Plant ไปเปรียบเทียบกับค่า
เอาต์พุตของแบบจำลอง จะเป็นค่าความคลาดเคลื่อน
(Error) เพื่อใช้ในการปรับค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปร
จนกว่าจะได้ค่าตัวแปรที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความสมบูรณ์



ตารางที่ 1 ค่าตัวแปรที่ได้จากการประมาณค่า

Parameter	Ga1	Ga2	Ga3	mean
a	24.000	24.001	24.000	24.000
b	9.000	9.002	9.001	9.001
c	43.945	43.950	43.943	43.946
d	0.447	0.450	0.449	0.449
C1	799.995	799.987	799.999	799.994
C2	41,000.376	41,000.372	41,000.350	41,000.366
C3	52,250.181	52,250.175	52,249.005	52,249.787
Q_{dist1}	0.00024	0.00031	0.00027	0.00027
Q_{dist2}	0.00275	0.00268	0.00273	0.00272
Q_{dist3}	0.00011	0.00013	0.00012	0.00012

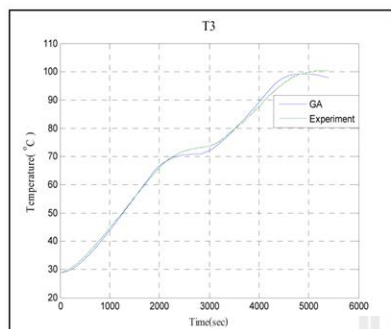
ผลของการระบุเอกลักษณ์ของระบบวงเปิด เมื่อ
นำค่า mean ที่ได้จากตารางที่ 1 แทนค่าตัวแปรใน
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อดูผลการตอบสนอง
ของแบบจำลองเทียบกับผลการทดลอง ผลที่ได้แสดง
ดังรูปที่ 3 กราฟเส้นสีน้ำเงินแสดงผลการตอบสนองอุณหภูมิ
(T_s) ของแบบจำลองจากการประมาณค่าตัวแปร ส่วน
กราฟเส้นสีเขียวแสดงผลการตอบสนองอุณหภูมิ (T_s) ของ
การทดลองจริง จะเห็นได้ว่าผลการตอบสนองมีความ

รูปที่ 2 การระบุเอกลักษณ์แบบวงเปิด

โดยจะเก็บผลการทดลองแบบวงเปิดโดยใช้การ
เปิดปิดรีเลย์แบบแม่เหล็ก เพื่อตัดต่อกระแสไฟฟ้าที่
จ่ายให้กับแผ่น Heater แทนตัวควบคุม โดยในการทำ
การทดลองเปิดปิดรีเลย์แบบแม่เหล็ก จะทำการเปิด
ปิดเป็นจำนวน 2 ครั้ง ซึ่งกำหนดค่าเริ่มต้นในการรัน
โปรแกรมดังนี้ $R = 45 \Omega$, $T_{sur} = 32^\circ C$ และ $N = 3$
ส่วนตัวแปรที่ไม่ทราบค่าจะใช้การประมาณค่าตัวแปร
ด้วยโปรแกรมจีนเนติกอัลกอริทึมเพื่อหาค่าที่เหมาะสม
ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 1

ใกล้เคียงกัน แสดงว่าค่าตัวแปรที่ได้สามารถทำให้
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความสมบูรณ์ในระดับ
หนึ่ง

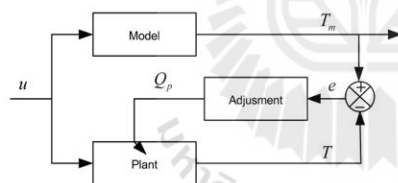
DRC-60



รูปที่ 3 ผลการตอบสนองของอุณหภูมิ (T_3)

4. การประมาณการสูญเสียความร้อน

ในการประมาณการสูญเสียความร้อนของกระบวนการผลิตภาชนะเมลามีนมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยใช้วิธีระบบปรับตัวได้ (Adaptive system) ในการสร้างอัลกอริทึมเพื่อประมาณฟังก์ชันเปลี่ยนแปลงตามเวลาของการสูญเสียความร้อนของระบบเป็นไปตามแบบจำลองอ้างอิง ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 แผนภาพหลักการทำงานของระบบปรับตัวได้

