ระบบควบคุมเครื่องยนต์เบนซินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าขนาด 5 กิโลวัตต์ จากก๊าซชีวภาพด้วยเครื่องอัดอากาศ

นายวิโรจน์ ขาวละออ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2558

THE CONTROL SYSTEM OF GASOLINE ENGINE FOR 5 KILOWATTS ELECTRICAL POWER GENERATOR FROM BIOGAS WITH SUPERCHARGER

Wiroj Khawlaor

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

Suranaree University of Technology

Academic Year 2015

ระบบควบคุมเครื่องยนต์เบนซินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าขนาด 5 กิโลวัตต์ จากก๊าซชีวภาพด้วยเครื่องอัดอากาศ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

_____

(ผศ. ดร.กีรติ สุลักษณ์)
ประธานกรรมการ

_____

(รศ. ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

_____

(อ. ดร.โศรฎา แข็งการ)
กรรมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

_____

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

_____

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

วิโรจน์ ขาวละออ : ระบบควบคุมเครื่องยนต์เบนซินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าขนาด 5 กิโลวัตต์จากก๊าซชีวภาพด้วยเครื่องอัดอากาศ (THE CONTROL SYSTEM OF GASOLINE ENGINE FOR 5 KILOWATTS ELECTRICAL POWER GENERATOR FROM BIOGAS WITH SUPERCHARGER) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล , 129 หน้า

พลังงานเป็นสิ่งสำคัญและพลังงานส่วนใหญ่ที่ใช้พบว่า เป็นพลังงานแบบใช้แล้วหมดไป การใช้พลังงานทดแทนจึงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับปัญหาดังกล่าว และก๊าซชีวภาพก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับพลังงานทดแทนนั้น ก๊าซชีวภาพได้ถูกนำมาใช้แทนน้ำมันเบนซินในการผลิตกระแสไฟฟ้า ในภาคอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะมีขนาด 8-12 สูบ ผลิตกระแสไฟฟ้าได้ 1-3 เมกะวัตต์ แต่การนำก๊าซชีวภาพไปใช้สำหรับเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าขนาดเล็ก พบว่าอัตราการไหลของก๊าซไม่เพียงพอต่อการใช้งานของเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าขนาดเล็ก ส่งผลให้ไม่สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ จากปัญหาดังกล่าวงานวิจัยนี้นำเสนอการดัดแปลงและออกแบบระบบควบคุมอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพสำหรับเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าขนาด 5 กิโลวัตต์ เพื่อนำไปใช้กับชุมชนขนาดเล็ก โรงเรียน ฟาร์ม เป็นต้นโดยใช้ตัวควบคุมพีไอเพื่อควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ส่งกำลังไปยังเครื่องอัดอากาศ เพื่อควบคุมอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพสอดคล้องตามความต้องการของเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้า ผลการทดลองพบว่าระบบควบคุมอัตราการไหลก๊าซชีวภาพสามารถทำงานได้สัมพันธ์กับเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า ขนาด 5 กิโลวัตต์ ที่ความเร็วรอบเดินเบา 3200 รอบต่อนาที ที่อัตราการไหลก๊าซชีวภาพประมาณ 45 ลิตรต่อนาที และที่ความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้าประมาณ 350 รอบต่อนาที ซึ่งทำให้เครื่องผลิตกระแสไฟฟ้ามีประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่อนักศึกษา_____

ปีการศึกษา 2558 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา_____

WIROJ KHAWLAOR : THE CONTROL SYSTEM OF GASOLINE ENGINE FOR 5 KILOWATTS ELECTRICAL POWER GENERATOR FROM BIOGAS WITH SUPERCHARGER. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. JIRAPHON SRISERTPOL, Ph.D., 129 PP

ELECTRICAL GENERATOR / AIR COMPRESSOR / DC MOTOR

Energy is essential for our human life; most of all is non-renewable so using renewable energy is necessary for solving that problem. Biogas is one of the alternatives that can replace gasoline for producing electricity. Most industries use 8-12 cylinders generator to produce around 1-3 MW. However, when we use biogas to drive the small generator, we found insufficient gas flow rate that cannot activate the operation for electricity generation. Because of that issue, we did the research to develop gas flow rate controlling for 5 kW generator for household, farm, or school by using PI controller to controls speed of DC motor that transfers power to air compressor then we can control continuity of gas flow rate according to generator speed. The result of the experiment shows that biogas flow rate controlling system can work relatively with 5 kW generator at 3200 rpm speed, 45 Liters/min biogas flow rate and 350 rpm speed of the DC motor, that makes the electrical generator has more efficiency to produce electricity continuously.

School of Mechanical Engineering Student's Signature_____

Academic Year 2015 Advisor's Signature_____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ทุกประการ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ และขอขอบคุณบุคคลต่าง ๆ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัย ดังนี้

ขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนการศึกษาสำหรับผู้ช่วยวิจัยเข้าศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความรู้ และคำปรึกษาแนะนำในการทำงานวิจัย และให้โอกาสการทำงานในหลายด้านด้วยความกรุณาเสมอมา รวมทั้งให้คำแนะนำในการดำเนินชีวิตด้วยความเมตตามาโดยตลอด และสละเวลาตรวจสอบแก้ไขให้วิทยานิพนธ์มีความถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ผู้ทำวิจัยทั้งในอดีตจนถึงปัจจุบัน

ขอขอบคุณ วิศวกรและเจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ให้คำแนะนำและอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือต่าง ๆ ด้วยดียิ่ง

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ประจำสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ที่อำนวยความสะดวกในด้านธุรการต่าง ๆ ขอบคุณเพื่อน ๆ และน้อง ๆ บัณฑิตศึกษาที่ใกล้ชิดทุกคนที่มีส่วนทำให้การเรียนในระดับปริญญาโทเป็นช่วงเวลาที่มีความสุข

และที่ขาดไม่ได้ขอกราบขอบพระคุณพ่อมานิตย์ ขาวละออ และคุณแม่ฉันทนา ขาวละออ รวมถึงสมาชิกในครอบครัวทุกท่านที่ให้การอบรมเลี้ยงดู และส่งเสริมทางการศึกษาเป็นอย่างดีมาโดยตลอดจนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมา

วิโรจน์ ขาวละออ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)..... ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)..... ข
กิตติกรรมประกาศ..... ค
สารบัญ..... ง
สารบัญตาราง..... ฉ
สารบัญรูป..... ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ..... ฑ

บทที่

1 บทนำ..... 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... 1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย..... 2
1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น..... 2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย..... 2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 2
1.6 การจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์..... 2
2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 4
2.1 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับก๊าซชีวภาพ (Biogas)..... 4
2.1.1 ประวัติความเป็นมาของก๊าซชีวภาพในประเทศไทย..... 4
2.1.2 องค์ประกอบคุณสมบัติของก๊าซชีวภาพ..... 5
2.1.3 การนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์..... 6
2.2 เครื่องยนต์..... 7
2.2.1 เครื่องยนต์เผาไหม้ภายนอก..... 7
2.2.2 เครื่องยนต์เผาไหม้ภายใน..... 8
2.3 การจำแนกชนิดของเครื่องยนต์..... 9
2.3.1 การนำไปใช้งาน..... 9
2.3.2 การออกแบบพื้นฐาน..... 9

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.3 ตำแหน่งและจำนวนลูกสูบของเครื่องยนต์แบบเคลื่อนที่กลับไปกลับมา 10
2.3.4 จำแนกตาม วัฏจักรการทำงาน 11
2.3.5 จำแนกตามตำแหน่งวาล์วของเครื่องยนต์สี่จังหวะ 12
2.3.6 จำแนกตามตำแหน่งของช่องหรือวาล์วของเครื่องยนต์สองจังหวะ 12
2.3.7 เชื้อเพลิงที่ใช้ 13
2.3.8 กระบวนการนำไอดีเข้า 13
2.3.9 วิธีการเตรียมส่วนผสมสำหรับเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟ 14
2.3.10 วิธีการจุดระเบิด 14
2.3.11 การออกแบบห้องเผาไหม้ 15
2.3.12 วิธีการควบคุมภาระ (load control) 15
2.3.13 วิธีการหล่อเย็น 15
2.4 การแบ่งประเภทเครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพ 15
2.4.1 เครื่องยนต์เชื้อเพลิงเดี่ยวใช้งานสลับกัน 15
2.4.2 เครื่องยนต์เชื้อเพลิงคู่ใช้พร้อมกัน 15
2.5 วัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ 16
2.5.1 จังหวะดูด 17
2.5.2 จังหวะอัด 17
2.5.3 จังหวะกำลังหรือจังหวะขยายตัว 17
2.5.4 จังหวะคาย 17
2.6 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 18
2.6.1 แบ่งตามจำนวนเฟสของระบบไฟฟ้า 18
2.6.2 แบ่งตามลักษณะของขดลวดสนามแม่เหล็กที่กระทำกับขดลวดสเตเตอร์ 19
2.6.3 แบ่งตามลักษณะการติดตั้ง 20
2.6.4 แบ่งตามพิกัดกำลังใช้งาน 20
2.6.5 แบ่งตามพลังงานกลที่ใช้ขับเครื่องกำเนิด 20

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.6.6 แบ่งตามลักษณะการนำไปใช้งาน 23
2.6.7 แบ่งตามลักษณะการออกแบบ 24
2.7 โครงสร้างและส่วนประกอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 24
2.7.1 โครงสเตเตอร์ (Stator Frame) 24
2.7.2 โรเตอร์ (Rotor) 26
2.7.3 ขดลวดแดมเปอร์ (Damper Winding) 27
2.7.4 เอ็กไซเตอร์ (Exciter) 27
2.8 การเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวด 28
2.8.1 การเกิดรูปคลื่นไซน์ (Sine Wave) 29
2.8.2 ความเร็วรอบและความถี่ 31
2.9 หลักการทำงานของระบบควบคุมความเร็วรอบของเครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพ 33
2.9.1 ระบบควบคุมแบบเปิด หรือระบบควบคุมแบบไม่ป้อนกลับ 33
2.9.2 ระบบควบคุมแบบวงรอบปิด หรือระบบควบคุมแบบป้อนกลับ 34
2.10 คุณสมบัติของตัวควบคุม 35
2.10.1 การควบคุมแบบสัดส่วน 36
2.10.2 การควบคุมแบบอินทิกรัล 37
2.10.3 การควบคุมแบบอนุพันธ์ 38
2.11 ประเภทและหลักการทำงานของเครื่องอัดอากาศ 40
2.11.1 เครื่องอัดอากาศแบบลูกสูบ 40
2.11.2 เครื่องอัดอากาศแบบโรตารี่ 43
2.11.3 เครื่องอัดอากาศแบบหมุนเหวี่ยง 46
2.12 การซูเปอร์ชาร์จ 48
2.12.1 การซูเปอร์ชาร์จทางกล 48
2.12.2 การเทอร์โบชาร์จ 48
2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 49
2.14 สรุป 52

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....53
3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้า.....54
3.1.1 แบบจำลองสมการอัตราการไหลของมวลอากาศ.....54
3.1.2 แบบจำลองสมการแรงบิดของเครื่องยนต์.....57
3.1.3 แบบจำลองสมการการหมุนของเครื่องยนต์.....59
3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์กระแสตรง.....59
3.2.1 สมการทางไฟฟ้า.....60
3.2.2 สมการทางกล.....61
3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เครื่องอัดอากาศ.....63
3.4 การประมาณค่าของระบบโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดที่ไม่เป็นเชิงเส้น.....64
3.4.1 ขั้นตอนการประมาณค่าตัวแปรของระบบ.....65
3.4.2 ผลการประมาณค่าตัวแปร.....67
3.5 สรุป.....70
4 ผลการทดลองระบบผลิตกระแสไฟฟ้าจากก๊าซชีวภาพ.....71
4.1 ก๊าซชีวภาพ.....71
4.2 ระบบทำความสะอาดก๊าซชีวภาพ.....73
4.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบทำความสะอาดก๊าซชีวภาพ.....73
4.2.2 ขั้นตอนการทำงานของระบบทำความสะอาดก๊าซชีวภาพ.....74
4.2.3 คุณสมบัติของก๊าซชีวภาพหลังผ่านกระบวนการทำความสะอาด.....74
4.3 ระบบควบคุมอัตราการไหลก๊าซชีวภาพ.....76
4.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมอัตราการไหลก๊าซชีวภาพ.....76
4.3.2 ขั้นตอนการทำงานของระบบควบคุมอัตราการไหลก๊าซชีวภาพ.....77
4.4 ระบบควบคุมความเร็วรอบเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าก๊าซชีวภาพ.....78
4.4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบควบคุมความเร็วรอบเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า.....79
4.4.2 ขั้นตอนการทำงานระบบควบคุมความเร็วรอบ
เครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า.....82
4.5 การออกแบบระบบควบคุมพีไอ.....83

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.6 การออกแบบจำลองอ้างอิงระบบควบคุมความเร็วรอบเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า....84
4.6.1 ขั้นตอนการออกแบบจำลองอ้างอิง....85
4.7 การทดสอบระบบควบคุมความเร็วรอบเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าก๊าซชีวภาพ....86
4.8 สรุป....89
5 สรุปและข้อเสนอแนะ....90
5.1 สรุป....90
5.2 ข้อเสนอแนะ....91
รายการอ้างอิง....92
ภาคผนวก
ภาคผนวก ก. การใช้งานและการติดตั้ง Rapcon....94
ภาคผนวก ข. การใช้งานโปรแกรม Simulink Parameter Estimation....99
ภาคผนวก ค. การใช้งานโปรแกรม Simulink Response Optimization....108
ภาคผนวก ง. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่....113
ประวัติผู้เขียน....129

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2.1 องค์ประกอบและคุณสมบัติของก๊าซชีวภาพ..... 5
2.2 คุณสมบัติของก๊าซชีวภาพเปรียบเทียบกับก๊าซธรรมชาติและก๊าซหุงต้ม..... 6
2.3 เปรียบเทียบการใช้ก๊าซชีวภาพทดแทนพลังงานด้านอื่น ๆ..... 7
3.1 ผลการประมาณค่าตัวแปรของระบบ..... 69
4.1 องค์ประกอบก๊าซชีวภาพในงานวิจัย.....72
4.2 คุณสมบัติก๊าซชีวภาพภายหลังผ่านระบบทำความสะอาด.....74
4.3 แสดงรายละเอียดเครื่องวิเคราะห์ส่วนประกอบ
ก๊าซชีวภาพ Binder Combimass GA-m. 75
4.4 แสดงรายละเอียดของ Rapcon Board.....80
4.5 แสดงรายละเอียดของ Hi-Bridge Driver DC motor 80A.....81
4.6 แสดงค่าชุดควบคุมเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า..... 86
5.1 แสดงคุณสมบัติของก๊าซชีวภาพก่อน และหลังทำความสะอาด..... 89

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

2.1 จำนวนและการจัดวางกระบอกสูบ 11
2.2 ตำแหน่งของวาล์วของเครื่องยนต์สี่จังหวะ 12
2.3 การใช้ซูเปอร์ชาร์จเจอร์ (supercharher) เพื่อเพิ่มความดันของไอดีเข้าเครื่องยนต์ 13
2.4 การใช้เทอร์โบชาร์จเจอร์ (turbocharger) เพื่อเพิ่มความดันของไอดีเข้าเครื่องยนต์ 14
2.5 วัฏจักรการทำงานสี่จังหวะ 17
2.6 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิด 1 เฟส 18
2.7 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิด 3 เฟส 19
2.8 กังหันไอน้ำผลิตไฟฟ้า 21
2.9 กังหันน้ำผลิตไฟฟ้า 21
2.10 กังหันก๊าซผลิตไฟฟ้า 22
2.11 กังหันลมผลิตไฟฟ้า 23
2.12 ส่วนประกอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ 25
2.13 แกนเหล็กและร่องสำหรับพันขดลวดอาร์เมเจอร์ 25
2.14 โรเตอร์ชนิดขั้วแม่เหล็กยื่น 26
2.15 โรเตอร์ชนิดขั้วแม่เหล็กเรียบ 26
2.16 ขดลวดแดมเปอร์ 27
2.17 เอ็กไซเตอร์แบบไร้แปรงถ่าน 27
2.18 เอ็กไซเตอร์แบบไร้แปรงถ่านและมีไพล๊อตเอ็กไซเตอร์ 28
2.19 การเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากตัวนำหมุนตัดสนามแม่เหล็ก 28
2.20 การเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กหมุนตัดตัวนำ 29
2.21 การเกิดรูปคลื่นไซน์ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส 29
2.22 การเกิดรูปคลื่นไซน์ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ 2 เฟส 30
2.23 การเกิดรูปคลื่นไซน์ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส 30
2.24 เวกเตอร์ไดอะแกรมของแรงเคลื่อนไฟฟ้า 3 เฟส 30
2.25 ระบบควบคุมแบบวงเปิด 34

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

2.26 ระบบควบคุมแบบวงรอบปิด 34
2.27 ระบบควบคุมแบบปิดด้วยตัวควบคุมพีไอดี 35
2.28 ตัวควบคุมแบบสัดส่วน 36
2.29 เครื่องอัดอากาศแบบลูกสูบ 41
2.30 เครื่องอัดอากาศแบบ Sliding vane 43
2.31 ขั้นตอนการทำงานของเครื่องอัดก๊าซชีวภาพ Roots blower 45
2.32 เครื่องอัดอากาศแบบหมุนเหวี่ยง 46
2.33 รูปแบบของการซูเปอร์ชาร์จและการเทอร์โบชาร์จ 48
3.1 โครงสร้างระบบควบคุมเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า 53
3.2 โครงสร้างเครื่องยนต์เบนซิน 54
3.3 ภาพพื้นที่หน้าตัดของลิ้นปีกผีเสื้อที่ให้อากาศไหลผ่าน 55
3.4 แผนภาพวงจรอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 60
3.5 แรงบิดที่กระทำกับมอเตอร์ 62
3.6 แสดงหาค่าเบี่ยงเบนของวิธีกำลังสองน้อยที่สุด 65
3.7 แผนภาพแบบจำลองระบบควบคุมความเร็วรอบเครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพใน Simulink 66
3.8 ผลการทดสอบระบุเอกลักษณ์มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 68
3.9 ผลการทดสอบระบุเอกลักษณ์เครื่องอัดอากาศ Roots blower 68
3.10 ผลการทดสอบระบุเอกลักษณ์เครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า 69
4.1 การทำงานระบบผลิตกระแสไฟฟ้า 71
4.2 บ่อหมักก๊าซชีวภาพมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 72
4.3 ระบบทำความสะอาดก๊าซชีวภาพ 73
4.4 เหล็กฝอยในการดูดซับ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ 74
4.5 เครื่องวิเคราะห์ส่วนประกอบก๊าซชีวภาพ 75
4.6 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 76
4.7 เครื่องอัดอากาศ Roots blower 76

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.8 การประกอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงกับเครื่องอัดก๊าซชีวภาพ....77
4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากับอัตราการไหลก๊าซชีวภาพ... 78
4.10 PCI Serial card และบอร์ดควบคุม Rapcon.... 79
4.11 บอร์ด H-Bridge Driver DC Motor 80A.... 80
4.12 เซ็นเซอร์วัดความเร็วรอบ (Speed sensor).... 82
4.13 ตัวควบคุม PI ของระบบวงปิด....83
4.14 แผนภาพระบบควบคุมความเร็วรอบเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้าในระบบปิด โดยมีตัวควบคุมพีไอในโปรแกรม MATLAB/Simulink.... 85
4.15 แผนภาพแสดงการตอบสนองของแบบจำลองอ้างอิงที่ได้จากการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของตัวควบคุมพีไอ โดยใช้ Simulink Response Optimization.... 86
4.16 ความเร็วรอบเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าและความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้าที่ชุดควบคุที่ 1....87
4.17 ความเร็วรอบเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าและความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้าที่ชุดควบคุที่ 2....87
4.18 กราฟเปรียบเทียบความเร็วรอบเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้ากับความเร็วรอบมอเตอร์ที่ไม่มีภาระกรรมกับมีภาระกรรม....88
4.19 ภาพขยายเปรียบเทียบความเร็วรอบเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้ากับความเร็วรอบมอเตอร์ที่ไม่มีภาระกรรมกับมีภาระกรรม....88
ข.1 แบบจำลองมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.... 100
ข.2 แบบจำลองเครื่องอัดอากาศ.... 100
ข.3 แบบจำลองระบบเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้าก๊าซชีวภาพ.... 101
ข.4 ข้อมูลที่ Import เข้ามาไว้ใน Work space.... 102
ข.5 หน้าต่างของ Control and Estimation Tools Manager.... 103
ข.6 แสดงหน้าต่างการเลือก New Data....103
ข.7 แสดงการเลือกข้อมูลเข้าทำการ Estimation.... 104
ข.8 ภาพแสดงหน้าต่างเลือกตัวแปรที่ต้องการประมาณค่า....104
ข.9 แสดงการกำหนดขอบเขตตัวแปรด้าน Default setting....105
ข.10 แสดงการเลือกตัวแปรที่ต้องการประมาณค่า.... 105

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

ข.11 แสดงการกำหนดอัลกอริทึมในการประมาณค่าตัวแปร..... 106
ข.12 แผนภาพแสดงการตอบสนองการประมาณค่าเทียบกับข้อมูลการทดลอง..... 106
ข.13 แผนภาพแสดงค่าตัวแปรที่ประมาณได้.....107
ค.1 แผนภาพแบบจำลองระบบควบคุมเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า..... 109
ค.2 แผนภาพแสดง Signal Constrain windows.....109
ค.3 การกำหนดขอบเขตของสัญญาณที่ต้องการควบคุม.....110
ค.4 การเพิ่มค่า Parameter ที่ต้องการปรับแต่ง..... 110
ค.5 การกำหนดค่าเพื่อทำการ Optimization parameter..... 111
ค.6 การตอบสนองของสัญญาณที่ต้องการภายใต้ขอบเขตที่กำหนด..... 111
ค.7 แสดงค่าดำเนินการของโปรแกรมในการหาค่าพารามิเตอร์..... 112

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

C_d = สัมประสิทธิ์อัตราการไหล

R = ค่าคงที่ของแก๊สอุดมคติ (J/mol-K)

A_{th} = พื้นที่หน้าตัดของลิ้นปีกผีเสื้อที่ให้อากาศไหลผ่าน (m^2)

P_{amb} = ความดันในสภาวะนิ่ง (N/m^2)

T_{amb} = อุณหภูมิในสภาวะนิ่ง (K)

P_{man} = ความดันที่คอคอด (N/m^2)

γ = อัตราส่วนของความร้อนจำเพาะ $\left[\gamma = C_p / C_v\right]$

D = เส้นผ่านศูนย์กลางของลิ้นปีกผีเสื้อ (m)

θ = องศาของลิ้นปีกผีเสื้อที่เปลี่ยนไป (degree)

θ_0 = องศาของลิ้นปีกผีเสื้อเริ่มต้น (degree)

m_{man} = มวลของอากาศในท่อไอดี (kg)

$\dot{m}_{ai}$ = อัตราการไหลของมวลอากาศเข้าท่อร่วมไอดี (kg/s)

$\dot{m}_{ao}$ = อัตราการไหลของมวลอากาศที่เข้าไปในแต่ละกระบอกสูบ (kg/s)

P_{man} = ความดันในท่อร่วม (N/m^2)

T_{man} = อุณหภูมิในท่อร่วม (K)

V_{man} = ปริมาตรของท่อร่วมไอดี (m^3)

$\dot{m}_f$ = อัตราการไหลของมวลเชื้อเพลิง (Kg/s)

$\dot{m}_{ao}$ = อัตราการไหลของมวลอากาศขาออก (Kg/s)

λ = The air/fuel equivalence

L_{th} = The stoichiometric air/fuel

V_d = ปริมาตรกระบอกสูบ

V_s = swept volume

N = engine speed (rpm)

n = จำนวน cylinder

η_v = ประสิทธิภาพเชิงปริมาตร.

T_l = แรงบิดภาระกรรมภายนอก (N-m)

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

b = ความหน่วงของระบบการหมุนของเครื่องยนต์ (N-m-sec/rad)

$\dot{\omega}$ = ความเร่งเชิงมุมของเครื่องยนต์ (rad/sec^2)

I_e = ความเฉื่อยในการหมุนของเครื่องยนต์ (kg-m^2)

T_e = ค่าแรงบิดที่มีประสิทธิผล (N-m)

V_a = ความต่างศักดิ์ของอาร์เมเจอร์ (V)

k_b = ค่าคงที่ของ electromotive force (V-sec/rad)

R_a = ความต้านทานของอาร์เมเจอร์ (Ω)

L_a = ความเหนี่ยวนำของอาร์เมเจอร์ (H)

ω_a = ความเร็วรอบของแกนอาร์เมเจอร์ (rad/sec)

T_{em} = แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์

T_f = แรงบิดที่เกิดจากแรงเสียดทาน

T_j = แรงบิดที่เกิดจากความเฉื่อยของโหลด

T_L = แรงบิดของภาระทางกล

k_t = ค่าคงที่ของแรงบิด (N-m/A)

J = โมเมนต์ความเฉื่อย (kg.m^2)

c = ความหน่วงของระบบการหมุนของมอเตอร์ (N-m-sec/rad)

$\dot{m}_{corr}$ = อัตราการไหลของอากาศ (kg/s)

ρ_i = ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)

η_v = ประสิทธิภาพเชิงปริมาตร

N = ความเร็วรอบของเครื่องอัดอากาศ (rad/sec)

R = รัศมีของตัวกลีบใบพัด (mm)

l = ความยาวของใบพัด (mm)

$u(t)$ = สัญญาณควบคุมออกจาก PI

$e(t)$ = ค่าความคลาดเคลื่อนของสัญญาณ

K_P = อัตราส่วนขยายสัดส่วน

K_i = อัตราส่วนขยายปริพันธ์

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันนี้ประเทศต่าง ๆ รวมถึงประเทศไทยกำลังประสบปัญหาการใช้พลังงานสืบเนื่องมาจากมีความต้องการใช้พลังงานที่มากขึ้น โดยที่การใช้พลังงานของเราทุกวันนี้ กำลังเปลี่ยนจากการใช้พลังงานสิ้นเปลืองเป็นการใช้พลังงานหมุนเวียนที่ต้องอาศัยเทคโนโลยีในการผลิตมากยิ่งขึ้น เช่นจากเดิมเราใช้น้ำมันปิโตรเลียมเป็นแหล่งพลังงานหลักก็เปลี่ยนมาเป็นการใช้พลังงานทดแทนจากแสงอาทิตย์ ลม ชีวมวล หรือ พลังงานจากก๊าซชีวภาพ ซึ่งต้องอาศัยเทคโนโลยีในการเปลี่ยนรูปพลังงานเหล่านี้ ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าเพื่อสามารถนำไปใช้งานต่อไปได้ โดยที่พลังงานจากก๊าซชีวภาพเป็นแหล่งพลังงานแบบหมุนเวียนอีกแหล่งหนึ่งที่สามารถนำมาเป็นแหล่งพลังงานทดแทนได้ เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศที่มีการเลี้ยงสุกรเพื่อการเกษตรกรรมและอุตสาหกรรมเป็นจำนวนมาก และฟาร์มสุกรก็มักจะประสบปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อม เนื่องจากก่อให้เกิดมลภาวะทางน้ำ โดยมีสาเหตุมาจาก น้ำเสียจากการล้างคอก น้ำล้างตัวสุกร น้ำปัสสาวะ มูลสุกร และของเสียจากวิธีการเลี้ยง สิ่งต่าง ๆ เหล่านี้นำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตก๊าซชีวภาพ และในอีกด้านหนึ่งเพื่อเป็นการลดมลภาวะทางด้านสิ่งแวดล้อม เนื่องจากก๊าซชีวภาพมีส่วนประกอบหลักคือมีเทนซึ่งเป็นก๊าซเรือนกระจกที่มีศักยภาพในการทำให้โลกร้อนรุนแรงกว่า CO_2 จำนวน 23 เท่า (ที่มา : IPCC, 2001 อ้างอิงจากคู่มือการดำเนินโครงการกลไกที่สะอาด, กรมโรงงานอุตสาหกรรม) ดังนั้นการนำก๊าซชีวภาพมาใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตงานกลในการขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อนำกระแสไฟฟ้าไปใช้เพื่อการส่องสว่าง หรือนำไปให้ความอบอุ่นกับสัตว์เลี้ยงในฟาร์ม อีกทั้งสามารถนำก๊าซชีวภาพมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนก๊าซหุงต้ม (LPG) ทดแทนการใช้น้ำมันเตาสำหรับกระบวนการผลิตอาหาร และสามารถทดแทนการใช้พลังงานในรูปแบบอื่นได้

ดังนั้นก๊าซชีวภาพจึงถือเป็นตัวเลือกทางด้านพลังงานทดแทนที่มีศักยภาพสูง ภายใต้กรอบนโยบายการพัฒนาเทคโนโลยีชีวภาพของประเทศไทย พ.ศ. 2547-2552 ซึ่งได้กำหนดให้ “การใช้เทคโนโลยีชีวภาพเพื่อผลิตพลังงานสะอาดและรักษาสิ่งแวดล้อม” ให้เป็นหนึ่งในเป้าหมายสำคัญระดับชาติ โดยมุ่งเน้นการใช้พลังงานชีวภาพในการเพิ่มความมั่นคงทางด้านพลังงานและปรับปรุงสิ่งแวดล้อม (กุลวรางค์, 2550)

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. ออกแบบระบบควบคุมอัตราการไหลก๊าซชีวภาพให้เหมาะสมกับเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า
2. ออกแบบระบบควบคุมเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้าขนาด 5 กิโลวัตต์

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1. ใช้เครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าขนาด 5 กิโลวัตต์ ยี่ห้อควายทอง EP 6500 ES ใช้เครื่องยนต์ 4 จังหวะ 1 สูบเป็นต้นกำลังผลิตแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ 220 โวลต์
2. ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 240 โวลต์ 500 วัตต์ ความเร็วรอบ 2500 รอบ/นาที
3. ใช้เครื่องอัดอากาศแบบ AMR500 เป็นเครื่องอัดอากาศชนิด Roots blower

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาระบบและวิธีการควบคุมอัตราการไหลก๊าซชีวภาพ
2. สร้างระบบควบคุมอัตราการไหลก๊าซชีวภาพ
3. ปรับแต่งเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า ขนาด 5 กิโลวัตต์ ให้น้อยที่สุดเพื่อใช้ก๊าซชีวภาพ
4. ออกแบบระบบควบคุมเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าในการใช้ก๊าซชีวภาพ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำทฤษฎีมาปฏิบัติใช้ในการควบคุมให้สามารถใช้งานได้จริง
2. สามารถควบคุมความเร็วรอบเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าให้คงที่ได้เมื่อเพิ่มภาระกรรม
3. ลดการนำเข้าเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าจากก๊าซชีวภาพ

1.6 การจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

บทที่ 1 เป็นบทนำซึ่งจะกล่าวถึงความสำคัญของปัญหาวัตถุประสงค์และเป้าหมายของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ตลอดจนขอบเขต และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงข้อมูลทั่วไปของก๊าซชีวภาพและลักษณะของเครื่องยนต์ประเภทของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทฤษฎีและหลักการทำงานของระบบควบคุมประเภทและหลักการทำงานของเครื่องอัดอากาศ

บทที่ 3 กล่าวถึงการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องยนต์เบนซิน เครื่องอัดอากาศ และแบบจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และทำการหาค่าประมาณพารามิเตอร์ของระบบด้วยวิธี Parameter estimation

บทที่ 4 การทำงานของระบบทำความสะอาดก๊าซชีวภาพการทำงานของระบบควบคุมอัตราการไหลก๊าซชีวภาพ และการทำงานของระบบควบคุมความเร็วรอบเครื่องยนต์พร้อมทั้งสรุป

บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2
ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปัจจุบันฟาร์มสุกรมีการนำก๊าซชีวภาพ (Biogas) มาใช้เป็นพลังงานทดแทนเพื่อใช้กับเครื่องยนต์สันดาปภายในเพื่อผลิตงานทางกลและนำงานทางกลไปขับเคลื่อนเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าใช้ในฟาร์มสุกร และช่วยลดปัญหามลภาวะสิ่งแวดล้อม และยังช่วยปรับปรุงสภาพแวดล้อมให้ดีขึ้น โดยมีการนำไปใช้ทดแทนน้ำมันเบนซินเพื่อใช้กับเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟ (SI Engine) หรือใช้ทดแทนน้ำมันดีเซลเพื่อใช้กับเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด (CI Engine)

2.1 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับก๊าซชีวภาพ (Biogas)

ก๊าซชีวภาพ (Biogas) คือ ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วยวิธีทางชีววิทยา (Biological Treatment) ในสภาวะที่ไร้อากาศ (Anaerobic digestion) ก๊าซชีวภาพมีก๊าซมีเทน (CH_4) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นองค์ประกอบหลักส่วนก๊าซอื่นๆ เช่น ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ก๊าซแอมโมเนีย และก๊าซไฮโดรเจน จะมีปริมาณเล็กน้อย เนื่องจากก๊าซมีเทนเป็นก๊าซที่ให้ค่าพลังงานความร้อนสูง โดยสามารถให้พลังงานความร้อนได้สูงถึงประมาณ 9000 กิโลแคลอรี/ลบ.ม. และโดยปกติก๊าซชีวภาพจะมีก๊าซมีเทนอยู่มากกว่า 60% จึงสามารถนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์ในรูปของพลังงานได้ เช่นเผาเพื่อใช้ประโยชน์จากความร้อนโดยตรง ใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับขับเคลื่อนปั๊มน้ำหรือเครื่องยนต์ หรือ เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า เป็นต้น

2.1.1 ประวัติความเป็นมาของก๊าซชีวภาพในประเทศไทย

โครงการส่งเสริมการผลิตก๊าซชีวภาพในฟาร์มเลี้ยงสัตว์ในประเทศไทยได้เริ่มขึ้นในเดือนกันยายน พ.ศ. 2531 ภายใต้ความรับผิดชอบของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ร่วมกับกรมส่งเสริมการเกษตรกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ โดยองค์การ GTZ (Gesellschaft fur Technische Zusammenarbeit) จากประเทศเยอรมัน ได้ให้การสนับสนุนโครงการก๊าซชีวภาพไทย-เยอรมัน ตั้งแต่เดือนกันยายน 2531 - ธันวาคม 2537 เพื่อศึกษาปัญหาการใช้ระบบก๊าซชีวภาพพร้อมทั้งปรับปรุงและพัฒนาเทคโนโลยีก๊าซชีวภาพให้มีความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้กับฟาร์มเลี้ยงสัตว์ในประเทศไทย

ในปี พ.ศ. 2534 ได้มีการจัดตั้งหน่วยบริการก๊าซชีวภาพ สังกัดสถาบันวิจัยและพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เพื่อดำเนินการส่งเสริมเทคโนโลยีก๊าซชีวภาพต่อเนื่องจากโครงการก๊าซชีวภาพไทย - เยอรมัน รวมทั้งเพื่อดำเนินการศึกษาวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีให้สามารถประยุกต์ใช้ในฟาร์ม เลี้ยงสัตว์ได้อย่างกว้างขวางมากยิ่งขึ้น และในปลายปี พ.ศ. 2538 กองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ หรือ สพช. (ปัจจุบัน คือ สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน หรือ สนพ. กระทรวงพลังงาน) ได้ให้การสนับสนุนแก่หน่วยบริการก๊าซชีวภาพ ดำเนินงาน "โครงการส่งเสริมการผลิตก๊าซชีวภาพในฟาร์มเลี้ยงสัตว์ ระยะที่ 1" จนกระทั่งในปี พ.ศ. 2551 หน่วยบริการก๊าซชีวภาพได้รับการจัดตั้งเป็น "สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงาน มหาวิทยาลัยเชียงใหม่" และต่อมาในปี พ.ศ. 2553 สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารีได้พระราชทานชื่อหน่วยงานใหม่ เป็น " สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่" ซึ่งได้ดำเนินโครงการส่งเสริมการผลิตก๊าซชีวภาพต่อเนื่องมาจวบจนปัจจุบัน

2.1.2 องค์ประกอบและคุณสมบัติของก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพประกอบด้วยก๊าซมีเทน(CH_4) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นส่วนใหญ่และมีก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ไฮโดรเจน (H_2) ไนโตรเจน (N_2) เจือปนอยู่บ้างเป็นส่วนน้อย ซึ่งก๊าซที่เกิดจากการหมักนี้มีองค์ประกอบที่แตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่ใช้ในการหมักและสภาวะของกระบวนการหมัก แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบและคุณสมบัติของก๊าซชีวภาพ

ส่วนประกอบ	สุกร (%)	วัว (%)	ช้าง (%)	ไก่ (%)
มีเทน (CH_4)	55 - 65	54-61	51.8-72.2	50-70
คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)	30 - 40	24.7-27.3	10.3-20.3	15-25
ก๊าซออกซิเจน (O_2)	1 - 5	8.5-15.3	17.5-27.9	5-10
ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S)	>1000 ppm	>1000 ppm	51-67 ppm	>1000 ppm

ก๊าซชีวภาพเป็นแหล่งพลังงานที่สามารถผลิตขึ้นเองและเป็นเชื้อเพลิงที่มีศักยภาพที่สามารถทดแทนการใช้พลังงานในด้านอื่น ๆ เช่นทดแทนการใช้ก๊าซหุงต้มในครัวเรือน (LPG) หม้อต้มไอน้ำ หรือในรูปแบบแสงสว่างกับตะเกียง รวมถึงใช้กับเครื่องยนต์สันดาปภายในเพื่อสูบน้ำ หรือผลิตกระแสไฟฟ้าเพื่อนำไปใช้กับอุปกรณ์ต่าง ๆ

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของก๊าซชีวภาพเปรียบเทียบกับก๊าซธรรมชาติและก๊าซหุงต้ม
(สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ 2544, 18)

พารามิเตอร์	หน่วย	ก๊าซธรรมชาติ	ก๊าซหุงต้ม	ก๊าซชีวภาพ*
Calorific value (lower)	MJ/m^3	27.072	14.652	21.456
Density	Kg/m^3	0.384	0.411	0.940
Max ignition velocity	m/s	0.39	0.7	0.25
Theory air required	M^3 air/m^3 gas	9.53	3.83	5.71
Max CO in stack gas	% volume	11.9	13.1	17.8
Dew point	C	59	60	60-160

จากตารางที่ 2.2 พบว่าก๊าซชีวภาพมีค่าความหนาแน่นที่ 0.940 (kg/m^3) ที่สถานะปกติ (มีเทน 60 %) โดยค่าความหนาแน่นของก๊าซชีวภาพจะขึ้นอยู่กับความดันและอุณหภูมิ และพบว่ามีค่าความร้อนที่ 21.456 (MJ/m^3) ที่สถานะปกติ โดยค่าความร้อนของก๊าซชีวภาพจะขึ้นอยู่กับปริมาณมีเทนและความหนาแน่นของก๊าซ การลุกไหม้ของก๊าซชีวภาพลุกไหม้ที่อุณหภูมิ 595 $^{\circ}C$ เมื่อปริมาตรของก๊าซชีวภาพผสมในอากาศ โดยเฉลี่ย 15 % ที่สถานะปกติ และพบว่ามีค่าความร้อนที่ใกล้เคียงกับก๊าซธรรมชาติ แต่มีความหนาแน่นมากกว่า ดังนั้นถ้าเราสามารถเพิ่มความหนาแน่นให้ก๊าซชีวภาพเพื่อให้ก๊าซชีวภาพมีค่าความร้อนสูงขึ้นจะสามารถนำไปใช้ทดแทนก๊าซธรรมชาติได้ จากการศึกษาค้นคว้าการเพิ่มความหนาแน่นก๊าซชีวภาพ มีการพัฒนาการมาอย่างต่อเนื่อง ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้เห็นถึงความสำคัญ จึงทำการศึกษาการนำเอาก๊าซชีวภาพมาเพิ่มความหนาแน่นเพื่อเป็นเชื้อเพลิง ในการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยการนำเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้ายี่ห้อควายทอง รุ่น EP 6500 ES เพื่อใช้เป็นเครื่องต้นกำลังในการผลิตกระแสไฟฟ้า และควบคุมปริมาณก๊าซชีวภาพ โดยการควบคุมความเร็วรอบของเครื่องอัดอากาศ เพื่ออัดก๊าซชีวภาพให้มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเพียงพอสำหรับเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า

2.1.3 การนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์

การทำระบบก๊าซชีวภาพก่อให้เกิดประโยชน์ทั้งในด้านอนุรักษ์พลังงาน การอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม และการเกษตร นอกจากนี้ยังให้ผลตอบแทนในรูปแบบต่าง ๆ อีกมากมาย เนื่องจากคุณสมบัติของก๊าซชีวภาพดังแสดงในตารางที่ 2.2 และตารางที่ 2.3 พบว่าค่าความร้อนของก๊าซชีวภาพมีค่าเท่ากับ 21.456 (MJ/m^3) สามารถทดแทนน้ำมันเตาได้ 0.55 ลูกบาศก์เมตรต่อก๊าซชีวภาพ 1 ลูกบาศก์เมตร

ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบการใช้ก๊าซชีวภาพทดแทนพลังงานด้านอื่น ๆ

คิดต่อก๊าซชีวภาพ 1 ลูกบาศก์เมตร ที่มีองค์ประกอบมีเทน 60%

(สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ 2544, 18)

ชนิดของพลังงานทดแทน	อัตราทดแทน	หน่วย
ก๊าซหุงต้ม (LPG)	0.46	กิโลกรัม
น้ำมันเบนซิน	0.67	ลิตร
น้ำมันดีเซล	0.60	ลิตร
น้ำมันเตา	0.55	ลิตร
ฟืนไม้	1.50	กิโลกรัม
ไฟฟ้า (ค่าเฉลี่ย)	1.20	กิโลวัตต์ - ชั่วโมง

2.2 เครื่องยนต์

เครื่องยนต์เป็นส่วนประกอบที่สำคัญที่ทำให้รถยนต์มีความแตกต่างไปจากรถที่ใช้แรงฉุดลาก หรือการขับเคลื่อนจากแรงภายนอกเครื่องยนต์จะเป็นตัวสร้างพลังงานที่ใช้ขับเคลื่อนตัวรถให้เคลื่อนที่ไปด้วยตัวเองในยุคแรก ๆ ของการพัฒนารถยนต์ได้มีการคิดค้นหาแหล่งพลังงานที่จะทำให้รถเคลื่อนที่ได้เองอย่างหลากหลายชนิดไม่ว่าจะเป็นแรงลม, พลังไอน้ำ, พลังงานไฟฟ้าแต่ท้ายที่สุดเมื่อเห็นว่าการนำเอาเครื่องยนต์แบบสันดาปภายในมาใช้ในการขับเคลื่อนเป็นวิธีที่มีปัญหาน้อยที่สุดลักษณะของเครื่องยนต์เผาไหม้ (Combustion Engine) จะมี 2 แบบ

2.2.1 เครื่องยนต์เผาไหม้ภายนอก

เครื่องยนต์เผาไหม้ภายนอกหรือสันดาษภายนอกโดยหลักการแล้วจะต้องเป็นการเผาไหม้จากภายนอกเครื่องยนต์แล้วจึงเอาความร้อนจากการเผาไหม้ที่ได้นั้นไปใช้งานยกตัวอย่างเช่นเครื่องจักรไอน้ำที่ใช้ในการขับเคลื่อนหัวจักรรถไฟในอดีตที่อาศัยการต้มน้ำให้ร้อนด้วยเตาที่มีเชื้อเพลิงเป็นฟืนแล้วจึงนำเอาไอน้ำไปขับดันเครื่องจักรไอน้ำต่อไปเมื่อเครื่องจักรไอน้ำทำงานจึงสามารถขับดันให้ล้อของหัวรถจักรหมุนได้ และขับเคลื่อนตัวรถไปในที่สุดแต่ด้วยประสิทธิภาพที่ต่ำมากเพราะต้องสูญเสียพลังงานหลายขั้นตอนกว่าจะถึงล้อรถความนิยมเครื่องจักรไอน้ำจึงลดน้อยลง

2.2.2 เครื่องยนต์เผาไหม้ภายใน

เครื่องยนต์เผาไหม้ภายในเป็นเครื่องยนต์ที่มีการระเบิดหรือการเผาไหม้ส่วนผสมของเชื้อเพลิงกับอากาศเกิดขึ้นภายในเครื่องยนต์ แรงระเบิดจากการเผาไหม้จะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานเพื่อใช้ขับเคลื่อนตัวรถ เมื่ออากาศกับเชื้อเพลิงป้อนเข้าสู่เครื่องยนต์และให้มีการจุดระเบิดเกิดขึ้นของส่วนผสมทั้งสองชนิดภายในกระบอกสูบเครื่องยนต์ก็จะทำงานและเกิดการหมุนที่เพลาข้อเหวี่ยงของเครื่องยนต์แล้วนำพลังการหมุนของเครื่องยนต์นี้ไปใช้ในการขับเคลื่อนรถยนต์ต่อไป

เครื่องยนต์ทั้งสองกลุ่มนี้ถูกใช้เป็นต้นกำลังสำหรับขับเคลื่อนอุปกรณ์และยานพาหนะประเภทต่าง ๆ ซึ่งได้แก่ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เครื่องสูบน้ำ รถยนต์ เรือ และเครื่องบิน เครื่องยนต์เผาไหม้ภายนอกที่ยังใช้กันอยู่ในปัจจุบันก็คือกังหันไอน้ำที่ใช้ในโรงจักรไฟฟ้าซึ่งโดยทั่วไปจะมีขนาดใหญ่ ส่วนเครื่องยนต์เผาไหม้ภายในยังคงใช้กันอยู่เกือบทุกประเภท แต่ที่นิยมใช้กันมากที่สุดก็คือเครื่องยนต์แบบลูกสูบซึ่งส่วนใหญ่ใช้กับรถยนต์

เครื่องยนต์เผาไหม้ภายนอกในรูปของเครื่องจักรไอน้ำได้ถูกพัฒนาขึ้นมาใช้งานก่อนเครื่องยนต์เผาไหม้ภายใน แม้ว่าเครื่องยนต์เผาไหม้ภายในจะถูกสร้างขึ้นเมื่อ ค.ศ. 1700 ในรูปของเครื่องยนต์ที่ใช้การระเบิดของดินปืนก็ตาม แต่เครื่องยนต์เผาไหม้ภายในที่ถูกผลิตออกมาสำหรับการใช้งานจริงนั้นได้เกิดขึ้นประมาณปี ค.ศ. 1860 โดยการคิดค้นของ ชอง เลอนัวร์ (Jean Lenoir) ซึ่งเป็นเครื่องยนต์ที่ใช้การเผาไหม้ของแก๊สถ่านหิน (coal gas) กับอากาศที่ความดันบรรยากาศโดยไม่มีการอัดแก๊สและอากาศถูกนำเข้าไปในกระบอกสูบในระหว่างครึ่งแรกของระยะชักของลูกสูบแล้วถูกจุดระเบิดด้วยประกายไฟ ความดันจะเพิ่มขึ้นและแก๊สที่เผาไหม้แล้วก็จะถ่ายทอดกำลังให้แก่ลูกสูบในช่วงครึ่งหลังของระยะชักของลูกสูบ หลังจากนั้นก็จะเป็นจังหวะการไล่ไอเสียออก ซึ่งก็จะครบวัฏจักรการทำงาน

