

แบบจำลองกระบวนการ
PROCESS SIMULATOR



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 45862
วัน, เดือน, ปี 19 ก.พ. 2546

b.....
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม
ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PROCESS SIMULATOR



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

2001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองปริญญาโท

หัวข้อปริญญาโท แบบจำลองกระบวนการ
PROCESS SIMULATOR
นักศึกษาผู้จัดทำ นายประพัฒน์ สกลรัตน์กุลชัย รหัสประจำตัว 42015440
นายสิริพงษ์ พงษ์ศักดิ์ศิริกุล รหัสประจำตัว 42015454
นายสหัชพัชญ์ อชพงศ์สิน รหัสประจำตัว 42015460
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมการวัดคุม
ปีการศึกษา 2544

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาโท	ลายมือชื่อ
ผศ. วิริยะ กองรัตน์	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 27 มีนาคม 2545
สถานที่สอบ ณ ห้องสอบปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม

ภาควิชารับรองแล้ว

(ผศ.ประสิทธิ์ จุลเสวีวงศ์)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	แบบจำลองกระบวนการ
	PROCESS SIMULATOR
นักศึกษาผู้จัดทำ	นาย ประพัฒน์ สกฤตตันกุลชัย
	นาย ศิริพงษ์ พงษ์ทัตศิริกุล
	นาย สหัชพัชญ์ อชพงค์สิน
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ. วิริยะ กองรัตน์
ปีการศึกษา	2544

บทคัดย่อ

แบบจำลองกระบวนการ เป็นการนำคอมพิวเตอร์มาทำการจำลองกระบวนการ เพื่อใช้ในการศึกษา หรือวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบต่างๆ ที่มีผลต่อระบบ โดยสามารถที่จะจำลองการควบคุมกระบวนการได้ โดยใช้ตัวควบคุมแบบ PID ในการสร้างแบบจำลองกระบวนการนั้น จะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งได้มาจากสมการคุณลักษณะของกระบวนการ มาทำการวิเคราะห์ โดยใช้วิธีเชิงตัวเลข ในการแก้ปัญหาสมการเชิงอนุพันธ์ของกระบวนการ แล้วเขียนออกมาในรูปของโปรแกรม ซอฟต์แวร์ โดยที่สามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอก เพื่อใช้ในการรับค่าสถานะแล้วนำมาแสดงผล และทำการส่งผ่านค่าที่ได้เพื่อนำไปควบคุมกระบวนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Process Simulator
Authors	Mr. Prapat Sakulrattanakulchai Mr. Siriphong Phongtadsirikul Mr. Sahagpat Achaphongsin
Thesis Advisor	Asst.Prof. Viriya Kongratana
Year	2001

ABSTRACT

Process simulator is computerized process simulation. For using in education or analysis any factor are effects for the system. It can simulate process control by using PID controller. Process simulation using math model, which take from Characteristic equation of process to analysis. Which solving the differential equation by using numerical method and write into the software program. Control loop is analysis by computer, which interface for using condition value for showing a result and send pass through for controlling process.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาโทฉบับนี้สำเร็จลงไปได้ด้วยดี เพราะได้รับคำปรึกษาและการอนุเคราะห์ในการทำวิจัยจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิริยะ กองรัตน์ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาโท ผู้จัดทำขอขอบพระคุณอย่างสูง ที่ได้ให้การสนับสนุน และคำปรึกษาชี้แนะแนวทางในการวิจัย จนสำเร็จตามจุดประสงค์

ขอขอบพระคุณ อ.อาจินต์ น่วมสำราญ ที่เอื้อเพื่อให้คำปรึกษา และข้อมูลในการวิจัย ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่าน ที่ให้ความรู้เรื่องต่างในขณะที่กำลังศึกษา และขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม ที่เอื้อเพื่อวัสดุอุปกรณ์ และเครื่องมือในการทดลอง และทุกๆสิ่ง

ขอขอบพระคุณห้องสมุดของ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่เป็นแหล่งข้อมูลในการศึกษา และขอขอบคุณเพื่อนๆทุกคนที่ให้อำนาจใจ และความช่วยเหลือด้วยดีเสมอมา

และที่มีเกียรติขอกราบขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่เป็นอย่างสูง ที่เป็นแรงใจและให้การสนับสนุนมาโดยตลอดจนปริญญาโทฉบับนี้สำเร็จลงไปได้ด้วยดี

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญภาพ.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและเหตุจูงใจของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญาานิพนธ์.....	2
1.3 ขอบเขตของปริญญาานิพนธ์.....	2
1.4 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและเนื้อหาที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 กล่าวนำ.....	4
2.2 ขั้นตอนในการจำลองกระบวนการทางพลศาสตร์.....	4
2.3 กระบวนการความร้อน.....	6
2.4 กระบวนการความร้อนที่มีอันดับที่สูงขึ้น.....	11
2.5 การถ่ายเทความร้อน.....	19
2.5.1 การพาความร้อน (CONVENTION).....	19
2.5.2 การเคลื่อนที่ของของไหลภายในท่อ.....	20
2.6 การหาผลเฉลยของสมการเชิงอนุพันธ์สามัญโดยวิธีเชิงตัวเลข.....	27
2.6.1 วิธีการแก้สมการเชิงอนุพันธ์สามัญ.....	27
2.6.2 ระเบียบวิธีของ รุงเง – คูดตา.....	30
2.6.3 การใช้ Numerical method ในการจำลองกระบวนการ.....	33
2.7 การใช้ตัวควบคุมกระบวนการแบบ PID.....	37
2.7.1 การออกแบบ PI/PID Controller จาก time domain.....	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ในรูปของเอกสารฉบับพิมพ์ โดยอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.7.3 Positional Velocity PID Algorithms.....	38
2.7.4 เครื่องมือและส่วนปฏิบัติการในรูปแบบของตัวควบคุม Discrete PID.....	38
บทที่ 3 อุปกรณ์เชื่อมต่อ.....	42
3.1 อุปกรณ์เชื่อมต่อสัญญาณ.....	42
3.2 Protocol ที่ใช้ในการสื่อสาร.....	42
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	44
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	50
5.1 สรุป.....	50
5.2 ปัญหาและแนวทางแก้ไข.....	50
บรรณานุกรม.....	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่

หน้า

2.1.1 จากการศึกษาผลลัพธ์จากการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ จากสมการเชิงอนุพันธ์

$$\frac{dy}{dx} = y \cos x \text{ ด้วยระเบียบวิธีของออยเลอร์ ของฮวน ของออยเลอร์ที่ปรับปรุง}$$

แล้ว และของรุงเง - จุดตาอันดับ 4 เมื่อเปรียบเทียบกับผลลัพธ์แม่นยำตรง.....29



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 ขั้นตอนการศึกษาปริญญาโท.....	3
2.1 ผลตอบสนองของกระบวนการแบบอันดับหนึ่ง.....	9
2.2 แสดง Block diagram ของกระบวนการความร้อนอันดับหนึ่ง.....	10
2.3 กระบวนการความร้อน.....	10
2.4 กระบวนการความร้อนอันดับที่สูงขึ้น.....	11
2.5 บล็อกไดอะแกรมของระบบเมื่อไม่คำนึงถึงการส่งผ่านความร้อนของผนัง.....	14
2.6 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบเมื่อคำนึงถึงการส่งผ่านความร้อนของผนัง.....	17
2.7 ลักษณะของอุณหภูมิในของไหลที่บริเวณปากท่อ.....	20
2.8 ความเร็ว และอุณหภูมิในท่อกลมของการไหลแบบราบเรียบ.....	21
2.9 การหาอุณหภูมิโดยเฉลี่ยของของไหลระหว่างการไหลแบบราบเรียบ.....	22
2.10 ท่อที่มีหน้าตัดแบบต่างๆ.....	23
2.11 แสดง Block diagram ของกระบวนการความร้อน.....	24
2.12 Out put ที่ปราศจากการควบคุมจากการบีบบังคับ.....	39
2.13 สัญญาณการควบคุมที่ถูกบีบบังคับ.....	40
2.14 Out put ที่มีการควบคุมแบบถูกบังคับ.....	40
2.15 สัญญาณการควบคุมที่ถูกบีบบังคับ.....	41
3.1 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้เชื่อมต่อกับสัญญาณ.....	43
4.1 แสดงในส่วนของการป้อนค่า Input ข้อมูล.....	44
4.2 ส่วนของกราฟการแสดงผล.....	45
4.3 แสดงในส่วนของ Property การควบคุม.....	45
4.4 แสดง Property ของ Tank ซึ่งจะแสดง Transfer function ระบบด้วย.....	46
4.5 แสดงการเกิด Reset windup ในกระบวนการ.....	47
4.6 แสดง Offset ที่เกิดขึ้นในกระบวนการ ที่มี Kp=23 , Ki=45 , Kd=15 ,Setvalue=45.....	47
4.7 แสดง Offset ที่เกิดขึ้นในกระบวนการ ที่มี Kp=23, Ki=459, Kd=15, Setvalue=45.....	48
4.8 แสดงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า Ki.....	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและเหตุจูงใจของงานวิจัย

แบบจำลองกระบวนการ (Process Simulator) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการจำลองกระบวนการเพื่อใช้ในการศึกษา หรือวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบต่างๆที่มีผลต่อกระบวนการ ซึ่งเดิมทีแบบจำลองกระบวนการที่ถูกสร้างขึ้นมา จะเป็นการจำลองจากกระบวนการจริงๆ แต่มีขนาดเล็กกว่า และเป็น การจำลองทางด้านฮาร์ดแวร์ ซึ่งการจำลองกระบวนการลักษณะดังกล่าวนี้ จะมีค่าใช้จ่ายในการ ดำเนินการค่อนข้างสูง และถ้าหากมีความต้องการที่จะเปลี่ยนแปลง ต่อเติมกระบวนการก็ทำได้ยาก ดังนั้นการจำลองกระบวนการ โดยใช้คอมพิวเตอร์ซอฟต์แวร์จึงเกิดขึ้น ในการใช้งานจะต่อเครื่อง คอมพิวเตอร์ร่วมกับอุปกรณ์เชื่อมต่อสัญญาณ ซึ่งการใช้คอมพิวเตอร์ในการจำลองกระบวนการนี้ เป็นการนำเอาสมการคุณลักษณะของกระบวนการมาทำการวิเคราะห์ ซึ่งง่ายต่อการออกแบบ หรือ เปลี่ยนแปลงกระบวนการ ผู้ใช้สามารถที่จะกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆของกระบวนการได้ เพื่อที่ จะใช้ในการวิเคราะห์ผลตอบสนองของกระบวนการเมื่อมีการรบกวนจากภายนอก

เมื่อพูดถึงการจำลองกระบวนการ โดยมากแล้วมักจะใช้สมการที่ได้ในรูปของ S-domain เข้ามาทำการวิเคราะห์เลย จึงเป็นสิ่งที่ยากสำหรับผู้ที่ไม่มีความรู้ทางด้าน การแยกสมการในรูปของ สมการลาปลาซ ดังนั้นจากโครงงานนี้จึงทำการจำลองกระบวนการจากธรรมชาติของวัสดุ ขนาด ของวัสดุ และสารที่ใช้ในกระบวนการ เพื่อให้ได้เป็นค่าต่างๆในรูปของตัวแปรทาง Math model จึงต่างจากโปรแกรมจำลองกระบวนการ โดยทั่วไปที่จะใช้สมการที่คงที่จากตัวแปรที่มีค่าคงที่อยู่แล้ว การควบคุมจึงง่ายเพราะเป็นรูปของการจำลองที่กระบวนการที่แน่นอนหรือ Transfer function ที่เป็น แบบแผนตายตัวอยู่แล้ว ซึ่งผิดกับพฤติกรรมธรรมชาติของกระบวนการจริงๆ ซึ่งอาจมีการเบี่ยงเบน จากผลของ Disturbance

การจำลองกระบวนการครั้งนี้จะทำให้ผู้จำลองทราบถึง ค่าประมาณที่อาจทำให้เกิดความ เสียหายเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิสูงได้ ผลของความเร็วของของเหลวในถังกวน หรือ ในชุด Coolant ผลของการเปลี่ยนสารและอื่นๆ และปริมาตรของสารหล่อเย็น โดยการคำนวณทั้ง หมจะยึดหลักการในวิชา Heat Transfer ในเรื่องการพาและนำความร้อนของวัสดุ และใช้หลักการ วิเคราะห์เรื่องอัตราการไหลจากวิชากลศาสตร์ของไหล ซึ่งเกี่ยวกับการไหลแบบราบเรียบและการ ไหลแบบอลวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของปฏิญาณนิพนธ์

1. ศึกษาพฤติกรรมทางพลศาสตร์ ของกระบวนการจากทฤษฎีการจำลอง
2. นำหลักการและการประมาณผลหรือการทำนายผลจากทฤษฎีทางกลศาสตร์ต่างๆมาใช้
3. ต้องการให้ผู้ผู้ใช้โปรแกรมมีความเข้าใจในกระบวนการเพิ่มขึ้นกับรูปแบบทางกายภาพ
4. สามารถวิเคราะห์ผลเทียบกับหลักการจริงถึงคุณสมบัติของวัสดุ
5. สามารถปรับค่าพารามิเตอร์จากภายนอกเพื่อควบคุมกระบวนการได้
6. สามารถนำค่าทาง Output ของกระบวนการ ไปประมวลผลเพื่อนำไปใช้ควบคุมแบบป้อนกลับได้ เช่นเดียวกับกระบวนการจริง

1.3 ขอบเขตของปฏิญาณนิพนธ์

1. ออกแบบวิเคราะห์การสร้างและการประกอบกระบวนการ ผ่านทาง Software Computer
2. วิเคราะห์ผลกระทบที่จะเกิดขึ้น เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงวัสดุที่ใช้ในการการสร้างตามทฤษฎี
3. สามารถที่จะวิเคราะห์ผลกระทบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของสารที่ใช้ในกระบวนการ
4. ทดสอบรับสัญญาณจากภายนอกเข้ามาแสดงผล และประมวลผล
5. นำสัญญาณ Output ที่ได้จากการจำลองกระบวนการออกแสดงผลทาง Indicator
6. สามารถขยายงานการรับค่า และแสดงผลได้
7. สามารถนำไปต่อร่วมกับอุปกรณ์ควบคุมภายนอกได้
8. ทดสอบโปรแกรมในการควบคุมร่วมกับการจำลองกระบวนการได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ขั้นตอนการศึกษาปริญญาโท



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและเนื้อหาที่เกี่ยวข้อง

2.1 กล่าวนำ

แบบจำลองกระบวนการที่สร้างจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และที่ทำการจำลองทางคอมพิวเตอร์นั้นเป็นเครื่องมือที่มีความจำเป็นเป็นอย่างยิ่งสำหรับการวิเคราะห์ และออกแบบระบบควบคุม สำหรับระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งเราควรจะใช้เครื่องมือที่ดี และมีความเหมาะสมกับการวิเคราะห์ระบบเชิงเส้น

ข้อพิจารณาที่นำมาใช้ในการตัดสินใจในการใช้คอมพิวเตอร์จำลองกระบวนการ ได้แก่

- 1) เราจะต้องพิจารณาการทำงานของระบบควบคุมในด้านความปลอดภัยและต้องพิจารณาผลตอบแทนการทำงานของระบบ เช่น ในระบบควบคุมระบบอัตโนมัติขนาดใหญ่ที่มีความผันผวนสูงควรเป็นระบบควบคุมระดับที่ไม่ยุ่งยาก หรือการจ่ายแรงดันที่เหมาะสม
- 2) เราต้องพิจารณาระดับความเชื่อมั่นเกี่ยวกับการทำงานของระบบควบคุม โดยทั่วไปจะอ้างอิงกับการทดลอง และมีความเกี่ยวข้องกับการปฏิบัติการควบคุมในการใช้งานจริง
- 3) ความเหมาะสมของเวลาที่ใช้ในการจำลอง อาจจะใช้เวลาหลายชั่วโมงสำหรับกระบวนการที่มีความสัมพันธ์ของกระบวนการที่ซับซ้อน ซึ่งความซับซ้อนของกระบวนการจะถูกจำลองในเวลาเริ่มต้น การพิจารณาอื่น ๆ ร่วมกับข้อได้เปรียบจากความสามารถของคอมพิวเตอร์ ความชำนาญของบุคคล และข้อมูลที่เพียงพอของการจำลองกระบวนการ

2.2 ขั้นตอนในการจำลองกระบวนการทางพลศาสตร์

ขั้นตอนในการจำลองกระบวนการทางพลศาสตร์ มี 3 ประการ

- 1) การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการและการควบคุมกระบวนการนั้นๆ
- 2) วิเคราะห์สมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
- 3) วิเคราะห์ให้เป็นเหตุผล

การพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์ ของกระบวนการที่ซับซ้อนสองกระบวนการที่ซ้อนกันอยู่จากกระบวนการหลายส่วนในหอกลับและเตาเผา ในส่วนนี้จะอยู่ที่การวิเคราะห์รูปแบบสมการเชิงตัวเลข แม้ว่าจะไม่เหมือนในขั้นตอนที่ 3 ความสำคัญของการวิเคราะห์คุณสมบัติอยู่ที่ผลลัพธ์การวิเคราะห์ผลของกระบวนการจำลองจะต้องมีความเป็นไปได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพัฒนาารูปแบบกระบวนการที่ซับซ้อน