การประมาณค่าการสูญเสียความร้อนของกระบวนการผลิตภาชนะเมลามีนโดยใช้แบบจำลองอ้างอิงที่ปรับตัวได้ ซึ่งตัว Adjustment เป็นอัลกอริทึมที่รับค่าเอาต์พุตของแบบจำลอง (T_m) , ค่าเอาต์พุตของ Plant (T) และ สัญญาณอินพุต (u) ทำหน้าที่ปรับตัวแปรของ Plant คือค่าการสูญเสียความร้อน (Q_p) ของระบบ เพื่อให้ระบบมีการตอบสนองเช่นเดียวกับแบบจำลองอ้างอิง

4.1 ระบบปรับตัวได้

ใช้ MIT rule ดังนั้นหลักการทำงานของตัวชดเชยแบบปรับตัวคือการปรับค่าตัวแปร (Q_p) ให้ความแตกต่างระหว่างเอาต์พุตทั้งสองหมดไปทำได้โดยกำหนดให้ Loss function (J) จะมีค่าดังสมการที่ 8

$$J(Q_p) = \frac{1}{2} e^2 \quad (8)$$

การเปลี่ยนแปลงของตัวแปร (Q_p) ในทิศทาง Negative gradient of Loss function (J) คือ

$$\frac{\partial Q_p}{\partial t} = -\gamma \frac{\partial J}{\partial Q_p} = -\gamma e \frac{\partial e}{\partial Q_p} \quad (9)$$

ซึ่งพิจารณาการเปลี่ยนอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิ T_2 และ T_3 ดังนั้น Transfer function คือ

$$G(s) = \frac{T_3(s)}{T_2(s)} \quad (10)$$

กำหนดให้ Transfer function ของ Plant

คือ $kG(s)$ และ Transfer function ของแบบจำลองคือ $G_m(s) = k_o G(s)$ ซึ่งใช้หลักการ feedforward control แสดงดังนี้

$$u = Q_p u_c \quad (11)$$

เมื่อ u คือสัญญาณควบคุม และ u_c คือสัญญาณอินพุต ส่วนสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากระบบ Transfer function คือ $Q_p kG(s)$ ซึ่งจะเท่ากับ $G_m(s)$ จะได้ตัวแปรในการปรับค่า (Q_p) คือ

$$Q_p = \frac{k_o}{k} \quad (12)$$

เมื่อนำสัญญาณเอาต์พุตของ plant เทียบกับแบบจำลอง จะได้ค่าความผิดพลาด (e) คือ

$$e = T - T_m = kG(p)Q_p u_c - k_o G(p)u_c \quad (13)$$

เมื่อ T คือเอาต์พุตของ plant, T_m คือเอาต์พุตของแบบจำลอง, Q_p คือตัวแปรปรับค่า และ $p = d/dt$ จึงกำหนดให้ sensitivity derivative เท่ากับ

$$\frac{\partial e}{\partial Q_p} = kG(p)u_c = \frac{k}{k_o} T_m \quad (14)$$

DRC-60

ใช้ MIT rule จะได้

$$\frac{de}{dt} = -\gamma' \frac{k}{k_o} T_m e = -\gamma T_m e \quad (15)$$

เมื่อ $\gamma = \gamma' k / k_o$, γ คือ อัตราการปรับตัว
ในการวิเคราะห์ของ MRAS ตัวแปร (Q_p) ที่ใช้ใน
การปรับค่าเป็น time – varying แสดงดังนี้