ในระหว่างปี ค.ศ. 1860 ถึง 1865 เครื่องยนต์แบบนี้ถูกผลิตออกมาประมาณ 5000 เครื่อง มีขนาดสูงสุด 6 แรงม้าและมีประสิทธิภาพดีที่สุดประมาณร้อยละ 5 หลังจากนั้นในปี ค.ศ. 1867 นิโคเลาส์ ออตโต (Nikolaus Otto) และออยเกน ลังเกน (Eugen Langen) ได้พัฒนาเครื่องยนต์เผาไหม้ที่ความดันบรรยากาศ (atmospheric engine) หรือเครื่องยนต์แบบลูกสูบอิสระ (free-piston engine) ขึ้นมาโดยใช้เครื่องยนต์ที่มีกระบอกสูบในแนวดิ่งยาว เครื่องยนต์นี้จะมีประสิทธิภาพประมาณร้อยละ 11 และถูกผลิตออกมาประมาณ 10,000 เครื่องในช่วงเวลา 5 ปีถัดมาเพื่อแก้ปัญหาของเครื่องยนต์เผาไหม้ที่ความดันบรรยากาศซึ่งมีประสิทธิภาพ ต่ำและน้ำหนักมาก ออตโต้ได้เสนอวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์เป็นวัฏจักรสี่จังหวะ ประกอบด้วยจังหวะดูดจังหวะอัดก่อนการจุดระเบิด จากนั้นตามด้วยจังหวะขยายตัวหรือจังหวะกำลังซึ่งเป็นจังหวะที่งาน

ถูกถ่ายทอดไปยังเพลาข้อเหวี่ยง และสุดท้ายเป็นจังหวะคายหรือจังหวะไล่ไอเสียออก เครื่องยนต์ต้นแบบตามหลักการดังกล่าวได้ถูกผลิตออกมาในปี ค.ศ. 1876

หลังจากออตโตได้ผลิตเครื่องยนต์ต้นแบบที่มีการทำงานตามวัฏจักรสี่จังหวะได้ไม่นาน ในปี ค.ศ. 1880 ดูกาลด์ เคลิร์ก (Dugald Clerk), เจมส์ รอบสัน (James Robson), คาร์ล เบนซ์ (Karl Benz) และผู้คิดค้นอื่นๆ ก็ได้ประสบความสำเร็จในการพัฒนาเครื่องยนต์เผาไหม้ภายในสองจังหวะซึ่งกระบวนการนำไอดีเข้าและนำไอเสียออกเกิดขึ้นในระหว่างปลายจังหวะกำลังและต้นจังหวะอัด ในปี ค.ศ. 1892 รูดอล์ฟ ดีเซล (Rudolf Diesel) ได้เสนอรูปแบบของเครื่องยนต์เผาไหม้ภายในรูปแบบใหม่ในเอกสารสิทธิบัตร โดยมีหลักการคือให้มีการเริ่มต้นการเผาไหม้โดยการฉีดเชื้อเพลิงเข้าไปในอากาศร้อนที่ถูกอัดเพียงประการเดียว ทำให้ประสิทธิภาพสูงกว่าเครื่องยนต์เผาไหม้ภายในแบบอื่น เนื่องจากอัตราการขยายตัวมากขึ้นโดยไม่มีการน็อก แต่กว่าที่เครื่องยนต์ดังกล่าวจะถูกผลิตออกมาใช้งานก็เป็นเวลาอีก 5 ปีต่อมา

หลังจากนั้นก็มีการพัฒนาเครื่องยนต์เผาไหม้ภายในอย่างต่อเนื่องแต่หลักการทำงานไม่ได้เปลี่ยนแปลงไปจากหลักการเดิม กล่าวคือเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟสี่จังหวะใช้หลักการของออตโต้เครื่องยนต์สองจังหวะใช้หลักการของ รอบสัน และเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดใช้หลักการของ ดีเซล แต่อย่างไรก็ตาม เครื่องยนต์เหล่านี้เป็นเครื่องยนต์ลูกสูบทั้งหมด สำหรับเครื่องยนต์โรทารีแบบที่ไม่ใช้ลูกสูบนั้นได้มีการพัฒนาและทดสอบจนประสบความสำเร็จในปี ค.ศ.1957 เครื่องยนต์โรทารีนี้เป็นเครื่องยนต์ที่ได้รับการออกแบบโดยเฟลิกซ์ แวงเกล (Felix Wankel)

2.3 การจำแนกชนิดของเครื่องยนต์

เครื่องยนต์เผาไหม้ภายในมีหลายแบบและหลายชนิดซึ่งสามารถจำแนกได้หลายลักษณะ

2.3.1 การนำไปใช้งาน จำแนกเป็นเครื่องยนต์สำหรับ

- รถยนต์ รถบรรทุก รถโดยสาร
- รถไฟ
- เรือ
- เครื่องบิน
- เครื่องจักรที่อยู่กับที่ อาทิ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เครื่องสูบน้ำ ฯลฯ
- เครื่องจักรขนาดเล็กที่หิ้วไปมาได้ง่าย อาทิ เครื่องตัดหญ้า เลื่อย เครื่องพ่นยา

2.3.2 การออกแบบพื้นฐาน จำแนกเป็นเครื่องยนต์ที่มี

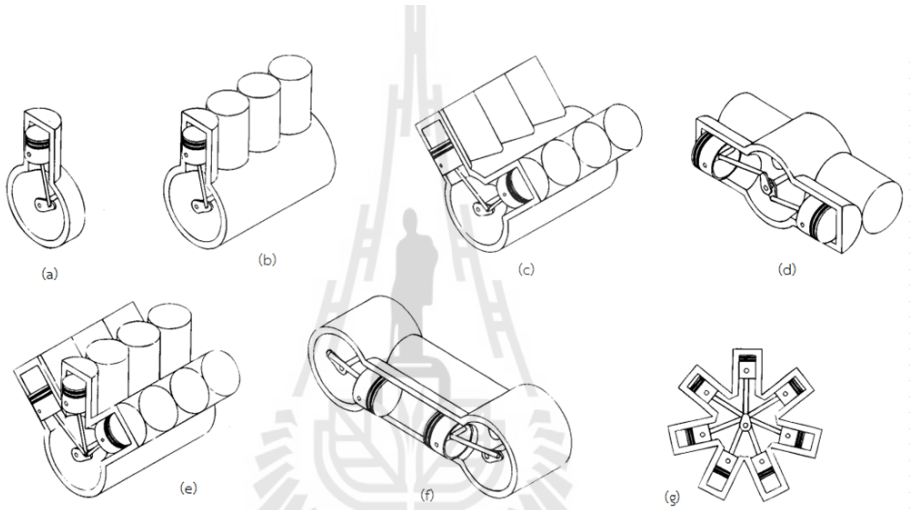
- การเคลื่อนที่กลับไปกลับมา (reciprocating) เครื่องยนต์มีกระบอกสูบเดียวหรือมากกว่าซึ่งภายในจะมีลูกสูบเคลื่อนที่กลับไปกลับมา โดยมีห้องเผาไหม้อยู่ที่ปลายปิดของกระบอกแต่ละกระบอกและกำลังถูกส่งไปยังเพลาข้อเหวี่ยงที่หมุนโดยก้านสูบที่ติดเข้ากับลูกสูบ
- การหมุน (rotary) เครื่องยนต์ประกอบด้วยเสื้อหรือสเตเตอร์ (stator) ซึ่งห่อหุ้มโรเตอร์เยื้องศูนย์และเพลาเยื้องศูนย์

2.3.3 ตำแหน่งและจำนวนของลูกสูบของเครื่องยนต์แบบเคลื่อนที่กลับไปกลับมา แสดงได้ดังรูปที่ 2.1

- เครื่องยนต์กระบอกสูบเดียว (single-cylinder engine) เครื่องยนต์มีกระบอกสูบและลูกสูบชุดเดียวต่อเข้ากับเพลาข้อเหวี่ยง
- เครื่องยนต์กระบอกสูบเรียง (in-line engine) เครื่องยนต์มีกระบอกสูบและลูกสูบหลายชุด กระบอกสูบถูกวางให้อยู่ในตำแหน่งเส้นตรงโดยกระบอกสูบหนึ่งจะอยู่ด้านหลังกระบอกสูบอีกกระบอกหนึ่งตามความยาวของเพลาข้อเหวี่ยง ซึ่งจำนวนสูบอาจมีได้ตั้งแต่ 2 ถึง 11 สูบหรือมากกว่านั้น ที่นิยมใช้กันมากก็คือเครื่องยนต์กระบอกสูบเรียงแบบ 4 สูบ และ 6 สูบ
- เครื่องยนต์กระบอกสูบตัว V (V-engine) เครื่องยนต์มีกระบอกสูบและลูกสูบหลายชุดกระบอกสูบแบ่งเป็นสองแถวทำมุมซึ่งกันและกันอยู่บนเพลาข้อเหวี่ยงเพลาเดียว มุมระหว่างแถวของกระบอกสูบมีค่าได้ตั้งแต่ 15° ถึง 120° แต่ที่ใช้กันมากก็คือ 60° และ 90° เครื่องยนต์กระบอกสูบตัว V มีจำนวนกระบอกสูบเป็นเลขคู่ตั้งแต่ 2 ถึง 20 สูบหรือมากกว่านั้น ที่นิยมใช้กันมากก็คือเครื่องยนต์ V6 (มี 6 สูบ) และ V8 (มี 8 สูบ)
- เครื่องยนต์กระบอกสูบตรงกันข้าม (opposed cylinder engine) เครื่องยนต์มีกระบอกสูบและลูกสูบหลายชุด กระบอกสูบแบ่งเป็นสองแถวตรงข้ามกันอยู่บนเพลาข้อเหวี่ยงเพลาเดียว (เครื่องยนต์กระบอกสูบตัว V ที่มีมุม 180°) เครื่องยนต์กระบอกสูบตรงกันข้ามมีจำนวนกระบอกสูบเป็นเลขคู่เข่นกันตั้งแต่ 2 ถึง 8 สูบหรือมากกว่านั้น
- เครื่องยนต์กระบอกสูบตัว W (W-engine) เครื่องยนต์มีกระบอกสูบและลูกสูบหลายชุดกระบอกสูบถูกจัดวางเหมือนเครื่องยนต์กระบอกสูบตัว V แต่แบ่งเป็นสามแถวอยู่บนเพลาข้อเหวี่ยงเพลาเดียว การจัดวางกระบอกสูบแบบนี้ไม่นิยมใช้กันแต่ก็มีการพัฒนาเครื่องยนต์แบบนี้สำหรับรถแข่งกันอยู่บ้าง โดยส่วนใหญ่จะเป็นเครื่องยนต์ 12 สูบ แต่ละแถวทำมุมกันประมาณ 60°
- เครื่องยนต์ลูกสูบตรงกันข้าม (opposed piston engine) เครื่องยนต์มีลูกสูบสองลูกอยู่ในกระบอกสูบแต่ละกระบอกโดยมีห้องเผาไหม้อยู่ตรงกลางระหว่างกระบอกสูบทั้งสองเป็นผลให้กระบวนการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นแต่ละครั้งได้จังหวะกำลังสองจังหวะในเวลาเดียวกันโดย

ลูกสูบแต่ละลูกถูกดันออกจากกึ่งกลางและให้กำลังแก่เพลาข้อเหวี่ยงที่แยกกันซึ่งอยู่ที่ปลายแต่ละด้านของกระบอกสูบ

- เครื่องยนต์กระบอกสูบในแนวรัศมี (radial engine) เครื่องยนต์มีกระบอกสูบและลูกสูบหลายชุดโดยชุดกระบอกสูบและลูกสูบถูกจัดวางในระนาบวงกลมรอบเพลาข้อเหวี่ยงที่อยู่ตรงกลาง ก้านสูบของลูกสูบถูกต่อเข้ากับก้านหลักซึ่งถูกต่อเข้ากับเพลาข้อเหวี่ยง จำนวนสูบของเครื่องยนต์แบบนี้จะเป็นเลขคี่เสมอและจะมีตั้งแต่ 3 ถึง 13 สูบหรือมากกว่านั้น นอกจากนี้ยังสามารถใช้ลูกสูบได้หลายแถวบนเพลาข้อเหวี่ยงเพลาเดียว เช่น เครื่องยนต์ 54 สูบใช้ 6 แถว แถวละ 9 สูบเป็นต้น



รูปที่ 2.1 จำนวนและการจัดวางกระบอกสูบ (ที่มา Willard W. Pulkrabek , 2004)

(a) เครื่องยนต์กระบอกสูบเดียว (b) เครื่องยนต์กระบอกสูบเรียง

(c) เครื่องยนต์กระบอกสูบตัว V (d) เครื่องยนต์กระบอกสูบตรงกันข้าม

(e) เครื่องยนต์กระบอกสูบตัว W (f) เครื่องยนต์ลูกสูบตรงกันข้าม

(g) เครื่องยนต์กระบอกสูบในแนวรัศมี

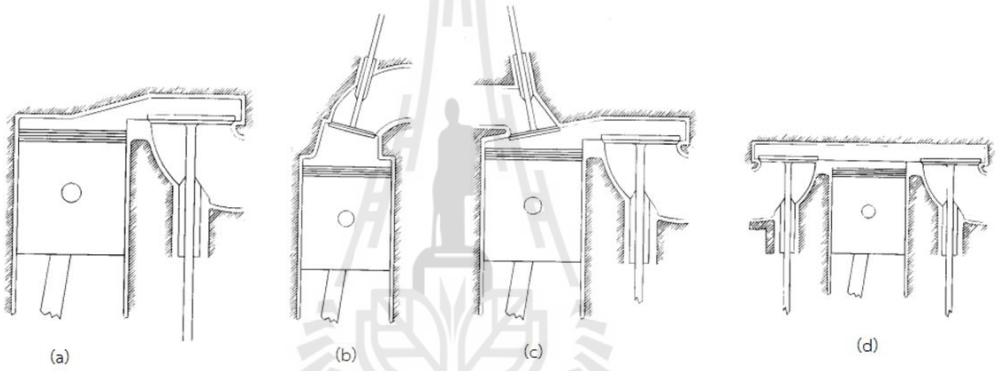
2.3.4 จำแนกตาม วัฏจักรการทำงาน

- วัฏจักรสี่จังหวะ (four-stroke cycle) วัฏจักรการทำงาน 1 วัฏจักรประกอบด้วยการเคลื่อนที่ของลูกสูบ 4 จังหวะหรือสองรอบหมุนของเพลาข้อเหวี่ยง

- วัฏจักรสองจังหวะ (two-stroke cycle) วัฏจักรการทำงาน 1 วัฏจักรประกอบด้วยการเคลื่อนที่ของลูกสูบ 2 จังหวะหรือหนึ่งรอบหมุนของเพลาข้อเหวี่ยง

2.3.5 จำแนกตามตำแหน่งวาล์วของเครื่องยนต์สี่จังหวะ แสดงได้ดังรูปที่ 2.2

- วาล์ววางตัวเป็นรูปตัว L (L-head valve หรือ side valve) วาล์วไอดีและวาล์วไอเสียอยู่ในเสื้อสูบแบบเรียงอยู่ในแนวเดียวกัน
- วาล์ววางตัวเป็นรูปตัว I (I-head valve หรือ overhead valve) วาล์วไอดีและวาล์วไอเสียอยู่ในฝาสูบแนวขนานกัน
- วาล์ววางตัวเป็นรูปตัว F (F-head valve) วาล์วตัวหนึ่งมักเป็นวาล์วไอดีวางตัวอยู่ในฝาสูบและวาล์วอีกตัวหนึ่งอยู่ในเสื้อสูบ
- วาล์ววางตัวเป็นรูปตัว T (T-head valve) วาล์วไอดีและวาล์วไอเสียอยู่ในเสื้อสูบวางอยู่คนละด้านของกระบอกสูบ



รูปที่ 2.2 ตำแหน่งของวาล์วของเครื่องยนต์สี่จังหวะ (ที่มา Willard W. Pulkrabek , 2004)

(a) วาล์ววางตัวในบล็อกเป็นรูปตัว L (b) วาล์ววางตัวในหัวลูกสูบเป็นรูปตัว I

(c) วาล์ววางตัวในบล็อกและบนหัวลูกสูบเป็นรูปตัว F

(d) วาล์ววางตัวในบล็อกตรงกันข้ามกันเป็นรูปตัว T

2.3.6 จำแนกตามตำแหน่งของช่องหรือวาล์วของเครื่องยนต์สองจังหวะ

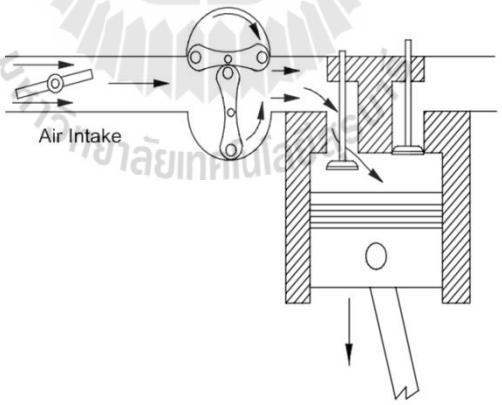
- Cross-scavenged porting ช่องไอดีและช่องไอเสียอยู่ด้านตรงข้ามกันของกระบอกสูบที่ปลายหนึ่ง
- Loop-scavenged porting ช่องไอดีและช่องไอเสียอยู่ด้านเดียวกันของกระบอกสูบที่ปลายหนึ่ง
- Through-scavenged porting หรือ uniflow-scavenged porting ช่องไอดีและช่องหรือวาล์วไอเสียอยู่คนละปลายของกระบอกสูบ

2.3.7 เชื้อเพลิงที่ใช้ จำแนกเป็น

- เบนซิน (gasoline หรือ petrol)
- ดีเซล (diesel หรือ fuel oil)
- แก๊สธรรมชาติ (natural gas)
- แก๊สปิโตรเลียมเหลว (liquefied petroleum gas, LPG)
- แอลกอฮอล์ (alcohol)
- แก๊สโซฮอล์ (gasohol) เป็นเชื้อเพลิงผสมระหว่างน้ำมันเบนซินกับแอลกอฮอล์ โดยทั่ว ไปจะใช้น้ำมันเบนซิน 90 % และแอลกอฮอล์ 10 % เชื้อเพลิงผสมนี้อาจเรียกว่าเชื้อเพลิงคู่ (dual fuel)

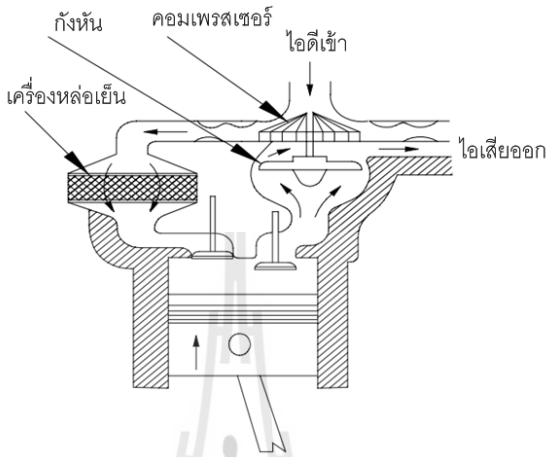
2.3.8 กระบวนการนำเอาไอดีเข้า จำแนกเป็น

- การนำไอดีเข้าโดยธรรมชาติ (naturally aspirated) ไม่มีระบบการเพิ่มความดันแก่ไอดี
- การซูเปอร์ชาร์จ (supercharging) ความดันของไอดีถูกเพิ่มโดยเครื่องอัดหรือคอมเพรสเซอร์ หรือซูเปอร์ชาร์จเจอร์ที่ขับเคลื่อนโดยใช้กำลังที่ถ่ายทอดมาจากเพลาข้อเหวี่ยงของเครื่องยนต์รูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การใช้ซูเปอร์ชาร์จเจอร์ (supercharger) เพื่อเพิ่มความดันของไอดีที่เข้าเครื่องยนต์ (ที่มา Willard W. Pulkrabek , 2004)

- การใช้เทอร์โบชาร์จ (turbocharging) ความดันของไอดีถูกเพิ่มโดยชุดกังหันและคอมเพรสเซอร์โดยกังหันจะถูกขับเคลื่อนด้วยไอเสียจากเครื่องยนต์ซึ่งจะได้กำลังออกมาใช้ในการขับคอมเพรสเซอร์เพื่ออัดไอดีต่อไป ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การใช้เทอร์โบชาร์จเจอร์ (turbocharger) เพื่อเพิ่มความดันของไอดีที่เข้าเครื่องยนต์ (ที่มา Willard W. Pulkrabek , 2004)

- การอัดในห้องเพลาข้อเหวี่ยง (crankcase compression) ของเครื่องยนต์สองจังหวะ ซึ่งใช้ห้องเพลาข้อเหวี่ยงเป็นคอมเพรสเซอร์เพื่อเพิ่มความดันของไอดี

2.3.9 วิธีการเตรียมส่วนผสมสำหรับเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟ จำแนกได้เป็น

- คาร์บูเรชัน (carburetion) การเตรียมส่วนผสมกระทำโดยใช้คาร์บูเรเตอร์
- การฉีดเชื้อเพลิง (fuel injection) การเตรียมส่วนผสมกระทำโดยใช้หัวฉีดฉีดเชื้อเพลิงเข้าที่จุดเดียวคือเข้าที่เสื้อลิ้นเร่ง (throttle body fuel injection, ลิ้นปีกผีเสื้อ ลิ้นปีกผีเสื้อเป็นการเรียกตามรูปร่าง ส่วนลิ้นเร่งเป็นการเรียมตามหน้าที่) หรือใช้หัวฉีดฉีดเชื้อเพลิงเข้าที่หลายจุดสำหรับแต่ละสูบเข้าที่ช่องไอดี (multipoint port fuel injection)

2.3.10 วิธีการจุดระเบิด จำแนกเป็น

- การจุดระเบิดด้วยประกายไฟ (spark ignition, SI) เครื่องยนต์มีการเริ่มกระบวนการเผาไหม้ในแต่ละวัฏจักรโดยการใช้ประกายไฟจากหัวเทียนจุดระเบิดสารผสมอากาศกับเชื้อเพลิง (air-fuel mixture, ไอดี) ในห้องเผาไหม้โดยรอบหัวเทียน

- การจุดระเบิดด้วยการอัด (compression ignition, CI) เครื่องยนต์มีการเริ่มกระบวนการเผาไหม้เมื่อสารผสมอากาศกับเชื้อเพลิงจุดระเบิดด้วยตัวเองอันเนื่องมาจากอุณหภูมิสูงในห้องเผาไหม้ที่เกิดการอัด

2.3.11 การออกแบบห้องเผาไหม้ จำแนกได้เป็น

- ห้องเผาไหม้เปิด (open chamber) ห้องเผาไหม้เป็นห้องเดียวซึ่งมีหลายรูปแบบ เช่น ทรงลิ่ม ทรงจาน และแบบหลุมในลูกสูบ เป็นต้น

- ห้องเผาไหม้แบ่ง (divided chamber) ห้องเผาไหม้แบบนี้แบ่งเป็นห้องเผาไหม้เล็กและห้องเผาไหม้หลัก เชื่อมต่อกันด้วยรูหรือช่องเล็กๆ

2.3.12 วิธีการควบคุมภาระ (load control) จำแนกได้เป็น

- การควบคุมการไหลของสารผสมอากาศกับเชื้อเพลิงที่เข้าไปในเครื่องยนต์ ซึ่งถือได้ว่าส่วนประกอบของสารผสมไม่เปลี่ยนแปลง

- การควบคุมการไหลของเชื้อเพลิงที่เข้าไปในเครื่องยนต์เพียงอย่างเดียว

- การควบคุมที่ใช้ทั้งสองวิธีข้างต้นรวมกัน

2.3.13 วิธีการหล่อเย็น จำแนกได้เป็น

- การหล่อเย็นด้วยของเหลว (liquid cooling)

- การหล่อเย็นด้วยอากาศ (air cooling)

2.4 การแบ่งประเภทเครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพสามารถนำมาใช้กับเครื่องยนต์สันดาปภายในแบบลูกสูบสามารถแบ่งตามลักษณะการใช้เชื้อเพลิงซึ่งสามารถแบ่งได้ 2 ประเภทดังนี้

2.4.1 เครื่องยนต์เชื้อเพลิงเดี่ยวใช้งานสลับกัน (Bi-Fuel Engine) เป็นเครื่องยนต์ที่ใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงเพียงอย่างเดียว จุดระเบิดด้วยประกายไฟ ดัดแปลงมาจากเครื่องยนต์เบนซินหรือเครื่องยนต์ดีเซลก็ได้ มีข้อดีคือใช้ก๊าซชีวภาพเพียงอย่างเดียวก็ทำงานได้

2.4.2 เครื่องยนต์เชื้อเพลิงคู่ใช้พร้อมกัน (Dual-Fuel Engine) เป็นเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิงร่วมกับก๊าซชีวภาพ ทำงานโดยการผสมก๊าซชีวภาพกับอากาศให้ไหลเข้าเครื่องยนต์ จากนั้นหัวฉีดดีเซลจะฉีดน้ำมันดีเซลประมาณเพียงเล็กน้อย เพื่อให้น้ำมันดีเซลเป็นตัวเริ่มการเผาไหม้ จากนั้นก็จะเผาไหม้ก๊าซชีวภาพต่อไป มีข้อดีคือดัดแปลงเครื่องให้มาใช้กับก๊าซชีวภาพได้ง่าย สามารถเดินเครื่องดีเซลอย่างเดียวหรือใช้ร่วมกับก๊าซชีวภาพก็ได้

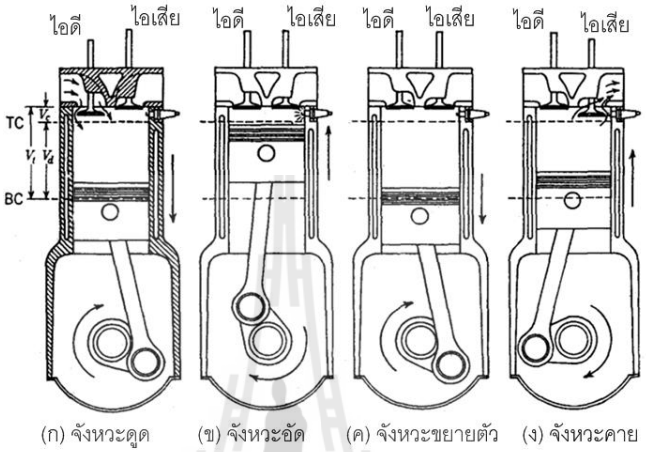
สำหรับเครื่องยนต์ที่ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้านั้นสามารถใช้ได้ทั้งเครื่องยนต์เบนซินหรือเครื่องยนต์ดีเซลดัดแปลง ก๊าซที่จะใช้ในเครื่องยนต์ ความดันของก๊าซอาจจะลดลง เนื่องจากเครื่องยนต์จะดูดก๊าซเข้าไปในเครื่องยนต์ซึ่งอาจจะไม่คุ้มค่าที่นำก๊าซชีวภาพไปใช้กับเครื่องยนต์ และเครื่องยนต์เบนซินเป็นเครื่องยนต์ที่มีรอบการทำงานสูงสิ้นเปลืองพลังงานและ ผลิตไฟฟ้าได้ไม่มากรวมทั้งยังมีการสึกหรอสูงมากจึงจำเป็นต้องใช้เครื่องยนต์จำนวนมาก ส่วนเครื่องยนต์ดีเซลดัดแปลงนั้นจะมีขนาดใหญ่ ใช้รอบต่ำ ไม่สิ้นเปลืองพลังงาน สามารถผลิตไฟฟ้าได้จำนวนมาก ๆ และยังมีการสึกหรอต่ำอีกด้วย ส่วนเครื่องยนต์ที่ผลิตมาเพื่อใช้แก๊สชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงโดยเฉพาะจะมีความทนทานสูง มีค่าบำรุงรักษาต่ำให้ประสิทธิภาพในการใช้งานสูงแต่จะมีราคาสูงตามคุณภาพด้วย

เครื่องยนต์ที่ใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงจะให้กำลังงานน้อยกว่าเมื่อใช้น้ำมันเบนซินเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งอัตราของกำลังงานที่ลดลงจะขึ้นอยู่กับค่าความร้อนเชิงปริมาตร (Volumetric Heating value) ของก๊าซ เช่น ก๊าซชีวภาพ 70 % มีเทน จะมีค่าความร้อนสูงกว่าก๊าซชีวภาพ 50 % มีเทน การควบคุมกำลังงานและความเร็วของเครื่องยนต์จะควบคุมได้โดยการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่จะส่งเข้าสู่เครื่องยนต์ ทำได้โดยปรับอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพให้เหมาะสมกับปริมาณอากาศที่ท่อไอดีและนำเข้าสู่เครื่องยนต์

2.5 วัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์

เครื่องยนต์เผาไหม้ภายในแบบลูกสูบ ทั้งเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟและเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดจะทำงานตามวัฏจักรการทำงาน 4 จังหวะหรือ 2 จังหวะ ในขณะที่เครื่องยนต์แบบลูกสูบทำงานนั้นลูกสูบจะเคลื่อนที่กลับไปกลับมาในกระบอกสูบและถ่ายทอดกำลังผ่านก้านสูบไปยังเพลาข้อเหวี่ยงตามภาพ 2.5 ซึ่งการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาของลูกสูบนี้จะถูกเปลี่ยนไปเป็นการหมุนของเพลาข้อเหวี่ยง เมื่อลูกสูบไปหยุดที่ตำแหน่งบนสุดซึ่งเรียกว่าตำแหน่งศูนย์บน (top center, TC) หรือตำแหน่งศูนย์ตายบน (top dead center, TDC) ปริมาตรของกระบอกสูบจะน้อยที่สุดซึ่งเรียกว่าปริมาตรช่องว่าง (clearance volume, V_c) และเมื่อลูกสูบไปหยุดที่ตำแหน่งล่างสุดซึ่งเรียกว่าตำแหน่งศูนย์ล่าง (bottom center, BC) หรือตำแหน่งศูนย์ตายล่าง (bottom dead center, BDC) ปริมาตรของกระบอกสูบจะมากที่สุดซึ่งเรียกว่าปริมาตรรวม (total volume, V_t) โดยปริมาตรที่ถูกกล่าวโดยลูกสูบระหว่างปริมาตรรวมและปริมาตรช่องว่างก็คือปริมาตรกระจัด (displaced volume หรือ swept volume, V_d) ซึ่งอัตราส่วนระหว่างปริมาตรสูงสุดและปริมาตรต่ำสุดก็คืออัตราส่วนการอัด (compression ratio, r_c) สำหรับระยะระหว่างตำแหน่งศูนย์บนและศูนย์ล่างก็คือระยะชัก หรือช่วงชัก หรือจังหวะการเคลื่อนที่ของลูกสูบ (stroke)

วัฏจักรการทำงานสี่จังหวะในแต่ละกระบอกสูบของเครื่องยนต์จะต้องใช้จังหวะการเคลื่อนที่ของลูกสูบ 4 จังหวะหรือ 2 รอบการหมุนของเพลาข้อเหวี่ยงเพื่อให้ลำดับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นซึ่งได้จังหวะกำลัง 1 จังหวะนั้นสมบูรณ์หรือให้ครบ 1 วัฏจักรการทำงาน วัฏจักรการทำงานสี่จังหวะประกอบด้วยจังหวะต่างๆในทางทฤษฎีดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 วัฏจักรการทำงานสี่จังหวะ (ที่มา John B. Heywood, 2015)

2.5.1 จังหวะดูด (intake stroke) หรือจังหวะเอาไอดีเข้า เริ่มต้นเมื่อลูกสูบอยู่ที่ TC และสิ้นสุดเมื่อลูกสูบอยู่ที่ BC ไอดีจะถูกนำเข้าไปในกระบอกสูบโดยในระหว่างจังหวะดูดนี้วาล์วไอดีจะเปิดวาล์วไอเสียจะปิด

2.5.2 จังหวะอัด (compression stroke) สารผสมในกระบอกสูบถูกอัดให้ปริมาตรลดลงโดยลูกสูบเคลื่อนที่จาก BC ไปยัง TC ในขณะที่วาล์วทั้งสองปิดอยู่ และเมื่อลูกสูบอยู่ที่ TC จะมีการจุดระเบิดและการเผาไหม้ของสารผสมอากาศกับเชื้อเพลิง ทำให้ความดันกระบอกสูบเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

2.5.3 จังหวะกำลังหรือจังหวะขยายตัว (power stroke หรือ expansion stroke) ซึ่งเริ่มต้นเมื่อ ลูกสูบอยู่ที่ TC และสิ้นสุดเมื่อลูกสูบอยู่ที่ BC โดยแก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้ของอากาศกับเชื้อเพลิงซึ่งมีอุณหภูมิและความดันสูงจะดันลูกสูบลงและไปทำให้เพลาข้อเหวี่ยงหมุน ในระหว่างจังหวะกำลังนั้นวาล์วไอดีและวาล์วไอเสียจะปิด

2.5.4 จังหวะคาย (exhaust stroke) เริ่มต้นเมื่อลูกสูบอยู่ที่ BC และวาล์วไอเสียเปิดส่วนวาล์วไอดียังคงปิดอยู่ แก๊สที่ขยายตัวแล้วถูกดันออกจากกระบอกสูบโดยลูกสูบเคลื่อนที่จาก BC ไปยัง TC

2.6 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นเครื่องกลที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยอาศัยการเหนี่ยวนำ ของแม่เหล็กตามหลักการของ ไมเคิล ฟาราเดย์ โดยการหมุนตัดกันระหว่างขดลวดตัวนำกับสนามแม่เหล็ก พิกัดกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะบอกเป็นโวลต์-แอมป์ (VA) หรือกิโลโวลต์-แอมป์ (KVA) การออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีความเหมาะสมกับตัวต้นกำลังแต่ละชนิด และสามารถแบ่งชนิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละประเภทได้ดังนี้

2.6.1 แบ่งตามจำนวนเฟสของระบบไฟฟ้า

2.6.1.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิด 1 เฟส (Single Phase Generator)

ให้แรงดันไฟฟ้าระบบ 1 เฟส 2 สาย (L,N) 220 โวลต์ 50 เฮิรตซ์ ส่วนใหญ่จะเป็นเครื่องกำเนิดขนาดเล็กให้กำลังไม่เกิน 5 KVA หรือ 5 KW ใช้เครื่องยนต์ขนาดเล็กเป็นตัวต้นกำลัง ส่งกำลังโดยการต่อเพลาเข้าโดยตรงหรือใช้สายพานส่งกำลังส่วนใหญ่จะนำไปใช้งานผลิตไฟฟ้าชั่วคราว ใช้เป็นไฟฉุกเฉิน หรืองานเฉพาะกิจที่ไม่สามารถใช้ไฟของการไฟฟ้าได้ ดังรูปที่ 2.6

รูปที่ 2.6 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิด 1 เฟส

2.6.1.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิด 3 เฟส (Three Phase Generator)

โดยให้แรงดันไฟฟ้าในระบบ 3 เฟส 220/380 โวลต์ 50 เฮิรตซ์ หรือให้แรงดันไฟฟ้าสูงสุดได้ไม่เกิน 20 กิโลโวลต์ มีขนาดตั้งแต่ 5 KVA ขึ้นไป ที่ขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดชนิดนี้ มีขดลวด 3 ชุด แต่ละชุดวางมุมห่างกัน 120° ทางไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.7

รูปที่ 2.7 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิด 3 เฟส

2.6.2 แบ่งตามลักษณะของขดลวดสนามแม่เหล็กที่กระทำกับขดลวดสเตเตอร์

2.6.2.1 เครื่องกำเนิดชนิดขดลวดสนามแม่เหล็กอยู่กับที่

มีขดลวดสนามแม่เหล็กติดอยู่กับที่โครงสเตเตอร์ เพื่อสร้างเส้นแรงแม่เหล็กให้วิ่งจาก ขั้วเหนือ (N) ไปยังขั้วใต้ (S) ส่วนขดลวดอาร์เมเจอร์ที่เป็นตัวหมุนจะเป็นตัวจ่ายไฟออกไปใช้งานผ่านทาง สลิปริง และแปรงถ่าน ส่วนมากจะเป็นเครื่องกำเนิดขนาดเล็ก

2.6.2.2 เครื่องกำเนิดชนิดขดลวดสนามแม่เหล็กหมุน

มีขดลวดสนามแม่เหล็กที่สร้างขั้วเหนือ และใต้ เป็นตัวหมุน ส่วนขดลวดอาร์เมเจอร์ที่ผลิตไฟฟ้าออกไปใช้งานจะพันอยู่บนแกนเหล็กของโครง สเตเตอร์โดยไม่ต้องมีแปรงถ่านและสลิปริงสามารถรับพิกัดกระแสได้มากกว่าแบบแรก ส่วนมากจะเป็นเครื่องกำเนิด ขนาดกลาง และใหญ่

2.6.3 แบ่งตามลักษณะการติดตั้ง

2.6.3.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเพลานอน หรือ แนวราบ ถ้าสังเกตที่เพลาโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดชนิดนี้จะติดตั้งหรือวางในแนวราบ มีการต่อเพลาโดยตรงเข้ากับตัวต้นกำลังที่เป็นเครื่องยนต์ หรือเครื่องกังหันแบบต่าง ๆ มีทั้งขนาดเล็ก ขนาดกลาง และขนาดใหญ่ เป็นที่นิยมใช้งานกันทั่วไป

2.6.3.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเพลาตั้ง การติดตั้งจะวางเพลาโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดอยู่ในแนวตั้งขึ้นเช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้กับเขื่อนต่าง ๆ โดยมีกังหันน้ำต่อเพลาเข้ากับโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดในแนวตั้งให้ความเร็วรอบของการหมุนต่ำ

2.6.4 แบ่งตามพิกัดกำลังใช้งาน

2.6.4.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก ส่วนมากจะเป็นเครื่องกำเนิดชนิด 1 เฟส ให้แรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์ มีขนาดไม่เกิน 5 KVA มีจำหน่ายตามท้องตลาดทั่วไปใช้ผลิตไฟฟ้าชั่วคราว ใช้เป็นไฟฉุกเฉินและใช้กับงานเฉพาะกิจ

2.6.4.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดกลาง เป็นเครื่องกำเนิดที่จ่ายระบบไฟ 3 เฟสให้แรงดันไฟฟ้า 220/380 โวลต์มีขนาดตั้งแต่ 5 KVA ถึง 500 KVA ใช้เป็นเครื่องสำรองไฟให้กับโรงพยาบาล โรงแรม ศูนย์การค้า ธนาคาร และโรงงานอุตสาหกรรม ในกรณีที่ระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าไม่สามารถจ่ายไฟได้ อาจจะให้เครื่องกำเนิดเริ่มเดินด้วยมือ (Manual) หรือให้เริ่มเดินแบบอัตโนมัติแบบใช้ทรานส์เฟอร์สวิตช์ (Transfer switch) ทำหน้าที่ถ่ายโอนระบบไฟฟ้าของเครื่องสำรองไฟและระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าเข้ากับโหลด

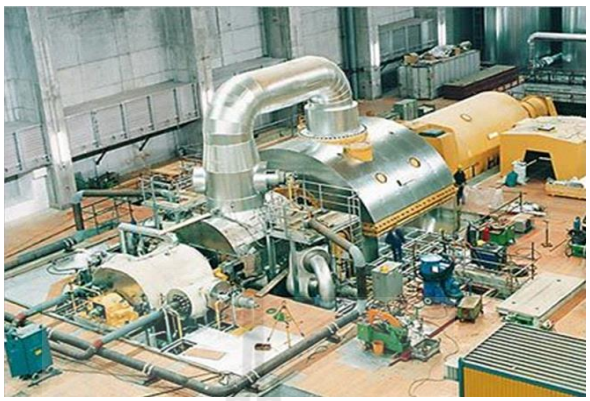
2.6.4.3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่ มีขนาดตั้งแต่ 500 KVA เป็นต้นไป ส่วนมากจะใช้เป็นกำลังหลักในการผลิตไฟฟ้าของโรงต้นกำลัง เช่น โรงงานไฟฟ้าพลังงานความร้อน พลังน้ำ กังหันแก๊ส และโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้าได้ประมาณ 20 KV เข้าสู่ระบบสายส่งแรงสูงของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย หรือใช้ในการผลิตไฟฟ้าเพื่อเชื่อมต่อให้กับระบบจำหน่าย 22 KV ของการไฟฟ้าภูมิภาคโดยตรง

2.6.5 แบ่งตามพลังงานกลที่ใช้ขับเครื่องกำเนิด

2.6.5.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดใช้กังหันไอน้ำเป็นตัวต้นกำลัง

โดยการนำเอาไอน้ำที่มีความดันสูงและอุณหภูมิสูง (Supper heat) จากหม้อไอน้ำ (Boiler) ไหลผ่านวาล์วของระบบควบคุม และเมื่อไอน้ำไหลเข้าไปในกังหันไอน้ำ (Stream Turbine) ที่มีลักษณะเป็นซี่ ๆ ทั้งชุดความดันต่ำและชุดความดันสูง ความดันของไอน้ำจะลดลงและเกิดการขยายตัวทำให้ปริมาตรของไอน้ำเพิ่มขึ้น มีผลทำให้ความเร็วในการไหลของไอน้ำ

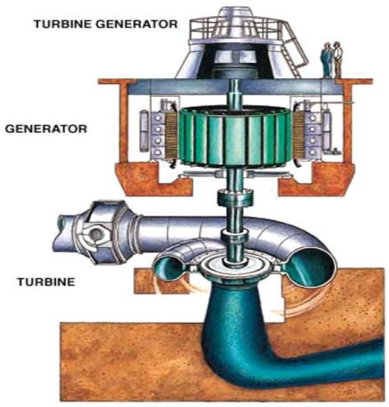
สูงขึ้นและเมื่อไปปะทะกับใบพัดจำนวนหลายชุดที่ติดอยู่ที่เพลา ก็จะผลักให้เพลาของกังหันหมุน ก่อให้เกิดกำลังกลและไปหมุนขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตกระแสไฟฟ้าออกมา ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 กังหันไอน้ำผลิตไฟฟ้า

2.6.5.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดใช้กังหันน้ำเป็นตัวต้นกำลัง

กังหันชนิดนี้จะมีใช้งานกับเขื่อนต่าง ๆ เช่น เขื่อนภูมิพล เขื่อนสิริกิตติ์ เขื่อนวชิรลงกรณ์ เขื่อนอุบลรัตน์ ฯลฯ มีทั้งแบบ คาปลาน (kaplan), ฟรานซิส (Francis), เทอบูล่าร์ (Tubular), เตอร์โก (Turgo) และ เพลตอน (Pelton) การทำงานอาศัยพลังงานจลน์ของแรงดันน้ำที่เกิดจากความต่างระดับของน้ำเหนือเขื่อน และท้ายเขื่อน ฉีดไปที่ใบพัดของกังหันน้ำ ทำให้เกิดการหมุนในแนวแกน เพื่อขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดผลิตไฟฟ้า ซึ่งให้ความเร็วรอบของการหมุนต่ำ แสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 กังหันน้ำผลิตไฟฟ้า

2.6.5.3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดใช้กังหันก๊าซเป็นตัวต้นกำลัง

การทำงานของเครื่องกังหันก๊าซโดยมีเครื่องอัดอากาศ (Compressor) ต่ออยู่บนเพลาเดียวกับชุดกังหัน และต่อตรงไปยังเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อเริ่มเดินเครื่อง อากาศจะถูกดูดจากภายนอกเข้าหาเครื่องอัดอากาศทางด้านล่าง ถูกอัดจนมีความดันและอุณหภูมิสูงประมาณ 8-10 เท่า แล้วถูกส่งไปยังห้องเผาไหม้ ซึ่งใช้เชื้อเพลิงเป็นก๊าซธรรมชาติ (หรือน้ำมันดีเซล) จะถูกเผาไหม้และให้ความร้อนแก่อากาศ ก๊าซร้อนที่ออกจากห้องเผาไหม้จะถูกส่งไปยังกังหัน ทำให้กังหันหมุนเกิดงานขึ้น ไปขับเครื่องอัดอากาศและขณะเดียวกันก็ขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วย ความดันของก๊าซเมื่อผ่านตัวกังหันจะลดลงและผ่านออกมาที่บรรยากาศ ดังรูปที่ 2.10

รูปที่ 2.10 กังหันก๊าซผลิตไฟฟ้า

2.6.5.4 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดใช้กังหันลมเป็นตัวต้นกำลัง

กังหันลมที่ใช้ผลิตไฟฟ้าเป็นพลังงานทดแทนรูปแบบหนึ่ง ซึ่งลมเป็นแหล่งพลังงานที่สะอาด สามารถใช้ได้อย่างไม่มีวันหมด หลักการทำงานเมื่อมีลมพัดมาปะทะกับใบพัดของกังหันลม กังหันลมจะทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานลมที่อยู่ในรูปของพลังงานจลน์ไปเป็นพลังงานกล โดยการหมุนของใบพัด แรงจากการหมุนของใบพัดนี้ จะถูกส่งผ่านแกนหมุนทำให้เพลาที่ติดอยู่กับแกนหมุนของเครื่องกำเนิดเพื่อผลิตไฟฟ้า ซึ่งกังหันลมที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้ามี 2 แบบคือ แบบแกนเพลาแนวนอน และแบบแกนเพลาแนวตั้ง ดังรูปที่ 2.11

รูปที่ 2.11 กังหันลมผลิตไฟฟ้า

2.6.6 แบ่งตามลักษณะการนำไปใช้งาน

2.6.6.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดสำรอง (Standby Generator Type)

เครื่องกำเนิดชนิดนี้จะใช้เป็นกำลังสำรองเมื่อไฟฟ้าหลักดับไปเป็นเวลาไม่นานนักซึ่งมีไว้สำหรับใช้เมื่อมีความจำเป็นหรือกรณีฉุกเฉิน ความสำคัญของเครื่องกำเนิดจึงอยู่ที่ความพร้อมใช้งานเป็นหลักใช้สำหรับอาคารสูง โรงงานอุตสาหกรรมที่ต้องการผลผลิตอย่างต่อเนื่อง เครื่องกำเนิดชนิดนี้จะต้องตอบสนองความต้องการได้อย่างรวดเร็ว มีความเที่ยงตรงแม่นยำ และออกแบบให้ใช้งานเต็มกำลังของเครื่องยนต์เพื่อใช้ขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดและเครื่องกำเนิดชนิดนี้จะไม่สามารถจ่ายโหลดเกินกำลังได้ ชั่วโมงการทำงานจะต้องไม่เกินพิกัดของผู้ผลิตเครื่องยนต์ เช่นกำหนดไว้ไม่เกิน 150 หรือ 200 ชั่วโมงต่อปี และการเดินเครื่องแต่ละครั้งจะต้องอยู่ในข้อกำหนดของผู้ผลิตด้วย เช่น ในรอบเดินเครื่อง 12 ชั่วโมงต้องหยุด 1 ชั่วโมง เป็นต้น

2.6.6.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดสำรองต่อเนื่อง (Continuous Generator Type)

ใช้เป็นกำลังสำรองแต่สามารถใช้งานได้อย่างต่อเนื่องเมื่อไฟฟ้าหลักดับ เช่น กรณีที่ไฟฟ้าหลักดับนานเกิน 12 ชั่วโมงใช้กับโหลดที่มีกระแสเริ่มเดินสูง เครื่องกำเนิดชนิดนี้จะมีขีดความสามารถสูงกว่าแบบแรกและราคาแพงกว่า เนื่องจากการออกแบบจะต้องเลือกเครื่องยนต์ที่มีกำลังหรือแรงม้าที่มากพอ และสามารถรับโหลดเกินกำลังได้ 10 % ตามมาตรฐาน IEC และมาตรฐานอื่น ๆ การทำงานจะเป็นลักษณะกึ่งใช้งานหนัก และจะต้องพิจารณาถึงความคงทนของฉนวนและอุณหภูมิการใช้งานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วย

2.6.6.3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดจ่ายกำลังหลัก (Base load Generator)