การวิเคราะห์จะเป็นไปตามสมการเชิงอนุพันธ์ซึ่งเขียนในรูปทั่วไปได้ดังนี้

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{อัตราของมวลหรือพลังงาน} \\ \text{เข้าไปในกระบวนการ} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{อัตราของมวลหรือพลังงาน} \\ \text{ที่ออกจากในกระบวนการ} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{อัตราสะสมของมวลหรือพลังงาน} \\ \text{ที่อยู่ในกระบวนการ} \end{array} \right\}$$

ในการอนุพันธ์ปริมาตรมวล(MASS) ก็สามารถทำในรูปของผลรวมมวล, ส่วนของมวล, พลังงานและโมเมนตัม ซึ่งอัตราการไหลเข้าต้องสามารถวัดได้ ด้วยทุกกลวิธีโดยปริมาตรทางเข้าหรือออก จาก Control Volume หรือกระบวนการควบคุมทั้งหมดซึ่งต้องสมดุลกันจากการปฏิบัติการ ตัวอย่างเช่น การไหลเข้า และออกจากปริมาตรควบคุม พลังงานทั้งทางเข้าและออก การแผ่รังสี และจากการนำความร้อน ส่วนประกอบสามารถถ่ายทอดโดยการกระจาย และโมเมนตัมสามารถเกิดขึ้นหรือสูญเสียโดยแรงกล ในกรณีของถึงปฏิกิริยา อัตราของปฏิกิริยา จำเป็นต้องนับจากชุดทางเข้า ของถึงปฏิกิริยา และทางออกของถึงปฏิกิริยา

สมการอัตราการสะสมปริมาณเป็นดังนี้

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{อัตราการสะสมปริมาณ} \\ \text{เชิงอนุพันธ์} \end{array} \right\} = \frac{d}{dt} \left\{ \begin{array}{l} \text{ผลรวมปริมาณเชิงอนุพันธ์} \\ \text{ในปริมาตรควบคุม} \end{array} \right\}$$

ซึ่ง t คือค่าเวลา ในที่นี้หมายถึง ส่วนประกอบของสมการ first order different ซึ่งเป็นรูปแบบที่ธรรมดาที่สุด ในรูปแบบของสมการ Differential กำลังหนึ่งของเวลาที่เปลี่ยนแปลงกับปริมาตรที่เปลี่ยนไป นอกจากนี้อาจใช้สมการพีชคณิต ซึ่งกำหนดคุณสมบัติทางฟิสิกส์ และอัตราการแสดงผล และจากสมการในชุดสะสมก็จะละลายไป

ในการแทนค่าในชุดสมการเชิงอนุพันธ์ และอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการ (เช่น อุณหภูมิ, ความดัน, ตำแหน่ง) ซึ่งเหล่านี้จำเป็นต้องสัมพันธ์กับรูปแบบปริมาตรควบคุม (Control Volume) เมื่อปริมาตรเหล่านี้มีปริมาตรที่เพียงพอในกระบวนการแบ่ง จำนวนของปริมาตรควบคุมของขอบเขตจำกัด หรือ “Lump (กลุ่มเดียวกัน)” หรือที่ถูกรเรียกว่า “Lumped-parameter model” ในอีกส่วนหนึ่ง “Distributed-parameter model” ผลลัพธ์ของกระบวนการจะมีความต่อเนื่องกับตำแหน่งในรูปแบบของสมการคณิตศาสตร์ ที่ประกอบจาก Partial differential equation กับเวลาที่พึ่งพิงกับตัวแปรเมื่อสมการทั่วไปเป็นการรวมกันของสมการกำลังหนึ่ง และจะเป็นสมการที่มีค่ามากกว่ากำลังหนึ่งเทียบกับเวลา เมื่อเป็นการรวมชิ้นส่วนของ ตัวแปรและสมการกำลังหนึ่งกับเวลา

ในการพัฒนาารูปแบบของสมการ ส่วนสำคัญกับการเก็บค่าจำนวนสูงสุดในความสมดุลที่ใช้

ในการควบคุมเชิงปริมาตรของกระบวนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการในการพัฒนาแบบทางคณิตศาสตร์

- 1) เขียนสมการความสมดุล
- 2) นับตัวแปรตัวใหม่(ที่ไม่รู้) ที่ปรากฏขึ้นในแต่ละสมการ และเก็บร่องรอยการเปลี่ยนแปลงของแต่ละสมการ
- 3) เก็บคำแนะนำ และความสัมพันธ์จนกระทั่งสมการมีจำนวนและตัวแปรเท่ากันและตัวแปรทั้งหมดมีความน่าสนใจที่จะต้องพิจารณา

2.3 กระบวนการความร้อน(Thermal process)

จุดสนใจก็คือ เราพิจารณาผลตอบสนองของอุณหภูมิทางออก $T(t)$ จะมีการเปลี่ยนแปลงเป็นอย่างไร ต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิทางเข้า $T_i(t)$ ซึ่งจากตัวอย่างนี้จะประกอบด้วยทางเข้าและทางออกของอัตราการไหลเชิงปริมาตร ความหนาแน่นของของเหลว ความจุความร้อน ซึ่งของเหลวในถังจะถูกกวนโดยมีจนวนก้นความร้อนและกระบวนการเป็นแบบ adiabatic และสมดุลพลังงานที่สถานะไม่คงที่ (Unsteady-State Energy Balance) ของถังนี้ โดยใช้ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิทางเข้าและอุณหภูมิทางออก และจากกระบวนการจะได้รับความสัมพันธ์ดังนี้

$$q \rho_i h_i(t) - q \rho h(t) = \frac{dV \rho u(t)}{dt}$$

หรือในเทอมของอุณหภูมิจะได้สมการ Unsteady-State Energy Balance (USSEB) ดังนี้

$$q \rho C_p T_i(t) - q \rho C_p T(t) = V \rho C_v \frac{dT(t)}{dt}$$

เมื่อ

ρ_i, ρ = ความหนาแน่นของของเหลวที่ทางเข้าและทางออกตามลำดับ, Kg/m^3

C_{pi}, C_p = ความจุความร้อนที่ความดันคงที่ของทางเข้าและทางออกของของเหลว, J/Kg-C

V = ปริมาตรของของเหลวในถัง, m^3

C_v = ความจุความร้อนที่ปริมาตรคงที่, J/Kg-C

h_i, h = enthalpies ของของเหลวที่ทางเข้าและทางออกตามลำดับ, J/Kg

u = พลังงานภายในของของเหลวในถัง, J/Kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมดุลของพลังงานที่สภาวะคงที่ Steady-State Energy Balance (SSEB) ก็คือ จุดที่อุณหภูมิทางเข้าและทางออกมีค่าเท่ากัน โดยภายในกระบวนการ ไม่มีเทอมของการสะสม หรือเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$q \rho C_p \bar{T}_i(t) - q \rho C_p \bar{T}(t) = 0$$

นำสมการ USSEB-SSEB จะได้

$$q \rho C_p (\bar{T}_i(t) - \bar{T}_i) - q \rho C_p (\bar{T}(t) - \bar{T}) = v \rho C_v \frac{d(\bar{T}(t) - \bar{T})}{dt}$$

เมื่อเขียนอยู่ในเทอมของอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงบน จะได้

$$q \rho C_p \bar{T}_i(t) - q \rho C_p \bar{T}(t) = v \rho C_v \frac{dT(t)}{dt}$$

เมื่อ

$$\bar{T}_i(t) = \bar{T}_i(t) - \bar{T}_i \quad \text{และ} \quad \bar{T}(t) = \bar{T}(t) - \bar{T}$$

เขียนสมการใหม่โดยให้ $\tau = \frac{v \rho C_v}{q \rho C_p}$ จะได้ $\tau \frac{dT(t)}{dt} + T(t) = \bar{T}_i(t)$

แปลงลาปลาซจะได้สมการถ่ายโอนแบบอันดับหนึ่งดังนี้

$$\frac{T(s)}{\bar{T}_i(s)} = \frac{1}{\tau s + 1}$$

เมื่อเรากำหนดให้ภาชนะมีการสูญเสียความร้อนให้กับบรรยากาศเพราะฉะนั้นสมการสมดุลทางพลังงานที่สภาวะไม่คงที่ (USSEB) จะเป็นดังนี้

$$q \rho C_p \bar{T}_i(t) - Q(t) - q \rho C_p \bar{T}(t) = v \rho C_v \frac{dT(t)}{dt}$$

หรือ

$$q \rho C_p \bar{T}_i(t) - UA[\bar{T}(t) - \bar{T}_s(t)] - q \rho C_p \bar{T}(t) = v \rho C_v \frac{dT(t)}{dt}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

U = สัมประสิทธิ์ของการส่งผ่านความร้อน, $J/m^2 \cdot K \cdot s$

A = พื้นที่ผิวที่มีการส่งผ่านความร้อน, m^2

$T_s(t)$ = อุณหภูมิโดยรอบซึ่งเป็นตัวแปรทางเข้า

เขียนสมการสมดุลพลังงานที่สภาวะคงที่ (SSEB) ได้ดังนี้

$$q \rho C_p \bar{T}_i - UA[\bar{T} - \bar{T}_s] - q \rho C_p \bar{T} = 0$$

นำสมการ USSEB-SSEB จะได้

$$q \rho C_p (T_i(t) - \bar{T}) - UA[(T(t) - \bar{T}) - (T_s(t) - \bar{T}_s)] - q \rho C_p (T(t) - \bar{T}) = v \rho C_v \frac{d(T(t) - \bar{T})}{dt}$$

เมื่อ $T_s(t) = T_s(t) - \bar{T}_s$ แล้วจัดสมการใหม่ได้

$$\frac{v \rho C_v}{q \rho C_p + UA} \frac{dT(t)}{dt} + T(t) = \frac{q \rho C_p}{q \rho C_p + UA} T_i(t) + \frac{UA}{q \rho C_p + UA} T_s(t)$$

เมื่อ $\tau = \frac{v \rho C_v}{q \rho C_p + UA}$ วินาที

$K_1 = \frac{q \rho C_p}{q \rho C_p + UA}$ ไม่มีหน่วย

$K_2 = \frac{UA}{q \rho C_p + UA}$ ไม่มีหน่วย

จะได้

$$\tau \frac{dT(t)}{dt} + T(t) = K_1 T_i(t) + K_2 T_s(t)$$

ทำการแปลงลาปลาซแล้วจัดรูปแบบสมการใหม่จะได้

$$T(s) = \frac{K_1}{\tau s + 1} T_i(s) + \frac{K_2}{\tau s + 1} T_s(s)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าอุณหภูมิโดยรอบคงที่ $T_s(t) = T_s(t)$ ดังนั้น $T_s(t) = 0$ หมายถึงจะมีความเบี่ยงเบนเป็นศูนย์ เพราะฉะนั้นฟังก์ชันถ่ายโอนของความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของกระบวนการต่ออุณหภูมิทางเข้า คือ

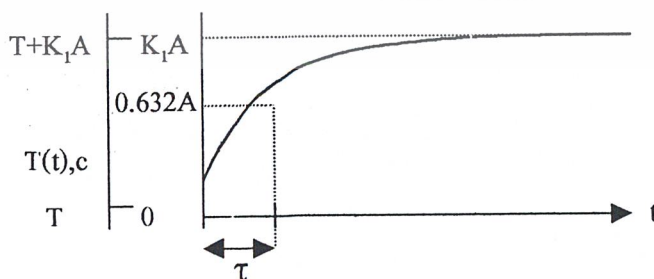
$$\frac{T(s)}{T_s(s)} = \frac{K_1}{\tau s + 1}$$

ถ้าอุณหภูมิทางเข้าของของไหลในกระบวนการคงที่ ฟังก์ชันถ่ายโอนของความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของกระบวนการต่ออุณหภูมิโดยรอบคือ

$$\frac{T(s)}{T_s(s)} = \frac{K_2}{\tau s + 1}$$

ถ้าทั้งสองตัวแปร คืออุณหภูมิทางเข้าและอุณหภูมิโดยรอบมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นในเวลาเดียวกัน เราจะใช้วิธีการหาผลตอบสนองที่ละส่วนของตัวแปรทางเข้าและนำมารวมกัน ซึ่งเรียกว่า Superposition และในสามสมการสุดท้ายจะพบตัวประกอบที่สำคัญคือ K ซึ่งถูกเรียกว่าอัตราขยายของกระบวนการ (Process gain) หรืออัตราขยายที่สภาวะคงที่ (Steady-state gain) เพื่อที่จะบ่งบอกถึงคุณลักษณะทางกายภาพของอัตราขยาย โดยสมมุติให้อุณหภูมิทางเข้าของถังนั้น เพิ่มขึ้นขนาด $A^\circ\text{C}$ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นและผลตอบสนองของอุณหภูมิของฟังก์ชันขั้นบันไดนี้คือ

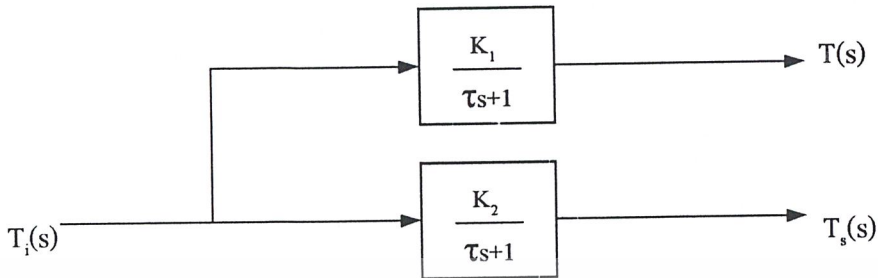
$$\begin{aligned} \frac{T(s)}{T_s(s)} &= \frac{K_1}{s(\tau s + 1)} \\ T(t) &= K_1 A (1 - e^{-t/\tau}) \\ T(t) &= T + K_1 A (1 - e^{-t/\tau}) \end{aligned}$$



ภาพที่ 2.1 ผลตอบสนองของกระบวนการแบบอันดับหนึ่งต่อการเปลี่ยนแปลงของฟังก์ชันแบบขั้น-เวลาคงตัว

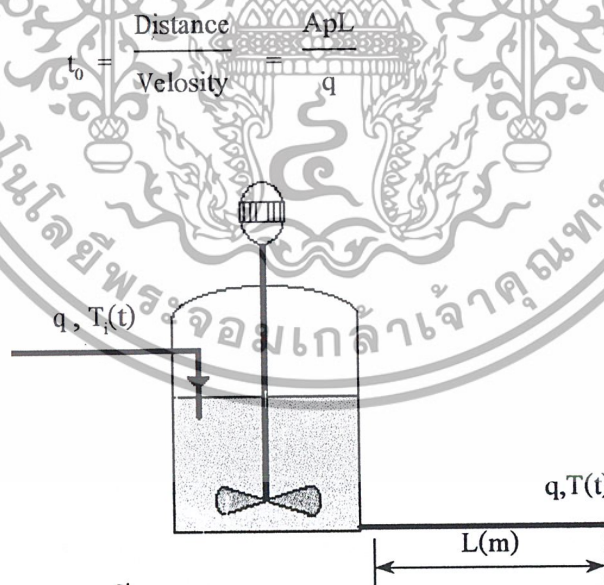
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยสังเกตว่าระบบตัวอย่างนี้เป็นเพียงกระบวนการอันดับหนึ่ง (First Order) ขนานกันดัง
 ภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 แสดง Block diagram ของกระบวนการความร้อนอันดับหนึ่ง

เวลาดำหลังกระบวนการ (Dead time, Time Delay หรือ Transportation Lag) โดยข้อกำหนดสองข้อเกี่ยวกับทางออกของท่อ โดย ข้อกำหนดที่หนึ่งท่อของเหลวระหว่างทางออกของของเหลว โดยที่มันเป็นจำนวนความร้อนที่ดี และสองการไหลของของเหลวที่ผ่านท่อนั้นมีความแปรปรวนสูง ภายใต้ข้อกำหนดนี้ผลตอบสนองของอุณหภูมิทางออก ต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิทางเข้า และอุณหภูมิโดยรอบจะมีลักษณะแบบเดียวกันกับอุณหภูมิทางออก หรืออุณหภูมิในถัง แต่จะถูกหน่วงเวลาออกไประยะหนึ่งซึ่งเวลานี้เองคือเวลาดำหลังกระบวนการ