$$G(p)(Q_p u) \quad (16)$$

เมื่อ $p = d/dt$ ถ้า $G(p) = p$ จะเท่ากับ

$$G(p)(Q_p u) = p(Q_p u) = Q_p \frac{du}{dt} + u \frac{dQ_p}{dt} \quad (17)$$

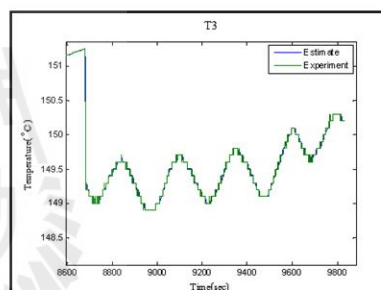
4.2 ผลการประมาณการสูญเสียความร้อน

ผลจากการประมาณค่าการสูญเสียความร้อนโดย
วิธีระบบปรับตัวได้ในการสร้างอัลกอริทึมเพื่อปรับค่า
การสูญเสียความร้อน (Q_p) ให้มีผลการตอบสนองของ
แบบจำลอง มีลักษณะคล้ายกับผลการทดลองทั้งหมด
2 ครั้ง ดังรูปที่ 5, 6 จะแสดงการเปลี่ยนแปลงของ
อุณหภูมิของกระบวนการผลิตภาชนะเมลามีนและรูปที่
7, 8 จะแสดงค่าการสูญเสียความร้อนที่ใช้ในการปรับ
เพื่อให้แบบจำลองมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

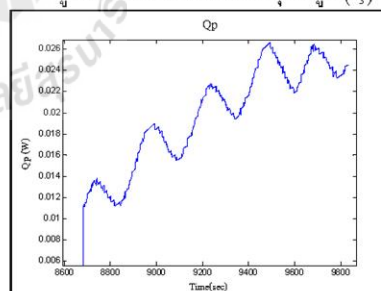
เมื่อแม่พิมพ์มีอุณหภูมิคงที่ประมาณ 151
องศาเซลเซียสจะสามารถเริ่มการผลิตชิ้นแรกได้
จากรูปที่ 5 เป็นการทดลองผลิตครั้งที่ 1 จะเริ่มผลิตที่
เวลา 8,680 วินาที เริ่มโดยใส่ก้อนเมลามีนที่มีอุณหภูมิ
เริ่มต้นที่ 100 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการอัด
แม่พิมพ์ใช้ระยะเวลาจนถึง 8,815 วินาที เมื่อถึงเวลาก็
จะทำการเปิดแม่พิมพ์ออกเพื่อนำงานออกจาก
แม่พิมพ์และ เป่าทำความสะอาดแม่พิมพ์ถึงเวลา
8,931 วินาที ช่วงเวลานี้เป็นการรอวัตถุดิบที่เป็นผง
เมลามีนผ่านการให้ความร้อนด้วยเตาไมโครเวฟให้มี
อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จะมีลักษณะเป็นก้อน
เล็ก ถึงจะสามารถผลิตงานชิ้นต่อไปได้ การผลิตงาน
จะใช้เวลาประมาณ 4 นาทีต่อ 1 ชิ้น ชิ้นที่สองเริ่มโดย
การใส่วัตถุดิบเข้าไปเหมือนเดิมจากนั้นทำการอัดใช้

ระยะเวลาถึง 9,070 วินาที ถึงเวลาก็เปิดแม่พิมพ์ออก
เพื่อนำชิ้นงานออกถึงเวลา 9,186 วินาที ชิ้นที่สามใช้
ระยะเวลาอัดถึง 9,317 วินาที เปิดแม่พิมพ์นำชิ้นงาน
ออกถึง 9,436 วินาที ชิ้นที่สี่ใช้ระยะเวลาอัดถึง 9,571
วินาที เปิดแม่พิมพ์นำชิ้นงานออกถึง 9,632 วินาที
และชิ้นที่ห้าใช้ระยะเวลาอัดถึง 9,765 วินาที เปิด
แม่พิมพ์นำชิ้นงานออกถึง 9,830 วินาที ส่วนการผลิต
ครั้งที่ 2 อาจจะใช้เวลาไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับผู้ควบคุม
เครื่อง แต่ช่วงเวลาที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปเท่ากัน ต่างกัน
เฉพาะช่วงเวลาเตรียมวัตถุดิบ

การทดลองครั้งที่ 1



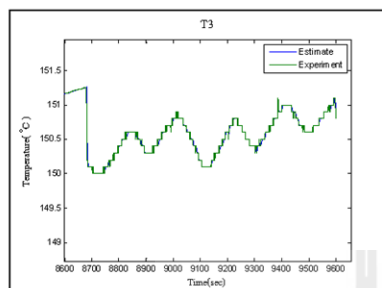
รูปที่ 5 ผลการตอบสนองของอุณหภูมิ (T_3)