เป็นเครื่องที่ใช้งานจ่ายกำลังไฟฟ้าหลัก สามารถใช้อย่างต่อเนื่องโดยไม่จำกัดชั่วโมงการทำงาน พิกัดของเครื่องจะต้องรับโหลดเป็น 70 % ของเครื่องชนิดสำรองและ 60 % ของเครื่องชนิดสำรองต่อเนื่อง เครื่องชนิดนี้มักจะใช้ในเกาะ หรือสถานที่ใช้ไฟฟ้าชั่วคราว เช่น แท่นขุดเจาะน้ำมันแคมป์งานก่อสร้าง ฯลฯ บางครั้งจะต้องติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพร้อมกัน 2 เครื่อง แล้วสลับกันทำงาน เพื่อให้มีความสะดวกต่อการบำรุงรักษาตามช่วงเวลาที่กำหนด

2.6.7 แบ่งตามลักษณะการออกแบบ

2.6.7.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเปลือยติดตั้งอยู่กับที่ (Bare Generator)

เป็นชนิดที่นิยมใช้งานกันโดยทั่วไปเครื่องยนต์ที่เป็นต้นกำลังและเครื่องกำเนิดจะเป็นชนิดเปลือยมีชุดควบคุมติดตั้งอยู่ด้านท้ายของเครื่องกำเนิด มีขนาดใหญ่และน้ำหนักมากจึงไม่นิยมเคลื่อนย้าย

2.6.7.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดตู้ครอบเก็บเสียง(Canopied and Sound Proof)

เป็นชนิดที่ต้องการย้ายพื้นที่การใช้งานบ่อย ๆ หรือต้องการเก็บเสียงหรือพื้นที่ที่ไม่มีห้องสำหรับติดตั้งเครื่องกำเนิด ส่วนประกอบที่สำคัญทั้งหมดจะถูกออกแบบให้อยู่ในตู้ครอบเช่น ถังน้ำมันเชื้อ เพลิงชุดควบคุมสตาร์ทอัตโนมัติ และสวิตช์ถ่ายโอนกระแสไฟฟ้า

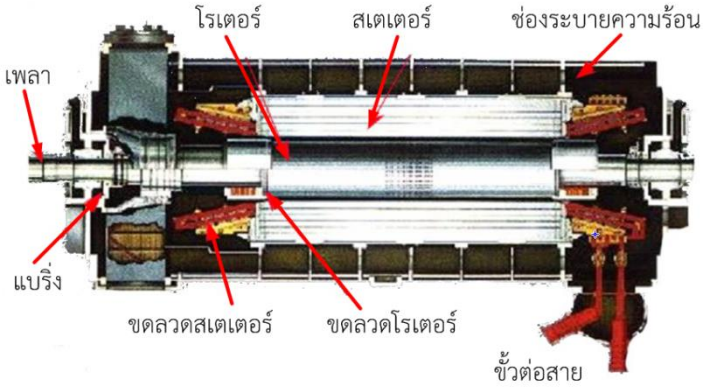
2.6.7.3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเคลื่อนย้าย (Mobile Generator Trailer)

เครื่องกำเนิดชนิดนี้ใช้ในสถานที่ชั่วคราวเช่นงานพิธีการต่าง ๆ งานกู้ภัย งานเฉพาะกิจภาคสนาม สามารถเคลื่อนย้ายนำไปใช้งานในสถานที่ต่าง ๆ ได้มีทั้งชนิดลากจูง (Trailer) และแบบบรรทุกบนรถยนต์ (Mobile Generator)

2.7 โครงสร้างและส่วนประกอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

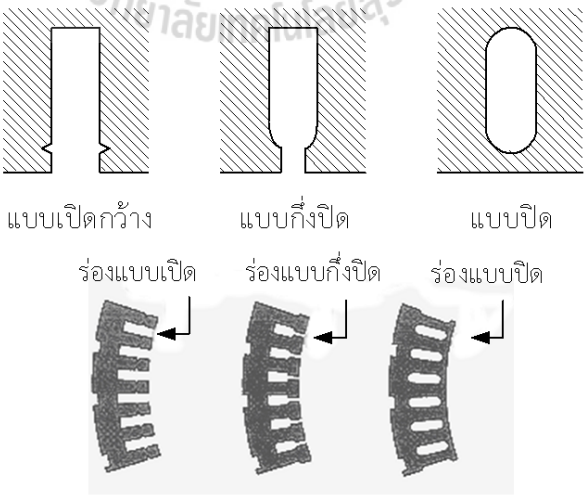
2.7.1 โครงสเตเตอร์ (Stator Frame)

เป็นเปลือกหุ้มภายนอกทำด้วยเหล็กหล่อซึ่งเป็นชิ้นส่วนที่รองรับส่วนประกอบอื่น ๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทำหน้าที่ยึดแกนเหล็กที่ใช้บรรจุขดลวดอาร์เมเจอร์ ออกแบบให้มีช่องลมเพื่อช่วยในการระบายความร้อนดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ส่วนประกอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ
(ที่มา George G. Karady และ Keith Holbert, 2003)

แกนเหล็กสเตเตอร์ (Stator Core) เป็นส่วนที่ใช้พันขดลวดอาร์เมเจอร์ แกนเหล็กสเตเตอร์ทำมาจากแผ่นเหล็กบาง ๆ วางอัดซ้อนกันเพื่อลดการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนและเป็นเหล็กอ่อนมีส่วนผสมของสารซิลิกอน เพื่อลดการสูญเสียเนื่องจากฮีสเตอริซีสในแกนเหล็ก แผ่นเหล็กแต่ละแผ่นจะปั๊มเป็นร่อง (Slot) และเคลือบด้วยฉนวน แกนเหล็กสเตเตอร์จะมีร่องอากาศเพื่อช่วยระบายความร้อน ลักษณะร่องของแกนเหล็กสเตเตอร์มีอยู่ด้วยกัน 3 แบบ ได้แก่ ร่องแบบเปิดกว้าง (Wide – Open Type Slot) ร่องแบบกึ่งปิด (Semi – Closed Type Slot) และร่องแบบปิด (Wholly Closed Type Slot) ดังรูป 2.13

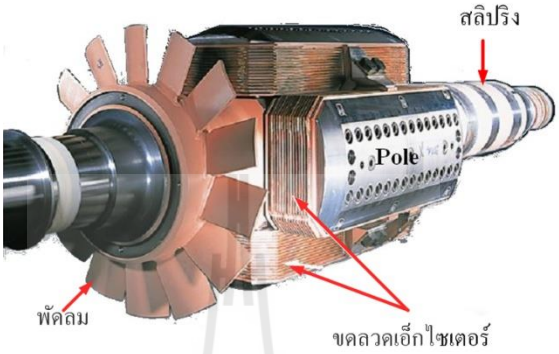


รูปที่ 2.13 แกนเหล็กและร่องสำหรับพันขดลวดอาร์เมเจอร์

2.7.2 โรเตอร์ (Rotor)

2.7.2.1 โรเตอร์ชนิดขั้วแม่เหล็กยื่น (Salient – Pole Type)

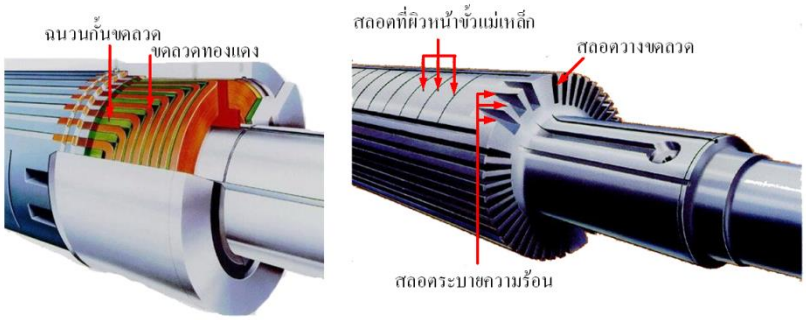
นิยมนำมาใช้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีความเร็วรอบต่ำและความเร็วปานกลางเช่นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้กับโรงจักรไฟฟ้ากังหันน้ำของเขื่อนต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 โรเตอร์ชนิดขั้วแม่เหล็กยื่น (ที่มา George G. Karady & Keith Holbert, 2003)

2.7.2.2 โรเตอร์ชนิดขั้วแม่เหล็กเรียบ (Smooth–Cylindrical Type)

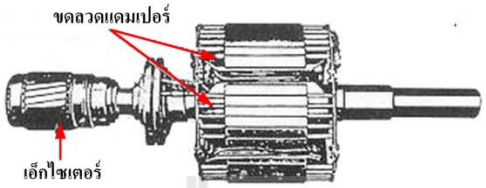
ส่วนมากจะนำไปใช้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ขับด้วยเครื่องกังหันไอน้ำ (Turbine) และเครื่องกังหันแก๊สที่มีความเร็วรอบสูงประมาณ 1500 รอบต่อนาที และ 3000 รอบต่อนาที ลักษณะของโรเตอร์เป็นแท่งเหล็กแผ่นอัดซ้อนกันเป็นรูปทรงกระบอกยาว มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กกว่าโรเตอร์ชนิดขั้วแม่เหล็กยื่น โรเตอร์ชนิดนี้ทำให้เกิดการสมดุลดีกว่าชนิดขั้วแม่เหล็กยื่น ลดการสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานของลมและแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางขณะที่ตัวหมุนถูกขับด้วยความเร็ว ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 โรเตอร์ชนิดขั้วแม่เหล็กเรียบ (ที่มา George G. Karady & Keith Holbert, 2003)

2.7.3 ขดลวดแดมเปอร์ (Damper Winding)

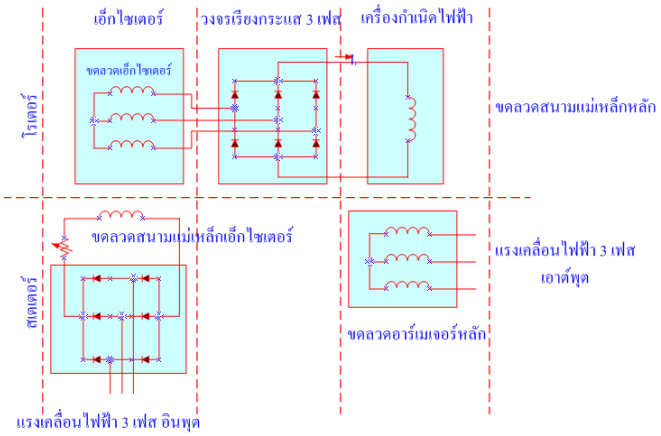
มีลักษณะเป็นแท่งทองแดงฝังอยู่ที่บริเวณผิวด้านหน้าของขั้วแม่เหล็กหมุน ถูกต่อลัดวงจรเข้าด้วยวงแหวนทองแดงทั้ง 2 ด้านของโรเตอร์ ขดลวดแดมเปอร์นี้จะช่วยป้องกันการสั่นหรือการแกว่งเมื่อความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขึ้น ๆ ลง ๆ ไม่สม่ำเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 2.16



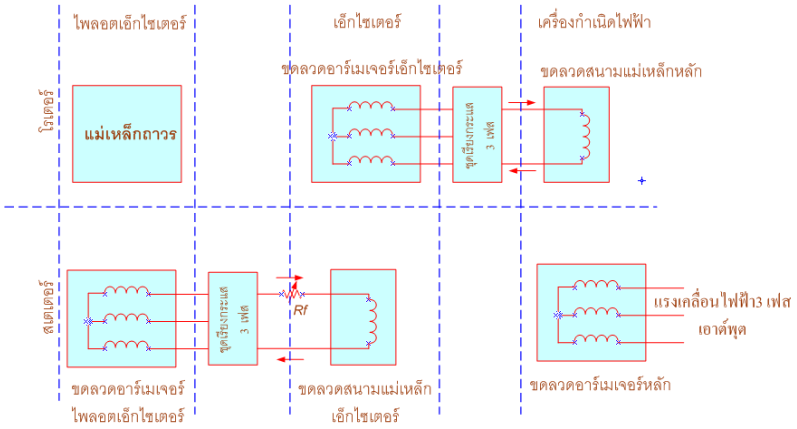
รูปที่ 2.16 ขดลวดแดมเปอร์

2.7.4 เอ็กไซเตอร์ (Exciter)

ทำหน้าที่ผลิตและจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับขดลวดสนามแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งติดอยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับขนาดใหญ่ มักจะใช้เอ็กไซเตอร์แบบ ไร้แปรงถ่าน (Brushless Generator) ทำให้การบำรุงรักษาน้อยกว่าแบบที่ใช้สลิปริง (แหวนเลื่อน) และแปรงถ่าน ระบบการกระตุ้นขดลวดสนามแม่เหล็กที่สมบูรณ์ไม่จำเป็นต้องใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าจากภายนอกมากระตุ้น แต่จะใช้ไพล็อตเอ็กไซเตอร์ติดตั้งไว้ที่เพลาของโรเตอร์ซึ่งเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ขนาดเล็กที่มีขั้วแม่เหล็กหมุนเป็นแบบแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet) ดังแสดงในรูปที่ 2.17 รูปที่ 2.18



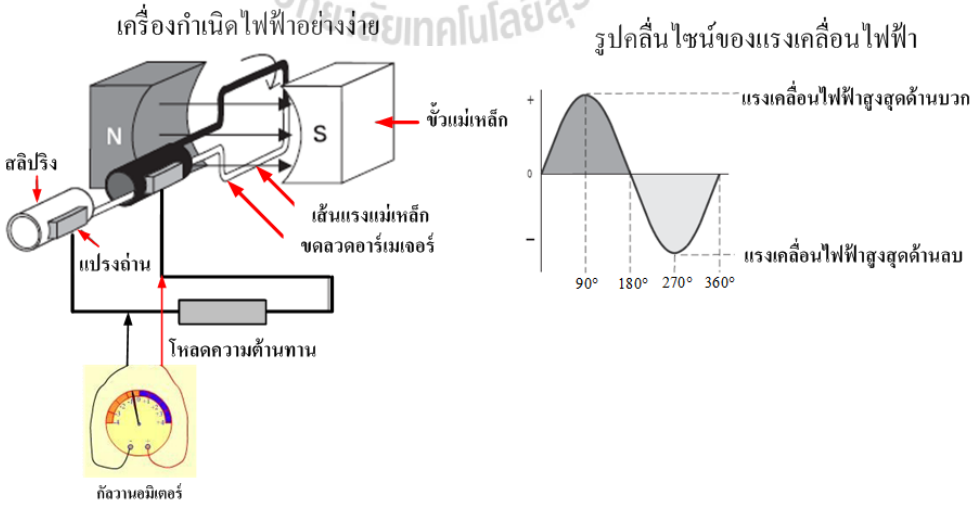
รูปที่ 2.17 เอ็กไซเตอร์แบบไร้แปรงถ่าน



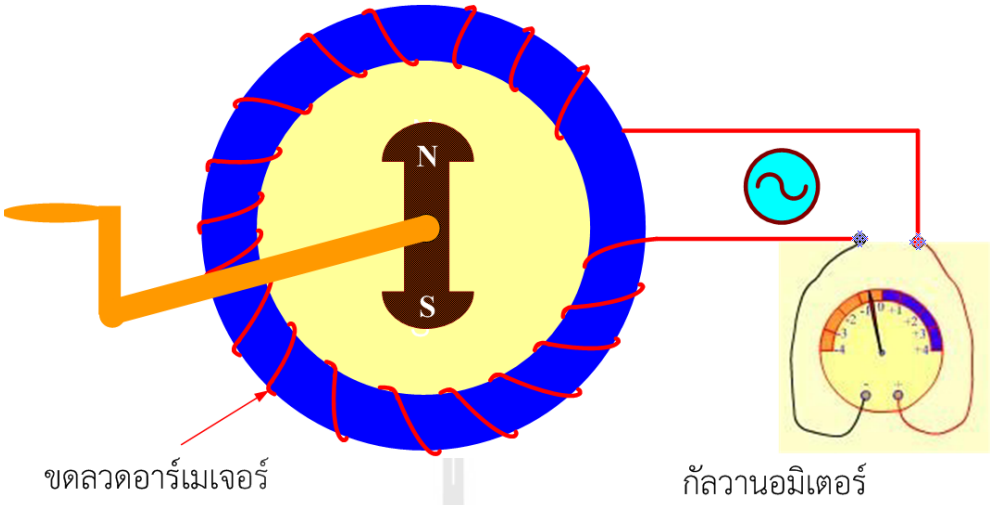
รูปที่ 2.18 เอ็กไซเตอร์แบบไร้แปรงถ่านและมีไพล๊อตเอ็กไซเตอร์
(ที่มา Stephen J. Chapman, 1991.)

2.8 การเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวด

แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นในขดลวดตัวนำเมื่อให้ตัวนำหมุนตัดสนามแม่เหล็ก (ขั้วแม่เหล็กอยู่กับที่) หรือให้สนามแม่เหล็กหมุนตัดตัวนำ (ตัวนำอยู่กับที่) เมื่อขดลวดหมุนตัดผ่านสนามแม่เหล็กดังรูปที่ 2.19 หรือสนามแม่เหล็กหมุนตัดกับตัวนำดังรูปที่ 2.20 จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้น สังเกตเห็นได้ว่าเข็มของกัลวานอมิเตอร์จะเบี่ยงเบนไป ทำให้ทราบว่ามีกระแสไฟฟ้าไหลในวงจร



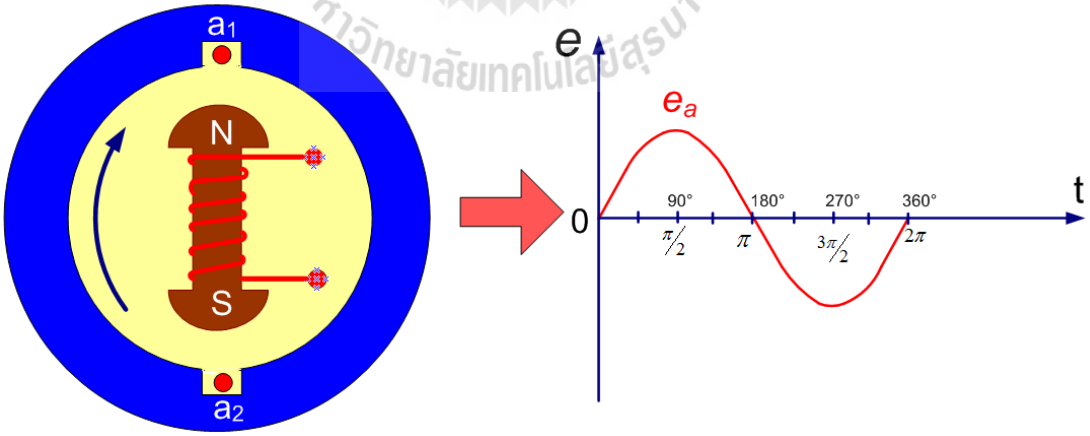
รูปที่ 2.19 การเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากตัวนำหมุนตัดสนามแม่เหล็ก



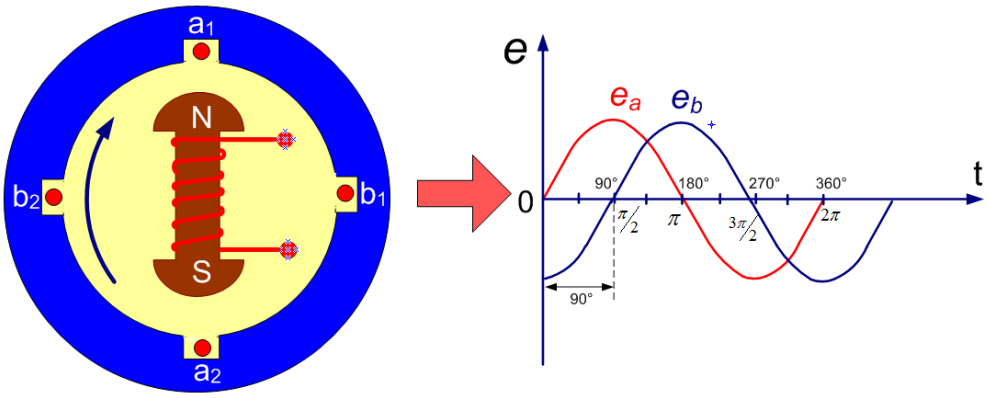
รูปที่ 2.20 การเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กหมุนตัดตัวนำ

2.8.1 การเกิดรูปคลื่นไซน์ (Sine Wave)

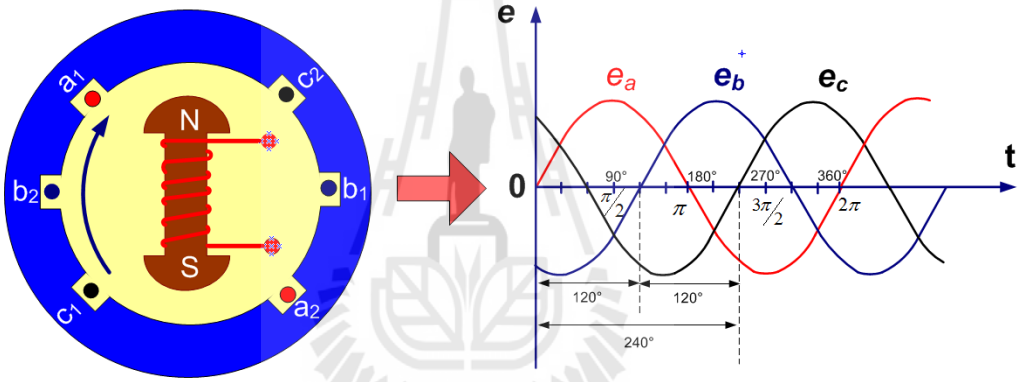
ถ้าจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับขดลวดสนามแม่เหล็กจะทำให้เกิดอำนาจแม่เหล็กที่ขั้วแม่เหล็ก (ขั้ว N และ ขั้ว S) และขับเคลื่อนให้หมุนตัดผ่านกับขดลวดอาร์เมเจอร์จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในลักษณะรูปคลื่นไซน์ขึ้น ซึ่งสามารถแบ่งตามชนิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แสดงได้ดังรูปที่ 2.21 , รูปที่ 2.22 และรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.21 การเกิดรูปคลื่นไซน์ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส (Single – Phase Alternator)

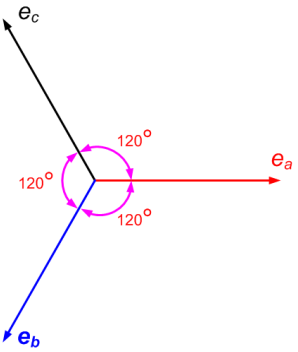


รูปที่ 2.22 การเกิดรูปคลื่นไซน์ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ 2 เฟส (Two – Phase Alternator)



รูปที่ 2.23 การเกิดรูปคลื่นไซน์ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส (Three – Phase Alternator)

สามารถเขียนเป็นเวกเตอร์ไดอะแกรมของแรงเคลื่อนไฟฟ้า 3 เฟส ได้ดังนี้



รูปที่ 2.24 เวกเตอร์ไดอะแกรมของแรงเคลื่อนไฟฟ้า 3 เฟส

เมื่อพิจารณาเวกเตอร์ไดอะแกรมตามเข็มนาฬิกา

$$e_a = E_m \sin \omega t \quad (2.1)$$

$$e_b = E_m \sin\left(\omega t - 120^o\right) \quad (2.2)$$

$$e_c = E_m \sin\left(\omega t - 240^o\right) \quad (2.3)$$

เมื่อพิจารณาเวกเตอร์ไดอะแกรมทวนเข็มนาฬิกา

$$e_a = E_m \sin \omega t \quad (2.4)$$

$$e_b = E_m \sin\left(\omega t + 240^o\right) \quad (2.5)$$

$$e_c = E_m \sin\left(\omega t + 120^o\right) \quad (2.6)$$

ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (e) ที่เกิดขึ้นในตัวนำจะเพิ่มขึ้นตามความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก (B) ความยาวของลวดตัวนำ (l) ความเร็วรอบของการหมุนตัด (v) จะได้สมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำดังนี้

$$e = Blv \quad \text{(volt)} \quad (2.7)$$

2.8.2 ความเร็วรอบและความถี่

ถ้าขดลวดหมุนตัดสนามแม่เหล็ก 1 คู่ ขั้วแม่เหล็กได้ 1 รอบจะทำให้เกิดรูปคลื่นไซน์ 1 ไซเกิล เป็นมุม 360 องศาไฟฟ้า หรือ 2π เรเดียน นั่นคือ

องศาไฟฟ้า = องศาทางกล × จำนวนคู่ของขั้วแม่เหล็ก (2.8)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

$$\theta_e = \theta_m \frac{P}{2} \tag{2.9}$$

โดย θ_e = องศาไฟฟ้าของรูปคลื่นไซน์

θ_m = องศาทางกลที่ขดลวดตัวนำหมุนตัดขั้วแม่เหล็กครบ 1 รอบ

$P/2$ = จำนวนคู่ของขั้วแม่เหล็ก

P = จำนวนขั้วแม่เหล็ก

ถ้ากำหนดให้ความเร็วรอบการหมุน n คงที่

$$\text{จำนวนรูปคลื่นไซน์} \propto \frac{P}{2} \tag{2.10}$$

$$\text{ความถี่ } (f) \propto \frac{P}{2} \tag{2.11}$$

ถ้ากำหนดให้จำนวนคู่ขั้วแม่เหล็ก $\frac{P}{2}$ คงที่

$$f \propto n \tag{2.12}$$

จากสมการที่ (2.11) และ (2.12) จะได้

$$f = n\frac{P}{2} \tag{2.13}$$

เมื่อ f = ความถี่ มีหน่วยเป็น ไซเกิล/วินาที หรือ เฮิรตซ์ (Hz)

P = จำนวนขั้วแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น ขั้ว

n = ความเร็วรอบการหมุนตัด มีหน่วยเป็น รอบต่อวินาที (rps)

N = ความเร็วรอบการหมุนตัด มีหน่วยเป็น รอบต่อนาที (rpm)

$$N = \frac{120f}{P} \tag{2.14}$$

N ในที่นี้ คือ ความเร็วรอบของสนามแม่เหล็กหมุน (Synchronous Speed) เป็นความเร็วรอบของต้นกำลังที่ใช้ขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้หมุน เพื่อผลิตแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้ได้ความถี่ตามต้องการ

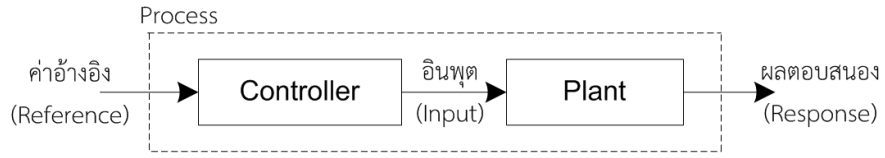
2.9 หลักการทำงานของระบบควบคุมความเร็วรอบของเครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพ

เครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพที่นำมาใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า (หรือเครื่องยนต์ต้นกำลัง) ต้องทำงานด้วยความเร็วรอบคงที่ และเพื่อป้องกันไม่ให้ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ต้นกำลังต่ำหรือสูงเกินกว่าการทำงานของเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า ดังนั้นต้องมีระบบควบคุมความเร็วรอบของเครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพให้ทำงานด้วยระบบอัตโนมัติ

ระบบควบคุมอัตโนมัติ (Automatic controller) ในบางครั้งจะเรียกว่าเป็นระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback controller) เป็นการดำเนินการที่พยายามลดค่าความแตกต่างระหว่างเอาต์พุตของระบบกับอินพุตอ้างอิงที่เกิดจากการรบกวน โดยระบบควบคุมอัตโนมัตินี้จะรับค่าสัญญาณจากตัวตรวจวัด (Sensor) แล้วนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่าอินพุตอ้างอิงที่ต้องการจากนั้นระบบจะทำการสร้างสัญญาณ (Control signal) เพื่อลดค่าความแตกต่าง และทำให้ระบบกลับเข้าสู่ค่าอินพุตอ้างอิงที่ต้องการ

2.9.1 ระบบควบคุมแบบเปิด หรือระบบควบคุมแบบไม่ป้อนกลับ (Open - loop control system, Non - feedback control system)

ในการควบคุมแบบวงรอบเปิด ตัวควบคุม (Controller) จะส่งสัญญาณป้อน (Input) ให้กับสิ่งที่ต้องการควบคุม (Plant) ตามคำสั่งหรือสัญญาณอ้างอิง (Command or referent) ที่รับมา โดยที่ตัวควบคุมจะอนุมานว่า เมื่อสิ่งที่ต้องการควบคุม (Plant) ได้รับสัญญาณป้อนมาจากตัวควบคุมแล้วนั้น ก็จะผลิตเอาท์พุตหรือผลตอบสนอง (Response) ให้ได้ตามที่คาดหมายไว้โดยที่ไม่ต้องทำการตรวจสอบสัญญาณเอาท์พุตจริง ว่าเป็นไปตามคำสั่งหรือไม่ ตัวอย่างเช่น ตู้อบไมโครเวฟที่มีลักษณะการปรับเปลี่ยนกำลังไฟฟ้า โดยที่ไม่มีการตรวจสอบว่ากำลังไฟฟ้าจริงที่ออกมาในรูปของสัญญาณไมโครเวฟนั้นว่าเป็นเท่าใดกันแน่ คือออกมาได้เท่ากับที่ได้ปรับตั้งไว้หรือไม่ ลักษณะการทำงานจึงเป็นวงรอบเปิด



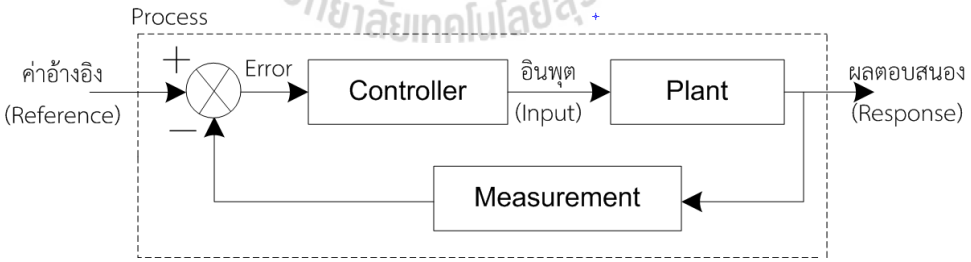
รูปที่ 2.25 ระบบควบคุมแบบวงเปิด

จากรูปที่ 2.25 แสดงระบบควบคุมแบบวงเปิด โดยประกอบด้วยตัวควบคุม (Controller) ระบบที่ต้องการควบคุม (Plant) โดยที่ตัวควบคุมจะรับคำสั่งจากอินพุตและทำการประมวลผลแบบอนุมานด้วยตัวเองจากนั้นส่งต่อคำสั่งไปยังระบบเพื่อให้ระบบผลิตเอาต์พุตตอบสนองออกมา โดยที่ไม่มีการตรวจสอบเอาต์พุตของระบบว่าได้ตามคำสั่งที่ป้อนให้หรือไม่

2.9.2 ระบบควบคุมแบบวงรอบปิด หรือระบบควบคุมแบบป้อนกลับ

(Closed loop control system, Feedback control system)

ในการควบคุมแบบวงรอบปิด ตัวควบคุม (Controller) จะทำการเปรียบเทียบสัญญาณอ้างอิงหรือคำสั่ง (Referent or Command) กับสัญญาณเอ้าท์พุทหรือผลตอบสนอง (Output or Response) ที่ป้อนกลับมาโดยตัวตรวจจับ (Measurement or sensor) แล้วนำไปสร้างสัญญาณป้อนหรืออินพุต (Input) ให้กับสิ่งที่ต้องการควบคุม (System under controlled or plant) เพื่อที่จะให้ผลิตเอาท์พุตหรือผลตอบสนองให้เป็นไปตามสัญญาณอ้างอิงที่ต้องการ (Command or Reference)



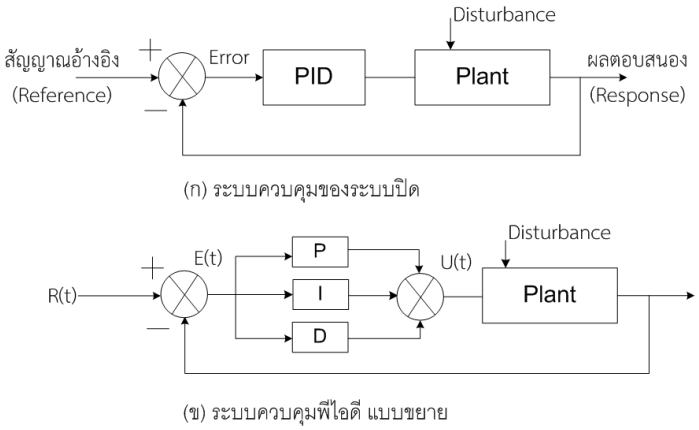
รูปที่ 2.26 ระบบควบคุมแบบวงรอบปิด

จากรูปที่ 2.26 แสดงการทำงานของระบบควบคุมแบบวงรอบปิด โดยที่ชุดควบคุม (Controller) จะรับค่าความผิดพลาด(Error) ของสัญญาณอ้างอิงหรือคำสั่ง (Referent of command) กับสัญญาณเอาต์พุตหรือผลตอบสนอง(Output or response) ที่ป้อนกลับมาโดยตัวตรวจจับ (Measurement or sensor) ที่ได้เป็นค่าความผิดพลาด (Error) แล้วตัวควบคุมจะนำไปสร้างสัญญาณป้อนหรืออินพุตอันใหม่ ให้กับระบบที่ต้องการควบคุม

2.10 คุณสมบัติของตัวควบคุม

ในปัจจุบันเทคโนโลยีระบบควบคุมได้รับการพัฒนาอย่างรวดเร็วอุปกรณ์แบบใหม่ ๆ ได้ถูกนำมาใช้ในงาน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและประสิทธิผลในการผลิต ระบบควบคุมส่วนใหญ่ในโรงงานอุตสาหกรรมยังคงเป็นแบบ P-only, PI ,PD หรือ PID และวิธีการควบคุมแบบ PID control เป็นส่วนหนึ่งของการควบคุมในระบบวงปิดหรือระบบควบคุมแบบป้อนกลับโดยการควบคุมแบบPID กลไกทั้งสามที่กระทำกับสัญญาณถูกรวมเข้าด้วยกัน เพื่อทำหน้าที่ปรุงแต่งสัญญาณอย่างเหมาะสม ให้เกิดผลเป็นการควบคุมระบบอย่างอัตโนมัติ ในการใช้งานตัวควบคุมอาจมีใช้กลไกทั้งสามพร้อมกันทีเดียวหรือ อาจใช้ "พี" แต่เพียงอย่างเดียว หรือใช้ "พีไอ" หรือ "พีดี" ควบคู่กันไปเป็นต้น ซึ่งตัวชดเชยแต่ละแบบต่างก็มีข้อดีของตัวเอง และเพื่อวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกันในการชดเชยพลวัตรของระบบ

การใช้งานระบบควบคุมพีไอดี จะต่ออนุกรมกับระบบที่ต้องการควบคุมจากนั้นนำผลที่ได้จากกระบวนการ หรือเอาท์พุตของระบบ ที่รับมาด้วยเครื่องตรวจจับสัญญาณ นำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิงได้ผลต่างออกมาเป็น Error เพื่อนำไปควบคุมสัญญาณเอาท์พุทให้มีค่าตามสัญญาณอ้างอิง ดังเช่นระบบควบคุมแบบปิดหรือระบบควบคุมแบบป้อนกลับ ดังแสดงในรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 ระบบควบคุมแบบปิดด้วยตัวควบคุมพีไอดี

$$u(t) = K_p\left(e(t) + \frac{1}{T_i}\int_0^t e(\tau) + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2.15)$$

โดยที่ $u(t)$ คือสัญญาณควบคุมของตัวคอนโทรลเลอร์พีไอดี $e(t)$ คือค่าความคลาดเคลื่อนของสัญญาณเปรียบเทียบระหว่างค่าเอาท์พุทของระบบกับสัญญาณสั่งการหรือสัญญาณอ้างอิง ระบบควบคุม พีไอดี จะประกอบไปด้วยส่วนการควบคุมที่สำคัญ 3 ส่วนด้วยกัน คือ ส่วนการควบคุมแบบ P (Proportional) การปรับสัดส่วนสัญญาณ, ส่วนการควบคุม I (Integral) การอินทิเกรตสัญญาณ, ส่วนการควบคุม D (Derivative) การอนุพันธ์สัญญาณ แต่ละแบบสามารถนำมาประกอบกันเพื่อให้ได้ตัวควบคุมที่ต้องการ โดยตัวควบคุมมีพารามิเตอร์ ที่สำคัญ 3 ตัวคือค่าอัตราขยายแบบสัดส่วน (K_P) ค่า Integral time (T_i) และ Derivative time (T_d) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.10.1 การควบคุมแบบสัดส่วน

การควบคุมระบบแบบป้อนกลับโดยใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วนเป็นเทคนิคที่ง่ายที่สุด หลักการคือสัญญาณควบคุม $u(t)$ จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าสัญญาณความผิดพลาด (Error) ที่เกิดจากผลต่างระหว่างค่าสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณเอาท์พุตของระบบที่ทำการควบคุมนั้น แสดงได้ดังรูปที่ 2.28

รูปที่ 2.28 ตัวควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional : P)

โดยความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณเอาท์พุตจากตัวควบคุมและสัญญาณความผิดพลาดที่ส่งเข้าไปในระบบเขียนได้ดังสมการที่ 2.16

$$u(t) = K_P e(t) \quad (2.16)$$

โดยที่ K_P คือค่าอัตราขยายของตัวควบคุมนี้หรือจะเรียกว่า เกนสัดส่วน และ $e(t)$ ความคลาดเคลื่อน = ค่าที่กำหนด - ค่าที่วัดได้จริง เทอมเกนสัดส่วน (บางครั้งเรียก อัตราขยาย) ผลอัตราขยายสัดส่วนที่สูง ระบบควบคุมก็จะเปลี่ยนแปลงมากเช่นกันแต่ถ้าสูงเกินไประบบจะไม่

เสถียรได้ในทางตรงกันข้าม ผลอัตราขยายสัดส่วนที่ต่ำ ระบบควบคุมจะมีผลตอบสนองเปลี่ยนแปลงต่อขบวนการน้อยตามไปด้วย

2.10.2 การควบคุมแบบอินทิกรัล

ผลตอบสนองของการควบคุมแบบสัดส่วนรวมกับการควบคุมแบบอินทิกรัล สามารถอธิบายได้ในสมการที่ 2.17

$$u(t) = K_P\left(e(t) + \frac{1}{T_i}\int_0^t e(\tau)\right) \tag{2.17}$$

เมื่อ T_i คือ Integral time (วินาที) และเปรียบเทียบกับสมการของตัวควบคุมแบบสัดส่วนความแตกต่างอยู่ตรงที่เทอมไบแอสนั่นคือตัวควบคุมแบบสัดส่วนถูกจำกัดด้วยส่วนไบแอสเป็นค่าคงที่ส่วนการควบคุมแบบอินทิกรัล มีการสะสมความคลาดเคลื่อนในการปรับแต่งไบแอส (ทำหน้าที่เป็นตัวอินทิกรัล) และจะหยุดสะสมเมื่อความคลาดเคลื่อนของระบบเป็นศูนย์ การทำงานในลักษณะเช่นนี้มีลักษณะคล้ายกับฟังก์ชันรีเซตด้วยมือ (Manual - Reset Function) ดังนั้นในบางครั้งจึงเรียกตัวอินทิกรัลว่าฟังก์ชันรีเซต (Reset Function) เทอมไบแอสของระบบควบคุมแบบอินทิกรัล จะมีค่ามากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับลักษณะของการรบกวนระบบ (Disturbance)

คุณสมบัติของตัวอินทิกรัลในการกำจัดความคลาดเคลื่อน (หรือออฟเซต) เป็นข้อดีอย่างมาก จึงเป็นที่นิยมใช้กับระบบควบคุมป้อนกลับ อย่างไรก็ตาม ตัวอินทิกรัลก็มีข้อเสียนั่นคือทำให้เกิดการล้าหลัง (Capacity - Like Lag) และทำให้ช่วงเวลาของการแกว่งยาวนานขึ้นโดยทั่วไประบบแบบสัดส่วนรวมกับอินทิกรัล จะมีช่วงเวลาของการแกว่งนานกว่าระบบเชิงสัดส่วนอย่างเดียว 50 % หรือ $T_{PI} = 1.5T_P$ สำหรับระบบที่มีค่าคงตัวเวลา (Time constant) น้อย (เช่น ระบบควบคุมอัตราการไหล ปัญหานี้จะไม่มีผลมากนัก แต่สำหรับระบบที่มีค่าคงตัวเวลามาก (เช่น ระบบควบคุมระดับ) ปัญหานี้อาจมีผลมาก จนทำให้ระบบเข้าสู่จุดวิกฤติที่ไม่สามารถยอมรับได้

การควบคุมแบบอินทิกรัล มีลักษณะเช่นเดียวกันกับการควบคุมสัดส่วนตรงผลกระทบของการเพิ่มอัตราขยายของตัวควบคุม หากอัตราขยายมีค่าเพิ่มมากเกินไปจะทำให้ผลการตอบสนองของระบบมีการแกว่ง โดยทั่วไป Integral Time ($T_i = 1/K_i$ sec โดยที่ K_i = repeats/sec) เป็นตัวแสดงว่าอัตราการตอบสนองของกระบวนการต่อสัญญาณการควบคุมค่า T_i ที่น้อยกว่า จะทำให้ตัวควบคุมมีการตอบสนองที่เร็วกว่าในระยะเริ่มต้น โดยที่ความคลาดเคลื่อนยังเป็นค่าบวกอยู่ ดังนั้นกว่าความคลาดเคลื่อนจะเป็นศูนย์ เทอมไบแอสก็จะมีค่าสูงกว่าที่ต้องการ ดังนั้นผลตอบสนองจึงเกิดส่วนพุ่งเกิน (Overshoot) สูงกว่าค่าที่กำหนด เป็นผลให้ตัวอินทิกรัลทำหน้าที่ปรับให้ความคลาดเคลื่อนมีค่าลดลง การใช้ตัวอินทิกรัลในการควบคุม ควรระวังในเรื่องของ

ความคลาดเคลื่อนขนาดใหญ่ (เช่น เกิดการเปลี่ยนแปลงค่ากำหนดขนาดใหญ่) เพราะจะทำให้เกิดปัญหา Integral Windup ถึงแม้ว่า T_i มีค่าถูกต้องในสภาวะการทำงานธรรมดา แต่สัญญาณควบคุมอาจถึงจุดอิ่มตัวขณะผลตอบสนอง เกิดส่วนพุ่งเกิน (Overshoot)

ข้อสรุปของตัวควบคุมอินทิกรัล

- ทำหน้าที่คล้ายกับ รีเซตด้วยมือ (Manual Reset) เพื่อกำจัดความคลาดเคลื่อน
- มีปัญหาการล้าหลังยังผลให้เกิดการหักล้างทางเวลาในตัวควบคุมจึงไม่เหมาะสมกับระบบที่มีค่าคงตัวเวลายาวนาน
- ทำให้ช่วงเวลาในการแกว่งยาวนานขึ้น

ในระบบควบคุม ค่าที่วัดได้และค่าที่กำหนดควรเป็นค่าเดียวกัน หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง ค่าความคลาดเคลื่อนในสภาวะอยู่ตัวควรเป็นศูนย์ ถ้ามีความคลาดเคลื่อนในสภาวะอยู่ตัว สัญญาณที่ออกจากตัวอินทิเกรต (เพิ่มขึ้น ด้วยอัตราคงที่ เมื่อสัญญาณเข้ามีค่าคงที่) ส่งต่อให้กับวงจรขยาย ความคลาดเคลื่อนเป็นสัญญาณเข้าของตัวควบคุมทั้งสัดส่วนและอินทิกรัล โดยสัญญาณออกจามารวมกันที่วงจรขยายและส่งสัญญาณไปควบคุมระบบตัวควบคุมจะทำให้ค่าที่วัดได้เพิ่มขึ้นจนเท่ากับค่าที่กำหนด นั่นคือทำให้ความคลาดเคลื่อนในสภาวะอยู่ตัวเป็นศูนย์อย่างไรก็ตาม หาก T_i มีค่าน้อยลง ผลตอบสนองอาจเกิดการแกว่งได้

2.10.3 การควบคุมแบบอนุพันธ์

ตัวควบคุมแบบสัดส่วนและแบบอินทิกรัล ต่างก็มีข้อจำกัดอยู่ที่ความคลาดเคลื่อนขนาดใหญ่ ซึ่งเป็นปัญหาต่อการควบคุมกระบวนการแต่ความคลาดเคลื่อนขนาดใหญ่นี้ สามารถรู้ได้ล่วงหน้าโดยพิจารณาจากแนวโน้มของความคลาดเคลื่อนหรืออัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณนั่นเอง ตัวอนุพันธ์มีหลักการทำงาน คือ ตัวควบคุมตอบสนองต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของความคลาดเคลื่อนถึงแม้ว่าความคลาดเคลื่อนยังมีค่าเล็กอยู่ สัญญาณออกของตัวอนุพันธ์ไม่ได้สัมพันธ์กับขนาดของความคลาดเคลื่อนแต่ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของความคลาดเคลื่อนถ้าความคลาดเคลื่อนมีค่าคงที่ตัวอนุพันธ์จะให้สัญญาณออกเป็นศูนย์ คุณลักษณะข้อนี้มีผลดีคือตัวควบคุมจะมีผลตอบสนองที่เกิดก่อนที่ความคลาดเคลื่อนจะเพิ่มมากขึ้นและทำให้ระบบมี ผลตอบสนองที่เร็วขึ้น ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.18

$$u(t) = K_P\left(e(t) + T_d\frac{de(t)}{dt}\right) \tag{2.18}$$

โดยที่ Derivative Time (T_d) เป็นเวลาที่แสดงถึงผลตอบสนองเนื่องจากตัวอนุพันธ์ การเพิ่ม T_d จะทำให้ผลตอบสนองของตัวอนุพันธ์มีค่ามากขึ้น เนื่องจากตัวอนุพันธ์มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงมาก ดังนั้นจึงนิยมใช้กับค่าที่วัดได้เท่านั้น แต่ไม่ใช้กับค่ากำหนด เพราะการเปลี่ยนค่ากำหนดมักจะเป็นแบบขั้น (Step) ทำให้ผลตอบสนองของตัวอนุพันธ์เป็นพัลส์และทำให้เกิดการกระแทก (Bump) ของอุปกรณ์ในกระบวนการ สำหรับค่ากำหนดใช้เฉพาะกับตัวควบคุมสัดส่วนและอินทิกรัล ตัวอนุพันธ์คือตัวควบคุมที่ก่อให้เกิดผลตรงข้ามกับตัวอินทิกรัล ดังนั้นจึงใช้ในการปรับปรุงกระบวนการที่มีการล้าหลังทางเวลา (Time Lag) มาก ๆ ทำให้ผลตอบสนองรวดเร็วขึ้นและช่วงเวลาการแกว่งที่สั้นลง ข้อเสียของตัวอนุพันธ์คือ มีความไวต่อสัญญาณรบกวนเป็นอย่างมาก เพราะมีผลตอบสนองโดยตรง ต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่วัดได้ดังนั้น แม้สัญญาณรบกวนจะมีขนาดเล็ก แต่ก็อาจก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่อสัญญาณออกของตัวควบคุมจึงเป็นไปไม่ได้ที่จะใช้ตัวอนุพันธ์ในการควบคุมผลของสัญญาณรบกวน ยิ่งไปกว่านั้นระบบใดที่มีสัญญาณรบกวนมาก จะไม่สามารถใช้ตัวอนุพันธ์ ในวงการอุตสาหกรรมส่วนใหญ่นิยมใช้เพียงตัวควบคุม PI เท่านั้น

