



การหาแบบจำลองและการออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิภายในอาคาร

Building Energy Modeling and Control Design

นางสาวกนิษฐา กิติกาญจน์
นายฐิติวัฒน์ สัตยชัยชาติ
นางสาวทิพวรรณ นพสรน้อย

โครงการวิศวกรรมไฟฟ้า เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า แขนงวิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ปีการศึกษา 2557

การหาแบบจำลองและการออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิภายในอาคาร

Building Energy Modeling and Control Design



นางสาวกนิษฐา

กิตติกาญจน์

นายฐิติวัฒน์

สัตยชัยชาติ

นางสาวทิพวรรณ

นพสรระน้อย

โครงการวิศวกรรมไฟฟ้า เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า แขนงวิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ปีการศึกษา 2557

หัวข้อโครงการวิศวกรรม สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

เรื่อง การหาแบบจำลองและการออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิภายในอาคาร

โดย

นางสาว กนิษฐา กิตติกาญจน์

นาย จูติวัฒน์ สัตยชัยชาติ

นางสาว ทิพวรรณ นพสรระน้อย

ภาควิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

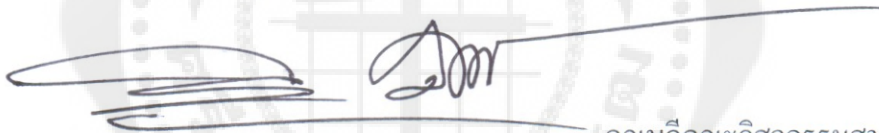
อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ ดร. กฤษชัย วิถีพานิช

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วุฒิพล ชาราธิ์รเศรษฐ์

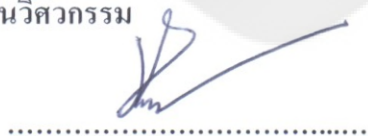
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ อนุมัติให้นับโครงการวิศวกรรมไฟฟ้า
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรวิศวกรรมบัณฑิต



.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.เวคิน ปิยรัตน์)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

คณะกรรมการสอบโครงการวิศวกรรม



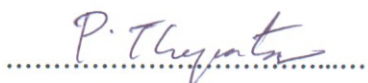
ประธานกรรมการ

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วุฒิพล ชาราธิ์รเศรษฐ์)



กรรมการ

.....
(อาจารย์ ดร.คณิศร์ มาตรา)



กรรมการ

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พินิจ เทพสาคร)

การหาแบบจำลองและการออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิภายในอาคาร
ปีการศึกษา 2557

โดย

นางสาวกนิษฐา กิติกาญจน์

นายฐิติวัฒน์ สัญชัยชาติ

นางสาวทิพวรรณ นพสรน้อย

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ ดร.กฤษชัย วิถีพานิช

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วุฒิพล ธาราธิรเศรษฐ์

บทคัดย่อ

โครงการนี้นำเสนอ วิธีการหาแบบจำลองและการออกแบบตัวควบคุมอุณหภูมิภายในอาคาร เราจำลองพฤติกรรมทางความร้อนของอาคาร โดยอาศัยหลักการเทียบเคียงของการถ่ายเทความร้อน กับโครงข่ายไฟฟ้าชนิด R-C ที่สามารถวิเคราะห์ด้วยวิธี โนด หลังจากได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แล้ว เราออกแบบตัวควบคุมอุณหภูมิภายในอาคารด้วยการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลอง (Model Predictive Control, MPC) ผลการจำลองการทำงานแสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมเชิงทำนายแบบจำลอง สามารถควบคุมอุณหภูมิภายในห้องและประหยัดพลังงานได้ดีกว่าการควบคุมแบบพีไอดี

คำสำคัญ: ระบบควบคุมอุณหภูมิภายในอาคาร/ ตัวควบคุมแบบพีไอดี/ การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลอง

Building Energy Modeling and Control Design**Academic Year 2014****By**

Miss Kanittha Kitikanchana

Mr. Thitiwat Sunchaichart

Miss Thippawan Nopsanoi

Project Advisor

Dr. Kritchai Witheephanich

Co- Project Advisor

Asst. Prof. Dr. Vuttiapon Tarateeraseth

ABSTRACT

This project presents the modeling and controller design of building temperature control systems. In this work, we model thermal behavior of the building to describe the temperature variation based on analogy between heat transfer phenomena and electrical RC network, thereby nodal analysis can be applied. After the thermal model is obtained, we design the temperature controller using Model Predictive Control (MPC). The simulation results illustrate that the MPC controller performs better performance on controlling the room temperature as well as provides less energy consumption comparing to PID control.

Keywords: building energy modeling/ PID controller/ model predictive control

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิศวกรรมฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาจาก อาจารย์ ดร.กฤษชัย วิถีพานิช ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการได้อำนวยความสะดวกให้ความรู้และคำแนะนำในการทำโครงการ รวมถึงเป็นที่ปรึกษาและตรวจทานแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ส่งผลให้โครงการนี้เสร็จสมบูรณ์และเป็นประโยชน์แก่ทางมหาวิทยาลัย คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบคุณอาจารย์ ดร.คณิตร์ มาตรา และผศ.ดร.วุฒิพล ชาราธิ์รเศรษฐ์ ที่ได้ให้ความดูแลอำนวยความสะดวกแทนอาจารย์ ดร.กฤษชัย วิถีพานิช ซึ่งมีการกิจระหว่างไปศึกษาต่อ

ขอขอบคุณบุคลากรในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย ศรีนครินทรวิโรฒ ที่อำนวยความสะดวกในการจัดทำโครงการ ตลอดจนอำนวยความสะดวกในด้านต่างๆ ตลอดมา

ขอกราบขอบพระคุณพ่อ คุณแม่ และญาติพี่น้องทุกท่านที่ให้ความอุปการะทุนในการศึกษาเล่าเรียน และเป็นกำลังใจด้วยดีตลอดมา

สุดท้ายนี้คณะผู้จัดทำขอแสดงความขอบคุณเป็นอย่างสูง สำหรับทุกท่านที่มีส่วนในการทำโครงการนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ทั้งที่กล่าวมาแล้ว และยังไม่ได้กล่าวมาข้างต้น คณะผู้จัดทำหวังเป็นอย่างยิ่งว่าโครงการนี้คงมีประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจไม่มากนักน้อย ถ้ามีสิ่งใดที่ขาดตกบกพร่องหรือผิดพลาดประการใดก็ขออภัยไว้ ณ ที่นี้ด้วย

สารบัญ

หน้าที่

บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
สารบัญรายการสัญลักษณ์	ซ
ประมวลศัพท์และคำย่อ	ฌ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตโครงการวิศวกรรม	2
1.4 ประโยชน์ที่จะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer)	4
2.2 ระบบควบคุมเชิงเส้น	9
บทที่ 3 การดำเนินงานและการออกแบบ	22
3.1 บทนำ	22
3.2 การหาแบบจำลองพลวัตของอาคารในรูปแบบโครงข่ายไฟฟ้าชนิด R-C	23
3.3 การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	24
3.4 การทำให้เป็นเชิงเส้น (Linearization)	26

สารบัญ (ต่อ)

	หน้าที่
บทที่ 4 ผลการทดลอง	33
4.1 กล่าวนำ	33
4.2 ระบบวงเปิด	33
4.3 ระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมแบบพีไอดี	34
4.4 ระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมแบบเชิงทำนาย	36
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	37
5.1 กล่าวนำ	37
5.2 สรุปผลการทดลอง	37
5.3 ปัญหาและอุปสรรคในการทำงาน	38
5.4 ข้อเสนอแนะ	38
เอกสารอ้างอิง	39
ภาคผนวก	40
ประวัติย่อ นิสิตผู้ทำโครงการ	44

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าโดยประมาณของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย	7
3.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบ	22



สารบัญรูป

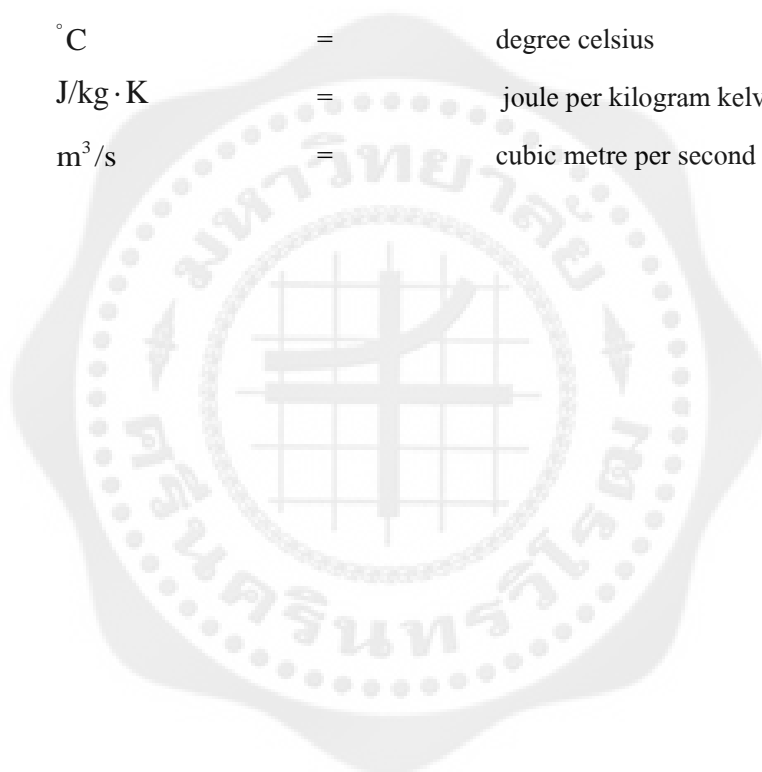
รูปที่	หน้า
2.1 รูปแบบการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้น โดยการนำ การพา และการแผ่รังสี	4
2.2 การพัฒนาชั้นขอบเขตในการถ่ายเทความร้อน	7
2.3 วงจรความร้อนสำหรับการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังเมื่อผิวทั้งสองด้าน	8
2.4 ระบบควบคุมแบบเปิด	9
2.5 ระบบควบคุมป้อนกลับ	10
2.6 ระบบควบคุมหลายตัวแปร	10
2.7 รูปแบบมาตรฐานของตัวควบคุมแบบพีไอดี	13
2.8 กลยุทธ์แกนนถอย (Receding horizon strategy)	21
2.9 ผลตอบสนองวงปิดและผลตอบสนองการทำนาย สำหรับระบบอันดับสอง	21
3.1 แบบจำลองอณูภูมิของกำแพงแต่ละด้าน ในโปรแกรม MATLAB/Simulink	23
3.2 แบบจำลองอณูภูมิของห้องที่ 1 ในโปรแกรม MATLAB/Simulink	23
3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในโปรแกรม MATLAB/Simulink	28
3.4 ค่าของอณูภูมิในระบบวงเปิดโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	29
3.5 แบบจำลองวงจรสมมูลทางไฟฟ้า	29
3.6 ค่าของอณูภูมิในระบบวงเปิดโดยใช้วงจรสมมูลทางไฟฟ้า	29
3.7 แบบจำลองวงจรสมมูลทางไฟฟ้าที่มีตัวควบคุมแบบพีไอดี	30
3.8 ค่าของอณูภูมิภายในห้องที่มีตัวควบคุมพีไอดี	30
3.9 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีตัวควบคุมแบบพีไอดี	30
3.10 ค่าอณูภูมิของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีตัวควบคุมแบบพีไอดี	31
4.1 อณูภูมิภายในห้องที่ไม่มีการควบคุม	33
4.2 อณูภูมิภายในห้องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	34
4.3 อณูภูมิภายในห้องโดยมีตัวควบคุมแบบพีไอดี	35
4.4 อณูภูมิภายในห้องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยมีตัวควบคุมแบบพีไอดี	35

สารบัญรายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
A_n	พื้นที่ของกำแพงด้านที่ n	m^2
A	เมตริกซ์สถานะ	ไม่มีหน่วย
B	เมตริกซ์นำเข้า	ไม่มีหน่วย
C	เมตริกซ์นำออก	ไม่มีหน่วย
C_{wall_n}	ค่าความจุความร้อนของกำแพงด้านที่ n	kJ/K
C_{room}	ค่าความจุความร้อนของห้อง	kJ/K
C_{pair}	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ	$J/kg \cdot K$
D	เมตริกซ์รับกวนระบบ	ไม่มีหน่วย
\dot{m}	อัตราการไหลของมวลอากาศเข้ามาในห้อง	m^3/s
\ddot{q}_{rad_n}	สภาพการแผ่รังสีความร้อนของภายนอกห้อง	W/m^2
\dot{q}_{int}	สภาพการแผ่รังสีความร้อนของภายในห้อง	W
R_{wall_n}	ค่า R-Value ของกำแพงด้านที่ n	$m \cdot K/W$
R_{in}	ค่า R-Value ของด้านในห้อง	$m \cdot K/W$
R_{out}	ค่า R-Value ของด้านนอกห้อง	$m \cdot K/W$
T_{Air}	อุณหภูมิจากระบบปรับอากาศ	$^{\circ}C$
T_{in}	อุณหภูมิภายในห้อง	$^{\circ}C$
T_{wall}	อุณหภูมิของกำแพง	$^{\circ}C$
T_{out}	อุณหภูมิภายนอกห้อง	$^{\circ}C$
x	เวกเตอร์สถานะ	ไม่มีหน่วย
u	ค่านำเข้าของระบบ	ไม่มีหน่วย
y	ค่านำออกของระบบ	ไม่มีหน่วย

ประมวลศัพท์และคำย่อ

kJ/K	=	kilojoule per kelvins
m^2	=	square metre
kg/s	=	kilogram per second
W/m^2	=	watt per square metre
W	=	watt
$\text{m} \cdot \text{K/W}$	=	meter kelvins per watt
$^{\circ}\text{C}$	=	degree celsius
$\text{J/kg} \cdot \text{K}$	=	joule per kilogram kelvins
m^3/s	=	cubic metre per second



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

จากข้อมูลตามแผนอนุรักษ์พลังงาน 20 ปี (พ.ศ. 2554 – 2573) ของกระทรวงพลังงาน ที่กล่าวถึงอัตราการใช้พลังงาน ในระยะ 20 ปีที่ผ่านมา (พ.ศ. 2533 – 2553) ซึ่งให้เห็นว่าการใช้พลังงานของประเทศไทยมีอัตราเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเฉลี่ยร้อยละ 4.4 ต่อปี จนถึงปัจจุบันมีการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นเป็น 2.3 เท่าของปี 2533 ซึ่งเป็นการเจริญเติบโตที่ควบคู่กับอัตราการขยายตัวทางเศรษฐกิจมีค่าเฉลี่ยร้อยละ 4.5 ต่อปี โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้พลังงานในภาคอุตสาหกรรมการผลิตและอาคารธุรกิจนั้นสูงกว่าอัตราการเติบโตของ GDP มาก หรือเพิ่มเป็น 3.0 และ 3.7 เท่าตามลำดับ เมื่อเทียบกับปี 2533 จากข้อมูลดังกล่าวพบว่า ภาคอาคารสำนักงานมีการใช้พลังงานสูงกว่าภาคอุตสาหกรรมโดยมีสัดส่วนมากกว่าร้อยละ 20 ของการใช้พลังงานทั้งหมด และปัจจัยที่ส่งผลให้ภาคอาคารธุรกิจมีการใช้พลังงานสูง ส่วนหนึ่งมาจาก สภาพภูมิอากาศของประเทศไทยที่มีอุณหภูมิสูงจนเกินขอบเขตความสบาย ทำให้สัดส่วนการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบปรับอากาศภายในอาคารมีอัตราการใช้น้สูงกว่าร้อยละ 50 ของการใช้น้ทั้งหมดภายในอาคาร

ที่มา : บัณฑิต พึ่งธรรมสารและคณะ. (2554)

จากข้อมูลข้างต้น โครงการนี้เป็นการศึกษาการหาแบบจำลองของระบบควบคุมอุณหภูมิภายในอาคาร โดยอาศัยหลักการถ่ายเทความร้อน แล้วจำลองการทำงานของระบบด้วยโปรแกรม MATLAB จากการใช้เครื่องมือหลักบน Simulink คือ Simscape เพื่อจำลองการทำงานของระบบควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งผลการจำลองการทำงานมุ่งเน้นการวิเคราะห์พลังงานที่ใช้ไปในส่วนของระบบปรับอากาศภายในอาคาร จากนั้นจึงทำการออกแบบตัวควบคุมเชิงทำนายแบบจำลอง (Model predictive control, MPC) เพื่อควบคุมอุณหภูมิภายในห้องให้อยู่ในช่วงขอบเขตความสบายของผู้ใช้งานภายในอาคาร นอกจากนี้ยังสามารถปรับปรุงสมรรถนะของระบบให้ดีขึ้น และสามารถนำผลวิเคราะห์และการออกแบบตัวควบคุมมาประยุกต์ใช้ในการลดพลังงานไฟฟ้าที่เกินความจำเป็นได้

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อประยุกต์หลักการทางวิศวกรรมไฟฟ้าและทฤษฎีการควบคุมสำหรับการหาแบบจำลองและการออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิภายในอาคาร

1.3 ขอบเขตโครงการวิศวกรรม

1.3.1 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอาคารจากการประยุกต์ใช้ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าชนิด R-C

1.3.2 สร้างแบบจำลองและจำลองการทำงานเพื่อวิเคราะห์พลวัตของอาคารด้วยโปรแกรม MATLAB โดยใช้เครื่องมือหลักใน Simulink คือ Simscape

1.3.3 ออกแบบตัวควบคุมเชิงทำนายแบบจำลอง (MPC) เพื่อควบคุมอุณหภูมิของอาคาร โดยเปรียบเทียบสมรรถนะของการควบคุมและการประหยัดพลังงานกับตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID Controller)

1.4 ประโยชน์ที่จะได้รับ

1.4.1 สามารถใช้ผลการวิเคราะห์และออกแบบตัวควบคุมเพื่อเป็นแนวทางลดปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและประหยัดค่าใช้จ่ายพลังงานไฟฟ้าของอาคารได้

1.4.2 สามารถนำความรู้ที่ศึกษาไปใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงระบบควบคุมอุณหภูมิภายในอาคารได้อย่างเหมาะสม

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การออกแบบการจำลองระบบควบคุมอุณหภูมิภายในอาคาร ผู้ออกแบบต้องศึกษาหลักการถ่ายเทความร้อน (Principles of heat transfer) เพื่อทราบถึงค่าตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อระบบควบคุมอุณหภูมิในอาคาร เนื่องจากค่าอุณหภูมิภายในและนอกอาคารมีความแตกต่างกัน ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนบริเวณโดยรอบอาคาร คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุจะต้องมีค่าความจุความร้อนจำเพาะ (c_p) ซึ่งใช้เป็นตัวชี้วัดค่าความร้อนหรือพลังงานความร้อน ที่ทำให้วัตถุหนึ่งหน่วยสสารมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นหนึ่งองศา ค่าความร้อนแปรผันตรงกับอุณหภูมิและค่าความจุความร้อนจำเพาะ ส่งผลให้เมื่อค่าความร้อนเพิ่มขึ้นจะทำให้อุณหภูมิและค่าความจุความร้อนสูงขึ้นตามไปด้วยดังสมการ

$$Q = mc_p \dot{T} \quad (2.1)$$

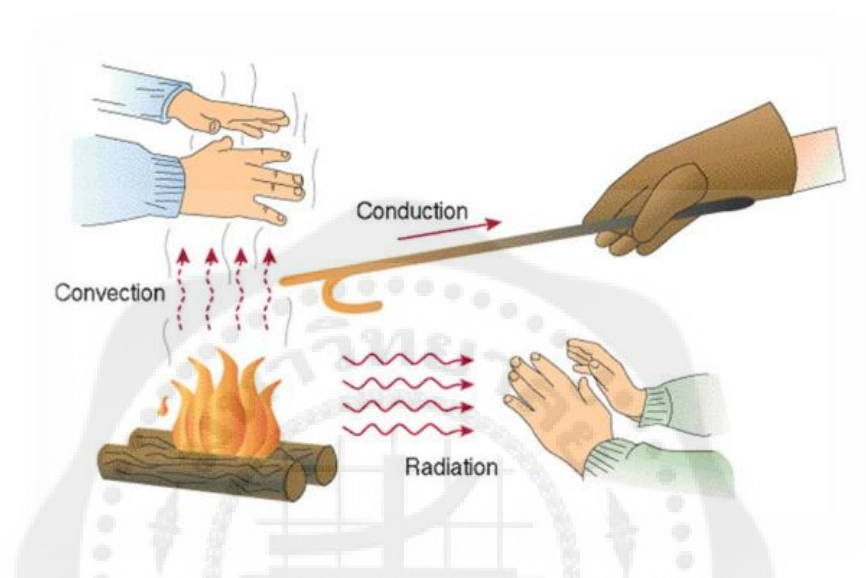
เมื่อ m คือ มวลของวัตถุ ; kg
 c_p คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะ ; kJ/kg·K
 \dot{T} คือ อุณหภูมิที่เปลี่ยนไป ; K
 Q คือ การไหลของความร้อน ; kJ

ที่มา : Mehdi Maasoumy Haghighi. (2011)

2.1 การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer)

การถ่ายเทความร้อน คือ การส่งผ่านพลังงานความร้อนซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ ดังนั้น เมื่อใดก็ตามที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิเกิดขึ้นในตัวกลางหรือระหว่างตัวกลาง การถ่ายเทความร้อนมักจะเกิดขึ้นได้รูปที่ 2.1 แสดงการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในแบบต่าง ๆ เมื่อมีเกรเดียนต์อุณหภูมิ (Temperature Gradient) เกิดขึ้นในตัวกลางที่อยู่หนึ่ง เช่น ของแข็ง หรือของไหล ทอมของการนำความร้อน (Conduction) จะเป็น การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นผ่านตัวกลาง ในขณะที่การพาความร้อน (convection) จะเป็นการถ่ายเทความร้อน ที่เกิดขึ้นระหว่างพื้นผิวและของไหลที่

เคลื่อนที่เมื่อมีอุณหภูมิแตกต่างกัน ส่วนการแผ่รังสีความร้อน (Thermal Radiation) จะเป็นการที่ทุกพื้นที่ผิวที่มีอุณหภูมิหนึ่งจะปล่อยพลังงานในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมา ดังนั้นในสภาวะที่ปราศจากตัวกลางใด ๆ จะมีการถ่ายเทความร้อนสุทธิที่เกิดขึ้นเนื่องจากการแผ่รังสีระหว่างพื้นผิวสองพื้นผิวที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันได้



รูปที่ 2.1 รูปแบบการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นโดยการนำ การพา และการแผ่รังสี
ที่มา : จุฑารัตน์ แสงงาม. (2556)

2.1.1 การนำความร้อน (Conduction)

การถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน เป็นการถ่ายเทความร้อนเพียงวิธีเดียวที่เกิดขึ้นในวัตถุที่เป็นตัวกลางทึบแสง เมื่อมีความลาดชันของอุณหภูมิสามารถเกิดได้ทั้งในของแข็ง ของเหลว และแก๊ส แต่เนื่องจากมีการไหลหมุนเวียนเกิดขึ้นในของเหลวและแก๊ส แต่สำหรับในของแข็งทึบแสงจะไม่มีเคลื่อนไหวภายในวัสดุ จะมีแต่การถ่ายเทความร้อนด้วยการนำเพียงอย่างเดียว อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนจะเป็นสัดส่วนกับค่าความลาดชันของอุณหภูมิ (Temperature gradient) คูณกับพื้นที่ A ที่ความร้อนไหลผ่านดังสมการที่ (2.2)

$$q_k \propto A \frac{dT}{dx} \quad (2.2)$$

ความสามารถในการนำความร้อนของสาร วัดด้วยปริมาณที่เรียกว่า ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity) หรือใช้ตัวอักษรย่อว่า k ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางกายภาพของตัวกลางที่มีความร้อนเคลื่อนที่ผ่าน อัตราการนำความร้อนเป็น

$$q_k = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.3)$$

เมื่อ q_k คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน ; W
 A คือ พื้นที่ที่ความร้อนไหลผ่าน ; m^2
 T คือ อุณหภูมิ ; $^{\circ}C$
 x คือ ระยะทางการเคลื่อนที่ของความร้อน ; m
 k คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน ; $W/m \cdot K$

จากสมการที่ (2.3) คือ กฎการนำความร้อนของฟูรีเยร์ (Fourier's law of conduction) เครื่องหมายลบที่อยู่ทางขวามือของสมการเป็นผลเนื่องจากกฎข้อที่สองทางเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งกำหนดว่า ความร้อนจะต้องไหลจากจุดที่มีอุณหภูมิสูงไปยังจุดที่มีอุณหภูมิต่ำ แต่เนื่องจากความลาดชันของอุณหภูมิจะต้องลดลงเมื่อระยะทาง x เพิ่มมากขึ้น จึงมีเครื่องหมายเป็นลบ ดังนั้นหากต้องการให้อัตราการถ่ายเทความร้อนไหลในทิศทางที่เป็นบวกหรือมีค่าเป็นบวก จะต้องเติมเครื่องหมายลบไว้ด้านขวาของสมการที่ (2.3)

อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านตัวกลางนั้นขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น รูปทรง ความหนา และวัสดุที่ใช้ในการทำตัวกลาง รวมทั้งความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างตัวกลาง ค่าการนำความร้อน k เป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของวัสดุ การนำความร้อนเป็นการถ่ายเทพลังงานจากอนุภาคที่มีพลังงานสูงไปยังอนุภาคที่มีพลังงานต่ำกว่าสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในของเหลว ของแข็ง และแก๊ส ค่าการนำความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ ๆ ของแก๊สไม่สามารถหาได้จากการวิเคราะห์ ดังนั้นข้อมูลเกี่ยวกับการนำความร้อนส่วนใหญ่ของวัสดุจึงได้มาจากการวัดและการทดสอบโดยทั่วไปแล้วค่าการนำความร้อนของวัสดุจะแปรตามอุณหภูมิ แต่การนำไปใช้งานในด้านการปฏิบัตินั้น ส่วนใหญ่แล้วจะใช้ค่าการนำความร้อนคงที่ที่หาจากอุณหภูมิจเฉลี่ย สารที่มีความสามารถในการนำความร้อนสูง เช่น โลหะ จะมีค่า k สูง ส่วนสารที่มีความสามารถในการนำความร้อนต่ำเช่น สารอโลหะ ก็จะมีค่า k ต่ำ ค่า k จึงเป็นคุณสมบัติประจำตัวของสารที่สำคัญมากในการศึกษาถึงการเคลื่อนที่ของความร้อนในสารนั้น สามารถเปรียบเทียบความสามารถในการนำความร้อนของสารต่างๆโดยการเปรียบเทียบจากค่า

k ของสารเหล่านั้นโดยสารที่มีค่า k สูง จะเรียกว่า สารตัวนำ และสารที่มีค่า k ต่ำจะเรียกว่า ฉนวน

2.1.2 การพาความร้อน (Convection)

การถ่ายเทความร้อนโดยการพาประกอบด้วยกลไก 2 อย่าง คือ พลังงานเกิดการถ่ายเทอันมีผลเนื่องมาจากการเคลื่อนที่หรือการแพร่แบบสุ่มของโมเลกุล และผลเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของของไหล การถ่ายเทลักษณะนี้เกิดขึ้นได้ เช่น ในระบบที่มีเกรเดียนต์อุณหภูมิจะมีการถ่ายเทความร้อนได้ และเนื่องจากโมเลกุลในกลุ่มของไหลจะมีการเคลื่อนที่แบบสุ่มอยู่ด้วย ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนทั้งหมดที่เกิดขึ้นจึงเกิดขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่แบบสุ่มของโมเลกุลและการเคลื่อนที่ของของไหล ส่วนใหญ่ การถ่ายเทความร้อนโดยการพา แบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะคือ

2.1.2.1 การพาความร้อนแบบอิสระ (Free Convection)

การพาความร้อนแบบอิสระ หรือการพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Natural convection) คือ การเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของแข็งและของไหล โดยที่ของไหลถูกบังคับให้เคลื่อนที่ไปสัมผัสกับผิวของของแข็งโดยกลไกภายนอก เช่น พัดลม หรือ เครื่องสูบน้ำ

2.1.2.2 การพาความร้อนแบบบังคับ (Force Convection)

การพาความร้อนแบบบังคับ คือการเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของของแข็งและของไหล โดยที่ไม่มีกลไกใดๆ ที่ทำให้ของไหลเคลื่อนที่ แต่ของไหลที่อยู่ใกล้กับผิวของของแข็งก็อาจเคลื่อนที่ได้โดยแรงลอยตัวของของไหลเอง แรงลอยตัวนี้เกิดจากความแตกต่างของความหนาแน่นของของไหล เมื่อเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิในชั้นของของไหลขึ้น

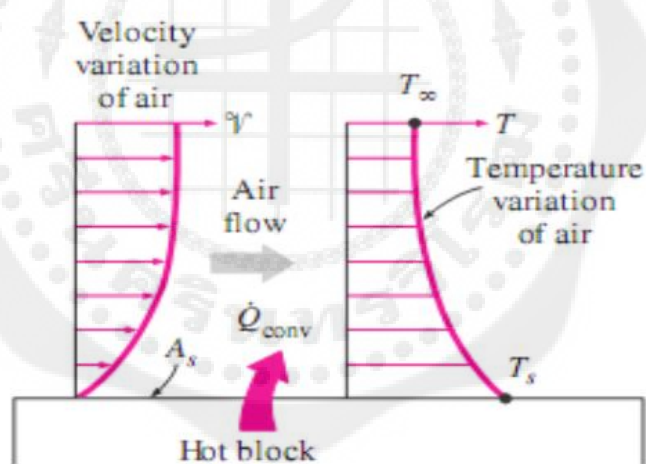
พิจารณาการพาความร้อนที่เกิดขึ้นในของไหลเคลื่อนที่ผ่านพื้นผิวของแข็งที่มีอุณหภูมิต่างกัน ดังรูป 2.2 ที่แสดงการถ่ายเทความร้อนโดยการพาระหว่างพื้นผิวร้อนกับของไหลที่เคลื่อนที่ผ่านไปบนแผ่นวัตถุ ซึ่งแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของความเร็วและอุณหภูมิ จุดที่น่าสังเกตคือความเร็วจะลดน้อยลงในทิศทางที่วิ่งเข้าสู่ผิวของวัตถุด้วยผลของแรงจากความเสียดทานที่เนื่องมาจากความหนืดของของไหลและเนื่องจากของไหลชั้นที่อยู่ติดกับผิวนั้นมีความเร็วเป็นศูนย์ ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ระหว่างผิวของแผ่นวัตถุกับของไหลชั้นดังกล่าวเป็นการถ่ายเทความร้อนแบบการนำอย่างเดียว ของไหลที่มีความเร็วสูงจะให้ค่าความลาดชันของอุณหภูมิสูงทำให้มีอัตราการนำความร้อนสูงตามไปด้วย ตาราง 2.1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของของไหลบางชนิด

การคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการพานั้นเป็นสิ่งยุ่งยาก เมื่อพิจารณาแล้ว มีหลายสิ่งหลายอย่างที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของความร้อนแบบการพานี้ เช่น คุณสมบัติต่างๆ ของ

ของไหล เช่น ความหนาแน่น ความร้อนจำเพาะ ความหนืด ฯลฯ ความเร็วของของไหล ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของพื้นผิวของของแข็ง และของไหล เป็นต้น นิวตัน (Newton) ได้ตัดปัญหาความยุ่งยากเหล่านี้ โดยเสนอสมการสำหรับคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการพาความร้อน ดังนี้

$$q_c = \bar{h}_c A (T_h - T_c) \quad (2.4)$$

เมื่อ q_{conv} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน ; W
 \bar{h}_c คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ; W/m \cdot K
 T_h คือ อุณหภูมิที่ร้อนกว่า ; °C
 T_c คือ อุณหภูมิที่เย็นกว่า ; °C
 A คือ พื้นที่ผิวของวัตถุที่สัมผัสกับของไหล



รูปที่ 2.2 การพัฒนาชั้นขอบเขตในการถ่ายเทความร้อน
 ที่มา : จุฑารัตน์ แสงงาม. (2556)

ตารางที่ 2.1 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของของไหลบางชนิด

ประเภทของการพาความร้อนและชนิดของของไหล	\bar{h}_c (W/m \cdot K)
การพาความร้อนแบบอิสระ , อากาศ	5-25
การพาความร้อนแบบอิสระ , น้ำ	20-100
การพาความร้อนแบบบังคับ , อากาศ	10-200

การถ่ายเทความร้อนโดยการพานี้สามารถนำมาเปรียบเทียบกับกรไหลของกระแสไฟฟ้าได้ เช่นเดียวกัน จากสมการที่ (2.4) นั้น ค่าความต้านทานความร้อนของการถ่ายเทความร้อนโดยการพา จะมีค่าเป็น

$$R_c = \frac{1}{h_c A} \quad (2.5)$$

ความต้านทานความร้อนที่ผิวสัมผัสนี้สามารถนำไปรวมเข้ากับความต้านทานค่าอื่นๆ ที่อยู่ในระบบได้โดยง่าย เช่น การถ่ายเทความร้อนจากบรรยากาศภายในผนังที่มีอุณหภูมิ T_i ผ่านผนังออกไปยังบรรยากาศภายนอกที่มีอุณหภูมิ T_o ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งในกรณีนี้จะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนเป็น

$$q = \frac{T_i - T_o}{\sum_{i=1}^{i=3} R_i} = \frac{T_i - T_o}{R_1 + R_2 + R_3} \quad (2.6)$$