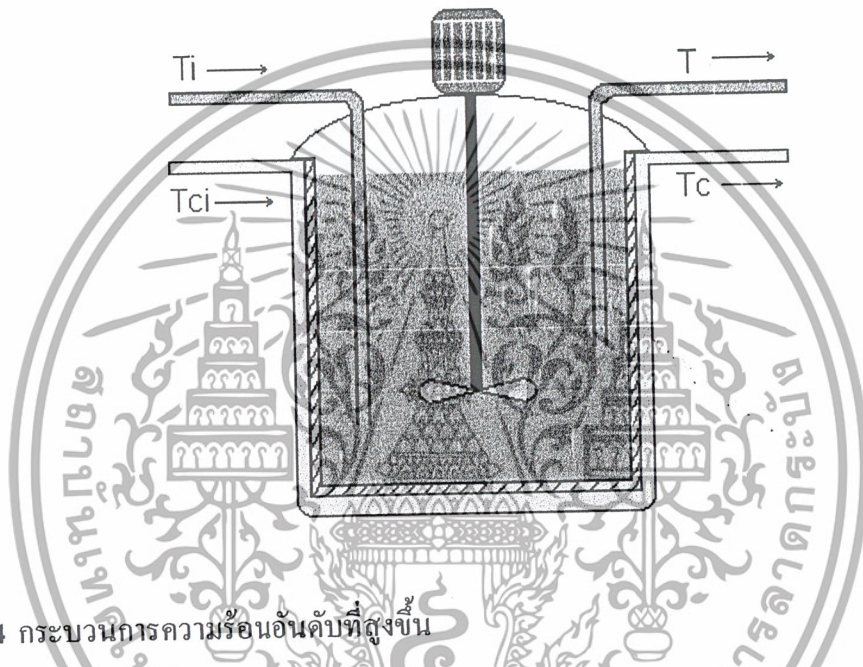
ภาพที่ 2.3 กระบวนการความร้อน

- เมื่อ t_0 = เวลาดำหลัง, วินาที
- A_p = พื้นที่หน้าตัดของท่อ, m^2
- L = ความยาวของท่อ, m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการขยายจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกายภาพ หรือพฤติกรรมภาพของกระบวนการ ภายใต้การควบคุมซึ่งอัตราการขยายของกระบวนการนี้จะขึ้นอยู่กับ อัตราการไหล ความจุความร้อน ความหนาแน่น ของกระบวนการ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อน และพื้นที่ผิวในการส่งผ่านความร้อน ถ้าสิ่งใดสิ่งหนึ่งมีการเปลี่ยนแปลงก็จะทำให้คุณสมบัติของกระบวนการมีการเปลี่ยนแปลงด้วย ซึ่งมีผลต่ออัตราการขยาย และส่งผลไปถึงค่าเวลาคงตัว

2.4 กระบวนการความร้อนที่มีอันดับที่สูงขึ้น



ภาพที่ 2.4 กระบวนการความร้อนอันดับที่สูงขึ้น

จากภาพที่ 2.4 จุดมุ่งหมายของกระบวนการเพื่อทำการระบายความร้อน ให้กับของไหลในกระบวนการ โดยตัวกลางในการระบายความร้อนคือน้ำเย็นซึ่งไหลผ่านเข้าไปในช่อง (jacket) รอบถัง เมื่อน้ำไหลเข้าไปใน jacket แล้วจะทำให้การผสมกันของของเหลวเป็นไปอย่างดีโดยความหนาแน่นและความจุความร้อนของของไหลในกระบวนการ และน้ำที่ใช้ในการระบายความร้อนจะไม่เปลี่ยนแปลงสภาพไปกับอุณหภูมิ จนกระทั่งของเหลวไหลออกไปเมื่อระดับเต็มแล้ว และพื้นที่ผิวในการส่งผ่านความร้อนในถังจะคงที่ และดังนั้นเป็นจนวนความร้อนอย่างดีที่สุดทำการเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ เมื่อไม่คำนึงถึงการส่งผ่านความร้อนของผนังจะได้สมการพลังงานที่สถานะไม่คงที่ของกระบวนการของไหล (USSEB of Fluid) คือ

$$q\rho C_p T_i(t) - UA [T(t) - T_c(t)] - q \rho C_p T(t) = V\rho C_v \frac{dT(t)}{dt}$$

เมื่อ $U =$ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนทั้งหมด กำหนดให้คงที่; $J/m^2 - k - Sec$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการด้านวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$V =$ ปริมาตรของถัง, m^3

$C_p, C_v =$ ความจุความร้อนของของไหลในกระบวนการ, $J/Kg - K$

สมการสมดุลพลังงานที่สภาวะไม่คงที่ของน้ำหล่อเย็น (USSEB of Coolant) คือ

$$q_c(t) \rho_c C_{pc} T_{ci}(t) + UA[T(t) - T_c(t)] - q_c(t) \rho_c C_{pc} T_c(t) = V_c \rho_c C_{vc} \frac{dT_c(t)}{dt}$$

เมื่อ

$C_{pc}, C_{va} =$ ความจุความร้อนของน้ำหล่อเย็น, $J/Kg - K$

$V_c =$ ปริมาตรของน้ำในช่องหล่อเย็น, m^3

สมการสมดุลของพลังงานที่สภาวะคงที่ของของไหล (SSEB of Fluid) คือ

$$q \rho C_p \bar{T}_i - UA(\bar{T} - \bar{T}_c) - q \rho C_p \bar{T} = 0$$

และสมการสมดุลของพลังงานที่สภาวะคงที่ของน้ำหล่อเย็น (SSEB of Coolant) คือ

$$\bar{q}_c \rho_c C_{pc} \bar{T}_{ci} + UA(\bar{T} - \bar{T}_c) - \bar{q}_c \rho_c C_{pc} \bar{T}_c = 0$$

ทำการปรับเป็นเชิงเส้นโดยนำสมการสมดุลพลังงานที่สภาวะไม่คงที่ (USSEB) ลบด้วย สมดุลพลังงานที่สภาวะคงที่ (SSEB) ทั้งของของไหล และของน้ำหล่อเย็นจะได้ของของไหลจะได้

$$q \rho C_p T_i(t) - UA[T(t) - T_c(t)] - q \rho C_p T(t) = V \rho C_v \frac{dT(t)}{dt}$$

ของน้ำหล่อเย็นจะได้

$$C_1 Q_c(t) + C_2 T_{ci}(t) + UA[T(t) - T_c(t)] - C_3 Q_c(t) - C_2 T_c(t) = V_c \rho_c C_{vc} \frac{dT_c(t)}{dt}$$

เมื่อ $C_1 = P_c C_{pc} \bar{T}_{ci}$, J/m^3

$$C_2 = q_c \rho_c C_{pc}, J/s - k$$

$$C_3 = P_c C_{pc} \bar{T}_{ci}, J/m^3$$

จะได้ตัวแปรเบี่ยงเบนคือ

$$T_i(t) = T_i(t) - \bar{T}_i$$

$$T(t) = T(t) - \bar{T}$$

$$T_c(t) = T_c(t) - \bar{T}_c$$

$$T_{ci}(t) = T_{ci}(t) - \bar{T}_{ci}$$

$$Q_c(t) = q_c(t) - \bar{q}_c$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการจัดสมการเชิงเส้นของของไหล และทำการแปลงลาปลาซจะได้

$$T(s) = \frac{1}{(\tau_1 s + 1)} [K_1 T_i(s) + K_2 T_c(s)] \quad \text{-----2.1}$$

เมื่อ $\tau_1 = \frac{V \rho C_v}{UA + q \rho C_p}$

$$K_1 = \frac{q \rho C_p}{UA + q \rho C_p}$$

$$K_2 = \frac{UA}{UA + q \rho C_p}$$

ทำการจัดสมการเชิงเส้นของของไหลเย็น และทำการแปลงลาปลาซจะได้

$$T_c(s) = \frac{1}{(\tau_2 s + 1)} [K_3 T_c(s) + K_4 Q_c(s) + K_5 T(s)]$$

เมื่อ $\tau_2 = \frac{V_\infty C_{vc}}{C_2 + UA}$

$$K_3 = \frac{C_3}{C_2 + UA}$$

$$K_4 = \frac{C_3 - C_1}{C_2 + UA}$$

$$K_5 = \frac{UA}{C_2 + UA}$$

เขียนฟังก์ชันถ่ายโอนได้โดยนำ $T_c(s)$ ไปแทนในสมการ 2.1 จะได้

$$T(s) = \frac{1}{(\tau_1 s + 1)} \left[K_1 T_i(s) + K_2 \left\{ \frac{1}{(\tau_2 s + 1)} (K_3 T_c(s) + K_4 Q_c(s) + K_5 T(s)) \right\} \right]$$

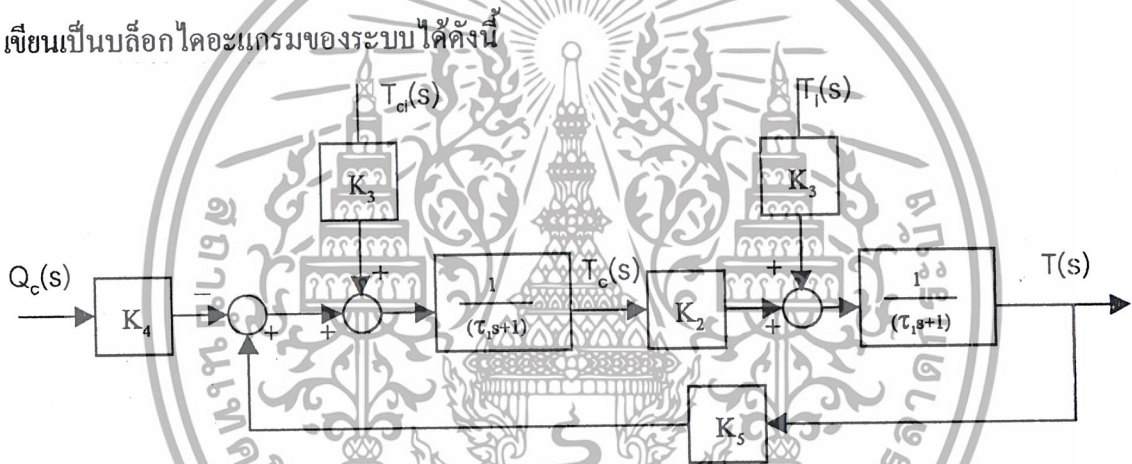
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{T(s)}{T_i(s)} = \frac{K_1}{1 - K_2K_5} * \frac{\tau_2s + 1}{\frac{\tau_1\tau_2}{1 - K_2K_5} s^2 + \frac{\tau_1 + \tau_2}{1 - K_2K_5} s + 1}$$

$$\frac{T(s)}{T_{cl}(s)} = \frac{K_2K_3}{1 - K_2K_5} * \frac{1}{\frac{\tau_1\tau_2}{1 - K_2K_5} s^2 + \frac{\tau_1 + \tau_2}{1 - K_2K_5} s + 1}$$

$$\frac{T(s)}{Q_c(s)} = \frac{-K_4K_2}{1 - K_2K_5} * \frac{1}{\frac{\tau_1\tau_2}{1 - K_2K_5} s^2 + \frac{\tau_1 + \tau_2}{1 - K_2K_5} s + 1}$$

เขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมของระบบได้ดังนี้



ภาพที่ 2.5 บล็อกไดอะแกรมของระบบเมื่อไม่คำนึงถึงการส่งผ่านความร้อนของผนัง

เมื่อเราคำนึงถึงการส่งผ่านความร้อนของผนังของถังซึ่งจะถูกแสดงให้เป็นค่าความจุโดยขนาดของความจุนี้ขึ้นอยู่กับ ความหนา ความหนาแน่น ค่าความจุความร้อน และคุณสมบัติทางกายภาพอื่นๆ ของวัสดุที่ใช้ทำเป็นโครงสร้างของผนัง

สมการสมดุลทางพลังงานที่สภาวะไม่คงที่ของของไหลในกระบวนการ (USSEB)

$$q\rho C_p T_i(t) - h_f A_i (T(t) - T_m(t)) - q\rho C_p T(t) = V_p C_v \frac{dT(t)}{dt}$$

เมื่อ h_f = สัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนของผิวผนังด้านใน, $J/m^2 \cdot s \cdot k$

A_i = พื้นที่ส่งผ่านความร้อนด้านใน, m^2

$T_m(t)$ = อุณหภูมิของผนังโลหะ, K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความร้อนจะส่งผ่านจากของไหลในกระบวนการมาผู้ผนังและผนังก็จะถ่ายเทความร้อนสู่น้ำหล่อเย็น สมการสมดุลทางพลังงานที่สภาวะไม่คงที่บนผนังของถัง

$$h_i A_i (T(t) - T_m(t)) - h_o A_o (T_m(t) - T_c(t)) = V_m P_m C_{vm} \frac{dT_m(t)}{dt}$$

เมื่อ

h_i = สัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนของผิวผนังด้านใน สมมุติว่าคงที่, $J/m^2 - s - k$

h_o = สัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนของผิวผนังด้านนอก, $J/m^2 - s - k$

A_i = พื้นที่ส่งผ่านความร้อนด้านใน, m^2

A_o = พื้นที่ส่งผ่านความร้อนด้านนอก, m^2

V_m = ปริมาตรของผนังโลหะ, m^3

P_m = ความจุความร้อนของผนังโลหะ, Kg/m^3

C_{vm} = ความหนาแน่นของผนังโลหะ, $J/Kg - K$

เขียนสมการสมดุลทางพลังงานที่สภาวะไม่คงที่ของน้ำหล่อเย็นได้ (USSEB of Coolant)

$$q_c(t) \rho_c C_{pc} T_c(t) + h_o A_o (T_m(t) - T_c(t)) - q_c(t) \rho_c C_{pc} T_c(t) = V_c \rho_c C_{vc} \frac{dT_c(t)}{dt}$$

เขียนสมการสมดุลทางพลังงานที่สภาวะคงที่ของของไหลในกระบวนการ (SSEB of Fluid)

$$q \rho C_p \bar{T}_i - h_i A_i (\bar{T} - \bar{T}_m) - q \rho C_p \bar{T} = 0$$

เขียนสมการสมดุลทางพลังงานที่สภาวะคงที่ของผนัง (SSEB of Wall)

$$h_i A_i (\bar{T} - \bar{T}_m) - h_o A_o (\bar{T}_m - \bar{T}_c) = 0$$

เขียนสมการสมดุลทางพลังงานที่สภาวะคงที่ของน้ำหล่อเย็น (SSEB of Coolant)

$$q_c \rho_c C_{pc} \bar{T}_{ci} + h_o A_o (\bar{T}_m - \bar{T}_c) - q_c \rho_c C_{pc} \bar{T}_c = 0$$

ทำการปรับให้เป็นเชิงเส้นโดยนำสมการ USSEB - SSEB

สมการเชิงเส้นของของไหลในกระบวนการคือ

$$q \rho C_p T_i(t) - h_i A_i (T(t) - T_m(t)) - q \rho C_p T(t) = V_p C_v \frac{dT(t)}{dt} \quad \text{-----2.2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการเชิงเส้นของผนังในกระบวนการคือ

$$h_i A_i (T(t) - T_m(t)) - h_o A_o (T_m(t) - T_c(t)) = V_m \rho_m C_{vm} \frac{dT_m(t)}{dt} \quad \text{-----2.3}$$

สมการเชิงเส้นของน้ำหล่อเย็นในกระบวนการคือ

$$\begin{aligned} \rho_c C_{pc} \bar{T}_{ci} Q_c(t) + \rho_c C_{pc} \bar{q}_c T_{ci}(t) + h_o A_o (T_m(t) - T_c(t)) - \rho_c C_{pc} \bar{T}_c Q_c(t) - \rho_c C_{pc} \bar{q}_c T_c(t) \\ = v_c \rho_c C_{vc} \frac{dT_c(t)}{dt} \quad \text{-----24} \end{aligned}$$

เมื่อ

$$T_i(t) = T_i(t) - \bar{T}_i$$

$$T(t) = T(t) - \bar{T}$$

$$T_m(t) = T_m(t) - \bar{T}_m$$

$$T_c(t) = T_c(t) - \bar{T}_c$$

$$T_{ci}(t) = T_{ci}(t) - \bar{T}_{ci}$$

$$Q_c(t) = q_c(t) - \bar{q}_c$$

จากสมการที่ 2.2 ทำการแปลงลาปลาซและจัดสมการใหม่จะได้

$$T(s) = \frac{K_6}{(\tau_3 s + 1)} T_i(s) + \frac{K_7}{(\tau_3 s + 1)} T_m(s)$$

จากสมการที่ 2.3 ทำการแบ่งลาปลาซและจัดสมการใหม่จะได้

$$T_m(s) = \frac{K_8}{(\tau_4 s + 1)} T(s) + \frac{K_9}{(\tau_4 s + 1)} T_c(s)$$

จากสมการที่ 2.4 ทำการแปลงลาปลาซและจัดสมการใหม่จะได้

$$T_c(s) = \frac{K_{10}}{(\tau_5 s + 1)} T_{ci}(s) + \frac{K_{11}}{(\tau_5 s + 1)} T_m(s) - \frac{K_{12}}{(\tau_5 s + 1)} Q_c(s)$$