ข้อสรุปของตัวควบคุมอนุพันธ์

- เหมาะสำหรับกระบวนการที่ล้าหลังทางเวลามากทำให้การควบคุมถึงจุดที่ต้องการเร็วขึ้น
- ถ้า T_d มากเกินไป ผลของตัวอนุพันธ์จะทำให้ผลตอบสนองไวขึ้นจนกระทั้งระบบอาจขาดเสถียรภาพได้
- ไม่เหมาะกับระบบที่มีตัวแปรกระบวนการเปลี่ยนแปลงได้ง่าย หรือมีการล้าหลังทางเวลาน้อย เพราะจะทำให้ระบบขาดเสถียรภาพ
- ไม่ควรใช้กับระบบที่มีสัญญาณรบกวนมาก
- ใช้ชดเชยการล้าหลังที่เกิดจากตัวอินทิกรัลด้วยการนำหน้า (Lead)ในตัวอนุพันธ์

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าที่กำหนดทันที ความคลาดเคลื่อนจะมีค่าเปลี่ยนแปลงอย่างทันที และส่งผลต่อผลตอบสนองของระบบ ถ้านำอนุพันธ์ของความคลาดเคลื่อนนั่นคืออัตราการเปลี่ยนแปลงของความคลาดเคลื่อนแล้วไปรวมกับสัญญาณที่ได้จากตัวควบคุมแบบสัดส่วนและอินทิเกรเตอร์ จะทำให้การทำงานของระบบดีขึ้น การควบคุมเชิงอนุพันธ์ไม่มีผลต่อความคลาดเคลื่อนในสภาวะอยู่ตัว แต่จะลดช่วงเวลาเข้าที่ (Settling Time) โดยจะลดการแกว่งให้น้อยลง

เมื่อเราใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID - Controller) ก็จะได้ผลการทำงานของทั้งตัวควบคุมพีดีและพีไอรวมกัน จะว่ากันตามจริงแล้ว การออกแบบตัวควบคุมพีไอดี อาจดำเนินการแบบรวดเดียว หมายถึงออกแบบองค์ประกอบทั้งสามส่วนไปด้วยกัน หรือดำเนินการแบบสองจังหวะก็ได้ ซึ่งหมายความว่า เราอาจเลือกออกแบบตัวควบคุมพีดีหรือพีไอตัวใดตัวหนึ่งเสียก่อนแล้วจึงออกแบบอีกตัวที่เหลือ ตัวควบคุมในขั้นตอนสุดท้ายก็จะเป็นการต่อเรียงกันของตัวควบคุมทั้งสองตัวเข้าด้วยกัน

2.11 ประเภทและหลักการทำงานของเครื่องอัดอากาศ

(Type and principle of operation of air-compressor)

โดยทั่วไปเครื่องอัดอากาศอาจแบ่งได้ 2 ประเภท คือ ประเภทปริมาตร และแบบไดนามิกส์

1) เครื่องอัดอากาศประเภทปริมาตรแทนที่เชิงบวก(Positive Displacement) มีหลักการทำงานคือ ให้อากาศเข้าไปในปริมาตรแล้วลดปริมาตรอากาศนี้ลงโดยใช้พลังงานจากภายนอก เมื่อปริมาตรของอากาศลดลงก็จะทำให้ความดันสูงขึ้น เครื่องอัดอากาศปริมาตรมีทั้งแบบลูกสูบและโรตารี่

2) เครื่องอัดอากาศประเภทไดนามิคส์ (Dynamics) มีหลักการทำงาน คือให้พลังงานกลกับอากาศทำให้อากาศมีความเร็วเพิ่มขึ้น โดยผ่านโรเตอร์แล้วอาศัยรูปร่าง Casing ภายในเครื่องอัดอากาศลดความเร็วลงทำให้พลังงานจลน์ของอากาศเปลี่ยนรูปเป็นความดันของอากาศ เครื่องอัดอากาศประเภทนี้ ได้แก่ Centrifugal compressor , Turbo compressor , Air jet

เครื่องอัดอากาศที่นิยมใช้โดยทั่วไปแบ่งได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

(1) เครื่องอัดอากาศแบบลูกสูบ (Reciprocating compressors)

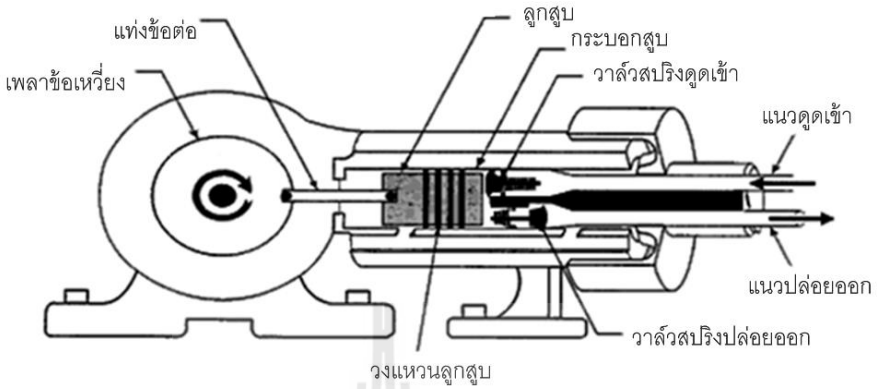
(2) เครื่องอัดอากาศแบบโรตารี่ (Rotary compressors)

(3) เครื่องอัดอากาศแบบหมุนเหวี่ยง (Centrifugal compressors)

2.11.1 เครื่องอัดอากาศแบบลูกสูบ (Reciprocating compressors)

เครื่องอัดอากาศประเภทนี้ ส่วนใหญ่จะมีขนาดเล็กใช้แหล่งต้นกำลังจากมอเตอร์หรือเครื่องยนต์ขนาดเล็ก โดยมีสายพานเป็นอุปกรณ์ถ่ายทอดกำลังไปสู่เครื่องอัดเพื่อให้ลูกสูบเคลื่อนที่อัดอากาศให้มีปริมาตรเล็กลง และความกดดันของอากาศสูงขึ้น อากาศอัดจะถูกส่งไปเก็บไว้ในถังลมก่อนที่จะนำไปใช้งานต่อไป เครื่องอัดอากาศประเภทนี้ส่วนใหญ่จะระบายความร้อนด้วยอากาศ ดังนั้นบริเวณรอบ ๆ เสื้อสูบของเครื่องอัดจึงทำเป็นแผ่นครีบ (Vane) เพื่อเพิ่มพื้นที่ในการระบายความร้อนให้มากยิ่งขึ้นการเคลื่อนที่ของลูกสูบในจังหวะอัดแต่ละครั้งจะทำให้อากาศหรือแก๊สเกิดการอัดตัวขึ้น และการไหลของอากาศอัดจะมีลักษณะเป็นแบบห้วง ๆ (Pulsation)

ไม่ต่อเนื่องกัน ซึ่งเป็นผลเสียต่อระบบท่อส่ง เพราะอาจทำให้เกิดความดันย้อนกลับ ณ จุดที่มีการหักเลี้ยวในระบบท่อส่งได้ ทำให้ท่อส่งได้รับความเสียหายในภายหลัง ดังรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.29 เครื่องอัดอากาศแบบลูกสูบ
(ที่มา McKane A. and Medaris B. 2003)

เนื่องจากในอากาศมีความชื้นหรือไอน้ำและฝุ่นละอองปะปนอยู่ด้วยไม่มากก็น้อยดังนั้น อากาศที่เข้าสู่เครื่องอัดอากาศจึงมีไอน้ำและฝุ่นละอองปะปนเข้าไปด้วย เมื่ออากาศถูกอัดตัวโมเลกุลของอากาศจะเกิดการเสียดสีกันทำให้อากาศที่ถูกอัดมีความร้อนสูง ดังนั้น อากาศที่ถูกอัดก่อนที่จะถูกนำไปยังถังอัดอากาศจึงต้องมีการระบายความร้อนออกเสียก่อน เพื่อป้องกันอันตรายจากความร้อน ซึ่งจะทำให้ชิ้นส่วนภายในเครื่องอัดอากาศได้รับความเสียหาย อากาศอัดตัวดังกล่าวเมื่อถูกนำไปเก็บในถังอัดอากาศก็ยังมีความร้อนเหลืออยู่ เมื่ออากาศอัดภายในถังอากาศเย็นตัวลง ก็จะทำให้ไอน้ำกลั่นตัวเป็นหยดน้ำอยู่ในถังอัดอากาศ ซึ่งจะก่อให้เกิดความเสียหายได้ในขณะที่นำอากาศไปใช้งาน ดังนั้นจึงต้องมีการระบายน้ำส่วนนี้ออกไปจากถังอัดอากาศ ก่อนที่จะมีการใช้งานอยู่เสมอทุกวัน

คุณสมบัติในการทำงานของเครื่องเป่าลม เครื่องอัดอากาศ หรือกังหันสามารถแสดงออกด้วยวิธีการเปรียบเทียบอย่างง่ายระหว่างข้อแตกต่างในการออกแบบ กับขนาดของอุปกรณ์ ซึ่งสามารถทำได้โดยการอธิบายลักษณะการทำงาน ในแง่ของขนาดที่เป็นตัวเลขและตัวแปรตามที่มีความสำคัญมากที่สุดคือ mass flow rate, component isentropic efficiency, และความแตกต่างของอุณหภูมิที่ผ่านอุปกรณ์ ซึ่งค่าต่างๆ เหล่านี้มีผลมากจากตัวแปรตามเหล่านี้ คือ ความดันที่สภาวะหยุดนิ่งขาเข้า และความดันที่สภาวะหยุดนิ่งขาออกหรือเป็นความดันที่สภาวะขาออก อุณหภูมิ

หยุดนิ่งที่สภาวะขาเข้า ความเร็วรอบ ขนาดของเครื่องอัดอากาศ ค่าคงตัวแก๊ส ค่า specific heat ratio ($\gamma = c_p / c_v$) และค่าความหนืดเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\dot{m}, \eta, \Delta T_0 = f\left(p_{0,in}, p_{0,out}, T_{0,in}, N, D, R, \gamma, \mu\right) \tag{2.19}$$

ด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบ Dimensional analysis มีตัวแปรต้น 8 ตัวที่สามารถลดรูปด้วย dimension analysis ได้เป็น 4 กลุ่มดังนี้ (การวิเคราะห์เชิงมิติ (Dimension analysis) เป็นวิธีการทางคณิตศาสตร์ ใช้ในการศึกษามิติของปริมาณต่างๆ โดยอาศัยหลักการที่ว่า "สมการใดๆ ที่มีความสัมพันธ์กันทางกายภาพ ปริมาณต่าง จะต้องมีมิติเท่ากันทั้ง 2 ข้าง")

$$\frac{\dot{m}\sqrt{RT_{0,in}}}{P_{0,in}D^2}, \eta, \frac{\Delta T_0}{T_{0,in}} = f\left(\frac{ND}{\sqrt{RT_{0,in}}}, \frac{P_{0,out}}{P_{0,in}}, \frac{\dot{m}}{\mu D}, \gamma\right) \tag{2.20}$$

ค่า Reynold number $\dot{m}/\mu D$ มีผลน้อยมากกับประสิทธิภาพและ specific heat ratio ถูกกำหนดด้วยชนิดของแก๊ส ดังนั้นปรับสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{\dot{m}\sqrt{RT_{0,in}}}{P_{0,in}D^2}, \eta, \frac{\Delta T_0}{T_{0,in}} = f\left(\frac{ND}{\sqrt{RT_{0,in}}}, \frac{P_{0,out}}{P_{0,in}}\right) \tag{2.21}$$

ในอุปกรณ์แต่ละชนิดค่า D และ R เป็นค่าคงที่ของแต่ละอุปกรณ์ ปรับสมการใหม่ได้ดังนี้

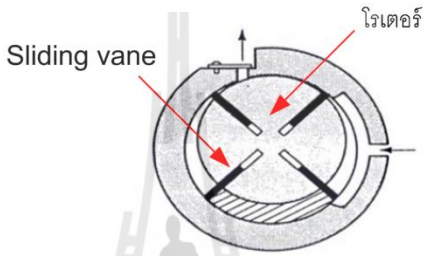
$$\frac{\dot{m}\sqrt{T_{0,in}}}{P_{0,in}}, \eta, \frac{\Delta T_0}{T_{0,in}} = f\left(\frac{N}{\sqrt{T_{0,in}}}, \frac{P_{0,out}}{P_{0,in}}\right) \tag{2.22}$$

$\dot{m}\sqrt{T_{0,in}}/P_{0,in}$ จะเรียกว่าเป็นเทอมการแก้ไขการไหลของมวล $N/\sqrt{T_{0,in}}$ เป็นเทอมการแก้ไขความเร็ว

2.11.2 เครื่องอัดอากาศแบบโรตารี่ (Rotary compressors)

2.11.2.1 เครื่องอัดอากาศแบบโรตารีหรือแบบลูกสูบหมุน (Sliding vane)

การทำงานโดยอัดอากาศอันเกิดจากการเคลื่อนที่ผลักดันของโรเตอร์ในลักษณะการแทนที่ของอากาศ อากาศอัดที่ได้จะมีอัตราการไหลอย่างสม่ำเสมอและปริมาณอากาศอัดที่ได้จะมีค่าความกดดันค่อนข้างต่ำกว่ามาก การหมุนของโรเตอร์ เพื่ออัดอากาศจะต้องหมุนด้วยความเร็วรอบที่สูงซึ่งจะก่อให้เกิดเสียงดังและชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ภายในจะมีอัตราการสึกหรอค่อนข้างสูง เครื่องอัดอากาศประเภทนี้แบ่งเป็นลักษณะย่อย ๆ ดังรูป 2.30



รูปที่ 2.30 เครื่องอัดอากาศแบบ Sliding vane

ในกรณี sliding vane compressor พบว่าตัวเรือนถูกตัดเป็นร่องลึกเพื่อรองรับใบพัดซึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้ ตัวโรเตอร์จะติดตั้งแบบเยื้องศูนย์ภายในตัวเรือน ขณะที่หมุนใบพัด แรงเหวี่ยงที่กระทำกับใบพัดบังคับให้อากาศออกไปจากตัวเรือน ดังนั้นถ้าทำการแบ่งส่วนโค้งออกเป็นหลายๆ ช่อง อากาศจะถูกดึงผ่านช่องขาเข้า ไปสู่ช่องว่างแต่ละช่องเป็นปริมาณที่เพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุด อากาศที่ถูกดึงเข้าไปถูกบีบอัดไปและทำให้ปริมาณช่องว่างลดลง ทำให้ความดันสูงขึ้นแล้วถูกส่งออกไปทางช่องขาออก

ความสามารถการไหลของ sliding vane compressor ขึ้นอยู่กับ ปริมาณการเหนี่ยวนำอากาศสูงสุด ซึ่งจะถูกกำหนดโดย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวเรือน เส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของโรเตอร์ ค่าการเยื้องศูนย์ จำนวนของใบพัด ขนาดของทางเข้าและทางออก

อัตราการไหลที่เกิดขึ้นจริง และการเพิ่มขึ้นของความดัน ที่ความเร็วคงที่จะลดลงตามการรั่วไหล นอกจากนี้การถ่ายโอนความร้อนจากการเคลื่อนย้ายใบพัดโรเตอร์และพื้นผิวของสเตเตอร์จะลดประสิทธิภาพการบีบอัดยกเว้นในกรณีที่มีการทำระบายความร้อนถูกนำมาใช้เพื่อนำพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจากแรงเสียดทานระหว่างใบพัดโรเตอร์และสเตเตอร์ ประสิทธิภาพเชิงปริมาตรสามารถเปลี่ยนได้ตั้งแต่ 0.6 ถึง 0.9 ขึ้นอยู่กับขนาดของเครื่อง คุณภาพของการออกแบบและวิธีการที่ใช้ในการหล่อลื่นและระบายความร้อน ปริมาตรที่แทนที่ V_D หาได้ดังนี้

$$V_D = \pi\varepsilon l(2r+\varepsilon) \tag{2.23}$$

โดย r คือรัศมีของโรเตอร์ ε คือระยะเยื้องศูนย์ l คือความยาวในแนวแกนของเครื่องอัดอากาศค่า พารามิเตอร์ของอัตราการไหลเชิงมวลได้ดังนี้

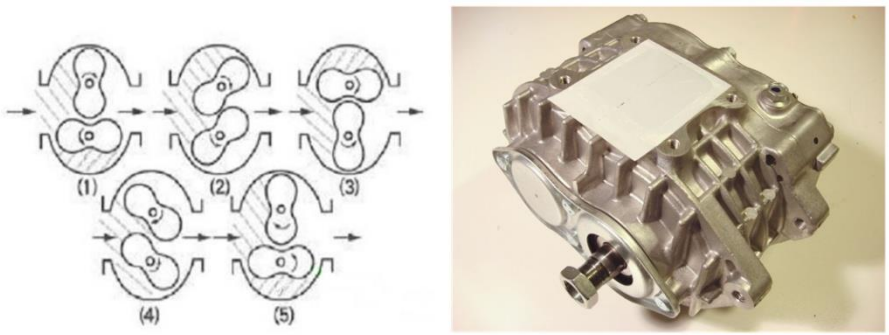
$$\dot{m}_{corr} = \frac{\dot{m}\sqrt{T_0/T_{std}}}{P_{0,in}/P_{std}} = const\,\rho_i\eta_v N\varepsilon l\left(2r+\varepsilon\right) \tag{2.24}$$

โดย η_v คือประสิทธิภาพเชิงปริมาตร N คือความเร็วรอบ (rev/sec) ตัวห้อย i คือทางเข้า 0 คือจุดหยุดนิ่ง std คือจุดที่ standard atmospheric การออกแบบของโรเตอร์ของเครื่องอัดอากาศจะเป็นแบบทรงกระบอกกลม โรเตอร์จะวางให้เยื้องศูนย์กับเสื้อ (casing) โรเตอร์จะมีร่องตามยาวกับแนวแกน ภายในร่องมีใบพัดตรง เมื่อโรเตอร์หมุน ใบพัดเหล่านี้จะถูกเหวี่ยงออกไป โดยที่ขอบของใบพัดสัมผัสกับเสื้อ ใบพัดนี้จะแบ่งช่องว่างระหว่างโรเตอร์กับเสื้อเป็นห้อง ๆ เมื่อโรเตอร์หมุนใบพัดหมุนตามไปด้วย เมื่อห้องหนึ่งหมุนมาตรงกับช่องอากาศเข้าอากาศจะเริ่มไหลเข้า เมื่อโรเตอร์หมุนต่อไปห้องนี้จะมีปริมาตรเล็กลง ขณะเดียวกันความดันอากาศก็จะสูงขึ้น (เมื่อปริมาตรลดลงความดันก็จะสูงขึ้น)

ปัญหาของเครื่องอัดอากาศแบบนี้อยู่ที่การสึกหรอ ซึ่งเกิดจากการเสียดสีของปลายใบพัดกับภายในเสื้อ ส่วนวัสดุที่ใช้ทำใบพัดตามปกติจะเป็นแผ่นเรซิน แต่สำหรับเครื่องขนาดเล็กจะเป็นเหล็กกล้าชุบเข็ง จำนวนใบพัดมีจำนวนมากที่สุดไม่เกิน 10 ถึง 12 ใบ เมื่อขับด้วยความเร็วสูงจะได้ความดันอากาศประมาณ 7 bar

2.11.2.2 เครื่องอัดอากาศแบบ Roots blower

รายละเอียดของเครื่องอัดอากาศแบบ Roots blower แสดงในรูปที่ 2.31 ในตัวเครื่อง จะมีโรเตอร์ 2 ตัวต่อกับชุดเกียร์โดยจะมีเกียร์ 2 ตัวขนาดเท่ากันทำให้โรเตอร์หมุนอย่างสอดคล้องกันและมีความเร็วเดียวกัน มีหลักการทำงานเป็นดังนี้ อากาศที่ถูกดักเอาไว้ติดอยู่ที่กลีบของใบพัดและตัวเรือนจะดำเนินการพาอากาศ ที่เริ่มจากการเปิดกลีบของใบพัดเพื่อทำการพาอากาศเข้าไปยังห้องจากนั้นเมื่อทางดูดเลื่อนปิด อากาศที่ถูกดักจะถูกอัดอย่างทันทีทันใด ด้วยการไหลย้อนกลับ (backflow) ด้วยแรงดันที่สูงจากสายการจัดส่งอากาศออกไป



รูปที่ 2.31 ขั้นตอนการทำงานของเครื่องอัดก๊าซชีวภาพ ชนิด Roots blower

การเลือกเครื่องอัดอากาศ มาดัดแปลงเป็นเครื่องอัดก๊าซชีวภาพเลือกแบบ Root blower เนื่องจากเครื่องอัดชนิด Reciprocating นั้นสามารถผลิตแรงดันได้สูง และได้อัตราการไหลเฉลี่ยที่เกือบคงที่ แต่การไหลที่ได้นั้นเป็นจังหวะ ในขณะที่เครื่องอัดชนิด Centrifugal นั้นผลิตแรงดันได้ต่ำ ถ้าต้องใช้แรงดันสูง ๆ เพื่อให้ได้อัตราการไหลที่สูงจะต้องใช้เครื่องอัดต่ออนุกรมกันหลายขั้นตอน ส่วนเครื่องอัดชนิด Roots blower จะอยู่ตรงกลางระหว่างสองกลุ่มนี้ คือให้ประสิทธิภาพที่สูงในช่วงความดันด้านขาออกที่ไม่สูงมาก และไม่ต่ำมากและให้อัตราการไหลที่ไม่เปลี่ยนไปแปลงไปมาก ตามการเปลี่ยนแปลงความดันด้านขาออก การเพิ่มความดันของ Roots blower นั้นอาศัยการขบกันของ rotor 2 ตัว ที่มีจำนวนใบพัดเท่ากัน ดังรูปที่ 3 แสดงหน้าตัดการทำงานของ roots blower ชนิดที่ rotor มี 2 ใบพัด ข้อดีของ roots blower คือการหมุนขบกันของ rotor นั้นไม่มีการใช้น้ำมันหล่อลื่น ทำให้อากาศที่ได้นั้นเป็นอากาศที่ปราศจากไอน้ำมันปนเปื้อน

เครื่องอัดอากาศแบบ Roots blower มีความเหมาะสมมากที่สุดสำหรับความดันขนาดเล็ก อัตราส่วนประมาณ 1.2 ประสิทธิภาพเชิงปริมาตราขึ้นอยู่กับช่องว่างของโรเตอร์ ความยาวของโรเตอร์ ความเร็วการหมุน และอัตราส่วนความดัน ปริมาตรของการหมุนแต่ละครั้งได้ดังนี้

$$V_R = 0.546R^2 l \tag{2.25}$$

โดย R คือรัศมีของตัวหมุน และ l คือความยาวของ blower

$$\dot{m}_{corr} = \dot{m}\frac{\sqrt{T_{amb}/T_{std}}}{P_{amb}/P_{std}} = const.\rho_i \eta_v NR^2 l \tag{2.26}$$

โดยที่ T_{amb} = อุณหภูมิโดยรอบ (k)

P_{amb} = ความดันโดยรอบ (atm)

R = รัศมีของตัวกลีบใบพัด (mm)

l = ความยาวของใบพัด (mm)

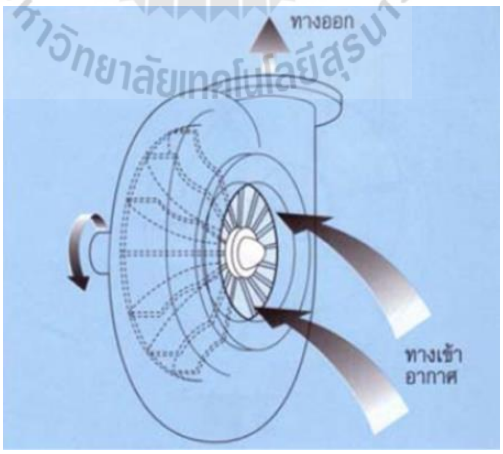
ρ_i = ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)

η_v = ประสิทธิภาพเชิงปริมาตร

N = ความเร็วรอบของเครื่องอัดอากาศ (rad/sec)

2.11.3 เครื่องอัดอากาศแบบหมุนเหวี่ยง (Centrifugal compressors)

เป็นเครื่องอัดอากาศที่ใช้หลักการทางด้านพลศาสตร์ ทำงานด้วยการเปลี่ยนพลังงานจลน์เป็นความกดดัน ทิศทางการเคลื่อนที่ของอากาศอัดจะถูกเหวี่ยงตัวออกไปในแนวรัศมี ลมดูดจะเข้าสู่แกนกลางเพลาใบพัดและถูกเหวี่ยงตัวออกไปในแนวรัศมีของใบพัดสู่ผนังเครื่องอัด และถูกส่งไปตามระบบท่ออากาศอัดจะมีความกดดันสูงขึ้นแต่ความเร็วยังคงที่ ดังรูปที่ 2.32 เมื่อเราต้องการอากาศอัดที่มีค่าความกดดันสูงมากขึ้น เราสามารถกระทำได้โดยการใช้เครื่องอัดอากาศหลายสเตจโดยที่อากาศอัดซึ่งได้จากการอัดในสเตจแรกจะถูกส่งต่อไปยังสเตจต่อไปและอัดอากาศให้ได้ความดันที่ต้องการ อากาศที่อัดได้ในแต่ละสเตจจะมีความร้อนสูงขึ้น ดังนั้นจึงต้องมีการระบายความร้อนออกจากอากาศอัดก่อนที่จะส่งอากาศอัดไปยังสเตจต่อ ๆ ไป



รูปที่ 2.32 เครื่องอัดอากาศแบบหมุนเหวี่ยง

ในกระบวนการเพิ่มความดันให้อากาศเครื่องอัดอากาศจะเพิ่มอุณหภูมิทางเข้าของอากาศด้วยโดยความร้อนที่เกิดจากการอัด นี่คือสิ่งที่ไม่ต้องการในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟ (SI Engine) ถ้าอุณหภูมิที่จุดเริ่มต้นของจังหวะการอัดมีค่าสูงทำให้อุณหภูมิที่อยู่ในส่วนอื่น ๆ ทั้งหมดของวัฏจักรมีค่าสูงตามไปด้วย อันนี้เองเป็นสาเหตุการทำให้เกิดการจุดระเบิดด้วยตัวเอง (self - ignition)

เพื่อหลีกเลี่ยงเหตุการณ์ดังกล่าว เครื่องอัดอากาศโดยส่วนใหญ่ จึงต้องติดตั้งอุปกรณ์เครื่องหล่อเย็น (aftercooler) เพื่อทำความเย็นให้กับอากาศที่ถูกอัดเพื่อทำให้อุณหภูมิของอากาศลดลง เครื่องทำความเย็นสามารถเป็นได้ทั้งเครื่องถ่ายเทความร้อนจาก อากาศไปสู่อากาศ หรือการถ่ายเทความร้อนระหว่างอากาศกับของไหล

อุณหภูมิอากาศจะลดลงหลังผ่านเครื่องทำความเย็นมักจะใช้แสดงในเทอมของประสิทธิภาพได้กำหนดเป็นอัตราส่วนของปริมาณอุณหภูมิที่ลดลง ต่ออุณหภูมิที่สามารถลดลงได้มากที่สุดเพื่อนำไปสู่ความเย็นของของไหลไปสู่อุณหภูมิของสารหล่อเย็น

$$C_c = \frac{T_1 - T_2}{T_1 - T_w} \tag{2.27}$$

โดยที่ T_1 = อุณหภูมิบรรยากาศ (ambient) ขาเข้าของอากาศ

T_2 = อุณหภูมิบรรยากาศ (ambient) ขาออกของอากาศ

T_w = อุณหภูมิของสารหล่อเย็นที่ทางเข้า

C_c = Cooler effectiveness

ในกรณีที่เครื่องทำความเย็นไม่จำเป็นต้องใช้สำหรับเครื่องอัดอากาศที่ใช้ในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด (CI Engine) เพราะว่าไม่มีความเกี่ยวข้องกับการ น้อคของเครื่องยนต์ เครื่องทำความเย็นนั้นมีค่าใช้จ่ายและใช้พื้นที่ว่างภายในห้องเครื่องยนต์ ด้วยเหตุผลเหล่านี้เครื่องอัดอากาศที่อยู่ในรถยนต์บางรุ่นไม่จำเป็นต้องมีเครื่องทำความเย็นและเครื่องยนต์ลักษณะนี้มักจะใช้การลดอัตราส่วนการอัดเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาที่เกิดจากการ self - ignition การจุดระเบิดด้วยตัวเอง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.12 การซูเปอร์ชาร์จ

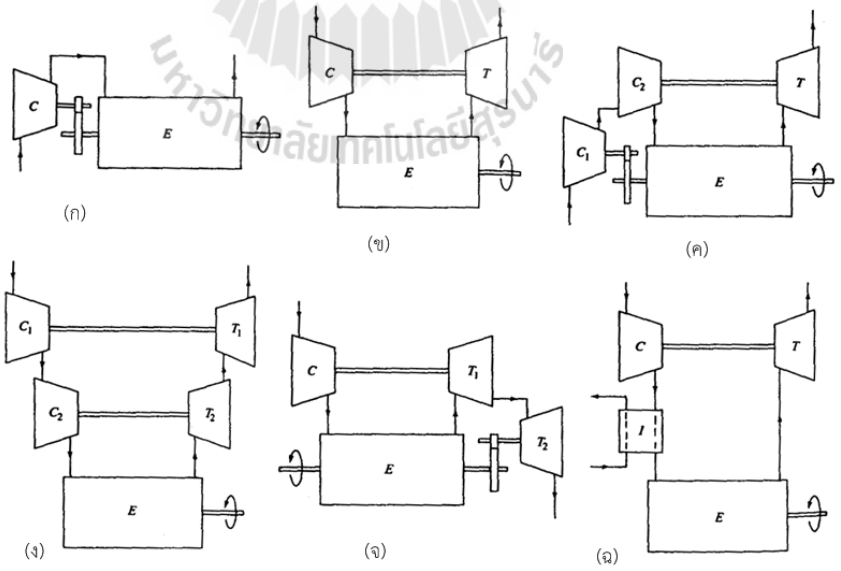
กำลังสูงสุดที่เครื่องยนต์เครื่องหนึ่งสามารถให้ได้จะถูกจำกัดโดยปริมาณเชื้อเพลิงที่สามารถเผาไหม้ได้อย่างมีประสิทธิภาพภายในกระบอกสูบ ซึ่งปริมาณเชื้อเพลิงนี้จะถูกจำกัดโดยปริมาณอากาศที่ถูกนำเข้าไปในแต่ละสูบ ในแต่ละวัฏจักร ดังนั้นถ้าอากาศที่ถูกนำเข้าถูกอัดให้มีความหนาแน่นมากกว่าอากาศโดยรอบก่อนที่จะเข้าไปในกระบอกสูบ เครื่องยนต์ขนาดความจุของกระบอกสูบเท่าเดิมก็สามารถให้กำลังสูงสุดได้มากขึ้น การเพิ่มความหนาแน่นของอากาศ (หรือสารผสม) โดยการเพิ่มความดันก่อนเข้าไปในกระบอกสูบนี้เรียกว่าการซูเปอร์ชาร์จ (supercharging) วิธีพื้นฐานของการซูเปอร์ชาร์จมีอยู่ 2 วิธี ดังนี้

2.12.1 การซูเปอร์ชาร์จทางกล (mechanical supercharging)

จะใช้ปั๊มเครื่องเป่าลม (blower) หรือเครื่องอัดอากาศ (compressor) ที่แยกต่างหาก (ซึ่งตามปกติแล้วจะถูกขับเคลื่อนโดยใช้กำลังจากเครื่องยนต์) เพื่ออัดอากาศหรือสารผสม

2.12.2 การเทอร์โบชาร์จ (turbocharging)

จะใช้เทอร์โบชาร์จเจอร์ (turbocharger) ซึ่งประกอบ ด้วยเครื่องอัดอากาศและกังหัน (turbine) ที่อยู่บนเพลาเดียวกัน เพื่อเพิ่มความหนาแน่นของอากาศ (หรือสารผสม) โดยพลังงานที่มีอยู่ในไอเสียที่ไหลออกจะถูกนำไปใช้ในการขับเคลื่อนกังหัน ซึ่งจะไปขับเครื่องอัดอากาศเพื่ออัดอากาศ (หรือสารผสม) ต่อไป



รูปที่ 2.33 รูปแบบของการซูเปอร์ชาร์จและการเทอร์โบชาร์จ

จากรูปที่ 2.33 แสดงรูปแบบของการซูเปอร์ชาร์จและการเทอร์โบชาร์จแบบต่าง ๆ การซูเปอร์ชาร์จถูกใช้ในเครื่องยนต์สี่จังหวะเพื่อเพิ่มกำลังต่อหน่วยปริมาตรกระจัด ซึ่งถ้ามีการเพิ่มความดันขึ้นอีก กำลังของเครื่องยนต์ก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย (ก) การซูเปอร์ชาร์จทางกล (ข) การเทอร์โบชาร์จ (ค) เครื่องอัดอากาศถูกขับเคลื่อนด้วยเครื่องยนต์และเทอร์โบชาร์จเจอร์ (ง) การเทอร์โบชาร์จสองตอน (จ) การเทอร์โบชาร์จกับการเทอร์โบคอมพาวนด์ (turbocompounding) (ฉ) เทอร์โบชาร์จเจอร์พร้อมด้วยเครื่องหล่อเย็น โดย C = เครื่องอัดอากาศ, E = เครื่องยนต์, I = เครื่องหล่อเย็น, T = กังหัน

2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วงศ์วิวรรธ ธนูศิลป์ และ คณะ (2555) ศึกษาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จากก๊าซชีวภาพโดยใช้ถ่านกัมมันต์และเหล็ก ซึ่งได้เลือกใช้ก๊าซชีวภาพที่สามารถผลิตได้จาก จากการหมักวัตถุดิบเหลือทิ้งทางการเกษตรได้ทำการทดสอบแยกการกำจัดโดยใช้ ถ่านกัมมันต์ (AC) ขี้กลึงเหล็กปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก (FH) ขี้กลึงเหล็กไม่ปรับสภาพ (FA) ถ่านกัมมันต์ร่วมกับขี้กลึงเหล็กไม่ปรับสภาพ (AF) ในคอลัมน์ตัวกลางสูง 10 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร จากนั้นทำการตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Biogas Analyser พบว่าความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ลดลงเหลือเท่ากับ 937.5, 1,187.4, 358.8 และ 610.7 มิลลิกรัมต่อลิตร ของวัสดุดูดซับ AC, FH, FA และ AF ซึ่งจากงานวิจัยข้างต้นพบว่าวัสดุดูดซับขี้กลึงเหล็กไม่ปรับสภาพ (FA) มีประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์สูงสุด

Sanel Galijasevic และคณะ (2011) ได้ทำการศึกษาการหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยวิธี Parameter Estimation ซึ่งอยู่ในโปรแกรม Matlab/Simulink โดยใช้ความสัมพันธ์กันระหว่าง ความต่างศักย์ของขดลวดอาร์เมเจอร์เป็นอินพุทและความเร็วรอบเชิงมุมเป็นเอาท์พุท จากนั้นทำการสร้างระบบควบคุมความเร็วรอบแบบพีไอ โดยใช้คำสั่ง Signal constrain ซึ่งอยู่ในโหมด Simulink Response Optimization เพื่อหาค่า K_p, K_i ของระบบควบคุม

Heywood, John B. (2015) ในบทที่ 6 ได้เขียนอธิบายเกี่ยวกับการจำแนกชนิดของเครื่องอัดอากาศ การใช้งานที่เหมาะสมของเครื่องอัดอากาศแต่ละชนิดเครื่องอัดชนิดเช่น Reciprocating นั้นสามารถผลิตแรงดันได้สูง และได้อัตราการไหลเฉลี่ยที่เกือบคงที่ แต่การไหลที่ได้นั้นเป็นจังหวะ ในขณะที่เครื่องอัดชนิด Centrifugal นั้นผลิตแรงดันได้ต่ำ ถ้าต้องใช้แรงดันสูงๆ เพื่อให้ได้อัตราการไหลที่สูงจะต้องใช้เครื่องอัดต่ออนุกรมกันหลายขั้นตอน ส่วนเครื่องอัดชนิด Roots blower จะอยู่ตรงกลางระหว่างสองกลุ่มนี้ คือให้ประสิทธิภาพที่สูง ในช่วงความดันด้านขาออกที่ไม่สูงมาก

และไม่ต่ำมากและให้อัตราการไหลที่ไม่เปลี่ยนไปแปลงไปมาก รวมถึงที่มาของสมการปริมาตรการกระจัด (Displacement volume) และอัตราการไหลของอากาศ (Mass flow rate) ของเครื่องอัดอากาศแต่ละชนิด

Miss S. S. Salaskar และ Dr. K. H. Inamadar (2012) นำเสนอการศึกษาการสร้าง twin lobe roots blower โดยใช้ เพลาเหล็ก ได้กล่าวว่า เครื่องอัดอากาศแบบ roots blower มีประสิทธิภาพสูงมากและมี อัตราส่วนกำลังอัดอยู่ที่ 1.1 ถึง 1.2 และมักจะใช้กับการทำอัตราการไหลให้คงที่และปรับเปลี่ยนค่าความดัน โดยทั่วไปที่ใช้กันอยู่มีความสามารถประมาณ 2.7 lite/sec ถึง 2700 lite/sec และความดันสามารถทำได้ถึง 0.98 bar ในกรณีใช้ supercharge เพียง 1 เครื่อง และอธิบายการทำงานว่า จะถูกขับด้วยเพลาด้านหนึ่งซึ่งติดอยู่กับแหล่งพลังงานภายนอกและส่งผ่านไปขับเกียร์ที่ด้านหลังแบบ spur gear จึงทำให้ lobe ทั้ง 2 หมุนด้วยความเร็วเดียวกันในทิศทางตรงข้ามกันได้ ทดสอบพบว่าการปรับเปลี่ยนการออกแบบของเพลาก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในการออกแบบ ตัวเรือนเครื่องอัดอากาศ, แขน, แบริ่ง ฯลฯ กลีบใบพัดและเพลาสามารถกลึงแยกต่างหากซึ่งจะช่วยให้มีความยืดหยุ่นในการผลิตมากขึ้น เมื่อเพลาในการหมุนถูกถอดออกเพื่อแก้ไข ก็ยังสามารถใช้กลีบใบพัดอันเดิมได้

Blekhman, David I., และ Mollendorf, Joseph C. (2004). ได้ศึกษาปริมาตรควบคุมของเครื่องอัดอากาศ Roots blower โดยส่วนมากเครื่องอัดอาอากาศที่พบจะมีใบพัดเพียง 2 หรือ 3 ใบแต่ก็มีถึง 4 ใบพัดในทางทฤษฎีเท่านั้น และการทำงานเครื่องอัดอากาศจะมีทางเข้าและทางออกของอากาศต้องตั้งฉากกับผิวของใบพัดเสมอ ได้อธิบายถึงปริมาตรควบคุมที่เปลี่ยนแปลงของเครื่องอัดอากาศโดยที่ยอดของใบพัดกับพื้นผิวด้านข้างของใบพัดจะแยกออกจากกันด้วยระยะห่างเล็กน้อย (Clearance) และระยะห่างนี้เองจะเปลี่ยนแปลงทุกครั้งที่มีการหมุนของใบพัด และระยะห่างทำให้การทำงานของเครื่องอัดอากาศไม่มีน้ำมันจึงได้อากาศที่สะอาดและปราศจากการเจือปนของน้ำมัน และพบว่าเมื่ออัตราส่วนของความดันเพิ่มขึ้นทำให้อัตราส่วนของอุณหภูมิของอากาศเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย

Jiang Yao-hua และคณะ (2009) ได้ศึกษาระบบการทำงานเครื่องยนต์ 2 แบบ โดยแบ่งเป็น 1) เครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้าเชื้อเพลิงคู่ ดีเซลกับไบโอก๊าซ แบบที่ 2) เครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้าไบโอก๊าซแบบจุดระเบิดด้วยประกายไป ได้บอกว่าก๊าซชีวภาพมีสัดส่วน มีเทน 55-75% และมีคาร์บอนไดออกไซด์ 24-44 % และกล่าวว่าถ้าปริมาณ คาร์บอนไดออกไซด์มีมากขึ้นจะทำให้การเผาไหม้ลดลง ในทางเดียวกันเมื่อลูกสูบใช้ไบโอก๊าซในการเผาไหม้ โดยที่เครื่องยนต์เชื้อเพลิงคู่ ไบโอก๊าซ-ดีเซล มีการทำงานโดยที่จะทำการผสมไบโอก๊าซกับอากาศด้วยตัวผสม (mixer) แล้วนำเข้าท่อไอดี และเมื่อถุงจังหวะจุดระเบิดจะฉีดน้ำมันดีเซลออกมาเพียงเล็กน้อย

และเมื่อน้ำมันดีเซลเกิดการเผาไหม้ทำให้ไบโอก๊าซเกิดการเผาไหม้ตามทันที โดยปริมาณการนำน้ำมันดีเซลไปใช้ในระบบเชื้อเพลิงคู่ประมาณ 8-20 % แต่มีข้อระวังว่าเมื่อไบโอก๊าซเริ่มจะหมดเครื่องเชื้อเพลิงคู่จะทำงานที่ดีเซลอย่างเดียวไม่ได้ดังนั้นต้องคอยระมัดระวังในกรณีที่ ไบโอก๊าซเหลือน้อย แต่เชื้อเพลิงคู่มีข้อดีคือใช้ปริมาณเชื้อเพลิงดีเซลที่น้อยในการจุดชนวน และอธิบายข้อเสียของการใช้ไบโอก๊าซ คือ ระยะเวลาในการเผาไหม้ช้า และไอเสียมีอุณหภูมิสูงมาก โดยเสนอวิธีแก้ดังนี้ 1) ทำให้ห้องเผาไหม้เกิดการหมุนวนแบบปั่นป่วนที่สุด 2) การเพิ่มปริมาณมีเทนให้สูงขึ้น 3) ใช้ท่อคายไอเสียที่ทนความร้อนได้ 60 °C ขึ้นไป

นายประเทือง ฝั้นแก้ว (2551) นำเสนอการดัดแปลงเครื่องเบนซินเพื่อใช้ก๊าซชีวภาพโดยทำการอัดอากาศผสมกับก๊าซชีวภาพให้มีความดันและมีอุณหภูมิสูงแล้วจุดระเบิดด้วยหัวเทียน โดยเราต้องเปลี่ยนอัตราส่วนการอัด (Compression ratio) ของเครื่องยนต์ให้ได้ประมาณ 10-12 จะต้องทำการเปลี่ยนจากคาร์บูเรเตอร์ ที่ผสมน้ำมันกับอากาศมาเป็น venture gas mixture หรือเครื่องผสมระหว่างก๊าซชีวภาพกับอากาศโดยการดัดแปลงนี้ทำให้เครื่องยนต์มีประสิทธิภาพลดลง 20%

ณทพร จินดาประเสริฐ (2544). ได้ศึกษาเครื่องยนต์ 1600 ซีซี 4 สูบ จุดระเบิดด้วยประกายไฟทำการดัดแปลงให้เหลือเพียงสูบเดียวและใช้เชื้อเพลิงก๊าซชีวภาพ โดยมีสัดส่วนคาร์บอนไดออกไซด์ 17-50 % ในสภาวะการทดสอบที่ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที ผลการศึกษาพบว่า เมื่อสัดส่วนคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซชีวภาพมีค่าเพิ่มมากขึ้นทำให้ส่วนผสมมีเทนถูกเจือจางมากขึ้นและความหนาแน่นมีเทนมีค่าลดลงทำให้ได้กำลังที่ลดลง และประสิทธิภาพทางความร้อนลดลง ต้องการมุมจุดระเบิดที่มากขึ้น การเผาไหม้มีลักษณะที่ช้าลง ช่วงการก่อตัวของเปลวไฟและช่วงการลามของเปลวไฟใช้เวลายาวนานขึ้น

ศุทธินี ตุ้ยเต็มวงค์ (2553). ได้ศึกษาการพัฒนาอุปกรณ์ควบคุมปริมาณก๊าซอัตโนมัติสำหรับเครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพโดยใช้เครื่องยนต์ ดีเซล 4 จังหวะ 4 สูบ 2500 ซีซี ทำการสร้างชุดประกอบควบคุมปริมาณก๊าซชีวภาพที่ใช้ในการควบคุมปริมาณก๊าซชีวภาพก่อนส่งเข้าท่อไปดี เพื่อให้สามารถปรับแต่ปริมาณก๊าซชีวภาพได้เหมาะสมกับการเผาไหม้ โดยใช้การเปลี่ยนแปลงพื้นที่นมหนูของก๊าซชีวภาพ ด้วยระบบควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ ผลการทดสอบพบว่าอุปกรณ์ควบคุมสามารถควบคุมการจ่ายปริมาณก๊าซชีวภาพให้กับเครื่องยนต์ได้ และการควบคุมอัตโนมัตินี้จะขึ้นอยู่กับขนาดของเข็มปรับปริมาณก๊าซชีวภาพ ขนาดท่อนำก๊าซและคาร์บูเรเตอร์เครื่องยนต์

Prashant S. Daingade และ S. D. Yadav (2013) ได้ทำการศึกษาระบบการทำงานของแหล่งจ่ายเชื้อเพลิงด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์สำหรับควบคุมอัตราส่วนอากาศกับเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพ เนื่องจากระบบเครื่องยนต์ 4 จังหวะจุดระเบิดด้วยประกายไฟ มีมลพิษของไอเสียที่ปล่อยออกมาสูงมาก เนื่องมาจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ เค้าได้ทำการพัฒนาระบบควบคุม

เชื้อเพลิงเพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ โดยชุดควบคุมใช้ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 12 โวลต์ ในการควบคุมโซลินอย์วาล์ว ซึ่งถูกควบคุมด้วยระบบไฟฟ้าและได้ทำการเปรียบเทียบระหว่างระบบที่ไม่มีชุดควบคุมทางไฟฟ้ากับระบบที่มีชุดควบคุมทางไฟฟ้าพบว่า ระบบที่มีการควบคุมอัตราส่วนอากาศกับเชื้อเพลิงมีการคายมลพิษลดลง และยังสามารถเพิ่มกำลังให้กับเครื่องยนต์

Feng-Chi Hsieh และคณะ (2007) ศึกษาถึงระบบควบคุมที่สามารถปรับตัวเองได้ตามพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงในขณะความเร็วรอบเดินเบา โดยใช้เครื่องยนต์ 1200 ซีซี สี่จังหวะจุดระเบิดด้วยประกายไฟโดยใช้แบบจำลองเครื่องยนต์ออกเป็น 3 ส่วนคือ 1) แบบจำลองการไหลของอากาศ 2) แบบจำลองแรงบิดของเครื่องยนต์ 3) แบบจำลองการหมุนของเครื่องยนต์