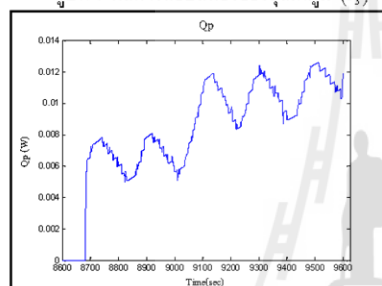
รูปที่ 6 การสูญเสียความร้อนของกระบวนการ
ผลิต

DRC-60

การทดลองครั้งที่ 2



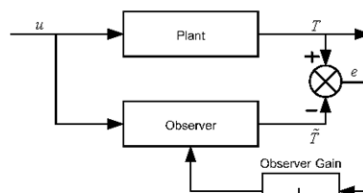
รูปที่ 7 ผลการตอบสนองของอุณหภูมิ (T_3)



รูปที่ 8 การสูญเสียความร้อนของกระบวนการผลิต

5. ตัวประมาณค่าสแตตแบบอันดับเต็ม

ในทางปฏิบัติตัวแปรสแตตของระบบที่ทำการศึกษานั้นไม่สามารถวัดค่าได้โดยตรง ดังนั้นหากมีความจำเป็นต้องทราบค่าตัวแปรสแตตของระบบเพื่อนำไปใช้ประโยชน์เพื่อการควบคุมระบบจึงต้องมีการประมาณค่าโดยใช้ตัวสังเกต ทั้งนี้ระบบต้องมีคุณสมบัติในการสังเกตได้ หลักการทำงานของตัวสังเกตจะนำค่าความแตกต่างระหว่างเอาต์พุตของระบบที่ต้องการจะประมาณค่าตัวแปรสแตต และเอาต์พุตจากระบบของตัวสังเกตมาประมวลผลผ่านค่าอัตราขยาย (Observer Gain) ของตัวสังเกตเพื่อลดค่าความผิดพลาดระหว่างทั้งสองระบบ แสดงหลักการทำงานดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 แผนภาพระบบประมาณค่าสแตตหรือตัวสังเกตอันดับเต็ม

ระบบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่จะทำการควบคุมมีรูปแบบดังนี้

$$\dot{T} = AT + Bu + Dw \quad (18)$$

$$y = CT \quad (19)$$

การออกแบบตัวประมาณค่าสแตตของระบบที่ต้องการควบคุมจะมีรูปแบบดังนี้

$$\dot{\hat{T}} = A\hat{T} + Bu + Dw \quad (20)$$

$$\hat{y} = C\hat{T} \quad (21)$$

กำหนดค่าผิดพลาดของการประมาณค่าสแตตได้ตั้งสมการที่ 22

$$e = T - \hat{T} \quad (22)$$

จากสมการที่ 18, 20 และ 22 สมการพลวัตของสัญญาณผิดพลาดสามารถเขียนได้คือ

$$\dot{e} = Ae \quad (23)$$

โดยที่

$$A = \begin{bmatrix} \frac{-a}{C_1} & \frac{a}{C_1} & 0 \\ \frac{a}{C_2} & \frac{-(a+b+c)}{C_2} & \frac{c}{C_2} \\ 0 & \frac{c}{C_3} & \frac{-(c+d)}{C_3} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \frac{RN}{C_1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, C = [0 \ 1 \ 0]$$

DRC-60

$$\text{และ } D = \begin{bmatrix} -Q_{dist1} \\ \frac{b \cdot T_{air}}{C_2} - Q_{dist2} \\ \frac{d \cdot T_{air}}{C_3} - (Q_{dist3} + Q_p) \end{bmatrix}$$

เราสามารถตรวจสอบคุณสมบัติความสังเกตได้โดยพิจารณาเมตริกซ์ความสังเกตได้ดังนี้

$$\text{Observability matrix} = P = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \end{bmatrix} \quad (24)$$