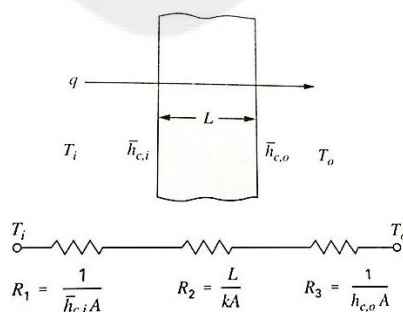
เมื่อ

$$R_1 = 1/(\bar{h}_{c,i} A)$$

$$R_2 = L/(kA)$$

$$R_3 = 1/(\bar{h}_{c,o} A)$$

ที่มา : จุฑารัตน์ แสงงาม. (2556)



รูปที่ 2.3 วงจรความร้อนสำหรับการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังเมื่อผิวทั้งสองด้าน

มีการถ่ายเทความร้อนโดยการพา

ที่มา : สุนันท์ ศรีณนิตย์. (2545)

2.2 ระบบควบคุมเชิงเส้น

ในการศึกษาวิธีการควบคุมระบบเรามีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องเข้าใจการทำงานของระบบ แม้ว่าในหลายกรณี ระบบที่เราสนใจจะมีความซับซ้อนก็ตาม เราอาจต้องใช้วิธีการจำลอง (Model) การทำงานของระบบขึ้นมา ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการจำลองระบบ (System Modeling) จะเป็นการประมาณและกำหนดข้อจำกัดบางอย่างขึ้นมาเพื่อให้ระบบสามารถที่จะจำลองเป็นสมการคณิตศาสตร์ที่สามารถเข้าใจได้

ดังนั้น ในการศึกษาเรื่องการควบคุมระบบ เราจะต้องศึกษาในส่วนต่างๆ โดยเริ่มจากการสร้างแบบจำลองของระบบ แล้วทำความเข้าใจถึงความสัมพันธ์ของอินพุตและเอาต์พุตของระบบนั้น และสุดท้ายคือวิธีการกำหนดอินพุตเพื่อให้ระบบมีเอาต์พุตตามที่เรต้องการ

2.2.1 ระบบควบคุม

ทฤษฎีระบบควบคุม (Control Theory) เป็นสาขาหนึ่งของคณิตศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ ในที่นี้ การควบคุมหมายถึง การควบคุมระบบพลศาสตร์ ให้มีเอาต์พุต (Output) ตามที่ต้องการ โดยการป้อนอินพุต (Input) ที่เหมาะสมให้กับระบบ แบ่งประเภทของระบบควบคุมได้ ดังนี้

2.2.1.1 ระบบควบคุมไม่อัตโนมัติ (Manual control) เป็นระบบควบคุมประเภทที่ต้องมีคนเข้ามาเกี่ยวข้อง ได้แก่ การควบคุมการขับเคลื่อนยานพาหนะ โดยผู้ขับขี่เป็นผู้ควบคุมทิศทางและความเร็ว

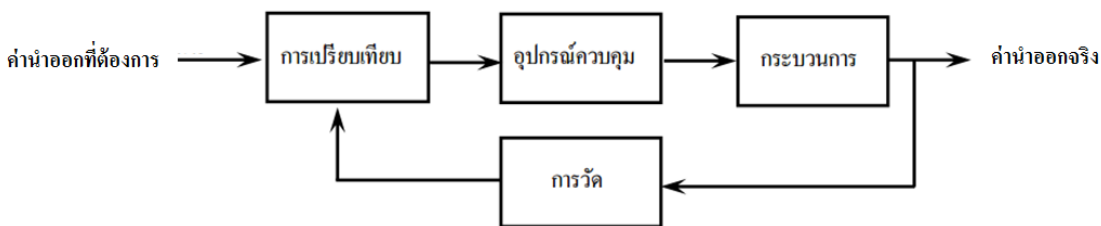
2.2.1.2 ระบบควบคุมอัตโนมัติ (Automatic control) เป็นระบบควบคุมที่ครอบคลุมแค่การวิเคราะห์และออกแบบเท่านั้น เช่น ระบบขับเคลื่อนอัตโนมัติ (Cruise control)

2.2.1.3 ระบบควบคุมวงเปิด (Open-loop control) เป็นระบบควบคุมที่ไม่ได้ใช้สัญญาณจากค่าเอาต์พุต มาบ่งชี้ถึงลักษณะการควบคุม



รูปที่ 2.4 ระบบควบคุมแบบเปิด

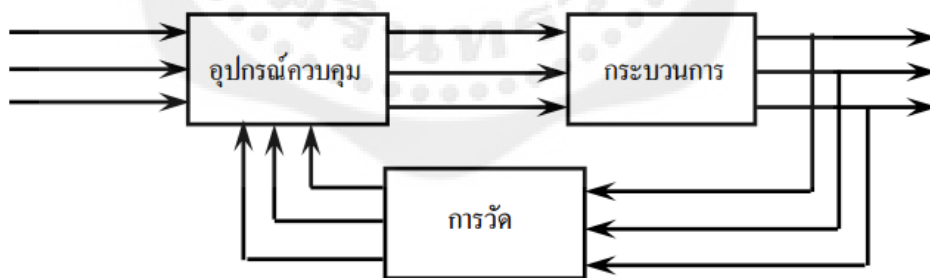
2.2.1.4 ระบบควบคุมวงปิดหรือระบบป้อนกลับ (Closed-loop or feedback control) จะใช้ค่าที่วัดจากค่าเอาต์พุตมาคำนวณค่าการควบคุม



รูปที่ 2.5 ระบบควบคุมป้อนกลับ

นอกจากนี้ยังสามารถแบ่งได้อีก ดังนี้ ระบบควบคุมเชิงเส้น (Linear) ระบบควบคุมไม่เชิงเส้น (Nonlinear) ระบบควบคุมแปรเปลี่ยนตามเวลา (Time-varying) ระบบควบคุมไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา (Time-invariant) ระบบควบคุมเวลาต่อเนื่อง (Continuous time) และระบบควบคุมเวลาไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous time or Discrete time)

สำหรับระบบควบคุมหนึ่งๆนั้น อาจจะมีพารามิเตอร์หรือตัวแปรที่ต้องการจะควบคุมมากกว่าหนึ่งพารามิเตอร์ ซึ่งระบบควบคุมดังกล่าวเป็นระบบที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น แต่หลักการของระบบควบคุมก็จะเหมือนเดิม คือ ทุกตัวแปรที่เราต้องการควบคุมจะต้องมีการวัดค่าที่ได้จากเอาท์พุท และนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่เราต้องการของตัวแปรนั้นๆ สำหรับระบบควบคุมหลายตัวแปร (Multivariable Control System) จะมีลักษณะดังในรูปที่ 2.6 ระบบควบคุมหลายตัวแปร



รูปที่ 2.6 ระบบควบคุมหลายตัวแปร

2.2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ (Mathematical Model of System)

ในยุคก่อนหน้านี้ การออกแบบระบบควบคุมต่างๆ นั้นเป็นไปในลักษณะลองผิดลองถูก ไม่ได้มีการใช้คณิตศาสตร์ในการวิเคราะห์ออกแบบแต่อย่างใด จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1840 นักดาราศาสตร์ชาวอังกฤษ จอร์จ แอริ ได้ประดิษฐ์อุปกรณ์ควบคุมทิศทางของกล้องดูดาว โดยอุปกรณ์นี้จะ

หมุนกล้องคูควาว เพื่อชดเชยกับการหมุนของโลกโดยอัตโนมัติ ในระหว่างการออกแบบ แอร์ได้สังเกตถึงความไม่เสถียร (Instability) ของระบบป้อนกลับ จึงใช้สมการเชิงอนุพันธ์ในการจำลองและวิเคราะห์พฤติกรรมของระบบ การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบนี้เป็นหัวใจสำคัญของทฤษฎีระบบควบคุม

2.2.2.1 ระบบควบคุมแบบดั้งเดิม

ระบบควบคุมแบบดั้งเดิม (Classical Control) หมายถึง ระบบควบคุมที่ออกแบบและวิเคราะห์บนโดเมนความถี่ (หรือ โดเมนการแปลงฟูเรีย) และโดเมนการแปลงลาปลาซ โดยการใช้แบบจำลองในรูปของ ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) โดยไม่ได้ใช้ข้อมูลรายละเอียดของไดนามิกส์ภายในของระบบ (Internal system dynamic)

2.2.2.2 ระบบควบคุมสมัยใหม่

ระบบควบคุมสมัยใหม่ (Modern Control) หมายถึง ระบบควบคุมที่ไม่ได้ใช้เทคนิคในการออกแบบแบบดั้งเดิมคือ จาการากของสมการคุณลักษณะและอยู่บนโดเมนความถี่ แต่เป็นการออกแบบโดยมีพื้นฐานจากแบบจำลองสมการอนุพันธ์ของไดนามิกส์ของระบบ และเป็นการออกแบบอยู่บนโดเมนเวลา

2.2.3 แรงผลักดันของพัฒนาการจากระบบควบคุม

แรงผลักดันของพัฒนาการจากระบบควบคุมแบบดั้งเดิม มาสู่ระบบควบคุมสมัยใหม่นี้มีอยู่หลักๆ สองประการคือ

2.2.3.1 ข้อจำกัดของระบบควบคุมแบบดั้งเดิมต่องานด้านอวกาศยาน

จากความสำเร็จในการส่งดาวเทียมสปุตนิก 1 ของสหภาพโซเวียตในปี ค.ศ. 1957 นั้นกระตุ้นให้เกิดความตื่นตัวของการประยุกต์ใช้งานทางด้านอวกาศยาน ความสำเร็จของโซเวียตนั้นเนื่องมาจากพัฒนาการทางด้านทฤษฎีระบบควบคุมแบบไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งไม่ได้รับความสนใจมากนักจากประเทศตะวันตก เนื่องจากความล้มเหลวในการใช้เทคนิคต่างๆ ของระบบควบคุมแบบดั้งเดิมกับงานด้านอวกาศยาน ซึ่งระบบส่วนใหญ่เป็นระบบหลายตัวแปรแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear multivariable system) จึงมีการหันกลับมาพิจารณาการวิเคราะห์จากปัญหาดั้งเดิม ในรูปของแบบจำลองสมการอนุพันธ์ของระบบ

2.2.3.2 การประยุกต์ใช้คอมพิวเตอร์กับงานระบบควบคุม

พัฒนาการของคอมพิวเตอร์ มีส่วนสำคัญในการพัฒนาทฤษฎีต่างๆ ของระบบควบคุม เนื่องจากทำให้สามารถสร้างอุปกรณ์ควบคุมที่สามารถทำงานซับซ้อนได้ รวมทั้งการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยคำนวณในการออกแบบกฎของการควบคุม ดังนั้น จึงมีการพัฒนาระบบควบคุมแบบต่างๆ ขึ้นอย่างมากมาย ด้วยเหตุดังกล่าว จึงมีการพัฒนาทฤษฎีระบบควบคุมจากหลายแง่มุม

จากความพยายามในการใช้คอมพิวเตอร์ซึ่งเป็นดิจิทัล เพื่อการควบคุมระบบ ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะเป็นระบบอนาล็อก จึงส่งผลให้มีการพัฒนาทางทฤษฎีระบบควบคุมดิจิทัล (Digital Control) โดยในปี ค.ศ. 1952 จอห์น ราจซซินี (J.R. Ragazzini), แฟรงคลิน (GFranklin) และซาเดห์ (L.A. Zadeh ผู้คิดค้นฟัซซีลอจิก) ที่มหาวิทยาลัยโคลัมเบียได้พัฒนาทฤษฎีระบบแบบซัดข้อมูล (Sampled data systems) ขึ้น การใช้คอมพิวเตอร์ในการควบคุมกระบวนการในอุตสาหกรรมนั้นมามีครั้งแรกในปี ค.ศ.1959 ที่โรงกลั่นน้ำมัน พอร์ต อาเธอร์ (Port Arthur) ในรัฐเท็กซัส

นอกจากนั้นแล้ว แนวความคิดของการควบคุมที่ซับซ้อนขึ้น โดยมีการรวมข้อกำหนดความต้องการทางด้านประสิทธิภาพ (Performance) ในการออกแบบระบบควบคุมซึ่งเรียกว่า ระบบควบคุมแบบเหมาะสมที่สุด (Optimal control) รากฐานของทฤษฎีระบบควบคุมแบบเหมาะสมที่สุดนี้มีมาช้านานตั้งแต่ปี ค.ศ. 1696 จากหลักของความเหมาะสมที่สุด (Principle of optimality) ในปัญหาบราคิสโตโครน (Brachistochrone curve) และแคลคูลัสของการแปรผัน (Calculus of variations) ในปีค.ศ. 1957 ริชาร์ด เบลแมน ได้ประยุกต์ใช้วิธีการไดนามิกโปรแกรมมิ่ง (Dynamic programming) ของเขา ในการแก้ปัญหาในระบบควบคุมแบบเหมาะสมที่สุดแบบเวลาไม่ต่อเนื่อง ต่อมาในปีค.ศ.1958 พอนเทรียกิน (L.S. Pontryagin) ได้พัฒนาหลักการมากที่สุด (Maximum principle หรือ Minimum principle) สำหรับแก้ปัญหาในรูปของแคลคูลัสของการแปรผันแบบเวลาต่อเนื่อง

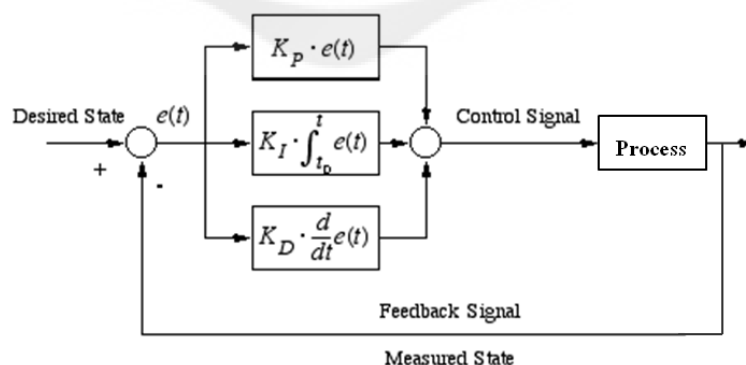
การสังเกตถึงผลกระทบของสัญญาณรบกวนต่อประสิทธิภาพของระบบควบคุมนั้นมีมาตั้งแต่ในช่วงระบบควบคุมยุคดั้งเดิม เช่น ในช่วงสงครามโลกครั้งที่สอง ในการพัฒนาระบบควบคุมสำหรับเรดาร์ติดตามเครื่องบินเพื่อควบคุมการยิง ที่ห้องทดลองเรดิเอชัน (Radiation Lab) ที่ เอ็มไอที, ฮอลล์ (A.C. Hall) ได้ประสบปัญหาในการออกแบบ เขาได้สังเกตถึงผลกระทบจากการออกแบบที่ไม่ได้คำนึงถึงสัญญาณรบกวนต่อประสิทธิภาพของระบบ ถึงแม้ว่าจะมีการคำนึงถึงผลกระทบของสัญญาณรบกวน แต่ก็ไม่ได้มีการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสัญญาณรบกวนในการวิเคราะห์แต่อย่างใด จนกระทั่ง นอร์เบิร์ต วินเนอร์ (Norbert Wiener) ได้จำลองสัญญาณรบกวนโดยใช้แบบจำลองกระบวนการสโตแคสติก หรือแบบจำลองทางสถิติแบบเวลาต่อเนื่อง ในการพัฒนาระบบเล็งเป้าและควบคุมการยิงปืนต่อต้านอากาศยาน โดยใช้ข้อมูลจากเรดาร์ ซึ่งงานของเขาได้ถูกเก็บเป็นความลับ จนถึงปี ค.ศ. 1949 ในช่วงเดียวกันในปี ค.ศ. 1941 คอลโมโกรอฟ (Andrey Kolmogorov) ก็ได้ทำการพัฒนาแบบจำลองสำหรับระบบเวลาไม่ต่อเนื่องขึ้น ระบบควบคุมที่ใช้แบบจำลองสโตแคสติกนี้ในการวิเคราะห์ จะเรียกว่าระบบควบคุมสโตแคสติก (Stochastic control)

การวิเคราะห์และควบคุมระบบบนโดเมนเวลา โดยใช้แบบจำลองตัวแปรสถานะหรือแบบจำลองปริภูมิสถานะ (State space) นั้นเป็นหัวใจของทฤษฎีระบบควบคุมสมัยใหม่ รูคอล์ฟ