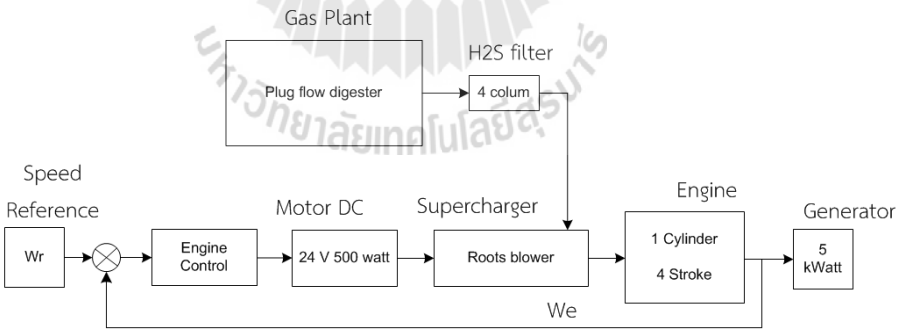
2.14 สรุป

จากปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องได้นำเสนอการนำก๊าซชีวภาพไปใช้งานกับเครื่องยนต์เบนซินโดยทำการเปรียบเทียบการใช้เชื้อเพลิงเบนซินกับการใช้เชื้อเพลิงก๊าซชีวภาพโดยใช้คาร์บูเรเตอร์ ทำการทดสอบโดยใช้อัตราส่วนของมีเทน 100 %, 80 %, 70 %, 60 % และ 50% กับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ นำไปทดสอบพบว่า กำลังที่ได้จากเครื่องและประสิทธิภาพของเครื่องยนต์มีค่าลดลงเมื่อส่วนผสมของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น ดังนั้นการรักษาปริมาณก๊าซมีเทนให้คงที่มีผลกับกำลังและประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ ด้วยการเพิ่มความหนาแน่นของก๊าซชีวภาพให้กับเครื่องยนต์เพื่อเพิ่มกำลังของเครื่องยนต์ให้ใกล้เคียงกับการใช้น้ำมันเบนซิน โดยในงานวิจัยฉบับนี้ได้ทำการออกแบบระบบอัดก๊าซชีวภาพโดยการควบคุมเครื่องอัดอากาศให้มีปริมาณของก๊าซชีวภาพที่สัมพันธ์กับความเร็วรอบที่เครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้าต้องการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 3
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในการออกแบบระบบควบคุมความเร็วรอบของเครื่องยนต์เบนซินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า โดยใช้ก๊าซชีวภาพด้วยเครื่องอัดอากาศนั้น จะใช้มอเตอร์กระแสตรง (DC motor) เพื่อเป็นตัวกระตุ้น (Actuator) ให้กับเครื่องอัดอากาศเพื่อให้เครื่องอัดอากาศนำก๊าซชีวภาพไปใช้อย่างเพียงพอต่อความต้องการของเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าที่ความเร็วรอบตามที่เครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าต้องการเมื่อมีโหลดมากระทำ ในการออกแบบระบบควบคุมนั้น มีความจำเป็นอย่างมากที่ต้องหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบโดยรวมทั้งหมด ดังนั้น ต้องทำการหาแบบจำลองระบบเครื่องยนต์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และเครื่องอัดอากาศ ตามลำดับ เพื่อนำมาใช้ในการออกแบบระบบควบคุมความเร็วรอบเครื่องยนต์ และใช้สำหรับการวิเคราะห์โดยทำการวัดตัวแปรต่าง ๆ จากผลการทดลองเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และอธิบายผลของการตอบสนองของระบบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงภาระกรรมในขณะเครื่องยนต์ทำงาน แสดงได้ดังรูปที่ 3.1



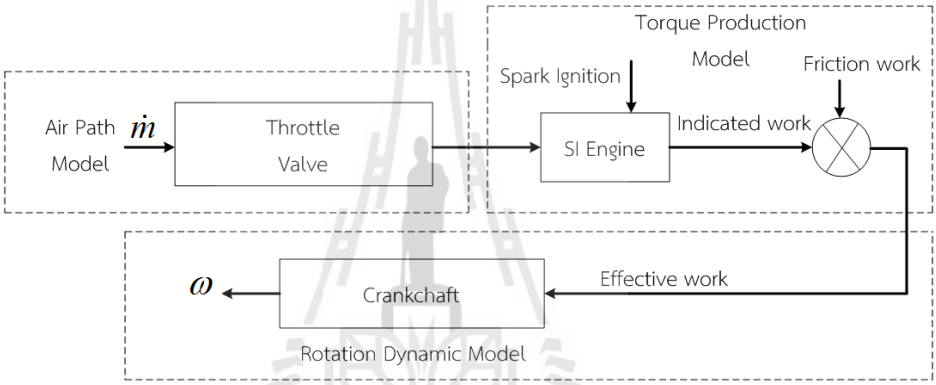
รูปที่ 3.1 โครงสร้างระบบควบคุมเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า

เมื่อทำการสร้างแบบจำลองของระบบ ขั้นต่อไปเราจะใช้แบบจำลองของระบบในการประมาณค่า แบบจำลองระบบ (Parameter Estimation) เป็นเครื่องมือช่วยในการหาค่าตัวแปรของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ โดยทำการวัดค่าอินพุทและเอาท์พุทของระบบ แล้วนำค่า

ข้อมูลเหล่านี้ไปทำการวิเคราะห์หาค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่สำคัญของระบบ เพื่อใช้ในการประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบควบคุมความเร็วรอบเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งประกอบไปด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้า (เครื่องยนต์เบนซิน) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เครื่องอัดอากาศ

3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องยนต์เบนซิน (Gasoline engine)

ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องยนต์เบนซินเป็นต้นกำลังเพื่อส่งกำลังให้กับเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า โดยที่เครื่องยนต์เบนซินมีแบบจำลองโครงสร้างระบบประกอบด้วย ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 โครงสร้างเครื่องยนต์เบนซิน

3.1.1 แบบจำลองสมการอัตราการไหลของมวลอากาศ (Air path model)

อัตราการไหลของมวลอากาศผ่านลิ้นปีกผีเสื้อโดยปกติจะอธิบายด้วยสมการสำหรับการไหลแบบยุบตัวผ่านคอคอด เมื่ออัตราส่วนความดันผ่านลิ้นเร่งมากกว่าค่าวิกฤต $\left(P_T/P_o = 0.528\right)$ อัตราการไหลจะได้เป็นดังสมการ 3.1

$$\dot{m}_{ai} = \frac{C_d A_{th} P_{amb}}{\left(RT_{amb}\right)^{1/2}} \left(\frac{P_{man}}{P_{amb}}\right)^{1/\gamma} \left\{\frac{2\gamma}{\gamma - 1}\left[1 - \left(\frac{P_{man}}{P_{amb}}\right)^{(\gamma-1)/\gamma}\right]\right\}^{1/2} \tag{3.1}$$

โดย C_d = สัมประสิทธิ์อัตราการไหล

R = ค่าคงที่ของแก๊สอุดมคติ (J/mol-K)

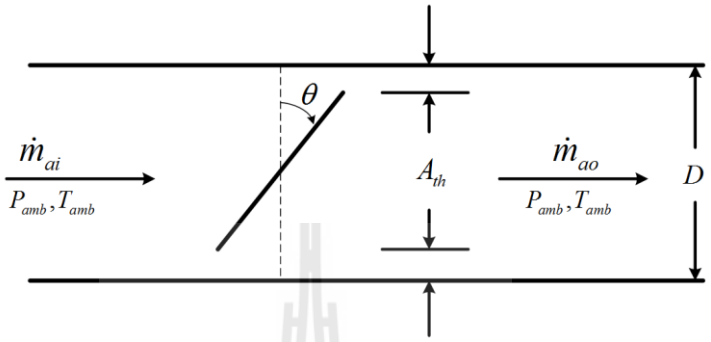
A_{th} = พื้นที่หน้าตัดของลิ้นปีกผีเสื้อที่ให้อากาศไหลผ่าน (m^2)

P_{amb} = ความดันในสภาวะนิ่ง (N/m^2)

T_{amb} = อุณหภูมิในสภาวะนิ่ง (K)

P_{man} = ความดันที่คอคอด (N/m^2)

γ = อัตราส่วนของความร้อนจำเพาะ $\left[\gamma = C_p / C_v\right]$



รูปที่ 3.3 ภาพพื้นที่หน้าตัดของลิ้นปีกผีเสื้อที่ให้อากาศไหลผ่าน

จากรูปที่ 3.3 สามารถประมาณพื้นที่หน้าตัดของลิ้นปีกผีเสื้อที่ให้อากาศไหลผ่าน $\left(A_{th}\right)$ แสดงได้ดังนี้

$$A_{th} = \pi \frac{D^2}{4} - \pi \frac{D^2}{4} \frac{\cos\theta}{\cos\theta_0} \tag{3.2}$$

เมื่อ D = เส้นผ่านศูนย์กลางของลิ้นปีกผีเสื้อ (m)

θ = องศาของลิ้นปีกผีเสื้อที่เปลี่ยนไป (degree)

θ_0 = องศาของลิ้นปีกผีเสื้อเริ่มต้น (degree)

เมื่ออัตราการไหลของมวลอากาศผ่านลิ้นปีกผีเสื้อการไหลเกิดการโช้กขึ้น จะได้ดังสมการที่ 3.3

$$\frac{P_{man}}{P_{amb}} \le \left[2/\left(\gamma+1\right)\right]^{\gamma(\gamma-1)} \tag{3.3}$$

เมื่ออัตราส่วนความดันมากกว่าอัตราส่วนวิกฤตการไหลที่ลิ้นเร่งก็จะเกิดการโช้ก (สภาวะที่ของไหลมีความเร็วเท่ากับความเร็วเสียง) และจะได้อัตราการไหลของมวลอากาศเป็น

$$\dot{m}_{ai} = \frac{C_d A_{th} P_{amb}}{\left(RT_{amb}\right)^{1/2}} \gamma^{1/2} \left\{ \frac{2\gamma}{\gamma - 1} \right\}^{(\gamma+1)/2(\gamma-1)} \tag{3.4}$$

การไหลของอากาศที่เข้าและออกจากท่อไอดีอาจอธิบายโดยการใช้ตัวแบบ ซึ่งมีอยู่หลายแบบ โดยแบบที่ง่ายแบบหนึ่งก็คือตัวแบบการเติมเข้าและถ่ายออก (Filling and Emptying model) ซึ่งสมมุติให้ความดันในท่อไอดีที่เวลาหนึ่ง ๆ สม่ำเสมอ และจากสมการความต่อเนื่องของอากาศที่ไหลเข้าและออกจากท่อไอดีก็จะได้ดังนี้

$$\frac{dm}{dt} = \dot{m}_{ai} - \sum \dot{m}_{ao} \tag{3.5}$$

เมื่อ m_{man} = มวลของอากาศในท่อไอดี (kg)

$\dot{m}_{ai}$ = อัตราการไหลของมวลอากาศเข้าท่อร่วมไอดี (kg/s)

$\dot{m}_{ao}$ = อัตราการไหลของมวลอากาศที่เข้าไปในแต่ละกระบอกสูบ (kg/s)

สมมุติให้อุณหภูมิของอากาศคงตัว แล้วใช้กฎของแก๊สอุดมคติสำหรับการไหลแก๊สในท่อ $\left(P_{man}V_{man} = m_{man}RT_{man}\right)$ สมการที่ 3.5 เขียนใหม่ดังนี้

$$\frac{dP_{man}}{dt} = \frac{RT_{man}}{V_{man}}\left(\dot{m}_{ai} - \dot{m}_{ao}\right) \tag{3.6}$$

สมการข้างบนนี้จะใช้สำหรับวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความดันในท่อไอดี

โดย P_{man} = ความดันในท่อร่วม (N/m^2)

T_{man} = อุณหภูมิในท่อร่วม (K)

V_{man} = ปริมาตรของท่อร่วมไอดี (m^3)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.1.2 แบบจำลองสมการแรงบิดของเครื่องยนต์ (Torque production model)

เมื่ออัตราการไหลของมวลเชื้อเพลิง $\left(\dot{m}_f\right)$ มีความสัมพันธ์กับอัตราการไหลของมวลอากาศออกจากท่อร่วมไอดี $\left(\dot{m}_{ao}\right)$ ซึ่งสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\dot{m}_f = \frac{\dot{m}_{ao}}{\lambda . L_{th}} \tag{3.7}$$

โดย $\dot{m}_f$ = อัตราการไหลของมวลเชื้อเพลิง (Kg/s)

$\dot{m}_{ao}$ = อัตราการไหลของมวลอากาศขาออก (Kg/s)

λ = The air/fuel equivalence

L_{th} = The stoichiometric air/fuel

ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์จะถูกใช้เป็นตัวชี้วัดโดยรวมของประสิทธิภาพของเครื่องยนต์วัฏจักรแบบสี่จังหวะและระบบการนำอากาศเข้าและระบบการนำอากาศออกเป็นอุปกรณ์ในการสูบอากาศถูกกำหนดเป็นดังนี้

$$\dot{m}_{ao} = \frac{V_d \eta_v P_{man} N}{120 R T_{man}} \tag{3.8}$$

V_d = ปริมาตรกระบอกสูบ

V_s = swept volume

N = engine speed (rpm)

n = จำนวน cylinder

η_v = ประสิทธิภาพเชิงปริมาตร

R = ค่าคงที่ของแก๊ส 8.314 ($J\text{-}K^{-1}\text{-}Mol^{-1}$)

เนื่องมาจากค่าสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเป็นค่าที่มีหน่วย ทำให้ไม่สะดวกในการนำไปใช้ จึงได้มีการกำหนดค่าที่ใช้วัดประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ในรูปของค่าที่ไม่มีหน่วย เป็นอัตราส่วนระหว่าง งานที่ได้ต่อวัฏจักรกับพลังงานที่เชื้อเพลิงที่ใส่เข้าไปต่อวัฏจักร

$$\dot{m}_f = \frac{\dot{m}_{ao}}{\lambda L_{th}} \tag{3.9}$$

ปรับสมการ (3.8) กับ (3.9) ใหม่ได้ดังนี้

$$\dot{m}_f = \frac{V_d \eta_v P_{man} N}{120 R T_{man} \lambda L_{th}} \tag{3.10}$$

แรงบิดบ่งชี้ $\left(T_i\right)$ เป็นแรงที่ได้จากการสันดาปน้ำมันเชื้อเพลิง

$$T_i = \frac{Q_{HV} \eta_i \dot{m}_f}{\omega} \tag{3.11}$$

จากสมการ (3.6), (3.10) และ (3.11) ปรับสมการจะได้สมการแรงบิดบ่งชี้ ดังนี้

$$T_i = \frac{Q_{HV} \eta_i \eta_v V_d}{4\pi R \lambda L_{th} T_{man}} P_{man} \tag{3.12}$$

$$T_i = \frac{Q_{HV} V_d \eta_i \eta_v}{4\pi R \lambda L_{th} T_{man}} SI\left(\phi\right) p_{man} \tag{3.13}$$

อย่างไรก็ตามถ้ามีการหมุนของเพลาข้อเหวี่ยงจะเกิดแรงเสียทาน $\left(T_f\right)$ เข้ามาในระบบ ดังนั้นค่าแรงบิดที่มีประสิทธิผลของเครื่องยนต์ $\left(T_e\right)$ จะได้

$$T_e = T_i - T_f \tag{3.14}$$

เมื่อแทนสมการที่ (3.13) ในสมการที่ (3.14) ได้ดังนี้

$$T_e = \frac{Q_{HV} V_d \eta_i \eta_v}{4\pi R \lambda L_{th} T_{man}} SI\left(\phi\right) p_{man} - T_f \tag{3.15}$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.1.3 แบบจำลองสมการการหมุนของเครื่องยนต์ (Rotation dynamic model)

พลศาสตร์การหมุนของเครื่องยนต์ได้จากกฎข้อที่ 2 ของ Newton

$$I_e\dot{\omega} = T_e - T_l - b\omega \tag{3.16}$$

โดย T_l = แรงบิดภาระกรรมภายนอก (N-m)

b = ความหน่วงของระบบการหมุนของเครื่องยนต์ (N-m-sec/rad)

$\dot{\omega}$ = ความเร่งเชิงมุมของเครื่องยนต์ (rad/sec^2)

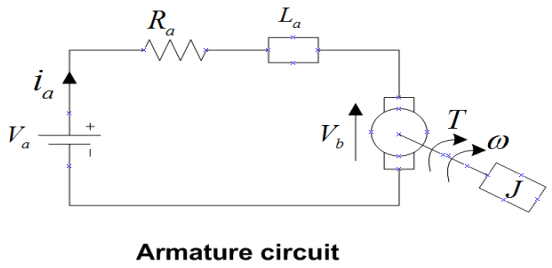
I_e = ความเฉื่อยในการหมุนของเครื่องยนต์ (kg-m^2)

T_e = ค่าแรงบิดที่มีประสิทธิผล (N-m)

ในทางปฏิบัติการควบคุมความเร็วรอบของเครื่องยนต์เบนซินจะทำการปรับตำแหน่งลิ้นปีกผีเสื้อโดยมีมนุษย์เป็นผู้ควบคุม แต่สำหรับเครื่องยนต์เบนซินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเครื่องอัดก๊าซชีวภาพจะทำการ ควบคุมความเร็วรอบของเครื่องยนต์เบนซินด้วยการควบคุมความเร็วรอบของเครื่องอัดอากาศเพื่อส่งก๊าซชีวภาพให้ได้ปริมาณตามที่เครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าต้องการ เนื่องจากในการผลิตกระแสไฟฟ้านั้นจะใช้ความเร็วรอบของเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าให้คงที่

3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์กระแสตรง

ในงานวิจัยนี้ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและควบคุมด้วยวิธี Armature Control โดยใช้การปรับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ให้กับวงจรอาร์เมเจอร์ (Armature Circuit) เพื่อควบคุมความเร็วรอบ โดยให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่ให้กับวงจรสนาม (Field Circuit) คงที่จึงสามารถพิจารณาเฉพาะวงจรอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเนื่องจากกระแสที่ให้กับวงจรสนามมีค่าคงที่ทำให้สนามแม่เหล็กของมอเตอร์มีค่าคงที่ไปด้วย การควบคุมจะทำโดยการปรับเปลี่ยนค่าความต่างศักย์ที่ให้กับวงจรอาร์เมเจอร์



รูปที่ 3.4 แผนภาพวงจรอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

จากรูปที่ 3.4 เมื่อจ่ายแรงดันให้ขดลวดอาร์เมเจอร์ จะทำให้เกิดกระแสไหลผ่านขดลวดตัวนำทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กรอบตัวนำนั้น แล้วไปเจอกับเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดสนามแม่เหล็กทำให้เกิดแรงต้านและเสริมกันของเส้นแรงแม่เหล็กทั้งสอง ทำให้มอเตอร์หมุนและนำไปใช้งานต่อไป ในการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์แบบ armature control จะทำการปรับแรงดัน ที่ให้กับวงจรขดลวดอาร์เมเจอร์เพื่อปรับความเร็วรอบของมอเตอร์และให้แรงดันที่ให้กับวงจรสนามมีค่าคงที่

3.2.1 สมการทางไฟฟ้า

สมการที่เทียบเท่ากับวงจรของระบบสามารถอธิบายโดยใช้ Kirchoff's voltage law รอบวงจรไฟฟ้า ซึ่งแสดงผลรวมของแรงดันไฟฟ้าโดยรวมของลูปต้องมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังแสดง

$$V_a - V_{Ra} - V_{La} - V_b = 0 \tag{3.17}$$

จากกฎโอห์ม แรงดันไฟฟ้าข้ามผ่านความต้านทานสามารถแสดงได้ดังนี้

$$V_{Ra} = i_a R_a \tag{3.18}$$

โดยที่ i_a คือกระแสของขดลวดอาร์เมเจอร์ และแรงดันไฟฟ้าที่ข้ามผ่านขดลวดเหนี่ยวนำเป็นสัดส่วนในการเปลี่ยนแปลงของกระแสผ่านขดลวดโดยเทียบกับเวลาสามารถเขียนได้ดังนี้

$$V_{La} = L_a \frac{d}{dt} i_a \tag{3.19}$$

L_a คือขดลวดเหนี่ยวนำของขดลวดอาร์เมเจอร์ ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำย้อนกลับหาได้ดังนี้

$$V_b = k_b \omega_a \tag{3.20}$$

โดยที่ V_b เป็นค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำย้อนกลับและ k_b ค่าคงที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ω_a เป็นความเร็วรอบการหมุนของขดลวดอาร์เมเจอร์ นำสมการแทนค่าใหม่ได้ดังนี้

$$V_a - i_a R_a - L_a \frac{d}{dt} i_a - k_b \omega_a = 0 \tag{3.21}$$

โดย V_a = ความต่างศักดิ์ของอาร์เมเจอร์ (V)

k_b = ค่าคงที่ของ electromotive force (V-sec/rad)

R_a = ความต้านทานของอาร์เมเจอร์ (Ω)

L_a = ความเหนี่ยวนำของอาร์เมเจอร์ (H)

ω_a = ความเร็วรอบของแกนอาร์เมเจอร์ (rad/sec)

3.2.2 สมการทางกล

แสดงการสมดุลพลังงานของระบบ เป็นผลรวมของแรงบิดของมอเตอร์ต้องเท่ากับศูนย์ แสดงได้ดังรูปที่ 3.5

$$T_{em} - T_f - T_j - T_L = 0 \tag{3.22}$$

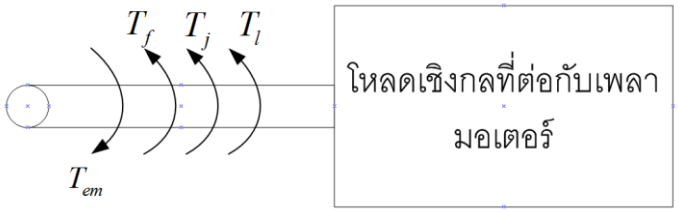
โดยที่ T_{em} = แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์

T_f = แรงบิดที่เกิดจากแรงเสียดทาน

T_j = แรงบิดที่เกิดจากความเฉื่อยของโหลด

T_L = แรงบิดของภาระทางกล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3.5 แรงบิดที่กระทำกับมอเตอร์

โดยแรงบิดของแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นสัดส่วนของกระแสที่ไหลผ่านขดลวดอาร์เมเจอร์ เขียนสมการได้ดังนี้

$$T_{em} = k_t i_a \tag{3.23}$$

เนื่องจากเป็นการนำแรงบิดของมอเตอร์มาใช้ต่อกับโหลดภายนอกทางกล โดยที่ k_t เป็นค่าคงที่แรงบิดของมอเตอร์ (ค่าขึ้นอยู่กับขนาดพิกัดมอเตอร์) คล้ายกับค่าคงที่ k_v ซึ่งขึ้นกับความหนาแน่นของฟลั๊กแม่เหล็กถาวรค่าความต้าน ทานของแกนแท่งเหล็กและจำนวนของการพันขดลวดอาร์เมเจอร์ T_j

$$T_j = J\frac{d}{dt}\omega_a \tag{3.24}$$

โดยที่ J เป็นความเฉื่อยของโรเตอร์และเทียบเท่ากับภาระทางกลแรงบิดที่เกี่ยวข้องกับความเร็วของมอเตอร์มีสมการดังนี้

$$T_f = c\omega_a \tag{3.25}$$

โดยที c สัมประสิทธิ์การหน่วงที่เกี่ยวข้องกับระบบการหมุนทางกลของมอเตอร์ ปรับสมการใหม่ได้ดังนี้

$$k_t i_a - J\frac{d}{dt}\omega_a - c\omega_a - T_L = 0 \tag{3.26}$$

โดย k_t = ค่าคงที่ของแรงบิด (N-m/A)

J = โมเมนต์ความเฉื่อย ($kg.m^2$)

c = ความหน่วงของระบบการหมุนของมอเตอร์ (N-m-sec/rad)

3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เครื่องอัดอากาศ

ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องอัดอากาศชนิด Roots blower ในการเปลี่ยนความเร็วรอบที่รับมาจากมอเตอร์ไฟฟ้าเป็นอัตราการไหลก๊าซชีวภาพ เพื่อรักษาความเร็วรอบเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าให้ได้ 3200 รอบต่อนาที ตามที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 เราจะได้สมการอัตราการไหลก๊าซชีวภาพดังนี้

$$\dot{m}_{corr} = \dot{m}\frac{\sqrt{T_{amb}/T_{std}}}{P_{amb}/P_{std}} = const.\rho_i\eta_v NR^2 l \tag{3.27}$$

เมื่อ $\dot{m}_{corr}$ = อัตราการไหลของอากาศ (kg/s)

ρ_i = ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)

η_v = ประสิทธิภาพเชิงปริมาตร

N = ความเร็วรอบของเครื่องอัดอากาศ (rad/sec)

R = รัศมีของตัวกลีบใบพัด (mm)

l = ความยาวของใบพัด (mm)

ในทางปฏิบัติตัวแปรของแบบจำลองเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและเครื่องอัดอากาศที่ใช้ในงานวิจัยนั้นไม่สามารถวัดค่าได้ครบทุกตัวแปร ดังนั้นหากมีความจำเป็นต้องการทราบค่าตัวแปรเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการออกแบบระบบควบคุม สามารถทำได้ด้วยวิธีการประมาณค่าของตัวแปร (Parameter Estimation) ที่ไม่สามารถวัดค่าได้โดยการวัดค่าอินพุทและเอาท์พุทของระบบที่ต้องการจะประมาณค่าตัวแปร โดยหลักการประมาณค่าตัวแปรจะนำความแตกต่างระหว่างเอาท์พุทที่ได้จากผลการทดลองและเอาท์พุทที่ได้จากแบบจำลองมาเปรียบเทียบกันเพื่อลดค่าความผิดพลาดของระบบและเปรียบเทียบให้ได้ค่าตัวแปรของระบบที่เหมาะสม ในงานวิจัยนี้ใช้การประมาณค่าของระบบด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดที่ไม่เป็นเชิงเส้น

3.4 การประมาณค่าของระบบโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear least squares method)

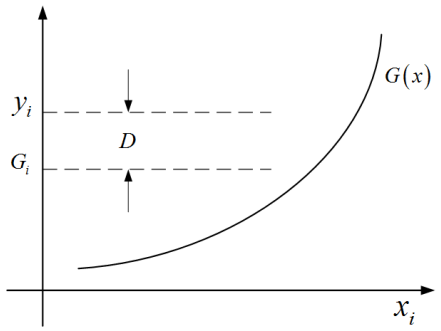
สำหรับรายงานวิจัยฉบับนี้ได้มีการประยุกต์ใช้วิธีการประมาณค่าโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดแบบไม่เป็นเชิงเส้นด้วยโปรแกรม Simulink Parameter Estimation ของโปรแกรม MATLAB ซึ่งใช้ในการหาค่าตัวแปรของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบควบคุมความเร็วรอบของเครื่องยนต์เบนซินด้วยระบบปิด (Close loop) ที่มีตัวควบคุมแบบพีไอ (PI-Controller) โดยลักษณะของการทำงาน Simulink Parameter Estimation คือการเก็บข้อมูลจากทางด้านอินพุตและด้านเอาท์พุต แล้วนำไปวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Math model) ของระบบที่เราต้องการ

การประมาณค่าฟังก์ชันโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด จะได้ฟังก์ชันที่เป็นตัวแทนที่ดีที่สุดของข้อมูล เพราะได้จากการเฉลี่ยค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลให้เหลือน้อยที่สุด ดังนั้น เมื่อเขียนเส้นกราฟของฟังก์ชัน เส้นกราฟจะผ่านไปในบริเวณจุดต่าง ๆ ของข้อมูล โดยจะตัดผ่านจุดของข้อมูลบางจุด โดยการประมาณค่าด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดจะได้เส้นกราฟผ่านไปในบริเวณจุดต่าง ๆ ของข้อมูล เพื่อทำให้เส้นกราฟที่ได้มีลักษณะราบเรียบ (smooth) ใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด

หลักการของวิธีกำลังสองน้อยที่สุดมีดังนี้ ถ้ามีข้อมูล x, y ทั้งสิ้น n ชุด ให้ฟังก์ชันที่ประมาณค่าของข้อมูลชุดนี้เป็น G(x) โดยที่ G(x) อยู่ในรูป

$$G(x) = a_1 g_1(x) + a_2 g_2(x) + \ldots + a_m g_m(x) \tag{3.28}$$

โดยที่ $m \le n$ และ $g_1(x), g_m(x)$ เป็นฟังก์ชันที่ขึ้นอยู่กับค่า x อาจจะอยู่ในรูปพหุนาม (polynomial) รูปลอการิทึม หรือเอ็กซ์โพเนนเชียล สมการ 3.28 จะสมบูรณ์ได้ก็ต่อเมื่อทราบค่า $a_1, a_2, \ldots a_m$ โดยหาค่าสัมประสิทธิ์เหล่านี้ได้จากการทำให้ค่าเบี่ยงเบนของข้อมูลกับค่าประมาณที่ได้จากฟังก์ชัน $G(x)$ มีค่าน้อยที่สุด จากรูปที่ 3.6 ค่าความแตกต่างของข้อมูลชุดที่ i คือ $y_i - g_i(x)$ เมื่อหาค่าแตกต่างของข้อมูลทุกชุดแล้ว นำค่าแตกต่างเหล่านี้ แล้วยกกำลังสองเพื่อขจัดเครื่องหมายลบ แล้วนำค่ามารวมกันจะได้



รูปที่ 3.6 แสดงหาค่าเบี่ยงเบนของวิธีกำลังสองน้อยที่สุด

$$D = \sum_{i=1}^{n} \left[y_i - G\left(x_i\right) \right]^2 \tag{3.29}$$

ค่าสัมประสิทธ์ $a_1, a_2, \ldots a_m$ จะเป็นตัวแปรเพราะเมื่อค่าเหล่านี้มีค่าต่าง ๆ กัน ฟังก์ชัน $G(x)$ จะเป็นฟังก์ชันที่แตกต่างกันออกไป แต่ต้องการหาค่า $a_1, a_2, \ldots a_m$ เหล่านี้ที่มีเงื่อนไขทำให้เกิดค่า D ที่มีค่าน้อยที่สุดจากแคลคูลัสเราจึงได้

$$\frac{\partial D}{\partial a_1} = 0, \frac{\partial D}{\partial a_2} = 0, \ldots \frac{\partial D}{\partial a_n} = 0 \tag{3.30}$$

3.4.1 ขั้นตอนการประมาณค่าตัวแปรของระบบ

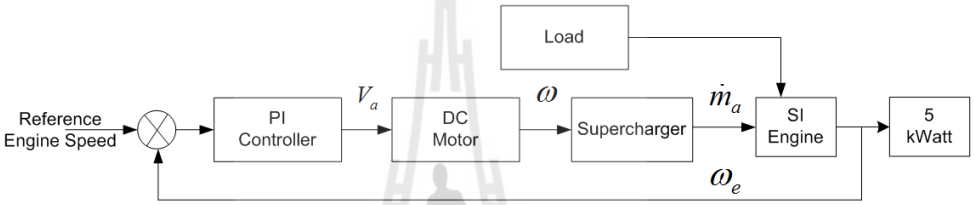
ในทางปฏิบัติตัวแปรของระบบจะมีทั้งที่สามารถวัดค่าได้และที่ไม่สามารถวัดค่าได้โดยตรง เราจึงต้องทำการประมาณค่าตัวแปรของระบบควบคุมความเร็วรอบของเครื่องยนต์ทั้งในส่วนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและเครื่องยนต์เบนซิน ซึ่งการประมาณค่าจะใช้โปรแกรม MATLAB ในกรณีของการประมาณค่าตัวแปรในส่วนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยกำหนดค่าอินพุตเป็นแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์และค่าเอาท์พุตเป็นค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ จากนั้นนำค่าอินพุตกับเอาท์พุตที่ได้ไปทำการประมาณหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ไม่ทราบค่าในระบบ โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. โดยใช้โปรแกรม MATLAB ในการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า และเก็บค่าในรูปแบบไฟล์ Excel

2. ระบบที่พิจารณามีตัวแปรทั้งหมด 12 ตัวแปรแบ่งเป็น 3 ชุดดังนี้ ชุดที่ 1 เป็นชุดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง คือ La, Ra, J, c, k_t, k_b ชุดที่ 2 เป็นชุดของเครื่องอัดก๊าซชีวภาพ คือ

$const, \rho_i$ และชุดที่ 3 ของเครื่องยนต์เบนซิน คือ V_{man}, T_f, I_e, b ทำการประมาณค่าตัวแปรโดยนำค่าจากแบบจำลองเปรียบเทียบกับค่าแรงดันของมอเตอร์และค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ได้จากการทดลองจะถูกรับเข้ามาเป็นข้อมูลอินพุตและเอาท์พุตเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับค่าเอาท์พุตของแบบจำลอง ในขั้นตอนการประมาณค่าตัวแปรของระบบ สำหรับวิธีการใช้งาน Parameter Estimation ได้แสดงไว้ใน ภาคผนวก

3. สร้างแบบจำลองระบบควบคุมความเร็วรอบของเครื่องยนต์ ในระบบควบคุมแบบปิดและมีตัวควบคุมแบบพีไอ พร้อมทั้งอินพุตและเอาท์พุตในโปรแกรม MATLAB ในส่วนของ Simulink ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แผนภาพแบบจำลองระบบควบคุมความเร็วรอบเครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพใน Simulink

ในการระบุเอกลักษณ์ค่าตัวแปรต่าง ๆ นั้นเพื่อที่จะให้ค่าที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกับระบบควบคุมความเร็วรอบของเครื่องยนต์เบนซินนั้นจะต้องมีการกำหนดขอบเขตความเป็นไปได้ของตัวแปรต่าง ๆ ซึ่งขอบเขตเหล่านั้นจะกำหนดตามลักษณะของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและเครื่องยนต์เบนซินดังนี้

ค่าตัวแปรของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีดังต่อไปนี้

L_a คือ ความเหนี่ยวนำของอาร์เมเจอร์ ค่าความเหนี่ยวนำจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับจำนวนของขดลวด ถ้าขดลวดมีปริมาณมาก ค่าความเหนี่ยวนำก็จะมากตามไปด้วย ซึ่งค่าความเหนี่ยวนำจะแปรผันตรงกับจำนวนขดลวด

R_a คือ ความต้านทานของอาร์เมเจอร์ เป็นเหตุของการทำให้เกิดแรงเคลื่อนตกคร่อมเฟสซึ่งจะทับเฟสหรือตกคร่อมเฟสเดียวกับกระแสไฟฟ้าในอาร์เมเจอร์

J คือ โมเมนต์ความเฉื่อยในการหมุนของมอเตอร์ เป็นค่าที่ได้จากการรักษาสภาพเดิมของการหมุนเอาไว้ โดยค่าโมเมนต์ความเฉื่อยจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับมวล ระยะจากมวลไปยังแกนหมุนของมอเตอร์

k_t คือ ค่าคงที่ของแรงบิด การเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้าทำให้เกิดการเคลื่อนไหวในช่องว่างอากาศระหว่างสเตเตอร์กับโรเตอร์เพื่อสร้างแรงบิด

k_b คือ ค่าคงที่ของ Electromotive Force ขณะที่ขดลวดอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงกำลังเคลื่อนที่ผ่านสนามแม่เหล็ก จะเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นบนขดลวดนั้น แรงดันไฟฟ้านี้มีแนวโน้มจะต่อต้านกับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ดังนั้นจึงเรียกว่า "แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ"

c คือ ค่าคงที่ความหนืดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งเป็นค่าที่ทำการวัดได้ยาก ต้องใช้โปรแกรมในการประมาณค่า

ค่าตัวแปรของเครื่องอัดอากาศมีดังต่อไปนี้

$const$ คือ ค่าคงที่ซึ่งเกิดจากการใช้วิธี Dimension analysis ในการหาสมการอัตราการไหลของอากาศ

ρ_i คือ ค่าความหนาแน่นของก๊าซชีวภาพขาเข้าเครื่องอัดอากาศ

ค่าตัวแปรของเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้ามีดังต่อไปนี้

V_m คือ ปริมาตรในท่อร่วมไอดี ซึ่งจะขึ้นอยู่กับขนาดของเครื่องยนต์ ถ้าเป็นเครื่องยนต์ที่มีขนาดใหญ่ปริมาตรท่อร่วมไอดีก็จะมีมากและถ้าเครื่องยนต์มีขนาดเล็กปริมาตรท่อร่วมไอดีก็จะมีขนาดเล็กด้วย

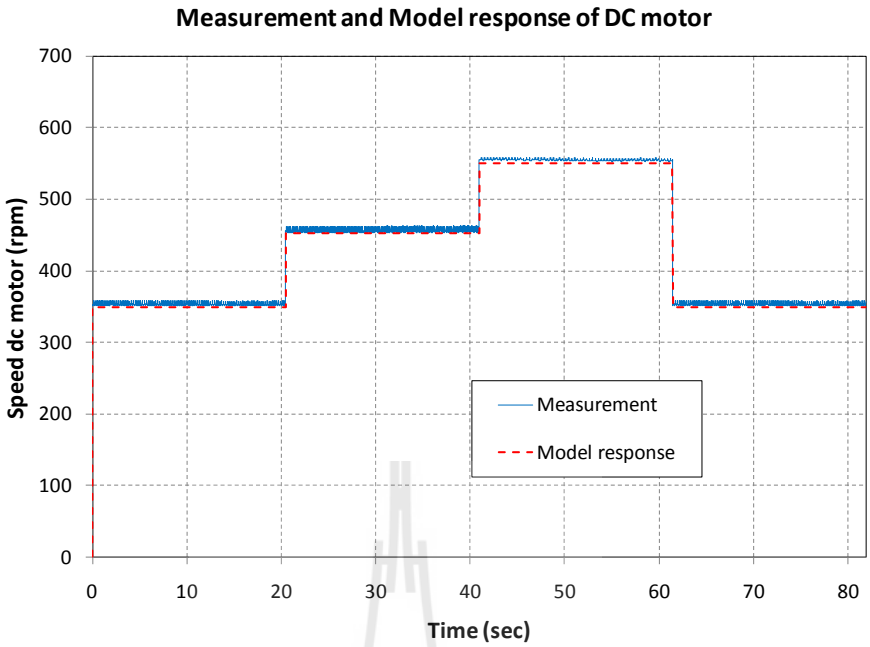
T_f คือ ค่าแรงบิดเสียดทานของเครื่องยนต์ ซึ่งค่าแรงบิดเสียดทานโดยระบบเครื่องยนต์ทั่วไปแล้วค่าแรงบิดไม่ควรมีค่ามากกว่าค่าแรงบิดสูงสุดของเครื่องยนต์ ดังนั้นค่าแรงบิดเสียดทานโดยทั่วไปของเครื่องยนต์อยู่ที่ประมาณ 30-40 % ของแรงบิดเครื่องยนต์

I_e คือ ค่าความเฉื่อยในการหมุนของเครื่องยนต์ ซึ่งสำหรับงานวิจัยนี้ใช้เครื่องยนต์เบนซิน 1 สูบ โดยที่ค่าความเฉื่อยจะเกิดจากเพลาข้อเหวี่ยงของเครื่องยนต์ซึ่งสามารถประมาณค่าได้จากการคำนวณ

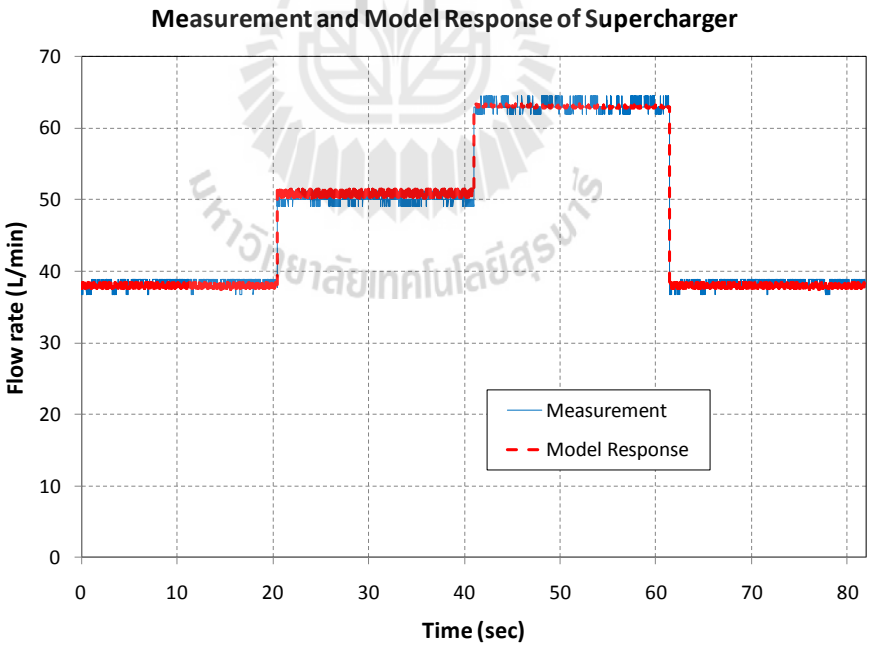
b คือ ค่าคงที่ความหนืดของลูกปืนเพลาข้อเหวี่ยง ซึ่งเป็นค่าที่ทำการวัดได้ยากจึงได้ใช้โปรแกรมในการประมาณค่า

3.4.2 ผลการประมาณค่าตัวแปร

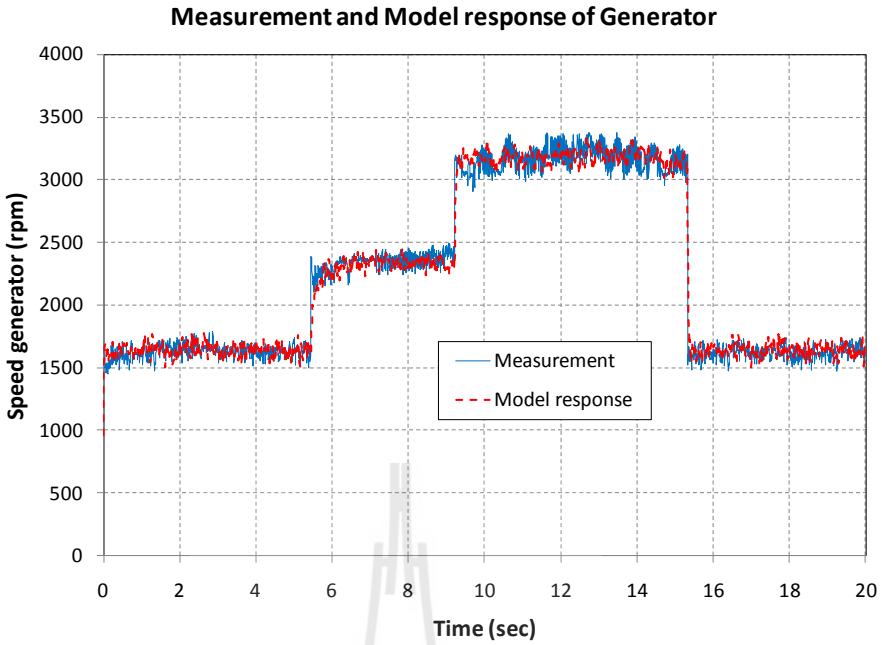
ผลของการประมาณค่าตัวแปรระบบด้วยการระบุเอกลักษณ์ (System identification) จะมีค่าแตกต่างกันออกไปในแต่ละช่วงการทำงานที่พิจารณา ดังนั้นก่อนทำการระบุเอกลักษณ์ ควรพิจารณาถึงช่วงการทำงานของระบบโดยรวมก่อนเสมอ โดยการระบุเอกลักษณ์จะให้ผลการประมาณค่าตัวแปรของระบบ $L_a, R_a, I, k_t, k_b, c, const, \rho_i, V_m, T_f, I_e, b$ พร้อมกับแสดงรูปแบบการตอบสนองของเอาท์พุทที่ได้จากการวัดเทียบกับเอาท์พุทของแบบจำลอง แสดงได้ดังรูป 3.8, 3.9, 3.10



รูปที่ 3.8 ผลการทดสอบระบุเอกลักษณ์มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 3.9 ผลการทดสอบระบุเอกลักษณ์เครื่องอัดอากาศชนิด Roots blower



รูปที่ 3.10 ผลการทดสอบระบุเอกลักษณ์เครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า

ตารางที่ 3.1 ผลการประมาณค่าตัวแปรของระบบ

Estimated Parameter											
DC Motor						Supercharger		Biogas Engine			
L_a	R_a	J	K_t	K_b	c	const	ρ_i	V_m	T_f	I_e	b
$6.3e^{-2}$	0.26	$1.7e^{-5}$	$6.2e^{-2}$	$6.2e^{-2}$	$7.6e^{-3}$	1.5414	0.6186	$6.6e^{-6}$	37.6	$4.2e^{-2}$	0.1

ผลจากการประมาณค่าตัวแปรสำหรับเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้า มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และเครื่องอัดอากาศ ที่ความเร็วรอบ 3200 รอบต่อนาที แสดงดังตาราง 3.1 ทดสอบนำค่าที่ได้แทนกลับไปยังแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แล้วทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลอง พบว่าการตอบสนองของมอเตอร์ไฟฟ้าดังรูปที่ 3.8 ค่าความคลาดเคลื่อน 1.05 % เครื่องอัดอากาศดังรูป 3.9 มีค่าความคลาดเคลื่อน 1.54 % เครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้าดังรูป 3.10 มีค่าความคลาดเคลื่อน 1.83 % พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากเอาท์พุตของการทดลองเทียบกับเอาท์พุทของแบบจำลองอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ จึงสามารถนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ไปทำการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอ เพื่อสร้างระบบควบคุมความเร็วรอบเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้าต่อไป

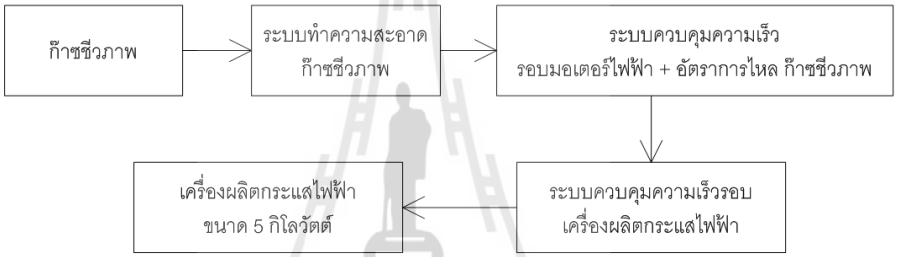
3.5 สรุป

ในบทนี้ได้ทำการประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในส่วนของเครื่องยนต์เบนซินและมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและเครื่องอัดอากาศ เพื่อหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมให้กับระบบ และเมื่อได้ค่าตัวแปรของระบบก็จะนำไปออกแบบระบบควบคุม พีไอ (PI-Controller) เพื่อใช้ในการควบคุมความเร็วรอบของเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้าให้มีความเหมาะสมกับความเร็วรอบที่เครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าต้องการเมื่อใช้ก๊าซชีวภาพ ซึ่งจะมีการทดลองระบบควบคุมความเร็วรอบของเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้าในบทที่ 4

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 4
ผลการทดลองระบบผลิตกระแสไฟฟ้าจากก๊าซชีวภาพ

จากบทที่ 3 ได้ทำการประมาณค่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในส่วนของเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า เครื่องอัดอากาศ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อใช้ในการออกแบบตัวควบคุมความเร็วรอบของเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า ในส่วนของบทนี้จะแสดงการทำงานทั้งหมดของการผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งมีขั้นตอนการทำงานดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 การทำงานระบบผลิตกระแสไฟฟ้า

4.1 ก๊าซชีวภาพ

งานวิจัยนี้ใช้ก๊าซชีวภาพที่ได้จากฟาร์มสุกรในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เพื่อทำการทดสอบระบบทำความสะอาดก๊าซชีวภาพ ระบบควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและควบคุมอัตราการไหลก๊าซชีวภาพ ระบบควบคุมความเร็วรอบเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าก๊าซชีวภาพ โดยที่บ่อก๊าซชีวภาพที่ใช้ เป็นบ่อหมักช้าแบบราง (Plug flow digester) ดังรูปที่ 4.2 ป็นลักษณะการไหลในแนวระดับ (Horizontal flow) โดยทั่วไปบ่อแบบรางจะมีผนังและพื้นบ่อเป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก ด้านบนทำด้วยพลาสติก PVC หรือ HDPE เพื่อทำหน้าที่เก็บก๊าซชีวภาพ โดยมีท่อเติมมูลสุกร อยู่ด้านบนของบ่อและมีท่อระบายอยู่ท้ายบ่อ มีท่อดึงกากมูลสุกร อยู่ด้านข้างบ่อเนื่องจากต้องมีการดึงกากสุกรที่หมักแล้วออกสม่ำเสมอเพื่อให้รับมูลสุกรชุดใหม่เข้ามาได้ และแรงดันก๊าซภายในบ่อประมาณ 500 มิลลิบาร์