เมื่อ

$$\tau_3 = \frac{v \rho C_p}{q \rho C + h A}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$K_6 = \frac{q\rho C_p}{q\rho C_p + h_i A_i}$$

$$K_7 = \frac{h_i A_i}{q\rho C_p + h_i A_i}$$

$$\tau_4 = \frac{V_m \rho_m C_{pm}}{h_i A_i + h_o A_o}$$

$$K_8 = \frac{h_i A_i}{h_i A_i + h_o A_o}$$

$$K_9 = \frac{h_o A_o}{h_i A_i + h_o A_o}$$

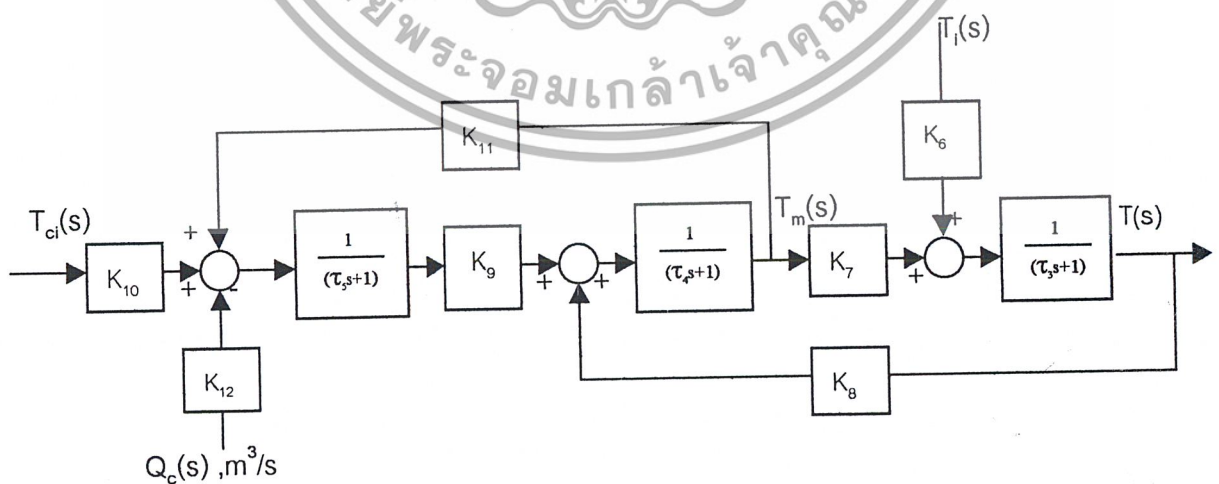
$$\tau_5 = \frac{V_c \rho_c C_{pc}}{h_o A_o + q_c \rho_c C_{pc}}$$

$$K_{10} = \frac{q_c \rho_c C_{pc}}{h_o A_o + q_c \rho_c C_{pc}}$$

$$K_{11} = \frac{h_o A_o}{h_o A_o + q_c \rho_c C_{pc}}$$

$$K_{12} = \frac{\rho_c C_{pc} (T_c - T_a)}{h_o A_o + q_c \rho_c C_{pc}}$$

นำทั้ง 3 สมการมาเขียนบล็อกไดอะแกรมจะได้



ภาพที่ 2.6 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบเมื่อคำนึงถึงการส่งผ่านความร้อนของผนัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการหาฟังก์ชันถ่ายโอนจะได้

$$T_m(s) = \frac{K_8(\tau_5s+1)}{(\tau_4s+1)(\tau_5s+1)-K_9K_{11}} T(s) + \frac{K_9K_{10}T_{ci}(s)-K_9K_{12}}{(\tau_4s+1)(\tau_5s+1)-K_9K_{11}} Q_c(s)$$

$$T(s) = \frac{K_6}{(\tau_3s+1)} T_i(s) + \frac{K_7K_8(\tau_5s+1)}{(\tau_3s+1)[(\tau_4s+1)(\tau_5s+1)-K_9K_{11}]} T(s) + \frac{K_7K_9(K_{10}T_{ci}(s)-K_{12}Q_c(s))}{(\tau_3s+1)[(\tau_4s+1)(\tau_5s+1)-K_9K_{11}]}$$

หลังจากนั้นกระทำการพีชคณิตแล้วจะได้

$$T(s) = \frac{K_6(1-K_9K_{11})}{(1-K_9K_{11}-K_7K_8)} \cdot \frac{(\tau_8s^2+\tau_7s+1)}{(\tau_8^3s^3+\tau_9^2s^2+\tau_{10}s+1)} T_i(s) + \frac{K_7K_9}{(1-K_9K_{11}-K_7K_8)} \cdot \frac{(K_{10}T_{ci}(s)-K_{12}Q_c(s))}{(\tau_8^3s^3+\tau_9^2s^2+\tau_{10}s+1)}$$

เมื่อ

$$\tau_6 = \left\{ \frac{\tau_1\tau_5}{(1-K_9K_{11})} \right\}^{1/2}$$

$$\tau_9 = \frac{\tau_4-\tau_5}{(1-K_9K_{11})}$$

$$\tau_8 = \left\{ \frac{\tau_3\tau_4\tau_5}{(1-K_9K_{11}-K_7K_8)} \right\}^{1/3}$$

$$\tau_9 = \left\{ \frac{(\tau_3\tau_4+\tau_4\tau_5+\tau_5\tau_3)}{(1-K_9K_{11}-K_7K_8)} \right\}^{1/2}$$

$$\tau_{10} = \frac{(\tau_3(1-K_9K_{11})+\tau_4+\tau_5-K_7K_8K_5)}{(1-K_9K_{11}-K_7K_8)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการเขียนฟังก์ชันถ่ายโอนจะได้

$$\frac{T(s)}{T_i(s)} = \frac{K_6(1 - K_9K_{11})}{(1 - K_9K_{11} - K_7K_8)} * \frac{(\tau_8s^2 + \tau_7s + 1)}{(\tau_8^3s^3 + \tau_9^2s^2 + \tau_{10}s + 1)}$$

$$\frac{T(s)}{T_c(s)} = \frac{K_7K_9K_{10}}{(1 - K_9K_{11} - K_7K_8)} * \frac{1}{(\tau_8^3s^3 + \tau_9^2s^2 + \tau_{10}s + 1)}$$

$$\frac{T(s)}{Q_c(s)} = \frac{-K_7K_9K_{12}}{(1 - K_9K_{11} - K_7K_8)} * \frac{1}{(\tau_8^3s^3 + \tau_9^2s^2 + \tau_{10}s + 1)}$$

2.5 การถ่ายเทความร้อน(Heat Transfer)

2.5.1 การพาความร้อน (CONVECTION)

การพา คือ วิธีการที่ความร้อนเคลื่อนที่ระหว่างผิวของของแข็งและของไหลจะเป็นตัวพาความร้อนมาให้ หรือพาความร้อนจากผิวของแข็ง กลไกที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของความร้อน โดยการพาได้นั้น เกิดจากผลรวมของการนำความร้อน การสะสมพลังงาน และจากลักษณะของการเคลื่อนที่ของของไหล

การพาโดยการบังคับ (Forced Convection) คือการเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของของแข็งและของไหล โดยที่ของไหลถูกบังคับให้เคลื่อนที่ไปสัมผัสกับผิวของของแข็งโดยมีกลไกภายนอก เช่น พัดลม หรือเครื่องสูบน้ำ สิ่งที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของความร้อนแบบการพาเป็นต้นว่า คุณสมบัติต่างๆ ของของไหล เช่น ความหนาแน่น ความร้อนจำเพาะ ความหนืด ความเร็วของการไหล เป็นต้น

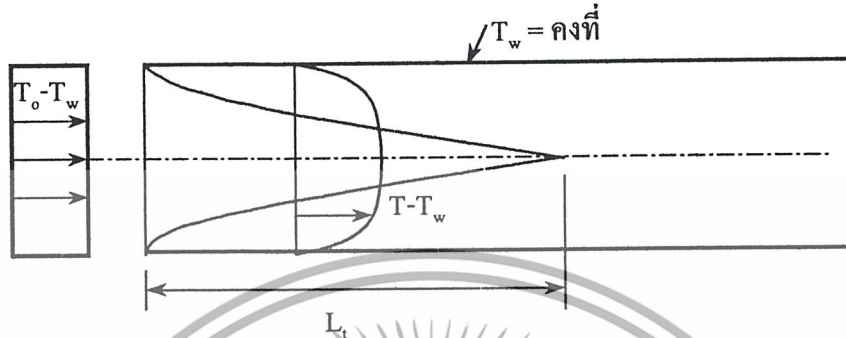
ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนนั้น (h)คืออัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ของของแข็งที่สัมผัสกับของไหล

$$h = F(l, \rho, \mu, V, C_p, K)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 การเคลื่อนที่ของของไหลภายในท่อ

การไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของการไหล เมื่อของไหลที่มีอุณหภูมิ T เคลื่อนที่เข้าในท่อกกลาง หากผนังท่อที่อุณหภูมิ T_w ซึ่งมีค่าคงที่อุณหภูมิของของไหลจะค่อยๆ เปลี่ยนไปเช่นเดียวกับในกรณีของความเร็วของของไหล ดังแสดงในรูปที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 ลักษณะของอุณหภูมิในของไหลที่บริเวณปากท่อ

ระยะทางที่อุณหภูมิเปลี่ยนจากค่าสม่ำเสมอ (Uniform) มาเป็นแบบพัฒนาสมบูรณ์แล้ว (Fully developed profile) เรียกว่า thermal entrance length - L_t จากผลการทดลองพบว่า

$$\frac{L_t}{D} = 0.05 Re Pr$$

จะสังเกตได้ว่า ถ้า $Pr = 1.0$, $L_t = L_e$ และในกรณีของอุณหภูมิเป็นการสะดวกกว่าที่จะพลอตให้อยู่ในรูปของอุณหภูมิที่เทียบกับค่าอุณหภูมิของผนัง ในกรณีที่อุณหภูมิของผนังมีค่าคงที่ θ จะอยู่ในรูปดังนี้คือ

$$\theta = T - T_w$$

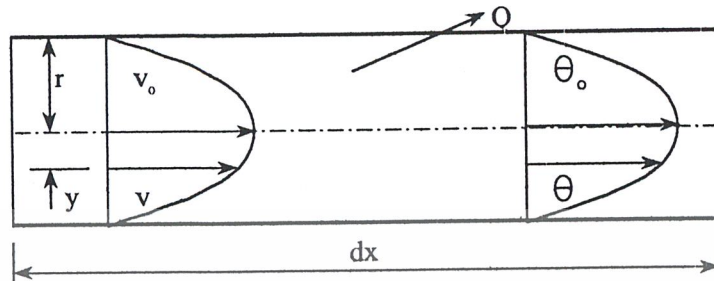
จะเห็นได้ว่า เนื่องจากทั้งความเร็ว และอุณหภูมิเปลี่ยนจากค่าสม่ำเสมอมาเป็นแบบที่พัฒนาสมบูรณ์แล้วตัวเลขนัสเซลท์ (hd/k) จะเปลี่ยนไปด้วย จะเขียนค่าเฉลี่ยของตัวเลขนัสเซลท์ของท่อที่มีความยาว L ได้ดังนี้คือ

$$Nu_{e, en} = \frac{1}{L} \int_0^L Nu_x dx$$

เมื่อทั้งความเร็ว และอุณหภูมิเป็นแบบพัฒนาสมบูรณ์แล้วที่จุดนั้นๆ ต่างจากจุดนี้ไปตัวเลขนัสเซลท์จะมีค่าคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์ปัญหาในกรณีของการพาเมื่อการไหลเป็นแบบราบเรียบในท่อกลม เมื่อมีค่าอุณหภูมิของผนังคงที่ (Simplified Analysis for fully Developed Flow in Circular Duct with Constant Wall Temperature)



ภาพที่ 2.8 ความเร็ว และอุณหภูมิในท่อกลมของการไหลราบเรียบ

พิจารณาส່วนของท่อที่ทั้งความเร็ว และอุณหภูมิเป็นแบบพัฒนาสมบูรณ์แล้ว และตัวเลขนัสเซิลท์คือ Nu

สมมุติว่าทั้งลักษณะการกระจายของ ความเร็ว และอุณหภูมิ สามารถเขียนแทนโดยสมการแบบพาราโบลาได้ นั่นก็คือ

$$v = v_0 \left[1 - \left(\frac{y}{r} \right)^2 \right]$$

$$\theta = \theta_0 \left[1 - \left(\frac{y}{r} \right)^2 \right]$$

สมมุติว่า คุณสมบัติต่างๆ ของของไหล ไม่เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการเคลื่อนที่ของความร้อนจากผนังโดยวิธีการนำจะเขียนได้ดังนี้คือ

$$Q = -kA \left. \frac{d\theta}{dy} \right|_{y=r}$$

จากสมการของ θ เราจะได้

$$\left. \frac{d\theta}{dy} \right|_{y=r} = -\frac{2\theta}{r}, \quad A = 2 \theta r dx$$

ดังนั้น $Q = 2 \theta K dx 2\theta$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การถ่ายเทความร้อนจากผนัง โดยการพา เขียนได้ดังนี้คือ

$$Q = hA (\theta_b - \theta_w)$$


$$\theta_w = 0$$

เมื่อ $y = r$, $A = 2 \theta r dx$

ดังนั้น $Q = h 2 \theta r dx \theta_b$

ในการหาอุณหภูมิเฉลี่ยของของไหล θ_b ให้อยู่ในรูปของ θ_0 พิจารณารูปที่ 7.9 จะเห็นได้ว่า

$$\theta_b = \frac{\int v \theta dA}{\int v dA}$$

$$= \frac{\int_0^r v_0 \left[1 - \left(\frac{y}{r}\right)^2\right]^2 \theta_0 \left[1 - \left(\frac{y}{r}\right)^2\right]^2 2\pi y dy}{\int_0^r v_0 \left[1 - \left(\frac{y}{r}\right)^2\right]^2 2\pi y dy}$$


The diagram shows a circular pipe cross-section with radius r . A vertical line through the center represents the y -axis, and a horizontal line represents the x -axis. A small area element dA is shown at a distance y from the center. The velocity profile is parabolic, with the maximum velocity v_0 at the center ($y=0$) and zero velocity at the wall ($y=r$). The temperature profile is also parabolic, with the maximum temperature θ_0 at the center and zero at the wall.

ภาพที่ 2.9 การหาอุณหภูมิโดยเฉลี่ยของของไหลระหว่างกรวยไหลแบบราบเรียบ

$$\theta_b = \left\{ \frac{v_0 \theta_0}{v_0} \right\} \frac{\int_0^r y - \left\{ \frac{2y^3}{r^2} \right\} + \left\{ \frac{2y^3}{r^2} \right\} dy}{\int_0^r \left\{ y - \frac{y^3}{r^2} \right\} dy}$$

$$= \frac{2\theta_0}{3}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การถ่ายเทความร้อนโดยวิธีการพา เมื่อแทนค่า $\theta_b = \frac{2\theta_0}{3}$ จะเขียนได้ดังนี้

$$Q = h 2\pi r dx \frac{2\theta_0}{3}$$

จากความจริงที่ว่า การถ่ายเทความร้อนแบบการนำ และการพาต้องเท่ากันจะได้

$$2 \pi k dx 2\theta_0 = h 2\pi r dx \frac{2\theta_0}{3}$$

$$\frac{hr}{k} = 3$$

$$\frac{hd}{k} = 6$$

$$Nu = 6$$

จะเห็นได้ว่า ในกรณีนี้ตัวเลขนัสเซิลต์มีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามความยาวของท่อ แต่วิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นวิชาที่ให้คำตอบเป็นค่าโดยประมาณเท่านั้นเพราะได้สมมติการกระจายของอุณหภูมิและความเร็วมีลักษณะเป็นพาราโบลารวมคา

ในการวิเคราะห์แบบเดียวกันนี้สำหรับกรณีของเมื่ออุณหภูมิของผนังมีค่าคงที่ดังนี้

$$Nu = 3.65$$

ในการวิเคราะห์ในกรณีของการเคลื่อนที่ของความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ผนัง (Heat flux) มีค่าคงที่ดังนี้

$$Nu = 4.36$$

ดังนั้นสรุปได้ว่า ในการเคลื่อนที่ของของไหลแบบราบเรียบไปตามท่อกลมค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างของไหล และผิวของผนังท่อ จะมีค่าคงที่เสมอ

สำหรับในส่วนของท่อที่ความเร็ว และอุณหภูมิผนังเปลี่ยนแปลงอยู่ (Thermal entrance length) ค่าของตัวนัสเซิลต์ในบริเวณนี้คือ

$$Nu = 3.66 + \frac{0.0668 \left(\frac{d}{x}\right) R_o P_r}{1 + 0.04 \left\{ \left(\frac{d}{x}\right) R_o P_r \right\}^{2/3}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การไหลแบบอลวน (Turbulent Flow) ในกรณีของการไหลแบบอลวนในท่อกลมการจะวิเคราะห์เพื่อหาสมการสำหรับทำนายค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างของไหล และผิวของท่อโดยทฤษฎีทำได้ยากมาก สมการที่ใช้ในการคำนวณสัมประสิทธิ์ในการพาความร้อน ในกรณีนี้ส่วนมากเป็นสมการของเอมไพริคัล ซึ่งได้จากการวิเคราะห์เชิงมิติ และข้อมูลจากการทดลอง โดยการวิเคราะห์เชิงมิติแล้วว่า เมื่อของไหลเคลื่อนที่ผ่านของแข็ง ตัวเลขนัสเซิลท์จะเป็นฟังก์ชันของตัวเลขเรย์โนลด์ที่ละตัวเลขแพรนเดิล $[Nu = F (R_o, P_r)]$

สมการที่ใช้ได้ผลดีในกรณีที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผนังของไหลมีค่าไม่มากนัก สำหรับการไหลแบบอลวนในท่อกลมคือ สมการของ Dittus – Boelter

$$Nu = 0.023 R_o^{0.8} P_r^n$$

โดยที่

1. $n = 0.3$ เมื่อของไหลถูกทำให้เย็นลง
 $n = 0.4$ เมื่อของไหลถูกทำให้ร้อนขึ้น
2. คุณสมบัติของของไหลทั้งหมดหาได้จากอุณหภูมิเฉลี่ยของของไหล
3. $R_o > 10^4$
4. $0.7 < P_r < 100$
5. $L/d > 60$