คาลมาน (Rudolf E. Kalman) และ Bellman) นั้นถือได้ว่าเป็นบุคคลที่มีส่วนสำคัญในการพัฒนา ทฤษฎีระบบควบคุมโดยใช้แบบจำลองตัวแปรสถานะนี้ โดยที่ในปี ค.ศ.1960 คาลมานได้นำทฤษฎี เสถียรภาพของเลียปูนอฟมาใช้ในการออกแบบระบบ ซึ่งเป็นผลให้ผลงานของเลียปูนอฟกลับมา ได้รับความสนใจ นอกจากนี้แนวทางใหม่นี้ยังสามารถตอบคำถามเกี่ยวกับลักษณะเฉพาะของตัว ระบบได้ ได้แก่ สภาพควบคุมได้ (Controllability) สภาพสังเกตได้ (Observability) ผลสัมฤทธิ์เล็ก สุดเฉพาะกลุ่ม (Minimal realization) และยังนำไปสู่การออกแบบตัวควบคุมแบบใหม่ เช่น การวาง ขั้ว (Pole placement) ตัวควบคุมอิงตัวสังเกต (Observer-based controller) และตัวควบคุมกำลังสอง เชิงเส้นเหมาะสมที่สุด (Optimal linear quadratic regulator) คาลมานได้พัฒนาวิธีการออกแบบระบบ ควบคุมแบบเหมาะสมที่สุด จากแบบจำลองปริภูมิสถานะ ในรูปของปัญหาหาค่าเหมาะที่สุดเชิงเส้นค่าแบบ เหมาะสมที่สุดตามสมการกำลังสองหรือ LQR (Linear quadratic regulator) ในปีเดียวกันนี้ คาลมาน ได้นำเสนอผลงานของเขาในการประยุกต์ใช้แบบจำลองตัวแปรสถานะนี้เข้ากับแนวความคิด ทางด้านสตochasticของวินเนอร์ และคิดค้นสิ่งที่เรารู้จักกันในชื่อ ตัวกรองคาลมาน (Kalman filter) ขึ้นมา โดยการใช้งานจริงครั้งแรกของตัวกรองคาลมานนั้น ได้ถูกประยุกต์เป็นส่วนหนึ่งของระบบ นำร่องในโครงการอพอลโล ตั้งแต่นั้นมาตัวกรองคาลมานก็ได้ถูกประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวางใน ปัจจุบัน

2.2.4 การออกแบบตัวควบคุมพีไอดี

ตัวควบคุมที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมก็คือ PID controller ซึ่งตัวควบคุมนี้จะช่วย เพิ่มความแข็งแกร่ง (Robustness) ให้กับกระบวนการผลิตต่างๆ ในภาคอุตสาหกรรม พิจารณา ระบบ Single Input Single Output (SISO) ดังรูป



รูปที่ 2.7 รูปแบบมาตรฐานของตัวควบคุมพีไอดี

PID controller ประกอบด้วย 3 เทอม คือ Proportion, Integral และ Derivative จาก

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int e(t)dt + K_D \cdot \frac{de(t)}{dt}$$

$$e(t) = r(t) - c(t)$$
(2.7)

Laplace Transform

$$U(s) = \left(K_p + \frac{K_i}{s} + K_D \cdot s\right) \cdot E(s)$$

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = \left(K_p + \frac{K_i}{s} + K_D \cdot s\right) = \frac{(K_D s^2 + K_p s + K_i)}{s}$$
(2.8)

2.2.5 การออกแบบตัวควบคุมเชิงทำนายแบบจำลอง (Model Predictive Control: MPC)

การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลอง จัดเป็นกลยุทธ์การหาค่าควบคุมที่เหมาะสมที่สุด อาศัยหลักพื้นฐานจากการกำหนดค่าเชิงตัวเลขที่ต้องการ ผลตอบสนองจากการป้อนค่าเข้าการควบคุมเป็นการทำนายอนาคตผ่านแบบจำลอง และให้ค่าที่เหมาะสม ณ ช่วงเวลาหนึ่งๆ โดยเกี่ยวข้องกับดัชนีชี้วัดผลสมรรถนะการทำงาน (Performance index) จุดเริ่มต้นของเทคนิคการคำนวณในการปรับปรุงสมรรถนะของระบบควบคุม เกิดจากการประยุกต์กระบวนการทำงาน เช่น ขั้นตอนการผลิตในอุตสาหกรรมโรงกลั่นน้ำมัน (Petrochemical industries) จึงทำให้การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองเป็นการควบคุมขั้นสูงที่เกิดขึ้นได้จริงเพราะมีหลักฐานรับรอง ถูกนำไปใช้อย่างกว้างขวางในด้านอุตสาหกรรม ดังนั้น การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองจึงเป็นทฤษฎีพื้นฐานที่อธิบายได้อย่างครบถ้วน ไม่ว่าจะเป็น เสถียรภาพของระบบ (Stability), การหาค่าควบคุมที่เหมาะสมที่สุด (Optimality) และเพิ่มความแข็งแกร่ง

การออกแบบระบบให้เป็นไปตามต้องการทำได้ง่ายมาก กล่าวคือ อัลกอริทึมในส่วนของ การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลอง (MPC algorithms) สามารถใช้ในการควบคุมระบบที่มีขนาดใหญ่ซึ่งมีตัวแปรจำนวนมากได้ และการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองมีความสำคัญมาก เพราะมีวิธีคิดที่เป็นระบบ จากความสัมพันธ์กับขอบเขตข้อจำกัดต่างๆ (Constraints) ในส่วนการป้อนค่าเข้าและสถานะ ขอบเขตข้อจำกัดส่วนมากพบได้ในด้านวิศวกรรมควบคุมทั้งหมด แต่มีขอบเขตข้อจำกัดบางเรื่องมาจากข้อจำกัดของตัวขับเคลื่อน (Actuators) ที่พบได้ในด้านฟิสิกส์ (Physical), ด้านความปลอดภัย (Safety) และด้านเศรษฐศาสตร์ (Economic) ขอบเขตข้อจำกัดที่กำหนดไว้ ทำให้นำมาใช้ในการแก้โจทย์เกี่ยวกับค่าควบคุมที่เหมาะสมที่สุดได้ในเวลาที่เกิดขึ้นจริง ณ ขณะนั้น (Problem

in real-time) โดยป้อนค่านำเข้าไปเพื่อทำนายค่าควบคุมที่เหมาะสมที่สุด และแบบจำลองเชิงทำนาย มีระบบพลวัตไม่เชิงเส้น (Nonlinear plant dynamics) รวมอยู่ด้วย

ที่มา: Mark Cannon. (2015)

2.2.5.1 กลยุทธ์การควบคุมเชิงทำนาย (Predictive control strategy)

กฎของการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลอง ประกอบด้วยองค์ประกอบต่างๆ คือ การทำนายค่าในอนาคต (Prediction), ค่าการควบคุมที่เหมาะสม (Optimization) และผลจากการใช้แกนถดถอย (Receding horizon implement) มีรายละเอียดดังนี้

1). การทำนายค่าในอนาคต (Prediction)

ผลตอบสนองในอนาคตของกระบวนการควบคุมคือ การทำนายค่าในอนาคต จากการใช้แบบจำลองพลวัต (dynamic model) ซึ่งเป็นกรณีของระบบเชิงเส้นแบบเวลาไม่ต่อเนื่อง (Discrete-time linear systems) ในรูปแบบปริภูมิสถานะ (State-space) เขียนเป็นสมการได้ ดังนี้

$$\begin{aligned}x_{t+1} &= Ax_t + Bu_t \\ y_t &= Cx_t + Du_t\end{aligned}\tag{2.9}$$

เมื่อ x_t คือ สถานะของแบบจำลอง ณ ที่เวลาสุ่ม t
 u_t คือ เวกเตอร์ค่านำเข้าไป ณ ที่เวลาสุ่ม t

ให้ค่านำเข้าไปและค่าสถานะที่มีการทำนายแล้วจะเกิดอย่างต่อเนื่อง โดยผลจำลองการทำงานของแบบจำลองเชิงทำนายมีการเคลื่อนที่ไปด้านหน้ากับแกนทำนาย (Predicted horizon) ไป N ช่วงเวลาและจากผลทำนายที่เกิดอย่างต่อเนื่อง ข้อมูลที่ได้จึงเป็นชุดข้อมูลที่เรียงซ้อนกันเป็นชั้นๆ จากบนลงล่าง (Stacked) แทนอยู่ในรูปเวกเตอร์ตัวแปร U_t และ X_t ดังนี้

$$U_t = \begin{bmatrix} u_{(t|t)} \\ u_{(t+1|t)} \\ \vdots \\ u_{(t+i-1|t)} \end{bmatrix}, \quad X_t = \begin{bmatrix} x_{(t+1|t)} \\ x_{(t+2|t)} \\ \vdots \\ x_{(t+i|t)} \end{bmatrix}\tag{2.10}$$

เมื่อ $u_{(t+i|t)}$ คือ เวกเตอร์ค่านำเข้าไป ซึ่งเกิดที่เวลา $t+i$ ก็ต่อเมื่อทำนายที่เวลา t
 $x_{(t+i|t)}$ คือ เวกเตอร์สถานะ ซึ่งเกิดที่เวลา $t+i$ ก็ต่อเมื่อทำนายที่เวลา t

และ $x_{(t+i|t)}, u_{(t+i|t)}$ นำมาเขียนใหม่ในรูปแบบจำลองเชิงทำนาย ได้เป็น

$$\begin{aligned}\hat{x}_{t+i+1|t} &= A\hat{x}_{t+i|t} + Bu_{t+i|t}, \\ \hat{y}_{t+i|t} &= C\hat{x}_{t+i|t} + Du_{t+i|t}, \quad i = 0, 1, \dots\end{aligned}\quad (2.11)$$

เมื่อ $\hat{x}_{t+1|t}$ คือ สถานะเริ่มต้น หรือ จุดเริ่มต้นของแผนการทำนาย (Prediction horizon)

2) ค่าการควบคุมที่เหมาะสม (Optimization)

กฎการควบคุมเชิงทำนายแบบป้อนกลับ คำนวณจากการทำนายค่าต้นทุนสมรรถนะ (Performance cost) ให้มีค่าน้อยที่สุด (Minimizing) ซึ่งกำหนดไว้ในเทอมรูปเวกเตอร์ตัวแปร \mathbf{u} และ \mathbf{x} ที่มีผลการทำนายอย่างต่อเนื่อง (Terms of the predicted sequences) ซึ่งเป็นกรณีต้นทุนพหุนามกำลังสอง (Quadratic cost) ผลการทำนายต้นทุน (Predicted cost) อยู่ในรูปสมการทั่วไป คือ

$$J(\hat{x}_{t+1|t}, U_t) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \|\hat{y}_{t+i|t} - r_{t+k}\|^2 Q + \|u_{t+i|t} - u_{t+i+1|t}\|^2 S. \quad (2.12)$$

เมื่อ Q คือ เมตริกซ์ลำดับบวก (หรือ อาจเป็นเมตริกซ์กึ่งลำดับบวก)
 S คือ เมตริกซ์ลำดับบวก

เห็นได้ว่า U_t เป็นส่วนหนึ่งในฟังก์ชันของ $J(\hat{x}_{t+1|t}, U_t)$ และค่านำเข้าที่เหมาะสมอย่างต่อเนื่อง U_t^* สำหรับการแก้ปัญหาค่าที่น้อยที่สุดของ $J(\hat{x}_{t+1|t}, U_t)$ แทนด้วย

$$U_t^* = \arg \min_{\mathbf{u}} J(\hat{x}_{t+1|t}, U_t)$$

แต่ถ้ากระบวนการนี้ ขึ้นอยู่กับค่าขอบเขตจำกัดทั้งค่านำเข้าและสถานะ จะทำให้การหาค่าควบคุมที่เหมาะสมจะเท่ากับขอบเขตจำกัดในสมการ U_t ถูกเขียนอยู่ในรูปของฟังก์ชันพหุนามกำลังสอง (Quadratic Function) ของ U_t ดังแสดงในสมการที่ (2.10) สังเกตได้ว่าในส่วนของ $u_{(t+i|t)}$ ถูกละเว้นในสมการที่ (2.12) ทำให้ไม่มีเทอมใดๆของ $J(\hat{x}_{t+1|t}, U_t)$ ที่ขึ้นอยู่กับส่วนของ $u_{(t+i|t)}$ เลย นอกจากนี้ค่าที่เป็นไปได้ (ค่าจริงที่ให้ความพึงพอใจ) จะใช้ผลต่างของเมตริกซ์ถ่วงน้ำหนัก (Weighting matrix) แทนด้วยตัวแปร Q ในเทอมที่เกี่ยวข้องกับปลายทางของสถานะเชิง

ทำนาย (Terminal predictive state) ในส่วนของ $u_{(t+i|t)}$ โดยการเลือกค่าที่เหมาะสมสำหรับตัวแปร Q นี้จะช่วยประหยัดต้นทุนกว่าการทำนายแบบอนันต์ (Infinite prediction) จากการนำมาคำนวณในสมการของ $J(\hat{x}_{t+i|t}, U_t)$ ผลการทำนายค่าสถานะเป็นลำดับอย่างต่อเนื่อง ซึ่งสร้างจากแบบจำลองปริภูมิสถานะเชิงเส้น (Linear state-space model) ในสมการที่ (2.11) ร่วมกับค่านำเข้าต่อเนื่องแทนด้วยตัวแปร $\mathbf{u}(k)$ สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned}x(k|k) &= x(k) \\x(k+1|k) &= Ax(k) + Bu(k|k) \\x(k+2|k) &= A^2x(k) + ABu(k|k) + Bu(k+1|k) \\&\vdots\end{aligned}$$

ในสัญลักษณ์อย่างง่าย :

$$x(k+i|k) = A^i x(k) + C_i \mathbf{u}(k), \quad i=0, \dots, N$$

หรือ

$$\mathbf{x}(k) = \Lambda x(k) + \Phi \mathbf{u}(k), \quad \text{เมื่อ } \Lambda = \begin{bmatrix} A \\ A^2 \\ \vdots \\ A^N \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

ขณะที่ตัวแปร C เมตริกซ์คอนวูลูชัน (Convolution matrix) กำหนดแถวให้เป็น C_i ที่กำหนดโดย

$$\Phi = \begin{bmatrix} B & 0 & \dots & 0 \\ AB & B & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \\ A^{N-1}B & A^{N-2}B & \dots & B \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

เมื่อ

$$\Phi_i = 0,$$

$\Phi_i =$ โดย i เป็นแถวของเมตริกซ์ Φ

แทนค่า $x(k+i|k)$ ลงในสมการที่ (2.1) และ จัดให้อยู่ในเทอมของ

$$J(\hat{x}_{t+1|t}, U_t) = \frac{1}{2} U_t^T H U_t + U_t^T f + C_3 \quad (2.15)$$

เมื่อ

$$H = \Phi^T \bar{Q} \Phi + \bar{S} \quad (2.16ก)$$

$$\Gamma = [\Phi^T \bar{Q} \Lambda - \Phi^T \bar{Q}] \quad (2.16ข)$$

$$f = \Gamma \begin{bmatrix} \hat{x}_{t+1|t} \\ R_t \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} S u_t \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.16ค)$$

กับ

$$\bar{Q} = \begin{bmatrix} Q & & & \\ & Q & & \\ & & \ddots & \\ & & & Q \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad \bar{S} = \begin{bmatrix} 2S & -S & & & \\ -S & 2S & -S & & \\ & & \ddots & \ddots & \ddots \\ & & & -S & 2S & -S \\ & & & & -S & S \end{bmatrix}$$

สังเกตได้ว่า เมตริกซ์ต้นทุน H, F และ G สามารถคำนวณแบบออฟไลน์ได้

- การรวบรวมขอบเขตจำกัดต่างๆ (Incorporating constraints)

วัตถุประสงค์ของตัวควบคุมแบบเชิงทำนายแบบจำลอง คือ การตรวจสอบกฎการป้อนกลับไม่เชิงเส้นที่มีความเหมาะสมสำหรับระบบที่มีขอบเขตข้อจำกัด(constrained systems) กำหนดโดยใช้วิธีเชิงตัวเลขมีการแสดงผลแบบออนไลน์ หลังจากกำหนดต้นทุนกำลังสองเป็นฟังก์ชันของค่านำเข้าการทำนายในหัวข้อที่ 2.1 และ 2.3 ตามลำดับ ในส่วนนี้เขียนค่านำเข้าเชิงเส้นและขอบเขตข้อจำกัดสถานะได้ใหม่คือ

$$L_{in} \leq U_t \leq b_{in} \quad (2.17ก)$$

$$L_{eq} \leq X_t \leq b_{eq} \quad (2.17ข)$$

ในรูปแบบ $\begin{bmatrix} I \\ -I \end{bmatrix} U_t \leq \begin{bmatrix} b_u \\ -b_l \end{bmatrix}$ เหมาะสมสำหรับโดยรวมการแก้ปัญหาหาค่าควบคุมที่เหมาะสมที่สุดของสมการ $J(\hat{x}_{t+1|t}, U_t)$ โดยขึ้นอยู่กับขอบเขตข้อจำกัดต่างๆ ขอบเขตข้อจำกัดของค่านำเข้าในสมการที่ (2.17ก) สมมูลกับค่า $U_t \leq b_u$ และ $-U_t \leq -b_l$ โดยขอบเขตข้อจำกัดต่างๆ เหล่านี้นำไปใช้กับการทำนายผล ได้คือ $u(k+i|k)$, $i=0, \dots, N-1$ สามารถแสดงออกในเทอมของ U_t เป็น

$$\begin{bmatrix} I \\ -I \end{bmatrix} U_t \leq \begin{bmatrix} b_u \\ -b_l \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