ก๊าซชีวภาพ หมายถึง ก๊าซที่เกิดจากการหมักและย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ได้จาก มูลสุกร การล้างสุกร รวมถึงการล้างคอกสุกร โดยอาศัยกลุ่มจุลินทรีย์ชนิดไม่ใช้อากาศทำหน้าที่หมักและย่อยสลายสารอินทรีย์ และเปลี่ยนรูปเป็นก๊าซชีวภาพ โดยจะมีส่วนผสมของก๊าซมีเทน (CH_4) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และก๊าซอื่น ๆ ตามอัตราส่วนโดยประมาณ 60 : 38 : 2 ตามลำดับ โดยที่ก๊าซชีวภาพที่มีสัดส่วนมีเทนมากเกิน 50 % จะสามารถลุกติดไฟได้ดี

รูปที่ 4.2 บ่อหมักก๊าซชีวภาพมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบก๊าซชีวภาพในงานวิจัย (ที่มา : ก๊าซชีวภาพจากฟาร์มสุกร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี)

ก๊าซ	ส่วนประกอบ
มีเทน (CH_4)	62.2 %
คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)	12.6 %
ออกซิเจน (O_2)	10.8 %
ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S)	1170 ppm

จากตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่ได้จากบ่อหมักฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีพบว่ามีมีเทนเกิน 50 % ทำให้สามารถติดไฟได้ แต่เนื่องจากมีก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ติดมาด้วย ถ้าทำปฏิกิริยากับไอน้ำจะกลายเป็นกรดซัลฟูริกมีฤทธิ์การกัดกร่อน จึงต้องทำการกำจัดให้อยู่ในสัดส่วนที่เครื่องยนต์ทำงานได้

4.2 ระบบทำความสะอาดก๊าซชีวภาพ

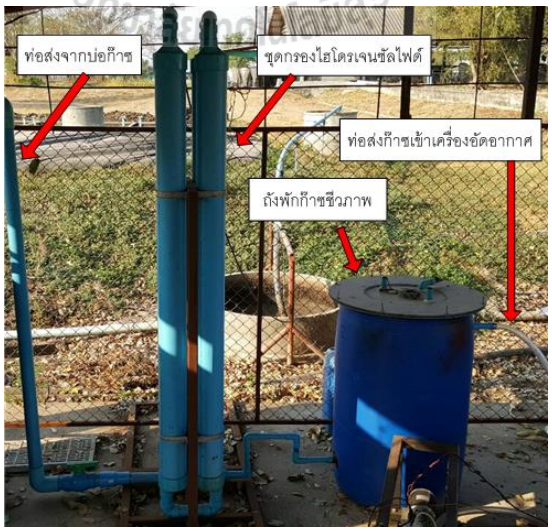
เนื่องจากส่วนประกอบที่สำคัญในการสันดาปภายในของเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าคือ มีเทน และจากก๊าซชีวภาพมีส่วนประกอบของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ซึ่งมีฤทธิ์กัดกร่อนผสมอยู่จึงส่งผลเสียต่ออุปกรณ์ของเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า ดังนั้นต้องออกแบบระบบทำความสะอาดก๊าซชีวภาพก่อนนำไปใช้งานเพื่อลดการสึกหรอการกัดกร่อนต่อเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า

ในงานวิจัยนี้ได้ทำอุปกรณ์ทำความสะอาดก๊าซชีวภาพเพื่อดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ โดยใช้ขี้กลึงเหล็กไม่ปรับสภาพ (วงศ์วิวรรธ และคณะ 2555) เพื่อให้ได้คุณสมบัติของก๊าซชีวภาพนำไปใช้งานสำหรับเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าให้ได้ ตามมาตรฐานของก๊าซชีวภาพที่นำไปใช้งานโดยจะต้องมีสัดส่วนของก๊าซมีเทน(CH_4) มากกว่า 50 % และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ น้อยกว่า 23 ppm โดยมีอุปกรณ์และขั้นตอนการทำความสะอาดดังนี้

4.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบทำความสะอาดก๊าซชีวภาพ

อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบทำความสะอาดก๊าซชีวภาพเพื่อให้ได้คุณสมบัติของก๊าซชีวภาพตามมาตรฐานในการนำไปใช้งานแบ่งออกเป็น 2 ส่วนดังนี้

1. ชุดคอลัมน์ดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) จัดทำขึ้นจากท่อพีวีซี เกรด 8.5 ขนาด 4 นิ้ว ยาว 1.50 เมตร จำนวน 4 คอลัมน์ ภายในบรรจุเหล็กฝอย แสดงได้ดังรูปที่ 4.3
2. ถังพักก๊าซชีวภาพ เป็นถังพีวีซีขนาด 200 ลิตรดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ระบบทำความสะอาดก๊าซชีวภาพ

4.2.2 ขั้นตอนการทำงานของระบบทำความสะอาดก๊าซชีวภาพ

4.2.2.1 การดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ที่ติดมากับก๊าซชีวภาพถือเป็นเรื่องที่สำคัญมาก เนื่องจากก๊าซชนิดนี้มีคุณสมบัติเป็นก๊าซพิษและเมื่อทำปฏิกิริยากับไอน้ำจะมีฤทธิ์เป็นกรดซัลฟิวริก ที่สามารถกัดกร่อนชิ้นส่วนของเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า จึงเป็นขั้นตอนที่สำคัญมากในการทำความสะอาดก๊าซชีวภาพก่อนนำไปใช้งาน โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้เหล็กฝอยในการดูดซับ ดังรูปที่ 4.4

4.2.2.2 เมื่อทำการดูดซับ จะทำให้ก๊าซชีวภาพมีแรงดันลดต่ำลงก่อนนำไปใช้งาน จึงจำเป็นต้องมีถังกักเก็บก๊าซ เพื่อพักก๊าซให้มีปริมาณที่เพียงพอต่อการนำไปเข้าเครื่องอัดอากาศ

รูปที่ 4.4 เหล็กฝอยในการดูดซับ ไฮโดรเจนซัลไฟด์

4.2.3 คุณสมบัติของก๊าซชีวภาพหลังผ่านกระบวนการทำความสะอาด

ภายหลังผ่านกระบวนการทำความสะอาดก๊าซชีวภาพ ได้ทำการวิเคราะห์ส่วนประกอบ และคุณสมบัติของก๊าซชีวภาพหลังทำความสะอาด โดยทำการวิเคราะห์ส่วนประกอบของก๊าซชีวภาพ ด้วยเครื่องวิเคราะห์ก๊าซชีวภาพ Binder Combimass GA-m ดังรูปที่ 4.5 และได้ผลคุณสมบัติของก๊าซชีวภาพเปลี่ยนไปจากเดิม ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติก๊าซชีวภาพภายหลังผ่านระบบทำความสะอาด (ที่มา : ก๊าซชีวภาพจากฟาร์มสุกรของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี)

ก๊าซ	ส่วนประกอบ
มีเทน (CH_4)	58.3 %
คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)	13.1 %
ออกซิเจน (O_2)	8.2 %
ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S)	10 ppm

รูปที่ 4.5 เครื่องวิเคราะห์ส่วนประกอบก๊าซชีวภาพ

ตารางที่ 4.3 แสดงรายละเอียดเครื่องวิเคราะห์ส่วนประกอบก๊าซชีวภาพ Binder Combimass GA-m

ชื่อ	Binder
รุ่น	Combimass GA-m
ก๊าซที่สามารถวัดได้	CH_4, CO_2, O_2, H_2S
ช่วงการวัดค่า	CH_4 = 0 - 100% CO_2 = 0 - 100% O_2 = 0 - 25% H_2S = 0 - 10,000 ppm
อัตราการไหล	400 ml/min

หลังจากก๊าซชีวภาพได้ผ่านกระบวนการทำความสะอาด และได้ทำการตรวจสอบคุณสมบัติของก๊าซชีวภาพว่าผ่านมาตรฐานของการนำก๊าซชีวภาพไปเป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า เนื่องจากก๊าซชีวภาพได้ผ่านขั้นตอนกระบวนการทำความสะอาด มาทำให้อัตราการไหลของก๊าซชีวภาพมีค่าลดต่ำลง และไม่เพียงพอต่อการนำไปใช้งานกับเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า ทำให้ต้องมีการเพิ่มอัตราการไหลก๊าซชีวภาพให้เพียงพอต่อความต้องการของเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า ในหัวข้อต่อไป

4.3 ระบบควบคุมอัตราการไหลก๊าซชีวภาพ

เนื่องจากอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและสภาพอากาศของบ่อซึ่งเปลี่ยนแปลงไม่เท่ากันในแต่ละวัน และก๊าซชีวภาพยังได้ผ่านกระบวนการทำความสะอาดทำให้อัตราการไหลลดลง เพื่อให้การทำงานของเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าทำงานได้ต่อเนื่องที่ความเร็วคงที่จึงมีความจำเป็นที่ต้องควบคุมอัตราการไหลให้อยู่ในช่วงตามที่เครื่องยนต์ต้องการ

4.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมอัตราการไหลก๊าซชีวภาพ

อุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมอัตราการไหลก๊าซชีวภาพ ให้เหมาะสมกับความต้องการของเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้านั้นมีรายละเอียดของอุปกรณ์การทำงานดังต่อไปนี้

รูปที่ 4.6 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

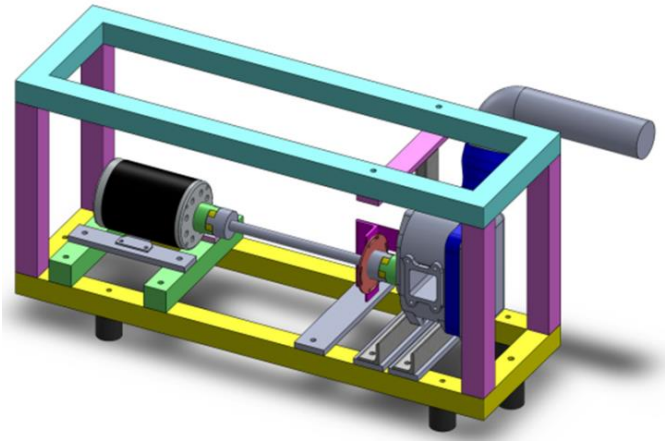
4.3.1.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เลือกใช้มอเตอร์ สกูตเตอร์แบบไม่มีเกียร์ทด 24 โวลต์ 500 วัตต์ 2500 รอบต่อนาที ดังรูปที่ 4.6 จะติดตั้งประกอบเข้ากับเครื่องอัดก๊าซชีวภาพ มีหน้าที่รับคำสั่งจากชุดควบคุมผ่านบอร์ดควบคุม เพื่อเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบและส่งความเร็วรอบต่อไปยังเครื่องอัดก๊าซชีวภาพ

รูปที่ 4.7 เครื่องอัดอากาศ Roots blower

4.3.1.2 เครื่องอัดก๊าซชีวภาพ ได้เลือกใช้เครื่องอัดอากาศ Roots blower AMR500 ดังรูปที่ 4.7 เนื่องจากเครื่องอัดชนิด Reciprocating นั้นสามารถผลิตแรงดันได้สูง และได้อัตราการไหลเฉลี่ยที่เกือบคงที่ แต่การไหลที่ได้นั้นเป็นจังหวะ ในขณะที่เครื่องอัดชนิด Centrifugal นั้นผลิตแรงดันได้ต่ำ ถ้าต้องใช้แรงดันสูง ๆ เพื่อให้ได้อัตราการไหลที่สูงจะต้องใช้เครื่องอัดต่ออนุกรมกันหลายขั้นตอน ส่วนเครื่องอัดชนิด Roots blower จะอยู่ตรงกลางระหว่างสองกลุ่มนี้ คือให้ประสิทธิภาพที่สูง ในช่วงความดันด้านขาออกที่ไม่สูงมาก และไม่ต่ำมากและให้อัตราการไหลที่ไม่เปลี่ยนไปแปลงไปมาก ตามการเปลี่ยนแปลงความดันด้านขาออก การเพิ่มความดันของ Roots blower นั้นอาศัยการขบกันของโรเตอร์ 2 ตัว ที่มีจำนวนใบพัดเท่ากัน ข้อดีของ Roots blower คือการหมุนขบกันของโรเตอร์ นั้นไม่มีการใช้น้ำมันหล่อลื่น ทำให้อากาศที่ได้นั้นเป็นอากาศที่ปราศจากไอน้ำมันปนเปื้อน จัดประกอบติดตั้งเข้ากับมอเตอร์ไฟฟ้า โดยมีหน้าที่รับความเร็วรอบจากมอเตอร์ไฟฟ้าและแปลงเป็นอัตราการไหลก๊าซชีวภาพ ให้เพียงพอต่อความต้องการของเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า

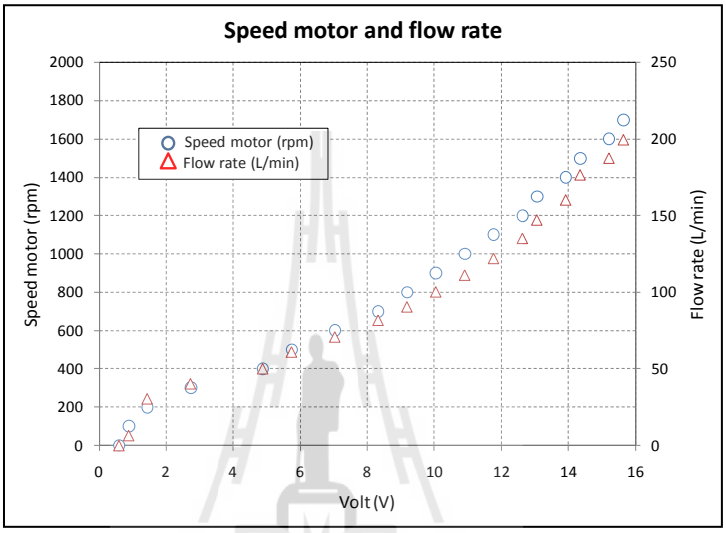
4.3.2 ขั้นตอนการทำงานของระบบควบคุมอัตราการไหลก๊าซชีวภาพ

เมื่อทำการเปิดวาล์วที่บ่อก๊าซชีวภาพ ก๊าซชีวภาพจากบ่อจะไหลมาตามท่อส่งก๊าซจนถึงชุดทำความสะอาดก๊าซชีวภาพ จากนั้นจะไหลไปยังถังพักก๊าซชีวภาพเพื่อเก็บก๊าซชีวภาพให้เพียงพอต่อการใช้งาน ในการควบคุมอัตราการไหลก๊าซชีวภาพ จะขึ้นอยู่กับความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งมีความสัมพันธ์กันดังสมการที่ได้กล่าวในบทที่ 3 โดยถ้าความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นส่งผลให้อัตราการไหลก๊าซชีวภาพสูงขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 4.8 การประกอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงกับเครื่องอัดก๊าซชีวภาพ

จากรูปที่ 4.8 แสดงการประกอบระบบควบคุมอัตราการไหลก๊าซชีวภาพ โดยที่มอเตอร์มีหน้าที่รับคำสั่งจากชุดควบคุมพีไอและแปลงเป็นความเร็วรอบและทำการส่งต่อไปยังเครื่องอัดก๊าซชีวภาพ ทำให้เครื่องอัดก๊าซชีวภาพมีความเร็วรอบเท่ากับมอเตอร์ไฟฟ้า ในส่วนการทำงานของเครื่องอัดก๊าซชีวภาพจะดูดก๊าซชีวภาพผ่านทางเข้าของตัวเครื่อง จากนั้นทำการเพิ่มแรงดันก๊าซชีวภาพ โดยใบพัดของตัวเครื่องอัดอากาศและส่งออกไปที่ทางออกของตัวเครื่อง



รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้า กับอัตราการไหลก๊าซชีวภาพ

รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงกับอัตราการไหลของเครื่องอัดอากาศ พบว่าเมื่อความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นทำให้อัตราการไหลอากาศมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และสามารถนำความสัมพันธ์นี้ไปใช้สร้างระบบควบคุมความเร็วรอบเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้าต่อไป

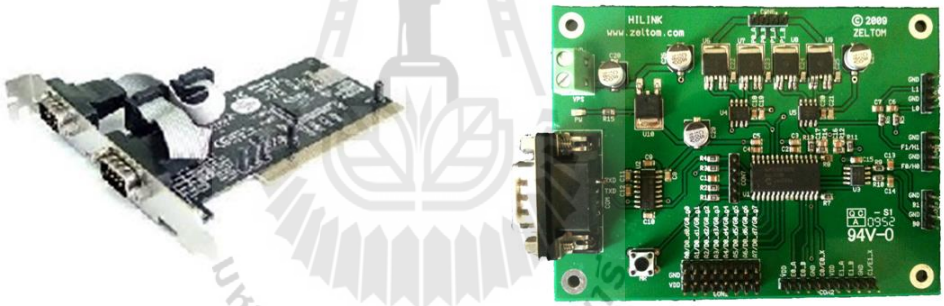
4.4 ระบบควบคุมความเร็วรอบเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าก๊าซชีวภาพ

การทำงานของเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยก๊าซชีวภาพ โดยใช้เครื่องยนต์ขนาดเล็กเป็นต้นกำลัง ส่งกำลังผ่านระบบเพลาไปยังเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า ดังนั้นจะต้องมีระบบควบคุมความเร็วรอบเครื่องยนต์ให้คงที่ เนื่องจากในการผลิตกระแสไฟฟ้าของเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าต้องใช้ที่ความเร็วรอบคงที่ ทำให้ต้องควบคุมความเร็วรอบเครื่องยนต์ให้คงที่ตามไปด้วย และการควบคุมความเร็วรอบเครื่องยนต์ให้คงที่จะขึ้นกับอัตราการไหลเชื้อเพลิงก๊าซชีวภาพ ที่ส่งให้กับเครื่องยนต์ต้องเพียงพอต่อความต้องการของเครื่องยนต์ ซึ่งเราสามารถควบคุมอัตราการไหลก๊าซชีวภาพด้วย

การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้า และเราสามารถให้มนุษย์เป็นผู้ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าให้อยู่ในช่วงการใช้งาน แต่การทำงานในระบบอัตโนมัติ ระบบจะต้องทำงานได้ด้วยตนเองเพื่อให้ได้ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าและอัตราการไหลก๊าซชีวภาพตามที่เครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าต้องการ โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้ระบบควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้าร่วมกับคอมพิวเตอร์ และอุปกรณ์การเชื่อมต่ออีกหลาย ส่วนโดยมีรายละเอียดดังนี้

4.4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบควบคุมความเร็วรอบเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า

4.4.1.1 บอร์ด Controller Rapcon และชุด PCI Aerial card ดังรูปที่ 4.10 โดยที่บอร์ด PCI จะติดตั้งอยู่ที่เครื่องคอมพิวเตอร์ และคอมพิวเตอร์จะสั่งงานผ่านโปรแกรมที่เขียนใน Matlab/Simulink ผ่านไปยังบอร์ด PCI เพื่อควบคุมบอร์ด Control Rapcon ไปสั่งการให้มอเตอร์ทำงานสัมพันธ์กับความต้องการก๊าซชีวภาพจากเครื่องยนต์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ตามที่ผู้ออกแบบระบบควบคุมต้องการ รายละเอียดของบอร์ด Control Rapcon แสดงดังตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.10 PCI Serial card และบอร์ดควบคุม Rapcon

ตารางที่ 4.4 แสดงรายละเอียดของ Rapcon Board (Rapcon Real - Time rapid control prototyping platform for Matlab/Simulink

Meaning	Magnitude	Unit
Power supply (Minimum current	6-15 (0.15)	VDC (A)
Analog Input A0 - A7 Analog 12 bit	0 - 5	V
Capture Input C0 - C1 Digital 16 bit		
Digital Input D0_d0 - D0_d7 Digital 8 bit		
Encoder Input E0 - E1 Digital 16 bit		
Frequency Output F0 - F1 Digital 16 bit		
Analog Output B0 - B1 Analog 12 bit		
Digital Output G0_g0 - G0_g7 Digital 8 bit		
Pulse Output H0 - H1 Digital 16 bit		
Filtered Pulse Output L0 - L1 Analog		
H - Bridge Output P0 - P1 Digital	0 - Supply voltage , 5A	
Voltage Regulator Output	5 (0.25)	V (A)
Ground GND	0	V
Sampling Rate	Up to 15.2	kHz

4.4.1.2 บอร์ด H-BRIDGE DRIVER DC MOTOR 80A ดังรูปที่ 4.11 เนื่องจากบอร์ดควบคุม Rapcon ช่วงการทำงาน 6-15 VDC แต่กับมอเตอร์ที่เลือกใช้เป็น 24 V ดังนั้นจึงต้องใช้บอร์ดขับมอเตอร์ที่สามารถรองรับการทำงานของมอเตอร์ 24 V ได้รายละเอียดดังตารางที่ 4.5

รูปที่ 4.11 บอร์ด H-BRIDGE DRIVER DC MOTOR 80A

ตารางที่ 4.5 แสดงรายละเอียดของ Hi-Bridge Driver DC motor 80A

Output	Single motor driver
	Motor DC Supply 12-48 V 80A (Max. กระแสพัลส์)
	Full-Complementary Power MOSFET Driver With ultra-fast reverse recovery protection diodes
Input	Full Opto-isolated input interface signals
	5V 8 mA TTL – Level
Drive Mode	independently with
	ON – OFF Control
	Direction Control
	Speed Control (PWM Drives)
PWM Frequency	400 Hz - 1000 Hz (400-800 Hz Recommend)

การทำงานของบอร์ดขับมอเตอร์ H-BRIDGE DRIVER DC MOTOR 80A จะรับสัญญาณ PWM จากบอร์ด Rapcon เพื่อนำสัญญาณ PWM นั้นไปสั่งการทำงานของบอร์ดให้มอเตอร์สามารถทำงานได้ที่ 24 V โดยอุปกรณ์ในบอร์ดสามารถทนแรงดันได้ที่ 24 V 80 A ที่เลือกบอร์ดที่ทนได้ 80 A เนื่องจากในขั้นตอนของการเริ่มเดินมอเตอร์ จะเกิดการกระชากของมอเตอร์ทำให้กระแสในตอนเริ่มเดินมอเตอร์นั้นมีค่าสูงมากจึงได้เลือกบอร์ดที่ทนกระแสได้สูง ๆ เพื่อความปลอดภัยของระบบควบคุม

4.4.1.3 เซ็นเซอร์วัดความเร็วรอบ (Speed sensor) และเซ็นเซอร์วัดอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ ดังรูปที่ 4.12 เซ็นเซอร์วัดความเร็วรอบถูกติดตั้งที่เพลาของเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้า และเพลาของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยที่เซ็นเซอร์ที่เครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้าจะส่งสัญญาณมายังบอร์ด Rapcon เพื่อทำการประมวลผลและส่งผลไปยังคอมพิวเตอร์ในการสั่งการปรับเปลี่ยนความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อให้ได้ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้าตามต้องการ ในส่วนของเซ็นเซอร์วัดความเร็วรอบที่มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง จะส่งสัญญาณไปยังบอร์ด Rapcon เพื่อทำการประมวลผลและส่งผลแสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าในแต่ละช่วงความเร็วรอบของมอเตอร์ที่สอดคล้องกันกับความเร็วรอบเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้า และในส่วนของเซ็นเซอร์วัดอัตราการไหลก๊าซชีวภาพจะส่งสัญญาณไปยังบอร์ด Rapcon เพื่อทำการประมวลผลและส่งผลแสดงอัตราการไหลก๊าซชีวภาพที่เครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าต้องการในขณะนั้น ๆ

รูปที่ 4.12 เซ็นเซอร์วัดความเร็วรอบ (Speed sensor)

4.4.2 ขั้นตอนการทำงานระบบควบคุมความเร็วรอบเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า

การควบคุมจะใช้คอมพิวเตอร์ โดยโปรแกรมที่ใช้ควบคุมคือ Matlab/Simulink ซึ่งทำการเชื่อมต่อสัญญาณในการควบคุมระหว่างคอมพิวเตอร์กับบอร์ด Rapcon โดยที่คอมพิวเตอร์จะมี PCI Serial card ทำการเชื่อมต่อผ่านสาย Serial crossover cable กับบอร์ด Rapcon platform ซึ่งเป็นบอร์ดการเชื่อมต่อแบบ Real - Time windows target ภายใน Windows และบอร์ดนี้สามารถทำงานได้ทั้งอินพุทและเอาท์พุท การทำงานของระบบจะถูกควบคุมด้วยสัญญาณที่เป็น Digital singnal จากโปรแกรม Matlab/Simulink ในคอมพิวเตอร์ จากนั้นสัญญาณจะถูกส่งต่อไปยังบอร์ดขับมอเตอร์ไฟฟ้า H-Bridge 80 A เพื่อทำการสั่งมอเตอร์ให้ทำงาน เมื่อมอเตอร์ทำงานเครื่องอัดอากาศก็จะทำงานทำให้มีอัตราการไหลก๊าซชีวภาพส่งให้กับเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้า เมื่อความเร็วรอบของเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าได้ความเร็วรอบตามที่ตั้งเอาไว้ มอเตอร์ก็จะหยุดการทำงานและเครื่องอัดก๊าซชีวภาพก็จะหยุดทำให้ไม่มีอัตราการไหลก๊าซชีวภาพส่งให้กับเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าทำให้เครื่องผลิตกระแสไฟฟ้ามีความเร็วรอบลดลง เมื่อความเร็วรอบเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้ามีความเร็วรอบลดลงต่ำกว่าค่าที่ตั้งเอาไว้ระบบควบคุมใน Matlab/Simulink ก็จะสั่งการให้มอเตอร์หมุน เป็นวงจรการทำงานเพื่อรักษาระดับความเร็วรอบเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าให้คงที่ต่อไป

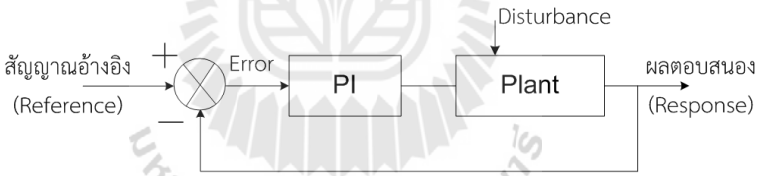
ในการปรับความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อส่งกำลังทางกลหมุนให้เครื่องอัดอากาศหมุนด้วยความเร็วเพื่อผลิตอัตราการไหลก๊าซชีวภาพเพื่อควบคุมความเร็วเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้าได้นั้น ก่อนการทำงานในภาคปฏิบัติจะต้องมีการออกแบบระบบควบคุมเพื่อนำไปใช้ในการทำงานว่าต้องการผลการตอบสนองในลักษณะใด

4.5 การออกแบบระบบควบคุมพีไอ

เมื่อพิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยมีอินพุตเป็นแรงดันไฟฟ้าและเอาท์พุตเป็นความเร็วรอบพบว่า ระบบที่พิจารณาเป็นระบบอันดับ 0 (type 0) ซึ่งมีทรานเฟอร์ฟังก์ชันดังนี้

$$G(s)=\frac{k}{(L_a s+R_a)(Js+c)+k^2} \tag{4.1}$$

จากระบบอันดับ 0 เมื่อพิจารณาระบบควบคุมแบบปิดที่สภาวะคงตัว เมื่อให้สัญญาณอินพุตเป็นแบบขั้นบันได (Unit step) ยังคงมีค่าความผิดพลาดเกิดขึ้น ต้องเพิ่มอันดับของระบบเป็นอันดับที่ 1 ถึงจะทำให้ระบบมีค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัวเท่ากับศูนย์ โดยการใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ PI control เป็นการควบคุมในแบบระบบวงปิดหรือระบบควบคุมแบบป้อนกลับ การใช้งานระบบควบคุมพีไอ จะต่ออนุกรมกับระบบที่ต้องการควบคุมจากนั้นนำผลที่ได้จากกระบวนการหรือเอาท์พุตของระบบเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิงดังรูปที่ 4.13 และส่งค่า Error ให้ controller ปรับแก้ต่อไป



รูปที่ 4.13 ตัวควบคุม PI ของระบบวงปิด

$$u(t)=K_p e(t)+K_i\int_0^t e dt \tag{4.2}$$

ทำการปรับสมการ (4.2) เราจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของคอนโทรลเลอร์ PI เป็น

$$G(s) \quad =K_p+\frac{K_i}{s} \tag{4.3}$$

$$G(s) \ =K_p\frac{(s+K_i/K_p)}{s} \tag{4.4}$$

กำหนดให้ integral time constant τ_i เป็น

$$\tau_i = \frac{K_p}{K_i} \tag{4.5}$$

ดังนั้นเราจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนคอนโทรลเลอร์ PI

$$G(s) = K_p \frac{\left[s + \left(1/\tau_i \right) \right]}{s} \tag{4.6}$$

เมื่อ $u(t)$ = สัญญาณควบคุมออกจาก PI

$e(t)$ = ค่าความคลาดเคลื่อนของสัญญาณ

K_P = อัตราส่วนขยายสัดส่วน

K_i = อัตราส่วนขยายปริพันธ์

จากสมการที่ (4.6) พบว่าเมื่อทำการใช้ระบบควบคุมแบบพีไอ จะเพิ่มจำนวนโพลให้กับระบบควบคุมและเพิ่ม type ของระบบจาก type 0 เป็น type 1 ซึ่งทำให้ระบบมีความผิดพลาดที่สถานะคงตัวเป็นศูนย์ในกรณีอินพุทแบบขั้นบันได ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ระบบควบคุมแบบพีไอ เพื่อขจัดความผิดพลาดของระบบที่เหลืออยู่ ที่เกิดจากการใช้เพียงเทอมสัดส่วนเพียงอย่างเดียว

4.6 การออกแบบจำลองอ้างอิงระบบควบคุมความเร็วรอบเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า

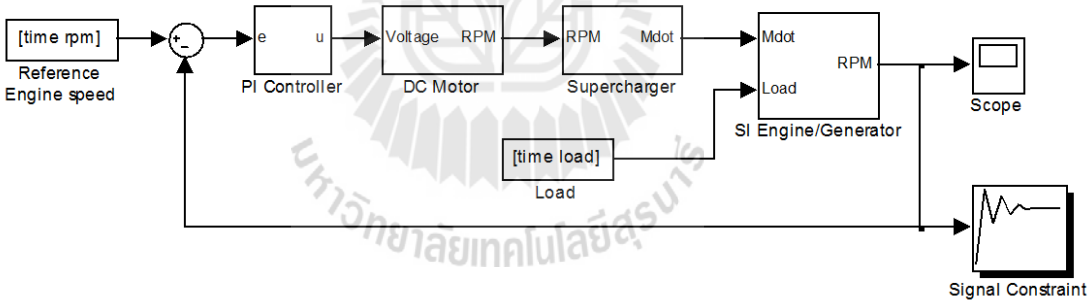
ในการประมาณค่า (Parameter Estimation) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้า เครื่องอัดก๊าซชีวภาพ และมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่กล่าวในบทที่ 3 มีความสำคัญมากเนื่องจากเป็นตัวแสดงการตอบสนองของเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าให้เป็นไปตามต้องการและมีความสัมพันธ์กับเครื่องอัดก๊าซชีวภาพและมอเตอร์ไฟฟ้า ในการออกแบบระบบควบคุมพีไอ ต้องใช้อัลกอริทึมในการปรับค่าตัวแปรของการควบคุม K_p, K_i ของระบบควบคุมความเร็วรอบเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองอ้างอิงดังนี้

4.6.1 ขั้นตอนการออกแบบจำลองอ้างอิง

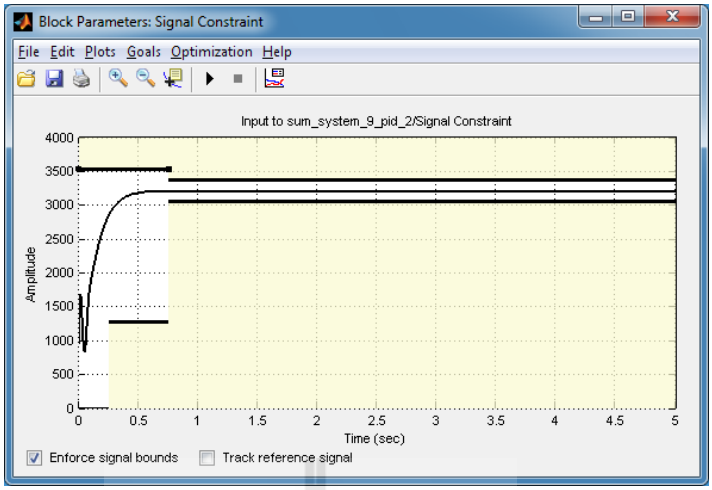
1. สร้างแบบจำลองระบบควบคุมความเร็วรอบเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้าในระบบปิดและมีตัวควบคุมแบบพีไอ ในโปรแกรม Matlab/Simulink แสดงได้ดังรูปที่ 4.14

2. ระบบที่พิจารณามีตัวแปรทั้งหมด 12 ตัว คือ $La, Ra, I, c, k_t, k_b, const, \rho_i$ และ V_{man}, T_f, I_e, b แต่การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้การตอบสนองของความเร็วรอบเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าได้ตามที่ต้องการต้องใช้การควบคุมด้วย K_p, K_i ซึ่งเป็นค่าตัวแปรการควบคุมแบบพีไอ ของแบบจำลองระบบอ้างอิง

3. กำหนดลักษณะการตอบสนองที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ได้ค่า K_p, K_i ของแบบจำลองระบบอ้างอิง โดยใช้เครื่องมือในโปรแกรม Matlab/Simulink ชื่อ Signal constrain จะอยู่ใน Simulink library ที่ชื่อว่า Simulink Response Optimization และทำการกำหนดลักษณะการตอบสนองด้วย Design Response ดังนี้ Percent Overshoot น้อยกว่า 10 %, Rise time 0.25 sec, Setting time 0.75 sec, Percent rise 80 %, Percent setting 5 % ซึ่งข้อกำหนดดังกล่าวเหล่านี้จะใช้กำหนดขอบเขตการตอบสนองของแบบจำลอง แสดงได้ดังรูปที่ 4.15 สำหรับวิธีการใช้งาน Simulink Response Optimization ได้แสดงไว้ในภาคผนวก



รูปที่ 4.14 แผนภาพระบบควบคุมความเร็วรอบเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้าในระบบปิดโดยมีตัวควบคุมพีไอ ในโปรแกรม Matlab/Simulink



รูปที่ 4.15 แผนภาพแสดงการตอบสนองของแบบจำลองอ้างอิงที่ได้จากการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของตัวควบคุมพีไอ โดยใช้ Simulink Response Optimization

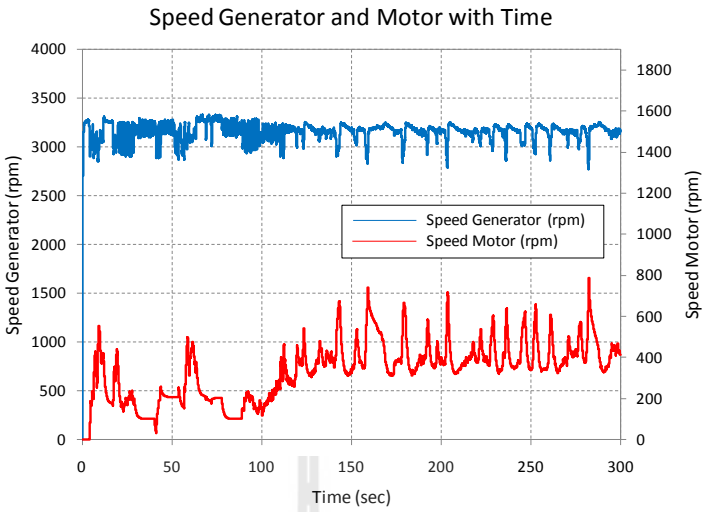
4.7 การทดสอบระบบควบคุมความเร็วรอบเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าก๊าซชีวภาพ

การทดลองจะใช้การหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อสร้างความเร็วรอบให้กับเครื่องอัดอากาศเพื่อทำให้เครื่องอัดอากาศสร้างอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพให้เพียงพอต่อความต้องการของเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า ที่มีระบบควบคุมความเร็วรอบเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าแบบปิดในส่วนของเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า และมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ปฏิบัติการได้มีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเร็วรอบ โดยทำการแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1 ทำการทดลองให้เครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าเปลี่ยนการใช้เชื้อเพลิงจากน้ำมันเบนซินเป็นก๊าซชีวภาพ และส่วนที่ 2 ทำการทดลองเปลี่ยนแปลงภาระโหลดของเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าขณะใช้ก๊าซชีวภาพเพื่อทดสอบการตอบสนองของระบบควบคุม

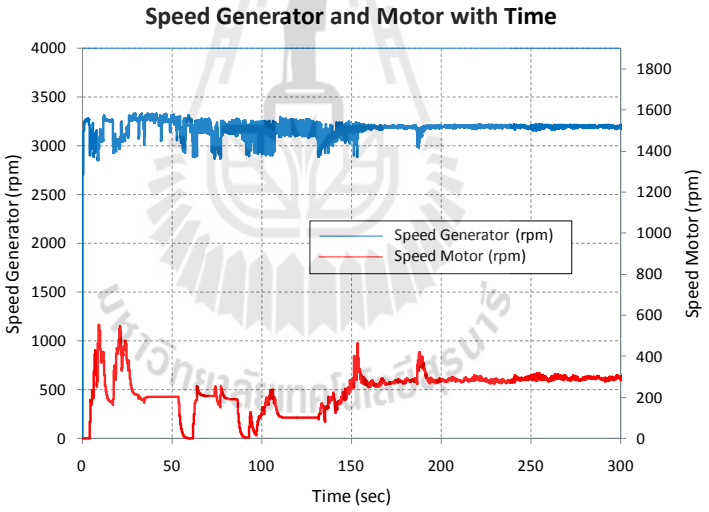
<u>การทดลองส่วนที่ 1</u> : การทดลองเปลี่ยนระบบเชื้อเพลิงเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าจากการใช้น้ำมันเบนซินเป็นก๊าซชีวภาพ ด้วยระบบควบคุมความเร็วรอบเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า โดยใช้ชุดควบคุม 2 ชุด แสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าชุดควบคุมเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า

ชุดควบคุมที่ 1		ชุดควบคุมที่ 2	
K_p	K_i	K_p	K_i
1.7672e-4	0.3888e-4	1.7672e-4	1.3888e-4



รูปที่ 4.16 ความเร็วรอบเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าและความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้าชุดควบคุม 1

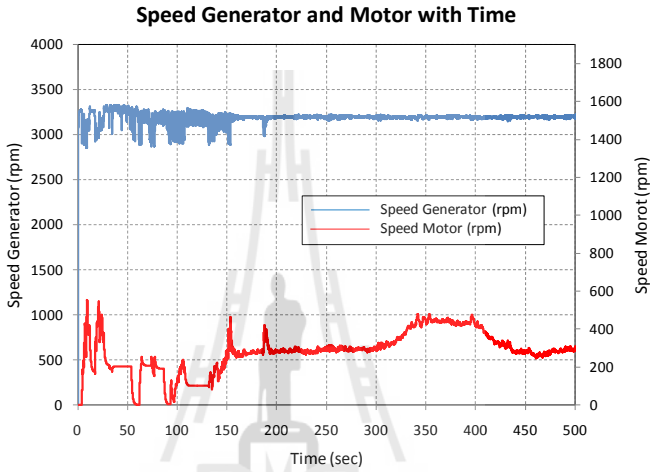


รูปที่ 4.17 ความเร็วรอบเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าและความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้าชุดควบคุม 2

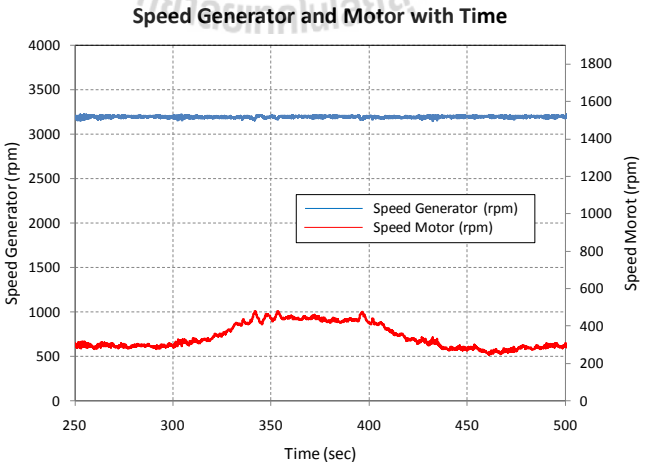
จากรูปที่ 4.16 และ 4.17 กราฟความเร็วรอบเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้ากับมอเตอร์ไฟฟ้า เมื่อปิดระบบน้ำมันเบนซินเครื่องยนต์จะใช้น้ำมันเชื้อเพลิงที่ค้างในคาร์บูเรเตอร์เมื่อน้ำมันใกล้หมดและระบบเริ่มปรับมาใช้ก๊าซชีวภาพ สังเกตได้ว่าในช่วงที่เครื่องยนต์กำลังเปลี่ยนมาใช้ก๊าซชีวภาพมอเตอร์ไฟฟ้าจะเดิน ๆ หยุด ๆ เนื่องจากยังคงมีน้ำมันเบนซินบางส่วนค้างอยู่ในคาร์บูเรเตอร์และเมื่อมอเตอร์ไฟฟ้าเริ่มทำงานเพื่อให้เครื่องอัดก๊าซชีวภาพทำงานและดูดเชื้อเพลิงก๊าซชีวภาพเข้าเครื่องยนต์เพื่อให้เครื่องยนต์สามารถเผาไหม้ก๊าซชีวภาพทดแทนน้ำมันเบนซินได้ จะทำให้

เครื่องยนต์เริ่มมีกำลังกลับมาทำให้เครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้ามีความเร็วรอบเพิ่มขึ้นมาตามค่าที่ระบบควบคุมได้ตั้งไว้

การทดลองส่วนที่ 2 :ในขั้นตอนที่ 1 นั้นเมื่อเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้าสามารถเปลี่ยนจากระบบเชื้อเพลิงเบนซิน มาเป็นระบบเชื้อเพลิงก๊าซชีวภาพ อย่างสมบูรณ์แล้วเราจะเริ่มทำการทดลองระบบควบคุมด้วยการใส่โหลดให้กับระบบและดูผลตอบสนองของเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าขณะใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิง แสดงดังรูปที่ 4.18 และรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.18 กราฟเปรียบเทียบความเร็วรอบเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้ากับความเร็วรอบมอเตอร์ที่ไม่มีภาระกรรมกับมีภาระกรรม



รูปที่ 4.19 ภาพขยายเปรียบเทียบความเร็วรอบเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้ากับความเร็วรอบมอเตอร์ในช่วงเวลาที่ใส่ภาระกรรมและปลดภาระกรรม

4.8 สรุป

ระบบการทำงานของงานวิจัยนี้ เริ่มจากการสร้างระบบทำความสะอาดก๊าซชีวภาพที่สามารถลดปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของการนำไปใช้สำหรับเครื่องยนต์สันดาปภายในคือต้องน้อยกว่า 23 ppm ซึ่งในรายงานวิจัยวัดได้เท่ากับ 10 ppm เนื่องจากก๊าซชีวภาพที่ผ่านระบบทำความสะอาดจะมีอัตราการไหลไม่เพียงพอต่อการใช้งานของเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า จึงต้องสร้างระบบควบคุมอัตราการไหลก๊าซชีวภาพ โดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงประกอบเข้ากับเครื่องอัดก๊าซชีวภาพ เพื่อควบคุมอัตราการไหลก๊าซชีวภาพ ให้สอดคล้องกับความต้องการของเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า ในการสร้างระบบควบคุมความเร็วรอบเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้าพบว่าเมื่อเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าทำงานด้วยเชื้อเพลิงก๊าซชีวภาพโดยสมบูรณ์จะได้ใช้ที่ความเร็วรอบมอเตอร์โดยประมาณ 350 ±50 รอบต่อนาทีและอัตราการไหลสามารถหาได้จากรูปที่ 4.9 ได้โดยประมาณ 45 ±5 ลิตรต่อนาที ที่ความเร็วรอบเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า 3200 รอบต่อนาที พบว่ามีความเร็วรอบเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้าทำงานที่ความเร็วรอบคงที่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 5
สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอ ระบบควบคุมเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าสำหรับใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิง ระบบทำความสะอาดก๊าซชีวภาพ ระบบควบคุมอัตราการไหลก๊าซชีวภาพ และการออกแบบระบบควบคุมความเร็วรอบเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้าขนาด 5 กิโลวัตต์ ซึ่งได้แบ่งขั้นตอนการทดลองดังนี้

1. ระบบทำความสะอาดก๊าซชีวภาพ เพื่อกำจัดส่วนประกอบของก๊าซชีวภาพที่ไม่ต้องการอย่างเช่น CO_2 , H_2S เป็นต้น ในส่วนของก๊าซ CO_2 จะทำการปรับลดเมื่อปริมาณก๊าซมีเทน CH_4 มีค่าต่ำมาก (น้อยกว่า 45 %) จนถึงขั้นจุดติดไฟยาก แต่ในระบบการผลิตก๊าซชีวภาพจากฟาร์มสุกรไม่เป็นปัญหา ดังนั้นการลดปริมาณ CO_2 จึงไม่จำเป็น ในส่วนของไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ที่ปนเปื้อนในก๊าซชีวภาพมีคุณสมบัติเป็นก๊าซพิษ และเมื่อผสมกับไอน้ำจะกลายเป็นกรด ซัลฟูริค (H_2SO_4) เป็นสาเหตุของไอกรดทำให้สามารถกัดกร่อนชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ จึงเป็นส่วนสำคัญอย่างมากที่ต้องทำการกำจัดออก

ตารางที่ 5.1 แสดงคุณสมบัติของก๊าซชีวภาพก่อน และหลังทำความสะอาด

ก๊าซ	ก่อนทำความสะอาด	หลังทำความสะอาด
มีเทน (CH_4)	62.2 %	58.3 %
คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)	12.6 %	13.1 %
ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S)	1170 ppm	10 ppm

2. ออกแบบระบบควบคุมอัตราการไหลก๊าซชีวภาพให้สามารถส่งก๊าซชีวภาพประมาณ 45 ลิตรต่อนาที เพียงพอต่อความต้องการของเครื่องยนต์

3. ออกแบบระบบควบคุมความเร็วรอบเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้าขนาด 5 กิโลวัตต์ โดยควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ที่ความเร็วรอบ 350 รอบต่อนาที และส่งความเร็วรอบไปยังเครื่องอัดอากาศ ทำให้เครื่องอัดอากาศสร้าง อัตราการไหลก๊าซชีวภาพ 45 ลิตร

ต่อนาที เพื่อรักษาความเร็วรอบ เครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าที่ความเร็วรอบ 3200 รอบต่อนาที เพื่อทำให้เครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าสามารถทำงานได้ที่ความเร็วคงที่

4. ทำการการประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบประกอบด้วย 3 ส่วน โดยมีมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เครื่องอัดอากาศ เครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า ที่ความเร็วรอบ 3200 รอบต่อนาทีด้วยวิธีการระบุเอกลักษณ์ เพื่อหาค่าตัวแปรของระบบ

5. ออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอ เพื่อใช้ควบคุมความเร็วรอบเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าให้เหมาะสมกับการใช้งาน

6. ทดสอบการใช้งานระบบควบคุมพีไอ ด้วยการเริ่มระบบควบคุมความเร็วรอบเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยน้ำมันเบนซิน จากนั้นปิดระบบน้ำมันเบนซินและให้ระบบทำงานด้วยก๊าซชีวภาพ และใส่ภาระกรรมให้กับระบบ ทำให้ความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเพิ่มมากขึ้นเพื่อเพิ่มอัตราการไหลก๊าซชีวภาพให้มากขึ้นต่อความต้องการของเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า และขณะปล่อยโหลดพบว่าความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงลดลงเนื่องจากเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าต้องการปริมาณก๊าซชีวภาพน้อยลง

5.2 ข้อเสนอแนะ

การออกแบบระบบควบคุมเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าโดยก๊าซชีวภาพด้วยเครื่องอัดอากาศแบบ พีไอ เพื่อให้ระบบการทำงานของเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้ามีเสถียรภาพมากขึ้น มีข้อเสนอแนะดังนี้

1. ในขั้นตอนการทำความสะอาดก๊าซชีวภาพ ควรทำการตรวจสอบคุณภาพก๊าซชีวภาพ อย่างน้อยเดือนละ 1 ครั้ง เนื่องจากวัสดุที่ใช้ในการกรองลดปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จะเสื่อมสภาพตามระยะเวลาการใช้งาน

2. ในการเพิ่มภาระกรรมให้กับเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าไม่ควรเพิ่มเกิน 50 % ของความสามารถของเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า เพื่อป้องกันการสึกหรอจากการใช้ก๊าซชีวภาพถ้าเพิ่มสูงเกิน 50 % เป็นเวลานาน จะทำให้เครื่องมีความร้อนสะสมมากเกินไปทำให้ชิ้นส่วนของเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าสึกหรอเร็วขึ้น

3. ในการพัฒนาขั้นต่อไป สามารถนำไปสร้างระบบกลไกหรือสายพานเพื่อนำกำลังจากเครื่องยนต์มาใช้ในการขับเครื่องอัดอากาศ ให้มีอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพให้สอดคล้องกับความต้องการของเครื่องยนต์ ทดแทนการใช้กำลังขับเครื่องอัดอากาศจากมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

รายการอ้างอิง

ณทพร จินดาประเสริฐ (2544). **การศึกษาคุณลักษณะการเผาไหม้ของก๊าซชีวภาพในเครื่องยนต์สันดาปภายใน.** วิทยานิพนธ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ประเทือง ฝั้นแก้ว (2551). **การหาสมรรถนะเครื่องยนต์เล็กดีเซลโดยใช้เชื้อเพลิงร่วมกับก๊าซชีวภาพ**, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก. 96 หน้า.