สมการของ Seider and Tate ได้ให้สมการที่ใช้ได้ในกรณีที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิมิค่าสูง และตัวเลขแพรนเดิลมีค่ามากขึ้น สมการเขียนได้ดังนี้

$$Nu = 0.027 R_o^{0.8} P_r^{1/3} \left\{ \frac{\mu_m}{\mu_w} \right\}^{0.14}$$

โดยที่

1. คุณสมบัติทั้งหมดหาได้จากอุณหภูมิเฉลี่ยของของไหล ยกเว้น U_w ซึ่งหาได้จากอุณหภูมิต่อผนัง (T_w)
2. $R_o > 10^4$
3. $0.7 < P_r < 17000$
4. $L/d > 60$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Skupinsk et al ได้ให้สมการสำหรับคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างโลหะเหลวและผนังท่อ ซึ่งมีผิวเรียบ และอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ มีค่าคงที่ หรือกล่าวได้ว่าเมื่อของไหลมีค่าตัวเลขแพรนเดิลที่ต่ำมาก จะมีสมการดังนี้

$$\text{Nu} = 4.82 + 0.0185 P_e^{0.827}$$

โดยที่

$$3.6 \times 10^3 < R_e < 9.05 \times 10^5$$

$$10^2 < P_e < 10^4$$

สำหรับโลหะเหลวในกรณีที่คุณสมบัติของผนังมีค่าคงที่ Seban and Shimazaki เสนอสมการนี้สำหรับกรณีที่มี $P_e > 100$

$$\text{Nu} = 5 + 0.025 P_e^{0.8}$$

ดังนั้น เมื่อเราต้องการหาค่าสัมประสิทธิ์ของการพาความร้อน h ก็จะใช้การเปรียบเทียบจากสมการ

$$\text{Nu} = \frac{hd}{k}$$

เมื่อ

d = เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ

k = ค่าความนำความร้อนของสาร

h = ค่าสัมประสิทธิ์ของการพาความร้อน

ดังนั้น

$$h = \frac{\text{Nu} \cdot k}{d}$$

การพาความร้อนในท่อที่ไม่กลม

ในกรณีที่ท่อไม่ใช่ท่อกลม สมการสำหรับคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะใช้เช่นเดียวกับในกรณีของท่อกลมเพียงแต่แทนเส้นผ่านศูนย์กลางท่อด้วยเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (Hydraulic Diameter) ซึ่งเขียนได้ดังนี้

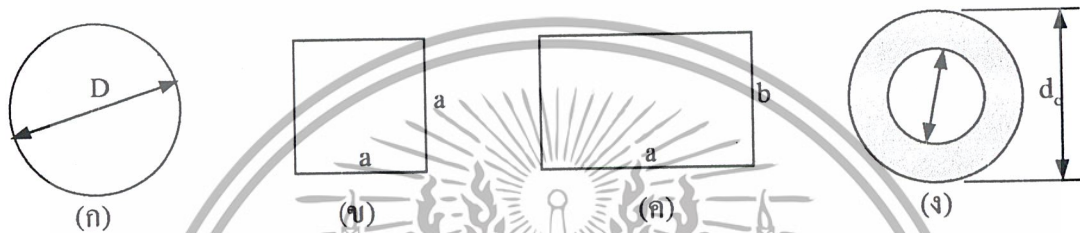
$$d_h = \frac{4 \text{ พื้นที่ที่ของไหลเคลื่อนที่ผ่าน (Flow area)}}{\text{ความยาวโดยรอบที่สัมผัสกับของไหล (Wetted Perimeter)}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกของท่อ มีรูปร่างต่างๆจะมีค่าดังนี้

ท่อกลม $d_h = \frac{4\pi d^2}{4\pi d} = d =$ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ

ท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส $d_h = \frac{4a^2}{4a} = a =$ ความยาวของด้าน



ภาพที่ 2.10 ท่อที่มีหน้าตัดแบบต่างๆ

ท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้า $d_h = \frac{4ab}{2(a+b)} = \frac{2ab}{(a+b)}$

ท่อรูปวงแหวน $d_h = \frac{4\pi(d_o^2 - d_i^2)}{4\pi(d_o - d_i)} = (d_o + d_i)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 การหาผลเฉลยของสมการเชิงอนุพันธ์สามัญโดยวิธีเชิงตัวเลข

สมการเชิงอนุพันธ์สามัญ (Ordinary differential equation) โดยมากเกิดขึ้นในปัญหาทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ และวิทยาศาสตร์โดยทั่วไป เช่น การคำนวณการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา t สมการเชิงอนุพันธ์นั้นมีอยู่ 2 ลักษณะ คือ สมการเชิงอนุพันธ์ที่เป็นเชิงเส้น และสมการเชิงอนุพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น ในยุคก่อนนั้นวิธีการแก้สมการเชิงอนุพันธ์เราสามารถทำได้โดยการประดิษฐ์ผลลัพธ์แบบแมนตรง หากสมการเชิงอนุพันธ์นั้นอยู่ในรูปแบบของเชิงเส้นแล้วสามารถที่จะประดิษฐ์ผลลัพธ์แบบแมนตรงได้โดยง่าย แต่ถ้าหากสมการเชิงอนุพันธ์อยู่ในรูปไม่เป็นเชิงเส้นแล้ว การประดิษฐ์ผลลัพธ์แบบแมนตรงนั้นทำได้โดยลำบาก แต่ก็สามารถที่จะทำได้โดยการประมาณให้เป็นสมการเชิงเส้น

2.6.1 วิธีการแก้สมการเชิงอนุพันธ์สามัญ

วิธีการแก้สมการเชิงอนุพันธ์สามัญนั้นมีหลายรูปแบบ เช่น 1. ระเบียบวิธีของออยเลอร์ (Euler's method) 2. ระเบียบวิธีของฮวน (Heun's method) 3. ระเบียบวิธีของออยเลอร์ที่ปรับปรุงแล้ว (Modified Euler's method) 4. ระเบียบวิธีของรุงเง - คูดตา (Runge-Kutta method) เป็นต้น ในการศึกษาระเบียบวิธีการเหล่านี้ เพื่อที่จะนำไปใช้ในการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์

1. ระเบียบวิธีของออยเลอร์ (Euler's method)

$$\text{จาก } \frac{dy}{dx} = f(x, y)$$

เราจะหาค่าผลลัพธ์โดยประมาณ y_{i+1} ที่ x_{i+1} จากผลลัพธ์ ซึ่งรู้ค่าที่ x_i โดยใช้ค่าของความชันที่ x_i ดังนี้

$$\frac{dy}{dx} = \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} = \frac{y_{i+1} - y_i}{h} \quad ; h = x_{i+1} - x_i$$

$$\frac{y_{i+1} - y_i}{h} = f(x_i, y_i)$$

$$y_{i+1} = y_i + f(x_i, y_i)h$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ระเบียบวิธีของฮวน (Heun's method)

$$y_i' = f(x_i, y_i)$$

$$y_{i+1}^0 = y_i + f(x_i, y_i)h$$

$$y_{i+1}^1 = f(x_{i+1}, y_{i+1}^0)$$

$$\bar{y}' = \frac{y_{i+1}^1 + y_i^1}{2} = \frac{f(x_i, y_i) + f(x_{i+1}, y_{i+1}^0)}{2}$$

$$y_{i+1} = y_i + \frac{f(x_i, y_i) + f(x_{i+1}, y_{i+1}^0)}{2} h$$

2. ระเบียบวิธีของออยเลอร์ปรับปรุงแล้ว (modified Euler's method)

$$y_{i+1/2} = y_i + f(x_i, y_i) \frac{h}{2}$$

$$y_{i+1/2}' = f(x_{i+1/2}, y_{i+1/2})$$

$$y_{i+1} = y_i + f(x_{i+1/2}, y_{i+1/2})h$$

3. ระเบียบวิธีของรุงเง - กุตตาอันดับสี่ (fourth - order Runge - kutta method)

$$y_{i+1} = y_i + \left[\frac{1}{6} (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \right] h$$

โดยที่

$$k_1 = f(x_i, y_i)$$

$$k_2 = f\left(x_i + \frac{1}{2}h, y_i + \frac{1}{2}hk_1\right)$$

$$k_3 = f\left(x_i + \frac{1}{2}h, y_i + \frac{1}{2}hk_2\right)$$

$$k_4 = f(x_i + h, y_i + hk_3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 จากการศึกษาการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ จากสมการเชิงอนุพันธ์ $\frac{dy}{dx} = y \cos x$ ด้วย
 ระเบียบวิธีของออยเลอร์ ของฮวน ของออยเลอร์ที่ปรับปรุงแล้ว และของรุงเง - คุดตาอันดับ 4 เมื่อ
 เปรียบเทียบกับผลลัพธ์แม่นยำตรง

X	ผลลัพธ์แม่นยำตรง	ออยเลอร์	ฮวน	ออยเลอร์ปรับปรุง	รุงเง-คุดตา
0.00	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000
0.25	1.28070	1.25000	1.27639	1.27906	1.28069
0.50	1.61515	1.55279	1.60492	1.61263	1.61513
0.75	1.97712	1.89346	1.95996	1.97545	1.97709
1.00	2.31978	2.23982	2.29581	2.32096	2.31974
1.25	2.58309	2.54236	2.55358	2.58805	2.58304
1.50	2.71148	2.74278	2.67858	2.71888	2.71144
1.75	2.67510	2.79128	2.64153	2.68173	2.67505
2.00	2.48254	2.66690	2.45139	2.48539	2.48254
2.25	2.17727	2.38944	2.15141	2.17541	2.17723
2.50	1.81934	2.01419	1.80087	1.81444	1.81931
2.75	1.46472	1.61078	1.45413	1.45952	1.46469
3.00	1.15156	1.23857	1.14776	1.14820	1.15155

จากผลลัพธ์ที่ได้พบว่าวิธีการที่ให้ผลลัพธ์ได้ใกล้เคียงกับผลลัพธ์แม่นยำตรงที่สุดคือ วิธีการ
 ของ รุงเง- คุดตา อันดับ 4 จึงใช้วิธีของ รุงเง-คุดตา ในการแก้สมการเชิงอนุพันธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.2 ระเบียบวิธีของ รุงเง - คุดตา (Runge - Kutta method)

เป็นระเบียบวิธีที่ให้ผลลัพธ์ที่มีความเที่ยงตรงสูง แนวคิดที่ใช้ในการประดิษฐ์ระเบียบวิธีของ รุงเง-คุดตา คือ การหาค่ารวมความชันที่เป็นค่าเฉลี่ยของอนุพันธ์ที่สองจุด มีรูปแบบทั่วไปดังนี้

$$y_{i+1} = y_i + (a_1 k_1 + a_2 k_2 + a_3 k_3 + \dots + a_n k_n) h$$

โดยที่

$$k_1 = f(x_i, y_i)$$

$$k_2 = f(x_i + p_1 h, y_i + q_{11} k_1 h)$$

$$k_3 = f(x_i + p_2 h, y_i + q_{21} k_1 h + q_{22} k_2 h)$$

⋮

$$k_n = f(x_i + p_{n-1} h, y_i + q_{n-1,1} k_1 h + q_{n-1,2} k_2 h + \dots + q_{n-1,n-1} k_{n-1} h)$$

โดยที่ตัวห้อย n บ่งถึงอันดับของระเบียบวิธี รุงเง-คุดตา

รุงเง-คุดตา อันดับสอง

จากสมการรูปแบบทั่วไปหากกำหนดให้ $n=2$ จะก่อให้เกิดระเบียบวิธี รุงเง-คุดตา อันดับสองดังนี้

โดยที่

$$y_{i+1} = y_i + (a_1 k_1 + a_2 k_2) h$$

$$k_1 = f(x_i, y_i)$$

$$k_2 = f(x_i + p_1 h, y_i + q_{11} k_1 h)$$

ระเบียบวิธี รุงเง-คุดตา อันดับสองนี้จะให้ผลลัพธ์ ที่มีความเที่ยงตรงเทียบเท่ากับผลลัพธ์ที่เกิดจากการใช้อนุกรมเทย์เลอร์ที่อยู่ในรูปแบบดังนี้

$$y_{i+1} = y_i + f(x_i, y_i) h + f'(x_i, y_i) \frac{h^2}{2} + \dots$$

จากกฎลูกโซ่ (Chain-rule) ค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งของสมการอนุกรมเทย์เลอร์ สามารถที่จะเขียนได้ดังนี้

$$f'(x, y) = \frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial f}{\partial y} \frac{dy}{dx} = \frac{\partial f}{\partial x} + f(x, y) \frac{\partial f}{\partial y}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนสมการ $f(x_i, y_i)$ ลงในสมการอนุกรมเทย์เลอร์จะได้

$$y_{i+1} = y_i + f(x_i, y_i)h + \left\{ \frac{\partial f}{\partial x} + f(x_i, y_i) \frac{\partial f}{\partial y} \right\} \frac{h^2}{2} + \dots$$

เขียนสมการ รุ่งง-คุดตา ให้อยู่ในรูปแบบของสมการอนุกรมเทย์เลอร์ แล้วทำการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ โดยจะประยุกต์อนุกรมเทย์เลอร์ที่ประกอบด้วย สองตัวแปรดังนี้

$$g(x+r, y+s) = g(x, y) + r \frac{\partial g}{\partial x} + s \frac{\partial g}{\partial y} + \dots$$

เข้ากับสมการ รุ่งง-คุดตา ซึ่งจะได้

$$k_2 = f(x_i, y_i) + p_1 h \frac{\partial f}{\partial x} + q_{11} k_1 h \frac{\partial f}{\partial y} + \dots$$

แทนค่า k_1 ลงในสมการ และทำการจัดพจน์จะได้

$$y_{i+1} = y_i + [a_1 f(x_i, y_i) + a_2 f(x_i, y_i)] h + [a_2 p_1 \frac{\partial f}{\partial x} + a_2 q_{11} f(x_i, y_i) \frac{\partial f}{\partial x}] \frac{h^2}{2} + \dots$$

หากเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ของสมการ รุ่งง-คุดตา ที่เกิดขึ้นนี้กับสัมประสิทธิ์ของสมการอนุกรมเทย์เลอร์ จะได้

$$a_1 + a_2 = 1$$

$$a_2 p_1 = \frac{1}{2}$$

$$a_2 q_{11} = \frac{1}{2}$$

มีเงื่อนไขเกิดขึ้น 3 เงื่อนไขในขณะที่มีตัวไม่รู้ค่าถึง 4 ตัว ดังนั้นสมมุติค่าหนึ่งขึ้นมาก่อน แล้วจึงหาค่าที่เหลืออีก 3 ค่า จากเงื่อนไขทั้ง 3 นี้ สมมุติว่าเลือก $a_2 = 1/2$ ดังนั้นจะได้

$$a_1 = 1/2 \quad ; \quad p_1 = 1 \quad ; \quad q_{11} = 1$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจะได้ สูตรของ รุงเง-คุตตา คือ

$$y_{i+1} = y_i + \left(\frac{1}{2}k_1 + \frac{1}{2}k_2 \right) h$$

และ

$$k_1 = f(x_i, y_i) = \text{ความชันที่จุดต้นของช่วงกว้าง } h$$

$$k_2 = f(x_i + h, y_i + k_1 h) = \text{ความชันที่จุดปลายของช่วงกว้าง } h$$

หากเราเลือก $a_2 = 1$ ดังนั้นจะได้

$$a_1 = 0 \quad ; \quad p_1 = \frac{1}{2} \quad ; \quad q_{11} = \frac{1}{2}$$

ดังนั้น สูตรของ รุงเง-คุตตา

$$y_{i+1} = y_i + (0 + k_2) h$$

และ

$$k_1 = f(x_i, y_i) = \text{ความชันที่จุดต้นของช่วงกว้าง } h$$

$$k_2 = f\left(x_i + \frac{1}{2}h, y_i + \frac{1}{2}k_1 h\right) = \text{ความชันที่จุดปลายของช่วงกว้าง } h$$

รุงเง-คุตตา อันดับสาม

ระเบียบวิธีของ รุงเง-คุตตา ที่อยู่ในรูปแบบทั่วไป เมื่อ $n = 3$ เพื่อก่อให้เกิด ระเบียบวิธีของ รุงเง-คุตตา อันดับสาม (third-order Runge-kutta method) รูปแบบของสมการรุงเง-คุตตา อันดับสาม ที่ใช้กันโดยทั่วไปซึ่งสามารถนำไปใช้ในการประดิษฐ์โปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้โดยตรง มีลักษณะ ดังนี้

$$y_{i+1} = y_i + \left[\frac{1}{6}(k_1 + 4k_2 + k_3) \right] h$$

โดย

$$k_1 = f(x_i, y_i)$$

$$k_2 = f\left(x_i + \frac{1}{2}h, y_i + \frac{1}{2}k_1 h\right)$$

$$k_3 = f(x_i + h, y_i + k_1 h + 2k_2 h)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลลัพธ์ที่คำนวณโดยระเบียบวิธีของ รุงเง - คุดตา อันดับสามนี้จะมีค่าความผิดพลาดใน รูปแบบของความกว้างช่วงอันดับสาม

รุงเง-คุดตา อันดับสี่

ระเบียบวิธี รุงเง-คุดตา อันดับสี่ (Fourth-order Runge-kutta method) ที่เขียนอยู่ในรูปแบบทั่วไป เมื่อ $n = 4$ จะมีค่าความผิดพลาดในรูปแบบของความกว้างช่วงอันดับสี่ ลักษณะของผลลัพธ์ที่มีความเที่ยงตรงสูงนี้ทำให้ระเบียบวิธีการนี้ถูกนำไปประยุกต์กับงาน การคำนวณในหลายๆด้าน โดยเฉพาะในงานวิจัยค้นคว้าที่ต้องการความเที่ยงตรงสูง รูปแบบของสมการ รุงเง-คุดตา อันดับสี่ที่ใช้กันโดยทั่วไปซึ่งสามารถนำไปประดิษฐ์ขึ้นเป็น โปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้โดยตรงมีลักษณะดังนี้

$$y_{i+1} = y_i + \left[\frac{1}{6} (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \right] h$$