ระบบจะมีคุณสมบัติความสังเกตได้ก็ต่อเมื่อค่าลำดับขั้นของเมตริกซ์ความสังเกตได้เท่ากับ n คือ

$$\text{rank}[P] = 3 \quad (25)$$

การออกแบบ Observer Poles จะกำหนดค่า $\zeta = 0.7$ คือ อัตราส่วนความหน่วงของตัวสังเกตและคำนวณหา ω_n คือค่าความถี่ธรรมชาติของตัวสังเกตจากเวลาเข้าที่ (setting time) กำหนด $t_s = 6,600 \text{ sec}$ ที่ 2% จะได้ตำแหน่งโพล S_1 และ S_2 ดังสมการที่ 26

$$S_{1,2} = -\zeta\omega_n \pm \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (26)$$

ส่วนตำแหน่งโพล S_3 จะกำหนดเป็น 10 เท่าของตำแหน่งโพล S_1 และ S_2 บนแกนจริง จากนั้นคำนวณหา L คือค่าอัตราขยายได้ดังนี้

$$L = \text{acker}(A, B, S) \quad (27)$$

สมการของตัวสังเกตอันดับเต็มในรูปแบบของ State Space Form ได้ดังสมการที่ 28 และ 29

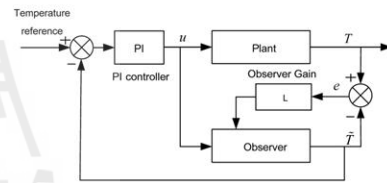
$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{T}}_1 \\ \dot{\hat{T}}_2 \\ \dot{\hat{T}}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{T}_1 \\ \hat{T}_2 \\ \hat{T}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ L_1 \\ L_2 \\ L_3 \end{bmatrix} e + [D]w \quad (28)$$

$$\dot{\hat{y}} = [0 \ 1 \ 0] \begin{bmatrix} \hat{T}_1 \\ \hat{T}_2 \\ \hat{T}_3 \end{bmatrix} \quad (29)$$

โดยที่ w นั้นเป็นสัญญาณรบกวนหรือ Disturbance input

6. การออกแบบตัวควบคุมแบบพีโอสำหรับเครื่องอัดขึ้นรูปภาชนะเมลามีน

จากการศึกษาระบบการทำงานของเครื่องมีระบบควบคุมอุณหภูมิที่แผ่นรองแม่พิมพ์ ซึ่งเป็นแบบปิดที่มีตัวควบคุมแบบ PID ผ่านรีเลย์แบบแม่เหล็ก ลักษณะการควบคุมมีผลต่อประสิทธิภาพของอุณหภูมิที่แม่พิมพ์ ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตชิ้นงาน ดังนั้นจึงได้ทำการออกแบบตัวควบคุมใหม่เป็นแบบพีโอโดยจะควบคุมอุณหภูมิที่แม่พิมพ์โดยตรง ซึ่งอุณหภูมิที่แม่พิมพ์ ไม่สามารถวัดได้จริงในทางปฏิบัติ ดังนั้นจึงใช้ค่าอุณหภูมิที่ได้จากการประมาณค่าสแตตแบบอันดับเต็มเพื่อเป็นค่าป้อนกลับให้กับระบบควบคุม แสดงหลักการทำงานดังรูป 10



รูปที่ 10 แผนภาพระบบควบคุมแบบปิดของเครื่องอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่มีตัวควบคุมแบบพีโอ สำหรับการออกแบบค่าพีโอ งานวิจัยนี้ใช้วิธี Response optimization ของโปรแกรม MATLAB เพื่อคำนวณหาค่าพีโอที่เหมาะสม โดยการกำหนดรูปแบบการตอบสนองของสัญญาณเอาต์พุต ที่มีต่ออินพุตแบบขั้นบันไดให้มี Percent Overshoot ไม่เกิน 5%, ค่า Rise Time น้อยกว่า 6,000 วินาที และค่า Setting time น้อยกว่า 8,000 วินาที ซึ่งโปรแกรม MATLAB จะใช้วิธี Gradient Descent เพื่อหาค่าตัวแปรของตัวควบคุมพีโอคือ K_p และ K_i