เมื่อเลข $\mathbf{1}$ เป็นเวกเตอร์ที่มีสมาชิกทุกตัวมีค่าเท่ากับ 1 สำหรับกรณีค่านำเข้าหนึ่งค่า (หรือ $\mathbf{1} = [I_{n_u} \ \dots \ I_{n_u}]$ สำหรับกรณีที่ u มีมิติเป็น n_u) เช่นเดียวกับขอบเขตข้อจำกัดสถานะในสมการที่ (2.17ข) นำไปใช้กับการทำนายในกรณีที่ 1 คือ $x(k+i|k)$, $i=1, \dots, N$ มีค่าเท่ากับ

$$\begin{bmatrix} c_i \\ -c_i \end{bmatrix} \mathbf{u}(k) \leq \begin{bmatrix} \bar{x} \\ -x \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -A^i \\ A^i \end{bmatrix} x(k), \quad i=1, \dots, N \quad (2.19)$$

การรวมกันของสมการที่ (2.17ก) กับ (2.17ข) นำไปใช้กับการทำนายในกรณีที่ 1 เพราะฉะนั้นสามารถแสดงขอบเขตข้อจำกัดของ $u(k)$ ในรูปของสมการ

$$A_c \mathbf{u}(k) \leq b_0 + B_x x(k) \quad (2.20)$$

โดยที่ A_c, b_0, B_x เป็นเมตริกซ์ค่าคงที่ ที่สามารถกำหนดค่าแบบออฟไลน์ได้

- โปรแกรมมิ่งกำลังสอง (Quadratic Programming: QP)

การรวมกันของฟังก์ชันเป้าหมาย(objective function)และข้อจำกัดที่ได้กล่าวมาข้างต้น คือการหาค่าควบคุมที่เหมาะสมที่สุดของต้นทุนที่แน่นอนซึ่งขึ้นอยู่กับขอบเขตข้อจำกัดในสมการที่ (2.20) นำมาแก้ปัญหาของโปรแกรมมิ่งกำลังสอง

$$\begin{array}{ll} \text{ค่าต่ำสุดของ } \mathbf{u} & \mathbf{u}^T H \mathbf{u} + 2x^T(k) F^T \mathbf{u} \\ \text{ขึ้นอยู่กับ} & A_c \mathbf{u} \leq b_0 + B_x x(k) \end{array} \quad (2.21)$$

เนื่องจาก H เป็นเมตริกซ์บวก (กึ่งบวก) แน่นอนและเนื่องจากขอบเขตข้อจำกัดเป็นเชิงเส้น จึงเป็นปัญหาการหาค่าควบคุมที่เหมาะสมแบบแนวเส้นโค้งซึ่งเป็นการแก้ปัญหาที่มีเอกลักษณ์ ในหัวข้อส่วนนี้แบ่งอัลกอริทึมออกเป็นสองแบบ (อัลกอริทึมที่ดึงค่าการทำงานที่จุดภายใน) อย่างไรก็ตาม ทั่วไปใช้การแก้ปัญหาแบบ QP แต่ทฤษฎีค่าควบคุมที่เหมาะสมที่สุดจะช่วยอธิบายวิธีเหล่านี้ก่อน จะได้ผลลัพธ์แบบทั่วไปและมีขอบเขตข้อจำกัด

ตามทฤษฎีบท กล่าวว่า (ค่าควบคุมที่เหมาะสมที่สุดร่วมกับขอบเขตข้อจำกัดต่างๆ) ถ้า \mathbf{u}^* ได้ผลน่าพึงพอใจ

$$\mathbf{u}^*(k) = \arg \min_{\mathbf{u}} f(\mathbf{u})$$

3). ผลจากการใช้แกนถดถอย (Receding horizon implementation)

หากต้องการได้ค่านำเข้าผลการทำนายเพียงอย่างเดียว จะต้องป้อนค่านำเข้าการควบคุมที่เหมาะสมอย่างต่อเนื่องเพียงอย่างเดียว จะได้เป็น

$$U_t = U_{t|t}^* \quad (2.22)$$

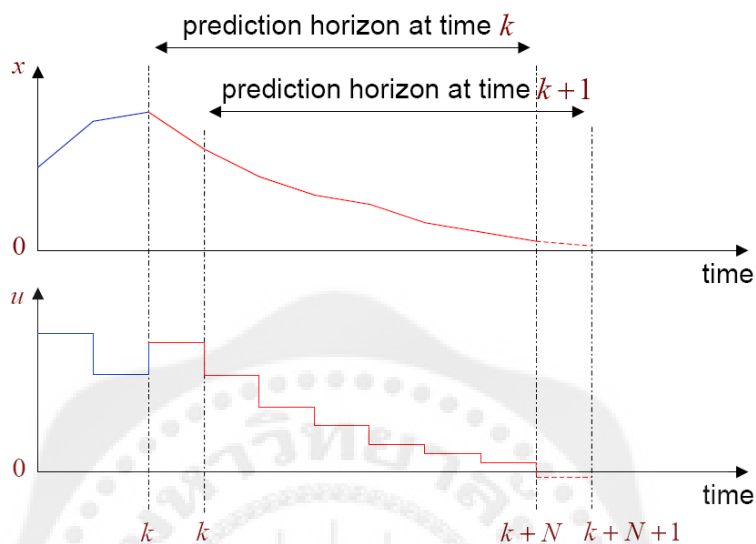
การคำนวณหาค่า U_t^* ทำได้โดยให้ผลการทำนายต้นทุนที่มีค่าน้อยที่สุด และนำผลที่ได้จากสมการ U^* ในค่าแรกมาทำการวนซ้ำในทุกๆ การสุ่มอย่างทันที ณ เวลา $t = 0, 1, \dots$ ไปเรื่อยๆ จึงเรียกได้ว่า สมการ U^* เป็นการหาค่าควบคุมที่เหมาะสมแบบออนไลน์ (Online Optimization)

ในส่วนแกนการทำนาย ยังคงใช้ความยาวเท่าเดิมในการวนซ้ำในทุกกรอบของการหาค่าควบคุมที่เหมาะสมของอนาคตในเวลาที่กำหนด ดังรูปที่ 2.8 จึงเรียกการกระทำแบบนี้ว่า กลยุทธ์แกนถดถอย (Receding horizon strategy)

ในขั้นแรก การทำนายค่าสถานะ X และค่านำเข้าที่เหมาะสมอย่างต่อเนื่อง U_t^* จะขึ้นอยู่กับ การเก็บค่าสถานะในปัจจุบัน X_t ซึ่งตามกฎของตัวควบคุมแบบเชิงทำนายแบบจำลอง แล้วจะมีการป้อนกลับมาตรวจสอบค่าความคงทนของระบบ ทำให้อาจเกิดความผิดพลาดของแบบจำลองและความไม่แน่นอนขึ้นได้

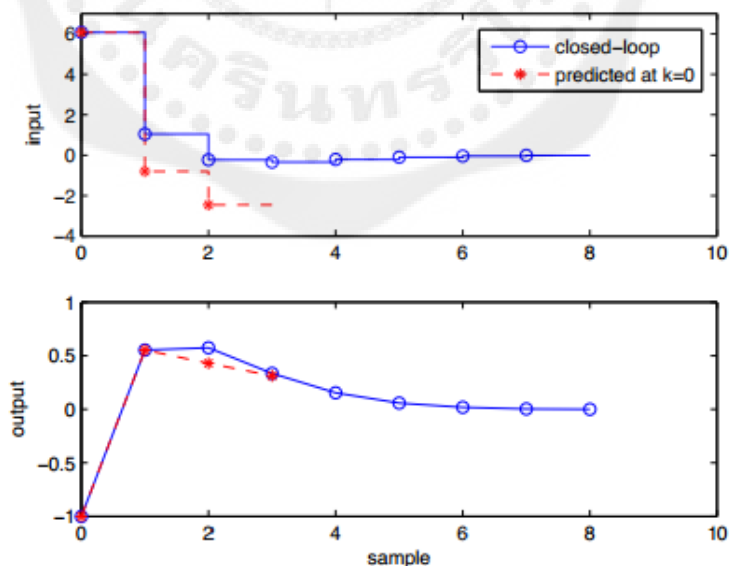
ในขั้นที่สอง ส่วนสำคัญของการเข้าใกล้แกนถดถอยนั้นคือ การเลื่อนแกนแนวนอนอย่างต่อเนื่องด้วยการกำหนดค่านำเข้าเพื่อหาค่าควบคุมที่เหมาะสมให้ออนาคต โดยมีความพยายามในการชดเชยตามความเป็นจริงที่แกนอนันต์ ดังรูปที่ 2.9 แสดงให้เห็นภาพผลตอบสนองการทำนายที่เป็นแบบวงปิด (Closed-loop response) ถ้ามีการออกแบบค่าต้นทุนและขอบเขตข้อจำกัดไว้อย่างถูกต้อง

มั่นใจได้เลยว่ากลยุทธ์แกนนถอยเป็นระบบวงปิดที่มีสมรรถนะดี เพราะเลือกค่าควบคุมได้เหมาะสม



รูปที่ 2.8 กลยุทธ์แกนนถอย (Receding horizon strategy)

ที่มา : Mark Cannon (2015)



รูปที่ 2.9 ผลตอบสนองวงปิดและผลตอบสนองการทำนาย สำหรับระบบอันดับสอง

ที่ไม่มีขอบเขตจำกัด บนแกนขอบเขต $N = 3$

ที่มา : Mark Cannon (2015)

บทที่ 3

การดำเนินงานและการออกแบบ

3.1 บทนำ

บทนี้นำเสนอขั้นตอนการดำเนินงานเพื่อหาแบบจำลองและการออกแบบตัวควบคุมสำหรับการควบคุมอุณหภูมิภายในอาคาร เป็นการเปรียบเทียบตัวควบคุมทั้งสองแบบคือ ตัวควบคุมแบบพีไอดี และตัวควบคุมเชิงทำนายแบบจำลอง

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบ

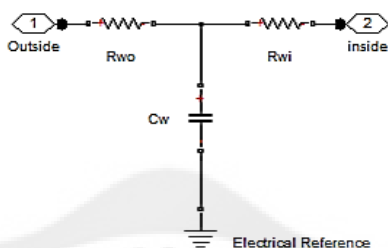
ตัวพารามิเตอร์	สัญลักษณ์	ค่าพารามิเตอร์	หน่วย
Capacitance Of Wall 1	C_{wall1}	2.707	kJ/K
Capacitance Of Wall 2	C_{wall2}	2.730	kJ/K
Capacitance Of Wall 3	C_{wall3}	1.895	kJ/K
Capacitance Of Wall 4	C_{wall4}	3.898	kJ/K
Capacitance Of Room	C_{room}	16.73	kJ/K
Specific Heat Capacity	$C_{p(air)}$	1.007	kJ/K
R-Value Of Wall	R_{wall}	1.659	m·K/W
R-Value Of Inside Room	R_{in}	0.062	m·K/W
R-Value Of Outside Room	R_{out}	2.149	m·K/W
Mass Flow Rate	\dot{m}	1.800	m ³ /s
Outside Temperature	T_{out}	25.0	°C
Inside Temperature	T_{in}	22.0	°C

3.2 การหาแบบจำลองพลวัตของอาคารในรูปแบบโครงข่ายไฟฟ้าชนิด R-C

จากทฤษฎีการถ่ายโอนความร้อน ซึ่งสามารถนำมาเทียบเคียงให้เป็นวงจรทางไฟฟ้าได้โดยการอาศัยตัวต้านทานและตัวเก็บประจุแทนการนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสี

3.2.1 แบบจำลองของกำแพง

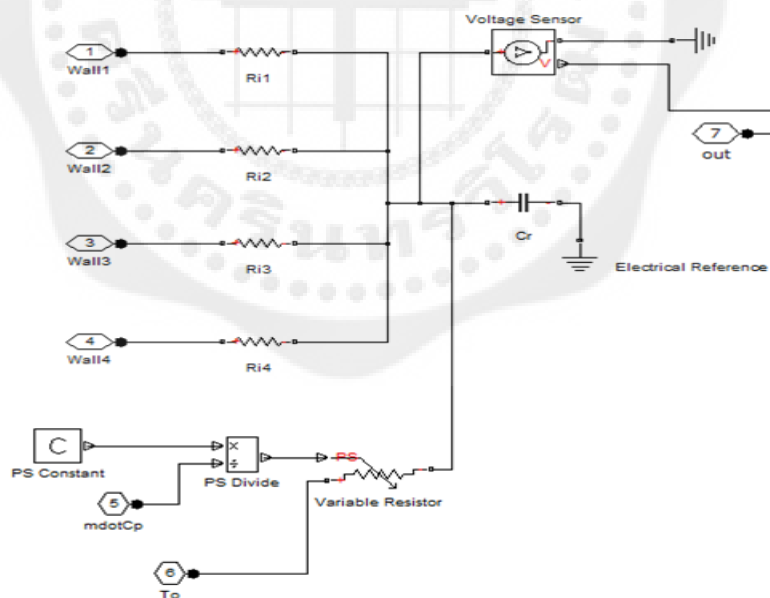
ประกอบไปด้วยตัวต้านทานเชิงความร้อน 2 ตัว และตัวเก็บประจุเชิงความร้อนกำแพง 1 ตัว



รูปที่ 3.1 แบบจำลองอุณหภูมิของกำแพงแต่ละด้าน ในโปรแกรม MATLAB/Simulink

3.2.2 แบบจำลองของห้อง

ประกอบไปด้วยตัวต้านทานเชิงความร้อน 4 ตัว และตัวเก็บประจุเชิงความร้อนห้อง 1 ตัว



รูปที่ 3.2 แบบจำลองอุณหภูมิของห้องที่ 1 ในโปรแกรม MATLAB/Simulink

หลังจากที่ออกแบบแบบจำลองของห้องโดยใช้การเทียบเคียงทางวงจรไฟฟ้า ซึ่งเมื่อสังเกตจากวงจรไฟฟ้าแล้ว เราสามารถใช้ทฤษฎีการวิเคราะห์ห้วงจรไฟฟ้าด้วยวิธี โนด แล้วจะได้สมการเชิง

อนุพันธ์ (Differential Equations) ที่ไม่เป็นเชิงเส้น ทั้งหมด 5 สมการ โดยแบ่งเป็นสมการของกำแพง ในแต่ละด้าน 4 สมการและสมการของห้อง 1 สมการ

3.3 การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากโครงข่ายไฟฟ้าทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีโนด เราจะได้สมการทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบ สมการเชิงอนุพันธ์ 5 สมการ ซึ่งประกอบไปด้วย

3.3.1 สมการของกำแพงด้านที่ 1 แทนด้วย W_1 เขียนได้ดังนี้

$$\frac{T_{out} - T_{wall1}}{(R_{out} + R_{wall} / 2)_1} + \frac{T_1 - T_{wall1}}{(R_{in} + R_{wall} / 2)_1} + \alpha A_1 \ddot{q}_{rad_1} = C_{wall1} \frac{d(T_{wall1})}{dt} \quad (3.1)$$

3.3.2 สมการของกำแพงด้านที่ 2 แทนด้วย W_2 เขียนได้ดังนี้

$$\frac{T_{out} - T_{wall2}}{(R_{out} + R_{wall} / 2)_2} + \frac{T_1 - T_{wall2}}{(R_{in} + R_{wall} / 2)_2} + \alpha A_2 \ddot{q}_{rad_2} = C_{wall2} \frac{d(T_{wall2})}{dt} \quad (3.2)$$

3.3.3 สมการของกำแพงด้านที่ 3 แทนด้วย W_3 เขียนได้ดังนี้

$$\frac{T_{out} - T_{wall3}}{(R_{out} + R_{wall} / 2)_3} + \frac{T_1 - T_{wall3}}{(R_{in} + R_{wall} / 2)_3} + \alpha A_3 \ddot{q}_{rad_3} = C_{wall3} \frac{d(T_{wall3})}{dt} \quad (3.3)$$

3.3.4 สมการของกำแพงด้านที่ 4 แทนด้วย W_4 เขียนได้ดังนี้

$$\frac{T_{out} - T_{wall4}}{(R_{out} + R_{wall} / 2)_4} + \frac{T_1 - T_{wall4}}{(R_{in} + R_{wall} / 2)_4} + \alpha A_4 \ddot{q}_{rad_4} = C_{wall4} \frac{d(T_{wall4})}{dt} \quad (3.4)$$

3.3.5 เมื่อได้สมการของกำแพงแต่ละด้านแล้ว ใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีโนดกับห้องเขียนได้ ดังนี้

$$\frac{T_{wall1} - T_1}{(R_{in} + R_{wall} / 2)_1} + \frac{T_{wall2} - T_1}{(R_{in} + R_{wall} / 2)_2} + \frac{T_{wall3} - T_1}{(R_{in} + R_{wall} / 2)_3} + \frac{T_{wall4} - T_1}{(R_{in} + R_{wall} / 2)_4} + \dot{m}_1 C_{p_{air}} (T_{out} - T_{in}) + q_{int_1} = C_{room} \frac{d(T_1)}{dt} \quad (3.5)$$