โดยที่

$$k_1 = f(x_i, y_i)$$

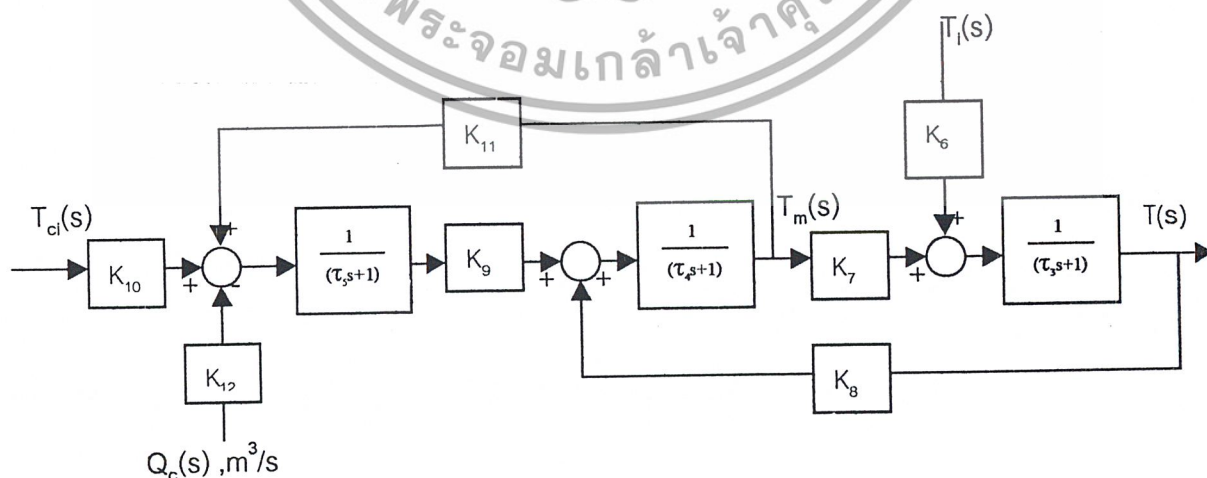
$$k_2 = f\left(x_i + \frac{1}{2}h, y_i + \frac{1}{2}hk_1\right)$$

$$k_3 = f\left(x_i + \frac{1}{2}h, y_i + \frac{1}{2}hk_2\right)$$

$$k_4 = f(x_i + h, y_i + hk_3)$$

2.6.3 การใช้ Numerical method ในการจำลองกระบวนการ

จาก Thermal process นำมาเขียน Block diagram ได้ดังนี้



ภาพที่ 2.11 แสดง Block diagram ของกระบวนการความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก Block Diagram จะได้ว่า

$$x(s) = K_{10}T_c(s) + K_{11}T_m(s) + K_{12}Q_c(s)$$

ทำการแปลงลาปลาซกลับได้

$$x(t) = K_{10}T_c(t) + K_{11}T_m(t) + K_{12}Q_c(t)$$

จาก
$$T_c(s) = \frac{1}{\tau_5 s + 1} x(s)$$

$$T_c(s) (\tau_5 s + 1) = x(s)$$

$$T_c(s) \tau_5 s + T_c(s) = x(s)$$

$$T_c(s) s = \frac{1}{\tau_5} (x(s) - T_c(s))$$

ทำการแปลงลาปลาซกลับได้

$$\frac{dT_c(t)}{dt} = \frac{1}{\tau_5} (x(t) - T_c(t))$$

-----2.5

จาก Block Diagram จะได้ว่า

$$x_1(s) = K_8 T(s) + K_9 T_c(s)$$

ทำการแปลงลาปลาซกลับได้

$$x_1(t) = K_8 T(t) + K_9 T_c(t)$$

จาก

$$T_m(s) = \frac{1}{\tau_4 s + 1} x_1(s)$$

$$T_m(s) (\tau_4 s + 1) = x_1(s)$$

$$T_m(s) s = \frac{1}{\tau_4} (x_1(s) - T_m(s))$$

ทำการแปลงลาปลาซกลับได้

$$\frac{dT_m(t)}{dt} = \frac{1}{\tau_4} (x_1(t) - T_m(t))$$

-----2.6

จาก Block Diagram จะได้ว่า

$$x_2(s) = K_6 T_i(s) + K_7 T_m(s)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการแปลงลาปลาซกลับได้

$$x_2(t) = K_6 T_i(t) + K_7 T_m(t)$$

จาก

$$T(s) = \frac{1}{\tau_3 s + 1} x_2(s)$$

$$T(s) (\tau_3 s + 1) = x_2(s)$$

$$T(s) s = \frac{1}{\tau_3} (x_2(s) - T(s))$$

ทำการแปลงลาปลาซกลับได้

$$\frac{dT(t)}{dt} = \frac{1}{\tau_3} (x_2(t) - T(t)) \quad \text{-----2.7}$$

ในการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ สมการที่ 2.5, 2.6, 2.7 นั้นโดยวิธีของ รุ่งแสง - กุศตา สามารถ

ทำได้ดังนี้

จาก

$$x(t) = K_{10} T_{ci}(t) + K_{11} T_m(t) + K_{12} Q_c(t)$$

และ

$$\frac{dT_c(t)}{dt} = \frac{1}{\tau_5} (x(t) - T_c(t))$$

จะได้

$$K1 = \frac{1}{\tau_5} (x(t) - T_c)$$

$$K2 = \frac{1}{\tau_5} \left[\left(x(t) + \frac{h}{2} \right) - \left(T_c + \frac{hK1}{2} \right) \right]$$

$$K3 = \frac{1}{\tau_5} \left[\left(x(t) + \frac{h}{2} \right) - \left(T_c + \frac{hK2}{2} \right) \right]$$

$$K4 = \frac{1}{\tau_5} \left[(x(t) + h) - (T_c + hK3) \right]$$

$$T_{c+1} = \left[T_c + \frac{1}{6} (K1 + 2K2 + 2K3 + K4) h \right]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $x_1(t) = K_8 T(t) + K_9 T_c(t)$

จาก

$$\frac{dT_m(t)}{dt} = \frac{1}{\tau_4} (x_1(t) - T_m(t))$$

จะได้

$$K1 = \frac{1}{\tau_4} (x_1(t) - T_m)$$

$$K2 = \frac{1}{\tau_4} \left[\left(x_1(t) + \frac{h}{2} \right) - \left(T_m + \frac{hK1}{2} \right) \right]$$

$$K3 = \frac{1}{\tau_4} \left[\left(x_1(t) + \frac{h}{2} \right) - \left(T_m + \frac{hK2}{2} \right) \right]$$

$$K4 = \frac{1}{\tau_4} \left[(x_1(t) + h) - (T_m + hK3) \right]$$

$$T_{m+1} = \left[T_m + \left(\frac{1}{6} (K1 + 2K2 + 2K3 + K4) h \right) \right]$$

เมื่อ

$$x_2(t) = K_6 T_1(t) + K_7 T_m(t)$$

และจาก

$$\frac{dT(t)}{dt} = \frac{1}{\tau_3} (x_2(t) - T(t))$$

จะได้

$$K1 = \frac{1}{\tau_3} (x_2(t) - T)$$

$$K2 = \frac{1}{\tau_3} \left[\left(x_2(t) + \frac{h}{2} \right) - \left(T + \frac{hK1}{2} \right) \right]$$

$$K3 = \frac{1}{\tau_3} \left[\left(x_2(t) + \frac{h}{2} \right) - \left(T + \frac{hK2}{2} \right) \right]$$

$$K4 = \frac{1}{\tau_3} \left[(x_2(t) + h) - (T + hK3) \right]$$

$$T = \left[T + \left(\frac{1}{6} (K1 + 2K2 + 2K3 + K4) h \right) \right]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 การใช้ตัวควบคุมกระบวนการแบบ PID

การออกแบบระบบควบคุม โดยใช้ Digital Control Algorithms ซึ่งจะเป็นการใช้ระบบควบคุมแบบไม่ต่อเนื่องในอุปกรณ์การควบคุมแบบอนาลอก นับเป็นการใช้อุปกรณ์ควบคุมโดยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ในการควบคุมแบบไม่ต่อเนื่องสามารถทำได้โดยการจำลองการควบคุมแบบต่อเนื่องของการควบคุมแบบอนาลอก ชนิดของตัวอย่างคือ algorithm ของ PI/PID อิเล็กทรอนิกส์วิธีทางโดยทั่วไป ที่ใช้ในการควบคุมใน discret form

2.7.1 การออกแบบ PI/PID Controller จาก time domain

ส่วนประกอบในอุดมคติของตัวควบคุม PID ถูกเขียนในรูปของฐานเวลาที่ต่อเนื่อง

จาก
$$U(t) = K_c e(t) + \frac{K_c}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_c T_d \frac{de(t)}{dt} + u_0$$

ในอุปกรณ์ควบคุมแบบไม่ต่อเนื่องเราต้องการประมาณค่า Integral และ derivative ที่เหมาะสมกับการใช้ในการประมวลผลโดยคอมพิวเตอร์ จากรูปแบบทางคณิตศาสตร์สามารถเขียนเป็นสมการดังนี้

$$\frac{de(t)}{dt} \cong \frac{e(t) - e(t-1)}{T_s} \quad \text{And} \quad \int_0^t e(t) dt \cong T_s \sum_{i=0}^t e(t)$$

ระบบควบคุมแบบ PID มี algorithm เขียนได้ดังนี้

$$U(t) = K_c e(t) + \frac{K_c T_s}{T_i} \sum_{i=0}^t e(t) + \frac{K_c T_d (e(t) - e(t-1))}{T_s} + u_0$$

อันซึ่งในขณะนี้เป็นรูปแบบของสมการ Differential มันเพียงพอในการทำ code ในการประมวลผลของภาษาในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในทางปฏิบัตินี้ฟอร์มของ PID algorithm จะเป็นในลักษณะ + PID control เพราะว่าสัญญาณการควบคุมถูกคิดจากสัญญาณพื้นฐาน U_0

2.7.2 PI/PID ในรูปของสมการลาปลาซโดเมน

เราสามารถคิด PID control ด้วยกฎ discrete PID control โดยตรงจากลาปลาซโดเมนดังนี้

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_c \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขณะนี้พวกเราสามารถประยุกต์ Backward different หรือ bilinear transformation จะได้สมการ Discrete PID Controller จากการประยุกต์ด้วยวิธีการ Backward difference จะได้

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_c \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \xrightarrow{\text{backward - difference}} u(t) = e(t) K_c \left\{ 1 + \frac{T_s}{T_i (1-z^{-1})} + T_d \frac{(1-z^{-1})}{T_s} \right\}$$

รูปแบบที่น่าจะนำมาใช้มีดังนี้

$$u(t) = u(t-1) + K_c [e(t) - e(t-1)] + \frac{K_c T_s}{T_i} e(t) + \frac{K_c T_d}{T_s} [e(t) - 2e(t-1) + e(t-2)]$$

สมการนี้เป็น PID Controller ซึ่งมีความแตกต่างในโครงสร้างที่เป็นส่วนประกอบข้อพิจารณาของ Time domain และรู้จักในรูปของ Velocity PID algorithm ซึ่งเป็นส่วนขัดแย้งกับการควบคุมแบบคงที่โดยอ้างอิงในการใช้ Positional algorithm ถึงนี้การคิดระบบควบคุมที่ยอมรับจะใช้ปริมาณการควบคุมที่มีความน่าเชื่อถือ ค่าที่แท้จริงของการควบคุมถูกคิดจากการเปลี่ยนแปลงดังนั้นกลุ่มของ Velocity Form algorithm ที่แทนที่ด้วยเทอมของ $(1-Z^{-1})$

2.7.3 Positional Velocity PID Algorithms

แม้ว่าโครงสร้างของ Positional Velocity PID Algorithms ปรากฏขึ้นจากความแตกต่างกันมากๆ แต่มันก็มีความสัมพันธ์กัน The positional Algorithm จะถูกนำมาจากเวลาที่เลื่อนถอยหลังกลับไปหนึ่งช่วงการสุ่มเป็น

$$u(t-1) = K_c e(t-1) + \frac{K_c T_s}{T_i} \sum_{i=0}^{t-1} e(i) + \frac{T_d (e(t-1) - e(t-2))}{T_s} + u_0$$

เมื่อลบมันออกจากสมการต้นกำเนิดจะมีรูปแบบที่เหมือนกับ Velocity Form

$$u(t) = u(t-1) + K_c [e(t) - e(t-1)] + \frac{K_c T_s}{T_i} e(t) + \frac{K_c T_d}{T_s} [e(t) - 2e(t-1) + e(t-2)]$$

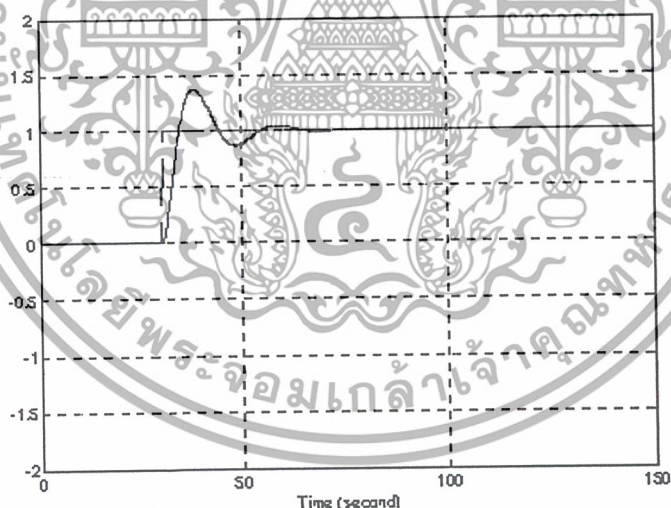
2.7.4 เครื่องมือและส่วนปฏิบัติการในรูปแบบของตัวควบคุม Discrete PID

การคิดการควบคุม Positional PID ต้องการรู้ค่าของ U_0 ซึ่งมีผลกับการควบคุมค่าทาง Out put ให้คงที่ U_0 อาจจะมีผลให้การทำงานผิดพลาดด้วย Velocity form อย่างไรก็ตาม ความเชื่อถือของการควบคุมสามารถปรับด้วยระดับบางระดับที่น่าเชื่อถือและมีความเหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

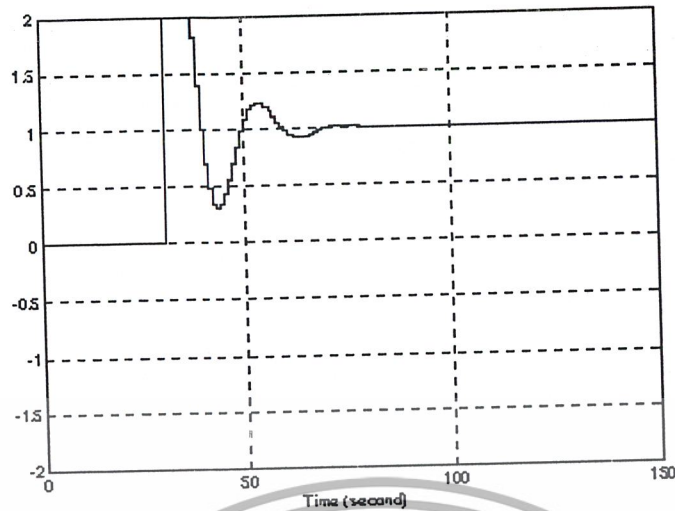
Integral Windup รูปร่างที่มีความสำคัญมาก จากการคิดด้วยผลรวมจากชุดของ Integral มันสามารถนำมาซึ่งปัญหาของปรากฏการณ์ที่รู้จักใน Integral Windup เหตุผลจากคาบเวลาที่ยาวนานของ over Shoot ของผลตอบสนองในตัวควบคุม Integral Windup มันสามารถเกิดขึ้นได้จากการปรับการควบคุมที่ไม่เหมาะสม หรือ Out put ตัวควบคุมถูกบังคับอย่างมาก (สำหรับบางเหตุผลของความปลอดภัย หรือการประมาณที่ไม่ถูกขนาดของการควบคุมค่าสุดท้าย) หรือผลรวมของข้อมูลทั้งหมด

สิ่งที่เกิดขึ้นคือ Process ถูก Control โดยมีค่า Gain เป็นบวก และจุด Set point เปลี่ยนเป็นบวกชุดควบคุมจะพยายามลดระดับความผิดพลาดระหว่าง Set point และ Out put ซึ่งเป็นบวกจากค่าเริ่มต้นส่วนประกอบของ Integral จะรวมค่าผิดพลาดที่เป็นบวกเกิดเป็นปฏิกิริยาการ Integrate ที่ไม่จำเป็นปฏิกิริยา Over shoot ที่เกิดขึ้นจากค่าผิดพลาดที่มาจากลบทิศทางของสัญญาณการควบคุมจะไม่เปลี่ยนด้วยการชดเชยถ้าผลรวมของข้อผิดพลาดทางบวกมีอิทธิพลนำเชื่อถือ ซึ่งในกรณีนี้เป็นเหตุให้ Over shoot มีขีดยาวออกไป ปฏิกิริยาการควบคุมนี้จะเปลี่ยนได้อย่างเดียวเมื่อมีข้อผิดพลาดทางลบสนับสนุนเพียงพอกับข้อผิดพลาดทางบวก วิธีการนี้ถูกเรียกในชื่อ Integral Windup หรือ Reset Windup ลักษณะของคำอธิบายแสดงดังรูป



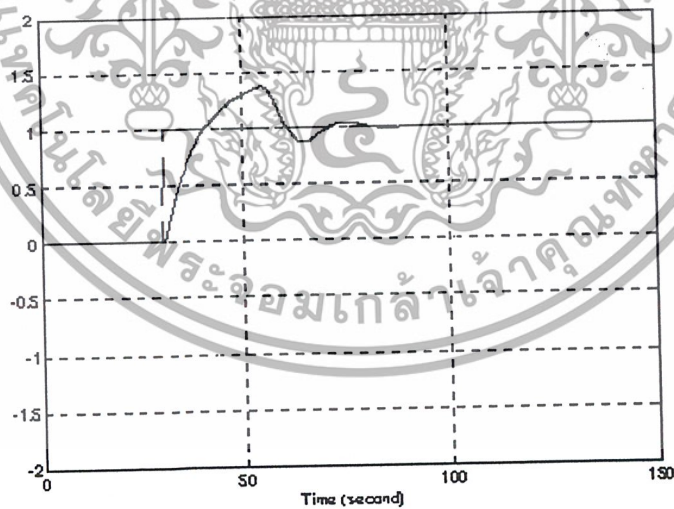
ภาพที่ 2.12 Out put ที่ปราศจากการควบคุมจากการบีบบังคับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



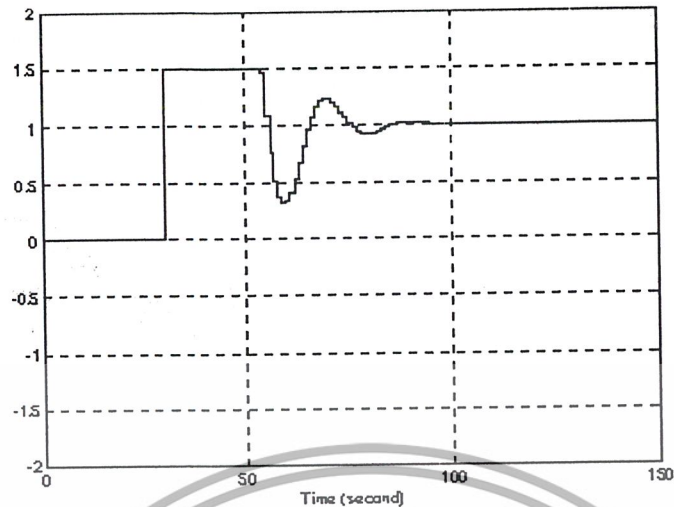
ภาพที่ 2.13 สัญญาณการควบคุมที่ถูกบีบบังคับ

ตามการ Set ค่าของจุดที่แสดงผลของ Integral windup เมื่อการควบคุม out put ถูกบีบบังคับ



ภาพที่ 2.14 Out put ที่มีการควบคุมแบบถูกบังคับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.15 สัญญาณการควบคุมที่ถูกบีบบังคับ

ด้วย Velocity PID Algorithms เพราะไม่ได้ถูกใช้สำหรับการรวมข้อผิดพลาดจากปฏิกิริยา Integral ทั่วไปโดยเมื่อเกิดปัญหา Integral Windup มันจะไม่ทำงานเสมอถ้าหากสัญญาณการควบคุมถูกบีบบังคับ

การปรับค่าตัวควบคุม วิธีการปรับทั้งหมดสำหรับการใช้ PID control กับเวลาที่ต่อเนื่องในส่วนนี้จากวิธีประมาณค่า Gain ของ Ziegler-Nichol ด้วยสูตรวิธีพื้นฐานพารามิเตอร์ของ $0.5 T_s$ ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในการเติมกับ dead time process ในส่วนของการดุ่ม

บทที่ 3

อุปกรณ์เชื่อมต่อ

3.1 อุปกรณ์เชื่อมต่อสัญญาณ

ในการติดต่อสื่อสารระหว่างคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ภายนอก(Interface)



ภาพที่ 3.1 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้เชื่อมต่อสัญญาณ

3.2 Protocol ที่ใช้ในการสื่อสาร

Read Data (Analog CH 0 – CH 3)

Command @ 00RA *XX

Response @ 00RA 0000 1111 2222 3333

Ch0 Ch1 Ch2 Ch3

Data 000 – 999 (Dec.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Write Data (Analog CH 0 – CH 3)

Command @ 00WR 00 FF *XX

└──┘ └──┘
 Ch0 Ch1
└──┘
 Data 00 – FF (Hex.)

โดย Referent ที่ Out put 0 - 10 V. = 00H – FFH

ถ้าจะทำการ Read ที่ละ Channel

Command @ 00RC 00 *XX

└──┘
 Channel Number 00, 01, 02, 03

รายละเอียดของวงจร Interface

Input 12 – 24 Vdc.
 A/D receive 0 – 10 Vdc. Input by MAX 192
 D/A sent Out 0 – 10 Vdc. Output by DAC 08E
 Connected with PC by RS232 serial port

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

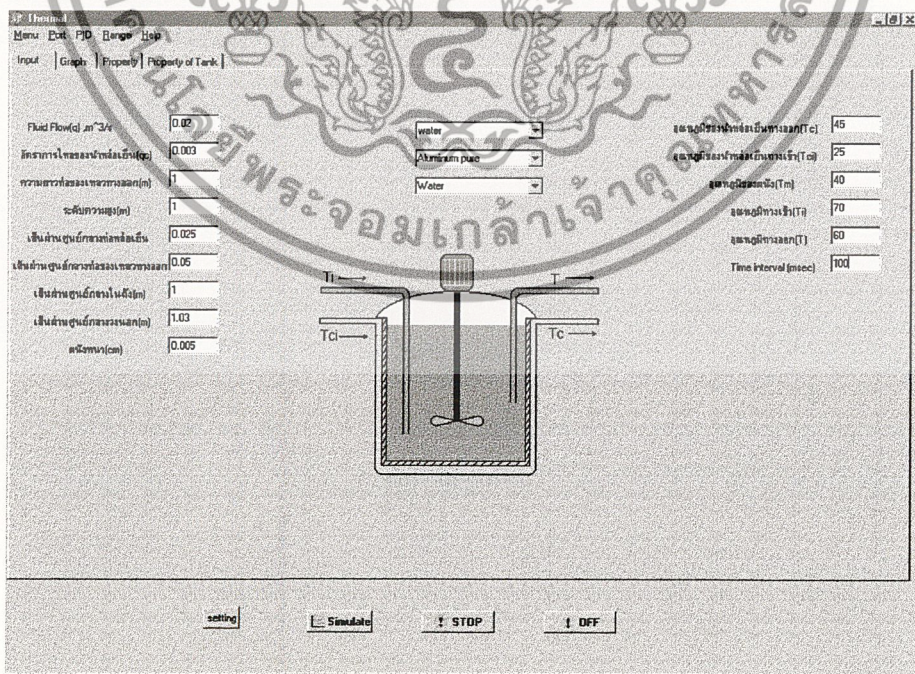
บทที่ 4

ผลการทดลอง

จากโปรแกรมแบบจำลองกระบวนการ จะใช้ Delphi ในการเขียน เนื่องจากได้ลองทดสอบเขียนในโปรแกรม Visual Basic แล้วเมื่อทำการรันโปรแกรมพร้อมกับ Interface กับ Algorithm การประมวลผลของโปรแกรมจะไม่ทันกับเวลาจริงที่ใช้ เราจึงเลือกใช้ Delphi ส่วนการทดลองกับ Visual C++ เป็นโปรแกรมที่ไม่ชำนาญที่จะใช้เพราะเนื้อหาเกี่ยวกับคู่มือการใช้งานมีน้อย

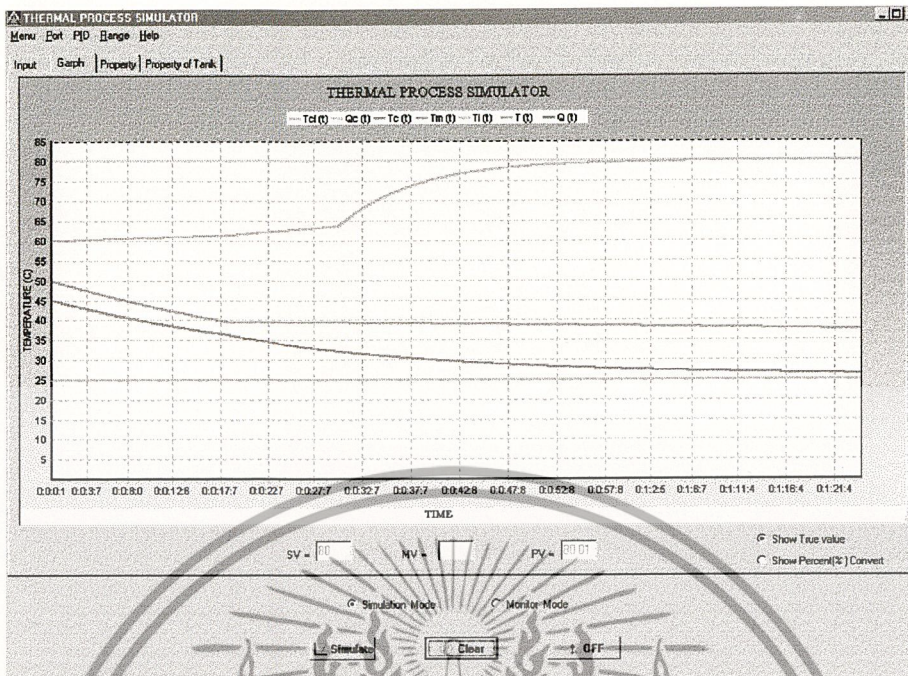
ส่วนการเลือกสมการที่ใช้ประมาณค่าเชิงอนุพันธ์ จากแนวทางเลือกค่าประมาณที่ใกล้เคียงที่สุด จากแนวทางทั้งหมด เช่น Euler's method, Heun's method, Modified Euler's method และ Runge - Kutta method เทียบกับวิธีผลลัพท์แม่นยำตรง ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าจากทุกๆวิธีการ วิธีของ Runge - Kutta fourth order จะให้ค่าที่ใกล้เคียงที่สุด โดยใช้สมการทดสอบ ซึ่งจะมี error ที่เกิดขึ้นในหลักที่ 4, 5 หลังจุดทศนิยมเท่านั้น จึงเลือกใช้วิธีของ Runge - Kutta

การทดสอบค่าคงที่ที่คำนวณจาก โปรแกรม อ้างอิงจากหนังสือ 3 เล่ม คือ Heat transfer ของ รศ.สุรินทร์ ศรีธนิษฐ์ และในเรื่องเดียวกันของ ดร.นักสิทธิ์ คุ้มฉายชัย โดยเทียบผลการคำนวณจากโปรแกรมกับตัวอย่างโจทย์วิเคราะห์ภายในเล่ม แล้วนำมาใช้ทำการวิเคราะห์ร่วมกันกับหนังสือ Energy Management ของ Paul O'Callaghan เทียบพฤติกรรมกับ Heat Exchangers ภายในหนังสือ ซึ่งเป็นการทดลองเทียบกับพฤติกรรมจาก Graph ก็ดูใกล้เคียงกัน

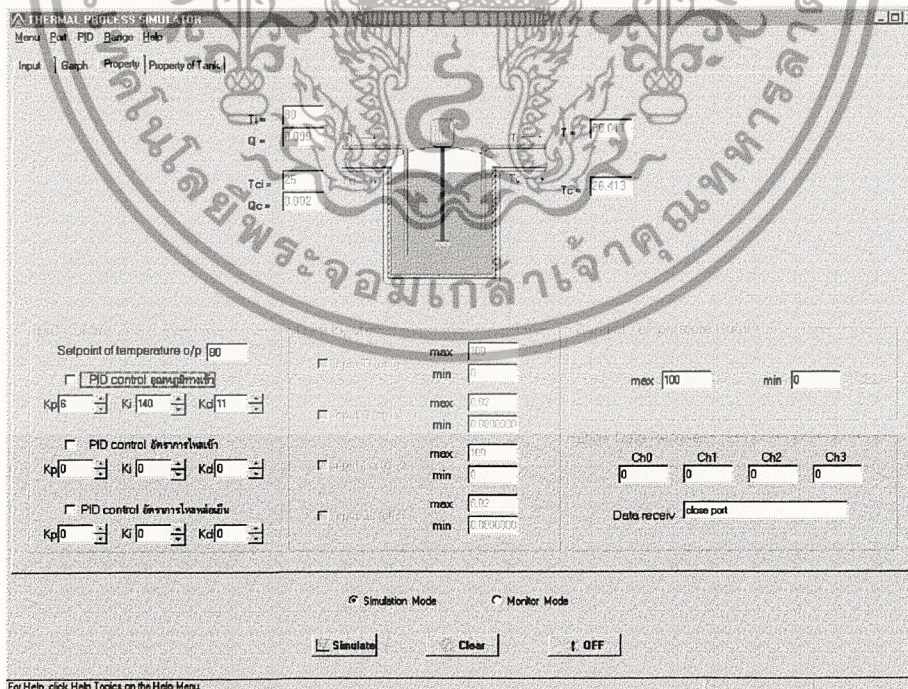


ภาพที่ 4.1 แสดงในส่วนของการป้อนค่า Input ข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

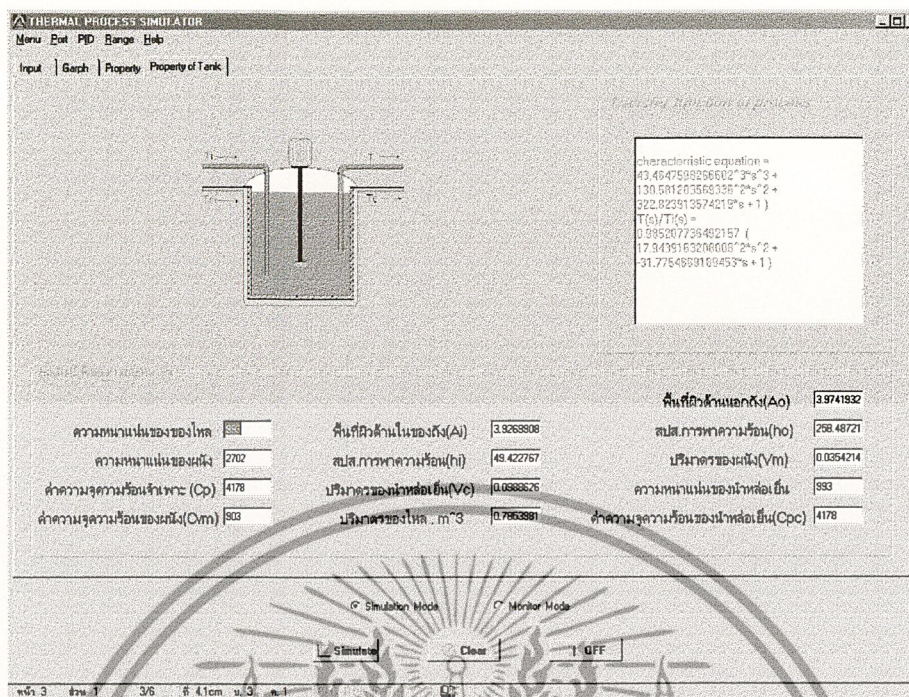


ภาพที่ 4.2 ส่วนของกราฟการแสดงผล



ภาพที่ 4.3 แสดงในส่วนของ Property การควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