การหาค่าตัวแปรของตัวควบคุมพีโอที่เหมาะสมที่สุดจากการตอบสนองโดยวิธี Gradient Descent แบบมีเงื่อนไข (Output constrain) เพื่อหาค่าตัวแปร K_p และ K_i สำหรับฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ

DRC-60

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 28
15-17 ตุลาคม 2557 จังหวัดขอนแก่น



$$f(x_k) = \sum_{i=1}^n (T_i - (T_c)_i)^2$$

โดยที่ x_k คือ K_p และ K_i , T_i - ค่าอุณหภูมิของแบบจำลอง และ T_c - ค่าอุณหภูมิที่ Output constraint

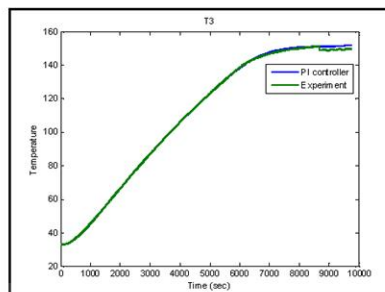
วิธี Gradient Descent เป็นระเบียบวิธีขั้นพื้นฐานของการแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดโดยพิจารณา Gradient ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ถ้าเคลื่อนจุดคำตอบไปในทิศทางของค่า Gradient จากจุดเริ่มต้นใดๆ การเคลื่อนที่ตำแหน่งของผลเฉลยในทิศทางลบ Gradient จะส่งผลให้การลดลงของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์มากที่สุด

7. ผลการทดลอง

ตารางที่ 2 ค่าตัวแปรตัวควบคุมพีไอ

No. Test	PI control parameter	
	K_p	K_i
1	0.5248	0.0000248
2	0.5567	0.0000234
3	0.5467	0.0000249
ค่าเฉลี่ย	0.5427	0.0000244

จากตารางที่ 2 นำค่าเฉลี่ยของตัวแปรตัวควบคุมพีไอ ที่ได้จากการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ค่าตัวแปรของตัวควบคุมแบบพีไอที่ได้คือ $K_p = 0.5427$ และ $K_i = 0.0000244$ สามารถควบคุมอุณหภูมิในกระบวนการผลิตภาชนะเมลามีนเป็นไปตามความต้องการได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ใช้ตัวควบคุมแบบ PID เดิม แสดงผลการตอบสนองดังกราฟที่ 11



รูปที่ 11 กราฟแสดงผลการตอบสนองระหว่างการออกแบบตัวควบคุมพีไอกับตัวควบคุมแบบ PID เดิม

8. สรุปผลการทดลอง

บทความนี้ได้ศึกษาการทำงานของเครื่องอัดขึ้นรูปภาชนะเมลามีน เพื่อนำมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และได้ใช้การระบุเอกลักษณ์โดยใช้วิธีการค้นหาแบบจีนเนติกอัลกอริทึม โดยวิเคราะห์การตอบสนองของแบบจำลองเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลอง เพื่อประมาณค่าตัวแปรของแบบจำลองของเครื่องอัดขึ้นรูปภาชนะเมลามีน และใช้วิธีระบบปรับตัวได้ในการสร้างอัลกอริทึมเพื่อประมาณค่าการสูญเสียความร้อนของกระบวนการผลิตจานเมลามีนที่ทำให้อุณหภูมิระหว่างการผลิตเปลี่ยนแปลงไม่มาก ผลการทดลองซึ่งสามารถหาค่าการสูญเสียความร้อนที่มีผลการตอบสนองของอุณหภูมิใกล้เคียงกับแบบจำลองอ้างอิงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจะสามารถประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการอัดขึ้นรูปภาชนะเมลามีนไปใช้ในการออกแบบตัวควบคุมพีไอที่มีความเหมาะสมกับระบบ เพื่อให้การตอบสนองของอุณหภูมิเป็นไปตามความต้องการได้

9. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทางมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และบริษัท ศรีไทยซูเปอร์แวร์ จำกัด มหาชน ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัย

DRC-60

10. เอกสารอ้างอิง

- [1] Shimpei Hashida, Ikuo Nanno, Nobutomo Matsunaga and Shigeyasu Kawaji. (2007). Experimental Study on Uniform Temperature Control for Two-dimensional Heating Plate Control, International Conference on Control, Automation and Systems, Oct. 17-20, 2007 in COEX, Seoul, Korea.
- [2] Liu Yucheng, Liu Yubin, Li Taifu, Su Yingying, Wuang Debiao. (2009). A Method of Synthetic Optimizing Adjustment Based on Fuzzy Genetic Arithmetic for Control of Electric Heater, International Forum on Computer Science-Technology and Applications, Dec. 25-27, 2009 in Chongqing.
- [3] อาทิตย์ ศรีแก้ว (2552). ปัญหาเชิงคำนวณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา
- [4] John J.Grefenstette. (1986). Optimization of Control Parameters for Genetic Algorithms, IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics, Vol.SMC-16(1), January/ February 1986, pp. 122 - 128.
- [5] Yeong-Koo Yeo and Tae-In Kwon. (2004). Control of pH Processes Based on the Genetic Algorithm, Korean J. Chem. Eng, 21(1), 6-13.
- [6] K. J. Astrom and Wittenmark. (1995). Adaptive Control (Second edition). Addison-Wesley Publishing Company, Inc. Korean J. Chem. Eng., 21(5), 6-13.
- [7] วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ (2538). การควบคุมระบบพลศาสตร์, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [8] จิระพล ศรีเสวีรุผล, สุพจน์ ปลั่งพิมาย และ ภาวิน จายาล (2553). การวิเคราะห์และออกแบบตัวควบคุมแบบปรับตัวได้สำหรับเตาอบหลอดอินฟราเรดในกระบวนการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์, วารสารวิจัยและ
- พัฒนา มจร, ปีที่ 33 ฉบับที่ 3 กรกฎาคม - กันยายน 2553, หน้า 235 - 248.
- [9] Yeong-Koo Yeo, Tae-In Kwon and Kwang Hee Lee. (2004) An Energy Effective PID Tuning Method for the Control of Polybutadiene Latex Reactor Based on Closed-loop Identification. Korean J. Chem. Eng., 21(5), 935-941.
- [10] Lin, C.A. and Jan, Y.K. (2001). Control System Design for a Rapid Thermal Processing System. IEEE Transactions on Control System Technology, Vol. 9(1), pp. 122-129.

ประวัติผู้เขียน

นายณรงค์ศักดิ์ สีแก้ว เกิดเมื่อวันที่ 28 กันยายน พ.ศ. 2530 ที่อำเภอเมือง จังหวัดสระบุรี เริ่มการศึกษาระดับประถมศึกษาชั้นปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนอนุบาลเสาไห้ จังหวัดสระบุรี ระดับมัธยมศึกษาชั้นปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนเสาไห้ “วิมลวิทยานุกูล” จังหวัดสระบุรี และสำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมาเมื่อปี พ.ศ. 2552 จากนั้นได้ศึกษาต่อในระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ณ สถาบันการศึกษาเดิม โดยได้รับทุนการศึกษาสำหรับผู้มีศักยภาพเข้าศึกษาต่อระดับบัณฑิตศึกษา

ขณะที่ศึกษาต่อในระดับมหาบัณฑิต ได้มีประสบการณ์เป็นผู้สอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล จำนวน 6 รายวิชาดังนี้

- (1) วิชาปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล 3
- (2) วิชาปฏิบัติการวิศวกรรมการผลิต 3
- (3) วิชาปฏิบัติการวิศวกรรมอากาศยาน 3
- (4) วิชาปฏิบัติการวิศวกรรมยานยนต์ 4
- (5) วิชาเขียนแบบวิศวกรรม 1
- (6) วิชาเขียนแบบวิศวกรรม 2

ระหว่างศึกษาได้นำเสนอผลงานวิชาการเรื่อง **“Temperature Control System Design in Melamine Container Production Process”** ในการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 28 ในระหว่างวันที่ 15 – 17 ตุลาคม 2557 ณ จังหวัดขอนแก่น มีรายละเอียดปรากฏดังแสดงไว้ในภาคผนวก จ.