จากสมการเชิงอนุพันธ์ทั้ง 5 สมการ สามารถนำมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยอยู่ในรูปปริภูมิสถานะ (State-Space)

$$\dot{x} = Ax + f(x, u) \quad (3.6)$$

$$y = Cx \quad (3.7)$$

เมื่อ

x คือ เวกเตอร์สถานะ

u คือ ค่านำเข้าของระบบ

y คือ ค่านำออกของระบบ

และเมตริกซ์ A, C เวกเตอร์ x และ $f(x, u)$ หาได้จาก

$$x = [T_{wall1} \quad T_{wall2} \quad T_{wall3} \quad T_{wall4} \quad T_1]^T$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{-1}{C_{wall1} \cdot R_{a1}} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_{wall1} \cdot R_{a1}} \\ 0 & \frac{-1}{C_{wall2} \cdot R_{a2}} & 0 & 0 & \frac{1}{C_{wall2} \cdot R_{a2}} \\ 0 & 0 & \frac{-1}{C_{wall3} \cdot R_{a3}} & 0 & \frac{1}{C_{wall3} \cdot R_{a3}} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{C_{wall4} \cdot R_{a4}} & \frac{1}{C_{wall4} \cdot R_{a4}} \\ \frac{1}{C_{room} \cdot R_{b1}} & \frac{1}{C_{room} \cdot R_{b2}} & \frac{1}{C_{room} \cdot R_{b3}} & \frac{1}{C_{room} \cdot R_{b4}} & R_c - \left(\frac{C_{p\ air} \cdot \dot{m}}{C_{room}} \right) \end{bmatrix}$$

โดย

$$R_a = \frac{\left[\left(R_{out} + \frac{R_{wall}}{2} \right) \times \left(R_{in} + \frac{R_{wall}}{2} \right) \right]}{\left[\left(R_{out} + \frac{R_{wall}}{2} \right) + \left(R_{in} + \frac{R_{wall}}{2} \right) \right]}$$

$$R_b = R_{in} + \left(\frac{R_{wall}}{2} \right)$$

$$R_c = -\frac{1}{C_{room}} \left(\frac{1}{R_{b1}} + \frac{1}{R_{b2}} + \frac{1}{R_{b3}} + \frac{1}{R_{b4}} \right)$$

$$f(x, u) = \begin{bmatrix} \frac{\alpha}{C_{wall1}} \ddot{q}_{rad1} A_1 + \frac{T_{out}}{C_{wall1} R_{out}} \\ \frac{\alpha}{C_{wall2}} \ddot{q}_{rad2} A_2 + \frac{T_{out}}{C_{wall2} R_{out}} \\ \frac{\alpha}{C_{wall3}} \ddot{q}_{rad3} A_3 + \frac{T_{out}}{C_{wall3} R_{out}} \\ \frac{\alpha}{C_{wall4}} \ddot{q}_{rad4} A_4 + \frac{T_{out}}{C_{wall4} R_{out}} \\ \frac{1}{C_{room}} [\dot{m} C_{p,air} (T_{air} - T_1) + q_{int1}] \end{bmatrix}$$

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

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้นั้น เป็นแบบจำลองที่ยังไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งเราสามารถทำให้เป็นเชิงเส้นได้ โดยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น (Linearization)

3.4 การทำให้เป็นเชิงเส้น (Linearization)

การทำให้เป็นเชิงเส้นในระบบของเรานั้น ได้ใช้วิธีแบบจาโคเบียน (Jacobian Linearization) ซึ่งสามารถทำได้ตามขั้นตอนต่อไปนี้

3.4.1 นำสมการเชิงอนุพันธ์ที่ไม่เชิงเส้นเท่ากับศูนย์

$$\dot{x} = f(x(t), u(t)) = 0$$

โดย

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{T}_{wall1} \\ \dot{T}_{wall2} \\ \dot{T}_{wall3} \\ \dot{T}_{wall4} \\ \dot{T}_1 \end{bmatrix}$$

แล้วหาจุดการทำงานของระบบจะได้สมการดังนี้

$$\left(-\frac{1}{C_{wall1}R_{a_1}}\right)x_1 + \left(\frac{1}{C_{wall1}R_{b_1}}\right)x_5 = 0 \quad (3.8)$$

$$\left(-\frac{1}{C_{wall2}R_{a_2}}\right)x_2 + \left(\frac{1}{C_{wall2}R_{b_2}}\right)x_5 = 0 \quad (3.9)$$

$$\left(-\frac{1}{C_{wall3}R_{a_3}}\right)x_3 + \left(\frac{1}{C_{wall3}R_{b_3}}\right)x_5 = 0 \quad (3.10)$$

$$\left(-\frac{1}{C_{wall4}R_{a_4}}\right)x_4 + \left(\frac{1}{C_{wall4}R_{b_4}}\right)x_5 = 0 \quad (3.11)$$

$$\left(\frac{1}{C_{room}R_{b_1}}\right)x_1 + \left(\frac{1}{C_{room}R_{b_2}}\right)x_2 + \left(\frac{1}{C_{room}R_{b_3}}\right)x_3 + \left(\frac{1}{C_{room}R_{b_4}}\right)x_4 + \left(R_c - \frac{C_{par}}{C_{room}} \cdot \mu\right) + \left(\frac{C_{par}}{C_{room}} \cdot \mu\right)T_{air} = 0 \quad (3.12)$$

ทำการแก้สมการเพื่อหาค่าจุดการทำงานของระบบโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink

$$x_e = \begin{bmatrix} 19.2300 \\ 19.2300 \\ 19.2300 \\ 19.2300 \\ 24.9858 \end{bmatrix}$$

และ

$$u_e = 1.8000$$

หลังจากที่นำสมการเชิงอนุพันธ์ทั้ง 5 สมการมาทำการแก้สมการหาค่าจุดทำงานของระบบแล้ว นำค่าที่ได้มาแทนในเมตริกซ์ที่ทำการเปลี่ยนให้อยู่ในระบบสมการที่เป็นเชิงเส้นโดยใช้วิธีแบบจาโคเบียน ให้อยู่ในรูปสมการดังนี้

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (3.13)$$

$$y = Cx + Du \quad (3.14)$$

โดย A, B, C และ D คือ

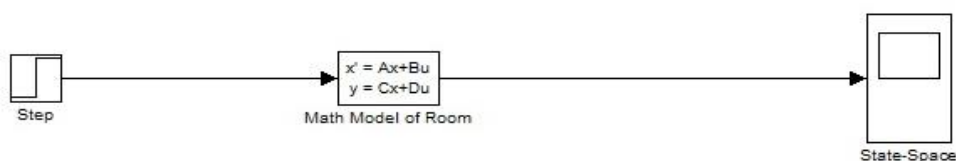
$$A = \begin{bmatrix} \frac{-1}{C_{wall1} \cdot R_{a1}} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_{wall1} \cdot R_{b1}} \\ 0 & \frac{-1}{C_{wall2} \cdot R_{a2}} & 0 & 0 & \frac{1}{C_{wall2} \cdot R_{b2}} \\ 0 & 0 & \frac{-1}{C_{wall3} \cdot R_{a3}} & 0 & \frac{1}{C_{wall3} \cdot R_{b3}} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{C_{wall4} \cdot R_{a4}} & \frac{1}{C_{wall4} \cdot R_{b4}} \\ \frac{1}{C_{room} \cdot R_{b1}} & \frac{1}{C_{room} \cdot R_{b2}} & \frac{1}{C_{room} \cdot R_{b3}} & \frac{1}{C_{room} \cdot R_{b4}} & R_c - \left[\left(\frac{C_{pair}}{C_{room}} \right) \dot{m} \right] \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{C_{pair}}{C_{room}} (T_{air} - T_1) \end{bmatrix}$$

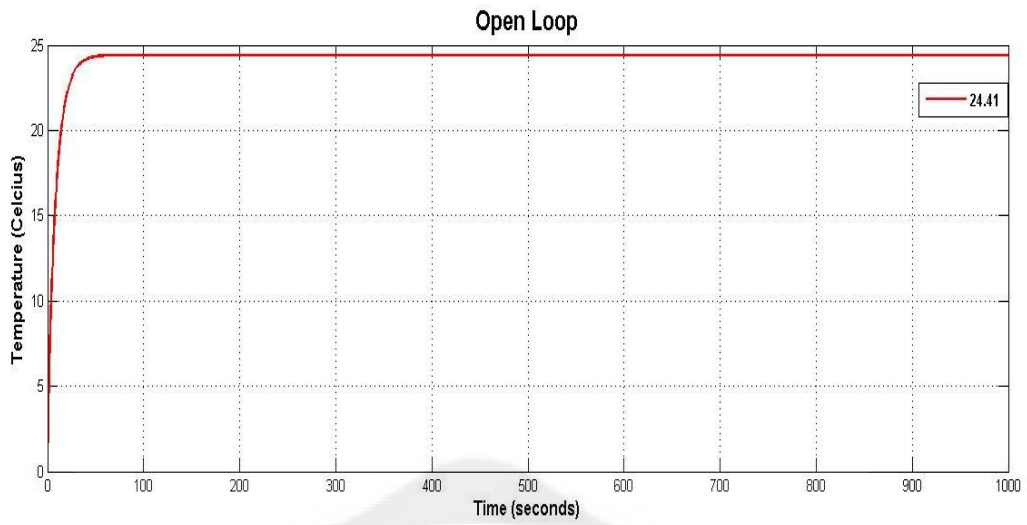
$$C = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]$$

$$D = [0]$$

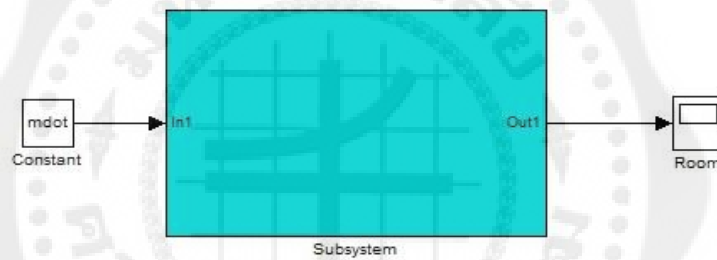
ทดสอบหาค่าของระบบวงเปิดโดยนำค่าเมตริกซ์ A, B, C และ D แทนในปริภูมิสถานะแล้ว
ป้อนสัญญาณขาเข้าแบบขั้นบันได



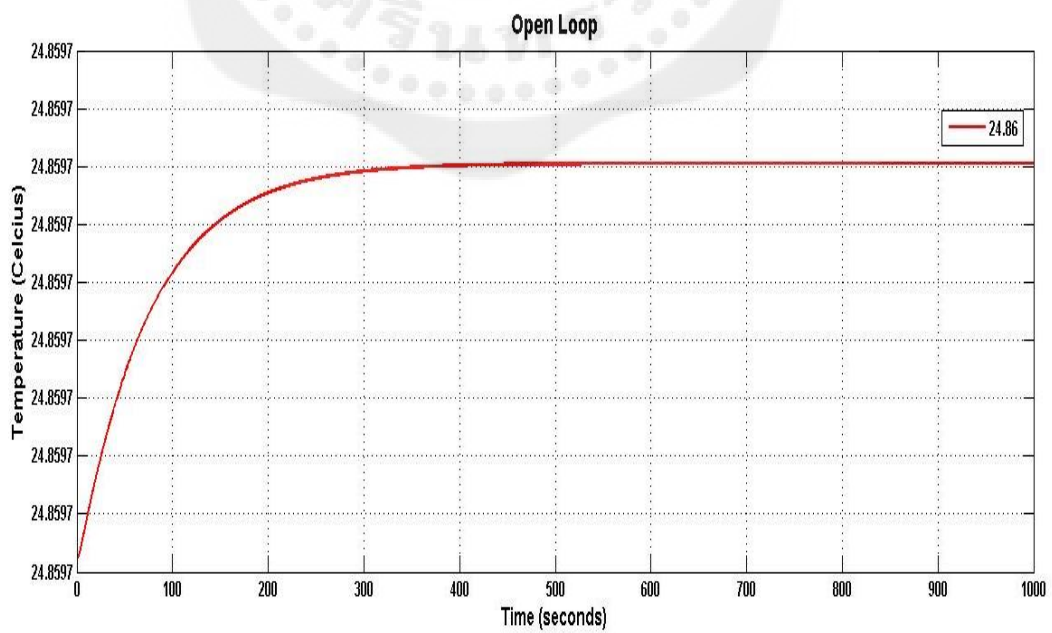
รูปที่ 3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใน โปรแกรม MATLAB/Simulink



รูปที่ 3.4 ค่าของอุณหภูมิในระบบวงเปิดโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์



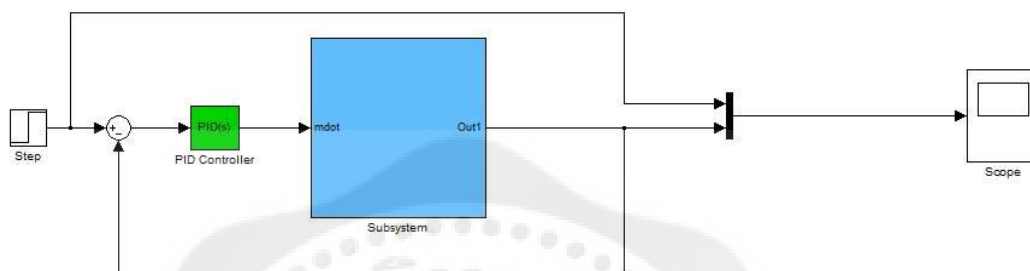
รูปที่ 3.5 แบบจำลองวงจรสมมูลทางไฟฟ้า



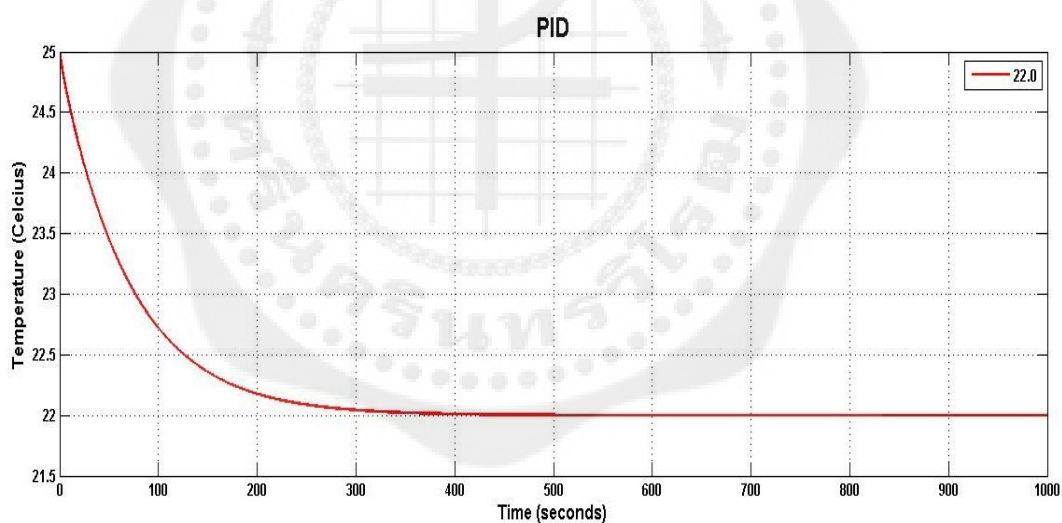
รูปที่ 3.6 ค่าของอุณหภูมิในระบบวงเปิดโดยใช้วงจรสมมูลทางไฟฟ้า

3.4.1 การออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอดี

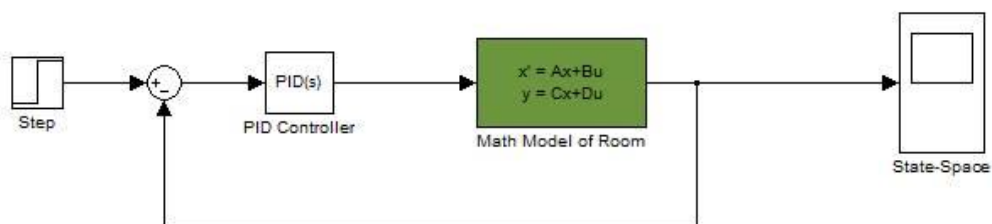
การออกแบบตัวควบคุมนั้นเราได้ใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ในการหาค่าตัวแปรต่างๆ โดยการเขียนฟังก์ชันใน m file คือฟังก์ชัน "pidtune" เพื่อหาค่าคงที่ของ K_p , K_i และ K_d แล้วนำมาใส่ในบล็อก PID Controller เพื่อทำการปรับปรุงระบบควบคุมอุณหภูมิภายในห้อง