วงศ์วิวรรธ ธนูศิลป์ และ สุนันทา เลาวัณย์ศิร (2555). **การกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จากก๊าซชีวภาพโดยใช้ถ่านกัมมันต์และเหล็ก.** การประชุมวิชาการแห่งชาติมหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 9. 6-7 ธันวาคม 2555.

วีระศักดิ์ กรัยวิเชียร (2542). **เครื่องยนต์เผาไหม้ภายในและทฤษฎีการคำนวณ.** (แปลจากต้นฉบับของ Heywood, J.B., 1998); วิทยพัฒน์, กรุงเทพฯ. 564 หน้า.

ศุทธินี ตุ้ยเต็มวงค์ (2553). **การพัฒนาอุปกรณ์ควบคุมปริมาณก๊าซอัตโนมัติสำหรับเครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพ**. วิทยานิพนธ์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่: กุมภาพันธ์ 2553.

สมบูรณ์ ศิริพรมงคลชัย (2546). **การปรับปรุงคาร์บูเรเตอร์สำหรับเครื่องยนต์สันดาปภายในที่ใช้ก๊าซชีวภาพ**. วิทยานิพนธ์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่: พฤษภาคม 2546.

สุชน ตั้งทวีวิพัฒน์, บุญล้อม ชีวะอิสระกุล, จันทร์จิรา ก้อนแก้ว, และ องอาจ ส่องสี (2555). **โครงการผลิตก๊าซชีวภาพเป็นแหล่งพลังงานทดแทนสำหรับครัวเรือนในชุมชน**. วารสารวิจัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่: ตุลาคม 2555.

Blekhman, David I., & Mollendorf, Joseph C. (2004). Multi-control-volume analysis of the compression process in a high-temperature root's type compressor. **The International Journal of Rotating Machinery**, pp.45-53.

Feng-Chi Hsieh (2007). Adaptive idle speed control for spark-ignition engines. National Taipei University of Technology, TAIWAN . **SAE International**

Fumao Wang, & Jingyu He (2010). Study on the power flow transmission characteristic of roots blower. **The International Conference On Computer Design And Appliations (ICCDA)**, pp.79-83.

Ganesan, V. (2004). Internal combustion engines. (2nd Edition), Mcgraw-Hill, Printed in Singapore. 777 pp

Gupta, H.N. (2009). Fundamentals of Internal combustion engines. (2nd Edition), **PHI Learning Private limited**, New Delhi, 597 pp

Heywood, J.B. (2015). Internal combustion engine fundamentals. (5 st Edition), **Mcgraw- Hill, Printed in USA**. 483 pp.

Jiang Yao-hua, XIONG Shu-sheng, SHI Wei, HE Wen-hua, ZHANG Tian, LIN Xian-ke, GU Yun, LV Yin-ding, QIAN Xiao-jun, YE Zong-yin, WANG Chong-ming, Wang Bei. (2009). Research of Biogas as Fuel for Internal Combustion Engine. **IEEE**.

Kiencke, U., & Nielsen, L. (2005). Automotive control systems for engine, Driveline and Vehicle. (2nd Edition), **Springer Berlin Heidelberg**, New york

Lino Guzzella, & Christopher H. Onder. (2010). Introduction to modeling and control of internal combustion enginesystems. (2nd Edition), **Springer-Verlag Berlin Heidelberg**, 362 pp

Ponsri, N. & Suntivarakorn, R.(2011). A comparative study of engine performance on modified diesel engine with gasoline, LPG and Biogas fuel. The 2011 **Khon Kaen University Research Journal (KKU Res J GS)**, January-March 2011; pp.27-38.

Prashant S. Daingade & S. D. Yadav (2013). Electronically operated fuel supply system to control air fuel ratio of biogas engine. **IEEE** (2013)

Pulkrabek, Willard W.(2003). Engineering fundamentals of the internal combustion engine. (2nd Edition), **Pretice Hall**, New Jersy, 426 pp

Salaskar, S. S., & Inamadar, K. H. (2012). Design and manufacturing of twin lobe roots blower using steel shaft. The 2012 **International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)**, July-August 2012, pp.266-270.

Sanel Galijasevic, Semsudin Masic, Senad Smaka, Abdulah Aksamovic, and Dinko Balic (2011). Parameter Identification and Digital Control of Speed of a Permanent Magnet DC Motors. **IEEE** (2011).

Suyong Chae, & Yujin Song (2011). Digital current sharing method for multiphase DC-DC converters using the peak input voltage. **IEEE Conference**, 17-22 Sept 2011, pp.1307–1311.

ภาคผนวก ก
การใช้งานและการติดตั้ง Rapcon

ก.1 ข้อมูลทางเทคนิคของ RAPCON Board

1. INTRODUCTION

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

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

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

1.1. Specifications

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

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

1.2. Requirements

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

1.3. Absolute Maximum Ratings

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

2. HARDWARE

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

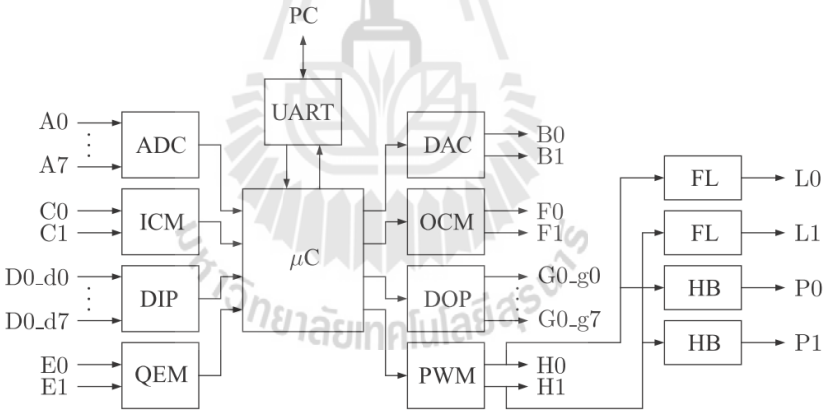


Figure 1. Functional block diagram of the board.

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

ก.2 การติดตั้ง Hardware กับโปรแกรม

1. ติดตั้งโปรแกรม MATLAB 2009a กับ Windows 7 32bit
2. ติดตั้ง Driver ของ PCI Serial Card ด้วยกรเชื่อมต่อผ่านสาย Serial Crossover cable
3. ติดตั้ง Real - Time Workshop และ Real - Time Windows Target
4. ติดตั้งโปรแกรมเสริมเพื่อใช้งานอุปกรณ์ Rapcon ด้วยไฟล์ rapcon2009a.exe ซึ่งในที่นี้ใช้ MATLAB เวอร์ชัน 2009a สำหรับ Windows 7 32 Bit และจะมีไฟล์ rtwt_2009b_win7_fix.zip สำหรับการแก้ไข BUG สำหรับ Windows 7 มาด้วย ซึ่งการติดตั้ง ต้องทำทีละขั้นตอน ด้วยวิธีการดังนี้
5. เข้าไปหาไฟล์ที่ชื่อว่า rtwin_main.c ภายในคอมพิวเตอร์ เช่น

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

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

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

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

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

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

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

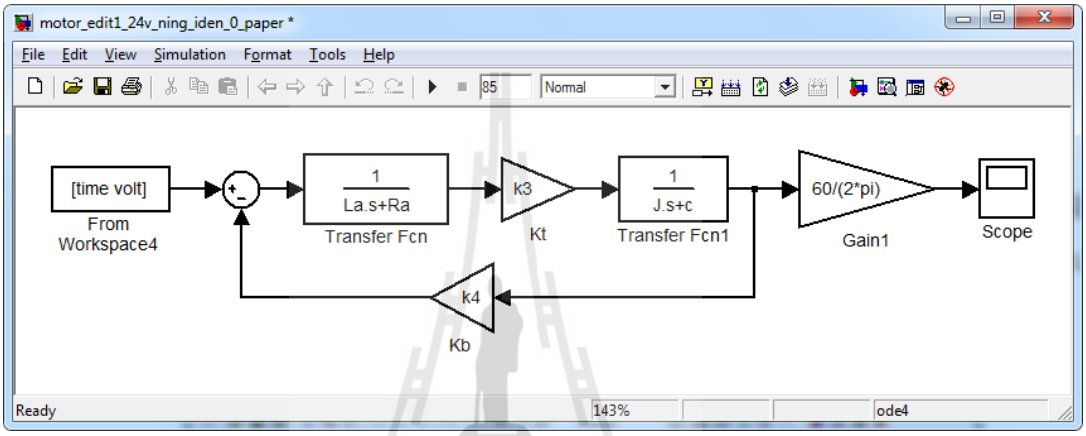
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ข

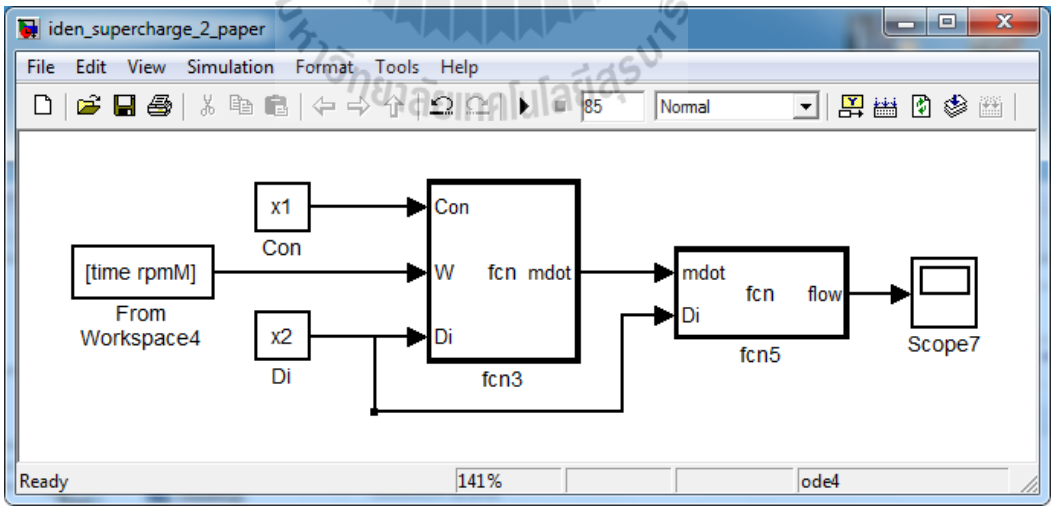
การใช้งาน โปรแกรม Simulink Parameter Estimation

ข. การใช้โปรแกรม Simulink Parameter Estimation

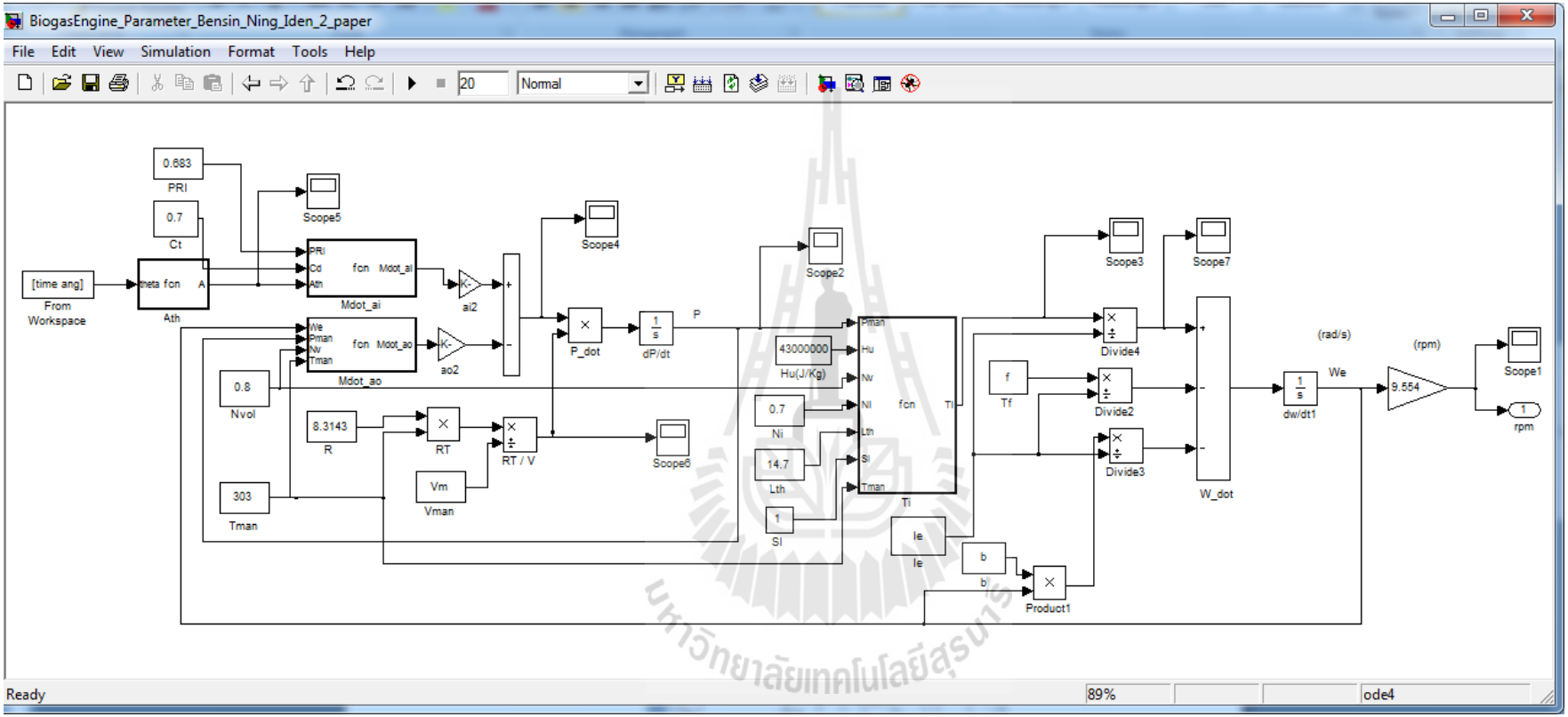
1. สร้างแบบจำลองระบบทั้งหมดประกอบด้วยกัน 3 ส่วน คือ แบบจำลองมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงดังรูปที่ ข.1 แบบจำลองเครื่องอัดอากาศ ข.2 และแบบจำลองเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้า ข.3



ข.1 แบบจำลองมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง



ข.2 แบบจำลองเครื่องอัดอากาศ



รูปที่ ข.3 แบบจำลองระบบเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้าก๊าซชีวภาพ

2. Import data ที่ได้จากการเก็บค่าจากการทดลองไว้ใน Work space ของโปรแกรม MATLAB ดังรูปที่ ข.4 โดยตัวแปรที่ต้องทำการประมาณค่ามีทั้งหมด 12 ตัวแปรประกอบไปด้วยตัวแปรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 6 ตัวแปรได้แก่ L_a, R_a, I, k_t, k_b, c ตัวแปรเครื่องอัดอากาศ 2 ตัวแปร $const, \rho_i$ ตัวแปรเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้า 4 ตัวแปร V_m, T_f, I_e, b โดยที่ต้องกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับตัวแปรทั้งหมดก่อนเริ่มทำการประมาณค่าตัวแปร โดยสามารถกำหนดค่าเริ่มต้นได้ที่ Command Windows ดังนี้

ค่าเริ่มต้นของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

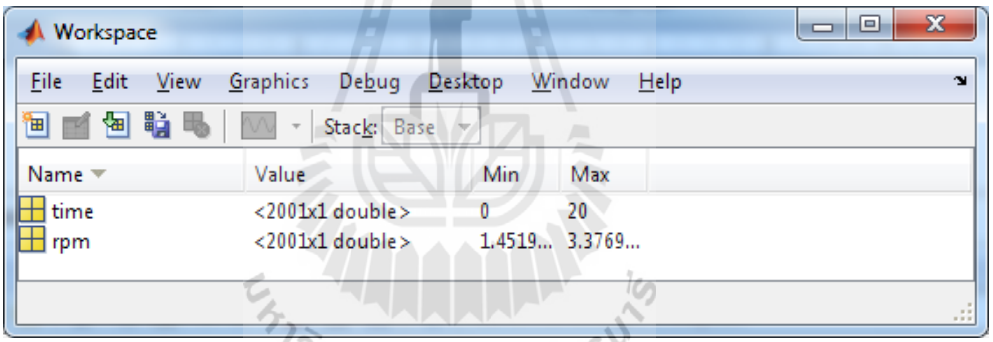
>> I=0.01; La=0.001; Ra=0; K_b=0.001; K_t=0.001; c=0.001;

ค่าเริ่มต้นของเครื่องอัดอากาศ

>> con=0; Di=0;

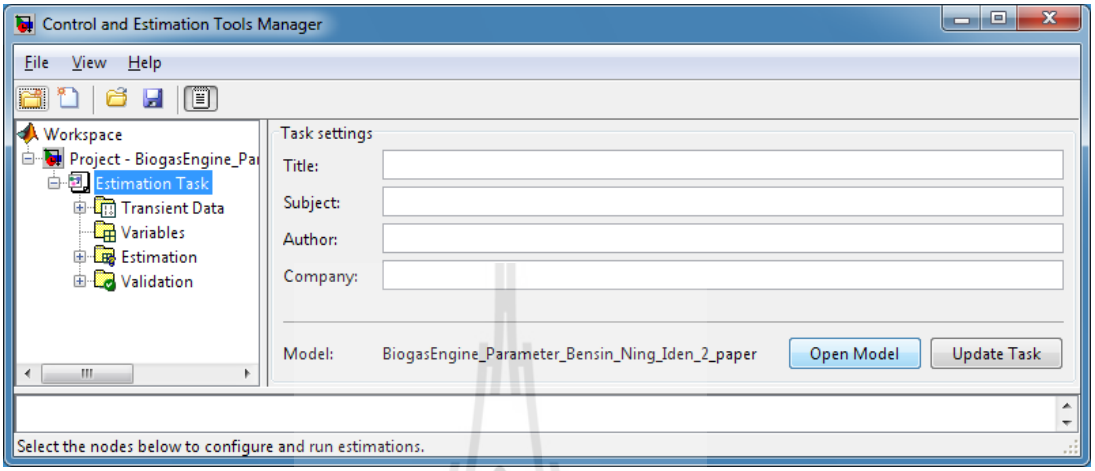
ค่าเริ่มต้นของเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้าก๊าซชีวภาพ

>> V_m=0.0001; I_e=0.01; b=0.01; f=0.1;



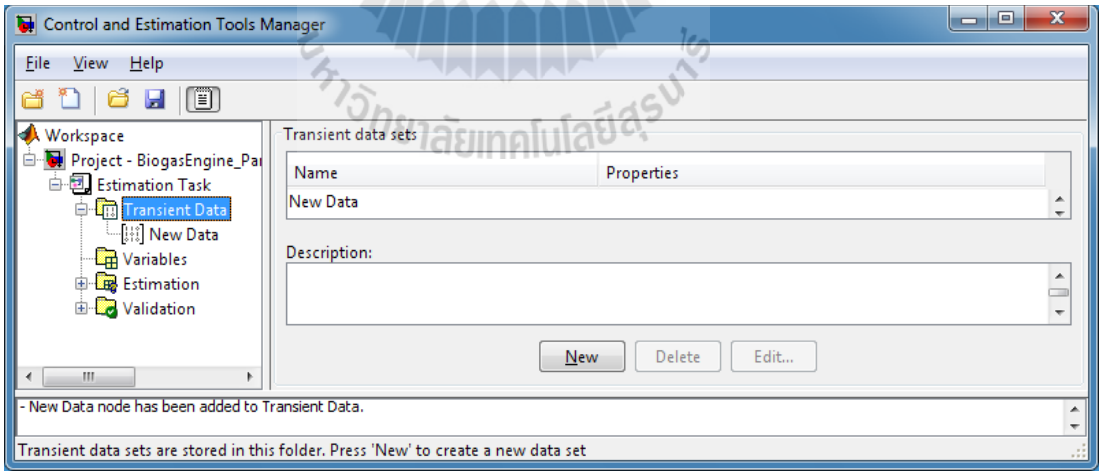
รูปที่ ข.4 ข้อมูลที่ Import เข้ามาไว้ใน Work space

3. เปิด Parameter Estimation บนหน้าต่างของ Simulink ที่ต้องการทำการประมาณค่าโดยเลือก tool > parameter estimation จะได้หน้าต่างดังนี้



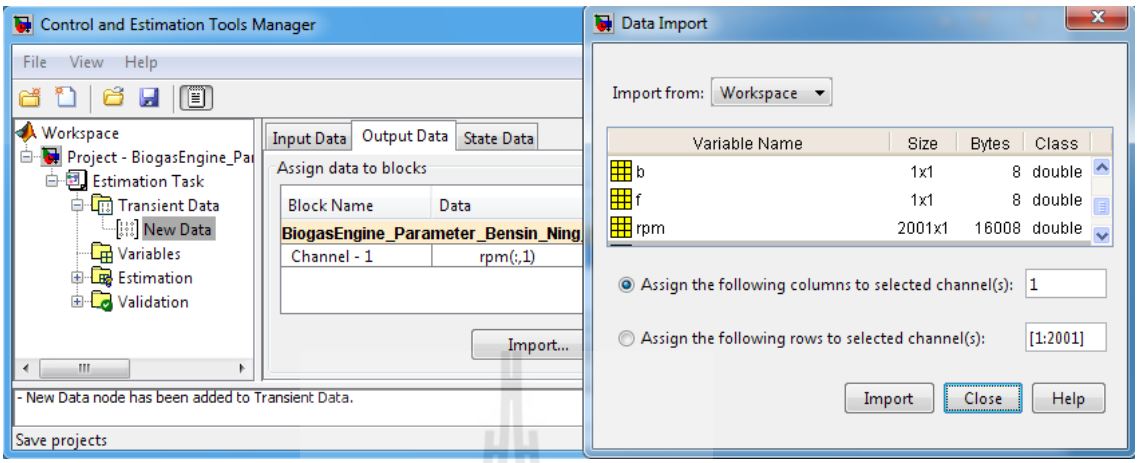
รูปที่ ข.5 หน้าต่างของ Control and Estimation Tools Manager

4. เลือก Transient Data > New



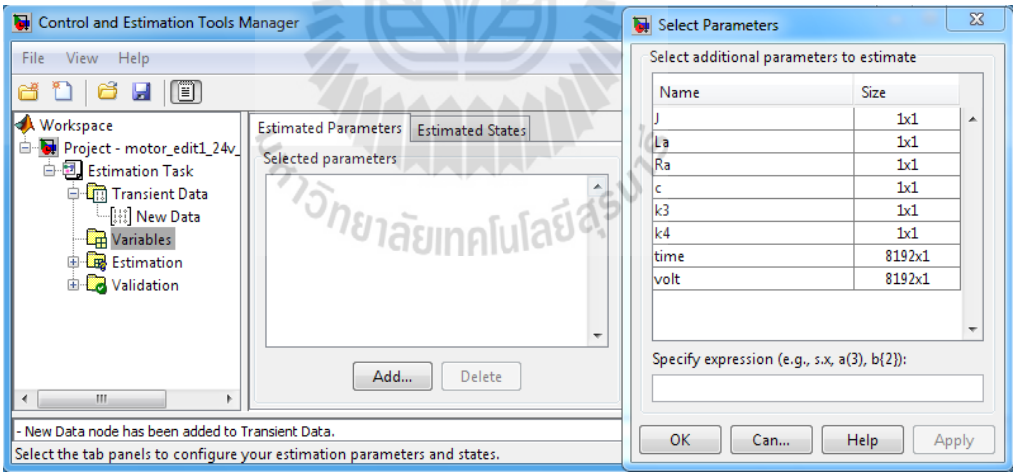
รูปที่ ข.6 แสดงหน้าต่างการเลือก New Data

5. เลือก New Data > Output Data > Import



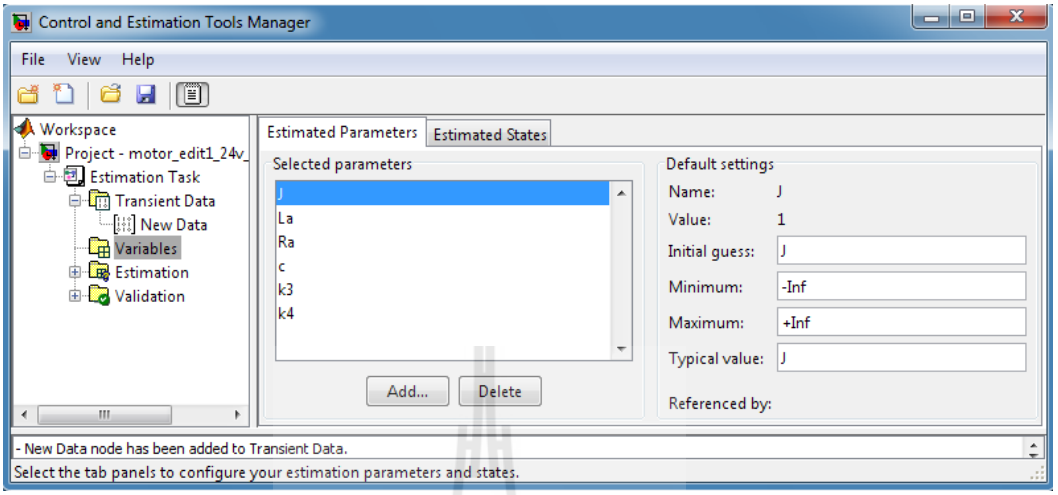
รูปที่ ข.7 แสดงการเลือกข้อมูลเข้าทำการ Estimation

6. เลือก Variables > Add > เลือกตัวแปรที่ทำการประมาณค่า > OK



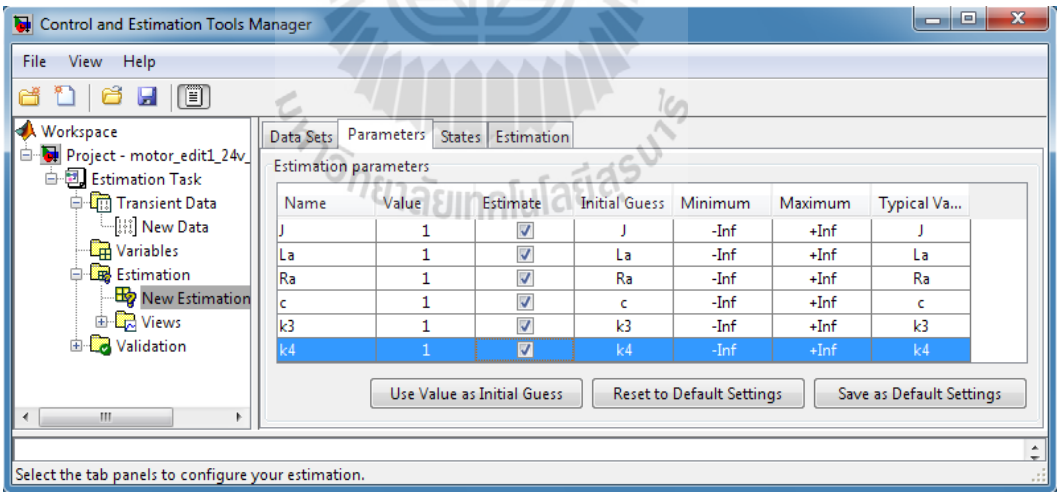
รูปที่ ข.8 ภาพแสดงหน้าต่างเลือกตัวแปรที่ต้องการประมาณค่า

7. กำหนดขอบเขตของตัวแปรที่จะประมาณค่าในส่วนของ Default setting



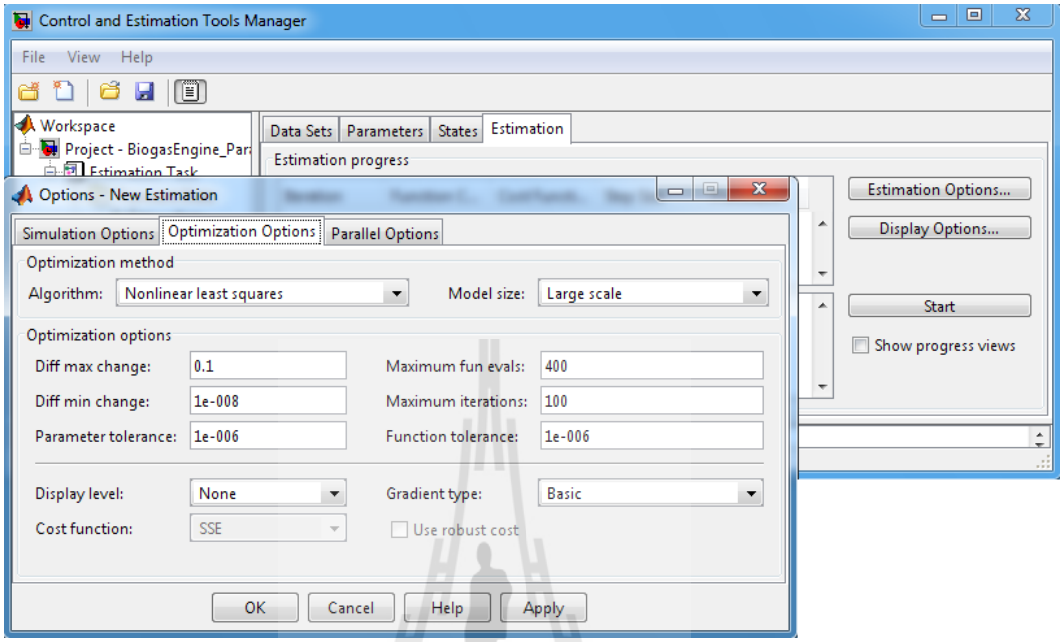
รูปที่ ข.9 แสดงการกำหนดขอบเขตตัวแปร ด้าน Default setting

8. เลือก Estimation > New ที่ Parameters เลือกทุกตัวแปรที่ต้องการทำการประมาณค่า

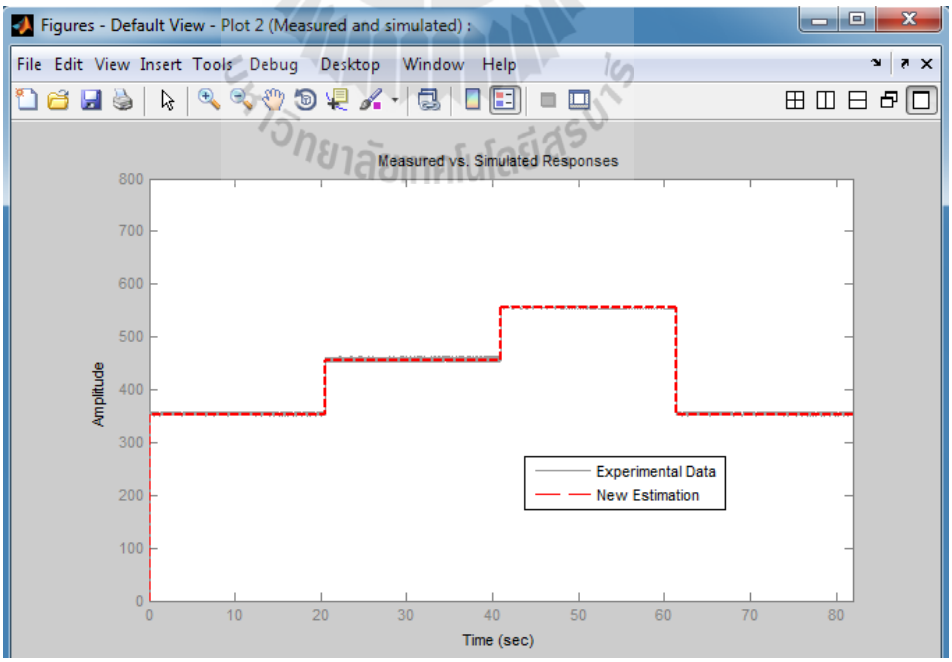


รูปที่ ข.10 แสดงการเลือกตัวแปรที่ต้องการประมาณค่า

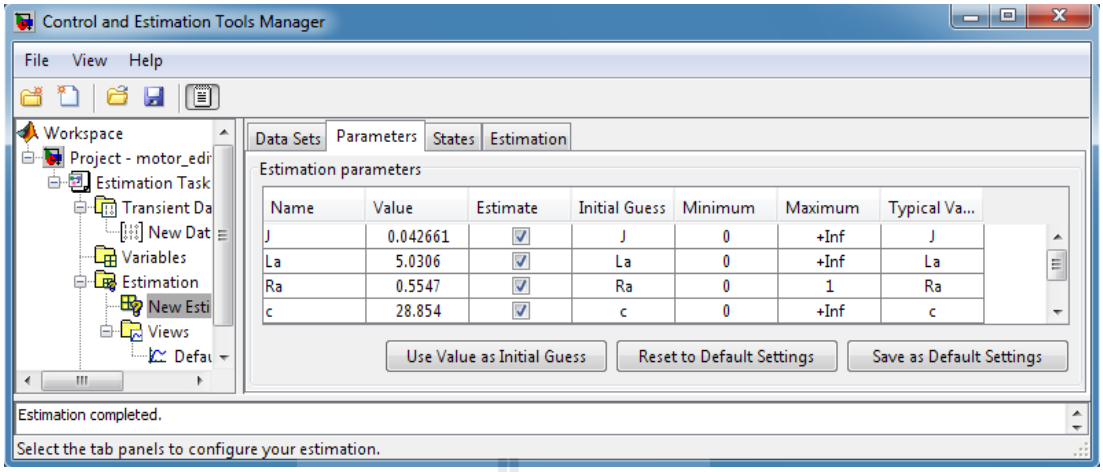
9. เลือก Estimation > Estimation Option > กำหนดอัลกอริทึม > Start



รูปที่ ข.11 แสดงการกำหนดอัลกอริทึมในการประมาณค่าตัวแปร



รูปที่ ข.12 แผนภาพแสดงการตอบสนองการประมาณค่าเทียบกับข้อมูลการทดลอง



รูปที่ ข.13 แผนภาพแสดงค่าตัวแปรที่ประมาณได้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ค

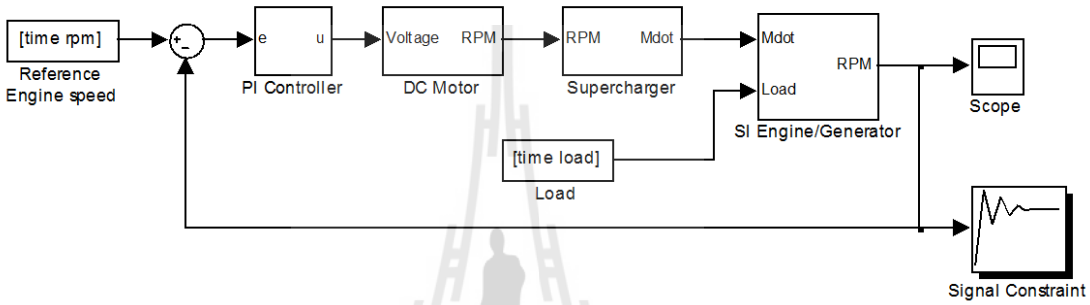
การใช้งานโปรแกรม Simulink Response Optimization

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ค. การใช้โปรแกรม Simulink Response optimization

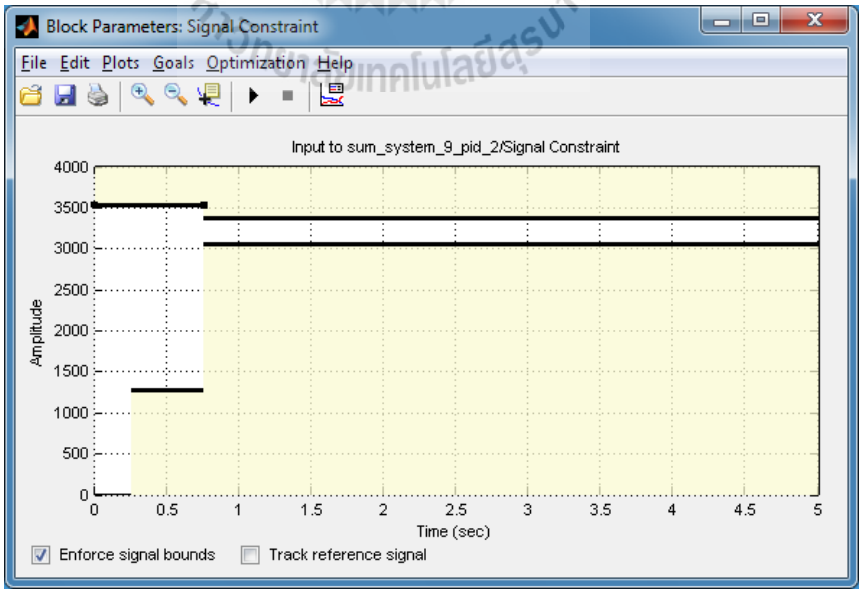
1. สร้างแบบจำลองระบบควบคุมโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ดังรูป ค.1

2. ติดตั้งคำสั่ง Signal Constrain ที่ช่องสัญญาณที่ต้องการควบคุมเพื่อกำหนดเงื่อนไขให้กับระบบ โดยคำสั่ง Signal Constrain อยู่ใน Simulink Library ที่ชื่อ Simulink Response Optimization



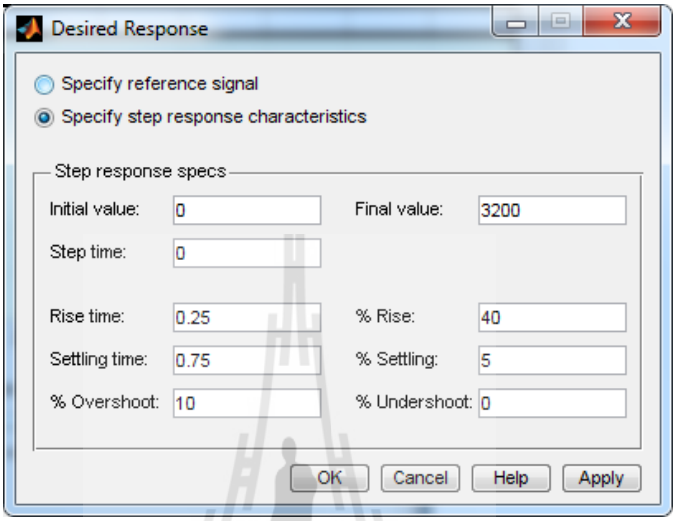
รูปที่ ค.1 แผนภาพแบบจำลองระบบควบคุมเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า

3. Double click ที่คำสั่ง Signal constrain เพื่อเข้าสู่ Signal Constrain windows



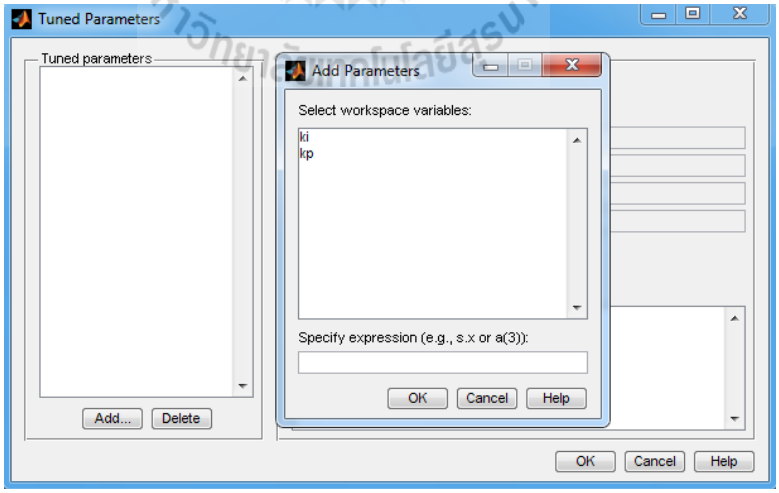
รูปที่ ค.2 แผนภาพแสดง Signal Constrain Windows

4. เลือก Goals > Desires Response > Specified step response เพื่อกำหนดขอบเขตของสัญญาณที่ต้องการควบคุม โดยสัญญาณจะถูกบังคับให้อยู่ในขอบเขตที่กำหนด Rise time, Setting time, Percent Over shoot ดังรูปที่ ค.3



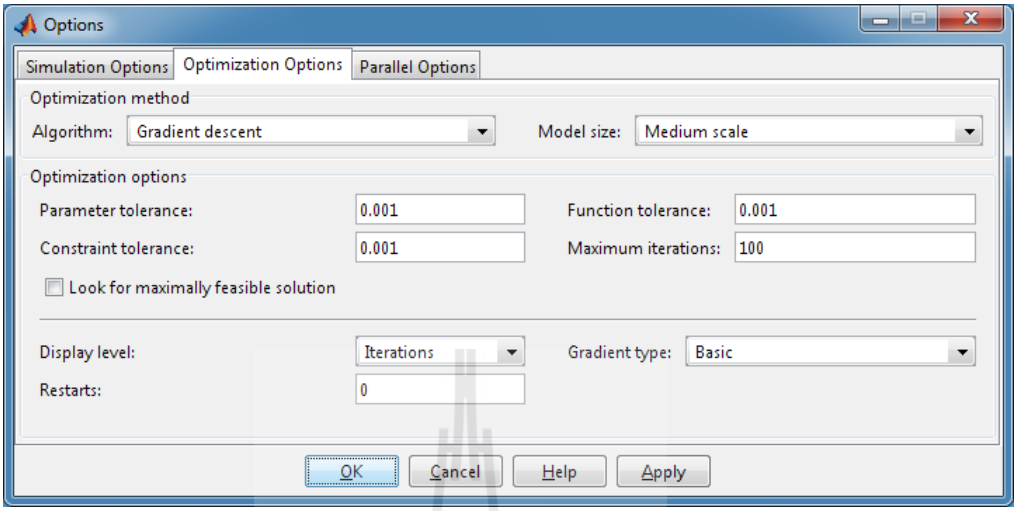
รูปที่ ค.3 การกำหนดขอบเขตของสัญญาณที่ต้องการควบคุม

5. เลือก Optimization > Tuned Parameter > Add ค่า Parameter ที่ต้องการปรับแต่ง



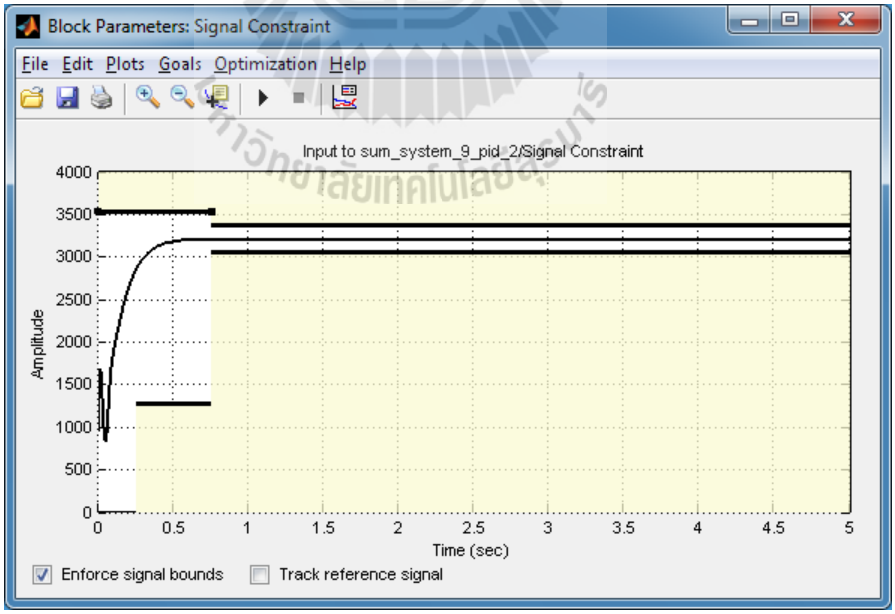
รูปที่ ค.4 การเพิ่มค่า Parameter ที่ต้องการปรับแต่ง

6. เลือก Optimization > Simulation option เพื่อกำหนดวิธีการทำ Optimization

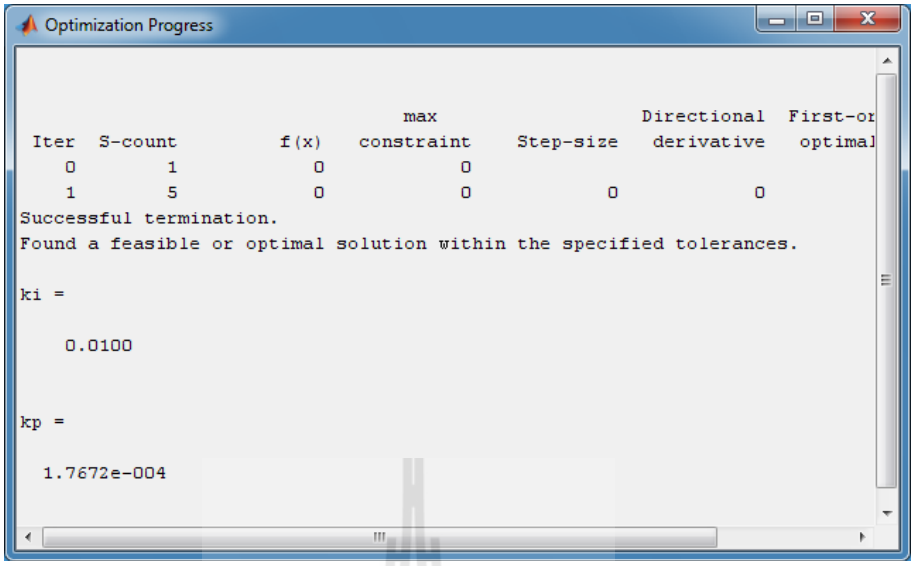


รูปที่ ค.5 การกำหนดค่าเพื่อทำการ Optimization parameter

7. เลือก Start optimization



รูปที่ ค.6 การตอบสนองของสัญญาณที่ต้องการภายใต้ขอบเขตที่กำหนด



รูปที่ ค.7 แสดงค่าดำเนินการของโปรแกรมในการหาค่าพารามิเตอร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ง
บทความที่ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

วิโรจน์ ขาวละออ, จิระพล ศรีเสริฐผล (2016). **ระบบควบคุมเครื่องยนต์เบนซินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าขนาด 5 กิโลวัตต์ จากก๊าซชีวภาพด้วยเครื่องอัดอากาศ.** The 4th Academic Science and Technology Conference 2016, ORA-AS-004. Bangkok, Thailand. 14 pp.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การประชุมวิชาการระดับชาติ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีระหว่างสถาบัน ครั้งที่ 4
ASTC2016: The 4th Academic Science and Technology Conference 2016
วันที่ 31 พฤษภาคม 2559

ระบบควบคุมเครื่องยนต์เบนซินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าขนาด 5 กิโลวัตต์ จากก๊าซชีวภาพด้วยเครื่องอัดอากาศ

THE CONTROL SYSTEM OF GASOLINE ENGINE FOR 5000 WATT ELECTRICAL POWER GENERATOR FROM BIOGAS WITH SUPERCHARGER

วิโรจน์ ขาวละออ *, จิระพล ศรีเสริฐผล
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000
**ติดต่อ: E-mail: kaola_or@yahoo.com เบอร์โทรศัพท์: 084-533-4777*

บทคัดย่อ

พลังงานเป็นสิ่งสำคัญและพลังงานส่วนใหญ่ที่ใช้พบว่า เป็นพลังงานแบบใช้แล้วหมดไป การใช้พลังงานทดแทนจึงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับปัญหาดังกล่าว และก๊าซชีวภาพก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับพลังงานทดแทนนั้น ก๊าซชีวภาพได้ถูกนำมาใช้แทนน้ำมันเบนซินในการผลิตกระแสไฟฟ้า ในภาคอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะมีขนาด 8-12 สูบ ผลิตกระแสไฟฟ้าได้ 1-3 เมกะวัตต์ แต่การนำก๊าซชีวภาพไปใช้สำหรับเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าขนาดเล็ก พบว่าอัตราการไหลของก๊าซไม่เพียงพอต่อการใช้งานของเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าขนาดเล็ก ส่งผลให้ไม่สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ จากปัญหาดังกล่าวงานวิจัยนี้นำเสนอการดัดแปลงและออกแบบระบบควบคุมอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพสำหรับเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าขนาด 5 กิโลวัตต์ เพื่อนำไปใช้กับชุมชนขนาดเล็ก โรงเรียน ฟาร์ม เป็นต้นโดยใช้ตัวควบคุมพีไอเพื่อควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ส่งกำลังไปยังเครื่องอัดอากาศ เพื่อควบคุมอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ สอดคล้องตามความต้องการของเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้า ผลการทดลองพบว่าระบบควบคุมอัตราการไหลก๊าซชีวภาพสามารถทำงานได้สัมพันธ์กับเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า ขนาด 5 กิโลวัตต์ ที่ความเร็วรอบเดินเบา 3200 rpm ที่อัตราการไหลก๊าซชีวภาพประมาณ 45 ลิตรต่อนาที และที่ความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้าประมาณ 350 รอบต่อนาที ซึ่งทำให้เครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า มีประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง

คำหลัก: *เครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า - เครื่องอัดอากาศ - มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง*

Abstract

Energy is essential for our human life; most of all is non-renewable so using renewable energy is necessary for solving that problem. Biogas is one of the alternatives that can replace gasoline for producing electricity. Most industries use 8-12 cylinders generator to produce around 1-3 MW. However, when we use biogas to drive the small generator, we found insufficient gas flow rate that cannot activate the operation for electricity generation. Because of that issue, we did the research to develop gas flow rate controlling for 5kW generator for household, farm, or school by using PI controller to controls speed of DC motor that transfers power to air compressor then we can control continuity of gas flow rate according to generator speed. The result of the experiment shows that biogas flow rate controlling system can work relatively with 5000 watt generator at 3200 rpm speed, 45 Litres/min biogas flow rate and 350 rpm speed of the DC motor, that makes the electrical generator has more efficiency to produce electricity continuously.