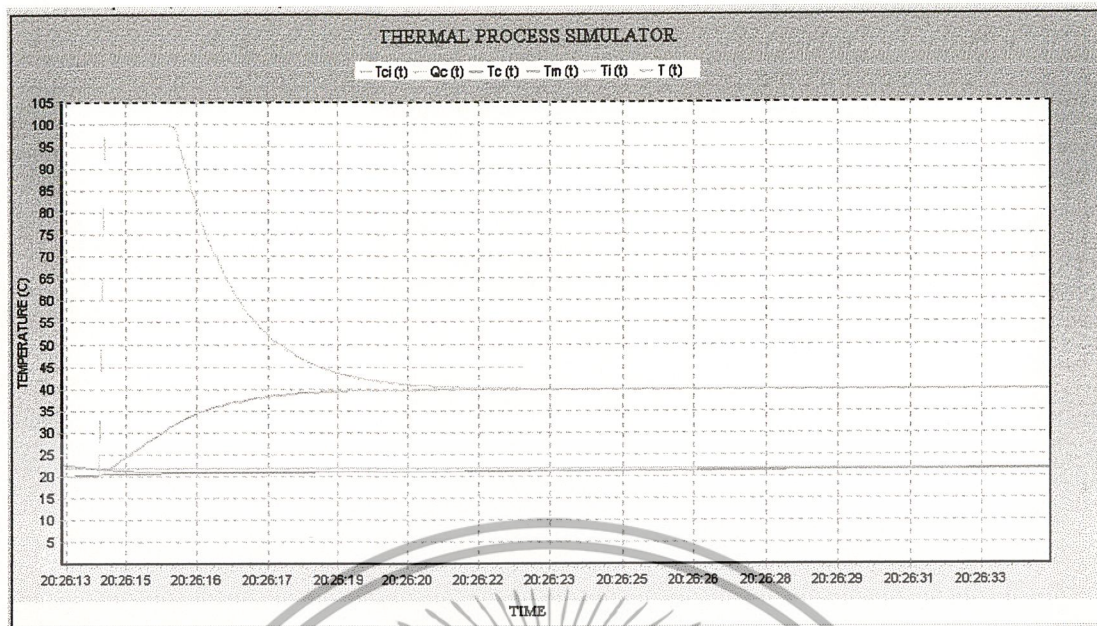


ภาพที่ 4.4 แสดง Property ของ Tank ซึ่งจะแสดง Transfer function ระบบด้วย

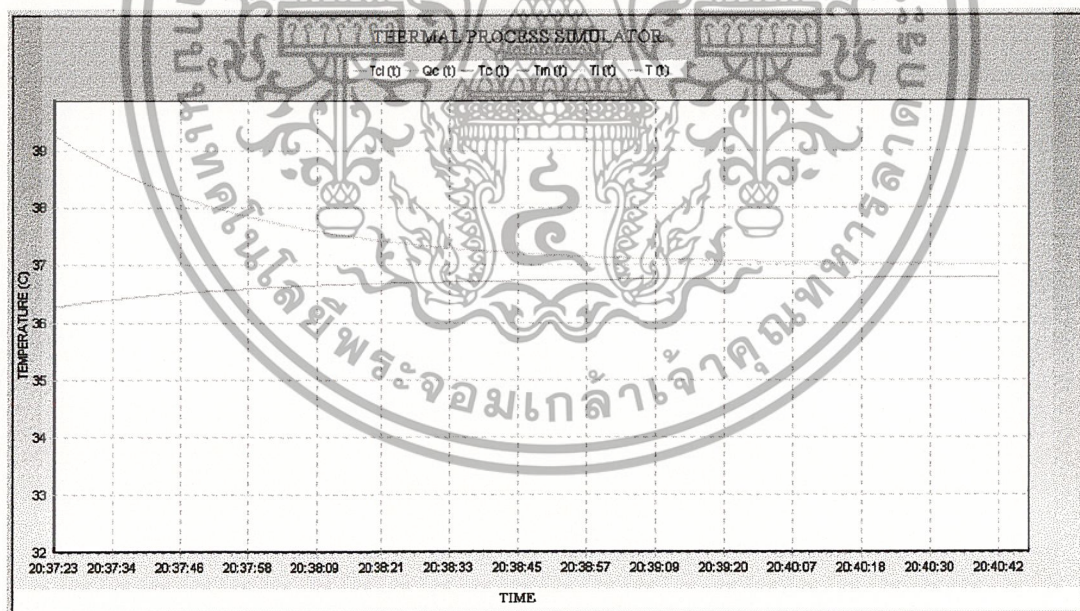
เนื่องจากว่ากระบวนการที่ทำ ไม่มีกระบวนการจริงที่จะใช้ในการสอบเทียบจึงใช้อ้างอิงจากทฤษฎี และงานวิจัยที่มีขึ้นในตำราต่างประเทศเข้ามาอ้างอิง ให้ผลการจำลองกระบวนการมีความน่าเชื่อถือยิ่งขึ้น

เมื่อทำการจำลองกระบวนการเสร็จแล้ว จึงทดสอบการควบคุมด้วย PID Controller โดยใช้ Algorithm ที่นำมาจากเครือข่าย Internet ซึ่งเป็นของ University of NEWCASTLE UPON TYNE โดย M.Tham ทดสอบโดยนำมาควบคุมอุณหภูมิทางออก และดูผลกระทบเทียบกับพฤติกรรมของระบบควบคุม จะเห็นว่ากราฟจะเกิดเช่นเดียวกับทฤษฎี ทั้งในส่วนของ Windup และ Offset ของระบบ ดังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



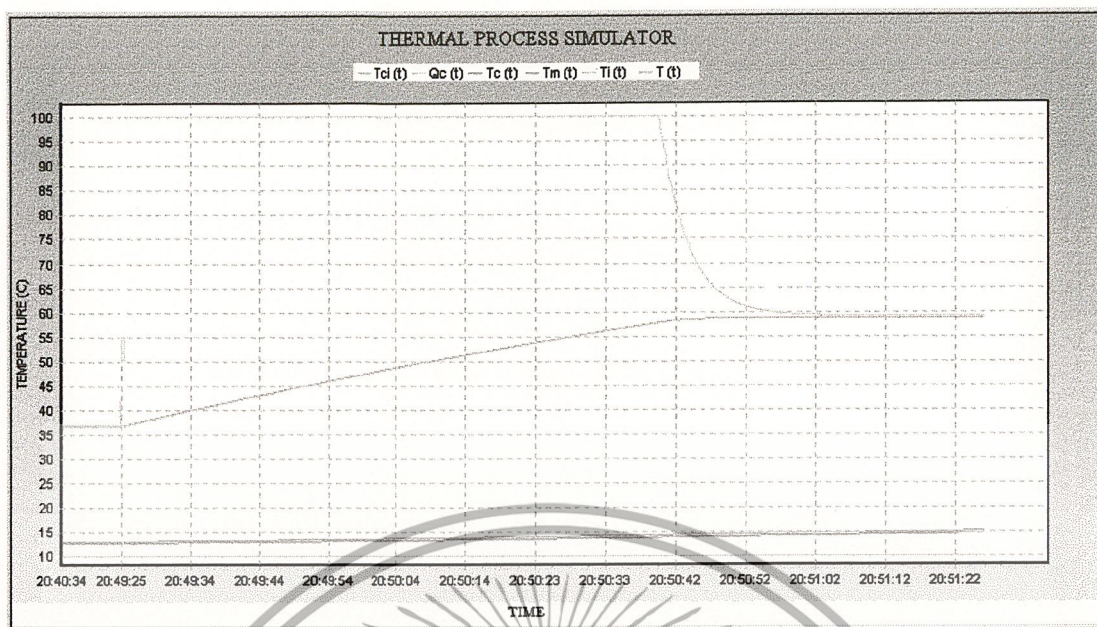
ภาพที่ 4.5 แสดงการเกิด Reset windup ในกระบวนการ



ภาพที่ 4.6 แสดง Offset ที่เกิดขึ้นในกระบวนการ ที่มี $K_p=23$, $K_i=45$, $K_d=15$, Setvalue=45

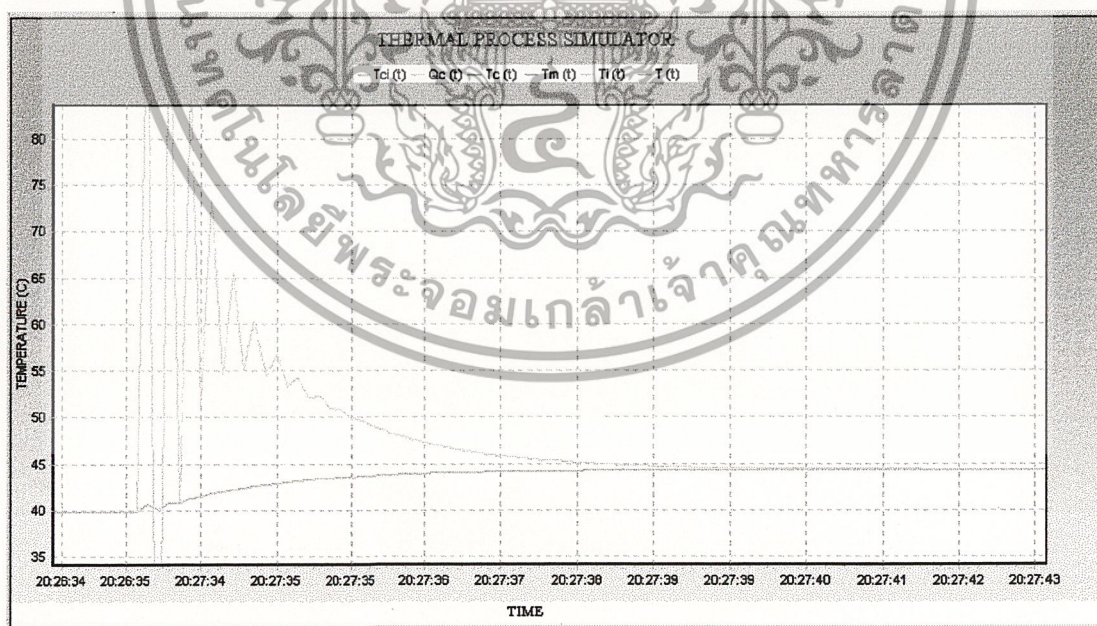
การปรับค่า K_i จะมีผลต่อค่า Offset ของกระบวนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



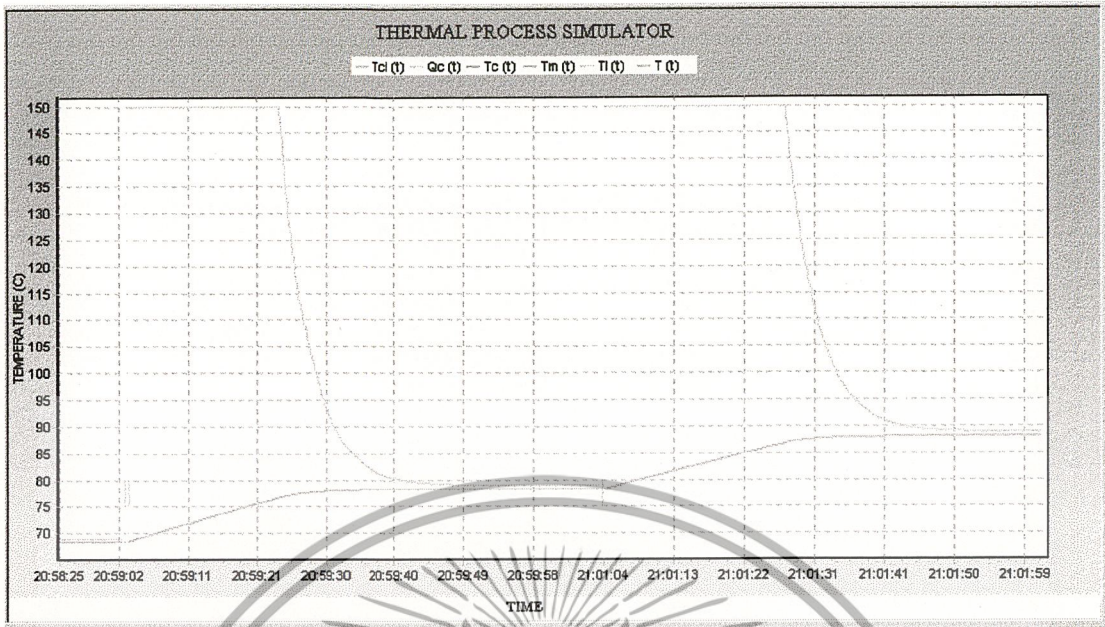
ภาพที่ 4.7 แสดง Offset ที่เกิดขึ้นในกระบวนการ ที่มี $K_p=23$, $K_i=459$, $K_d=15$, $Setvalue=45$

จะสังเกตเห็นว่าเมื่อ K_i เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ Offset (SV-PV) มีค่าลดลง น้อยกว่าที่ $K_i=45$



ภาพที่ 4.8 แสดงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า K_i

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.9 แสดงกราฟเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า K_d

จากกราฟเส้นสีเขียวเป็นอุณหภูมิทางเข้าที่ใช้ในการควบคุมกระบวนการ โดยมีค่า $K_p = 23$, $K_i = 459$, $K_d = 30$ ในคลัสเตอร์แรก และมี $K_p = 23$, $K_i = 459$, $K_d = 50$ ในคลัสเตอร์ที่สองจะสังเกตเห็นว่าเมื่อค่า K_d จะมีผลต่อค่าความไวที่จะเข้าสู่ Setpoint ได้เร็วขึ้น

เนื่องจากช่วงการเปลี่ยนแปลงของโปรแกรม สามารถที่จะเปลี่ยนแปลง ได้จากการรับค่า เพื่อให้ได้ค่าช่วงที่ละเอียดพอที่จะนำไปใช้ในการควบคุมได้ จึงมีการกำหนดช่วง(Range) ของการเปลี่ยนแปลงเทียบกับสัญญาณ 0-10 V. Output หรือ Input โดยถ้ายังกำหนดให้ Range แคลค่าที่ได้ก็จะมีค่าที่ใกล้เคียงมาก เป็นเพราะค่าทาง Input มี Resolution 0-999 ความแตกต่าง ส่วน Output มี 0-255 ส่วนความแตกต่างเท่านั้น ดังนั้นในการ Set ค่านี้ไว้จะมีส่วนเกี่ยวข้องกับค่าการเปลี่ยนแปลงทาง Output และ Input range จึงไม่ควรตั้งค่า Span ไว้มากเกินไปจะทำให้ค่าทางเข้าหรือออกมีความผิดพลาดสูง เมื่อต่อกับอุปกรณ์ควบคุม หรือแสดงผลภายนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปวิจารณ์ผล

5.1 บทสรุป

จากจุดประสงค์ในการทำปริญญานิพนธ์นี้ เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างของกระบวนการก่อนการตัดสินใจเลือกใช้วัสดุ โดยมองในรูปคุณสมบัติของโครงสร้าง และทฤษฎีพื้นฐานทั้งหมดของอุปกรณ์ด้วยการใช้ทฤษฎีของ Thermodynamic, Heat transfer และ Fluid เข้ามาช่วยวิเคราะห์ร่วมกับการจำลองผลทาง Dynamic จึงทำให้ค่าที่ได้เป็นไปตามทฤษฎี ซึ่งอาจเป็นไปได้แค่ค่าที่ใกล้เคียงกับกระบวนการจริงเท่านั้น ไม่สามารถเป็นค่าแน่นอนได้ แต่เป็นการจำลองผลเพื่ออาจนำไปใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาจากวัสดุ หรือโครงสร้างพื้นฐานที่อาจมีผลต่อการนำไปใช้ และการควบคุมได้ เช่น จากการเปลี่ยนแปลงความหนาผนังหรือชนิดผนังจะสังเกตเห็นว่าการควบคุมของผนังบางชนิดจะง่ายกว่า เช่น ทองแดงจะควบคุมง่ายกว่าอะลูมิเนียม เป็นต้น การจำลองกระบวนการในครั้งนี้เป็นเพียงการยกตัวอย่าง Process ซึ่งเราคิดว่าน่าจะสามารถนำมาวิเคราะห์กระบวนการอย่างคร่าวๆ ได้ โดยไม่จำเป็นต้องสร้าง Process จริงๆขึ้นมา ซึ่งเป็นการลดค่าใช้จ่าย และสามารถนำผลมาทำนายเหตุการณ์ หรือโอกาสที่จะเกิดเหตุการณ์ต่างๆในอนาคตได้ เพื่อจะได้เตรียมการแก้ไข หรือทำการวิเคราะห์ปัญหาได้ทันที

5.2 ข้อเสนอแนะ

การทำงานของแบบจำลองกระบวนการ เป็นการจำลองเพื่อให้เห็นพฤติกรรมที่จะพิจารณาจากโครงสร้างทางกายภาพ จึงต้องวิเคราะห์ทั้งรูปร่าง ขนาด และชนิดวัสดุทำให้การป้อนค่าดูยุ่งยาก ร่วนวายเพราะมีตัวแปรร่วมอยู่มาก จากโปรแกรมจึงใช้การป้อนค่าขนาดมาตรฐานไว้ก่อน แล้วถ้าผู้จำลองต้องการแก้ไขก็สามารถแก้ไขได้เลยเช่นกัน

ผลจากการจำลองกระบวนการสามารถนำไปวิเคราะห์ความสามารถของวัสดุได้ ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของ Service แตกต่างสูงมากๆ เมื่อเทียบกันทั้งสองด้านของผนัง และสูงเกินค่าที่วัสดุจะรับได้

เมื่อกระบวนการมีอัตราการไหลมากๆเกินกว่า $1 \text{ m}^3/\text{sec}$ จะทำให้เกิด Error ขึ้นในโปรแกรม เนื่องจากเกิด Over flow เพราะมวลที่ไหลผ่านท่อขนาดเล็กมีมากเกินไปทำให้เกิดความดันสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] Carlos A. Smith and Armando B. Corripio. **Principles and Practice Automatic Process Control**. New York: John Wiley & Sons,1985.
- [2] Okata,K **Modern Control Engineering**. 3rd Edition. New Jersey: Prentice – Hall,1997.
- [3] Paul O’Callaghan. **Energy Management** .Chapter 4 Heat Exchangers. New York: McGraw – Hill Book Company,1998.
- [4] W.F.Stoecker. **Design of Thermal Systems**.Chapter 10 Dynamic Programming. 3rd Edition. New York: McGraw – Hill Book Company,1996.
- [5] ตั๊จจะ จรัสรุ่งรวีวรร และ จักรพงษ์ สุขประเสริฐ. คู่มือการสร้างแอปพลิเคชันด้วย Delphi 5.0 ฉบับสมบูรณ์.กรุงเทพฯ : อินโฟเพรส , 2543.
- [6] วิศิษฐ์ จาตุรमान และ ขวัญชัย สันทิพย์สมบูรณ์. กลศาสตร์ของไหล. เรื่องการไหลในท่อ หน้า 368 – 444. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์ บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด.
- [7] รศ.สุนันท์ ศรีธรรณิตย์. การถ่ายเทความร้อน. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ โรงพิมพ์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี,2538.
- [8] รศ.ดร.ปราโมทย์ เคชชะอำไพ. ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,2544.
- [9] ดร.นักสิทธิ์ คูวัฒนาชัย. การถ่ายเทความร้อน. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : พิมพ์ที่สำนักพิมพ์พิสิทส์เซ็นเตอร์, 2530.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้