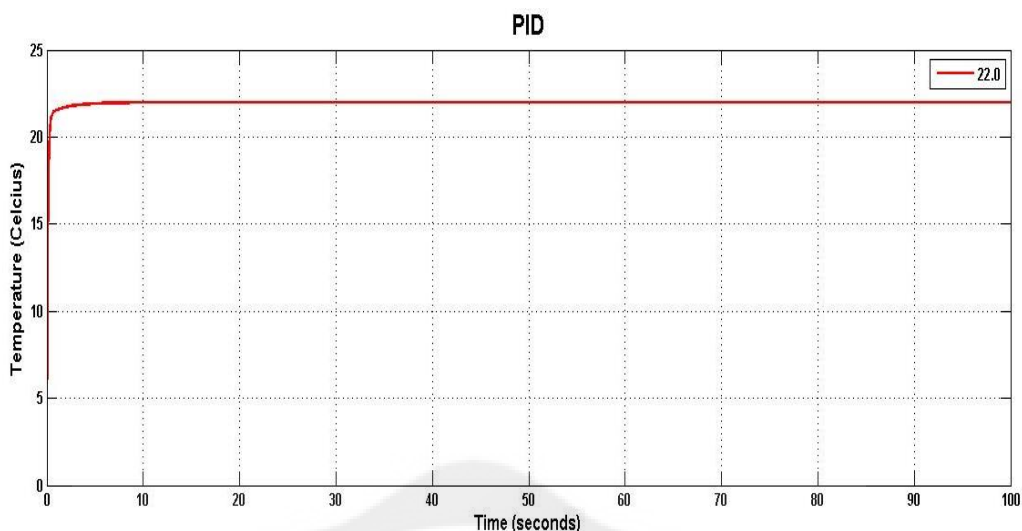
รูปที่ 3.7 แบบจำลองวงจรสมมูลทางไฟฟ้าที่มีตัวควบคุมแบบพีไอดี



รูปที่ 3.8 ค่าของอุณหภูมิภายในห้องที่มีตัวควบคุมพีไอดี



รูปที่ 3.9 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีตัวควบคุมแบบพีไอดี



รูปที่ 3.10 ค่าอุณหภูมิของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีตัวควบคุมแบบพีไอดี

3.4.2 การออกแบบตัวควบคุมแบบจำลองเชิงทำนาย

การออกแบบตัวควบคุมนั้น เราได้ใช้การเขียนฟังก์ชันใน m file ของโปรแกรม MATLAB/Simulink เป็นการจำลองการทำงานในรูปแบบออฟไลน์ โดยกำหนดรูปแบบการคำนวณเป็นขั้นตอน ดังนี้

3.4.2.1 กระบวนการทำงานการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลอง (MPC Procedures)

1). กระบวนการทำงานกำหนดให้แบบจำลองกระบวนการทำงานอยู่ในทอมนของระบบปริภูมิสถานะแบบเวลาไม่ต่อเนื่อง (Discrete time state-space system) คือ เมตริกซ์ a, b, c, d

2). คำนวณค่าจากวงจรถองคาลมาน (Kalman Filter) จากสมการดังนี้

$$K = (APC^T + Z)(CPC^T + V)^{-1}$$

$$P = W + APA^T - (APC^T + Z)(CPC^T + V)^{-1}(Z^T + CPA^T)$$

3). เลือกแกนการทำนาย (N) และเมตริกซ์ถ่วงน้ำหนักนำเข้า (Q) และสถานะ (S) เพื่อหาสมรรถนะที่ดีที่สุดให้ระบบสร้างเฮกเซียนเมตริกซ์ (H) และ Γ ตามสมการตามลำดับ

$$H \stackrel{\Delta}{=} \Phi^T \bar{Q} \Phi + \bar{S}$$

$$\Gamma \stackrel{\Delta}{=} [\Phi^T \bar{Q} \Lambda - \Phi^T \bar{Q}]$$

4).. เลือกขอบเขตข้อจำกัด L_{eq} , L_{in} , b_{eq} , b_{in} ตามลิมิตทางฟิสิกส์และกำหนดช่วงการทำงาน

3.4.2.2 การเขียนกัลกอริทึมของการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลอง (MPC Algorithm)

1). จากในแต่ละช่วงเวลา t ในช่วงก่อนหน้านี้ คำนวณค่าการควบคุมค่านำเข้าที่เคลื่อนไป $u(t)$ ของระบบ

2). วัดระบบในส่วนของค่านำออก $y(t)$ และค่านำเข้า $u(t)$

3). ประมาณสถานะในช่วงปัจจุบันที่ $\hat{x}_{k+1|k}$ จากการวัดค่านำออกและค่านำเข้า

ตามสมการ

$$\hat{x}_{k+1|k} = A\hat{x}_{k|k-1} + B_{u_t} + K(y_t - \hat{y}_{k|k-1}),$$

คำนวณค่า f ตามสมการ

$$f \stackrel{\Delta}{=} \Gamma \begin{bmatrix} \hat{x}_{k+1|k} \\ R_k \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Su_t \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}$$

4). คำนวณค่าการควบคุมในช่วงเวลาถัดไปจากค่านำเข้า u_{k+1} โดยเลือกค่าควบคุมค่าแรกจากการคำนวณใน u_k^* ซึ่งได้รับจากสมการ

$$\begin{aligned} u_k^* &\stackrel{\Delta}{=} \arg \min_{u_k} J(\hat{x}_{k+1|k}, u_k) \\ &\text{s.t.} \quad L_{eq} u_k = b_{eq} \\ &\quad L_{in} u_k \leq b_{in} \end{aligned}$$

บทที่ 4

ผลการทดลอง

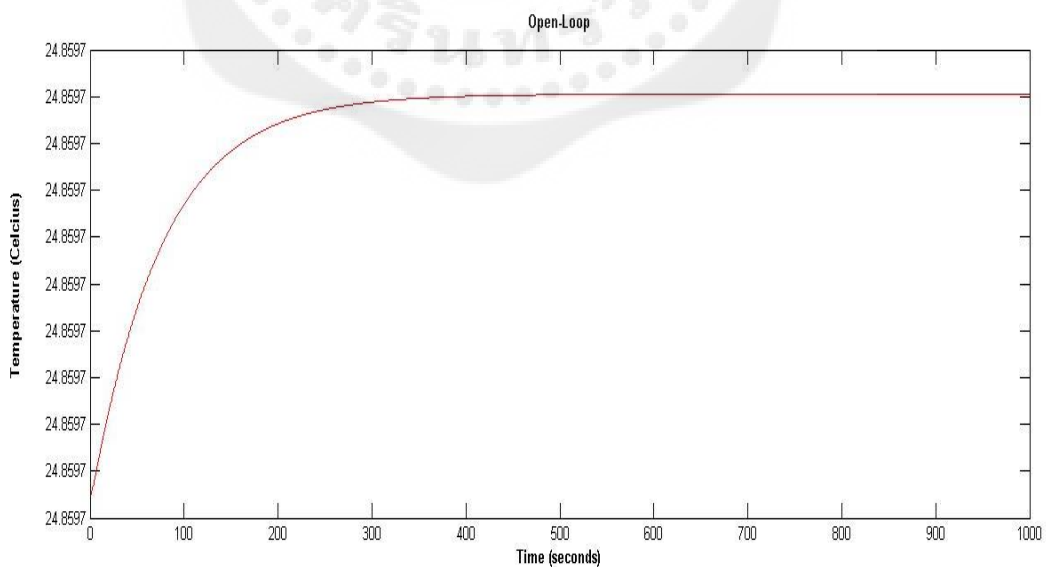
4.1 กล่าวนำ

บทนี้เป็นการนำเสนอผลการทดลอง โดยเป็นการเปรียบเทียบการควบคุมในแบบต่างๆ โดยมีแบบระบบวงเปิดการควบคุมด้วยตัวควบคุมชนิดพีไอดี และการควบคุมด้วยตัวควบคุมการทดลองเชิงทำนาย ซึ่งในการออกแบบนั้นจะอาศัยการคำนวณด้วยมือ และ ตรวจสอบผลด้วยโปรแกรม MATLAB โดยการวิเคราะห์หาตัวควบคุมที่เหมาะสมให้กับระบบ เพื่อดูว่าตัวควบคุมแบบใดที่ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพและความเหมาะสมในการทำงานมากกว่ากัน

4.2 ระบบวงเปิด

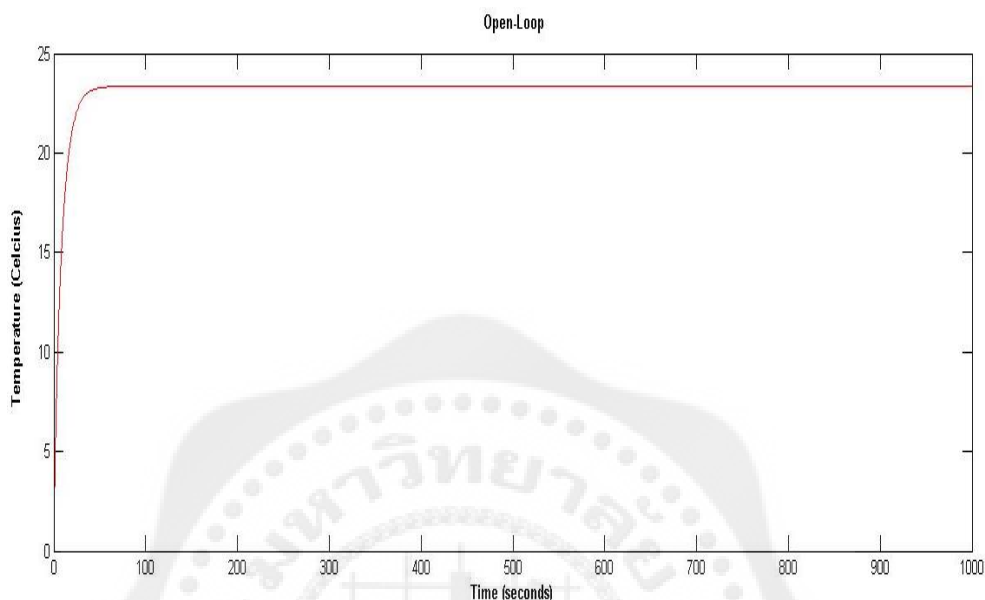
ในระบบวงเปิดนั้นเราได้มีการเปรียบเทียบค่าที่ใช้ในการทดลองโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เปรียบเทียบกับแบบจำลองของให้โดยใช้วงจรสมมูลแทนระบบของห้อง

จากแบบจำลองของห้องโดยใช้วงจรสมมูลทางไฟฟ้าแบบระบบวงเปิด ผลของอุณหภูมิภายในห้องมีค่าของผลการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 อุณหภูมิภายในห้องที่ไม่มีการควบคุม

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยการป้อนสัญญาณค่านำเข้า เป็นสัญญาณแบบขั้นบันได ผลของอุณหภูมิภายในห้องมีค่าของผลการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.2



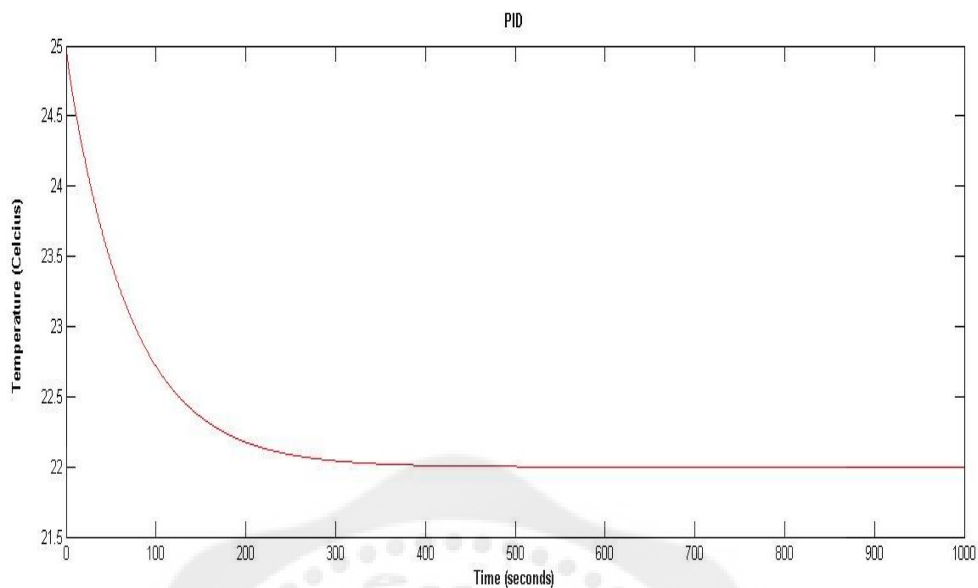
รูปที่ 4.2 อุณหภูมิภายในห้องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากผลการทดลองในระบบวงเปิด เป็นการเปรียบเทียบระหว่าง แบบจำลองของห้องโดยวงจรสมมูลทางไฟฟ้าและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งค่าผลตอบสนองที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกันโดยแบบจำลองวงจรสมมูลทางไฟฟ้ามีค่า 24.8°C และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นมีค่า 23.35°C

4.3 ระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมแบบพีไอดี

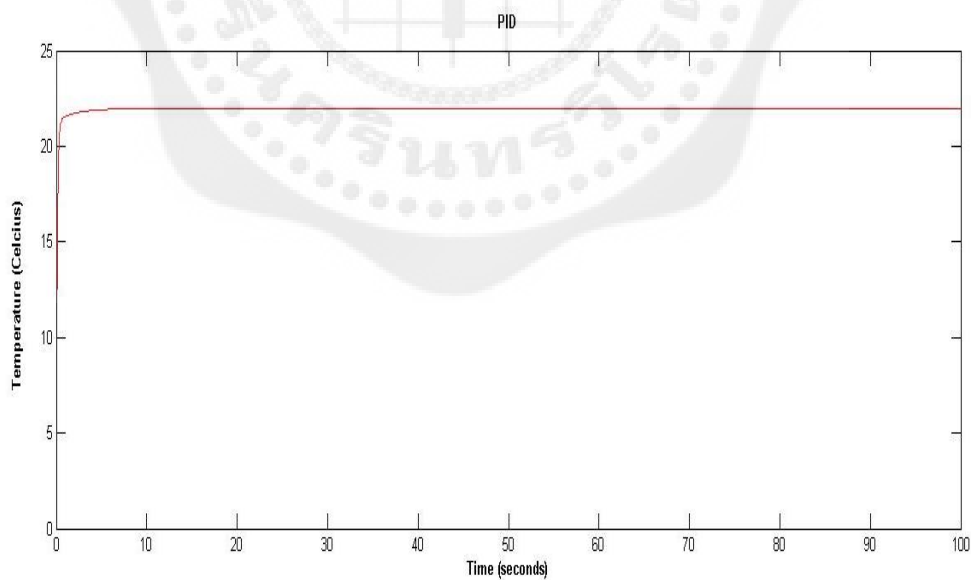
จากค่าของระบบในหัวข้อ 4.2 ซึ่งสามารถใช้ได้โดยการเปรียบเทียบวงจรสมมูลทางไฟฟ้าและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เราได้นำค่าที่ได้มานำใช้ในการทดลองนี้ ซึ่งเป็นการนำตัวควบคุมแบบพีไอดีใส่ในระบบ ทำให้ระบบนั้นกลายเป็นระบบวงปิด แล้วเราได้มาทำการเปรียบเทียบวงจรสมมูลทางไฟฟ้าและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อีกรอบหนึ่ง

จากแบบจำลองห้องหนึ่งห้องในระบบวงเปิด เราได้ทำการเพิ่มตัวควบคุมแบบพีไอดีเข้าไปในระบบ โดยค่า $K_p = 100$, $K_I = 10$, $K_D = 0$ และเราจะได้ค่าผลตอบสนองของระบบ ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 อุณหภูมิภายในห้องโดยมีตัวควบคุมแบบพีไอดี

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบวงเปิด เราได้ทำการเพิ่มตัวควบคุมแบบพีไอดีเข้าไปในระบบ โดยค่า $K_p = 100$, $K_I = 5$, $K_D = 0$ และเราจะได้ค่าผลตอบสนองของระบบดังแสดงในรูปที่ 4.4

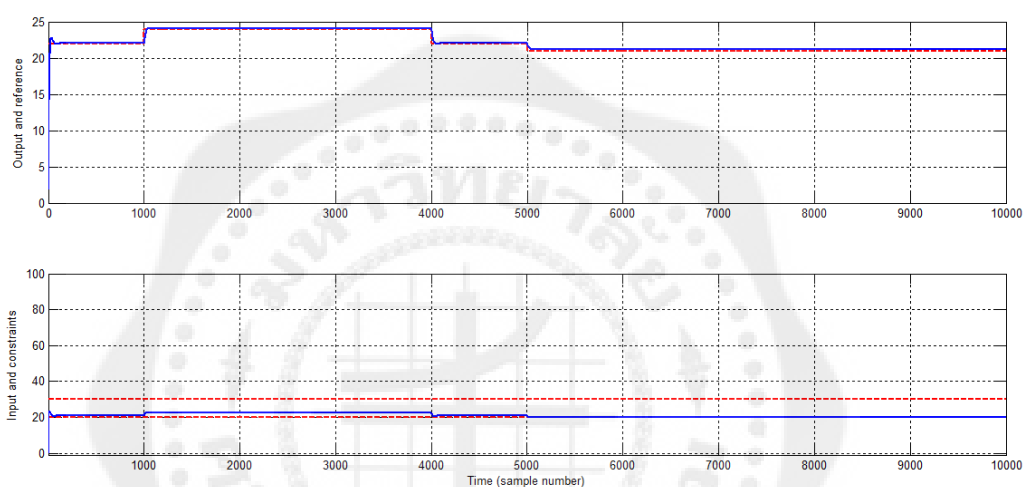


รูปที่ 4.4 อุณหภูมิภายในห้องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยมีตัวควบคุมแบบพีไอดี

จากผลการทดลองในระบบวงปิด เป็นการเปรียบเทียบระหว่าง แบบจำลองของห้องโดยวงจรสมมูลทางไฟฟ้าและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งมีการใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี และค่าผลตอบสนองที่ได้นั้นมีค่าเท่ากันคือ 22°C

4.4 ระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมแบบเชิงทำนาย

กราฟแสดงผลที่ได้จากการออกแบบตัวควบคุมโดยการเขียนฟังก์ชันใน m file ของโปรแกรม MATLAB /Simulink



รูปที่ 4.5 อุณหภูมิภายในห้องจากแบบจำลองโดยมีตัวควบคุมแบบเชิงทำนาย

สรุปผลได้ว่า จากการทดลองเปรียบเทียบการใช้ตัวควบคุมทั้งสองแบบ พบว่า ในเรื่องของใช้พลังงาน ตัวควบคุมแบบเชิงทำนายแบบจำลองจะใช้พลังงานน้อยกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดี ประมาณ 81.65% และ ในเรื่องของเวลา ตัวควบคุมแบบพีไอดี จะใช้เวลาในการเข้าสู่ช่วงอุณหภูมิที่ต้องการน้อยกว่าตัวควบคุมแบบเชิงทำนายแบบจำลองประมาณ 28.24% ดังนั้นแสดงว่า ตัวควบคุมแบบเชิงทำนายแบบจำลองมีประสิทธิภาพในการลดการใช้พลังงานมากกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดี แต่เพราะตัวควบคุมแบบเชิงทำนายแบบจำลองมีการทำนายอุณหภูมิล่วงหน้า เวลาที่ใช้ในการคำนวณจึงมากกว่าเนื่องจากใช้ค่าในปัจจุบันมาทำนายอนาคต ผลที่ได้จึงใกล้ความเป็นจริง (Fact on real time) มากกว่า

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 กล่าวนำ

ในบทนี้เป็นการกล่าวถึงบทสรุปการทำงานโครงการ โดยจะประกอบไปด้วย สรุปผลการทดลองของการทดลองทั้งหมด การเปรียบเทียบผลการทดลองในแบบต่างๆ ปัญหาและอุปสรรคต่างๆในการทำงาน และข้อเสนอแนะที่จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ต่อไปในอนาคต

5.2 สรุปผลการทดลอง

โครงการฉบับนี้ นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมอุณหภูมิของระบบปรับอากาศภายในอาคาร ประกอบไปด้วย ตัวควบคุมแบบคลาสสิกคือตัวควบคุมพีไอดี กับตัวควบคุมแบบขั้นสูงคือตัวควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองแบบออฟไลน์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของกระบวนการทำงานในเรื่องของระยะเวลาที่เข้าสู่ช่วงอุณหภูมิที่ขอบเขตความสบายของผู้ใช้งาน และลดการใช้พลังงานของเครื่องปรับอากาศเพื่อช่วยลดค่าใช้จ่าย ดังนั้นโดยในบทที่ 2 ได้กล่าวถึงทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนซึ่งที่ใช้ประกอบในการออกแบบกระบวนการควบคุมอุณหภูมิ สำหรับบทที่ 3 นี้ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการควบคุมอุณหภูมิ โดยอ้างอิงทฤษฎีจากบทที่ 2 มาเปรียบเทียบกับทฤษฎีทางไฟฟ้าเป็นวงจรไฟฟ้าประเภท R-C เมื่อทำการวิเคราะห์แบบโนด จะได้สมการแสดงอุณหภูมิของกำแพงและห้องออกมา จากนั้นจะออกแบบตัวควบคุมเพื่อปรับปรุงให้ระบบนี้มีสมรรถนะตามต้องการ ด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ คือโปรแกรม MATLAB และเครื่องมือ จากSimulink คือ Simscape ในบทที่ 4 เป็นการแสดงผลตอบสนองของแบบจำลองการทำงานซึ่งนำมาเปรียบเทียบทั้งสามแบบ คือ ระบบควบคุมแบบวงเปิด, ตัวควบคุมแบบพีไอดี และ ตัวควบคุมแบบเชิงทำนายแบบจำลองโดยการวิเคราะห์หาตัวควบคุมที่เหมาะสมให้กับระบบ เพื่อหาตัวควบคุมแบบใดที่ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพและความเหมาะสมในการทำงานมากกว่ากัน พบว่า ตัวควบคุมแบบเชิงทำนายแบบจำลองมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าในการลดการใช้พลังงาน และสามารถทำนายช่วงอุณหภูมิในอนาคตได้ ซึ่งตัวควบคุมแบบพีไอดี ไม่สามารถทำได้

5.3 ปัญหาและอุปสรรคในการทำงาน

5.3.1 เนื่องจากตัวควบคุมแบบเชิงทำนายนั้นเป็นทฤษฎีที่ยังใหม่ทำให้ต้องใช้เวลาในการศึกษา ทฤษฎีนี้ค่อนข้างมาก จึงทำให้เสียเวลาในการศึกษาไปมาก

5.3.2 เนื่องจากเวลาในการทดสอบนั้นใช้เวลาในการประมวลผลค่อนข้างมากที่ใช้เวลานานนั้น เพราะเพื่อที่จะสังเกตค่าที่ได้นั้นให้ชัดเจนเมื่ออยู่ในสถานะคงตัว

5.3.3 เวลาในการทำโครงงานค่อนข้างจำกัดทำให้การออกแบบตัวควบคุมนั้นอาจไม่ดีพออาจ ทำให้เกิดค่าผิดพลาดได้

5.4 ข้อเสนอแนะ

ในการออกแบบตัวควบคุมในโครงงาน เพื่อให้ได้ค่าที่ดีที่สุดควรนำค่าที่ได้จากผลการ ทดลองแต่ละแบบมาเปรียบเทียบกัน สำหรับในโครงงานนี้ห้องที่ใช้ในการทดลองนั้นยังเป็นห้องที่ เป็นระบบเปิด (ไม่มีตัวรบกวนภายในระบบ) เพราะองค์ประกอบของห้องในสถานะจริงยังมีอีก หลายองค์ประกอบที่สามารถนำมาคิดคำนวณเพื่อที่จะสามารถนำไปประยุกต์ในชีวิตประจำวันได้

เอกสารอ้างอิง

- จิระพล ศรีเสริฐผล. (2555). **Controller Design**. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. สืบค้นเมื่อ วันที่ 27 มกราคม 2558. จาก
http://eng.sut.ac.th/me/box/2_55/425440/Controller_Design2_55.pdf
- จุฑารัตน์ แสงงาม. (2556). **231-311 Momentum and Heat Transfer (Part 2 Heat Transfer)**. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. สืบค้นเมื่อ วันที่ 27 มกราคม 2558. จาก
<https://ajutarut.files.wordpress.com/2012/08/e0b89ae0b897e0b897e0b8b5e0b988-1-mechanism-of-heat-transfer.pdf>
- บัณฑิต ฟุ้งธรรมสารและคณะ. (2554). **แผนพัฒนาอนุรักษ์พลังงาน 20 ปี (พ.ศ.2554-2573)**. กระทรวงพลังงาน. สืบค้นเมื่อวันที่ 29 สิงหาคม 2557. จาก
www.eppo.go.th/ccep/download/NEEP2030_FINAL.pdf
- ผศ.ดร.วิชัย วิทยาเกียรติเลิศ. (2555). **Introduction to Mathematical Control Theory: บทที่ 1 บทนำ**. คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. สืบค้นเมื่อวันที่ 27 มกราคม 2558. จาก <http://webserv.kmitl.ac.th/kwichai/concontrol/controlChap1.pdf>
- A. G. Wills. (2004). **Technical Report EE04025 - Notes on Linear Model Predictive Control**. Australia : The University of Newcastle. Retrieved April 20, 2015, from
<http://sigpromu.org/reports/EE04025.pdf>
- Karla Vega. (2009). **Thermal Modeling for Buildings**. Berkeley : University of California. Retrieved August 29, 2014, from
https://chess.eecs.berkeley.edu/design/2009/project/EE249_KarlaVega.pdf
- Mark Cannon. (2015). **Lectures Notes: C21 Model predictive control**. Oxford University Retrieved April 20, 2015, from <http://www.eng.ox.ac.uk/~conmrc/mpc/mpc1-2.pdf>
- Mehdi Maasoumy Haghighi. (2011). **Modeling and Optimal Control Algorithm Design for HVAC Systems in Energy Efficient Buildings**. Berkeley : University of California. Retrieved August 29, 2014, from <http://www.eecs.berkeley.edu/Pubs/TechRpts/2011/EECS-2011-12.pdf>



ภาคผนวก

โปรแกรมที่ใช้ในการทดลอง

```

%-----
%clear all; close all;
%-----
%Specify system here in state space form with A B C D
Ts = 1 ; %Sample interval
T0 = 25;
T1 = 22;
Cr = 16.73;
Cw1 = 2.7070;
Cw2 = 2.7300;
Cw3 = 1.8950;
Cw4 = 3.8980;
Rw1 = 1.659;
Ri = 0.062;
Ro = 2.149;
Cp = 1.007;
mdot = 1.8;
Ra1 = ((Ro+(Rw1/2)) * (Ri+(Rw1/2))) / ((Ri+(Rw1/2)) + (Ro+(Rw1/2)))
Ra2 = Ra1
Ra3 = Ra1
Ra4 = Ra1
Rb1 = Ri+(Rw1/2)
Rb2 = Rb1
Rb3 = Rb1
Rb4 = Rb1
Rc = (-1/Cr) * ((1/Rb1)+(1/Rb2)+(1/Rb3)+(1/Rb4))
A = [-1/(Cw1*Ra1) 0 0 0 1/(Cw1*Rb1); ...
      0 -1/(Cw2*Ra2) 0 0 1/(Cw2*Rb2); ...
      0 0 -1/(Cw3*Ra3) 0 1/(Cw3*Rb3); ...
      0 0 0 -1/(Cw4*Ra4) 1/(Cw4*Rb4); ...
      1/(Cr*Rb1) 1/(Cr*Rb2) 1/(Cr*Rb3) 1/(Cr*Rb4) Rc - ((Cp/Cr)*mdot)]
B = [0;0;0;0; (Cp/Cr) * (T0-T1)]
C = [0 0 0 0 1]
D = [0]
s = tf('s')
[b,a] = ss2tf(A,B,C,D)
G = tf(b,a)
cd = c2d(G,Ts)
[a,b,c,d]=ssdata(cd);

%Specify system dimensions
n_in = size(b,2); %# inputs
n_out = size(c,1); %# outputs
n_states = size(a,1); %# states
%-----
% Specify horizon
%-----
M= 10; %Control Horizon
N = M; %Prediction Horizon
%-----
% Initial Matrix Filling
%-----
Lambda= zeros((N+1)*n_out,n_states);
Phi = zeros((N+1)*n_out);
AB = zeros((N+1)*n_out,n_in);
AB(1:n_out,:) = d;

```

```

    for i = 2:N+1,
        AB((i-1)*n_out+1:(i)*n_out,:) = c*a^(i-2)*b;
    end;
    for i = 1:M+1,
Phi(1+(i-1)*n_out:end,1+(i-1)*n_in:(i)*n_in) = AB(1:(N-i+2)*n_out,:);
    end;
Phi = sparse(Phi);
Lambda(1:n_out,:) = c;
    for i = 2:N+1,
        Lambda(1+(i-1)*n_out:i*n_out,:) = c*a^(i-1);
    end;

%-----
% Quadratic cost weighting Q (error) and R (control) generation.
%-----
r= diag([100*ones(1,n_in)]); %Weights on input moves (i.e. ||u(t)-
u(t-1)||)
q = diag([5*ones(1,n_out)]); %Weights on output deviation from
setpoint
Q = sparse(kron(eye(N+1),q));
R = kron(diag([2*ones(1,N),1]),r);
R = R + kron(diag([-ones(1,N)],-1),r);
R = R + kron(diag([-ones(1,N)],1),r);

%-----
% Genrate the Hessian H
%-----
H= full(Phi'*Q*Phi) + R;

%-----
% Create an observer
%-----
Aa= blkdiag(a,eye(n_out));
Ba = [b;zeros(n_out,n_in)];
Ca = [c eye(n_out)];
Da = d;
Ga = diag([ones(1,n_states),ones(1,n_out)]);
Qa = 1*eye(n_states+n_out);
Ra = 1*eye(n_out);
L = dlqe(Aa,Ga,Ca,Qa,Ra);
L = Aa*L;

%-----
% Create plant constraints
%-----
lb= 20*ones(n_in,1); ub = 30*ones(n_in,1);
Lb = kron(ones((M+1),1),lb);
Ub = kron(ones((M+1),1),ub);

%-----
% Set initial conditions
%-----
sim_length= 10000 ; %Simulation length in sec
T = sim_length/Ts; %number of samples in simulation
t = 0:Ts:sim_length-Ts; %time steps

```

```

%-----
% Set system initial conditions.....
%-----
x = zeros(n_states,T);
x(:,1) = 25*ones(n_states,1); %Plant state
xh = zeros(n_states+n_out,T); %Estimated state
u = zeros(n_in,T); %Input record
u_old = zeros(n_in,1);
y = zeros(n_in,1); %Output record
Aobs = Aa-L*Ca; %Generate observer state gain matrix
Bobs = Ba-L*Da; %Generate observer input gain matrix
fd = full([Phi'*Q*Lambda, Phi'*kron(ones(N+1,1),q)]);
opt=optimset('display','off');

%-----
% Generate reference signal
%-----
ref = 22*ones(1,T);
ref1 = 24*ones(1,T);
ref2 = 21*ones(1,T);
ref(1000:4000)=ref1(1000:4000);
ref(5000:10000)=ref2(5000:10000);
%-----
% MPC Evolution
%-----
for i = 1:T,
    %SIMULATE REAL PLANT-----
    x(:,i+1)= a*x(:,i) + b*u(:,i);
    y(:,i) = c*x(:,i) + d*u(:,i);

    %CONTROLLER STARTS HERE-----
    %Observestate
    xh(:,i+1) = Aobs*xh(:,i) + Bobs*u(:,i) + L*y(:,i);

    %Solve dynamic optimisation problem
    f = fd*[xh(1:n_states,i+1);xh(n_states+1:end,i+1)-ref(:,i)];
    f(1:n_in) = f(1:n_in)-r*u_old;
    U = quadprog(H,f,[],[],[],[],Lb,Ub,[],opt);u(:,i+1) = U(1:n_in);
    u_old = u(:,i);

end;

%-----
% Plots
%-----
subplot(2,1,1);
plot(ref','r--','Linewidth',2);hold on
plot(y','b-','Linewidth',2); hold off

ylabel('Output and reference');
subplot(2,1,2);
plot([1 T],[ub ub],'r--','Linewidth',2); hold on;
plot([1 T],[lb lb],'r--','Linewidth',2);
plot(u(:,1:T),'b-','Linewidth',2); hold off;

xlabel('Time (sample number)');
ylabel('Input and constraints');
axis([1 T -1 100]);

```

ประวัติย่อประวัติผู้ทำโครงการ

ชื่อ-สกุล นางสาว กนิษฐา กิติกาญจน์
 วัน เดือน ปีเกิด 10 สิงหาคม พ.ศ. 2535
 สถานที่เกิด กรุงเทพมหานคร
 สถานที่อยู่ปัจจุบัน 500/1 ซอยจรัญสนิทวงศ์ 85
 แขวงบางอ้อ เขตบางพลัด
 จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10700
 โทรศัพท์ 087-5667251



ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2550 มัธยมต้น โรงเรียนสตรีรัตนบุรี
 พ.ศ. 2553 มัธยมปลาย โรงเรียนสตรีรัตนบุรี
 พ.ศ. 2557 กำลังศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ประวัติย่อประวัติผู้ทำโครงการ

ชื่อ-สกุล นายฐิติวัฒน์ สัตยชัยชาติ
 วัน เดือน ปีเกิด 6 มกราคม พ.ศ. 2536
 สถานที่เกิด กรุงเทพมหานคร
 สถานที่อยู่ปัจจุบัน 12/120 หมู่ 4 ตำบลมหาสวัสดิ์
 อำเภอพุทธมณฑล
 จังหวัดนครปฐม 73170
 โทรศัพท์ 092-2544498



ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2550 มัธยมต้น โรงเรียนอัสสัมชัญ ธนบุรี
 พ.ศ. 2553 มัธยมปลาย โรงเรียนนวมินทราชินูทิศ สตรีวิทยา พุทธมณฑล
 พ.ศ. 2557 กำลังศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ประวัติย่อ นิสิตผู้ทำโครงการ

ชื่อ-สกุล นางสาว ทิพวรรณ นพระน้อย
วัน เดือน ปีเกิด 2 ตุลาคม พ.ศ. 2535
สถานที่เกิด นครราชสีมา
สถานที่อยู่ปัจจุบัน 73 หมู่ 3 ตำบลคอน
 อำเภอปักธงชัย
 จังหวัดนครราชสีมา 30150
โทรศัพท์ 098-2529345



ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2550 มัธยมต้น โรงเรียนปักธงชัยประชานิรมิต
พ.ศ. 2553 มัธยมปลาย โรงเรียนปักธงชัยประชานิรมิต
พ.ศ. 2557 กำลังศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