Keywords: *Electrical generator - Air compressor - DC motor*

1. บทนำ

ประเทศไทยมีการพัฒนาอย่างรวดเร็วทั้งภาคเกษตรและอุตสาหกรรม จึงทำให้มีความต้องการทางด้านพลังงานเพิ่มมากขึ้น โดยที่การใช้พลังงานของเราทุกวันนี้ กำลังเปลี่ยนจากการใช้พลังงานที่ใช้แล้วหมดไปเป็นการใช้พลังงานทดแทน ที่ต้องอาศัยเทคโนโลยีในการผลิตมากยิ่งขึ้น ก๊าซชีวภาพเป็นแหล่งพลังงานทดแทนอีกแหล่งหนึ่งที่สามารถนำมาเป็นแหล่งพลังงานทดแทนได้ โดยทั่วไประบบผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้ก๊าซชีวภาพจะใช้เครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าขนาดใหญ่และนำเข้าจากต่างประเทศ ทำให้มีค่าใช้จ่ายในการติดตั้งและการดูแลรักษาที่สูง ดังนั้นถ้าเราสามารถสร้างระบบควบคุมการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยก๊าซชีวภาพโดยใช้เครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าขนาดเล็กให้มีประสิทธิภาพทำให้ลดค่าใช้จ่ายในการติดตั้งและการดูแลรักษา และสามารถกระจายเทคโนโลยีสู่แหล่งชุมชนได้มากขึ้น

การใช้เครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้า โดยก๊าซชีวภาพ [1,2] เป็นการเปลี่ยนจากการใช้เชื้อเพลิงแบบใช้แล้วหมดไปมาเป็นการใช้เชื้อเพลิงทดแทนที่สามารถสร้างได้เองภายในประเทศ สำหรับก๊าซชีวภาพนี้ โดยทั่วไปสามารถผลิตจากวัตถุดิบที่เหลือใช้จากการเกษตร และอุตสาหกรรมจำพวกอาหาร โดยเฉพาะอย่างยิ่งการผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลสุกรซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการเลี้ยงสุกร และยังช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้มากกว่า 23% [2] จากตารางที่ 1 พบว่าก๊าซชีวภาพมีค่าความหนาแน่นที่ 0.94 (kg/m^3) ที่สถานะปกติ (มีเทน 60%) โดยค่าความหนาแน่นของก๊าซชีวภาพจะขึ้นอยู่กับความดันและอุณหภูมิ และพบว่ามีค่าความร้อนที่ 21.456 (MJ/m^3) ที่สถานะปกติ จะพบว่ามีค่าความร้อนที่ใกล้เคียงกับก๊าซธรรมชาติ แต่มีความหนาแน่นมากกว่า ดังนั้นถ้าเราสามารถเพิ่มความหนาแน่นให้ก๊าซชีวภาพเพื่อให้ก๊าซชีวภาพมีค่าความร้อนสูงขึ้นจะสามารถนำไปใช้ทดแทนก๊าซธรรมชาติและก๊าซหุงต้มได้ จากการศึกษาค้นคว้าการเพิ่มความหนาแน่นก๊าซชีวภาพ มีการพัฒนาการมาอย่างต่อเนื่อง [3,4] ในรายงานวิจัยนี้ได้นำเสนอระบบควบคุมเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าจากก๊าซชีวภาพด้วยเครื่องอัดก๊าซชีวภาพ โดยทำการดัดแปลงเครื่องยนต์น้อยที่สุดและรักษาความเร็วรอบเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าให้คงที่ได้มากที่สุด ซึ่งรายละเอียดจะขออธิบายในส่วนต่อไป

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของก๊าซชนิดต่าง [5]

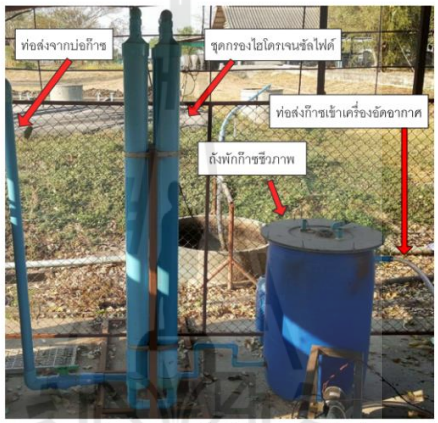
พารามเตอร์	หน่วย	NGV	LPG	Biogas
Calorific value (lower)	MJ/m^3	27.072	14.652	21.456
Density	Kg/m^3	0.384	0.411	0.940
Max ignition velocity	m/s	0.39	0.7	0.25
Theory air required	M^3 air/m^3 gas	9.53	3.83	5.71
Max CO in stack gas	% volume	11.9	13.1	17.8
Dew point	°C	59	60	60-160

(สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ 2544, 18)

2. ขั้นตอนการทำความสะอาดก๊าซชีวภาพ

ในงานวิจัยฉบับนี้ใช้ก๊าซชีวภาพจากของเสียจากการเลี้ยงสุกรในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยที่ก๊าซชีวภาพเป็นก๊าซที่เกิดจากการหมักและย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ได้จาก มูลสุกร การล้างสุกร รวมถึงการล้างคอกสุกร โดยอาศัยกลุ่มจุลินทรีย์ชนิดไม่ใช้อากาศทำหน้าที่หมักและย่อยสลายสารอินทรีย์ และเปลี่ยนรูปเป็นก๊าซชีวภาพ โดยจะมีส่วนผสมของก๊าซมีเทน (CH_4) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และก๊าซอื่นๆ ตามอัตราส่วนโดยประมาณ 60 : 38 : 2 ตามลำดับ โดยที่ก๊าซชีวภาพที่มีสัดส่วนมีเทนมากเกิน 50% จะสามารถนำมาใช้กับเครื่องยนต์ได้ [6,7,8]

รูปที่ 1 บ่อก๊าซชีวภาพมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

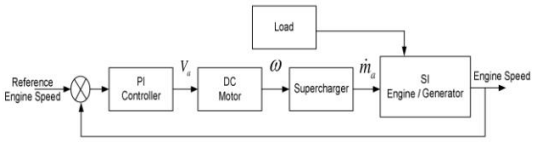


รูปที่ 2 ชุดกรองก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

ในรูปที่ 2 เป็นชุดกรองก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ และถังพักก๊าซ ซึ่งได้ต่อท่อส่งเพื่อลำเลียงก๊าซจากบ่อก๊าซดังรูปที่ 1 มายังชุดกรอง เมื่อผ่านชุดกรองทั้ง 4 คอลัม ก๊าซจะไปพักอยู่ที่ถังพักก๊าซเพื่อรอการใช้งาน เนื่องจากในก๊าซชีวภาพจะมีก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ในปริมาณที่สูงเกินมาตรฐานคือ 23 ppm [1] และใช้ขี้กลึงเหล็กในการกำจัดก๊าซ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ จะให้ประสิทธิภาพดีที่ [9] ซึ่งถ้าก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ทำปฏิกิริยากับไอน้ำจะกลายสภาพเป็นกรด และกัดกร่อนชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ให้ชำรุดได้ หลังจากใช้ชุดกรองก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์แล้วได้ค่า จากเดิม 1170 ppm ลดเหลือ 10 ppm จึงสามารถนำไปใช้กับเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้าได้อย่างปลอดภัย

3. ขั้นตอนการประมาณค่าตัวแปรของระบบ

ในขั้นตอนการประมาณค่าตัวแปรของระบบ เป็นขั้นตอนที่สำคัญมากเพื่อนำตัวแปรของระบบมาทำการวิเคราะห์การทำงานของระบบซึ่งประกอบไปด้วย แบบจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง แบบจำลองเครื่องอัดก๊าซชีวภาพ แบบจำลองเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า เพื่อนำแบบจำลองของระบบไปควบคุมความเร็วรอบของเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า โดยใช้ระบบควบคุมแบบปิดและมีตัวควบคุมแบบพีไอ พร้อมทั้งอินพุตและเอาท์พุตในโปรแกรม MATLAB ในส่วนของ Simulink ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 แผนภาพแบบจำลองระบบควบคุมความเร็วรอบเครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพ

รูปที่ 4 เครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าขนาด 5 กิโลวัตต์

3.1แบบจำลองมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่แปลงจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล โดยวิธีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดในสนามแม่เหล็ก ซึ่งจะทำให้เกิดแรงทางกลเกิดขึ้น โดยการควบคุมด้วยวิธี Armature Control การควบคุมจะทำโดยการปรับเปลี่ยนค่าความต่างศักย์ที่ให้กับวงจรอาร์เมเจอร์ (Armature Circuit) เพื่อควบคุมความเร็วรอบ ของแกนอาร์เมเจอร์ โดยให้วงจรสนาม (Field Circuit) มีค่าคงที่จึงสามารถพิจารณาเฉพาะวงจรอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้ การควบคุมทำได้โดยการปรับเปลี่ยนค่าความต่างศักย์ให้กับวงจรอาร์เมเจอร์ [10,11]

สมการของวงจรทางกล

$$k_t i_a - J\frac{d}{dt}\omega_a - c\omega_a - T_L = 0 \quad (1)$$

สมการของวงจรไฟฟ้า

$$V_a - i_a R_a - L_a\frac{d}{dt}i_a - k_b\omega_a = 0 \quad (2)$$

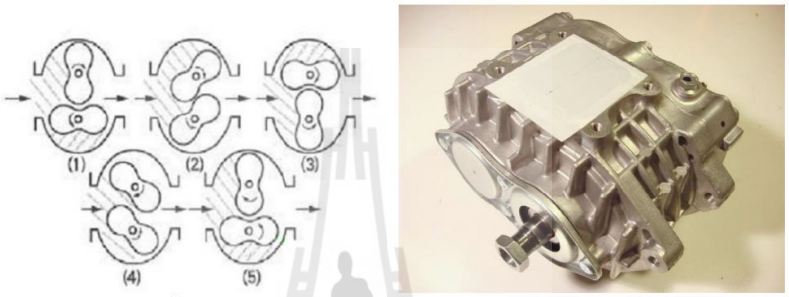
เมื่อ

- J โมเมนต์ความเฉื่อย (Kg.m^2)
- k_t ค่าคงที่ของแรงบิด (N.m/A)
- k_b ค่าคงที่ Electromotive force (V.s/rad)
- T_L แรงบิดที่เปลี่ยนแปลง (N.m)
- c ค่าความหน่วงทางกล (N.m.s/rad)
- i_a กระแสไฟฟ้าของอาร์เมเจอร์ (A)
- ω_a ความเร็วรอบ (rad/s)
- V_a ค่าความต่างศักย์ของอาร์เมเจอร์ (V)
- R ค่าความต้านทานของอาร์เมเจอร์ (Ω)
- L_a ค่าความเหนี่ยวนำของอาร์เมเจอร์ (H)

3.2 แบบจำลองเครื่องอัดอากาศ

เครื่องอัดก๊าซชีวภาพเลือกใช้แบบ Root blower เนื่องจากเครื่องอัดชนิด Reciprocating นั้นสามารถผลิตแรงดันได้สูง และได้อัตราการไหลเฉลี่ยที่เกือบคงที่ แต่การไหลที่ได้นั้นเป็นจังหวะ ในขณะที่เครื่องอัดชนิด Centrifugal นั้นผลิตแรงดันได้ต่ำ ถ้าต้องใช้แรงดันสูงๆ เพื่อให้ได้อัตราการไหลที่สูงจะต้องใช้เครื่องอัดต่ออนุกรมกันหลายขั้นตอน ส่วนเครื่องอัดชนิด

Roots blower จะอยู่ตรงกลางระหว่างสองกลุ่มนี้ คือให้ประสิทธิภาพที่สูง ในช่วงความดันด้านขาออกที่ไม่สูงมาก และไม่ต่ำมาก และให้อัตราการไหลที่ไม่เปลี่ยนไปแปลงไปมาก ตามการเปลี่ยนแปลงความดันด้านขาออก การเพิ่มความดันของ Roots blower นั้นอาศัยการขบกันของ Rotor 2 ตัว ที่มีจำนวนใบพัดเท่ากัน ดังรูปที่ 5 แสดงหน้าตัดการทำงานของ Roots blower ชนิดที่ rotor มี 2 ใบพัด ข้อดีของ Roots blower คือการหมุนขบกันของ rotor นั้นไม่มีการใช้น้ำมันหล่อลื่น ทำให้อากาศที่ได้นั้นเป็นอากาศที่ปราศจากไอน้ำมันปนเปื้อน สมการหาอัตราการไหลได้ดังนี้ [12,13]



รูปที่ 5 ขั้นตอนการทำงานของเครื่องอัดก๊าซชีวภาพ ชนิด Roots blower

$$\dot{m}_{corr} = const.\rho_i \eta_v \omega_S R^2 l \quad (3)$$

เมื่อ

$const$ ค่าคงที่ของสมการ

ρ_i ความหนาแน่น (kg/m^3)

η_v ประสิทธิภาพเชิงปริมาตร

ω_S ความเร็วรอบเครื่องอัดอากาศ (rad/sec)

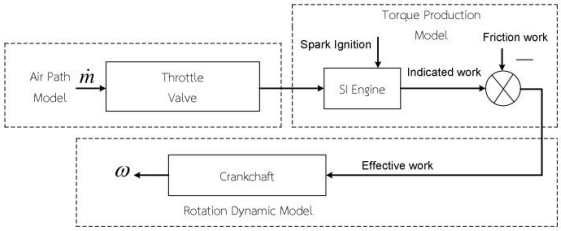
l ความยาวของใบพัด (mm)

R รัศมีของตัวกลีบใบพัด (mm)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.3 แบบจำลองค่าเฉลี่ยของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟ

ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องยนต์เบนซินเป็นต้นกำลังเพื่อส่งกำลังให้กับเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า โดยที่แบบจำลองเครื่องยนต์เบนซินได้อยู่บนพื้นฐาน 3 ส่วนด้วยกัน คือ แบบจำลองการไหลของอากาศ แบบจำลองแรงบิด แบบจำลองการหมุนทางกลโดยมีแบบจำลองโครงสร้างระบบเครื่องยนต์ดังรูปที่ 6 [14]



รูปที่ 6 แบบจำลองค่าเฉลี่ยของเครื่องยนต์จุดระเบิดภายใน

3.3.1 แบบจำลองการไหลของอากาศ

อัตราการไหลของมวลอากาศผ่านลิ้นปีกผีเสื้ออธิบายด้วยสมการของการไหลแบบยุบตัวผ่านคอคอด

$$\dot{m}_{ai} = \frac{C_d A_{th} P_{amb}}{\left(RT_{amb}\right)^{1/2}} PRI \tag{4}$$

เมื่อ

C_d สัมประสิทธิ์อัตราการไหล

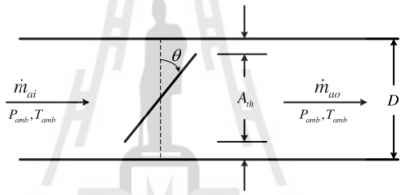
R ค่าคงที่ของแก๊สอุดมคติ (J/Kg.K)

A_{th} พื้นที่หน้าตัดของลิ้นปีกผีเสื้อ (m^2)

P_{amb} ความดันในสภาวะนิ่ง (N/m^2)

T_{amb} อุณหภูมิในสภาวะนิ่ง (K)

PRI อัตราส่วนความดัน



รูปที่ 7 ภาพพื้นที่หน้าตัดลิ้นปีกผีเสื้อ

จากรูปที่ 7 สามารถประมาณพื้นที่หน้าตัดของลิ้นปีกผีเสื้อได้ดังนี้

$$A_{th} = \pi \frac{D^2}{4} - \pi \frac{D^2}{4} \frac{\cos\theta}{\cos\theta_0} \tag{5}$$

เมื่อ

D เส้นผ่านศูนย์กลางของลิ้นปีกผีเสื้อ (m)

θ องศาของลิ้นปีกผีเสื้อที่เปลี่ยนไป (degree)

θ_0 องศาของลิ้นปีกผีเสื้อเริ่มต้น (degree)

3.3.2 แบบจำลองสมการแรงบิดของเครื่องยนต์

อัตราการไหลมวลอากาศออกจากท่อร่วมไอดี

$$\dot{m}_{ao} = \frac{V_d \eta_v P_{man} \omega_G}{120 RT_{man}} \tag{6}$$

เมื่อ

V_d ปริมาตรกระบอกสูบ

ω_G engine speed (rpm)

η_v ประสิทธิภาพเชิงปริมาตร

P_{man} ความดันในท่อร่วม (N/m^2)

T_{man} อุณหภูมิในท่อร่วม (K)

เมื่ออัตราการไหลของมวลเชื้อเพลิง $\left(\dot{m}_f\right)$ มีความสัมพันธ์กับอัตราการไหลของมวลอากาศออกจากท่อร่วมไอดี $\left(\dot{m}_{ao}\right)$ และแรงบิดบ่งชี้ $\left(T_i\right)$ ได้ดังนี้

$$\dot{m}_f = \frac{\dot{m}_{ao}}{\lambda . L_{th}} \tag{7}$$

$$P_i = \dot{m}_f Q_{HV} \eta_i \tag{8}$$

$$T_i = \frac{Q_{HV} V_d \eta_i \eta_v}{4\pi R \lambda L_{th} T_{man}} SI\left(\phi\right) p_{man} \tag{9}$$

เมื่อ

$\dot{m}_f$ อัตราการไหลของมวลเชื้อเพลิง (Kg/s)

$\dot{m}_{ao}$ อัตราการไหลของมวลอากาศออก (Kg/s)

λ The air/fuel equivalence

L_{th} The stoichiometric air/fuel

P_i กำลังบ่งชี้ (kW)

Q_{HV} ค่าความร้อนของพลังงานเชื้อเพลิง (J/kg)

η_i ประสิทธิภาพบ่งชี้

$SI(\phi)$ ฟังก์ชันการจุดระเบิด

อย่างไรก็ตามถ้ามีการหมุนของเพลาข้อเหวี่ยงจะเกิดแรงเสียทาน $\left(T_f\right)$ เข้ามาในระบบ ดังนั้นค่าแรงบิดที่มีประสิทธิผลของเครื่องยนต์ $\left(T_e\right)$ จะได้

$$T_e = T_i - T_f \tag{10}$$

$$T_e = \frac{Q_{HV} V_d \eta_i \eta_v}{4\pi R \lambda L_{th} T_{man}} SI\left(\phi\right) p_{man} - T_f \tag{11}$$

3.3.3 แบบจำลองสมการการหมุนของเครื่องยนต์

พลศาสตร์การหมุนของเครื่องยนต์ได้จากกฎข้อที่ 2 ของ Newton

$$I_e \dot{\omega} = T_e - T_l - b\omega \tag{12}$$

เมื่อ

T_l แรงบิดภาระกรรมภายนอก (N-m)

b ความหน่วงการหมุน (N-m-sec/rad)

$\dot{\omega}$ ความเร่งเชิงมุมของเครื่องยนต์ (rad/sec^2)

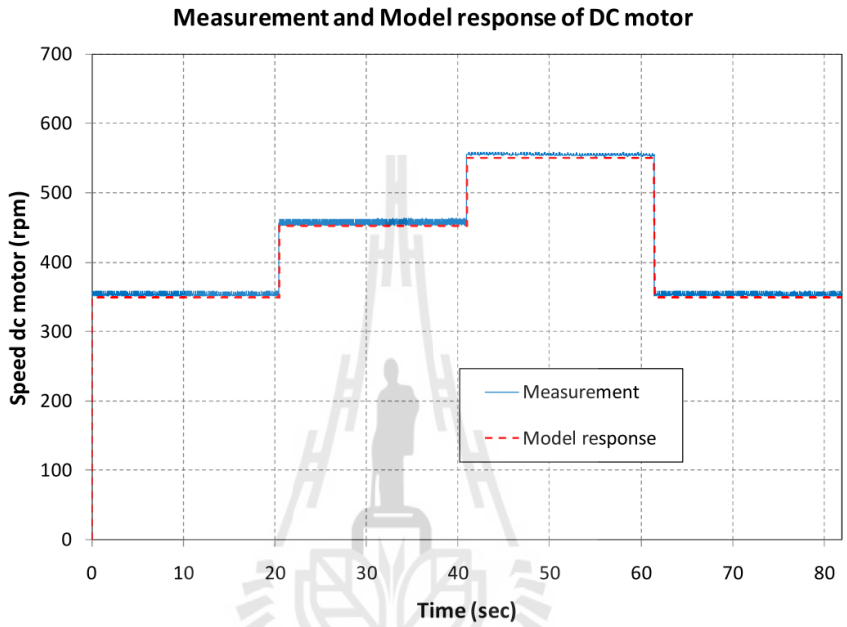
I_e ความเฉื่อยในการหมุนของเครื่องยต์ (kg-m^2)

T_e ค่าแรงบิดประสิทธิผล (N-m)

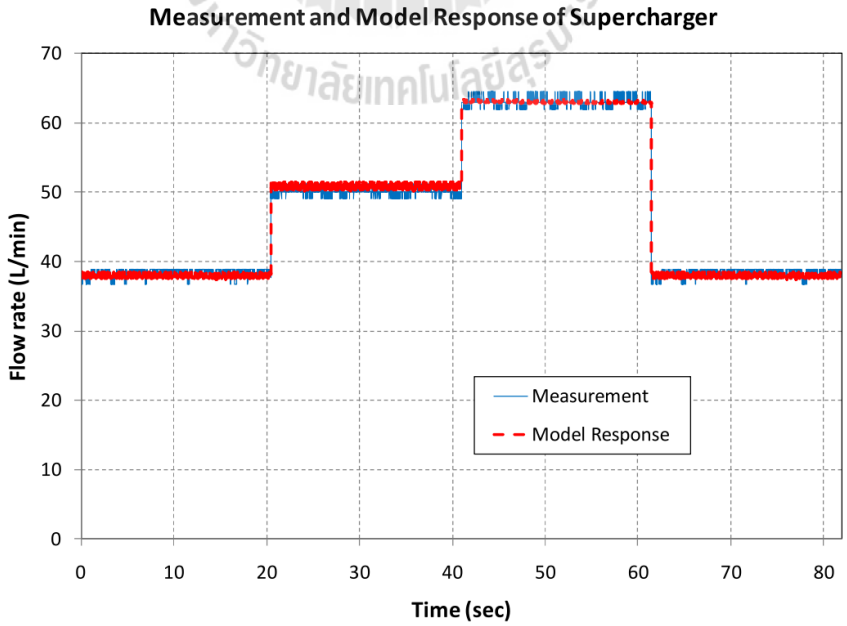
4. การระบุเอกลักษณ์ของระบบ

การระบุเอกลักษณ์ของระบบ เป็นการหาค่าคุณสมบัติระบบโดยที่ระบบแต่ละชนิดจะมีตัวแปรที่เหมาะสมและแตกต่างกันออกไป และสามารถหาได้โดยชุดคำสั่ง Parameter Estimation ในโปรแกรม MATLAB ของระบบที่กำลังศึกษา โดยที่ชุดคำสั่ง Parameter Estimation นี้เป็นคำสั่งที่อยู่ในส่วนของ Simulink ในโปรแกรม MATLAB ใช้เพื่อการประมาณค่าตัวแปรของ

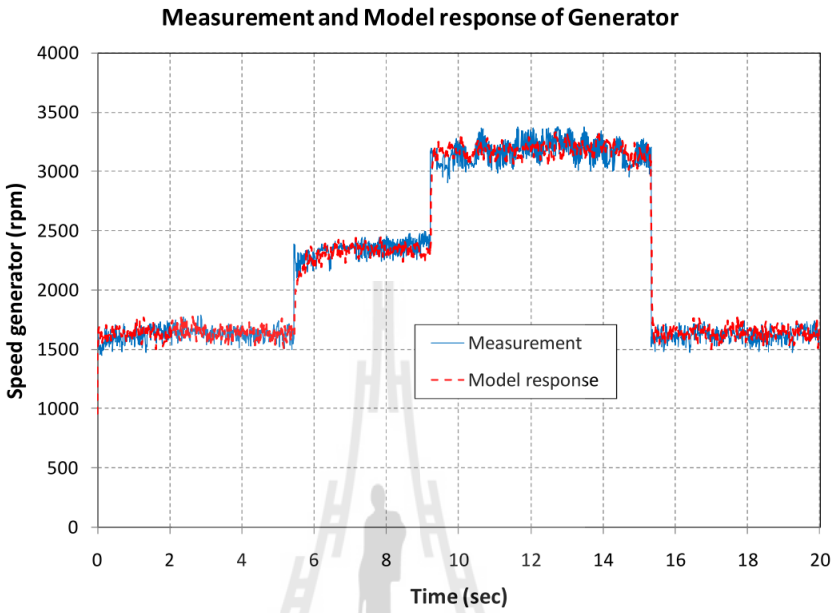
แบบจำลองเทียบกับข้อมูลที่เก็บได้จากผลการทดลอง ค่าตัวแปรของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เครื่องอัดก๊าซชีวภาพ และเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 8 รูปที่ 9 รูปที่ 10 [10]



รูปที่ 8 ผลการทดสอบระบุเอกลักษณ์มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 9 ผลการทดสอบระบุเอกลักษณ์เครื่องอัดอากาศชนิด Roots blower

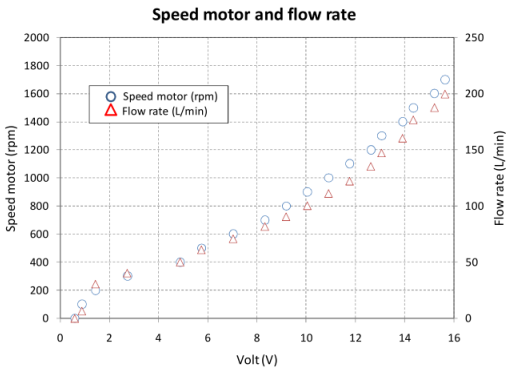


รูปที่ 10 ผลการทดสอบระบุเอกลักษณ์เครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า

ค่าตัวแปลที่ได้จากการทดสอบระบบและการทดลองนั้น ได้จากการระบุเอกลักษณ์ของระบบทำการแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ที่เกี่ยวข้องดังตารางที่ 2 และกราฟความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ส่งกำลังให้กับเครื่องอัดอากาศเพื่อสร้างอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ ดังรูปที่ 11

ตารางที่ 2 ผลการประมาณค่าตัวแปรของระบบ

Parameter Estimated											
DC Motor						Supercharger		Biogas Engine			
L_a	R_a	I	K_t	K_e	c	const	ρ_i	V_m	T_f	I_e	b
$6.3e^{-2}$	0.26	$1.7e^{-5}$	$6.2e^{-2}$	$6.2e^{-2}$	$7.6e^{-3}$	1.5414	0.6186	$6.6e^{-6}$	37.6	$4.2e^{-2}$	0.1



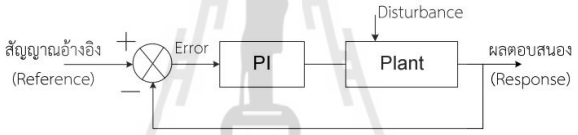
รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงกับอัตราการไหลเครื่องอัดอากาศ

5. คุณสมบัติของตัวควบคุมพีไอ

เมื่อพิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยมีอินพุตเป็นแรงดันไฟฟ้าและเอาท์พุตเป็นความเร็ว รอบพบว่า ระบบที่พิจารณาเป็นระบบอันดับ 0 (type 0) ซึ่งมีฟังก์ชันถ่ายโอนดังนี้ [10,11]

$$G(s) = \frac{k}{(L_a s + R_a)(Js + c) + k^2} \tag{13}$$

จากระบบอันดับ 0 เมื่อพิจารณาระบบควบคุมแบบปิดที่สภาวะคงตัว เมื่อให้สัญญาณอินพุตเป็นแบบขั้นบันได (Unit step) พบว่ายังคงมีค่าความผิดพลาดเกิดขึ้น ต้องเพิ่มอันดับของระบบเป็นอันดับที่ 1 ถึงจะทำให้ระบบมีค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัวเท่ากับศูนย์ โดยการใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ PI control เป็นการควบคุมในแบบระบบวงปิดหรือระบบควบคุมแบบป้อนกลับ การใช้งานระบบควบคุมพีไอ จะต่ออนุกรมกับระบบที่ต้องการควบคุมจากนั้นนำผลที่ได้จากกระบวนการ หรือเอาท์พุตของระบบเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิงดังรูปที่ 12 และส่งค่า Error ให้ controller ปรับแก้ต่อไป



รูปที่ 12 ตัวควบคุม PI ของระบบวงปิด

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e dt \tag{13}$$

ทำการลาปลาส และกำหนดค่าเริ่มต้นเท่ากับศูนย์ สมการ 13 เราจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของคอนโทรลเลอร์ PI เป็น

$$G(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \tag{14}$$

$$= K_p \frac{(s + K_i / K_p)}{s} \tag{15}$$

กำหนดให้ integral time constant τ_i เป็น

$$\tau_i = \frac{K_p}{K_i} \tag{16}$$

ดังนั้นเราจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนคอนโทรลเลอร์ PI

$$G(s) = K_p \frac{\left[s + (1/\tau_i) \right]}{s} \tag{17}$$

เมื่อ

$u(t)$ = สัญญาณควบคุมออกจาก PI

$e(t)$ = ค่าความคลาดเคลื่อนของสัญญาณ

K_P = อัตราส่วนขยายสัดส่วน

K_i = อัตราส่วนขยายปริพันธ์

จากสมการที่ (17) พบว่าเมื่อทำการใช้ระบบควบคุมแบบพีไอ จะเพิ่มจำนวนโพลให้กับระบบควบคุมและเพิ่ม type ของระบบจาก type 0 เป็น type 1 ซึ่งทำให้ระบบมีความผิดพลาดที่สถานะคงตัวเป็นศูนย์ในกรณีอินพุทแบบขั้นบันได ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ระบบควบคุมแบบพีไอ เพื่อขจัดความผิดพลาดของระบบที่เหลืออยู่ ที่เกิดจากการใช้เพียงเทอมสัดส่วนเพียงอย่างเดียว

6. ผลการทดลอง

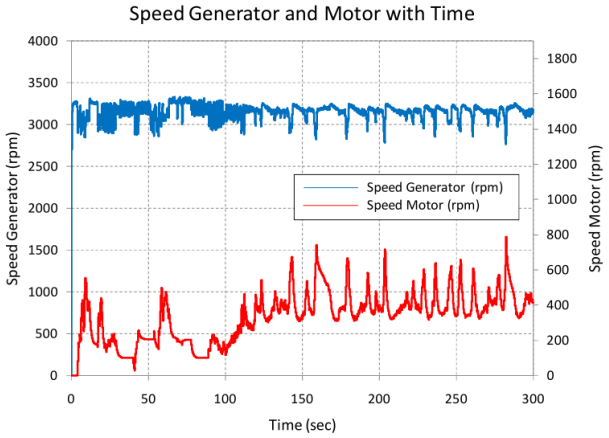
การทดลองจะใช้การหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อสร้างความเร็วรอบให้กับเครื่องอัดอากาศเพื่อทำให้เครื่องอัดอากาศสร้างอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพให้เพียงพอต่อความต้องการของเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า ที่มีระบบควบคุมความเร็วรอบเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าแบบปิด ในส่วนของเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า และมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ปฏิบัติการได้มีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเร็วรอบ โดยทำการแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1 ทำการทดลองให้เครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าเปลี่ยนการใช้เชื้อเพลิงจากน้ำมันเบนซินเป็นก๊าซชีวภาพ และส่วนที่ 2 ทำการทดลองเปลี่ยนแปลงภาระโหลดของเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าขณะใช้ก๊าซชีวภาพเพื่อทดสอบการตอบสนองของระบบควบคุม

ส่วนที่ 1 การทดลองเปลี่ยนระบบเชื้อเพลิงเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าจากการใช้น้ำมันเบนซินเป็นก๊าซชีวภาพ ด้วยระบบควบคุมความเร็วรอบเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า โดยใช้ชุดควบคุม 2 ชุดดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการหาตัวแปรชุดระบบควบคุม

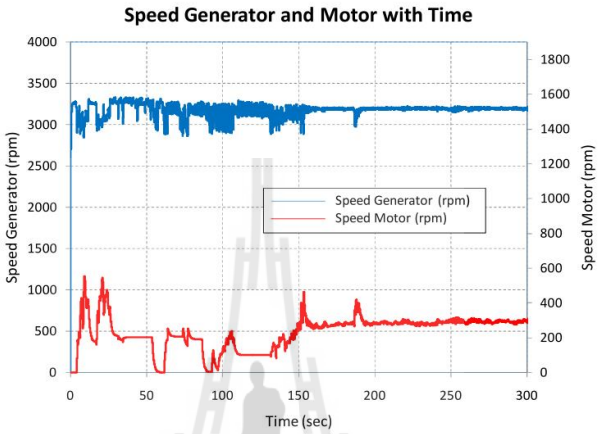
ชุดควบคุมที่ 1		ชุดควบคุมที่ 2	
K_p	K_i	K_p	K_i
1.7672e-4	0.3888e-4	1.7672e-4	1.3888e-4

ในชุดที่ 1 ดังรูปที่ 13 พบว่าการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสอดคล้องกับความเร็วรอบของเครื่องยนต์แต่การตอบสนองยังไม่สามารถทำให้ความเร็วรอบเครื่องยนต์มีค่าคงที่



รูปที่ 13 ความเร็วรอบเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าและความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้าที่ชุดระบบควบคุมที่ 1

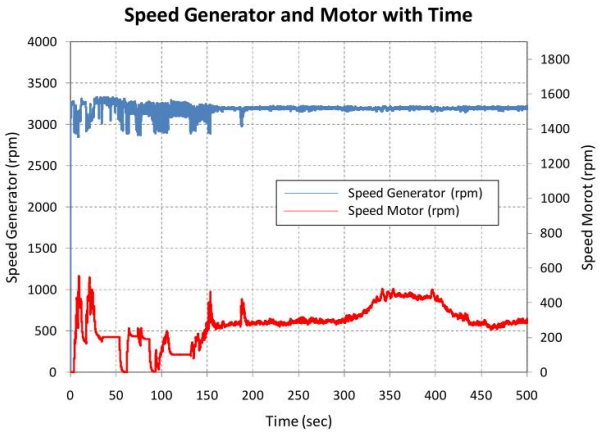
ในระบบควบคุมชุดที่ 2 พบว่าการทำงานของมอเตอร์ตอบสนองต่อความเร็วรอบเครื่องยนต์ได้เหมาะสมมากขึ้นเนื่องจากความเร็วรอบของเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้ามีความคงที่มากขึ้น ดังรูปที่ 14



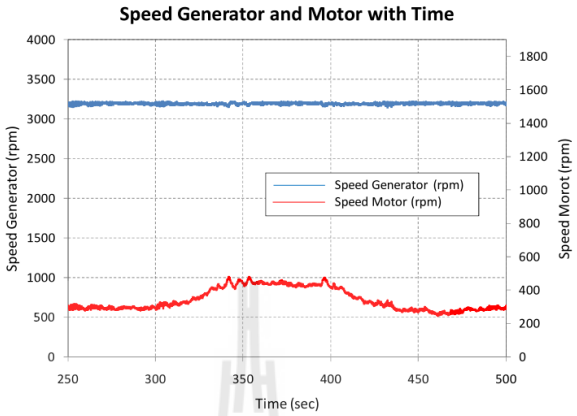
รูปที่ 14 ความเร็วรอบเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าและความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้าที่ชุดระบบควบคุมที่ 2

จากรูปที่ 13 และ 14 กราฟความเร็วรอบเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้ากับมอเตอร์ไฟฟ้า เมื่อปิดระบบน้ำมันเบนซินเครื่องยนต์จะใช้น้ำมันเชื้อเพลิงที่ค้างในคาร์บูเรเตอร์เมื่อน้ำมันใกล้หมด และระบบเริ่มปรับมาใช้ก๊าซชีวภาพ สังเกตุได้ว่าในช่วงที่เครื่องยนต์กำลังเปลี่ยนมาใช้ก๊าซชีวภาพ มอเตอร์ไฟฟ้าจะเดินๆ หยุดๆ เนื่องจากยังคงมีน้ำมันเบนซินบางส่วนค้างอยู่ในคาร์บูเรเตอร์ และเมื่อมอเตอร์ไฟฟ้าเริ่มทำงานเพื่อให้เครื่องอัดก๊าซชีวภาพทำงานและดูดเชื้อเพลิงก๊าซชีวภาพเข้าเครื่องยนต์เพื่อให้สอดคล้องกับความเร็วเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า

<u>ส่วนที่ 2</u> ทำการทดลองระบบควบคุมชุดที่ 2 ด้วยการใส่โหลดและดูผลตอบสนองของเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าขณะใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงดังรูปที่ 15 และรูปที่ 16



รูปที่ 15 กราฟเปรียบเทียบความเร็วรอบเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้ากับความเร็วรอบมอเตอร์ที่ไม่มีภาระกรรมกับมีภาระกรรม



รูปที่ 16 ภาพขยายความเร็วรอบเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้ากับความเร็วรอบมอเตอร์ ที่ไม่มีภาระกรรมกับมีภาระกรรม

7. สรุป

การเปลี่ยนระบบการทำงานเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าจากการใช้น้ำมันเบนซิน เป็นเชื้อเพลิงก๊าซชีวภาพ มีความสัมพันธ์กันระหว่างมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นตัวส่งกำลังการหมุนให้เครื่องอัดอากาศส่งอัตราการไหลก๊าซชีวภาพให้กับเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า ต้องได้สัดส่วนตามที่เครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าต้องการ และในส่วนของการเพิ่มโหลดให้กับเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้านั้นจะมีผลทำให้ความเร็วรอบของเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าลดลง ขณะเดียวกัน ระบบควบคุมจะสั่งการให้มอเตอร์ไฟฟ้ามีความเร็วรอบเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 15 และ 16 เพื่อทำให้เครื่องอัดก๊าซชีวภาพ หมุนเร็วเพิ่มขึ้นและส่งอัตราการไหลก๊าซชีวภาพ เพิ่มขึ้นไปยังเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าซึ่งข้อมูลที่ได้สามารถประมาณความเร็วรอบมอเตอร์และอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ โดยมีความสัมพันธ์กับความเร็วรอบเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า รวมถึงกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลด และสามารถควบคุมความเร็วรอบเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าให้คงที่

8. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทางมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และ บริษัท มณีสูรย์ กรุ๊ป จำกัดที่ให้งานสนับสนุนงานวิจัย

9. เอกสารอ้างอิง

[1] ประเทือง ฝั้นแก้ว (2551). *การหาสมรรถนะเครื่องยนต์เล็กดีเซลโดยใช้เชื้อเพลิงร่วมกับก๊าซชีวภาพ*, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก. 96 หน้า

[2] ณทพร จินดาประเสริฐ (2544). *การศึกษาคุณลักษณะการเผาไหม้ของก๊าซชีวภาพในเครื่องยนต์สันดาปภายใน*. วิทยานิพนธ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

[3] ศุทธินี ตุ้ยเต็มวงค์ (2553). *การพัฒนาอุปกรณ์ควบคุมปริมาณก๊าซอัตโนมัติสำหรับเครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพ*. วิทยานิพนธ์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่: กุมภาพันธ์ 2553.

[4] สมบูรณ์ ศิริพรมงคลชัย (2546). *การปรับปรุงคาร์บูเรเตอร์สำหรับเครื่องยนต์สันดาปภายในที่ใช้ก๊าซชีวภาพ*. วิทยานิพนธ์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่: พฤษภาคม 2546.

[5] สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (2544). การออกแบบและก่อสร้างบ่อก๊าซชีวภาพ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: โครงการวิทยาศาตร์และเทคโนโลยีเพื่อชนบทและการพัฒนาที่ยั่งยืน. 2544

[6] Jiang Yao-hua, XIONG Shu-sheng, SHI Wei, HE Wen-hua, ZHANG Tian, LIN Xian-ke, GU Yun, LV Yin-ding, QIAN Xiao-jun, YE Zong-yin, WANG Chong-ming, Wang Bei. (2009). *Research of Biogas as Fuel for Internal Combustion Engine.* IEEE (2009)

[7] Prashant S. Daingade & S. D. Yadav (2013). *Electronically operated fuel supply system to control air fuel ratio of biogas engine*. IEEE (2013)

[8] Wong, J.K.S. (1977). *Study of Mixtures of Methane and Carbon Dioxide as Fuels in a Single Cylinder Engine (CLR).* Detroit September 26-30 1977 SAE Paper 770796

[9] วงศ์วิวรรธ ธนูศิลป์ และ สุนันทา เลาวัณย์ศิร (2555). *การกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จากก๊าซชีวภาพโดยใช้ถ่านกัมมันต์และเหล็ก*. การประชุมวิชาการแห่งชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 9. 6-7 ธันวาคม 2555.

[10] Sanel Galijasevic และคณะ (2011). *Parameter Identification and Digital Control of Speed of a Permanent Magnet DC Motors*. IEEE (2011)

[11] บัญชา ศรีวิโรจน และคณะ (2556). *การควบคุมมอเตอร์กระแสตรงแบบกระตุ้นแยก ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC*. วารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยธนบุรี

[12] Heywood, J.B. (2015). *Internal combustion engine fundamentals*. (5st Edition), Mcgraw-Hill, Printed in USA. 483 pp.

[13] Salaskar, S. S., & Inamadar, K. H. (2012). Design and manufacturing of twin lobe roots blower using steel shaft. *The 2012 International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, July-August 2012, pp.266-270.

[14] Feng-Chi Hsieh (2007). *Adaptive idle speed control for spark-ignition engines.* National Taipei University of Technology, TAIWAN . SAE International .

ประวัติผู้เขียน

นายวิโรจน์ ขาวละออ เกิดเมื่อวันพฤหัสบดีที่ 29 พฤศจิกายน 2522 ที่อำเภอเมือง จังหวัดปทุมธานี เริ่มการศึกษาระดับประถมศึกษาชั้นปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนอนุบาลปทุมธานี จังหวัดปทุมธานี และระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นที่โรงเรียนปทุมวิไล จังหวัดปทุมธานีและระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายที่โรงเรียนสวนกุหลาบวิทยาลัยนนทบุรี จังหวัดนนทบุรี สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ.2548 และได้ศึกษาต่อระดับวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ ณ สถาบันการศึกษาเดิม โดยได้รับการสนับสนุนทุนการศึกษาคือทุนผู้ช่วยวิจัย

ขณะศึกษาในระดับมหาบัณฑิตได้เป็นผู้สอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ในรายวิชาเขียนแบบวิศวกรรม 1

ผลงานวิจัย: ได้เสนอบทความเข้าร่วมในการ ประชุมวิชาการระดับชาติ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีระหว่างสถาบัน ครั้งที่ 4 ประจำปี 2559 เรื่อง ระบบควบคุมเครื่องยนต์เบนซินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าขนาด 5 กิโลวัตต์ จากก๊าซชีวภาพด้วยเครื่องอัดอากาศ ดังปรากฏรายละเอียดในภาคผนวก ง.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี