

ระบบควบคุมเครื่องยนต์เบนซินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า
ขนาด 20 กิโลวัตต์ จากก๊าซชีวภาพ



นายสุนทร โอษฐ์งาม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2557

**THE CONTROL SYSTEM OF GASOLINE ENGINE
FOR 20 kW ELECTRICAL POWER GENERATOR
FROM BIOGAS**

Soontorn Odngam



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

Suranaree University of Technology

Academic Year 2014

ระบบควบคุมเครื่องยนต์เบนซินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า

ขนาด 20 กิโลวัตต์ จากก๊าซชีวภาพ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร. กิรติ สุลักษณ์)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร. จิระพล ศรีเจริญผล)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร. วีรชัย อัจฉาญ)

กรรมการ

(อ. ดร. ธีทัต คลวิชัย)

กรรมการ

(อ. ดร. ชโลธร ธรรมแท้)

กรรมการ

(ศ. ดร. ชูกิจ ลิ้มปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

(รศ. ร.อ. ดร. กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

สุนทร โอบฐงาม : ระบบควบคุมเครื่องยนต์เบนซินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า
ขนาด 20 กิโลวัตต์ จากก๊าซชีวภาพ (THE CONTROL SYSTEM OF GASOLINE
ENGINE FOR 20 kW ELECTRICAL POWER GENERATOR FROM BIOGAS)
อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสวีรัฐผล, 130 หน้า.

ประเทศไทยได้มีการพัฒนาอย่างรวดเร็วทั้งภาคเกษตรและอุตสาหกรรม จึงทำให้มีความต้องการทางด้านพลังงานเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะพลังงานจากปิโตรเลียม ซึ่งเป็นพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป จึงได้มีการวิจัยหาพลังงานอื่นเพื่อนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทน ก๊าซชีวภาพเป็นผลผลิตจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจน โดยองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพจะมีก๊าซมีเทนเป็นส่วนประกอบหลักเมื่อนำมาเผาไหม้จะให้พลังงานความร้อน ปัจจุบันรัฐบาลได้มีการส่งเสริมให้ชุมชนสร้างระบบบำบัดของเสียจากการเลี้ยงสัตว์ เช่น มูลสุกร ไก่ วัว เป็นต้น เพื่อนำไปผลิตก๊าซชีวภาพใช้ในการหุงต้มอาหาร ก๊าซชีวภาพสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงให้กับเครื่องยนต์ เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าได้ เครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้าจากก๊าซชีวภาพที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะมีขนาด 8-12 สูบ ผลิตกระแสไฟฟ้าได้ 1-3 เมกะวัตต์ งานวิจัยนี้นำเสนอการดัดแปลงและออกแบบระบบควบคุมเครื่องยนต์เบนซินให้สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าขนาด 20 กิโลวัตต์ ได้จากก๊าซชีวภาพ เพื่อใช้กับชุมชนขนาดเล็ก โรงเรียน ฟาร์ม เป็นต้น โดยทำการควบคุมแรงบิดและความเร็วรอบให้สอดคล้องกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ และการปรับอัตราส่วนระหว่างก๊าซชีวภาพและอากาศ ให้มีประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา 2557

ลายมือชื่อนักศึกษา _____
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม _____

SOONTORN ODNGAM : THE CONTROL SYSTEM OF GASOLINE
ENGINE FOR 20 kW ELECTRICAL POWER GENERATOR FROM
BIOGAS. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. JIRAPHON SRISERTPHOL,
Ph.D., 130 PP.

BIOGAS FUEL/GASOLINE ENGINE/GENERATOR/SPEED CONTROL

Thailand has developed quickly both in agricultural and industrial sectors, the energy requirements are increasing especially the petroleum which are unsustainable energy resource. The researches related to renewable energy have been studied for finding renewable energy resources. Biogas is a substance obtained from anaerobic decomposition process. The main component of the biogas is methane which provides thermal energy through the combustion. Nowadays, Thai government encourages communities to set the waste treatment systems for the animal's dung such as cattle, swine and poultry which is used to produce the biogas for household usage. The biogas can be used not only as the automotive fuel but also the resource for electricity production. The size of engine generators from biogas were 8-12 cylinders that can produce 1-3 MW of electricity supply which is mostly utilized in the industrial sectors. This research is to present the modification and design of the gasoline engine control system that can be produced the electricity of 20 kW for utilizing in small communities, schools and farms etc.,. The rotational speed and torque are controlled in accordance with the power generator by using a PI controller and the adjustment of ration between gas and air. This control system can maintain the effectiveness of electricity production of the gasoline.

School of Mechanical Engineering

Academic Year 2014

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

Co-Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ทุกประการ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ และขอขอบคุณบุคคลต่าง ๆ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัย ดังนี้

ขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนการศึกษาสำหรับผู้มีศักยภาพ เข้าศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา และทุนที่การศึกษาที่คณาจารย์ได้รับการสนับสนุนจากแหล่งทุนภายนอก

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิรัช อาจหาญ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ให้ความรู้ และคำปรึกษาแนะนำในการทำงานวิจัย รวมทั้งให้คำแนะนำในการดำเนินชีวิตด้วยความเมตตาโดยตลอด และสละเวลาตรวจสอบแก้ไขให้วิทยานิพนธ์มีความถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภกิจ รูปขันธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.การุญ พิงสุวรรณรักษ์ อาจารย์ ดร.ธีทัต ดลวิชัย อาจารย์ ดร.ชโลธร ธรรมแท้ อาจารย์ ดร.เอกรงค์ สุขจิต และอาจารย์ พรพรม บุญพรม ที่ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในการดำเนินงานวิจัย และให้โอกาสการทำงานในหลายด้านด้วยความกรุณาเสมอมา และขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ผู้ทำวิจัยทั้งในอดีตจนถึงปัจจุบัน

ขอขอบคุณ คุณจริยาพร ศรีวิไลลักษณ์ และเจ้าหน้าที่ประจำสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ ที่อำนวยความสะดวกในด้านธุรการต่าง ๆ ขอขอบคุณเพื่อน ๆ และน้อง ๆ บัณฑิตศึกษาที่ใกล้ชิดทุกคนที่มีส่วนทำให้การเรียนในระดับปริญญาโทเป็นช่วงเวลาที่มีความสุข

ขอขอบคุณ วิศวกรและเจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ให้คำแนะนำและอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือต่าง ๆ

และที่ขาดไม่ได้ขอกราบขอบพระคุณพ่อประยูร โอบธูงาม และคุณแม่สมยศ โอบธูงาม รวมถึงสมาชิกในครอบครัวทุกท่านที่ให้การอบรมเลี้ยงดู และส่งเสริมการศึกษาเป็นอย่างดีมาโดยตลอดจนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมา

สุนทร โอบธูงาม

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฎ
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 ทัศนวิสัยวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับก๊าซชีวภาพ.....	4
2.1.1 การส่งเสริมก๊าซชีวภาพในประเทศไทย.....	4
2.1.2 องค์ประกอบและคุณสมบัติของก๊าซชีวภาพ.....	5
2.1.3 การนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์.....	6
2.1.4 คุณสมบัติของก๊าซชีวภาพเพื่อใช้สำหรับเครื่องยนต์สันดาปภายใน.....	7
2.2 การปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพ.....	8
2.2.1 ประเภทของการดูดซับ	8

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2.2	ตัวดูดซับ	9
2.2.3	ตัวดูดซับเชิงพาณิชย์	10
2.3	เครื่องยนต์	11
2.3.1	การจำแนกชนิดของเครื่องยนต์.....	13
2.3.2	การแบ่งประเภทของเครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพ	16
2.3.3	วัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพ	17
2.3.4	เครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟที่ใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิง	19
2.3.5	อุปกรณ์ผสมอากาศกับก๊าซชีวภาพ (Gas mixer).....	19
2.3.6	สมรรถนะของเครื่องยนต์	20
2.4	เครื่องมือทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์	23
2.4.1	ไคนาโมมิเตอร์แบบสายพานหรือเบรกเชือก (Rope brake)	23
2.4.2	โพรนี่เบรก (Prony brake).....	23
2.4.3	ไคนาโมมิเตอร์แบบ Hydraulic Brake	25
2.4.4	ไคนาโมมิเตอร์แบบ Eddy Current Brake.....	25
2.4.5	ไคนาโมมิเตอร์แบบ Hysteresis Brake.....	26
2.4.6	ไคนาโมมิเตอร์แบบ DC	26
2.4.7	ไคนาโมมิเตอร์แบบ AC	27
2.5	เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ (Synchronous generator).....	27
2.5.1	หลักการการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ	28
2.5.2	แบ่งตามจำนวนเฟสของระบบไฟฟ้า	38
2.5.3	แบ่งตามลักษณะของขดลวดแม่เหล็กที่กระทำกับขดลวดสเตเตอร์.....	39
2.5.4	แบ่งตามลักษณะการติดตั้ง.....	39
2.5.5	แบ่งตามพิกัดกำลังใช้งาน	40
2.5.6	แบ่งตามพลังงานกลที่ใช้ขับเคลื่อนเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า.....	40

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5.7	แบ่งตามลักษณะการนำไปใช้งาน	41
2.5.8	แบ่งตามลักษณะการออกแบบ	42
2.6	หลักการทํางานของระบบควบคุมความเร็วรอบของเครื่องยนต์ก๊าชชีวภาพ.....	42
2.6.1	ระบบควบคุมแบบวงเปิดหรือระบบควบคุมแบบไม่ป้อนกลับ (Open – loop control systems, Nonfeedback control systems).....	43
2.6.2	ระบบควบคุมแบบวงปิดหรือระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Closed – loop control systems, Feedback control systems).....	43
2.6.3	คุณสมบัติตัวควบคุม	44
2.7	ปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	48
2.8	สรุป	51
3	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	52
3.1	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องยนต์เบนซิน (Gasoline engine)	53
3.2.1	แบบจำลองอัตราการไหลของมวลอากาศ (Air part model).....	54
3.2.2	แบบจำลองสมการแรงบิดของเครื่องยนต์ (Torque production model)	56
3.2.3	แบบจำลองสมการการหมุนของเครื่องยนต์ (Rotation dynamic model)....	58
3.2	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Motor)	58
3.3	การประมาณค่าของระบบโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear least squares method)	60
3.3.1	ขั้นตอนการประมาณค่าตัวแปรของระบบ	61
3.3.2	ผลการประมาณค่าตัวแปร.....	64
3.4	สรุป	67
4	ผลการทดลองของระบบผลิตกระแสไฟฟ้าจากก๊าชชีวภาพ	68
4.1	ก๊าชชีวภาพ	68
4.2	ระบบทำความสะอาดก๊าชชีวภาพ.....	70

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.1	อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบทำความสะอาดก๊าซชีวภาพ.....	70
4.2.2	ขั้นตอนการทำงานของระบบทำความสะอาดก๊าซชีวภาพ	71
4.2.3	คุณสมบัติของก๊าซชีวภาพหลังจากผ่านระบบทำความสะอาด	72
4.3	ระบบควบคุมแรงดันก๊าซชีวภาพ.....	74
4.3.1	อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบควบคุมแรงดันก๊าซชีวภาพ	74
4.3.2	ขั้นตอนการทำงานของระบบควบคุมแรงดันก๊าซชีวภาพ	76
4.4	ระบบควบคุมความเร็วรอบของเครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพ	77
4.4.1	อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบควบคุมความเร็วรอบ ของเครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพ.....	77
4.4.2	ขั้นตอนการทำงานของระบบควบคุมความเร็วรอบ ของเครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพ.....	80
4.5	การออกแบบจำลองอ้างอิงระบบควบคุมความเร็วรอบ ของเครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพ	81
4.5.1	ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองอ้างอิง.....	81
4.5.2	ค่าสัมประสิทธิ์ตัวควบคุมพีไอ.....	83
4.6	เครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพ.....	86
4.6.1	เครื่องมือทดสอบเครื่องยนต์.....	87
4.6.2	ขั้นตอนการทดสอบกำลังและแรงบิดของเครื่องยนต์	88
4.7	สรุป.....	93
5	สรุปและข้อเสนอแนะ	94
5.1	สรุป.....	94
5.2	ข้อเสนอแนะ	95
	รายการอ้างอิง.....	96

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. การใช้งาน Arduino	98
ภาคผนวก ข. การใช้งาน Rapcon	102
ภาคผนวก ค. การใช้โปรแกรม Simulink Parameter Estimation.....	107
ภาคผนวก ง. การใช้โปรแกรม Simulink Response Optimization.....	117
ภาคผนวก จ. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่	122
ประวัติผู้เขียน	130



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	องค์ประกอบก๊าซชีวภาพแต่ละชนิด 5
2.2	คุณสมบัติของก๊าซชีวภาพเปรียบเทียบกับก๊าซธรรมชาติและก๊าซหุงต้ม 6
2.3	ปริมาณการทดแทนเปรียบเทียบระหว่างก๊าซชีวภาพกับเชื้อเพลิงต่างๆ 6
2.4	ลักษณะและคุณภาพก๊าซธรรมชาติสำหรับรถยนต์ ตามประกาศกรมธุรกิจพลังงาน พ.ศ. 2552 7
3.1	ขอบเขตของค่าตัวแปรในโปรแกรม Parameter Estimation 64
3.2	ผลของการประมาณค่าตัวแปรของระบบที่ความเร็วรอบ 1500 rpm 64
4.1	องค์ประกอบก๊าซชีวภาพที่ใช้ในงานวิจัย 69
4.2	คุณสมบัติของก๊าซชีวภาพหลังจากผ่านระบบทำความสะอาด 72
4.3	แสดงรายละเอียดของเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซชีวภาพ 73
4.4	แสดงรายละเอียดอุปกรณ์เพิ่มแรงดันก๊าซชีวภาพ 75
4.5	แสดงรายละเอียดต่าง ๆ ของ RAPCON Board (RAPCON Real – Time Control Prototyping Platform for MATLAB/SIMULINK) 79
4.6	แสดงรายละเอียดเครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพ 87
4.7	แสดงรายละเอียดของไดนาโมมิเตอร์ (Dynamometer) 88
4.8	ตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์เมื่อใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิง 90
5.1	แสดงคุณสมบัติของก๊าซชีวภาพก่อนและหลังทำความสะอาด 94

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ความหนาแน่นชนิดต่าง ๆ ของตัวดูดซับ.....	10
2.2	วัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์แบบจุดระเบิด 4 จังหวะ.....	18
2.3	หลักการทำงานของไดนาโมมิเตอร์.....	21
2.4	แสดงโครงสร้างไดนาโมมิเตอร์แบบสายพาน.....	23
2.5	โครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ.....	29
2.6	แกนเหล็กและร่องสำหรับพันขดลวดอาร์เมเจอร์.....	29
2.7	โรเตอร์ชนิดขั้วแม่เหล็กยื่น.....	30
2.8	โรเตอร์ชนิดขั้วแม่เหล็กเรียบ.....	31
2.9	ขดลวดแอมแปออร์.....	31
2.10	เอ็กไซเตอร์แบบไร้แปรงถ่าน.....	32
2.11	เอ็กไซเตอร์แบบไร้แปรงถ่านและมีไฟลอตเอ็กไซเตอร์.....	33
2.12	การเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากตัวนำหมุนตัดสนามแม่เหล็ก.....	34
2.13	การเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กหมุนตัดตัวนำ.....	34
2.14	การเกิดรูปคลื่นไซน์ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส.....	35
2.15	การเกิดรูปคลื่นไซน์ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ 2 เฟส.....	35
2.16	การเกิดรูปคลื่นไซน์ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส.....	35
2.17	เวกเตอร์ไดอะแกรมของแรงเคลื่อนไฟฟ้า 3 เฟส.....	36
2.18	เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 เฟส.....	38
2.19	เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เฟส.....	39
2.20	ระบบควบคุมแบบวงเปิด.....	43
2.21	ตัวควบคุมแบบป้อนกลับ.....	44
2.22	ตัวควบคุม PID ของระบบวงปิด.....	45
3.1	โครงสร้างระบบควบคุมเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้า.....	52
3.2	โครงสร้างของเครื่องยนต์เบนซิน (Gasoline engine).....	53
3.3	ภาพพื้นที่หน้าตัดของลิ้นปีกผีเสื้อที่ให้อากาศไหลผ่าน.....	54

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.4	แผนภาพวงจรอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	59
3.5	แสดงการหาค่าเบี่ยงเบนของวิธีกำลังสองน้อยที่สุด.....	61
3.6	แผนภาพแบบจำลองระบบควบคุมความเร็วรอบเครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพใน Simulink.....	62
3.7	แสดงตำแหน่งลื่นปีกผีเสื้อจากการทดลองเทียบกับแบบจำลอง $K_p = 5, K_i = 1.2$	65
3.8	แสดงความเร็วรอบของเครื่องยนต์จากการทดลองเทียบกับแบบจำลอง $K_p = 5, K_i = 1.2$	65
3.9	แสดงตำแหน่งลื่นปีกผีเสื้อจากการทดลองเทียบกับแบบจำลอง $K_p = 4, K_i = 1.2$	66
3.10	แสดงความเร็วรอบของเครื่องยนต์จากการทดลองเทียบกับแบบจำลอง $K_p = 5, K_i = 1.2$	63
4.1	การทำงานของระบบผลิตกระแสไฟฟ้า.....	68
4.2	บ่อหมักก๊าซชีวภาพมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	69
4.3	ระบบทำความสะอาดก๊าซชีวภาพ.....	71
4.4	เหล็กฝอย	72
4.5	เครื่องวิเคราะห์ห้องค้ประกอบก๊าซชีวภาพ.....	73
4.6	อุปกรณ์ควบคุมแรงดันก๊าซชีวภาพ.....	74
4.7	เรกกูเรเตอร์ (Regulator) พร้อมชุดกรองไอน้ำ.....	75
4.8	อุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ	76
4.9	อุปกรณ์ผสมก๊าซชีวภาพกับอากาศ.....	76
4.10	มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดเวอมเกียร์ (Worm gear motor).....	78
4.11	PCI Serial Card และบอร์ด RAPCON.....	78
4.12	เซนเซอร์วัดความเร็วรอบ (Speed sensor) และบอร์ด Arduino.....	80
4.13	แผนภาพของระบบควบคุมความเร็วรอบเครื่องยนต์เบนซินในระบบปิด และมีตัวควบคุมแบบพีไอ ในโปรแกรม MATLAB/Simulink.....	82
4.14	แผนภาพแสดงการตอบสนองของแบบจำลองอ้างอิงที่ได้จากการหาค่า ที่เหมาะสมที่สุดของตัวควบคุมพีไอ โดยใช้ Response Optimization	82
4.15	แสดงผลการเปรียบเทียบการตอบสนองของตำแหน่งลื่นปีกผีเสื้อ.....	83
4.16	แสดงผลการเปรียบเทียบการตอบสนองของความเร็วรอบ ของเครื่องยนต์ 1500 rpm	83

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.17	ผลกระทบของเครื่องยนต์84
4.18	ผลการตอบสนองของตำแหน่งลื่นปีกผีเสื้อ85
4.19	ผลการตอบสนองความเร็วรอบของเครื่องยนต์85
4.20	เครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพ86
4.21	ไดนาโมมิเตอร์ (Dynamometer)87
4.22	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงบิด (ใช้น้ำมันเบนซินเป็นเชื้อเพลิง)89
4.23	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงบิด (ใช้น้ำมัน LPG เป็นเชื้อเพลิง)89
4.24	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงบิดที่ตำแหน่งลื่นปีกผีเสื้อ 10 องศา91
4.25	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงบิดที่ตำแหน่งลื่นปีกผีเสื้อ 12.5 องศา91
4.26	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงบิดที่ตำแหน่งลื่นปีกผีเสื้อ 15 องศา92
4.27	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงบิดที่ตำแหน่งลื่นปีกผีเสื้อ 17.5 องศา92
4.28	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงบิดที่ตำแหน่งลื่นปีกผีเสื้อ 20 องศา93
ก.1	การเชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์กับ Arduino100
ก.2	การลง Driver Arduino100
ก.3	การลง Driver Arduino (ต่อ).....101
ก.4	การลง Driver Arduino (ต่อ).....101
ค.1	แผนภาพการจำลองระบบควบคุมความเร็วรอบของเครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพ108
ค.2	แผนภาพข้อมูลการตอบสนองใน Work Space.....108
ค.3	แผนภาพแบบจำลองมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....109
ค.4	แผนภาพแบบจำลองเครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพ110
ค.5	แผนภาพแสดงหน้าต่างของ Control and Estimation Tool Manager.....111
ค.6	แผนภาพแสดงหน้าต่างของการเลือก New Data111
ค.7	แผนภาพแสดงหน้าต่างการเลือกข้อมูลเข้า112
ค.8	แผนภาพแสดงหน้าต่างการเลือกตัวแปรที่ต้องการประมาณค่า112
ค.9	แผนภาพแสดงการกำหนดขอบเขตตัวแปร113
ค.10	แผนภาพแสดงหน้าต่างการสร้าง New Estimation.....113

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ค.11	แผนภาพแสดงหน้าต่างการเลือกข้อมูลในการ Estimate 114
ค.12	แผนภาพแสดงหน้าต่างการกำหนดตัวแปรที่ต้องการประมาณค่า 114
ค.13	แผนภาพแสดงการกำหนดอัลกอริทึมในการประมาณค่าตัวแปร 115
ค.14	แผนภาพแสดงการเริ่มการประมาณค่าตัวแปร 115
ค.15	แผนภาพแสดงการตอบสนองจากการประมาณค่าตัวแปรเทียบกับข้อมูล 116
ค.16	แผนภาพแสดงค่าตัวแปรที่โปรแกรมประมาณได้ 116
ง.1	แผนภาพแบบจำลองในโปรแกรม MATLAB/Simulink 118
ง.2	แผนภาพแสดง Signal Constraint Window 118
ง.3	แผนภาพแสดงการกำหนดขอบเขตการตอบสนอง 119
ง.4	แผนภาพการแสดงการ Add Parameter 119
ง.5	แผนภาพแสดงการกำหนดขอบเขตพารามิเตอร์ 120
ง.6	แผนภาพแสดงการ Options ของการ Optimize 120
ง.7	แผนภาพแสดงการตอบสนองของสัญญาณในขอบเขต 121
ง.8	แผนภาพแสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้ปรับแต่ง 121

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

C_d	=	สัมประสิทธิ์อัตราการไหล
R	=	ค่าคงที่ของแก๊สอุดมคติ (J/mol-K)
A_{th}	=	พื้นที่หน้าตัดของลิ่มปีกผีเสื้อที่ให้อากาศไหลผ่าน (m ²)
P_{amb}	=	ความดันในสถานะนิ่ง (N/m ²)
P_{man}	=	ความดันในท่อร่วม (N/m ²)
T_{amb}	=	อุณหภูมิในสถานะนิ่ง (K)
T_{man}	=	อุณหภูมิในท่อร่วม (K)
γ	=	อัตราส่วนของความร้อนจำเพาะ
d	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของลิ่มปีกผีเสื้อ (m)
θ	=	องศาของลิ่มปีกผีเสื้อที่ปรับ (degree)
θ_0	=	องศาของลิ่มปีกผีเสื้อตั้งต้น (degree)
\dot{m}_{man}	=	มวลของอากาศในท่อไอดี (Kg/s)
\dot{m}_{ai}	=	อัตราการไหลของมวลอากาศเข้าท่อร่วมไอดี (Kg)
\dot{m}_{ao}	=	อัตราการไหลของมวลอากาศออกจากท่อร่วมไอดี (Kg/s)
V_d	=	ปริมาตรของกระบอกสูบ (m ³)
V_m	=	ปริมาตรของท่อร่วมไอดี (m ³)
η_v	=	ประสิทธิภาพเชิงปริมาตร
η_i	=	ประสิทธิภาพเชิงความร้อน
λ	=	(Air/Fuel)/Stoichiometric
L_{th}	=	Theoretical Air/Fuel Mass Ratio
H_u	=	ค่าความร้อนของพลังงานเชื้อเพลิง (J/Kg)

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

T_i	=	ค่าแรงบิดที่ได้จากการสั่นคาบภายใน (N-m)
T_e	=	ค่าแรงบิดที่มีประสิทธิผล (N-m)
T_f	=	ค่าแรงบิดเสียดทาน (N-m)
T_l	=	แรงบิดภาระกรรมภายนอก (N-m)
b	=	ค่าคงที่ความหนืดของลูกปืนเพลลาข้อเหวี่ยง (N-m-sec/rad)
ω	=	ความเร็วเชิงมุมของเครื่องยนต์ (rad/sec)
$\dot{\omega}$	=	ความเร่งเชิงมุมของเครื่องยนต์ (rad/sec ²)
I_e	=	ความเฉื่อยในการหมุนของเครื่องยนต์ (Kg-m ²)
I	=	โมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์ (kg-m ²)
K_t	=	ค่าคงที่ของแรงบิด (N-m/A)
K_b	=	ค่าคงที่ของ Electromotive Force (V-s/rad)
T_L	=	แรงบิดที่เปลี่ยนแปลง (N-m)
b	=	ความหน่วง (N-m-s/rad)
R_a	=	ความต้านทานของอาร์เมเจอร์ (Ω)
L_a	=	ความเหนี่ยวนำของอาร์เมเจอร์ (H)
i_a	=	กระแสไฟฟ้าของอาร์เมเจอร์ (Am)
V_a	=	ความต่างศักย์ของอาร์เมเจอร์ (Voltage)
V_b	=	ความต่างศักย์ back emf (Voltage)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยได้มีการพัฒนาอย่างรวดเร็วทั้งภาคเกษตรและอุตสาหกรรม จึงทำให้มีความต้องการทางด้านพลังงานเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะพลังงานจากปิโตรเลียม ซึ่งเป็นพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป จึงได้มีการวิจัยเพื่อหาพลังงานอื่นมาทดแทน ก๊าซชีวภาพเป็นผลผลิตจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจน โดยองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพจะมีก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลัก เมื่อนำมาเผาไหม้จะให้พลังงานความร้อน หากปล่อยสู่ชั้นบรรยากาศมากเกินไปจะทำให้เกิดสภาวะโลกร้อน รัฐบาลจึงได้มีการส่งเสริมให้ภาคอุตสาหกรรมและชุมชนบำบัดของเสีย เช่น น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม มูลสัตว์ภายในชุมชน และขยะ เป็นต้น เพื่อนำไปผลิตก๊าซชีวภาพใช้ในโรงงานและการหุงต้มอาหารสำหรับชุมชน นอกจากนี้ยังได้คาร์บอนเครดิตจากการช่วยลดปัญหาโลกร้อนจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่ชั้นบรรยากาศ

การผลิตก๊าซชีวภาพนอกจากจะช่วยลดปัญหาโลกร้อนแล้วยังสามารถนำมาใช้กับเครื่องยนต์เพื่อกำเนิดกระแสไฟฟ้าในการช่วยลดต้นทุนการผลิต เครื่องยนต์กำเนิดกระแสไฟฟ้าจากก๊าซชีวภาพมีใช้ในภาคอุตสาหกรรมเป็นส่วนใหญ่ จะมีขนาด 12 - 16 สูบ (ประมาณ 50,000 - 65,000 ซีซี) ผลิตกระแสไฟฟ้าได้ 1 - 3 เมกะวัตต์ จะมีระบบควบคุมที่ซับซ้อน เนื่องจากค่ามีเทนของก๊าซชีวภาพมีค่าไม่แน่นอน จึงนำเข้าจากต่างประเทศและมีราคาแพง ทำให้ไม่เหมาะสมกับการนำมาใช้งานในชุมชน ฟาร์ม โรงเรียน ที่มีอยู่ทุกภูมิภาคของประเทศไทย

งานวิจัยนี้นำเสนอการปรับแต่งเครื่องยนต์เบนซินขนาด 6 สูบ ขนาด 3,000 ซีซี ให้สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าขนาด 20 กิโลวัตต์ ได้จากก๊าซชีวภาพ ซึ่งเหมาะจะใช้กับชุมชนขนาดเล็ก โรงเรียน ตามชนบท ฟาร์ม เป็นต้น โดยการควบคุมมุมจุดระเบิด อัตราส่วนผสมระหว่างก๊าซชีวภาพและอากาศ ความเร็วรอบและแรงบิด ให้มีประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ปรับแต่งเครื่องยนต์ให้สามารถใช้ก๊าซชีวภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ
2. ออกแบบระบบควบคุมเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้าขนาด 20 กิโลวัตต์ได้

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1. การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องยนต์เบนซินเพื่อประมาณค่าตัวแปรของเครื่องยนต์ที่ไม่ทราบค่า
2. การออกแบบระบบควบคุมการทำงานของเครื่องยนต์เบนซินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าขนาด 20 กิโลวัตต์

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1. ปรับแต่งเครื่องยนต์เบนซินขนาด 6 สูบ ให้มีแรงบิดและความเร็วรอบที่เหมาะสมกับเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้าขนาด 20 กิโลวัตต์ โดยใช้ก๊าซชีวภาพเท่านั้น
2. การควบคุมเครื่องยนต์ด้วยการปรับอัตราส่วนผสมระหว่างปริมาณอากาศกับก๊าซชีวภาพ
3. ก๊าซชีวภาพต้องมีก๊าซมีเทน ไม่น้อยกว่า 65%
4. ก๊าซชีวภาพต้องมีก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์น้อยกว่า 23 ppm

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถปรับแต่งเครื่องยนต์เบนซินให้สามารถทำงานร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและผลิตกระแสไฟฟ้าขนาด 20 กิโลวัตต์ จากก๊าซชีวภาพได้
2. ระบบสามารถควบคุมความเร็วรอบและแรงบิดของเครื่องยนต์สำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าจากก๊าซชีวภาพได้
3. ลดการนำเข้เครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้าจากก๊าซชีวภาพ

1.6 การจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 5 บท 4 ภาคผนวก ซึ่งมีรายละเอียดโดยย่อ ดังนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำซึ่งจะกล่าวถึงความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ และเป้าหมายของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ตลอดจนขอบเขต และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงคุณสมบัติของก๊าซชีวภาพ การทำความสะอาดก๊าซชีวภาพ คุณลักษณะของเครื่องยนต์เบนซิน ประเภทของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ไดนาโมมิเตอร์สำหรับทดสอบเครื่องยนต์ และ ทฤษฎีระบบควบคุมวงเปิดและวงปิด

บทที่ 3 กล่าวถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องยนต์เบนซิน การหาค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าสำหรับมอเตอร์และเครื่องยนต์ และการใช้งาน Parameter Estimation

บทที่ 4 การทำงานของระบบทำความสะอาดก๊าซชีวภาพ การทำงานของระบบควบคุมแรงดันก๊าซชีวภาพ และการทำงานของระบบควบคุมความเร็วรอบของเครื่องยนต์พร้อมทั้งสรุป

บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ



บทที่ 2

ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันมีการนำก๊าซชีวภาพ (Biogas) ใช้เป็นเชื้อเพลิง สำหรับเครื่องยนต์สันดาปภายในเพื่อผลิตงานกลในการขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Alternator) สำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าไปใช้ในฟาร์มปศุสัตว์กันอย่างแพร่หลาย โดยการเปลี่ยนระบบเชื้อเพลิงจากเดิมที่ใช้น้ำมันเบนซินในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟ (SI Engine) หรือใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด (CI Engine) มาปรับปรุงใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงทดแทน

2.1 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพ (Biogas) คือ ก๊าซที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายของสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะที่ปราศจากออกซิเจน (Anaerobic digestion) ซึ่งโดยทั่วไปจะหมายถึงก๊าซมีเทนที่เกิดจากการหมักสารอินทรีย์ โดยกระบวนการนี้สามารถเกิดได้ทั้งในหลุมขยะ กองมูลสัตว์ และก้นบ่อแหล่งน้ำนิ่ง กล่าวคือ เมื่อไรก็ตามที่สารอินทรีย์หมักหมมกันเป็นเวลานานก็สามารถเกิดก๊าซชีวภาพได้

องค์ประกอบส่วนใหญ่ของก๊าซชีวภาพประกอบด้วยก๊าซมีเทน (CH_4) 50 - 70% ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) 30 - 40% และส่วนที่เหลือเป็นก๊าซชนิดอื่น ๆ เช่น ไฮโดรเจน (H_2) ออกซิเจน (O_2) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ไนโตรเจน (N_2) และไอน้ำ กระบวนการนี้เป็นที่นิยมในการเปลี่ยนของเสียประเภทอินทรีย์ไปเป็นเชื้อเพลิงให้กับเครื่องยนต์ในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้านอกจากจะเป็นการกำจัดของเสียได้แล้วยังสามารถทำลายเชื้อโรคได้อีกด้วย การใช้ก๊าซชีวภาพทดแทนพลังงานหลักเป็นการบริหารจัดการของเสียที่ควรได้รับการสนับสนุน เนื่องจากไม่เป็นการเพิ่มก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้กับชั้นบรรยากาศที่เป็นต้นเหตุทำให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก

2.1.1 การส่งเสริมก๊าซชีวภาพในประเทศไทย

ในระยะแรกการส่งเสริมเทคโนโลยีก๊าซชีวภาพจำกัดอยู่แค่ในระดับครัวเรือนหรือเกษตรกรรายย่อยเท่านั้น ต่อมาในปี พ.ศ. 2531 คณะทำงานในสังกัดมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ร่วมกับกรมส่งเสริมการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ โดยได้รับงบประมาณสนับสนุนจากองค์การ GTZ (Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit) ประเทศเยอรมนีจัดตั้ง “โครงการก๊าซชีวภาพ

ไทย-เยอรมัน” ขึ้นเพื่อศึกษาถึงปัญหาในการใช้งานระบบก๊าซชีวภาพ พร้อมทั้งปรับปรุงและพัฒนาเทคโนโลยีก๊าซชีวภาพให้เหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้กับฟาร์มเลี้ยงสัตว์ในประเทศให้มากขึ้น

หน่วยบริการก๊าซชีวภาพสังกัดสถาบันวิจัยและวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ได้ถูกจัดตั้งขึ้นในปี พ.ศ. 2534 เพื่อดำเนินการส่งเสริมเทคโนโลยีก๊าซชีวภาพ ต่อเนื่องจากโครงการก๊าซชีวภาพไทย-เยอรมัน รวมทั้งดำเนินการศึกษาและวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีให้สามารถประยุกต์ใช้ในฟาร์มเลี้ยงสัตว์ได้กว้างขวางมากขึ้น ปลายปี พ.ศ. 2538 กองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงานสำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ หรือ “สพช.” (ปัจจุบัน คือ สำนักนโยบายและแผนพลังงาน หรือ “สนพ.” กระทรวงพลังงาน) ได้ให้การสนับสนุนแก่หน่วยบริการก๊าซชีวภาพเพื่อดำเนินงาน “โครงการส่งเสริมการผลิตก๊าซชีวภาพในฟาร์มเลี้ยงสัตว์ ระยะที่ 1” จนกระทั่งในปี พ.ศ. 2551 หน่วยบริการก๊าซชีวภาพได้รับการจัดตั้งเป็น “สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงาน มหาวิทยาลัยเชียงใหม่” และต่อมาในปี พ.ศ. 2553 สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี ได้พระราชทานชื่อหน่วยงานใหม่เป็น “สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่” ซึ่งได้ดำเนินโครงการมาจนปัจจุบัน

2.1.2 องค์ประกอบและคุณสมบัติของก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพประกอบด้วยองค์ประกอบของก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นส่วนใหญ่ อาจจะมีก๊าซไนโตรเจน ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เจือปนอยู่บ้างเล็กน้อย ซึ่งก๊าซที่เกิดขึ้นจากการหมักนี้จะมีองค์ประกอบที่แตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่ใช้ในการหมักและสภาวะของกระบวนการหมัก โดยทั่วไปองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพมีดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบก๊าซชีวภาพแต่ละชนิด

องค์ประกอบ	มูลสุกร (%)	มูลวัว (%)	มูลสุกร + มูลวัว (%)
ก๊าซมีเทน	57 - 64	60 - 65	55 - 60
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	36 - 43	35 - 40	40 - 45
ก๊าซออกซิเจน	0.3 - 0.5	0.2 - 0.3	0.2 - 0.3
ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์	>2000 ppm	>2000 ppm	>2000 ppm

ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงที่มีศักยภาพในการทดแทนเชื้อเพลิงจากแหล่งพลังงานอื่นได้โดยตรงเช่นเดียวกับก๊าซธรรมชาติ ซึ่งมีความสะดวกในการใช้งานมากกว่าการใช้ฟืนหรือถ่านไม้ อีกทั้งยังเป็นพลังงานที่สะอาดปราศจากเขม่าและควัน ก๊าซชีวภาพยังสามารถให้พลังงานด้าน

แสงสว่างรวมทั้งให้พลังงานด้านความร้อน ซึ่งก๊าซชีวภาพที่สามารถนำไปเป็นเชื้อเพลิงให้กับเครื่องยนต์สันดาปภายในได้จะต้องมีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบไม่น้อยกว่า 65% เครื่องยนต์จึงจะทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของก๊าซชีวภาพเปรียบเทียบกับก๊าซธรรมชาติและก๊าซหุงต้ม

พารามิเตอร์	หน่วย	ก๊าซธรรมชาติ	ก๊าซหุงต้ม	ก๊าซชีวภาพ*
Calorific value (lower)	MJ / m ³	36.14	16.10	21.48
Density	Kg / m ³	0.82	540	1.21
Max ignition velocity	m / s	0.39	0.70	0.25
Theory air required	m ³ air / m ³ gas	9.53	3.83	5.71
Max CO ₂ in stack gas	% Volume	11.9	13.10	17.80
Dew point	°C	59	60	60 - 160

หมายเหตุ : *ที่ 60% CH₄, 38% CO₂, 2% other

2.1.3 การนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์

จากองค์ประกอบและคุณสมบัติของก๊าซชีวภาพดังที่กล่าวมาแล้วนั้นทำให้เห็นว่าก๊าซชีวภาพสามารถทดแทนเชื้อเพลิงหรือพลังงานต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.3 ปริมาณการทดแทนเปรียบเทียบระหว่างก๊าซชีวภาพกับเชื้อเพลิงต่าง ๆ

รายการทดแทน	อัตราทดแทน	หน่วย
ก๊าซ LPG	0.46	กิโลกรัม
ก๊าซธรรมชาติ	0.60	กิโลกรัม
ไฟฟ้า	1.2	กิโลวัตต์ - ชั่วโมง
น้ำมันเตา	0.55	ลิตร
น้ำมันดีเซล	0.4	กิโลกรัม
น้ำมันเบนซิน	0.6	กิโลกรัม
ถ่านหิน	0.8	กิโลกรัม
ถ่านไม้	1.6	กิโลกรัม

หมายเหตุ : ก๊าซชีวภาพ 1 ลบ.ม. ที่มีองค์ประกอบของก๊าซมีเทนร้อนละ 60 มีค่าความร้อนประมาณ

21 เมกะจูล/ลบ.ม. (สถาบันวิจัยและพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2538)

2.1.4 คุณสมบัติของก๊าซชีวภาพเพื่อใช้สำหรับเครื่องยนต์สันดาปภายใน

ปัจจุบันประเทศไทยยังไม่มีข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของก๊าซชีวภาพเพื่อใช้กับเครื่องยนต์ จึงต้องใช้มาตรฐานลักษณะและคุณภาพของก๊าซธรรมชาติสำหรับยานยนต์ตามประกาศกรมธุรกิจพลังงานปี พ.ศ. 2552 ดังตารางที่ 2.4 เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติของก๊าซชีวภาพภายหลังปรับปรุงคุณภาพ

ตารางที่ 2.4 ลักษณะและคุณภาพก๊าซธรรมชาติสำหรับยานยนต์ตามประกาศกรมธุรกิจพลังงาน พ.ศ. 2552

รายการ	ข้อกำหนด	หน่วย	อัตราสูงต่ำ	วิธีทดสอบ ^{1/}
1	จุดน้ำค้าง ที่ความดัน 20,000 kPa	°C	ไม่สูงกว่า 9.2	ASTM D 1142
2	จุดน้ำค้างไฮโดรคาร์บอนที่ความดัน 4,500 kPa ซึ่งควบแน่นเป็นของเหลวไม่เกิน 1%	°C	ไม่สูงกว่า 15.5	ASTM D 1945
3	คัลอรีวอบบี	MJ/m ³	ไม่ต่ำกว่า และ ไม่สูงกว่า 37 42	ASTM D 3588
4	ค่ามีเทน	%Vol	ไม่ต่ำกว่า 65	ASTM D 1945
5	ไฮโดรเจนซัลไฟด์	Mg/m ³	ไม่สูงกว่า 23	ASTM D 5504
6	ไฮโดรเจน	%Vol	ไม่สูงกว่า 0.1	ASTM D 1945
7	คาร์บอนไดออกไซด์	%Vol	ไม่สูงกว่า 18	ASTM D 1945
8	ออกซิเจน	%Vol	ไม่สูงกว่า 1	ASTM D 1945
9	กำมะถัน	ppm	ไม่สูงกว่า 50	ASTM D 5504

หมายเหตุ : ^{1/}วิธีการทดสอบอาจใช้วิธีอื่นเทียบเท่าก็ได้ แต่ในกรณีที่มีข้อโต้แย้งให้ใช้วิธีกำหนดในรายละเอียดแนบท้ายนี้

2.2 การปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพถูกนำไปใช้ทดแทนพลังงานในด้านต่าง ๆ เช่น เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า หรือใช้เป็นเชื้อเพลิงความร้อนโดยตรง เมื่อพิจารณาจากองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพแล้วพบว่าสัดส่วนของก๊าซมีเทน (CH_4) มีปริมาณใกล้เคียงกับก๊าซมีเทนในก๊าซธรรมชาติ เป็นผลให้ก๊าซชีวภาพสามารถใช้ทดแทนเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ได้ จึงได้ทำการปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับก๊าซธรรมชาติมากที่สุด ปัจจุบันเทคโนโลยีการปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพก๊าซมีการพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง

การจะนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์ได้นั้นจะต้องมีการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ก่อนในเบื้องต้น เนื่องจากก๊าซดังกล่าวมีคุณสมบัติเป็นกรดเมื่อสัมผัสกับความชื้นในอากาศ เมื่อสัมผัสกับโลหะจะทำให้เกิดสนิม เมื่อนำไปใช้กับเครื่องยนต์ซึ่งอุปกรณ์ส่วนใหญ่จะเป็นโลหะ หากไม่ทำการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จะทำให้เครื่องยนต์เสียหายได้ นอกจากนี้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ยังเป็นส่วนประกอบของก๊าซชีวภาพที่มีสัดส่วนค่อนข้างมาก เพื่อต้องการเพิ่มสัดส่วนของก๊าซมีเทนที่มีอยู่ในก๊าซชีวภาพให้มากขึ้น จะต้องมีการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีอยู่ให้เหลือน้อยที่สุด เช่นเดียวกัน

กระบวนการดูดซับเป็นวิธีแยกองค์ประกอบที่ต้องการออกจากสารละลายผสมของเหลวหรือก๊าซโดยให้สารละลายหรือก๊าซผสมไหลสัมผัสกับตัวดูดซับ โดยที่องค์ประกอบของสารผสมต่าง ๆ แต่ละชนิดในสารละลายจะมีความสามารถในการกระจายไปบนพื้นผิวและเกิดแรงดึงดูดกับตัวดูดซับได้ต่างกัน ดังนั้นปรากฏการณ์การดูดซับจึงขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของตัวดูดซับเอง คุณสมบัติทางเคมีของตัวดูดซับและตัวถูกละลายนั้น จำนวนชั้นของโมเลกุลของตัวดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิว และขนาดของรูพรุนที่ทำหน้าที่ดูดซับได้ ดังนั้นจึงสามารถแยกองค์ประกอบที่ต้องการออกได้โดยการเลือกตัวดูดซับให้เหมาะสมกับองค์ประกอบนั้น ๆ

2.2.1 ประเภทของการดูดซับ

กระบวนการดูดซับเกิดขึ้นได้จากแรงระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ โดยแรงดังกล่าวจำแนกออกได้เป็น 2 ประเภท คือ แรงทางกายภาพ และแรงทางเคมี ดังนั้นการดูดซับจึงสามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภท คือ การดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับทางเคมีตามชนิดของแรงดูดซับ โมเลกุลของสารถูกดูดไว้บนผิวของตัวดูดซับ

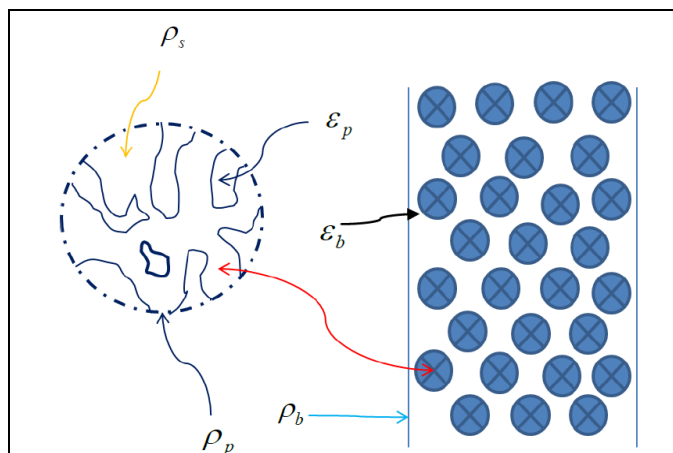
2.2.1.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption) เกิดได้จากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับกับองค์ประกอบที่ถูกดูดซับซึ่งมีค่ามากกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลสามารถแทรกเข้าช่องว่างภายในของตัวดูดซับดังกล่าวได้ แม้ว่าความดันของระบบจะต่ำกว่าความ

ดันไอขององค์ประกอบนั้นก็ตาม ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิปกติโดยให้ความร้อนออกมาเล็กน้อยแต่จะมากกว่าความร้อนของการควบแน่นขึ้นอยู่กับความดันย่อยของสารดูดซับชนิดนั้น อีกทั้งยังสามารถดูดซับสารดูดซับนั้นไว้ในปริมาณที่สูงมากต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ แต่เมื่อความดันของระบบลดลงหรือเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง ซึ่งจะทำให้สารดูดซับเคลื่อนที่ออกจากตัวดูดซับ ปฏิกิริยานี้ในช่วงนี้เรียกว่า “การคายซับ” ซึ่งเป็นวิธีการนำตัวดูดซับกลับมาใช้อีกครั้ง

2.2.1.2 การดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption) เกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิสูงซึ่งแตกต่างกับการดูดซับทางกายภาพ โดยที่ปฏิกิริยาเคมีจะเกิดขึ้นระหว่างตัวดูดซับกับองค์ประกอบที่ต้องการดูดซับและจะสร้างสารประกอบระหว่างตัวดูดซับขึ้นที่ผิวของตัวดูดซับซึ่งจะทำให้ปริมาณของตัวดูดซับลดลง แต่จะสามารถดูดซับตัวถูกละลายได้เพียงเล็กน้อยต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ โดยจะให้ความร้อนออกมาสูงมาก โดยที่การดูดซับทางเคมีไม่สามารถเกิดการคายซับได้ เนื่องจากกระบวนการดังกล่าวไม่ขึ้นกับความดันแต่จะขึ้นกับอุณหภูมิอย่างเดียว ซึ่งจะพบว่าสารผสมบางชนิดที่อุณหภูมิปกติไม่สามารถเกิดการดูดซับทางเคมีได้ แต่เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิที่เหมาะสมให้กับระบบก็สามารถเกิดการดูดซับทางเคมีได้เช่นกัน

2.2.2 ตัวดูดซับ

การดูดซับทางกายภาพเป็นการสะสมของการดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ ดังนั้นตัวดูดซับที่ดีต้องมีพื้นผิวจำนวนมาก ๆ เพื่อให้สามารถดูดซับสารดูดซับได้ปริมาณมาก กล่าวคือตัวดูดซับที่ดีต้องมีรูพรุนหรือมีโพรงภายในมาก ๆ เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะให้มากขึ้น โดยมีขนาดของเม็ดตัวดูดซับเท่าเดิม ซึ่งโดยทั่วไปแล้วหน่วยดูดซับจะมีลักษณะเป็นทรงกระบอกแนวตั้งภายในบรรจุเม็ดดูดซับที่เหมาะสมกับสารดูดซับแต่ละชนิด ดังนั้นความหนาแน่นของระบบสามารถจำแนกออกได้เป็น ความหนาแน่นของตัวดูดซับ (Solid density, ρ_s) ความหนาแน่นของเม็ดดูดซับ (Adsorbent density, ρ_p) และความหนาแน่นของชั้นดูดซับ (Bulk density, ρ_b) ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 ความหนาแน่นชนิดต่าง ๆ ของตัวดูดซับ

2.2.3 ตัวดูดซับเชิงพาณิชย์

การแยกสารประกอบชนิดใดชนิดหนึ่งออกจากของผสมเอกพันธ์ด้วยการดูดซับ ตัวดูดซับในหน่วยดูดซับจะต้องมีคุณสมบัติดูดซับสารประกอบชนิดนั้นเป็นสำคัญ ซึ่งได้แก่ ปริมาณสมมูลดูดซับสารประกอบนั้นจำเพาะ อัตราการดูดซับสารประกอบดังกล่าว และการเลือกตัวดูดซับสารประกอบชนิดนั้น ส่วนสมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับ ได้แก่ พื้นผิวจำเพาะของตัวดูดซับ ขนาดโพรงเฉลี่ยของตัวดูดซับ ความพรุนของตัวดูดซับ ความหนาแน่นของตัวดูดซับ และความหนาแน่นของชั้นเม็ดดูดซับที่บรรจุในหน่วยดูดซับนั้นเป็นปัจจัยเสริมของระบบดูดซับ

2.2.3.1 ตัวดูดซับอนินทรีย์ธรรมชาติ คือ ตัวดูดซับอนินทรีย์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น ดินเหนียวดูดซับ (Activated clay) เป็นของแข็งผสมที่ประกอบด้วยสารประกอบออกไซด์ของซิลิกอน (SiO_2) สารประกอบออกไซด์ของอลูมิเนียม (Al_2O_3) และสารประกอบออกไซด์ของเหล็ก (Fe_2O_3) เป็นองค์ประกอบที่สำคัญ และอาจมีสารประกอบโลหะออกไซด์ของโลหะอื่น ๆ เป็นต้น

2.2.3.2 ตัวดูดซับอนินทรีย์สังเคราะห์ คือ ตัวดูดซับอนินทรีย์ที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อเลียนแบบสารประกอบที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ ได้แก่ ผลึกซิลิกาดูดความชื้น (Silica gel) ผลึกอลูมินาดูดความชื้น (Activated alumina) และผลึกคัต โมเลกุล (Zeolite molecular sieves) ซึ่งเป็นผลึกของสารประกอบออกไซด์ของซิลิกอน ผลึกสารประกอบออกไซด์ของอลูมิเนียม และสารประกอบออกไซด์ร่วมของซิลิกอนและอลูมิเนียม ตามลำดับ

2.2.3.3 ถ่านดูดซับ คือ ตัวดูดซับที่สังเคราะห์จากวัสดุอินทรีย์ต่าง ๆ ซึ่งจำแนกได้ตามขนาดปากโพรงของเม็ดถ่านดูดซับออกเป็นถ่านดูดซับทั่วไป (Activated carbon) และถ่านคัต

โมเลกุล (Molecular sieve carbon) ถ่านดูดซับทั่วไปจะมีโพรงขนาดต่าง ๆ มากมาย โพรงดังกล่าวมีขนาดใหญ่กว่า 1 นาโนเมตร ส่วนถ่านคัดโมเลกุลมีขนาดปากโพรงเล็กกว่า 1 นาโนเมตร ถ่านดูดซับมีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบสำคัญ ถ่านดูดซับพาณิชย์ต่าง ๆ จึงผลิตจากวัสดุสารประกอบอินทรีย์หรือสารชีวมวลชนิดต่าง ๆ จึงผลิตจากวัสดุสารประกอบอินทรีย์หรือสารชีวมวลชนิดต่าง ๆ เช่น ถ่านหิน เศษไม้ และกะลามะพร้าว เป็นต้น

2.3 เครื่องยนต์

เครื่องยนต์ (Engine) เป็นคำที่มักใช้เรียกอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานความร้อนให้เป็นงานและกำลัง โดยทั่วไปพลังงานความร้อนจะได้จากการเผาไหม้ของอากาศกับเชื้อเพลิง เครื่องยนต์เผาไหม้ (Combustion engine) หรือเครื่องยนต์ความร้อน (Heat engine) นี้จะแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ

ก. เครื่องยนต์เผาไหม้ภายนอก (External combustion engine) เป็นเครื่องยนต์ที่นำเอาผลของการเผาไหม้ของอากาศกับเชื้อเพลิงให้ถ่ายเทความร้อนไปยังของไหลชนิดที่สองซึ่งใช้เป็นสารทำงานสำหรับผลิตกำลัง ดังนั้นสารทำงานและสารที่เกิดจากการเผาไหม้จึงเป็นของไหลคนละชนิดและถูกแยกจากกันโดยผนังความร้อน สารที่เกิดจากการเผาไหม้จึงไม่สัมผัสกับชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ของเครื่องยนต์ เครื่องยนต์เผาไหม้ภายนอกนี้ ได้แก่ เครื่องจักรไอน้ำ (Steam engine) กังหันไอน้ำ (Steam turbine) และเครื่องยนต์สเตอร์ลิง (Sterling engine)

ข. เครื่องยนต์เผาไหม้ภายใน (Internal combustion engine) เป็นเครื่องยนต์ที่นำเอาผลของการเผาไหม้ของอากาศกับเชื้อเพลิงไปใช้เป็นทำงานสำหรับผลิตกำลังโดยตรง เครื่องยนต์เผาไหม้ภายในนี้ ได้แก่ เครื่องยนต์ลูกสูบ (Piston engine) เครื่องยนต์โรตารี (Rotary engine) กังหันแก๊ส (Gas turbine) และเครื่องยนต์จรวด (Rocket engine)

เครื่องยนต์กลุ่มนี้ถูกใช้เป็นตัวกำลังสำหรับขับเคลื่อนอุปกรณ์และยานพาหนะประเภทต่างๆซึ่งได้แก่ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เครื่องสูบน้ำ รถยนต์ เรือ และเครื่องบิน เครื่องยนต์เผาไหม้ภายนอกที่ยังใช้กันอยู่ในปัจจุบันก็คือ กังหันไอน้ำที่ใช้ในโรงจักรไฟฟ้าซึ่งโดยทั่วไปจะมีขนาดใหญ่ ส่วนเครื่องยนต์เผาไหม้ภายในยังคงใช้กันในเกือบทุกประเภท แต่ที่นิยมใช้กันมากที่สุดก็คือเครื่องยนต์แบบลูกสูบซึ่งส่วนใหญ่ใช้กับรถยนต์

เครื่องยนต์เผาไหม้ภายนอกในรูปของเครื่องจักรไอน้ำได้ถูกพัฒนาขึ้นมาใช้งานก่อนเครื่องยนต์เผาไหม้ภายใน แม้ว่าเครื่องยนต์เผาไหม้ภายในจะถูกสร้างขึ้นเมื่อ ค.ศ. 1700 ในรูปของเครื่องยนต์การระเบิดของดินปืนก็ตาม แต่เครื่องยนต์เผาไหม้ภายในที่ถูกผลิตออกมาสำหรับการใช้งานจริงนั้น ได้เกิดขึ้นประมาณปี ค.ศ. 1860 โดยการคิดค้นของ ชอง เลอโนัวร์ (Jean Lenoir) ซึ่งเป็นเครื่องยนต์ที่ใช้การเผาไหม้ของแก๊สถ่านหิน (Coal gas) กับอากาศที่ความดันบรรยากาศโดยไม่มี

การอัด แก๊สและอากาศถูกนำเข้าไปในกระบอกสูบในระหว่างครึ่งแรกของระยะชักของลูกสูบแล้ว ถูกจุดระเบิดด้วยประกายไฟ ความดันจะเพิ่มขึ้นและแก๊สที่เผาไหม้แล้วก็จะถ่ายเทกำลังให้แก่ ลูกสูบในช่วงครึ่งหลังของระยะชักของลูกสูบ หลังจากนั้นก็จะเป็นจังหวะการไล่ไอเสียออก ซึ่งก็จะครบวัฏจักรการทำงาน ในระหว่างปี ค.ศ. 1860 ถึง 1865 เครื่องยนต์แบบนี้ถูกผลิตออกมาถึง ประมาณ 5,000 เครื่อง มีขนาดสูงสุด 6 แรงม้าและมีประสิทธิภาพดีที่สุดประมาณร้อยละ 5 หลังจากนั้น ในปี ค.ศ. 1867 นีโกลัส ออตโต (Nikolaus Otto) และออยเกน ลังเกน (Eugen Langen) ได้พัฒนา เครื่องยนต์เผาไหม้ที่ความดันบรรยากาศ (Atmospheric engine) หรือเครื่องยนต์แบบลูกสูบอิสระ (Free-piston engine) ขึ้นมาโดยใช้เครื่องยนต์ที่มีกระบอกสูบในแนวตั้งยาว เครื่องยนต์นี้จะมี ประสิทธิภาพร้อยละ 11 และถูกผลิตออกมาประมาณ 10,000 เครื่อง ในช่วง 5 ปีถัดมา เพื่อแก้ปัญหา ของเครื่องยนต์เผาไหม้ที่ความดันบรรยากาศซึ่งมีประสิทธิภาพต่ำและน้ำหนักมาก ออตโตได้ เสนอวัฏจักรสี่จังหวะ ประกอบด้วยจังหวะดูด จังหวะอัดก่อนการระเบิด จากนั้นตามด้วยจังหวะ ขยายตัวหรือจังหวะกำลังซึ่งเป็นจังหวะที่งานถูกถ่ายเทไปยังเพลาคือเหวี่ยง และสุดท้ายเป็น จังหวะคายหรือจังหวะไล่ไอเสียออก เครื่องยนต์ต้นแบบตามหลักการดังกล่าว ได้ถูกผลิตออกมาในปี ค.ศ. 1876 หลังจากออตโตได้ผลิตเครื่องยนต์ต้นแบบที่มีการทำงานตามวัฏจักรสี่จังหวะได้ไม่นาน ใน ค.ศ. 1880 ดูกาลด์ เคลิร์ก (Dugal Clerk), เจมส์ ร็อบสัน (James Robson), คาร์ล เบนซ์ (Karl Benz) และผู้คิดค้นคนอื่น ๆ ก็ได้ประสบความสำเร็จในการพัฒนาเครื่องยนต์เผาไหม้ภายในสอง จังหวะซึ่งกระบวนการนำไอดีเข้าและนำไอเสียออกขึ้นในระหว่างจังหวะกำลังและต้นกำลัง ในปี ค.ศ. 1892 รูดอล์ฟ ดีเซล (Rudolf Diesel) ได้สรุปรูปแบบของเครื่องยนต์เผาไหม้ภายในรูปแบบใหม่ โดยมีหลักการคือให้มีการเริ่มต้นการเผาไหม้โดยการฉีดเชื้อเพลิงเข้าไปในอากาศร้อนที่ถูกอัดเพียง ประการเดียว ทำให้ประสิทธิภาพสูงกว่าเครื่องยนต์เผาไหม้ภายในแบบอื่น เนื่องจากอัตราการ ขยายตัวมากขึ้น โดยไม่มีการน็อก แต่กว่าที่เครื่องยนต์ดังกล่าวจะถูกผลิตออกมาใช้งานก็เป็นเวลาอีก 5 ปีต่อมา

หลังจากนั้นก็มีการพัฒนาเครื่องยนต์เผาไหม้ภายในอย่างต่อเนื่องแต่หลักการทำงานไม่ เปลี่ยนแปลงไปจากหลักการเดิม กล่าวคือ เครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟสี่จังหวะใช้หลักการ ของออตโต เครื่องยนต์สองจังหวะใช้หลักการของร็อบสัน และเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดใช้ หลักการของดีเซล แต่อย่างไรก็ตาม เครื่องยนต์เหล่านี้เป็นเครื่องยนต์ลูกสูบทั้งหมด สำหรับ เครื่องยนต์โรตารีแบบที่ไม่ใช้ลูกสูบนั้นได้มีการพัฒนาและทดสอบจนประสบความสำเร็จในปี ค.ศ. 1957 เครื่องยนต์โรตารีนี้เป็นเครื่องยนต์ที่ได้รับการออกแบบโดยเฟลิกซ์ แวงเกล (Felix Wankel)

2.3.1 การจำแนกชนิดของเครื่องยนต์

เครื่องยนต์เผาไหม้ภายในมีหลายชนิดซึ่งสามารถจำแนกได้หลายลักษณะ คือ

2.3.1.1 จำแนกตามลักษณะการนำไปใช้งาน

- รถยนต์ รถบรรทุก และรถโดยสาร
- รถไฟ
- เครื่องบิน
- เครื่องจักรที่อยู่กับที่ เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เครื่องสูบน้ำ เป็นต้น
- เครื่องจักรขนาดเล็ก เช่น เครื่องตัดหญ้า เลื่อย เครื่องพ่นยา เป็นต้น

2.3.1.2 จำแนกตามลักษณะการออกแบบพื้นฐาน

- การเคลื่อนที่กลับไปกลับมา (Reciprocating) เครื่องยนต์มีกระบอกสูบเดียวหรือมากกว่าซึ่งภายในจะมีลูกสูบเคลื่อนที่กลับไปกลับมา โดยมีห้องเผาไหม้อยู่ที่ปลายปิดของกระบอกแต่ละกระบอกและกำลังถูกส่งไปยังเพลาค้อเหวี่ยงที่หมุน โดยก้านสูบที่ติดเข้ากับลูกสูบ

- การหมุน (Rotary) เครื่องยนต์ประกอบด้วยเสื้อหรือสเตเตอร์ (Stator) ซึ่งห่อหุ้มโรเตอร์เอียงศูนย์และเพลายี่งศูนย์

2.3.1.3 จำแนกตามตำแหน่งและจำนวนของลูกสูบของเครื่องยนต์แบบเคลื่อนที่กลับไปกลับมา

- เครื่องยนต์กระบอกสูบเดี่ยว (Single cylinder engine) เครื่องยนต์มีกระบอกสูบและลูกสูบชุดเดียวต่อเข้ากับเพลาค้อเหวี่ยง

- เครื่องยนต์กระบอกสูบเรียง (In - line engine) เครื่องยนต์มีกระบอกสูบและลูกสูบหลายชุด กระบอกสูบถูกวางให้อยู่ในตำแหน่งเส้นตรงโดยกระบอกสูบหนึ่งจะอยู่ด้านหลังกระบอกสูบอีกกระบอกหนึ่งตามความยาวของเพลาค้อเหวี่ยง ซึ่งจำนวนสูบอาจมีได้ตั้งแต่ 2 ถึง 11 สูบหรือมากกว่านั้น ที่นิยมกันมากที่สุดคือเครื่องยนต์กระบอกสูบเรียงแบบ 4 สูบ และ 6 สูบ

- เครื่องยนต์กระบอกสูบตัว V (V - engine) เครื่องยนต์มีกระบอกสูบและลูกสูบหลายชุดกระบอกสูบแบ่งเป็นสองแถวทำมุมซึ่งกันและกันอยู่บนเพลาค้อเหวี่ยงเดียวกัน มุมระหว่างแถวของกระบอกสูบมีค่าตั้งแต่ 15 องศา ถึง 120 องศา แต่ที่ใช้กันมากที่สุดคือ 60 องศา และ 90 องศา เครื่องยนต์กระบอกสูบตัว V มีจำนวนกระบอกสูบเป็นเลขคู่ตั้งแต่ 2 ถึง 20 สูบหรือมากกว่า ที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือเครื่องยนต์ V6 และ V8

- เครื่องยนต์กระบอกสูบตรงกันข้าม (Opposed cylinder engine) เครื่องยนต์มีกระบอกสูบและลูกสูบหลายชุด กระบอกสูบแบ่งเป็นสองแถวตรงข้ามกันอยู่บนเพลาค้อเหวี่ยงเดียวกัน เครื่องยนต์กระบอกสูบตรงกันข้ามมีจำนวนกระบอกสูบเป็นเลขคู่ตั้งแต่ 2 ถึง 8 สูบหรือมากกว่านั้น

- เครื่องยนต์กระบอกสูบตัว W (W - engine) เครื่องยนต์มีกระบอกสูบและลูกสูบหลายชุดกระบอกสูบถูกจัดวางเหมือนเครื่องยนต์กระบอกสูบตัว V แต่แบ่งเป็นสามแถวอยู่บนเพลาคือเหวียงเดียว การจัดวางกระบอกสูบแบบนี้ไม่นิยมใช้กันแต่ก็มีการพัฒนาเครื่องยนต์แบบนี้สำหรับรถแข่งอยู่บ้าง โดยส่วนใหญ่จะเป็นเครื่องยนต์ 12 สูบ แต่ละแถวทำมุมประมาณ 60 องศา

- เครื่องยนต์ลูกสูบตรงกันข้าม (Opposed piston engine) เครื่องยนต์มีลูกสูบอยู่ในกระบอกสูบแต่ละกระบอก โดยมีห้องเผาไหม้อยู่ตรงกลางระหว่างกระบอกสูบทั้งสอง เป็นผลให้กระบวนการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นแต่ละครั้งได้จังหวะในเวลาเดียวกันโดยลูกสูบแต่ละลูกถูกดันออกจากกึ่งกลางและให้กำลังแก่เพลาคือเหวียงที่แยกจากกันซึ่งอยู่ที่ปลายแต่ละด้านของกระบอกสูบ

- เครื่องยนต์กระบอกสูบในแนวรัศมี (Radial engine) เครื่องยนต์มีกระบอกสูบและลูกสูบหลายชุด โดยชุดกระบอกสูบและลูกสูบจัดวางในระนาบวงกลมรอบเพลาคือเหวียงที่อยู่ตรงกลาง ก้านสูบของลูกสูบถูกต่อเข้ากับก้านหลักซึ่งถูกต่อเข้ากับเพลาคือเหวียง จำนวนสูบของเครื่องยนต์แบบนี้จะเป็นเลขคู่เสมอและจะมีตั้งแต่ 3 ถึง 13 สูบหรือมากกว่านั้น นอกจากนี้ยังสามารถใช้ลูกสูบได้หลายแถวบนเพลาคือเหวียงเดียว เช่น เครื่องยนต์ 54 สูบ ใช้ 6 แถว แถวละ 9 สูบ เป็นต้น

2.3.1.4 จำแนกตามวัฏจักรการทำงาน

- วัฏจักรสี่จังหวะ (Four - Stroke cycle) วัฏจักรการทำงาน 1 วัฏจักรประกอบด้วยเคลื่อนที่ของลูกสูบ 4 จังหวะหรือสองรอบหมุนของเพลาคือเหวียง

- วัฏจักรสองจังหวะ (Two - Stroke cycle) วัฏจักรการทำงาน 1 วัฏจักรประกอบด้วยเคลื่อนที่ของลูกสูบ 2 จังหวะหรือหนึ่งรอบหมุนของเพลาคือเหวียง

2.3.1.5 จำแนกตามลักษณะการวางตัวของตำแหน่งวาล์วของเครื่องยนต์สี่จังหวะ

วาล์ววางอยู่ด้านบน (- Head valve หรือ Overhead valve) วาล์วไอดีและวาล์วไอเสียอยู่ในฝาสูบแนวขนานกัน

- วาล์ววางอยู่ด้านบนของเครื่องยนต์แบบตัว V (H - Head valve) วาล์วไอดีและวาล์วไอเสียอยู่ในฝาสูบ

- วาล์ววางอยู่ด้านข้าง (L - Head valve หรือ Side valve) วาล์วไอดีและวาล์วไอเสียอยู่ในเสื้อสูบแบบเรียงอยู่ในแนวเดียวกัน

- วาล์ววางเป็นรูปตัว T (T - Head valve) วาล์ว ไอดีและวาล์ว ไอเสียอยู่ในเสื้อสูบวางอยู่คนละด้านของกระบอกสูบ

2.3.1.6 จำแนกตามลักษณะการวางตัวของตำแหน่งช่องว่างหรือวาล์วของเครื่องยนต์สองจังหวะ

- ช่องไอดีและช่องไอเสียอยู่ด้านตรงข้ามของกระบอกสูบที่ปลายหนึ่ง (Cross - Scavenged porting)

- ช่องไอดีและช่องไอเสียอยู่ด้านเดียวกันของกระบอกสูบที่ปลายหนึ่ง (Loop - Scavenged porting)

- ช่องไอดีและช่องไอเสียวาล์วไอเสียอยู่ที่คนละปลายของกระบอกสูบ (Through – Scavenged porting หรือ Uniflow – Scavenged porting)

2.3.1.7 จำแนกตามชนิดน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้

- เบนซิน (Gasoline หรือ Petrol)
- ดีเซล (Diesel หรือ Fuel oil)
- ก๊าซธรรมชาติ (Natural gas)
- ก๊าซปิโตรเลียมเหลว (Liquefied petroleum gas, LPG)
- แอลกอฮอล์ (Alcohol)
- แก๊สโซฮอล์ (Gasohol)
- ก๊าซชีวภาพ (Biogas)

2.3.1.8 จำแนกตามลักษณะการนำไอดีเข้า

- การนำไอดีเข้าโดยธรรมชาติ (Naturally aspirated) ไม่มีระบบการเพิ่มความดันแก่ไอดีก่อนเข้าสู่เครื่องยนต์

- การซูเปอร์ชาร์จเจอร์ (Supercharging) ความดันของไอดีถูกเพิ่มโดยเครื่องอัดหรือคอมเพรสเซอร์หรือซูเปอร์ชาร์จเจอร์ที่ขับเคลื่อนโดยใช้กำลังที่ถ่ายทอดมาจากเพลาคือเหวี่ยงของเครื่องยนต์

- การเทอร์โบชาร์จ (Turbocharging) ความดันของไอดีถูกเพิ่มโดยกังหันและคอมเพรสเซอร์โดยกังหันจะถูกขับเคลื่อนด้วยไอเสียจากเครื่องยนต์ ซึ่งจะได้กำลังออกมาใช้ในการขับเคลื่อนอัดหรือคอมเพรสเซอร์เพื่ออัดไอดีต่อไป

- การอัดในห้องเพลาคือเหวี่ยง (Crankcase compression) ของเครื่องยนต์สองจังหวะ ซึ่งใช้ห้องเพลาคือเหวี่ยงเป็นคอมเพรสเซอร์เพื่อเพิ่มความดันของไอดี

2.3.1.9 จำแนกตามลักษณะการจ่ายเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟ

- คาร์บูเรชัน (Carburetion) เป็นกระบวนการเตรียมส่วนผสม กระทำโดยใช้คาร์บูเรเตอร์

- การฉีดเชื้อเพลิง (Fuel injection) การเตรียมส่วนผสมกระทำโดยใช้หัวฉีดเชื้อเพลิงเข้าที่จุดเดียวเข้าที่ลิ้นเร่ง (Throttle body fuel injection) หรือใช้หัวฉีดเชื้อเพลิงเข้าหลายจุด (สำหรับแต่ละสูบ) เข้าที่ช่อง ไอดี (Multipoint fuel injection)

2.3.1.10 จำแนกตามลักษณะการจุดระเบิด

- การจุดระเบิดด้วยประกายไฟ (Spark ignition, SI) เครื่องยนต์มีการเริ่มกระบวนการเผาไหม้ในแต่ละวัฏจักรโดยการใส่ประกายไฟจากหัวเทียนจุดระเบิดสารผสมอากาศกับเชื้อเพลิง (Air – fuel mixture, ไอดี) ในห้องเผาไหม้โดยรอบหัวเทียน

- การจุดระเบิดด้วยการอัด (Compression ignition, CI) เครื่องยนต์ที่มีการเริ่มกระบวนการเผาไหม้เมื่อมีสารผสมอากาศกับเชื้อเพลิงจุดระเบิดด้วยตัวเองอันเนื่องมาจากอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ที่เกิดการอัด

2.3.1.11 การจำแนกตามลักษณะห้องเผาไหม้

- ห้องเผาไหม้เปิด (Open chamber) ห้องเผาไหม้เป็นห้องเดียวซึ่งมีหลายรูปแบบ เช่น ทรงจาน ทรงลิ้ม และแบบหลุมในลูกสูบ เป็นต้น

- ห้องเผาไหม้แบ่ง (Divided chamber) ห้องเผาไหม้แบบนี้แบ่งเป็นห้องเผาไหม้เล็กและห้องเผาไหม้หลัก เชื่อมต่อกันด้วยรูหรือช่องเล็ก ๆ

2.3.1.12 จำแนกตามวิธีการควบคุม โหลด (Load control)

- การควบคุมการไหลของเชื้อเพลิงที่เข้าไปในห้องเครื่องยนต์ ซึ่งถือได้ว่าส่วนประกอบของสารผสมไม่เปลี่ยนแปลง

- การควบคุมที่ใช้ทั้งสองวิธีข้างต้นรวมกัน

2.3.1.13 จำแนกตามลักษณะการระบายความร้อนของเครื่องยนต์

- การระบายความร้อนด้วยของเหลว (Liquid cooling)

- การระบายความร้อนด้วยอากาศ (Air cooling)

2.3.2 การแบ่งประเภทของเครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพสามารถนำมาใช้กับเครื่องยนต์สันดาปภายในแบบลูกสูบ สามารถแบ่งตามลักษณะการใช้เชื้อเพลิงได้ 2 ประเภท

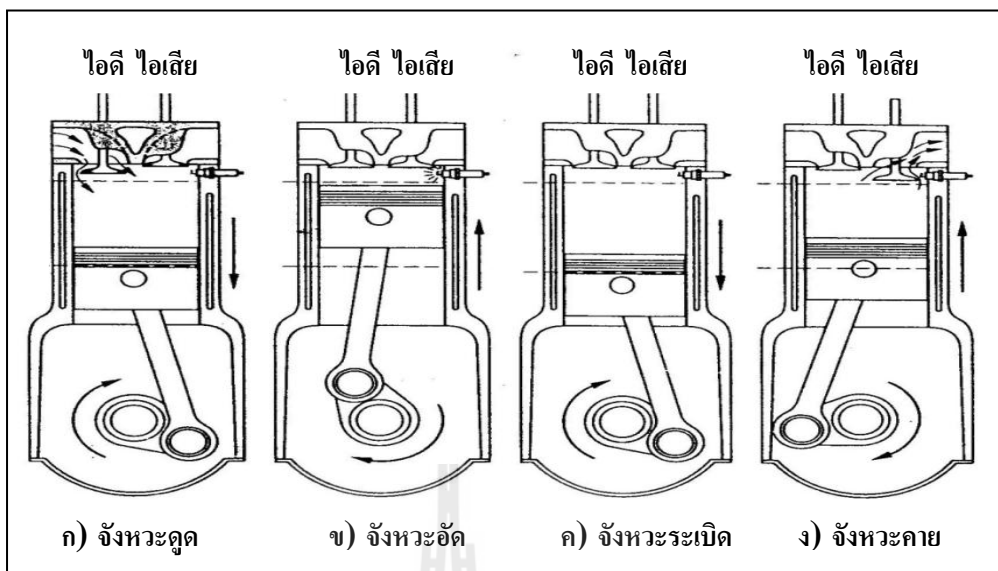
2.3.2.1 เครื่องยนต์เชื้อเพลิงเดี่ยวใช้งานสลับกัน (Bi - Fuel engine) เป็นเครื่องยนต์ที่ใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเพลิงอย่างเดียว จุดระเบิดด้วยประกายไฟ ดัดแปลงมาจากเครื่องยนต์เบนซินหรือเครื่องยนต์ดีเซล

2.3.2.2 เครื่องยนต์เชื้อเพลิงคู่ (Dual - Fuel engine) เป็นเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันดีเซล เป็นเชื้อเพลิงร่วมกับก๊าซชีวภาพ ทำงานโดยการผสมก๊าซชีวภาพกับอากาศให้ไหลเข้าเครื่องยนต์ หัวฉีดน้ำมันดีเซลจะฉีดน้ำมันดีเซลเพียงเล็กน้อย เพื่อให้ น้ำมันดีเซลเป็นเริ่มการเผาไหม้ จากนั้นก็จะเผาไหม้ก๊าซชีวภาพต่อไป

2.3.3 วัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพ

การทำงานของเครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพเป็นเครื่องยนต์เผาไหม้ภายในแบบลูกสูบ ทั้งเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟและเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดจะทำงานตามวัฏจักรการทำงาน 4 จังหวะ ในขณะที่เครื่องยนต์แบบลูกสูบจะเคลื่อนที่กลับไปกลับมาในกระบอกสูบและถ่ายเทกำลังผ่านก้านสูบไปยังเพลาค้อเหวี่ยง ซึ่งการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาของลูกสูบนี้อาจเปลี่ยนไปเป็นการหมุนของเพลาค้อเหวี่ยง เมื่อลูกสูบไปหยุดที่ตำแหน่งบนสุดซึ่งเรียกว่าตำแหน่งศูนย์ตายบน (Top center, TC) หรือตำแหน่งศูนย์ตายบน (Top dead center, TDC) ปริมาตรของกระบอกสูบจะน้อยที่สุดซึ่งเรียกว่าปริมาตรช่องว่าง (Clearance volume, V_c) และเมื่อลูกสูบไปหยุดอยู่ที่ตำแหน่งล่างสุดซึ่งเรียกว่าตำแหน่งศูนย์ตายล่าง (Bottom center, BC) หรือตำแหน่งศูนย์ตายล่าง (Bottom dead center, BDC) ปริมาตรของกระบอกสูบจะมากที่สุดซึ่งเรียกว่าปริมาตรรวม (Total volume, V_t) โดยปริมาตรที่ถูกกวาดโดยลูกสูบระหว่างปริมาตรรวมและปริมาตรช่องว่างก็คือปริมาตรการกระจัด (Displaced volume หรือ Swept volume, V_d) ซึ่งอัตราส่วนระหว่างปริมาตรสูงสุดและปริมาตรต่ำสุดก็คืออัตราส่วนการอัด (Compression ratio, r_c) สำหรับระยะระหว่างตำแหน่งศูนย์ตายบนและศูนย์ตายล่างก็คือระยะชัก หรือช่วงชัก หรือจังหวะการเคลื่อนที่ของลูกสูบ

วัฏจักรการทำงานสี่จังหวะ คือ การทำงานของเครื่องยนต์ในแต่ละกระบอกสูบจะต้องใช้จังหวะการเคลื่อนที่ของลูกสูบ 4 จังหวะ รอบการหมุนของเพลาค้อเหวี่ยงเพื่อให้ลำดับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นซึ่งได้จังหวะกำลัง 1 จังหวะนั้นสมบูรณ์หรือให้ครบ 1 วัฏจักรการทำงาน วัฏจักรการทำงานสี่จังหวะประกอบด้วยจังหวะต่าง ๆ ในทางทฤษฎี คือ



รูปที่ 2.2 วัฏจักรการทำงานเครื่องยนต์แบบจุดระเบิด 4 จังหวะ

2.3.3.1 จังหวะดูด (Intake stroke) หรือจังหวะนำไอดีเข้า เริ่มต้นเมื่อลูกสูบอยู่ที่ TC และสิ้นสุดเมื่อลูกสูบอยู่ที่ BC ไอดีจะถูกนำเข้าไปในกระบอกสูบ โดยในระหว่างจังหวะดูดนี้ วาล์วไอดีจะเปิดและวาล์วไอเสียจะปิด

2.3.3.2 จังหวะอัด (Compression stroke) สารผสมในกระบอกสูบถูกอัดปริมาณลดลงโดยลูกสูบเคลื่อนที่จาก BC ไปยัง TC ในขณะที่วาล์วทั้งสองปิดอยู่ และเมื่อลูกสูบอยู่ที่ TC จะมีการจุดระเบิดและการเผาไหม้ของสารผสมอากาศกับเชื้อเพลิง ทำให้ความดันกระบอกสูบสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว

2.3.3.3 จังหวะกำลังหรือจังหวะขยายตัว (Power stroke หรือ Expansion stroke) ซึ่งเริ่มต้นเมื่อลูกสูบอยู่ที่ TC และสิ้นสุดเมื่อลูกสูบอยู่ที่ BC โดยแก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้ของอากาศกับเชื้อเพลิงซึ่งมีอุณหภูมิและความดันสูงจะดันลูกสูบลงและไปทำให้เพลาค้อเหวี่ยงหมุน ในระหว่างจังหวะกำลังนั้นวาล์วไอดีและวาล์วไอเสียจะปิด

2.3.3.4 จังหวะคาย (Exhaust stroke) เริ่มต้นเมื่อลูกสูบอยู่ที่ BC และวาล์วไอเสียเปิด ส่วนวาล์วไอดียังคงปิดอยู่ แก๊สที่ขยายตัวแล้วถูกดันออกจากกระบอกสูบโดยลูกสูบเคลื่อนที่จาก BC ไปยัง TC

2.3.4 เครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟที่ใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิง

เครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟที่ใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิง หรือเครื่องยนต์เชื้อเพลิงเหลวที่เปลี่ยนแปลงทั้งเครื่องยนต์เบนซินและเครื่องยนต์ดีเซล สิ่งจำเป็นที่ต้องปรับปรุง มีดังนี้

2.3.4.1 การปรับปรุงเครื่องยนต์เบนซิน เพื่อใช้ก๊าซชีวภาพ มีการปรับปรุงเครื่องยนต์ดังนี้

- ติดตั้งอุปกรณ์ผสมก๊าซชีวภาพ (Gas mixer) ที่บริเวณท่อร่วมไอดีก่อนเข้าคาร์บูเรเตอร์ หรือบริเวณลิ้นปีกผีเสื้อ (Throttle valve) เพื่อผสมอากาศกับก๊าซชีวภาพ แต่ถ้าต้องการให้เครื่องยนต์สามารถใช้ได้กับน้ำมันเบนซิน ได้ด้วยก็ไม่ต้องเอาหัวฉีดหรือคาร์บูเรเตอร์ออก

- ติดตั้งวาล์วควบคุมอัตราการไหลของก๊าซ เพื่อที่จะควบคุมปริมาณก๊าซและอากาศในอัตราส่วนที่เหมาะสมในกระบวนการทำงานของเครื่องยนต์

- ปรับเปลี่ยนองศาการจุดระเบิดให้เร็วขึ้น (Increase spark advance) เนื่องจากเชื้อเพลิงก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงที่มีความเร็วในการเผาไหม้ต่ำ (Low flame speed)

2.3.4.2 การปรับปรุงเครื่องยนต์ดีเซล เพื่อใช้ก๊าซชีวภาพ มีดังนี้

- ลดอัตราส่วนการอัดของเครื่องยนต์ (Compression ratio) เพื่อให้มีค่าใกล้เคียงกับเครื่องยนต์เบนซิน และป้องกันการน็อคของเครื่องยนต์

- ถอดชุดอุปกรณ์ฉีดเชื้อเพลิงดีเซลออก แล้วทำการติดตั้งหัวเทียนและชุดอุปกรณ์จุดระเบิดสำหรับการทำงานของเครื่องยนต์

- ติดตั้งลิ้นปีกผีเสื้อ (Throttle valve) เพื่อควบคุมอัตราการไหลของไอดี และอุปกรณ์ผสมก๊าซชีวภาพ (Gas mixer) ที่บริเวณลิ้นปีกผีเสื้อ (Throttle valve)

- ติดตั้งวาล์วควบคุมอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพและอากาศ เพื่อให้มีอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับเครื่องยนต์ที่ใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิง

2.3.5 อุปกรณ์ผสมอากาศกับก๊าซชีวภาพ (Gas mixer)

อุปกรณ์ผสมอากาศกับก๊าซชีวภาพ (Mixing device) แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

2.3.5.1 อุปกรณ์ผสมอากาศกับก๊าซชีวภาพอย่างง่าย (Simple mixing device) คือ แบบ T - Joint Tube Mixer ซึ่งจะสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้อย่างกว้างขวาง ปกติจะนำมาใช้ในกรณีที่เครื่องยนต์ทำงานที่สภาวะคงที่ คือ มีภาระกรรมคงที่ (Load constant) หรือนำไปขับปั๊มน้ำที่มีอัตราการไหลคงที่ และจะต้องมีการสอบเทียบ (Calibration) อุปกรณ์ผสมอากาศกับก๊าซชีวภาพ โดยใช้ทั้งอากาศและก๊าซชีวภาพมาสอบเทียบการควบคุมเพื่อให้ได้กำลังตามต้องการ ก็คือ

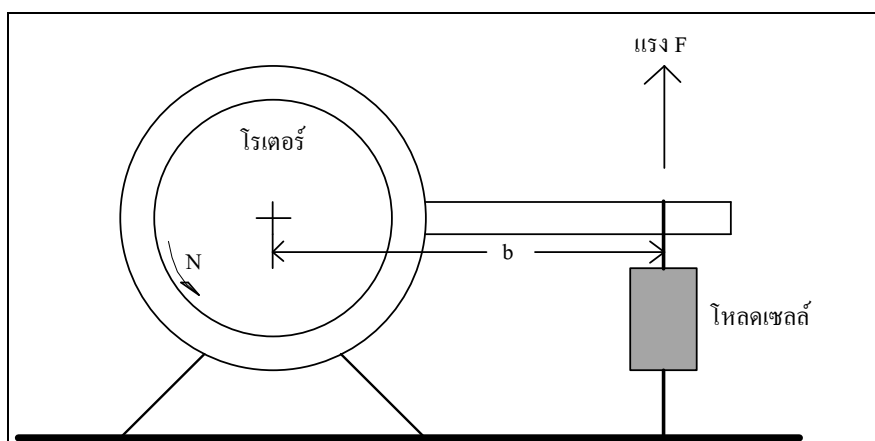
การควบคุมปริมาณของอากาศและก๊าซชีวภาพที่เข้ามาผสมกันในอุปกรณ์นี้ ซึ่งจะควบคุมได้โดยการปรับวาล์วด้านอากาศเข้าและด้านก๊าซชีวภาพเข้า

2.3.5.2 Venturi Mixer เป็นอุปกรณ์ผสมอากาศกับก๊าซชีวภาพที่สามารถควบคุมค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงได้ดี สามารถที่จะเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงได้ Venturi Mixer มีคุณลักษณะเช่นเดียวกับคาร์บูเรเตอร์ กล่าวคือเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณอากาศที่ไหลเข้าสู่เครื่องยนต์หรือความเร็วของอากาศที่ไหลเข้า จะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความดันที่คอคออดซึ่งจะก่อให้เกิดผลดีคือ กรณีที่มีปริมาณของอากาศไหลเข้าสู่เครื่องยนต์มากจะทำให้ความเร็วของอากาศที่บริเวณคอคออดมีค่าสูง ความแตกต่างระหว่างความดันระหว่างเชื้อเพลิงก๊าซชีวภาพและอากาศที่คอคออดสูง ปริมาณของก๊าซชีวภาพจะไหลมาผสมกับอากาศที่คอคออดได้มาก กรณีที่ปริมาณอากาศไหลเข้าสู่ห้องเครื่องยนต์น้อย จะทำให้ความเร็วของอากาศบริเวณคอคออดมีค่าต่ำ ความแตกต่างระหว่างความดันระหว่างเชื้อเพลิงก๊าซชีวภาพและอากาศที่คอคออดมีค่าต่ำ ทำให้ก๊าซชีวภาพเพียงเล็กน้อยไหลเข้ามาผสมกับอากาศที่คอคออด ดังนั้นการที่จะต้องให้การกำลังจากเชื้อเพลิงก๊าซชีวภาพเท่าใดขึ้นอยู่กับ การปรับลิ้นปีกผีเสื้อ เพื่อควบคุมปริมาณของเชื้อเพลิงก๊าซชีวภาพที่เข้าไปผสมกับอากาศ นอกจากนี้ที่ท่อส่งก๊าซบริเวณก่อนที่จะเข้าสู่อุปกรณ์ผสมอากาศกับก๊าซชีวภาพจะต้องติดตั้ง Constant Pressure Control Valve เพื่อควบคุมให้ความดันในท่อส่งก๊าซชีวภาพมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก เพราะถ้าความดันในท่อส่งก๊าซชีวภาพมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงมาก จะมีผลก็คือค่าความร้อนเชิงปริมาณของเชื้อเพลิงก๊าซชีวภาพจะมีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์

2.3.6 สมรรถนะของเครื่องยนต์

เครื่องยนต์จุกะระเบิดด้วยประกายไฟที่ใช้ น้ำมันเบนซินเป็นเชื้อเพลิง เมื่อนำมาปรับปรุงใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงจะผลิตกำลังงานได้น้อยกว่าการใช้ น้ำมันเบนซิน ซึ่งกำลังที่ลดลงจะขึ้นอยู่กับค่าความร้อนของก๊าซชีวภาพ เช่น ก๊าซชีวภาพ 70% มีเทน จะมีค่าความร้อนสูงกว่าก๊าซชีวภาพ 50% มีเทน ดังนั้นก่อนที่จะนำเครื่องยนต์ไปใช้งานจึงต้องทำการวัดกำลังและแรงบิด

2.3.6.1 กำลังเบรก (Brake power, P_b) เป็นกำลังที่วัดได้จากเพลาค้อหรือที่ล้อตุนกำลังของเครื่องยนต์ ซึ่งเป็นกำลังที่นำไปใช้งานได้นั่นเอง การวัดกำลังเบรกจะใช้เครื่องมือที่เรียกว่าไดนาโมมิเตอร์ (Dynamometer) ซึ่งมีอยู่หลายชนิด โดยจะวัดออกมาในรูปของทอร์ก (Torque) และรอบการหมุนของเครื่องยนต์ ซึ่งจะได้ทอร์ก



รูปที่ 2.3 หลักการทำงานของไดนามอมิเตอร์

แรงบิด (Torque)

$$Torque = Fb \quad (2.1)$$

และกำลัง (Power)

$$Power = 2\pi TN \quad (2.2)$$

เมื่อ	T	=	แรงบิดของเครื่องยนต์ (N-m)
	F	=	แรงที่ใช้ในการเบรก (N)
	b	=	ความยาวของแขน โมเมนต์ (m)
	N	=	ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ (rpm)

2.3.6.2 การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ (Specific fuel consumption, sfc) ในการทดสอบเครื่องยนต์ การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจะถูกวัดเป็นอัตราการไหลของมวล (\dot{m}_f) ซึ่งเครื่องยนต์ขนาดใหญ่จะมีการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงมาก ดังนั้นเพื่อให้สามารถนำไปใช้ในการเปรียบเทียบได้จึงกำหนดรูปของการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ ซึ่งอัตราการไหลของมวลเชื้อเพลิงต่อหน่วยกำลังที่ให้ออกมาและเป็นการวัดประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ในการใช้เชื้อเพลิงเพื่อผลิตงานออกมา

$$\text{Specific Fuel Consumption, } sfc = \frac{\dot{m}_f}{P} \quad (2.3)$$

ค่าการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะยิ่งต่ำยิ่งดี และโดยทั่วไปแล้วจะคำนวณในรูปของการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (Brake specific fuel consumption, bsfc) คือ อัตราการไหลของมวลเชื้อเพลิงต่อหน่วยกำลังเบรกที่ให้ออกมา ค่า bsfc ที่ดีที่สุดสำหรับเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟมีค่าประมาณ 270 g/(kW-h)

2.3.6.3 ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ คือ อัตราส่วนระหว่างงานที่ได้ต่อวัฏจักรกับพลังงานเชื้อเพลิงที่ใส่เข้าไปต่อวัฏจักร โดยพลังงานเชื้อเพลิงที่สามารถปล่อยออกมาจากการเผาไหม้จะหาได้จากมวลของเชื้อเพลิงที่ส่งเข้าไปในเครื่องยนต์ต่อวัฏจักรคูณด้วยค่าความร้อนของเชื้อเพลิง อัตราส่วนดังกล่าวนี้เรียกว่า “ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิง” (Fuel conversion efficiency, η_f)

$$\text{Fuel Conversion Efficiency, } \eta_f = \frac{P}{\dot{m}_f Q_{HV}} \quad (2.4)$$

2.3.6.4 การปล่อยมลพิษ ในการทำงานของเครื่องยนต์เผาไหม้ภายในจะมีการปล่อยไอเสียหรือผลที่เกิดจากการเผาไหม้ระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศออกมาจากเครื่องยนต์ ซึ่งมีส่วนประกอบที่ถือว่าเป็นมลพิษ คือ ออกไซด์ของไนโตรเจน (ได้แก่ ไนตริกออกไซด์ (NO) และไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO₂) ที่นิยมเรียกกันเป็น NO_x) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ไฮโดรคาร์บอนที่ยังไม่ได้เผา (HC) และสารละออง (Particulate)

ความเข้มข้นของแก๊สที่เป็นมลพิษในไอเสียของเครื่องยนต์มักจะถูกวัดเป็นส่วนในล้านส่วน (Part per million, ppm) หรือร้อยละโดยปริมาตร แต่พารามิเตอร์ที่ใช้ใช้ในการเปรียบเทียบจะพิจารณาเป็น 2 ลักษณะ คือ อัตราการไหลของมวลมลพิษต่อหน่วยกำลังที่ให้ออกมาที่เรียกว่า “การปล่อยมลพิษจำเพาะ” (Specific emission, s)

$$s_{NO_x} = \frac{\dot{m}_{NO_x}}{P}, s_{CO} = \frac{\dot{m}_{CO}}{P}, s_{HC} = \frac{\dot{m}_{HC}}{P}, s_{part} = \frac{\dot{m}_{part}}{P} \quad (2.5)$$

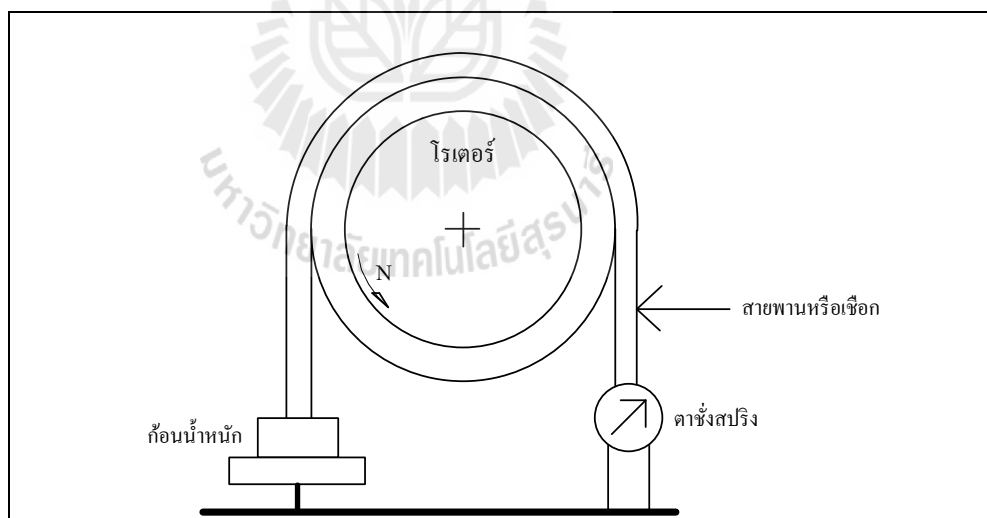
หน่วยที่นิยมใช้คือ $\mu\text{g} / \text{Jc}$ และ $\text{g} / (\text{kW} - \text{h})$

2.4 เครื่องมือทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์

การเลือกใช้เครื่องยนต์เพื่อเป็นต้นกำลังในงานต่าง ๆ หรือการนำเครื่องยนต์ไปใช้กับเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ ปัจจัยที่สำคัญก็คือความต้องการทราบสมรรถนะของเครื่องยนต์เพื่อที่จะได้เลือกใช้ขนาดของเครื่องยนต์ให้ถูกต้องตามความต้องการของการนำไปใช้งาน เช่น การนำเครื่องยนต์ไปผลิตกระแสไฟฟ้า จำเป็นที่จะต้องทราบสมรรถนะก่อนนำไปใช้งาน เพื่อที่จะได้เลือกอุปกรณ์ทางไฟฟ้าได้อย่างถูกต้อง

2.4.1 ไคนาโมมิเตอร์แบบสายพานหรือเบรกเชือก (Rope brake)

เบรกเชือก (Rope brake) เป็นอุปกรณ์สำหรับทดสอบหาสมรรถนะของเครื่องยนต์แบบหนึ่งที่มีใช้ในอดีต ซึ่งประกอบไปด้วยเชือกหนังหรือวัสดุที่มีคุณภาพใกล้เคียง และที่ปลายข้างหนึ่งของเชือกจะยึดติดกับตาชั่งสปริง และตาชั่งสปริงจะยึดติดกับพื้นตาม รูปที่ 2.4 ส่วนปลายอีกข้างหนึ่งเป็นสำหรับแขวนน้ำหนักที่สามารถเพิ่มและลดได้ ในการทดสอบเพื่อต้องการให้เครื่องยนต์รับภาระกรรมมากก็โดยการเพิ่มน้ำหนักและในทางตรงกันข้ามในกรณีที่ต้องการทดสอบที่ภาระกรรมต่ำก็ทำการลดน้ำหนักให้ต่ำลง



รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างไคนาโมมิเตอร์แบบสายพาน

เบรกเชือกเป็นเครื่องมือทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ที่มีความเร็วรอบต่ำในการหาแรงบิดเพื่อนำไปคำนวณหาค่ากำลังของเครื่องยนต์ จะได้แรงในแนวสัมผัสที่เครื่องยนต์ถูกต้าน โดยความฝืดที่ขอบของพลูเลย์ ซึ่งสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$F = g(m - m_s) \quad (2.6)$$

เมื่อ	F	=	แรงในแนวสัมผัส (N)
	G	=	อัตราเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก (m/s^2)
	M	=	มวลของน้ำหนักถ่วง (kg)
	m_s	=	มวลที่อ่านได้จากตาชั่งสปริง (kg)

$$\text{แรง } F \text{ กระทำที่รัศมี} = \frac{D+d}{2} \quad (2.7)$$

เมื่อ	D	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของพลูเลย์ (m)
	d	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของเชือก (m)

$$T = g(m - m_s) \frac{D+d}{2} \quad (2.8)$$

ถ้าเชือกมีขนาดเล็กมาก อาจไม่พิจารณาขนาดของเชือกจะได้สมการดังนี้

$$T = g(m - m_s) \frac{D}{2} \quad (2.9)$$

2.4.2 โพรนีเบรก (Prony brake)

โพรนีเบรก (Prony brake) เป็นอุปกรณ์ทดสอบหาแรงบิดอีกประเภทหนึ่งที่มีลักษณะใกล้เคียงกันกับแบบเบรกเชือก โดยประกอบไปด้วยพลูเลย์ใหญ่ และมีชุดเบรกที่มีด้ามต่อยาวประกอบอยู่ และที่ปลายด้ามต่อจะมีน้ำหนักถ่วงซึ่งสามารถเพิ่มและลดน้ำหนักดังกล่าวได้ การปรับความฝืดเพื่อลดหรือเพิ่มความฝืดเพื่อการทดสอบโดยการเปลี่ยนภาระกรรมของเครื่องยนต์กระทำโดยชั้นสกรูที่มีสปริงรองรับอยู่ ในขณะที่ทดสอบคานเบรกจะต้องอยู่ในแนวระดับตลอดเวลา โดยที่แรงบิดจะได้อ่านได้จากสมการ

$$T = gmr \quad (2.10)$$

เมื่อ	T	=	แรงบิด (N-m)
	G	=	อัตราเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก (m/s^2)

m	=	มวลของน้ำหนักปลายคาน (kg)
r	=	ระยะจากศูนย์กลางของพลูเลย์ไปยังตำแหน่งที่แขวนน้ำหนัก (m)

2.4.3 ไคนาโมมิเตอร์แบบ Hydraulic Brake

ไคนาโมมิเตอร์แบบ Hydraulic Brake เป็น Absorption Dynamometer มีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งคือ Water Brake ใช้ Fluid Friction เป็นตัวเบรก เปลี่ยน Mechanical Energy เป็นพลังงานความร้อนเช่นกัน Capacity ของ Water Brake ขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 ประการคือ ความเร็วและระดับน้ำใน Housing ของไคนาโมมิเตอร์ กำลังที่วัดได้จะเป็นแรงเสียดทานของความเร็วรอบและถ้าความเร็วรอบคงที่เราก็สามารถปรับ Capacity ได้ โดยการควบคุมระดับน้ำใน Housing ของไคนาโมมิเตอร์ ขนาดของ Water Brake จะทำให้มี Capacity สูงมาก ๆ ไว้ก็ได้ เพราะความร้อนที่เกิดขึ้น Absorb Mechanical Energy จะถูกนำพาออกไปทาง Housing ของไคนาโมมิเตอร์ได้ง่าย เมื่อเอาไคนาโมมิเตอร์ติดเข้ากับ Power Shaft ของเครื่องต้นกำลัง Power Absorbing Unit ของไคนาโมมิเตอร์จะพยายามหมุนไปตามเพลลาและเราสามารถวัดค่าแรงบิดได้จากโพลคเชลล์ ดังรูปที่ 2.3 ที่ติดอยู่ในไคนาโมมิเตอร์ โดยสามารถวัดแรงบิดได้จากสมการ 2.1 และ 2.2

2.4.4 ไคนาโมมิเตอร์แบบ Eddy Current Brake

ไคนาโมมิเตอร์แบบนี้อาศัยหลักการทางไฟฟ้า โดยใช้หลักการ Eddy Current ที่จะเหนี่ยวนำขึ้นในแผ่นโลหะที่หมุนได้โดยใช้สนามแม่เหล็ก และจะทำให้แผ่นโลหะนี้เกิดการสูญเสียแบบ Eddy Current ทำให้แผ่นโลหะไม่สามารถหมุนได้อย่างอิสระ หรือจะถูกหน่วงหรือเบรกให้หมุนช้าลงนั่นเอง โดยแรงบิดที่เบรกจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความเข้มสนามแม่เหล็ก ซึ่งความเข้มสนามแม่เหล็กแปรผันตรงกับกระแสที่จ่ายให้ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก ดังนั้นสามารถควบคุมแรงบิดที่ใช้ในการเบรกได้จากกระแสที่จ่ายให้กับขดลวด

ข้อดีของไคนาโมมิเตอร์แบบ Eddy Current Brake คือควบคุมได้อย่างแม่นยำ และเนื่องจากมีโครงสร้างที่ง่ายไม่ซับซ้อน จึงทำให้ไม่ต้องการการดูแลรักษามากนัก

ข้อเสียของไคนาโมมิเตอร์ชนิดนี้ คือ มีความเฉื่อยสูง และไม่สามารถควบคุมให้สร้างแรงบิดที่พิกัดที่ความเร็วศูนย์หรือความเร็วต่ำ นอกจากนี้ข้อเสียของไคนาโมมิเตอร์แบบ Eddy Current Brake นี้จะเหมือนกับไคนาโมมิเตอร์แบบ Water Brake คือ การทำงานได้เพียง Absorption Mode เท่านั้น และการที่ไม่สามารถจ่ายพลังงานที่ใช้ในการเบรกคืนสู่แหล่งจ่ายได้

2.4.5 ไคนาโมมิเตอร์แบบ Hysteresis Brake

ไคนาโมมิเตอร์นี้อาศัยหลักการทางไฟฟ้าเหมือนกับไคนาโมมิเตอร์แบบ Eddy Current Brake โดยอาศัยหลักการของ Hysteresis Loss ของเหล็กเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็กไฟฟ้า กระแสสลับทำให้เกิดการเบรกโดยส่วนประกอบที่สำคัญประกอบไปด้วยโรเตอร์รูปถ้วย และ ขดลวดที่สร้างสนามแม่เหล็กกระแสสลับเพื่อทำให้เกิด Hysteresis Loss ที่โรเตอร์ จากหลักการดังกล่าวข้างต้น เราจะสามารถควบคุมแรงบิดที่ใช้เบรกได้โดยการควบคุมความเข้มและความถี่ของ สนามแม่เหล็กไฟฟ้านั้นเอง ไคนาโมมิเตอร์แบบ Hysteresis Brake นี้สามารถควบคุมได้ง่าย เช่นเดียวกับไคนาโมมิเตอร์แบบ Eddy Current Brake แต่ว่าจะมีขนาดกำลังที่น้อยกว่ามาก

ส่วนข้อเสียของไคนาโมมิเตอร์แบบนี้จะคล้าย ๆ กับไคนาโมมิเตอร์แบบ Eddy Current Brake กล่าวคือมันไม่สามารถเบรกที่ความเร็วต่ำได้ ทำงานได้เพียง Absorption Mode เท่านั้น และไม่สามารถจ่ายพลังงานที่ใช้ในการเบรกคืนสู่แหล่งจ่ายได้

2.4.6 ไคนาโมมิเตอร์แบบ DC

ไคนาโมมิเตอร์แบบ DC นี้แท้จริงแล้วก็คือระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงแบบ 4 - Quadrants หรือ 2 - Quadrants โดยถ้าเป็นระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงแบบ 4 - Quadrants ทำให้ไคนาโมมิเตอร์แบบ DC นี้ทำงานได้ทั้งสองทิศทางการหมุน แต่ถ้าเป็นระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 2 - Quadrants จะทำให้ไคนาโมมิเตอร์แบบ DC นี้ทำงานได้เพียงทิศทางเดียว ไคนาโมมิเตอร์แบบ DC นี้มีข้อดีที่สามารถทำงานได้ ทั้ง Absorption Mode และ Driving Mode โดยแรงบิดที่ใช้ในการเบรกหรือที่ใช้ในการขับเคลื่อน จะขึ้นอยู่กับกระแสอาร์มเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ดังนั้นจึงเป็นเรื่องง่ายและแม่นยำที่จะ ควบคุมแรงบิดของไคนาโมมิเตอร์แบบ DC นี้ และนอกจากนี้มีการตอบสนองต่อคำสั่งที่ดี ข้อดีที่สำคัญของไคนาโมมิเตอร์แบบ DC คือ สามารถจ่ายพลังงานในการเบรกคืนสู่แหล่งจ่ายได้ อันเนื่องมาจากการใช้วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ที่สามารถให้พลังงานไหลกลับทางได้ นั้นหมายความว่าแม้ว่าพลังงานที่ใช้ในการเบรกจะมหาศาลแค่ไหนก็ไม่จำเป็นต้องทิ้งไปในรูปของ ความร้อน และไม่จำเป็นต้องจัดหาอุปกรณ์ที่จะระบายพลังงานความร้อน แต่ไม่ได้หมายความว่า พลังงานในการเบรกจะสามารถจ่ายคืนแหล่งจ่ายได้ทั้งหมด 100% นั้นเป็นเพราะตัวไคนาโมมิเตอร์แบบ DC เองที่ประกอบด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ก็มีการสูญเสียภายในตัวเองอยู่ แต่พลังงานสูญเสียเหล่านี้มีค่าไม่สูง โดยตัวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเองจะมีประสิทธิภาพประมาณ 80% และตัวขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงนั้นจะมี ประสิทธิภาพมากกว่า 95%

ข้อดีอีกข้อหนึ่งนั่น คือ การที่สามารถจะให้แรงบิดที่พิกัดที่ความเร็วต่ำจนถึงความเร็วเท่ากับศูนย์ได้ นั่นหมายความว่าไดนาโมมิเตอร์แบบ DC นี้จะสามารถลือกมอเตอร์ที่จะทำการทดสอบหรือเครื่องยนต์ที่จะทำการทดสอบให้หยุดนิ่งโดยให้แรงบิดเท่ากับค่าที่พิกัดของมันได้

2.4.7 ไดนาโมมิเตอร์แบบ AC

ไดนาโมมิเตอร์แบบ AC นี้ก็คือระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับโดยจะประกอบไปด้วยวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับและมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ มอเตอร์อาจจะใช้ได้ทั้งมอเตอร์เหนี่ยวนำหรือมอเตอร์เซอร์โว ในขณะที่มอเตอร์เซอร์โวมักมีขนาดเล็กกว่าในกำลังที่เท่ากัน แต่ก็มีราคาที่สูงกว่ามากทำให้ไดนาโมมิเตอร์แบบ AC จะใช้มอเตอร์แบบเหนี่ยวนำเสียเป็นส่วนใหญ่ เช่นเดียวกับไดนาโมมิเตอร์แบบ DC ที่ทำงานได้ทั้ง Absorption Mode และ Driving Mode ไดนาโมมิเตอร์แบบ AC นี้ก็ทำงานได้ทั้งสอง Modes เช่นเดียวกัน และด้วยเทคโนโลยีที่เป็นไปอย่างรวดเร็วของไมโครโปรเซสเซอร์ทำให้การควบคุมแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไปอย่างง่ายดายไม่ต่างอะไรจากการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งสิ่งเหล่านี้เป็นไปได้ยากมากในสมัยก่อนเนื่องจากมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ โดยเฉพาะมอเตอร์แบบเหนี่ยวนำนั้นมีแบบจำลอง (Model) ที่ยุ่งยากกว่ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมาก จำเป็นต้องอาศัยการคำนวณทางคณิตศาสตร์ที่ยุ่งยากเพื่อให้การควบคุมเป็นไปอย่างเที่ยงตรงและแม่นยำซึ่งก็ต้องขอบคุณเทคโนโลยีด้านสารกึ่งตัวนำที่ทำให้ไมโครโปรเซสเซอร์มีความเร็วในการประมวลผลที่เร็วขึ้นมากทำให้การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไปอย่างง่ายดายดังนั้น พลังงานที่ไดนาโมมิเตอร์ใช้ในการเบรกจะต้องถูกทำให้หายไปในรูปแบบของความร้อน โดย การทำให้เกิดการสูญเสียที่ DBR (Dynamic braking resistor) แต่อย่างไรก็ตามหากต้องการที่จะให้มีการจ่ายพลังงานคืนสู่แหล่งจ่ายในช่วงที่ไดนาโมมิเตอร์กำลังเบรกก็เป็นสิ่งที่เป็นไปได้โดยการใช้วงจรเรียงกระแสแบบวิธีสวิตช์ (Switched - Mode rectifiers) ที่ให้พลังงานไหลได้สองทางแทนที่วงจรเรียงกระแสที่ใช้ไดโอด จากเทคโนโลยีด้านการควบคุมมอเตอร์กระแสสลับทำให้ไดนาโมมิเตอร์แบบ AC สามารถสร้างแรงบิดสำหรับเบรกที่ค่าพิกัดได้แม้แต่ที่ความเร็วต่ำหรือความเร็วศูนย์

2.5 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ (Synchronous generator)

ระบบไฟฟ้าที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบันได้มาจากโรงต้นกำลัง (Power plant) ซึ่งเป็นแหล่งผลิตพลังงานไฟฟ้าอยู่ในความรับผิดชอบของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ทำหน้าที่ในการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับการไฟฟ้าภูมิภาค และการไฟฟ้านครหลวง เพื่อจำหน่ายให้กับบ้านพักอาศัย สำนักงาน หน่วยงานต่างๆ และโรงงานอุตสาหกรรม โรงต้นกำลังที่ผลิตพลังงานไฟฟ้านั้น มีทั้ง

โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน โรงไฟฟ้าพลังน้ำ โรงไฟฟ้ากังหันก๊าซ โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ และยังรวมถึงการผลิตไฟฟ้าทดแทนจากพลังงานทดแทนอีกด้วย โดยภายในโรงไฟฟ้าแต่ละชนิดจะมีเครื่องจักรที่สำคัญทำหน้าที่ผลิตพลังงานไฟฟ้าส่งออกไปใช้งาน เรียกว่า เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator)

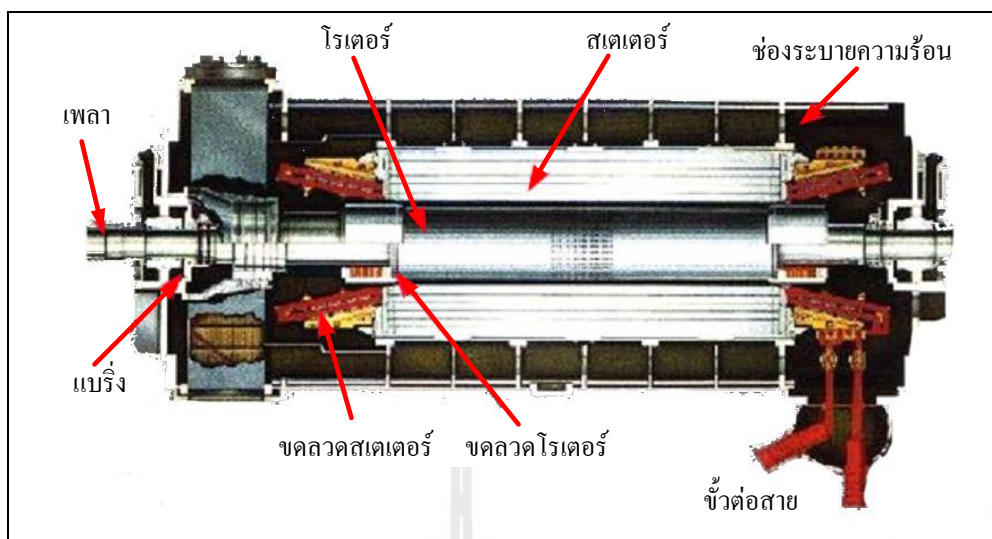
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นเครื่องจักรกลที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยอาศัยการเหนี่ยวนำของแม่เหล็กตามหลักการของ ไมเคิล ฟาราเดย์ โดยการหมุนตัดกันระหว่าง ขดลวดตัวนำกับสนามแม่เหล็ก พิกัดกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะบอกเป็น โวลต์ - แอมป์ (VA) หรือกิโลโวลต์ - แอมป์ (KVA) ซึ่งเป็นกำลังไฟฟ้าปรากฏ (Apparent Power) ที่เครื่องจ่ายออกมาและสามารถแบ่งชนิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละประเภท ได้ดังนี้

2.5.1 หลักการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ

เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternators) ทำหน้าที่ผลิตแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับโดยใช้พลังงานกลจากต้นกำลัง (Prime mover) มาหมุนขั้วเพลลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับใช้หลักการเดียวกันกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง โดยอาศัยหลักการตัวนำในอาร์เมเจอร์หมุนตัดสนามแม่เหล็กที่ขั้วแม่เหล็ก หรือสนามแม่เหล็กที่ขั้วแม่เหล็กหมุนตัดตัวนำในอาร์เมเจอร์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับแตกต่างจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง คือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงขดลวดอาร์เมเจอร์เป็นส่วนหมุนและขดลวดสนามแม่เหล็กอยู่กับที่ สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับนั้นอาจให้ขดลวดอาร์เมเจอร์อยู่กับที่หรือหมุนก็ได้ ขึ้นอยู่กับกำลังเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับขนาดใหญ่ส่วนมากจะเป็นแบบสนามแม่เหล็กหมุน (Rotating field)

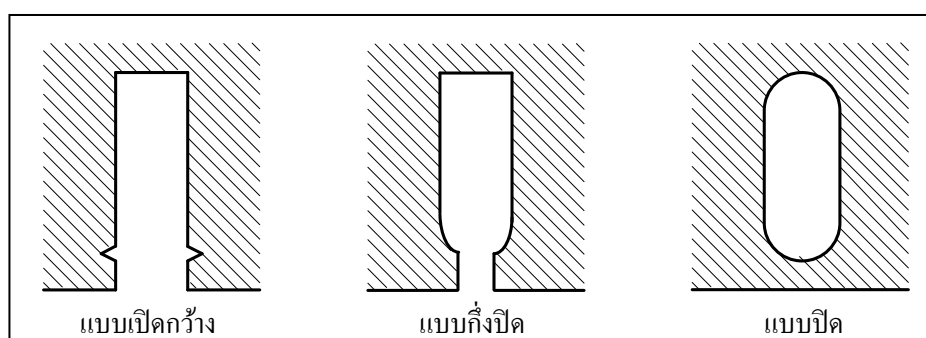
2.5.1.1 ส่วนประกอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ

1. โครงสร้างสเตเตอร์ (Stator frame) เป็นเปลือกหุ้มภายในทำด้วยเหล็กภายนอกทำด้วยเหล็กหล่อ ซึ่งเป็นชิ้นส่วนที่รองรับส่วนประกอบอื่นๆของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทำหน้าที่ยึดแกนเหล็กที่ใช้บรรจุขดลวดอาร์เมเจอร์ ออกแบบให้มีช่องลมเพื่อช่วยในการระบายความร้อน ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ
(ที่มา George G. Karady และ Keith Holbert, 2003)

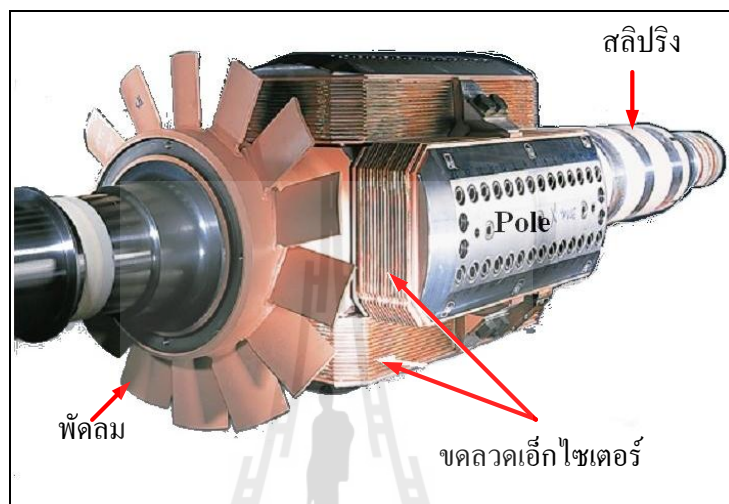
แกนเหล็กสเตเตอร์ (Stator core) เป็นส่วนที่ใช้พันขดลวดอาร์เมเจอร์ แกนสเตเตอร์ทำจากแผ่นเหล็กบาง ๆ วางอัดซ้อนกัน เพื่อลดการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน และเป็นเหล็กอ่อนมีส่วนผสมของสารซิลิกอน เพื่อลดการสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิสในแกนเหล็ก แผ่นเหล็กแต่ละแผ่นจะปั๊มเป็นร่อง (Slot) และเคลือบด้วยฉนวน แกนเหล็กสเตเตอร์จะมีร่องอากาศเพื่อช่วยระบายความร้อน ลักษณะร่องของแกนเหล็กสเตเตอร์มีอยู่ด้วยกัน 3 แบบ ได้แก่ ร่องแบบเปิดกว้าง (Wide - Open type Slot) ร่องแบบกึ่งปิด (Semi - Closed type slot) และร่องแบบปิด (Wholly Closed type slot)



รูปที่ 2.6 แกนเหล็กและร่องสำหรับพันขดลวดอาร์เมเจอร์

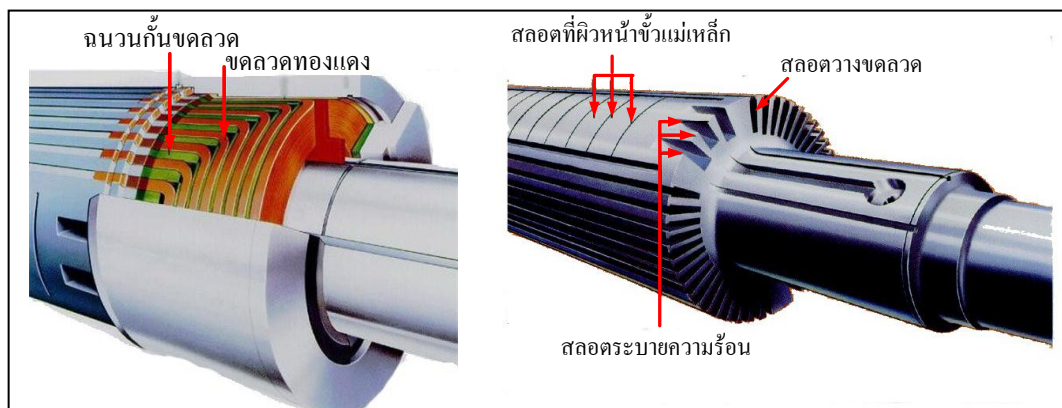
2. โรเตอร์ (Rotor) สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ดังนี้

โรเตอร์ชนิดขั้วแม่เหล็กยื่น (Salient - Pole Type) นิยมนำมาใช้กับเครื่องเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีความเร็วรอบต่ำและความเร็วเร็วปานกลาง เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้กับโรงจักรไฟฟ้ากังหันน้ำของเขื่อนต่างๆ ดังรูปที่ 2.7



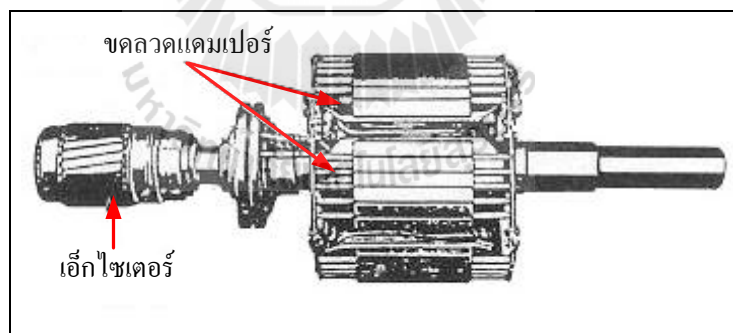
รูปที่ 2.7 โรเตอร์ชนิดขั้วแม่เหล็กยื่น
(ที่มา George G. Karady และ Keith Holbert, 2003)

โรเตอร์ชนิดขั้วแม่เหล็กเรียบ (Smooth - Cylindrical Type) ส่วนมากจะนำจะนำไปใช้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนด้วยกังหันไอน้ำ (Turbine) และเครื่องกังหันแก๊สที่มีความเร็วรอบประมาณ 1500 รอบต่อนาที และ 3000 รอบต่อนาที ลักษณะของโรเตอร์เป็นแท่งเหล็กแผ่นอัดซ้อนกันเป็นรูปทรงกระบอกยาว มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่าโรเตอร์ชนิดขั้วแม่เหล็กยื่น โรเตอร์ชนิดนี้ทำให้เกิดสมดุลดีกว่าชนิดขั้วแม่เหล็กยื่น ลดการสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานของลมและแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางขณะที่ตัวหมุนด้วยความเร็ว ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 โรเตอร์ชนิดขั้วแม่เหล็กเรียบ
(ที่มา George G. Karady และ Keith Holbert, 2003)

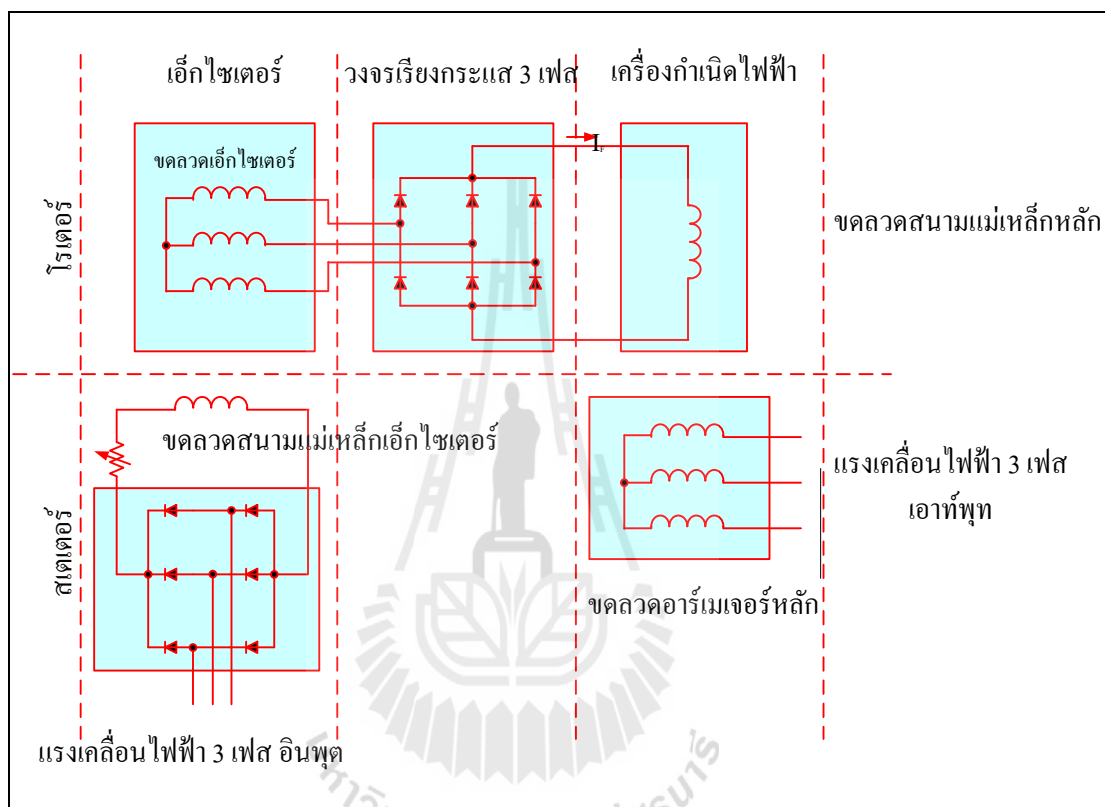
3. ขดลวดแดมเปอร์ (Damper Winding) มีลักษณะเป็นแท่งทองแดงฝังอยู่ที่บริเวณผิวด้านหน้าของขั้วแม่เหล็กหมุน ถูกต่อลัดวงจรเข้าด้วยวงแหวนทองแดงทั้ง 2 ด้านของโรเตอร์ ขดลวดแดมเปอร์นี้จะช่วยป้องกันการสั่นหรือการแกว่งเมื่อความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขึ้น ๆ ลง ๆ ไม่สม่ำเสมอ ดังรูปที่ 2.9



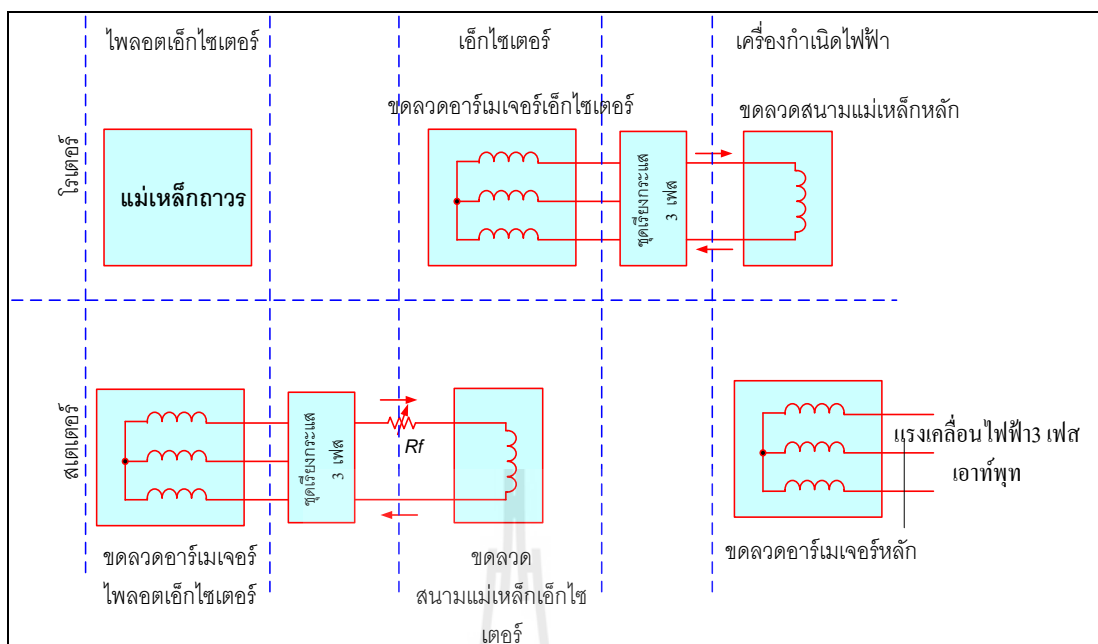
รูปที่ 2.9 ขดลวดแดมเปอร์

4. เอ็กไซเตอร์ (Exciter) ทำหน้าที่ผลิตและจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับขดลวดสนามแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งติดตั้งอยู่ที่เพลาคู่เดียวกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับขนาดใหญ่ มักจะใช้เอ็กไซเตอร์แบบไร้แปรงถ่าน (Brushless generator) ทำให้การบำรุงรักษาน้อยกว่าแบบที่ใช้สลิปริงและแปรง

ถ่านระบบการกระตุ้นขดลวดสนามแม่เหล็กที่สมบูรณ์ไม่จำเป็นต้องใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าจากภายนอกมากระตุ้น แต่จะใช้ไฟลอคอิเล็กทรอนิกส์ติดตั้งไว้ที่เพลลาของโรเตอร์ซึ่งเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ขนาดเล็กที่มีขั้วแม่เหล็กหมุนเป็นแบบแม่เหล็กถาวร (Permanent magnet) ดังรูปที่ 2.10



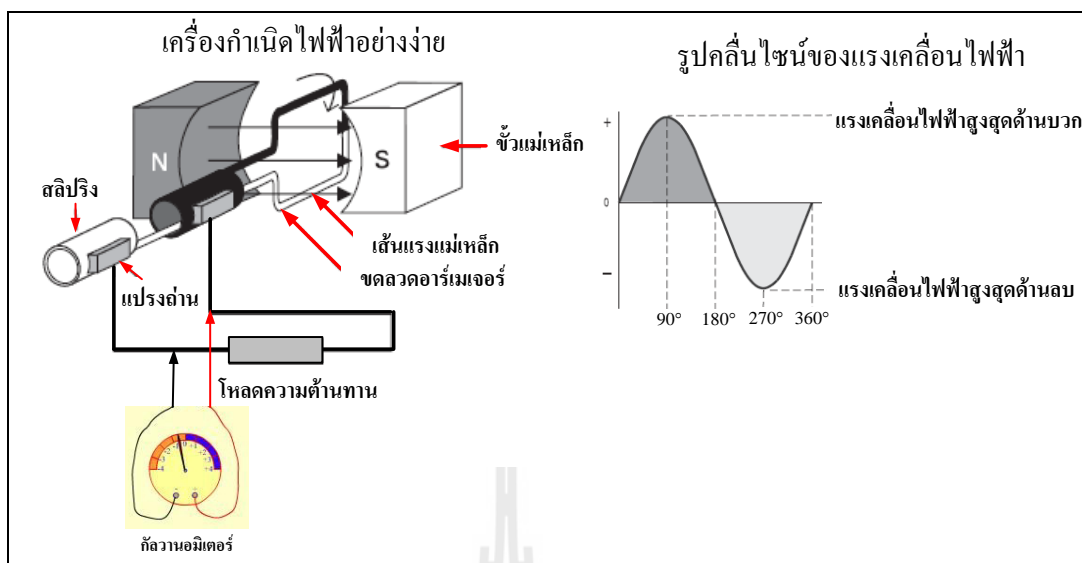
รูปที่ 2.10 เอ็กไซเตอร์แบบไร้แปรงถ่าน
(ที่มา Stephen J. Chapman, 1991)



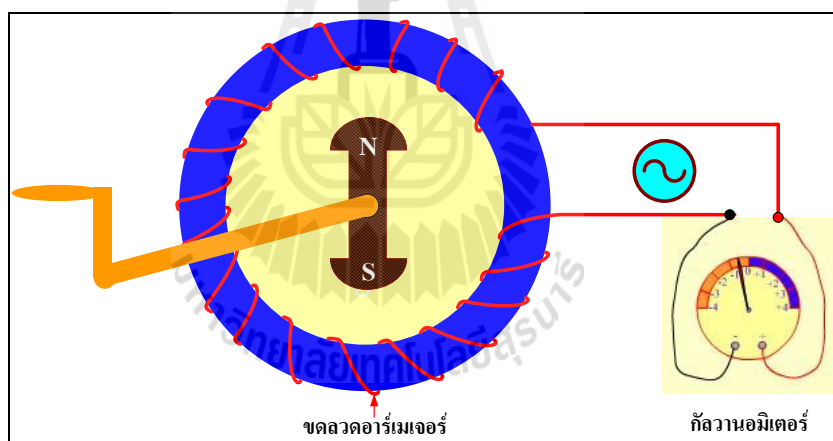
รูปที่ 2.11 เอ็กไซเตอร์แบบไร้แปรงถ่านและมีไฟลอคเอ็กไซเตอร์

(ที่มา Stephen J. Chapman, 1991)

2.5.1.2 การเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวด แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นในขดลวดเหนี่ยวนำเมื่อให้ตัวนำหมุนตัดสนามแม่เหล็ก (ขั้วแม่เหล็กอยู่กับที่) หรือให้สนามแม่เหล็กหมุนตัวขดลวดเหนี่ยวนำ (ตัวนำอยู่กับที่) เมื่อขดลวดหมุนตัดสนามแม่เหล็ก ดังรูปที่ 2.12 หรือสนามแม่เหล็กหมุนตัดกับตัวนำ ดังรูปที่ 2.13 จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้น สังเกตเห็นได้ว่าเข็มของกัลวานอมิเตอร์จะเบี่ยงเบนไป ทำให้ทราบว่ามีการเสไฟฟ้าไหลในวงจร

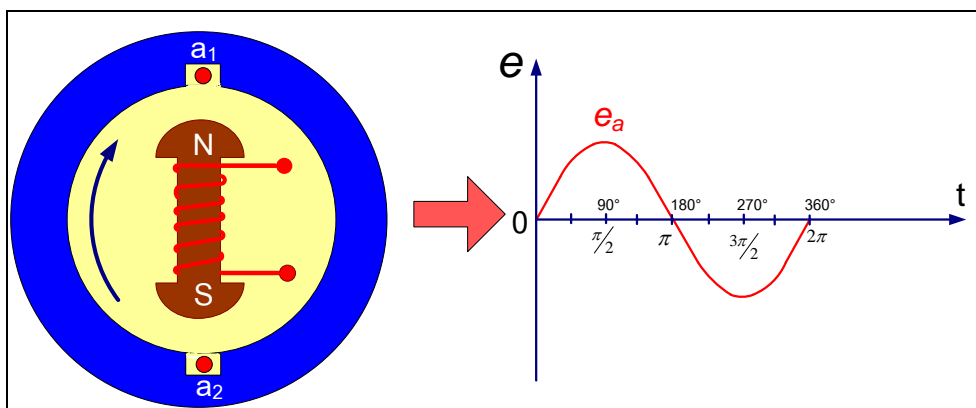


รูปที่ 2.12 การเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากตัวนำหมุนตัดสนามแม่เหล็ก

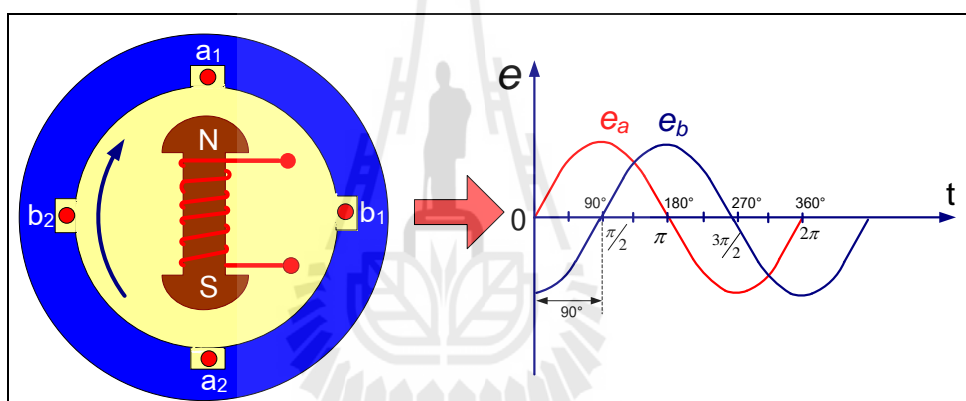


รูปที่ 2.13 การเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กหมุนตัดตัวนำ

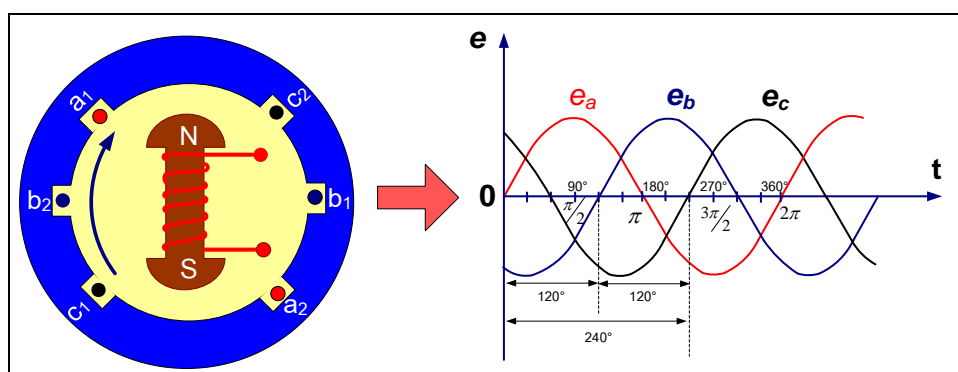
2.5.1.3 การเกิดรูปคลื่นไซน์ (Sine Wave) ถ้าจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับขดลวดสนามแม่เหล็ก (ขั้ว N และขั้ว S) และขับเคลื่อนให้หมุนตัดผ่านกับขดลวดอาร์เมเจอร์จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในลักษณะรูปคลื่นไซน์ขึ้น ซึ่งสามารถแบ่งตามชนิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.14, รูปที่ 2.15 และรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.14 การเกิดรูปคลื่นไซน์ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส

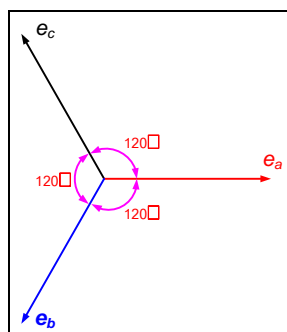


รูปที่ 2.15 การเกิดรูปคลื่นไซน์ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ 2 เฟส



รูปที่ 2.16 การเกิดรูปคลื่นไซน์ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส

สามารถเขียนเป็นเวกเตอร์ไคอะแกรมของแรงเคลื่อนไฟฟ้า 3 เฟส ได้ดังนี้



รูปที่ 2.17 เวกเตอร์ไคอะแกรมของแรงเคลื่อนไฟฟ้า 3 เฟส

เมื่อพิจารณาเวกเตอร์ไคอะแกรมตามเข็มนาฬิกา

$$e_a = E_m \sin \omega t \quad (2.11)$$

$$e_b = E_m \sin(\omega t - 120^\circ) \quad (2.12)$$

$$e_c = E_m \sin(\omega t - 240^\circ) \quad (2.13)$$

เมื่อพิจารณาเวกเตอร์ไคอะแกรมทวนเข็มนาฬิกา

$$e_a = E_m \sin \omega t \quad (2.14)$$

$$e_b = E_m \sin(\omega t + 120^\circ) \quad (2.15)$$

$$e_c = E_m \sin(\omega t + 240^\circ) \quad (2.16)$$

ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (e) ที่เกิดขึ้นในค้วนำจะเพิ่มขึ้นตามความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (B) ความยาวของขดลวดเหนี่ยวนำ (l) ความเร็วรอบของการหมุนตัด (v) จะได้สมการแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำดังนี้

$$e = Blv \quad \text{มีหน่วยเป็น (Volt)} \quad (2.17)$$

2.5.1.4 ความเร็วรอบและความถี่ ถ้าขดลวดหมุนตัดสนามแม่เหล็ก 1 คู่ขั้วแม่เหล็ก
ได้ 1 รอบ จะทำให้เกิดคลื่นไซน์ 1 ไซเคิล เป็นมุม 360 องศา หรือ 2π เรเดียน นั่นคือ
องศาทางไฟฟ้า = องศาทางกล x จำนวนคู่ของขั้วแม่เหล็ก

$$\theta_e = \theta_m \frac{P}{2} \quad (2.18)$$

เมื่อ θ_e = องศาไฟฟ้าของรูปคลื่นไซน์
 θ_m = องศาทางกลที่ขดลวดตัวนำหมุนตัดขั้วแม่เหล็กครบ 1 รอบ
 $\frac{P}{2}$ = จำนวนคู่ของขั้วแม่เหล็ก

ถ้ากำหนดให้ความเร็วรอบการหมุน (n) คงที่

จำนวนรูปคลื่นไซน์ $\propto \frac{P}{2}$

$$\text{ความถี่ (f)} \propto \frac{P}{2} \quad (2.19)$$

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

$$f \propto n \quad (2.20)$$

จากสมการที่ (2.19) และสมการที่ (2.20) จะได้

$$f = n \frac{P}{2} \quad (2.21)$$

เมื่อ f = ความถี่ (Hz)
 P = จำนวนขั้วแม่เหล็ก
 n = ความเร็วรอบการหมุนตัด (รอบต่อวินาที)

จากสมการ (1.4) จะได้

$$N = \frac{120f}{P} \quad (2.22)$$

$$f = \frac{NP}{120} \quad (2.23)$$

N ในที่นี้ คือ ความเร็วรอบของสนามแม่เหล็กหมุน (Synchronous speed) เป็นความเร็วรอบของต้นกำลังที่ใช้ขับเคลื่อนกำเนิดไฟฟ้าให้หมุน เพื่อผลิตไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้ได้ความถี่ตามต้องการ

2.5.2 แบ่งตามจำนวนเฟสของระบบไฟฟ้า

2.5.2.1 เครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าชนิด 1 เฟส (Single Phase Generator) ให้แรงดันไฟฟ้าระบบ 1 เฟส 2 สาย (L, N) 220 โวลต์ 50 เฮิร์ตซ์ ส่วนใหญ่จะเป็นเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าขนาดเล็กให้กำลังไม่เกิน 5 KVA หรือ 5 kW ใช้เครื่องยนต์ขนาดเล็กเป็นตัวต้นกำลัง ส่งกำลังโดยการต่อเพลเข้าโดยตรงหรือใช้สายพานส่งกำลัง ส่วนใหญ่จะนำไปใช้งานผลิตไฟฟ้าชั่วคราว ใช้เป็นไฟฉุกเฉินหรืองานเฉพาะกิจที่ไม่สามารถใช้ไฟฟ้าของการไฟฟ้าได้



รูปที่ 2.18 เครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า 1 เฟส (ที่มาจาก Changleuk)

2.5.2.2 เครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าชนิด 3 เฟส (Three Phase Generator) ให้แรงดันไฟฟ้าระบบ 3 เฟส 220/380 โวลต์ 50 เฮิร์ตซ์ มีขนาดตั้งแต่ 5 KVA ขึ้นไป ที่ขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดนี้มีขดลวด 3 ชุด แต่ละชุดวางมุมห่างกัน 120 องศาทางไฟฟ้า



รูปที่ 2.19 เครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า 3 เฟส

2.5.3 แบ่งตามลักษณะของขดลวดสนามแม่เหล็กที่กระทำกับขดลวดสเตเตอร์

2.5.3.1 เครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าชนิดขดลวดสนามแม่เหล็กอยู่กับที่มีขดลวดสนามแม่เหล็กติดอยู่กับที่ที่โครงสร้างสเตเตอร์ เพื่อสร้างเส้นแรงแม่เหล็กให้วิ่งจากขั้วเหนือ (N) ไปยังขั้วใต้ (S) ส่วนขดลวดอาร์เมเจอร์ที่เป็นตัวหมุนจะเป็นตัวจ่ายไฟออกไปใช้งานผ่านทาง สลิตปริง และแปรงถ่าน ส่วนมากจะเป็นเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าขนาดเล็ก

2.5.3.2 เครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าชนิดขดลวดสนามแม่เหล็กหมุนมีขดลวดสนามแม่เหล็กที่สร้างขั้วเหนือและใต้ เป็นตัวหมุน ส่วนขดลวดอาร์เมเจอร์ที่ผลิตไฟฟ้าออกไปใช้งานจะพันอยู่บนแกนเหล็กของโครงสร้างสเตเตอร์ โดยไม่ต้องมีแปรงถ่านและสลิตปริงสามารถรับพิกัดกระแสได้มากกว่าแบบแรก ส่วนมากจะเป็นเครื่องกำเนิด ขนาดกลาง และขนาดใหญ่

2.5.4 แบ่งตามลักษณะการติดตั้ง

2.5.4.1 เครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าชนิดเพลาอนหรือแนวราบ ที่เพลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดนี้จะติดตั้งหรือวางในแนวราบ มีการต่อเพลาโดยตรงเข้ากับตัวต้นกำลังที่เป็นเครื่องยนต์หรือเครื่องกังหันแบบต่าง ๆ มีทั้งขนาดเล็ก ขนาดกลาง และขนาดใหญ่ เป็นที่นิยมใช้งานกันทั่วไป

2.5.4.2 เครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าชนิดเพลาตั้ง การติดตั้งจะวางเพลาโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอยู่ในแนวตั้งขึ้น เช่น เครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าที่ใช้กับเขื่อนต่าง ๆ โดยมีกังหันน้ำต่อเพลากับโรเตอร์ของเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าในแนวตั้งความเร็วรอบในการหมุนต่ำ

2.5.5 แบ่งตามพิกัดกำลังใช้งาน

2.5.5.1 เครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าขนาดเล็ก ส่วนมากจะเป็นเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าชนิด 1 เฟส ให้แรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์ มีขนาดไม่เกิน 5 KVA มีจำหน่ายตามท้องตลาดทั่วไป ใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าชั่วคราว ใช้เป็นไฟฟ้าฉุกเฉินและใช้กับงานเฉพาะกิจ

2.5.5.2 เครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าขนาดกลางเป็นเครื่องกำเนิดที่จ่ายไฟฟ้า 3 เฟส ให้แรงดันไฟฟ้า 220/380 โวลต์ มีขนาดตั้งแต่ 5 KVA ถึง 500 KVA ใช้เป็นเครื่องสำรองไฟฟ้าให้กับโรงพยาบาล โรงแรม ศูนย์การค้า ธนาคาร และโรงงานอุตสาหกรรม ในกรณีที่ระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าไม่สามารถจ่ายไฟฟ้าได้ อาจจะทำให้เครื่องกำเนิดเริ่มเดินด้วยมือ (Manual) หรือให้เริ่มเดินเครื่องแบบอัตโนมัติ แบบใช้ทรานส์เฟอร์สวิตช์ (Transfer switch) ทำหน้าที่ถ่ายโอนระบบไฟฟ้าของเครื่องสำรองไฟฟ้าและระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าเข้ากับโหลด

2.5.5.3 เครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าขนาดใหญ่ มีขนาดตั้งแต่ 500 KVA เป็นต้นไป ส่วนมากจะใช้เป็นกำลังหลักในการผลิตกระแสไฟฟ้าของโรงต้นกำลัง เช่น โรงงานไฟฟ้าพลังความร้อนพลังน้ำ กังหันแก๊ส และโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้าได้ประมาณ 20 KV เข้าสู่ระบบสายส่งแรงสูงของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย หรือใช้ในการผลิตไฟฟ้าเพื่อเชื่อมต่อให้กับระบบจำหน่าย 22 KVA ของการไฟฟ้าภูมิภาคโดยตรง

2.5.6 แบ่งตามพลังกลที่ใช้ขับเคลื่อนเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า

2.5.6.1 เครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าชนิดใช้กังหันไอน้ำเป็นตัวต้นกำลัง โดยการนำเอาไอน้ำที่มีความดันสูงและอุณหภูมิสูง (Super heat) จากหม้อต้ม (Boiler) ไหลผ่านวาล์วของระบบควบคุม และเมื่อไอน้ำไหลเข้าไปในกังหันไอน้ำ (Stream Turbine) ที่มีลักษณะเป็นซี่ ๆ ทั้งชุดความดันต่ำและชุดความดันสูง ความดันของไอน้ำจะลดลงและเกิดการขยายตัวทำให้ปริมาตรของไอน้ำเพิ่มขึ้น มีผลทำให้ความเร็วในการไหลของไอน้ำสูงขึ้นและเมื่อไปปะทะกับใบพัดจำนวนหลายชุดที่ติดอยู่ที่เพลาก็จะทำให้เพลากลับไปหมุนทำให้เกิดกำลังกลและไปหมุนเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า

2.5.6.2 เครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าชนิดใช้กังหันน้ำเป็นตัวต้นกำลัง กังหันชนิดนี้จะมีใช้งานกับเขื่อนต่าง ๆ เช่น เขื่อนภูมิพล เขื่อนสิริกิติ์ เขื่อนวชิราลงกรณ เขื่อนอุบลรัตน์ เป็นต้น มีทั้งแบบคาปลา (Kaplan), ฟรานซิส (Francis), เทอบูลาร์ (Tubular), เตอร์โก (Turgo) และเพลตอน

(Pelton) การทำงานอาศัยพลังงานจลน์ของแรงดันน้ำที่เกิดจากความต่างระดับของน้ำเหนือเขื่อนและท้ายเขื่อน นิดไปที่ใบพัดของกังหันน้ำทำให้เกิดการหมุนในแนวแกน เพื่อขับเคลื่อนเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งให้ความเร็วรอบของการหมุนต่ำ

2.5.6.3 เครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าชนิดใช้กังหันก๊าซเป็นตัวต้นกำลัง การทำงานของเครื่องกังหันก๊าซโดยมีเครื่องอัดอากาศ (Compressor) ต่ออยู่บนเพลาคู่เดียวกับชุดกังหันและต่อตรงไปยังเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า เมื่อเดินเครื่องอากาศจะถูกดูดจากภายนอกเข้าหาเครื่องอัดอากาศทางด้านล่างถูกอัดจนมีความดันและอุณหภูมิสูงประมาณ 8 - 10 เท่า แล้วถูกส่งไปยังห้องเผาไหม้ ซึ่งใช้เชื้อเพลิงเป็นก๊าซธรรมชาติ (หรือน้ำมันดีเซล) จะถูกเผาไหม้และให้ความร้อนแก่อากาศ ก๊าซร้อนที่ออกจากห้องเผาไหม้จะถูกส่งไปยังกังหัน ทำให้กังหันหมุนเกิดกำลังไปขับเครื่องอัดอากาศและขณะเดียวกันก็ขับเคลื่อนเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าด้วย ความดันก๊าซเมื่อผ่านตัวกังหันความดันจะลดลงและผ่านออกมาที่บรรยากาศภายนอก

2.5.6.4 เครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าชนิดกังหันลมเป็นตัวต้นกำลัง กังหันลมที่ใช้ผลิตไฟฟ้าเป็นพลังงานทดแทนรูปแบบหนึ่ง ซึ่งลมเป็นแหล่งพลังงานสะอาด สามารถใช้ได้โดยไม่มีความหมดหลักการทำงานเมื่อมีลมพัดมาปะทะกับใบพัดของกังหันลม กังหันลมจะทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานลมที่มีอยู่ในรูปของพลังงานจลน์ไปเป็นพลังงานกล โดยการหมุนของใบพัด แรงจากการหมุนใบพัดนี้จะถูกส่งผ่านแกนหมุนทำให้เพลาคู่ที่ติดอยู่กับแกนหมุนของเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าหมุน ซึ่งกังหันลมที่ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้ามี 2 แบบ คือ แบบแกนเพลานอนและแบบแกนเพลาดิ่ง

2.5.7 แบ่งตามลักษณะการนำไปใช้งาน

2.5.7.1 เครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าชนิดสำรอง (Standby generator type) เครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าชนิดนี้จะใช้เป็นกำลังสำรองเมื่อไฟฟ้าหลักดับไปเป็นเวลานานซึ่งมีไว้สำหรับใช้เมื่อมีความจำเป็นหรือกรณีฉุกเฉิน เครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าชนิดนี้จะไม่สามารถจ่ายโหลดให้เกินกำลังได้ชั่ว โมงการทำงานจะต้องไม่เกินพิกัดของตัวเครื่อง เช่น กำหนดไว้ไม่เกิน 150 หรือ 250 กิโลวัตต์/ชั่วโมง และการเดินเครื่องแต่ละครั้งจะต้องอยู่ในข้อกำหนด เช่น ในรอบเดินเครื่อง 12 ชั่วโมงต้องหยุดเครื่อง 1 ชั่วโมง เป็นต้น

2.5.7.2 เครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าชนิดสำรองต่อเนื่อง (Continuous generator type) ใช้เป็นกำลังไฟฟ้าสำรองแต่สามารถใช้งานได้อย่างต่อเนื่องเมื่อไฟฟ้าหลักดับ เครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าชนิดนี้จะมีขีดความสามารถสูงกว่าแบบแรกและราคาจะแพงกว่าและราคาจะสูงกว่า เนื่องจากการออกแบบจะต้องเลือกเครื่องยนต์ที่มีกำลังที่มากพอและสามารถรับโหลดเกินกำลังได้ 10 เปอร์เซ็นต์ตามมาตรฐาน IEC

2.5.7.3 เครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าชนิดจ่ายกำลังหลัก (Base load generator) เป็นเครื่องที่ใช้จ่ายกำลังไฟฟ้าหลัก สามารถใช้งานได้ต่อเนื่องโดยไม่จำกัดชั่วโมงการทำงาน พิกัดของเครื่องยนต์จะต้องรองรับโหลดได้ 70 เปอร์เซ็นต์ ของเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าชนิดสำรองและ 60 เปอร์เซ็นต์ ของเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าชนิดสำรองต่อเนื่อง เครื่องชนิดนี้มักจะใช้ในเกาะหรือสถานที่ใช้ไฟฟ้าชั่วคราว เช่น แท่นเจาะน้ำมัน แคมป์ก่อสร้าง เป็นต้น

2.5.8 แบ่งตามลักษณะการออกแบบ

2.5.8.1 เครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าชนิดเปลือยติดตั้งอยู่กับที่ (Bare generator) เป็นชนิดที่นิยมใช้งานกันโดยทั่วไป เครื่องยนต์ที่เป็นต้นกำลังและเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าจะเป็นชนิดเปลือย มีชุดควบคุมติดตั้งอยู่ด้านท้ายของเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า มีขนาดใหญ่และน้ำหนักมากจึงไม่นิยมเคลื่อนย้าย

2.5.8.2 เครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าชนิดตู้ครอบเก็บเสียง (Canopied and sound proof) เป็นชนิดที่ต้องการย้ายพื้นที่การใช้งานบ่อย ๆ หรือต้องการเก็บเสียงหรือพื้นที่ที่ไม่มีห้องสำหรับติดตั้งเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า ส่วนประกอบที่สำคัญทั้งหมดจะถูกออกแบบให้อยู่ในตู้ครอบ เช่น ถังน้ำมัน ชุดควบคุมสตาร์ทอัตโนมัติ และสวิตช์ถ่ายโอนกระแสไฟฟ้า

2.5.8.3 เครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าชนิดเคลื่อนย้าย (Mobile generator trailer) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดนี้ใช้ในสถานที่ชั่วคราว เช่น งานพิธีการต่าง ๆ งานเฉพาะกิจภาคสนาม เป็นต้น สามารถเคลื่อนย้ายนำไปใช้ในสถานที่ต่าง ๆ ได้ มีทั้งชนิดลากจูง (Trailer) และแบบบรรทุกบนรถยนต์

2.6 หลักการทำงานของระบบควบคุมความเร็วรอบของเครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพ

เครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพที่นำมาใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า จะมีระบบควบคุมความเร็วรอบของเครื่องยนต์เนื่องจากเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้ากระแสสลับจะทำงานด้วยความเร็วรอบคงที่ เพื่อป้องกันไม่ให้ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ต้นกำลังต่ำหรือสูงเกินกว่าการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังนั้นเครื่องยนต์ต้นกำลังจะต้องมีระบบควบคุมความเร็วรอบของเครื่องยนต์ให้ทำงานโดยอัตโนมัติ

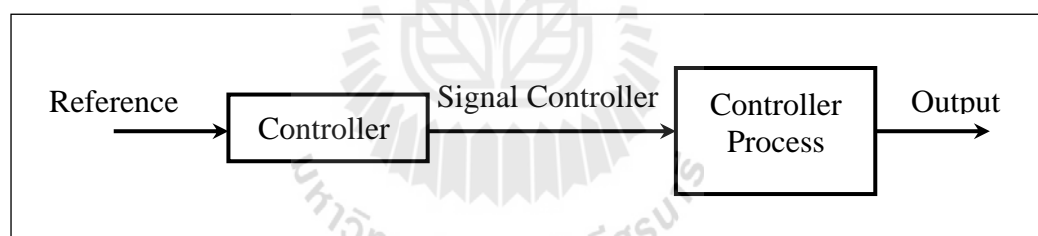
ระบบควบคุมอัตโนมัติ (Automatic controller) บางครั้งจะเรียกว่าการควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback controller) ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมการทำงานของระบบพลศาสตร์ที่ควบคุม โดยระบบควบคุมแบบอัตโนมัตินี้จะทำการเปรียบเทียบสัญญาณที่วัดค่าตัวแปรสถานะหรือ State variables จริงจากระบบด้วยตัวตรวจรู้ (Sensor) แล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ต้องการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นและสร้างสัญญาณควบคุมซึ่งสามารถลดการเปลี่ยนแปลงนี้ลงไปได้ให้มี

ค่าเป็นศูนย์หรือเป็นค่าตัวเลขที่มีขนาดเล็ก การกระทำของระบบควบคุมอัตโนมัติที่สร้างสัญญาณควบคุม (Control signal) นี้เรียกว่า กิริยาควบคุม (Control action)

2.6.1 ระบบควบคุมแบบวงเปิดหรือระบบควบคุมแบบไม่ป้อนกลับ

(Open – loop control systems, Nonfeedback control systems)

ระบบควบคุมพื้นฐานที่กล่าวถึงในหัวข้อนี้จะเป็นระบบควบคุมแบบวงเปิด ในระบบควบคุมแบบวงเปิดนี้การควบคุมส่วนใหญ่ต้องอาศัยการคาดคะเนและการตัดสินใจของมนุษย์ ตัวอย่าง เช่น การควบคุมอุณหภูมิภายในห้องโดยเตาผิง ถ้าเตาผิงที่ใช้มีเพียงอุปกรณ์ตั้งเวลาเปิด – ปิดเท่านั้น ผู้ใช้หรือผู้ควบคุมจะต้องคาดคะเนและตั้งเวลาในการเปิดเตาผิงที่นานพอเหมาะเพื่อให้อุณหภูมิห้องอยู่ในระดับที่ต้องการ แต่การควบคุมโดยมนุษย์เช่นนี้จะไม่แม่นยำและน่าเชื่อถือนัก เนื่องจากผู้ควบคุมไม่สามารถรู้ถึงคุณสมบัติเฉพาะในการสร้างความร้อนของเตาผิงนี้ อีกทั้งยังมีปัจจัยต่าง ๆ จากภายนอก เช่น อุณหภูมิภายนอกห้องที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในห้อง จะเห็นได้ว่าระบบควบคุมแบบวงเปิดนี้ไม่สามารถปรับตัวตามการเปลี่ยนแปลงของระบบอันเนื่องมาจากปัจจัยจากภายนอกได้



รูปที่ 2.20 ระบบควบคุมแบบวงเปิด

รูปที่ 2.20 แสดงแผนผังของระบบควบคุมแบบวงเปิด โดยสัญญาณอินพุตหรือสัญญาณสั่งการหรือสัญญาณอ้างอิงส่งผ่าน Controller ออกมาเป็นสัญญาณกระตุ้นหรือสัญญาณควบคุมเพื่อส่งให้ Controlled Process ขับเอาที่พุดที่ต้องการออกมา

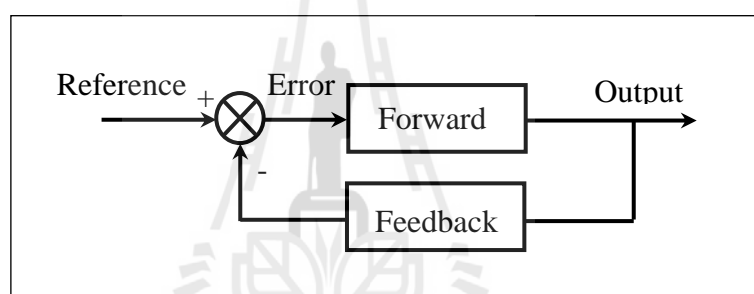
2.6.2 ระบบควบคุมแบบวงปิดหรือระบบควบคุมแบบป้อนกลับ

(Closed – loop control systems, Feedback control systems)

จากหัวข้อที่แล้วจะเห็นว่าเมื่อปัจจัยภายนอกมามีอิทธิพลต่อระบบจะทำให้ผู้ควบคุมไม่สามารถควบคุมเอาที่พุดให้เป็นไปตามต้องการได้ ในหัวข้อนี้ได้แก้ไขโดยการส่ง

สัญญาณเอาต์พุต $c(t)$ ป้อนกลับมาเปรียบเทียบกับสัญญาณสั่งการหรือสัญญาณอ้างอิงจะทำให้ได้ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างสัญญาณเอาต์พุตกับสัญญาณอ้างอิงทางด้านอินพุตเพื่อนำไปสร้างสัญญาณกระตุ้นและส่งต่อไปแก้ไขค่าความคลาดเคลื่อน (Error) ของเอาต์พุตให้น้อยลง ระบบที่กล่าวมานี้เรียกว่าระบบควบคุมแบบป้อนกลับ กิจกรรมส่วนใหญ่ที่มนุษย์ปฏิบัติในชีวิตประจำวันนั้นเป็นตัวอย่างหนึ่งของระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่ซับซ้อน

ส่วนประกอบพื้นฐานของระบบควบคุมแบบป้อนกลับ จากหลักการพื้นฐานของระบบควบคุมแบบป้อนกลับสามารถกล่าวได้ว่า ระบบควบคุมแบบป้อนกลับประกอบด้วยเส้นทางหรือวงรอบของสัญญาณป้อนกลับซึ่งเป็นสัญญาณเอาต์พุต ตั้งแต่หนึ่งวงรอบขึ้นไป แล้วนำสัญญาณป้อนกลับนี้มาเปรียบเทียบกับสัญญาณสั่งการหรือสัญญาณอ้างอิงจะได้ผลต่างระหว่างสัญญาณทั้งสองเป็น Error เพื่อนำไปควบคุมสัญญาณเอาต์พุตให้มีค่าตามที่กำหนดโดยสัญญาณอ้างอิง

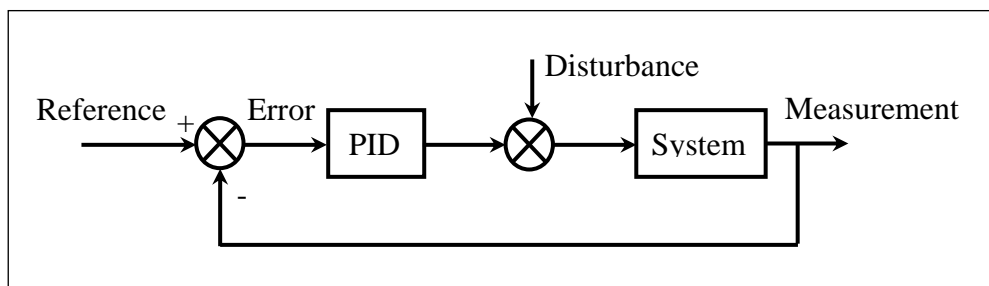


รูปที่ 2.21 ตัวควบคุมแบบป้อนกลับ

รูปที่ 2.21 แสดงแผนผังของระบบควบคุมแบบป้อนกลับ ระบบควบคุมนี้ประกอบด้วยส่วน Forward (Forward path) ส่วนป้อนกลับ (Feedback path) และส่วนตรวจจับค่าความคลาดเคลื่อน (Error - Sensing device) ส่วนตรวจจับค่าความคลาดเคลื่อนนี้จะเปรียบเทียบค่าสัญญาณอินพุตอ้างอิงกับค่าสัญญาณเอาต์พุตจริง ๆ หรือค่าที่เป็นฟังก์ชันของสัญญาณเอาต์พุต แล้วส่งสัญญาณที่เกิดจากผลต่างของสัญญาณทั้งสองนี้ออกไป

2.6.3 คุณสมบัติของตัวควบคุม

ในระบบควบคุมมีตัวควบคุมหลายชนิด ตัวควบคุมส่วนใหญ่ที่ใช้ในการควบคุมกระบวนการ เป็นแบบ PID โดยต่ออนุกรมกับระบบที่ต้องการควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 2.21 สัญญาณออกจากตัวควบคุม PID สามารถบรรยายได้ดังนี้



รูปที่ 2.22 ตัวควบคุม PID ของระบบวงปิด

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2.24)$$

โดยที่ $u(t)$ คือสัญญาณควบคุม $e(t)$ คือค่าความคลาดเคลื่อนของสัญญาณออกจากค่ากำหนด ตัวควบคุม PID ประกอบไปเทคนิคการควบคุมพื้นฐาน 3 แบบ แบบสัดส่วน (Proportional; P) แบบอินทิกรัล (Integral; I) และแบบอนุพันธ์ (Derivative; D) แต่ละแบบสามารถนำมาประกอบกัน เพื่อให้ได้ตัวควบคุมที่ต้องการ ตัวควบคุมมีพารามิเตอร์ 3 ตัว คือ ค่าอัตราขยายแบบสัดส่วน (K_p) ค่า Integral Time (T_i) และ Derivative Time (T_d) ซึ่งรายละเอียดของแต่ละแบบมีดังนี้

2.6.3.1 การควบคุมแบบสัดส่วน

การควบคุมแบบสัดส่วนเป็นเทคนิคที่ง่ายที่สุด หลักการคือสัญญาณควบคุม $u(t)$ จากตัวควบคุมที่ส่งไปปรับกระบวนการมีค่าเป็นสัดส่วนกับความคลาดเคลื่อน ซึ่งสามารถเขียนได้ในรูป

$$u(t) = K_p e(t) \quad (2.25)$$

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

2.6.3.2 การควบคุมแบบอินทิกรัล

ผลตอบของการควบคุมแบบสัดส่วนรวมกับการควบคุมแบบอินทิกรัลสามารถอธิบายได้ในสมการ

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \right) \quad (2.26)$$

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

เมื่อเปรียบเทียบกับสมการของตัวควบคุมแบบสัดส่วน ความแตกต่างอยู่ตรงที่เทอมไบแอส นั่นคือตัวควบคุมแบบสัดส่วนถูกจำกัดด้วยส่วนไบแอสเป็นค่าคงที่ ส่วนการควบคุมแบบอินทิกรัล มีการสะสมความคลาดเคลื่อนในการปรับแต่งไบแอส (นั่นคือ ทำหน้าที่เป็นตัวอินทิกรัล) และจะหยุดสะสมเมื่อความคลาดเคลื่อนของระบบเป็นศูนย์ เมื่อผลตอบเข้าที่สมบูรณ์แล้ว เทอมไบแอสของระบบจะมีค่าน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับลักษณะของการรบกวน (Disturbance) การทำงานในลักษณะเช่นนี้มีลักษณะคล้ายกับฟังก์ชันรีเซตด้วยมือ (Manual - Reset function) ดังนั้นในบางครั้งจึงเรียกตัวอินทิกรัลว่าฟังก์ชันรีเซต (Reset function)

คุณสมบัติของตัวอินทิกรัลในการกำจัดความคลาดเคลื่อน (หรือออฟเซต) เป็นข้อดีอย่างมาก จึงเป็นที่นิยมใช้กับระบบควบคุมป้อนกลับ อย่างไรก็ตาม ตัวอินทิกรัลก็มีข้อเสีย นั่นคือทำให้เกิดการล่าช้า (Capacity - Like Lag) และทำให้ช่วงเวลาของการแกว่งยาวนานขึ้น โดยทั่วไประบบแบบสัดส่วนร่วมกับอินทิกรัล จะมีช่วงเวลาของการแกว่งนานกว่าระบบเชิงสัดส่วนอย่างเดียว 50% หรือ $T_{PI} = 1.5T_p$ สำหรับระบบที่มีค่าคงตัวเวลา (Time constant) น้อย (เช่น ระบบควบคุมอัตราการไหล) ปัญหานี้จะไม่มีผลมากนัก แต่สำหรับระบบที่มีค่าคงตัวเวลามาก (เช่น ระบบควบคุมระดับ) ปัญหานี้จะมีผลมาก จนทำให้ระบบเข้าสู่จุดวิกฤติที่ไม่สามารถยอมรับได้

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

ข้อสรุปของตัวควบคุมอินทิกรัล

- ทำหน้าที่คล้ายกับรีเซ็ตด้วยมือ (Manual reset) เพื่อกำจัดความคลาดเคลื่อน
- มีปัญหาการล่าช้า ยังผลให้เกิดการหักล้างทางเวลาในตัวควบคุม จึงไม่เหมาะสมกับระบบที่มีค่าคงตัวเวลายาวนาน
- ทำให้ช่วงเวลาในการแกว่งยาวนานขึ้น

ในระบบควบคุม ค่าที่วัดได้และค่ากำหนดควรเป็นค่าเดียวกัน หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง ค่าความคลาดเคลื่อนในสถานะอยู่ตัวควรเป็นศูนย์ ถ้ามีความคลาดเคลื่อนในสถานะอยู่ตัว สัญญาณที่ออกจากอินทิเกรเตอร์ (เพิ่มขึ้น ด้วยอัตราคงที่ เมื่อสัญญาณเข้ามีค่าคงที่) ส่งต่อไปให้กับวงจรถยาย ความคลาดเคลื่อนเป็นสัญญาณเข้าของตัวควบคุมทั้งสัดส่วนและอินทิกรัล โดยสัญญาณออกจะมารวมกันที่วงจรถยายและส่งสัญญาณไปควบคุมระบบตัวควบคุมจะทำให้ค่าที่วัดได้ เพิ่มขึ้นจนเท่ากับค่ากำหนด นั่นคือทำให้ความคลาดเคลื่อนในสถานะอยู่ตัวเป็นศูนย์อย่างไรก็ตาม หาก T_i มีค่าน้อยลง ผลตอบอาจเกิดการแกว่งได้

2.6.3.3 ตัวควบคุมอนุพันธ์

ตัวควบคุมแบบสัดส่วนและแบบอินทิกรัล ต่างก็มีข้อจำกัดอยู่ที่ความคลาดเคลื่อนขนาดใหญ่ ซึ่งเป็นปัญหาต่อการควบคุมกระบวนการ แต่ความคลาดเคลื่อนขนาดใหญ่นี้สามารถรู้ได้ล่วงหน้าโดยพิจารณาจากแนวโน้มของความคลาดเคลื่อนหรืออัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณนั่นเอง ตัวอนุพันธ์มีหลักการทำงาน คือ ตัวควบคุมตอบสนองต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของความคลาดเคลื่อนถึงแม้ว่าความคลาดเคลื่อนมียังค่าเล็กน้อย สัญญาณออกของตัวอนุพันธ์ไม่ได้สัมพันธ์กับขนาดของความคลาดเคลื่อนแต่ขึ้นอยู่กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของความคลาดเคลื่อน ถ้าความคลาดเคลื่อนมีค่าคงที่ ตัวอนุพันธ์จะให้สัญญาณออกเป็นศูนย์ คุณลักษณะข้อนี้มีผลดีคือ ตัวควบคุมจะมีผลตอบสนองที่เกิดก่อนที่ความคลาดเคลื่อนจะเพิ่มมากขึ้น และทำให้ระบบมีผลตอบสนองที่เร็วขึ้น ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์สามารถเขียนได้ดังนี้

$$u(t) = K_p \left(e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2.27)$$

โดยที่ Derivative Time (T_d) เป็นเวลาที่แสดงถึงผลตอบสนองเนื่องจากตัวอนุพันธ์ การเพิ่ม T_d จะทำให้ผลตอบสนองของตัวอนุพันธ์มีค่ามากขึ้น เนื่องจากตัวอนุพันธ์มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงมาก ดังนั้นจึงนิยมใช้กับค่าที่วัดได้เท่านั้น แต่ไม่ใช้กับค่ากำหนด เพราะการเปลี่ยนค่ากำหนดมักจะเป็นแบบขั้น (Step) ทำให้ผลตอบสนองของตัวอนุพันธ์เป็นพัลส์และทำให้เกิดการกระแทก (Bump) ของอุปกรณ์ในกระบวนการ สำหรับค่ากำหนดใช้เฉพาะกับตัวควบคุมสัดส่วน

และอินทิกรัลตัวอนุพันธ์คือตัวควบคุมที่ก่อให้เกิดผลตรงข้ามกับตัวอินทิกรัล ดังนั้นจึงใช้ในการปรับปรุงกระบวนการที่มีการล่าช้าทางเวลา (Time lag) มาก ๆ ทำให้ผลตอบสนองรวดเร็วขึ้น และช่วงเวลากว้างที่สั้นลง ข้อเสียของตัวอนุพันธ์คือ มีความไวต่อสัญญาณรบกวนเป็นอย่างมาก เพราะมีผลตอบสนองโดยตรง ต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่วัดได้ ดังนั้น แม้สัญญาณรบกวนจะมีขนาดเล็ก แต่ก็อาจก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่อสัญญาณออกของตัวควบคุม จึงเป็นไปได้ที่จะใช้ตัวอนุพันธ์ในการควบคุมผลของสัญญาณรบกวน ยิ่งไปกว่านั้นระบบใดที่มีสัญญาณรบกวนมากจะไม่สามารถใช้ตัวอนุพันธ์ได้ ในวงการอุตสาหกรรมส่วนใหญ่นิยมใช้เพียงตัวควบคุม PI เท่านั้น

ข้อสรุปของตัวควบคุมอนุพันธ์

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

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าที่กำหนดทันที ความคลาดเคลื่อนจะมีค่าเปลี่ยนแปลงอย่างทันที และส่งผลต่อผลตอบสนองของระบบ ถ้านำอนุพันธ์ของความคลาดเคลื่อนนั้นคือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของความคลาดเคลื่อนแล้วไปรวมกับสัญญาณที่ได้จากตัวควบคุมแบบสัดส่วนและอินทิเกรเตอร์ จะทำให้การทำงานของระบบดีขึ้น การควบคุมเชิงอนุพันธ์ไม่มีผลต่อความคลาดเคลื่อนในสถานะอยู่ตัว แต่จะลดช่วงเวลาเข้าที่ (Settling time) โดยลดการแกว่งลง

2.7 ปรีทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ในการทำงานของระบบควบคุมเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้าที่มีก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงนั้น จะมีอยู่หลายส่วนการทำงานหากนำเข้าจากต่างประเทศจะมีราคาค่อนข้างสูง จึงไม่เหมาะสมกับการนำมาใช้กับชุมชนที่มีขนาดเล็ก ซึ่งใช้กำลังไฟฟ้าที่ประมาณ 20 กิโลวัตต์ งานวิจัยนี้จึงได้ทำการออกแบบระบบควบคุมเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้าให้มีราคาที่ถูกลง เพื่อลดการนำเข้าระบบควบคุมจากต่างประเทศ โดยได้ทำการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

จันทิมา ชั่งสิริพร และคณะ (2551) ได้ทำการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน งานวิจัยนี้ได้กำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพที่ได้จากน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากก๊าซชีวภาพที่ได้มีความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่แตกต่างกันทำให้เกิดปัญหาการกัดกร่อนเครื่องจักรที่นำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์ จึงได้ศึกษาการใช้สารลดแรงตึงผิว (Surfactant) ร่วมในการเร่งปฏิกิริยาการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์และศึกษาการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ สารออกซิแดนท์ที่ใช้ในการทดลองเป็นชนิดโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมไฮโปคลอไรต์ และใช้สารลดการตึงผิวชนิด SDS, CTAB และ Triton X-100

ปิยะพงษ์ สิงห์บัว (2554) ศึกษากระบวนการอัดก๊าซชีวภาพและดัดแปลงรถจักรยานยนต์เพื่อใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงและได้ทำการเปรียบเทียบอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเมื่อใช้น้ำมันแก๊สโซลีนและก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงในรถจักรยานยนต์ โดยทำการพัฒนาระบบอัดก๊าซชีวภาพเข้าถังขนาด 4 และ 15 กิโลกรัม ที่ความดันเกจ 15 บาร์

ประเทือง พันแก้ว (2554) ดัดแปลงเครื่องยนต์ดีเซล Kubota รุ่น ET 80 ขนาด 8 แรงม้าให้สามารถใช้ใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพ และทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ โดยหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างน้ำมันดีเซลกับก๊าซชีวภาพที่ความเร็วรอบ 1500 รอบต่อนาที พบว่าเครื่องยนต์ดัดแปลงใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพมีประสิทธิภาพสูงสุดร้อยละ 17.01 ที่อัตราส่วนผสมน้ำมันต่อก๊าซชีวภาพ 30:70 เป็นช่วงที่เหมาะสมและไม่เกิดการน็อกของเครื่องยนต์ อัตราการสิ้นเปลืองก๊าซชีวภาพอยู่ที่ $1.26 \text{ m}^3/\text{h}$ และอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันดีเซลอยู่ที่ $0.00034 \text{ m}^3/\text{h}$

ณัฐวุฒิ พลศรี และรัชพล สันติวารากร (2555) ศึกษาการเปรียบเทียบสมรรถนะของเครื่องยนต์ดีเซลดัดแปลงเมื่อใช้น้ำมันเบนซิน ก๊าซหุงต้ม และก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิง งานวิจัยนี้ได้ทำการดัดแปลงเครื่องยนต์ดีเซล Kubota รุ่น ET 95 ขนาด 9 แรงม้า จากอัตราการส่วนการอัด 21.3:1 เป็น 11:1 ติดตั้งระบบจ่ายเชื้อเพลิงและระบบจุดระเบิด โดยองศาการจุดระเบิดอยู่ที่ 5 – 10 องศา ก่อนศูนย์ตายบน จากการศึกษาพบว่ากำลังและแรงบิดที่ได้จากเครื่องยนต์เมื่อใช้น้ำมันเบนซินมีค่ามากกว่ากำลังและแรงบิดของการใช้ก๊าซหุงต้มและก๊าซชีวภาพโดยเฉลี่ยประมาณ 59.61% และ 78.01% ตามลำดับ

สุชน ตั้งทวีวัฒน์, งามอาจ ส่องสี และบุญล้อม ชีวะอิสระกุล (2555) ได้ทำการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกจากก๊าซชีวภาพ เนื่องจากในก๊าซชีวภาพที่ได้จากมูลสุกรจะมีไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ประมาณ 1000 ppm ก๊าซดังกล่าวจะกัดกร่อนโลหะเป็นอันตรายต่อเครื่องเครื่องยนต์เมื่อนำไปใช้งาน จึงได้ทำการกำจัดโดยใช้สารดูดซับที่แช่ในสารละลายเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์และโซดาไฟ โดยใช้ปูนซีเมนต์เทาผสมดินเบาหรือทรายละเอียด เมื่อนำไปใช้งานพบว่า การใช้ทรายผสมปูนซีเมนต์เทาสามารถ H_2S ได้ดีกว่าดินเบาผสมปูนและการใช้ฟอยเหล็ก สามารถลด H_2S จาก 2,400 ppm เหลือ 0 ppm

Shiao, and Moskwa (1996) งานวิจัยนี้เสนอวิธีใหม่สำหรับการควบคุมปริมาณอากาศต่อเชื้อเพลิงของแต่ละกระบอกลูกสูบ ซึ่งได้ใช้วิธีการประมาณไม่เป็นเชิงเส้นในการประมาณปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงและอากาศในห้องเผาไหม้ โดยอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงนั้นจะถูกส่งสัญญาณกลับไปยังส่วนควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ และปริมาณเชื้อเพลิงที่ทำการประมาณนั้นจะฉีดเข้าไปในแต่ละพอร์ตน้ำมันเชื้อเพลิง

Luigi Glielmo (2000) ได้นำเสนอการออกแบบโครงสร้างระบบควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ของเครื่องยนต์แบบจุดระเบิด โดยทำการแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ตัวปฏิบัติการ ชุดควบคุมเครื่องยนต์ และชุดควบคุมการสั่งการ และได้นำเสนอโครงสร้างการทำงานของระบบการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิง ระบบการจุดระเบิด และรูปแบบสัญญาณของเพลาค้อเหวี่ยงเพื่อกำหนดการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงและการจุดระเบิด

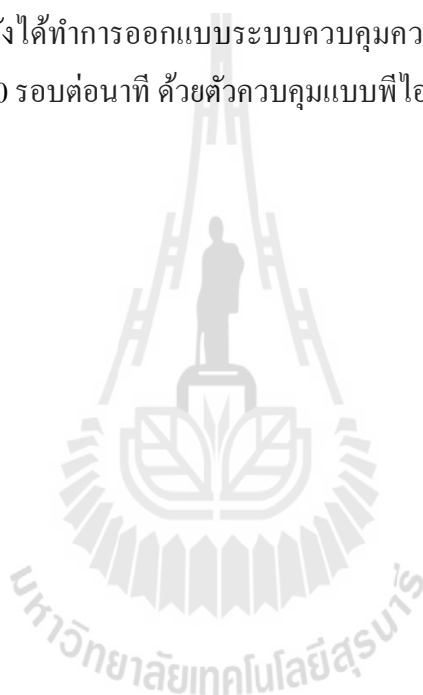
Muske, Jones, and Franceschi (2008) ได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์การปรับตัวของการควบคุมสำหรับอัตราส่วนอากาศกับน้ำมันเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ ซึ่งตัวควบคุมแบบเชิงเส้นนั้นใช้แบบ PID Control และใช้เป็นแบบควบคุมการวิเคราะห์การเพิ่มประสิทธิภาพแบบออฟไลน์โดยใช้คาถาในการกรอง และได้ทำการประมาณส่วนที่ไม่แน่นอนของระบบ

Tien, Mai, Hung and Cong (2010) ได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์การทำงานของเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้าขนาด 20 กิโลวัตต์ และใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงที่ได้จากฟาร์มสุกร ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับ งบศาลิ้นปีกผีเสื้อ การจ่ายไฟฟ้าในแต่ละเฟส อุณหภูมิของท่อไอดีและท่อไอเสีย ผลพิษของไอเสีย และองศาจุดระเบิดของเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้า พบว่าเมื่อเครื่องยนต์มีภาระกรรมมากขึ้นจะทำให้ห้องศาลิ้นปีกผีเสื้อเปิดมากขึ้นเพื่อรักษาความเร็วรอบของเครื่องยนต์ให้ได้ 1500 รอบต่อนาที เช่นเดิม นอกจากนั้นเมื่อภาระกรรมเพิ่มขึ้นยังส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิท่อไอเสียเพิ่มขึ้นด้วย แต่อุณหภูมิท่อร่วมไอดีเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เป็นต้น

Guo, Qin and Tang (2010) ได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์ผลกระทบของเครื่องยนต์สันดาปภายในที่ใช้ LPG และ Biogas ร่วมกันในแต่ละอัตราส่วนผสม ได้แก่ Biogas 100%, Biogas 95% + LPG 5% และ Biogas 85% + LPG 15% ได้ทำการศึกษาความดันในกระบอกลูกสูบ อุณหภูมิในห้องเผาไหม้ องศาจุดระเบิด และมลพิษของไอเสีย จากการศึกษาในส่วนของความดันในกระบอกลูกสูบพบว่าเชื้อเพลิงที่มีอัตราส่วน LPG 15% จะมีความดันสูงสุดที่ 53 บาร์ และอุณหภูมิในห้องเผาไหม้สูงสุดที่ 2500 องศาเซลวิน ในส่วนของมลพิษไอเสียจะมี CO สูงสุด แต่มี CO₂ น้อยที่สุด เป็นต้น

2.8 สรุป

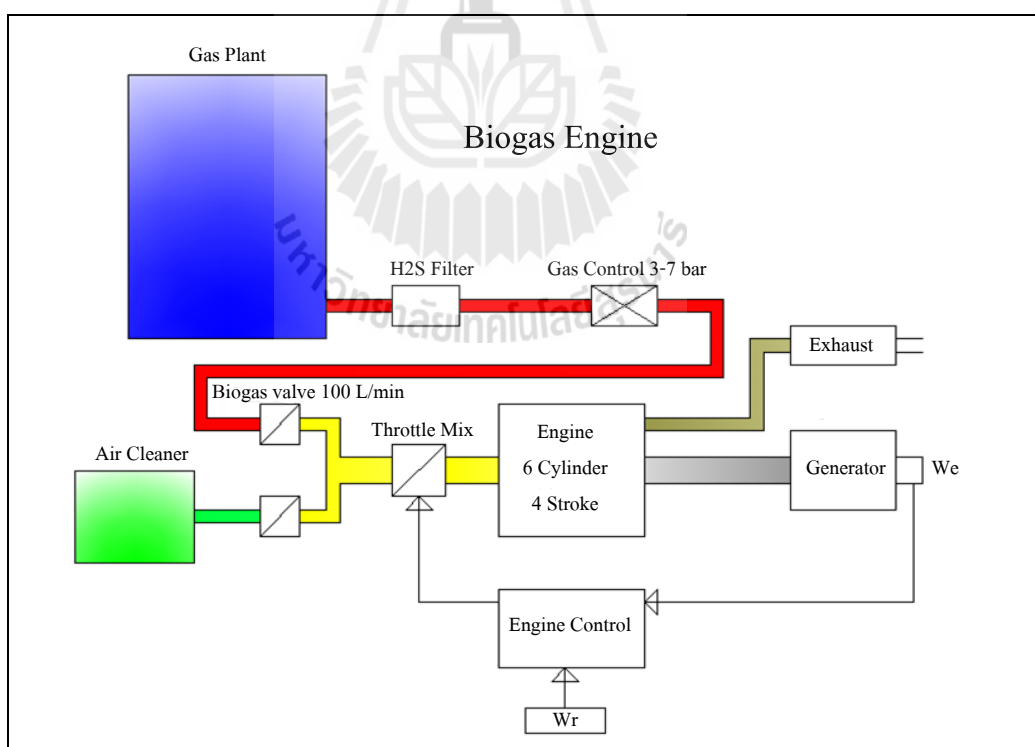
จากปรีทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องได้นำเสนอการนำก๊าซชีวภาพมาใช้งานสำหรับเครื่องยนต์สันดาปภายใน ตั้งแต่เริ่มต้นกระบวนการจนถึงที่สุดการทำงานของระบบควบคุมเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้า โดยในขั้นต้นจะเป็นการวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ จากนั้นเข้าสู่กระบวนการต่อไปคือการทำความสะอาดก๊าซชีวภาพเพื่อลดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เนื่องจากมีคุณสมบัติในการกัดกร่อนโลหะและทำให้ความความร้อนของเชื้อเพลิงลดลง ตามลำดับ และเพื่อให้ก๊าซชีวภาพมีความต่อเนื่องในการใช้งานจึงได้ออกแบบระบบควบคุมแรงดันก๊าซชีวภาพให้มีความเหมาะสมตามความต้องการของเครื่องยนต์ในทุกสภาวะการทำงาน ในงานวิจัยนี้ยังได้ทำการออกแบบระบบควบคุมความเร็วรอบเครื่องยนต์เพื่อใช้ในการผลิตไฟฟ้าที่ความเร็ว 1500 รอบต่อนาที ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ



บทที่ 3

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การออกแบบของระบบควบคุมความเร็วรอบของเครื่องยนต์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้านั้น จะใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Motor) ในการควบคุมตำแหน่งลิ้นปีกผีเสื้อ เพื่อให้ได้ความเร็วรอบและแรงบิดของเครื่องยนต์ตามต้องการ ในทางการออกแบบตัวควบคุมนั้น มีความจำเป็นที่ต้องหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ ดังนั้น การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องยนต์และมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงตามลำดับ เพื่อที่จะนำมาใช้ในการออกแบบระบบควบคุมความเร็วรอบของเครื่องยนต์ สำหรับใช้ในการวิเคราะห์และอธิบายผลการตอบสนองของเครื่องยนต์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงภาระกรรมในขณะที่เครื่องยนต์ทำงาน จากการวิเคราะห์โดยการวัดตัวแปรต่าง ๆ ที่สอดคล้องกับแบบจำลองคณิตศาสตร์

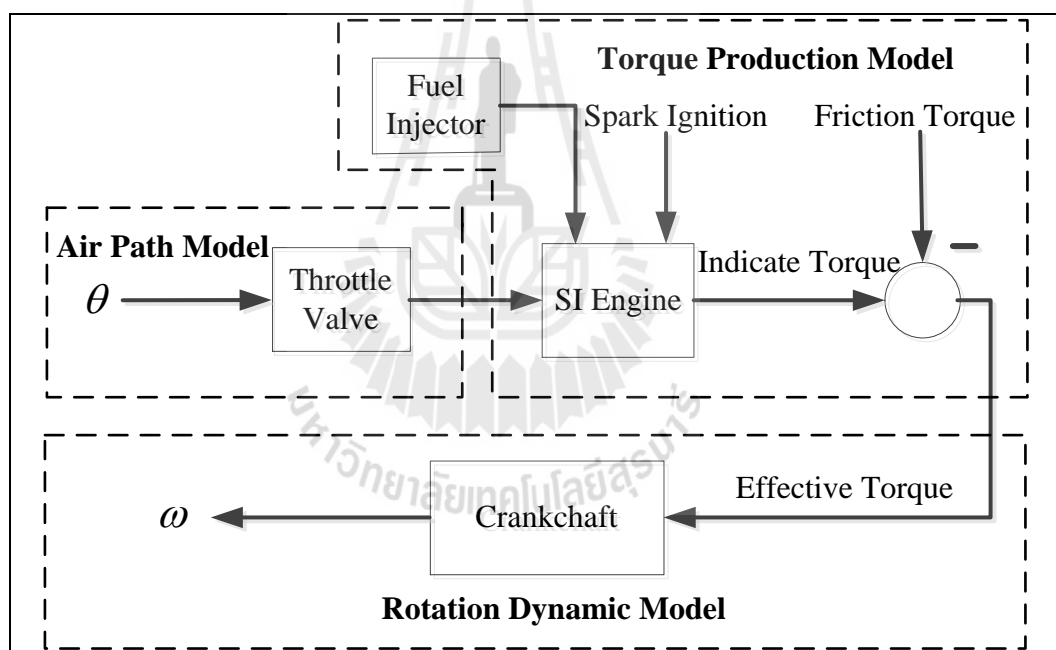


รูปที่ 3.1 โครงสร้างระบบควบคุมเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้า

การประมาณค่าพารามิเตอร์ (Parameter Estimation) เป็นเครื่องมือช่วยในการทดสอบหาค่าตัวแปรของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบได้ โดยการวัดค่าอินพุตและเอาต์พุตของระบบแล้วนำค่าข้อมูลเหล่านี้ไปวิเคราะห์หาค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่สำคัญ เพื่อใช้ในการประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบควบคุมความเร็วรอบของเครื่องยนต์ ซึ่งจะประกอบไปด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้า (เครื่องยนต์เบนซิน) และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องยนต์เบนซิน (Gasoline engine)

ในงานวิจัยนี้จะใช้เครื่องยนต์เบนซินในการผลิตไฟฟ้า จึงได้ศึกษาระบบของเครื่องยนต์เบนซินและจำลองโครงสร้างของเครื่องยนต์เบนซินดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 โครงสร้างของเครื่องยนต์เบนซิน (Gasoline engine)

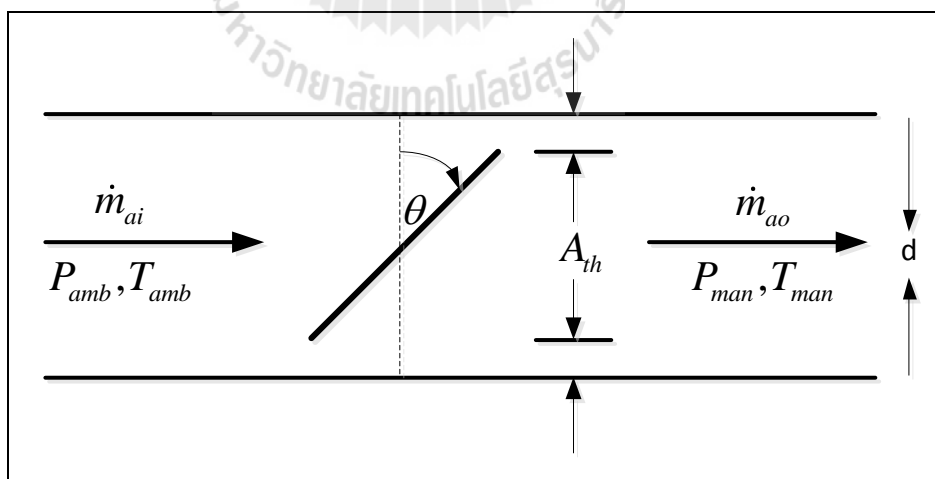
เราสามารถเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องยนต์จู่ระเบิด ได้เป็น 3 ส่วนได้ดังนี้

3.2.1 แบบจำลองสมการอัตราไหลของมวลอากาศ (Air part model)

อัตราการไหลของมวลอากาศผ่านลิ้นปีกผีเสื้อโดยปกติจะอธิบายด้วยสมการ สำหรับการไหลแบบยวบยัวผ่านคอขวด เมื่ออัตราส่วนความดันผ่านลิ้นเร่่งน้อยกว่าค่าวิกฤต $\left(\frac{P_{man}}{P_{amb}} = 0.528\right)$ อัตราการไหลจะเป็น

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

เมื่อ	C_d	=	สัมประสิทธิ์อัตราการไหล
	R	=	ค่าคงที่ของแก๊สอุดมคติ (J/mol-K)
	A_{th}	=	พื้นที่หน้าตัดของลิ้นปีกผีเสื้อที่ให้อากาศไหลผ่าน (m ²)
	P_{amb}	=	ความดันบรรยากาศ (N/m ²)
	T_{amb}	=	อุณหภูมิบรรยากาศ (K)
	P_{man}	=	ความดันภายในท่อร่วมไอดี (N/m ²)
	γ	=	อัตราส่วนของความร้อนจำเพาะ $\left[k = \frac{c_p}{c_v} \right]$



รูปที่ 3.3 ภาพพื้นที่หน้าตัดของลิ้นปีกผีเสื้อที่ให้อากาศไหลผ่าน

จากรูปที่ 3.2 สามารถประมาณพื้นที่หน้าตัดของลึนปีกผีเสื้อที่ให้อากาศไหลผ่าน (A_{th}) จากสมการดังนี้

$$A_{th} = \pi \frac{d^2}{4} - \pi \frac{d^2 \cos \theta}{4 \cos \theta_0} \quad (3.2)$$

เมื่อ d = เส้นผ่านศูนย์กลางของลึนปีกผีเสื้อ (m)
 θ = องศาของลึนปีกผีเสื้อที่เปลี่ยนไป (degree)
 θ_0 = องศาของลึนปีกผีเสื้อเริ่มต้น (degree)

เมื่ออัตราการไหลของมวลอากาศผ่านลึนปีกผีเสื้อเกิดการไหลเกิดการไซ้ก จะได้

$$\frac{P_{man}}{P_{amb}} \leq [2 / (\gamma + 1)]^{\gamma(\gamma-1)} \quad (3.5)$$

เมื่ออัตราส่วนความดันมากกว่าอัตราส่วนวิกฤตการไหลที่ลึนเร่่งก็จะเกิดการไซ้ก (สภาวะที่ของไหลมีความเร็วเท่ากับความเร็วเสียง) และจะได้อัตราการไหลของมวลอากาศเป็น

$$\dot{m}_{ai} = \frac{C_d A_{th} P_{amb}}{(RT_{amb})^{1/2}} \gamma^{1/2} \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{(\gamma+1)/2(\gamma-1)} \quad (3.6)$$

การไหลของอากาศที่เข้าและออกจากท่อไอดีอาจอธิบายโดยใช้ตัวแบบ ซึ่งมีอยู่หลายแบบ โดยแบบที่ง่ายแบบหนึ่งก็คือตัวแบบการเติมเข้าและถ่ายออก (Filling and Emptying model) ซึ่งสมมติให้ความดันในท่อไอดีที่เวลาหนึ่ง ๆ สม่าเสมอ และจากสมการความต่อเนื่องของอากาศที่ไหลเข้าและออกจากท่อไอดีจะได้เป็น

$$\frac{dm_{man}}{dt} = \dot{m}_{ai} - \sum \dot{m}_{ao} \quad (3.7)$$

เมื่อ m_{man} = มวลของอากาศในท่อไอดี (kg)
 \dot{m}_{ai} = อัตราการไหลของมวลอากาศเข้าท่อร่วมไอดี (kg/s)
 \dot{m}_{ao} = อัตราการไหลของมวลอากาศที่เข้าไปในแต่ละกระบอกสูบ (kg/s)

สมมติให้อุณหภูมิของอากาศคงตัว แล้วใช้กฎของแก๊สอุดมคติสำหรับการไหลแก๊สในท่อ ($P_{man} V_{man} = m_{man} RT_{man}$) สมการที่ (3.8) ก็จะเขียนได้เป็น

$$\frac{dP_{man}}{dt} = \frac{RT_{man}}{V_{man}} (\dot{m}_{ai} - \dot{m}_{ao}) \quad (3.8)$$

สมการข้างต้นนี้จะใช้สำหรับวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความดันในท่อไอดี

โดย P_{man} = ความดันในท่อร่วม (N/m²)
 T_{man} = อุณหภูมิในท่อร่วม (K)
 V_{man} = ปริมาตรของท่อร่วมไอดี (m³)

3.2.2 แบบจำลองสมการแรงบิดของเครื่องยนต์ (Torque production model)

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

$$\dot{m}_f = \frac{\dot{m}_{ao}}{\lambda \cdot L_{th}} \quad (3.9)$$

โดย λ = The air/fuel equivalence
 L_{th} = The stoichiometric air/fuel

และแรงบิดบ่งชี้ (T_i) ซึ่งเป็นแรงที่ได้จากการสันดาปน้ำมันเชื้อเพลิงจะได้จากสมการ

$$T_i = \frac{H_u \eta_i \dot{m}_f}{\omega} \quad (3.10)$$

โดย H_u = ค่าความร้อนของพลังงานเชื้อเพลิง (J/kg)
 η_i = ประสิทธิภาพเชิงความร้อน
 ω = ความเร็วเชิงมุม (rad/sec)

จากสมการที่ (3.8), (3.9) และ (3.10) แรงบิดบ่งชี้ของเครื่องยนต์เปลี่ยนเป็นสมการแรงบิดของเครื่องยนต์จะได้แรงบิดจากการสันดาปภายใน (T_i)

$$T_i = \frac{H_u V_d \eta_i \eta_v}{4\pi R \lambda L_{th} T_{man}} P_{man} \quad (3.11)$$

โดย V_d = ปริมาตรกระบอกสูบ (m^3)
 η_v = ประสิทธิภาพเชิงปริมาตร

เมื่อเพิ่มฟังก์ชันการจุดระเบิด ($SI(\phi)$) ซึ่งเป็นข้อมูลจากผลการทดลองจากการเปลี่ยนแปลงเวลาในการจุดระเบิดก่อนมุมของการจุดระเบิดจะถึงจุดศูนย์กลางตาย (TDC) จะได้ฟังก์ชัน $SI(\phi)$ เพิ่มเข้ามาในสมการของแรงบิดจากการสันดาปภายใน (T_i)

$$T_i = \frac{H_u V_d \eta_i \eta_v}{4\pi R \lambda T_{man}} SI(\phi) P_{man} \quad (3.12)$$

อย่างไรก็ตามถ้ามีการหมุนของเพลาข้อเหวี่ยงจะเกิดแรงเสียดทาน (T_f) เข้ามาในระบบ ดังนั้นค่าแรงบิดที่มีประสิทธิผลของเครื่องยนต์ (T_e) จะได้

$$T_e = T_i - T_f \quad (3.13)$$

โดย T_e = ค่าแรงบิดที่มีประสิทธิผล (Mean effective torque) (N-m)

เมื่อแทนสมการที่ (3.12) ในสมการที่ (3.13) จะได้

$$T_e = \frac{H_u V_d \eta_i \eta_v}{4\pi R \lambda T_{man}} SI(\phi) P_m - T_f \quad (3.14)$$

3.2.3 แบบจำลองสมการการหมุนของเครื่องยนต์ (Rotation dynamic model)

พลศาสตร์การหมุนเครื่องยนต์ได้จากกฎข้อที่ 2 ของ Newton

$$I_e \dot{\omega} = T_e - T_l - b\omega \quad (3.15)$$

โดย	T_l	=	แรงบิดภาระกรรมภายนอก (N-m)
	b	=	ค่าคงที่ความหนืดของลูกปืนเพลาคือเหวี่ยง (N-m-sec/rad)
	$\dot{\omega}$	=	ความเร่งเชิงมุมของเครื่องยนต์ (rad/sec ²)
	I_e	=	ความเฉื่อยในการหมุนของเครื่องยนต์ (kg-m ²)

ในทางปฏิบัติการควบคุมความเร็วรอบของเครื่องยนต์เบนซินจะทำการปรับตำแหน่งลิ้นปีกผีเสื้อโดยมีมนุษย์เป็นผู้ควบคุม แต่สำหรับเครื่องยนต์เบนซินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าจะทำการควบคุมตำแหน่งลิ้นปีกผีเสื้อด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เนื่องจากในการผลิตกระแสไฟฟ้านั้นจะใช้ความเร็วรอบของเครื่องยนต์คงที่

3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Motor)

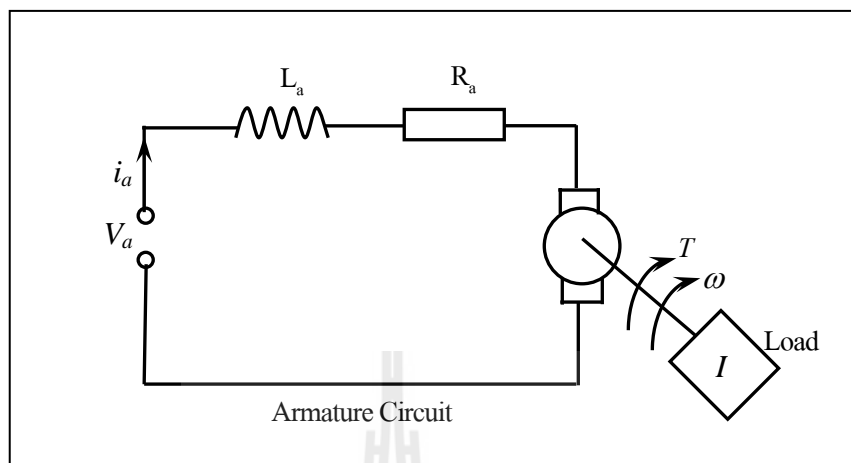
ในงานวิจัยนี้ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในการควบคุมตำแหน่งลิ้นปีกผีเสื้อของเครื่องยนต์เบนซินเพื่อรักษาความเร็วรอบเครื่องยนต์ให้ได้ 1500 รอบต่อนาที สำหรับการผลิตไฟฟ้าและควบคุมด้วยวิธี Armature Control ใช้การปรับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ให้กับวงจรรอาร์เมเจอร์ (Armature circuit) เพื่อควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ โดยให้ค่ากระแสไฟฟ้ากับมอเตอร์ที่ให้กับวงจрсสนาม (Field circuit) คงที่จึงสามารถพิจารณาเฉพาะวงจรรอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เนื่องจากกระแสที่ให้กับวงจрсสนามมีค่าคงที่ทำให้สนามแม่เหล็กของมอเตอร์มีค่าคงที่ไปด้วย การควบคุมจะทำโดยการปรับเปลี่ยนความต่างศักย์ที่ให้กับวงจรรอาร์เมเจอร์ พิจารณาสมการแรงบิดของมอเตอร์

$$I \dot{\omega} = -c \cdot \omega + K_t \cdot i_a - T_L \quad (3.16)$$

สมการวงจรไฟฟ้า

$$V_a - V_b = L_a \frac{di}{dt} + R_a \cdot i_a \quad (3.17)$$

เมื่อ $V_b = K_e \cdot \omega$



รูปที่ 3.4 แผนภาพวงจรอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

เมื่อ	I	=	โมเมนต์ความเฉื่อย ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)
	K_t	=	ค่าคงที่ของแรงบิด ($\text{N}\cdot\text{m}/\text{A}$)
	K_e	=	ค่าคงที่ของ Electromotive Force ($\text{V}\cdot\text{s}/\text{rad}$)
	T_L	=	แรงบิดที่เปลี่ยนแปลง ($\text{N}\cdot\text{m}$)
	c	=	ความหน่วง ($\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\text{rad}$)
	R_a	=	ความต้านทานของอาร์เมเจอร์ (Ω)
	L_a	=	ความเหนี่ยวนำของอาร์เมเจอร์ (H)
	i_a	=	กระแสไฟฟ้าของอาร์เมเจอร์ (A)
	ω_m	=	ความเร็วรอบ (rad/s)
	V_a	=	ความต่างศักย์ของอาร์เมเจอร์ (V)
	V_b	=	ความต่างศักย์ Back emf (V)

ในทางปฏิบัติตัวแปรของเครื่องยนต์เบนซินและมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ทำการศึกษานั้นไม่สามารถวัดค่าได้ครบทุกตัวแปร ดังนั้นหากมีความจำเป็นต้องทราบค่าของตัวแปรเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการออกแบบควบคุม จึงต้องมีการประมาณค่าของตัวแปรที่ไม่สามารถวัดได้ การที่จะสามารถประมาณค่าของตัวแปรได้นั้นต้องสามารถทราบค่าอินพุต และเอาต์พุตของระบบที่ต้องการจะประมาณค่าของตัวแปรที่ไม่ทราบค่า หลักการทำงานของ การประมาณค่าตัวแปร

จะนำความแตกต่างระหว่างเอาต์พุตที่ได้จากการทดลองและเอาต์พุตที่ได้จากแบบจำลองมาเปรียบเทียบกัน เพื่อลดค่าความผิดพลาดของระบบ ในงานวิจัยนี้ใช้การประมาณค่าของระบบด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดที่ไม่เป็นเชิงเส้น

3.3 การประมาณค่าของระบบโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดที่ไม่เป็นเชิงเส้น

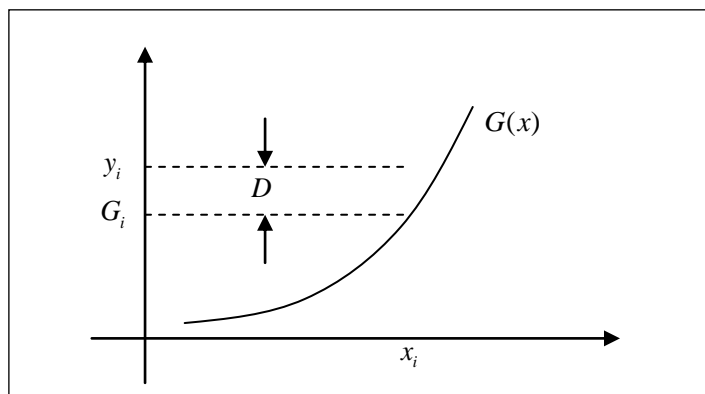
(Nonlinear least squares method)

สำหรับงานวิจัยนี้ได้มีการประยุกต์ใช้วิธีการประมาณค่าโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดไม่เป็นเชิงเส้นใน Simulink Parameter Estimation ของโปรแกรม MATLAB ซึ่งใช้ในการหาค่าตัวแปรของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบควบคุมความเร็วรอบเครื่องยนต์เบนซินในระบบปิดที่มีตัวควบคุมแบบพีไอ โดยอาศัยหลักการประมาณค่าตัวแปรที่เหมาะสมที่สุดจากการวัดและเก็บข้อมูลจากทั้งอินพุตและเอาต์พุตแล้วนำไปวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การประมาณค่าฟังก์ชันโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด จะได้ฟังก์ชันที่เป็นตัวแทนที่ดีที่สุดของข้อมูล เพราะได้จากการเฉลี่ยค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลให้เหลือน้อยที่สุด ดังนั้น เมื่อเขียนเส้นกราฟของฟังก์ชัน เส้นกราฟจะผ่านไปบริเวณจุดต่าง ๆ ของข้อมูล โดยจะตัดผ่านจุดของข้อมูลบางจุด หลักการของวิธีกำลังสองน้อยที่สุดมีดังนี้ ถ้ามีข้อมูล x, y ทั้งสิ้น n ชุด ให้ฟังก์ชันที่ประมาณค่าของข้อมูลชุดนี้เป็น $G(x)$ โดยที่ $G(x)$ อยู่ในรูป

$$G(x) = a_1g_1(x) + a_2g_2(x) + \dots + a_mg_m(x) \quad (3.18)$$

โดยที่ $m \leq n$ และ $g_1(x), g_m(x)$ เป็น ฟังก์ชันที่ขึ้นอยู่กับค่า x อาจจะอยู่ในรูปพหุนาม รูปลอการิทึม หรือเอ็กซ์โพเนนเชียล สมการ (3.18) จะสมบูรณ์ได้ก็ต่อเมื่อทราบค่า $a_1, a_2 \dots a_m$ โดยหาค่าสัมประสิทธิ์เหล่านี้ได้จากการทำให้ค่าเบี่ยงเบนของข้อมูลกับค่าประมาณที่ได้จากฟังก์ชัน $G(x)$ มีค่าน้อยที่สุด จากรูปที่ 3.5 ค่าแตกต่างของข้อมูลชุดที่ i คือ $y_i - g_i(x)$ เมื่อหาค่าแตกต่างของข้อมูลทุกชุดแล้ว นำค่าแตกต่างเหล่านี้มารวมกัน แล้วยกกำลังสองเพื่อขจัดเครื่องหมายลบจะได้



รูปที่ 3.5 แสดงการหาค่าเบี่ยงเบนของวิธีกำลังสองน้อยที่สุด

$$D = \sum_{i=1}^n [y_i - G(x_i)]^2 \quad (3.19)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ $a_1, a_2 \dots a_m$ จะเป็นตัวแปรเพราะเมื่อค่าเหล่านี้มีค่าต่าง ๆ กัน ฟังก์ชัน $G(x)$ จะเป็นฟังก์ชันที่แตกต่างกันออกไป แต่ต้องการหาค่า $a_1, a_2 \dots a_m$ เหล่านี้ที่มีเงื่อนไขทำให้เกิดค่า D ที่มีค่าน้อยที่สุดจะได้สมการออกมา m ชุด สามารถหาค่า $a_1, a_2 \dots a_m$ ได้

$$\frac{\partial D}{\partial a_1} = 0, \frac{\partial D}{\partial a_2} = 0, \dots, \frac{\partial D}{\partial a_m} = 0 \quad (3.20)$$

3.3.1 ขั้นตอนการประมาณค่าตัวแปรของระบบ

ในทางปฏิบัติตัวแปรของระบบจะไม่สามารถวัดค่าได้โดยตรง จึงต้องทำการประมาณค่าตัวแปรของระบบควบคุมความเร็วรอบของเครื่องยนต์ทั้งในส่วนของมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงและเครื่องยนต์เบนซิน โดยการระบุเอกลักษณ์ในระบบปิด และมีตัวควบคุมแบบพีไอ ซึ่งการประมาณค่าจะใช้โปรแกรม MATLAB โดยกำหนดค่าอินพุตเป็นค่าความเร็วรอบเครื่องยนต์แบบคงที่ให้กับระบบควบคุมความเร็วรอบในระบบปิด จากนั้นนำค่าอินพุตและเอาต์พุตที่ได้นี้ไปทำการประมาณค่าตัวแปรของระบบ โดยมีขั้นตอนดังนี้

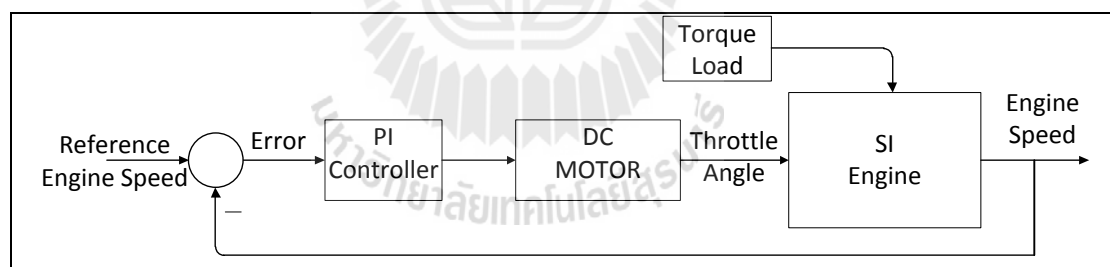
1. ใช้โปรแกรม MATLAB ในระบบควบคุมความเร็วรอบของเครื่องยนต์ เพื่อการวิเคราะห์โดยการวัด ที่ค่าความเร็วรอบคงที่ 1500 รอบต่อนาที โดยจะมีการปรับตัวแปรควบคุมพีไอ ที่แตกต่างกัน 2 ค่า เพื่อให้การตอบสนองความเร็วรอบที่ต่างกัน

2. ใช้โปรแกรม MATLAB ในการระบบควบคุมความเร็วรอบเก็บค่าการตอบสนองของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและเครื่องยนต์เบนซินในรูปแบบไฟล์ Excel

3. ระบบที่พิจารณามีตัวแปรทั้งหมด 12 ตัวแปรคือ $K_p, K_i, I, L_a, R, k_b, k_t, c, f, I_e, V_m, b$ แต่สำหรับการระบุเอกลักษณ์จะทำการประมาณค่าใหม่ 10 ตัวแปร กำหนดให้อีก 2 ตัวแปรเป็นค่าคงที่ โดย K_p คือ ตัวแปรควบคุมแบบพี และ K_i คือ ตัวควบคุมแบบไอ ซึ่งทั้งสองค่าเป็นค่าคงที่ที่กำหนดในการทดลอง แสดงดังรูปที่ 3.4

4. สร้างแบบจำลองระบบควบคุมความเร็วรอบของเครื่องยนต์ในระบบควบคุมแบบปิดและมีตัวควบคุมแบบพีไอ พร้อมทั้งอินพุตและเอาต์พุตใน โปรแกรม MATLAB ในส่วนของ Simulink

5. การประมาณค่าตัวแปรของระบบโดยใช้เครื่องมือของ โปรแกรม MATLAB ในส่วนของ Parameter Estimation ซึ่งข้อมูลจากไฟล์ Excel ที่เป็นค่าการตอบสนองของตำแหน่งลื่น ปีกผีเสื้อและความเร็วรอบของเครื่องยนต์ที่ได้จากการทดลองจะถูกรับเข้ามาเป็นข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตใน โปรแกรม MATLAB เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับเอาต์พุตของแบบจำลอง ในขั้นตอนการประมาณค่าตัวแปรของระบบ สำหรับวิธีการใช้งาน Parameter Estimation ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก.



รูปที่ 3.6 แผนภาพแบบจำลองระบบควบคุมความเร็วรอบเครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพใน Simulink

ในการระบุเอกลักษณ์ค่าตัวแปรต่าง ๆ นั้นเพื่อที่จะให้ค่าที่ได้จากที่ใกล้เคียงกับระบบควบคุมความเร็วรอบของเครื่องยนต์เบนซินนั้นจะต้องมีการกำหนดขอบเขตความเป็นไปได้ของตัวแปรต่าง ๆ ซึ่งขอบเขตเหล่านั้นจะกำหนดตามลักษณะของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและเครื่องยนต์เบนซิน ดังนี้

สำหรับขอบเขตของความเป็นไปได้ของค่าตัวแปรสำหรับเครื่องยนต์และมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงแสดงดังต่อไปนี้

I คือ โมเมนต์ความเฉื่อยในการหมุนของมอเตอร์ เป็นค่าที่ได้จากการรักษาสภาพเดิมของการหมุนเอาไว้ โดยค่าโมเมนต์ความเฉื่อยจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับมวล และระยะจากมวลไปยังแกนหมุนของมอเตอร์

L_d คือ ความเหนียวของอาร์เมเจอร์ ค่าความเหนียวจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับจำนวนของขดลวด ถ้าขดลวดมีปริมาณมากค่าความเหนียวก็จะมากตามไปด้วย ซึ่งค่าความเหนียวจะแปรผันตรงกับจำนวนขดลวด

R คือ ความต้านทานของอาร์เมเจอร์ เป็นเหตุของการทำให้เกิดแรงเคลื่อนตกคร่อมเฟส ซึ่งจะทับเฟสหรือตกคร่อมเฟสเดียวกับกระแสไฟฟ้าในอาร์เมเจอร์

k_t คือ ค่าคงที่ของแรงบิด การเหนียวทางแม่เหล็กไฟฟ้าทำให้เกิดการเคลื่อนไหวในช่องว่างอากาศระหว่างสเตเตอร์กับโรเตอร์ เพื่อสร้างแรงบิดตามกฎของ Lorentz

k_e คือ ค่าคงที่ของ Electromotive Force ขณะที่ขดลวดอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงกำลังเคลื่อนที่ผ่านสนามแม่เหล็ก จะเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนียวขึ้นบนขดลวดนั้น แรงดันไฟฟ้านี้มีแนวโน้มจะต่อต้านกับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ดังนั้นจึงเรียกว่า “แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ”

สำหรับขอบเขตของความเป็นไปได้ของค่าตัวแปรเครื่องยนต์เบนซินแสดงดังต่อไปนี้

I_e คือ ค่าความเฉื่อยในการหมุนของเครื่องยนต์ ซึ่งสำหรับงานวิจัยนี้ใช้เครื่องยนต์เบนซินขนาด 6 สูบ ดังนั้นค่าความเฉื่อยส่วนใหญ่จะเกิดจากเพลลาข้อเหวี่ยงของเครื่องยนต์ซึ่งสามารถประมาณค่าจากการคำนวณได้

f คือ ค่าแรงบิดเสียดทานของเครื่องยนต์ ซึ่งค่าแรงบิดเสียดทาน โดยระบบเครื่องยนต์ทั่วไปแล้วค่าแรงบิดไม่ควรมีค่ามากกว่าค่าแรงบิดสูงสุดของเครื่องยนต์ ดังนั้นค่าแรงบิดเสียดทานโดยทั่วไปของเครื่องยนต์อยู่ที่ประมาณ 30 - 40% ของแรงบิดเครื่องยนต์

V_m คือ ปริมาตรในทอรวมไอดี ซึ่งจะขึ้นอยู่กับขนาดของเครื่องยนต์ ถ้าเป็นเครื่องยนต์ที่มีขนาดใหญ่ปริมาตรทอรวมไอดีก็จะมีมากและถ้าเครื่องยนต์มีขนาดเล็กปริมาตรทอรวมไอดีจะมีขนาดเล็กด้วย

b คือ ค่าคงที่ความหนืดของลูกปืนเพลลาข้อเหวี่ยง ซึ่งเป็นค่าที่สามารถทำการวัดได้ยากจึงได้ใช้โปรแกรมในการประมาณค่า โดยที่ค่าคงที่ความหนืดนี้จะมีค่าน้อยมาก

เมื่อทราบขอบเขตของตัวแปรบางตัวที่สามารถระบุค่าขอบเขตแล้วเราจะนำขอบเขตเหล่านั้นที่ทราบค่านำไปใส่ใน โปรแกรม Parameter Estimation ให้โปรแกรมทำการหาค่าตัวแปรที่เหมาะสม ซึ่งได้กำหนดขอบเขตต่าง ๆ แสดงตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ขอบเขตของค่าตัวแปรในโปรแกรม Parameter Estimation

	Parameter									
	DC Motor						Biogas Engine			
	I	L_a	R	K_e	K_t	c	f	I_e	V_m	b
Min	0	0	1	0.0001	0.0001	0	0.01	0.001	0	0.1
Max	0.0001	0.0001	10	0.1	0.1	0.00001	1	0.1	0.00001	3

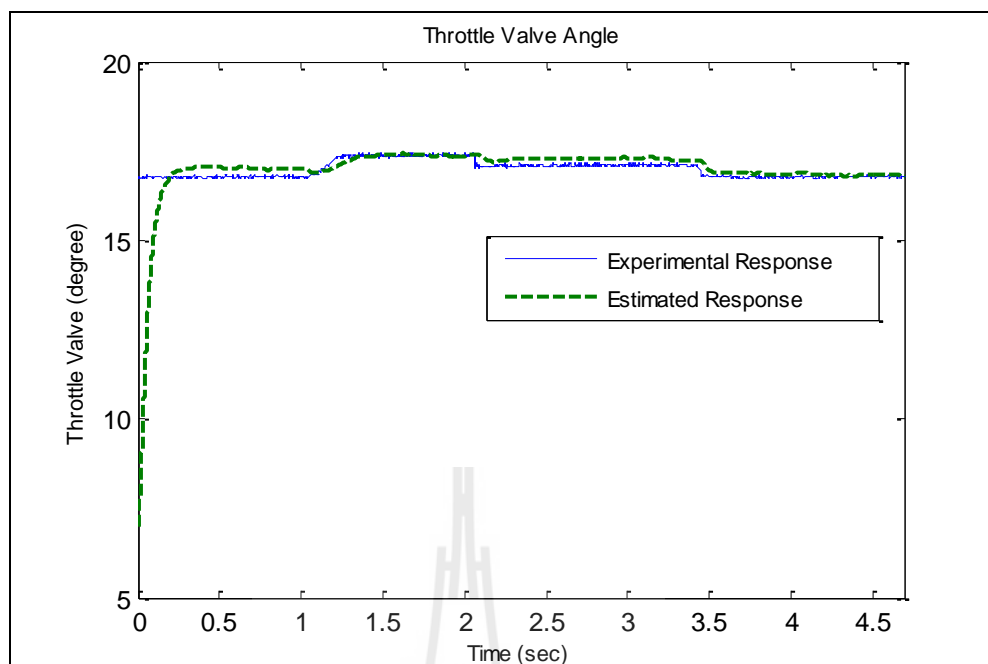
[ที่มา : Simulation Studies of The Estimated SI Engine Load Torque using Adaptive Observer Compensator]

3.3.2 ผลการประมาณค่าตัวแปร

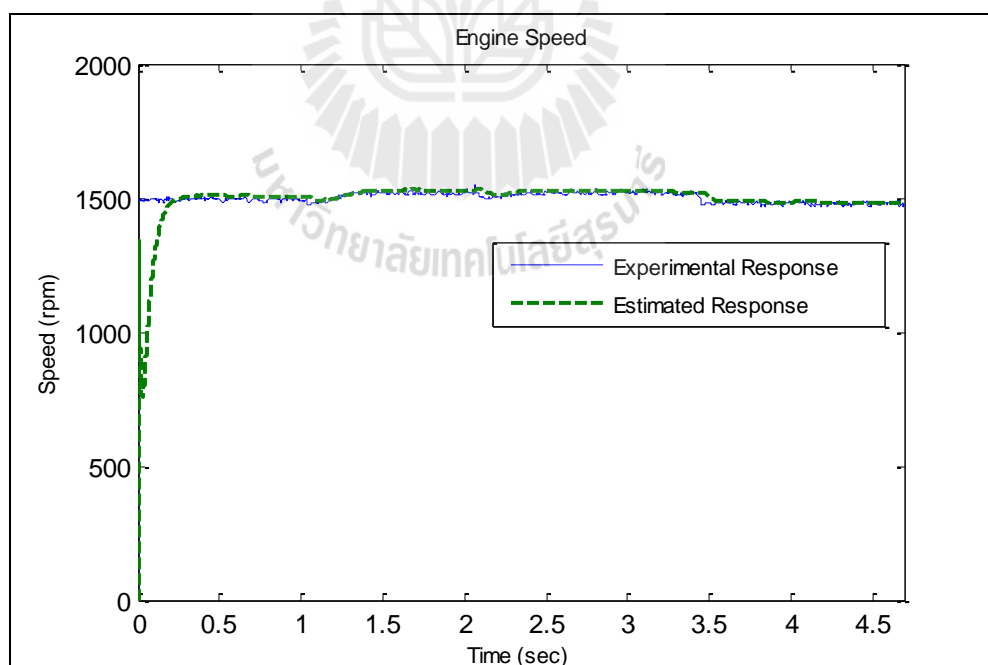
ผลของตัวแปรของระบบที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ จะมีค่าที่แตกต่างกันออกไปในแต่ละค่าของตัวควบคุมพีไอ ผลการตอบสนองความเร็วรอบของเครื่องยนต์ก็จะแตกต่างกันด้วย โดยในแต่ละการตอบสนองนี้จะให้ผลการประมาณค่าของตัวแปรของระบบ I , L_a , R , k_3 , k_4 , c , f , I_e , V_m และ b พร้อมกับแสดงรูปแบบการตอบสนองของความเร็วรอบจากการวัดเทียบกับแบบจำลองที่ได้จากการประมาณค่าตัวแปรของระบบ

ตารางที่ 3.2 ผลของการประมาณค่าตัวแปรของระบบที่ความเร็วรอบ 1500 rpm

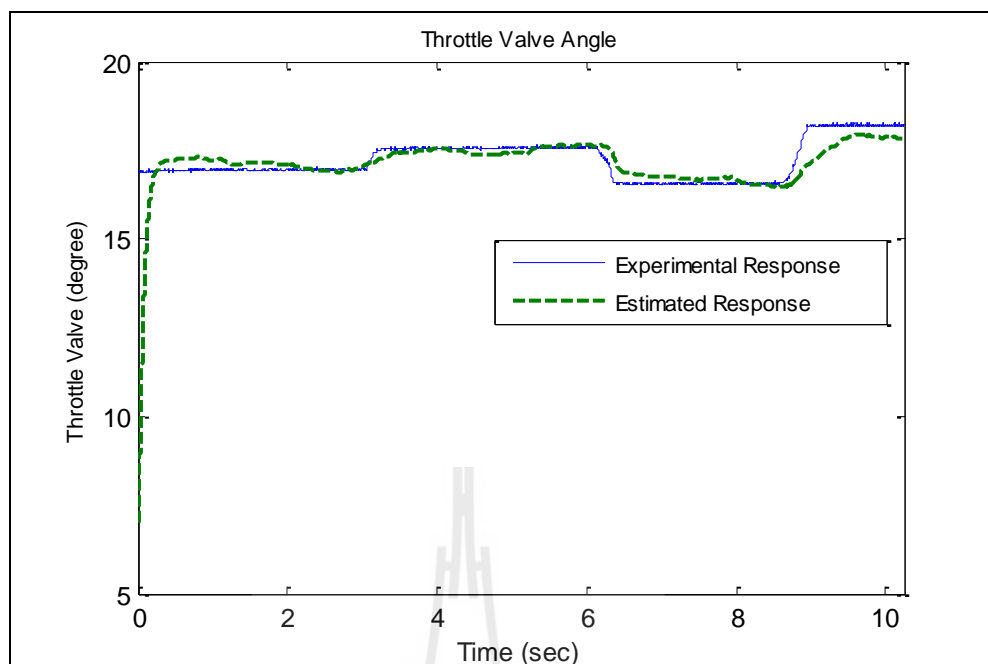
PI		Estimated Parameter									
Controller		DC Motor						Biogas Engine			
Parameter		I	L_a	R	K_e	K_t	c	f	I_e	V_m	b
K_p	K_i										
5	1.2	$1.0e^{-8}$	$5.0e^{-4}$	5.0	$2.7e^{-2}$	$1.8e^{-2}$	$4.4e^{-14}$	$1.1e^{-3}$	$5.0e^{-2}$	$1.7e^{-6}$	1.9
4	1.2	$1.5e^{-8}$	$7.1e^{-4}$	5.1	$3.2e^{-2}$	$2.3e^{-2}$	$3.2e^{-14}$	$3.8e^{-3}$	$5.2e^{-2}$	$1.8e^{-6}$	2.0
Mean		$1.2e^{-8}$	$6.1e^{-4}$	5.05	$3.0e^{-2}$	$2.1e^{-2}$	$3.8e^{-14}$	$2.4e^{-3}$	$5.1e^{-2}$	$1.8e^{-6}$	2.0



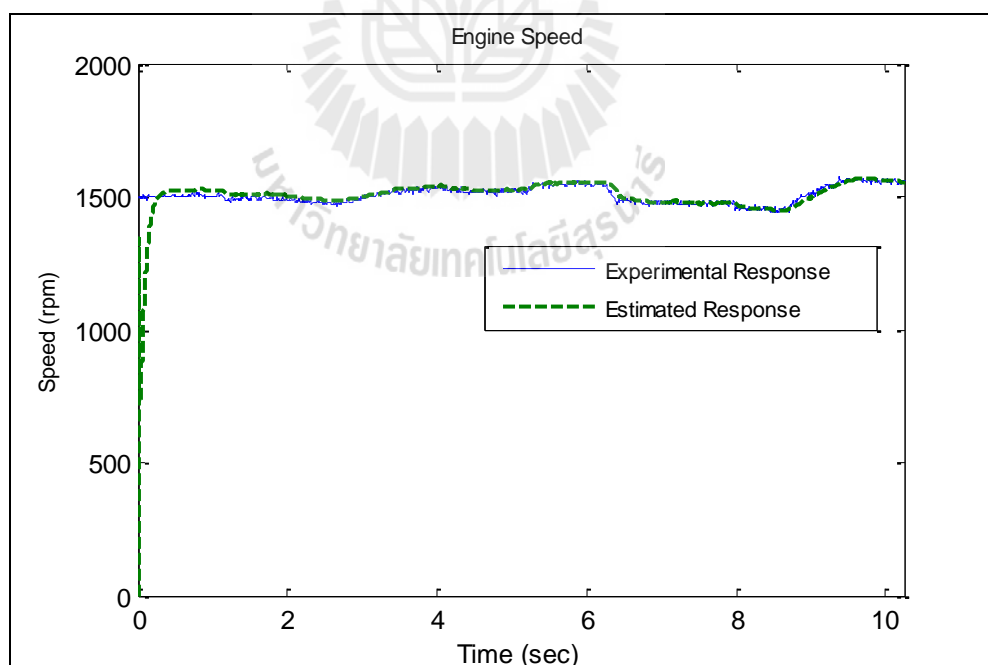
รูปที่ 3.7 แสดงตำแหน่งลิ้นปีกผีเสื้อจากทดลองเทียบกับแบบจำลอง $K_p = 5$, $K_i = 1.2$



รูปที่ 3.8 แสดงความเร็วรอบของเครื่องยนต์จากการทดลองเทียบกับแบบจำลอง $K_p = 5$, $K_i = 1.2$



รูปที่ 3.9 แสดงตำแหน่งลิ้นปีกผีเสื้อจากการทดลองเทียบกับแบบจำลอง $K_p = 4$, $K_i = 1.2$

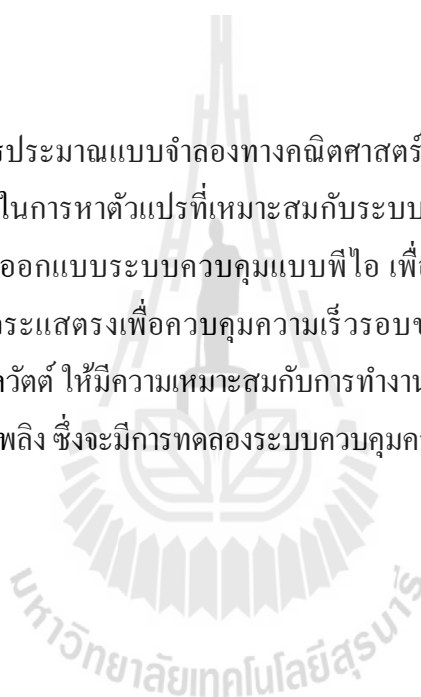


รูปที่ 3.10 แสดงความเร็วรอบของเครื่องยนต์จากการทดลองเทียบกับแบบจำลอง $K_p = 4$, $K_i = 1.2$

ผลจากการประมาณค่าของตัวแปรสำหรับเครื่องยนต์เบนซินและมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ที่ความเร็วรอบ 1500 รอบต่อนาที เมื่อนำค่าที่ได้แทนกลับไปยังแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แล้วทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้ที่ได้จากการทดลอง พบว่าการตอบสนองของเครื่องยนต์นั้นมีค่าความคลาดเคลื่อนดังนี้ รูปที่ 3.7 ค่าความคลาดเคลื่อน 1.73%, รูปที่ 3.8 ค่าความคลาดเคลื่อน 1.19%, รูปที่ 3.9 ค่าความคลาดเคลื่อน 1.35 % และรูปที่ 3.10 ค่าความคลาดเคลื่อน 1.28% ซึ่งพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ จึงสามารถนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ไปทำการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอ เพื่อปรับปรุงการทำงานของเครื่องยนต์ให้มีการตอบสนองที่ดีขึ้นต่อไป

3.4 สรุป

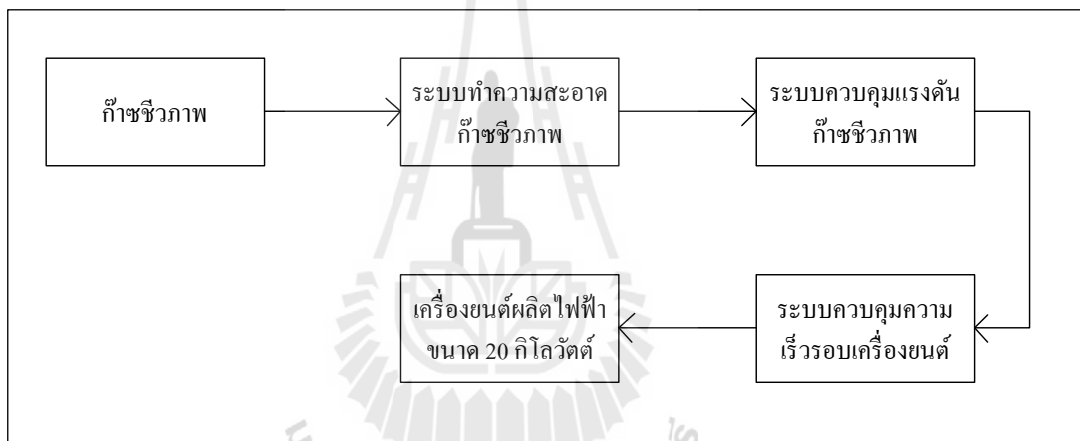
ในบทนี้ได้ทำการประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในส่วนของเครื่องยนต์เบนซินและมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในการหาตัวแปรที่เหมาะสมกับระบบ ในงานวิจัยนี้จะนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไปใช้ในการออกแบบระบบควบคุมแบบพีไอ เพื่อใช้ในการควบคุมตำแหน่งลิ้นปีกผีเสื้อผ่านมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อควบคุมความเร็วรอบของเครื่องยนต์เบนซินสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าขนาด 20 กิโลวัตต์ ให้มีความเหมาะสมกับการทำงานของเครื่องยนต์ที่ 1500 รอบต่อนาที เมื่อใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งจะมีการทดลองระบบควบคุมความเร็วรอบของเครื่องยนต์ในบทที่ 4



บทที่ 4

ผลการทดลองของระบบผลิตกระแสไฟฟ้าจากก๊าซชีวภาพ

จากบทที่ 3 ได้ทำการประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในส่วนของเครื่องยนต์เบนซิน และมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อใช้ในการออกแบบตัวควบคุมความเร็วรอบของเครื่องยนต์ ดังนั้น ในบทนี้จะเป็นการแสดงระบบการทำงานทั้งหมดของการผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งมีขั้นตอนการทำงานดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 การทำงานของระบบผลิตกระแสไฟฟ้า

4.1 ก๊าซชีวภาพ

งานวิจัยนี้ได้นำก๊าซชีวภาพที่ได้จากฟาร์มสุกรภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เพื่อทำงานทดสอบระบบทำความสะอาดก๊าซชีวภาพ ระบบควบคุมแรงดันก๊าซชีวภาพและระบบควบคุมความเร็วรอบของเครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพ บ่อก๊าซชีวภาพที่ใช้ทำงานวิจัยเป็นบ่อหมักช้าแบบราง (Plug flow digester) ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งก่อสร้างด้วยคอนกรีต ตัวบ่อมีรูปร่างคล้ายรางหรือคลองส่งน้ำซึ่งมีชื่อเรียกว่า Channel Digester ส่วนบนบ่อหมักมีพลาสติกคลุมเพื่อใช้เก็บก๊าซชีวภาพ ตัวบ่อมักจะถูกฝังอยู่ใต้ดิน มีท่อเติมมูลและนำมูลออกอยู่ทางหัวและทางท้ายบ่อ เนื่องจากใช้พลาสติกเป็นตัวเก็บก๊าซดังนั้นจึงมีแรงดันก๊าซค่อนข้างต่ำประมาณ 20 - 100 มิลลิบาร์



รูปที่ 4.2 บ่อหมักก๊าซชีวภาพมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ก๊าซชีวภาพ หมายถึง ก๊าซที่เกิดจากหมักและย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำเสียรูปแบบต่าง ๆ โดยอาศัยกลุ่มของจุลินทรีย์ชนิดที่ไม่ใช้ออกซิเจนทำหน้าที่หมักและย่อยสลายสารอินทรีย์ให้เปลี่ยนรูปไปเป็นก๊าซชีวภาพโดยจะมีส่วนผสมของก๊าซมีเทน (CH_4) : ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) : และก๊าซอื่น ๆ ในอัตราส่วนประมาณ 65 : 33 : 2 ตามลำดับ ซึ่งก๊าซชีวภาพที่มีสัดส่วนของก๊าซมีเทนสูงกว่า 50% จะสามารถจุดติดไฟได้ดี ดังนั้น ก๊าซชีวภาพที่ได้นี้จะสามารถนำไปใช้ทดแทนพลังงานจากเชื้อเพลิงอื่น ๆ ได้ ก๊าซชีวภาพที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีองค์ประกอบดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่ใช้ในงานวิจัย

ก๊าซ	องค์ประกอบเริ่มต้น
มีเทน (CH_4)	58.4%
คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)	39.2%
ออกซิเจน (O_2)	0.2%
ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S)	> 2000 ppm

[ที่มา : ก๊าซชีวภาพจากฟาร์มสุกร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี]

จากตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่ได้จากบ่อหมักนั้นจะประกอบไปด้วยก๊าซที่ไม่พึงประสงค์ ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) จะทำให้ก๊าซชีวภาพมีค่าทางความร้อนลดต่ำลง หากมีส่วนในปริมาณที่สูงและไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) จะมีฤทธิ์ในการกัดกร่อนวัสดุที่เป็นโลหะ ดังนั้นก่อนนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์ จึงจำเป็นที่จะต้องผ่านระบบทำความสะอาด

4.2 ระบบทำความสะอาดก๊าซชีวภาพ

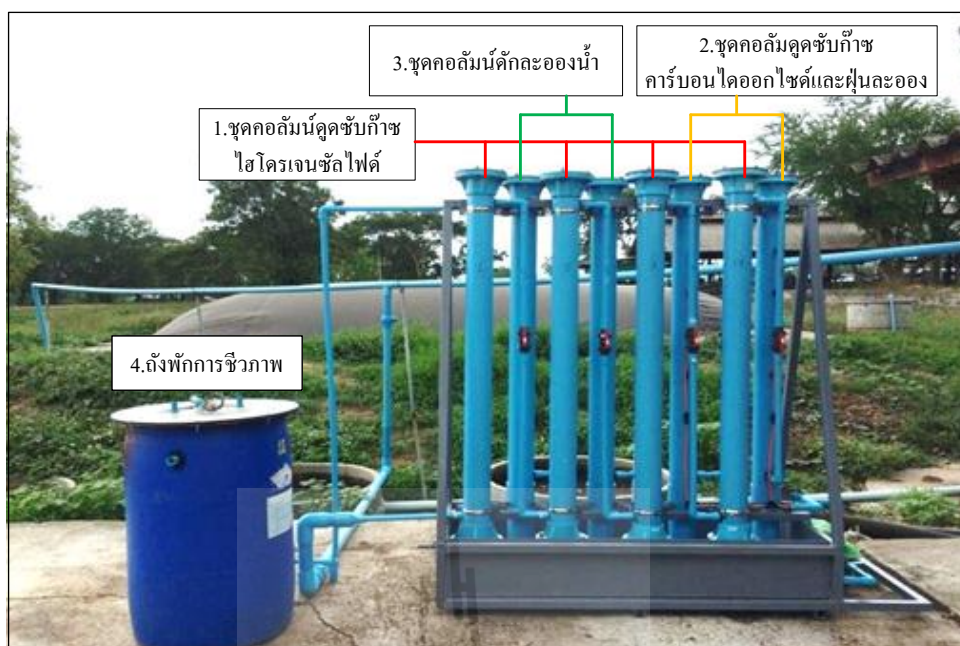
องค์ประกอบที่สำคัญของก๊าซชีวภาพ คือ ก๊าซมีเทน (CH_4) ซึ่งสามารถนำไปเป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์สันดาปภายในได้ แต่ก่อนที่จะนำไปใช้งานนั้นจำเป็นต้องปรับปรุงคุณภาพของก๊าซชีวภาพเพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ เนื่องจากองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพไม่ได้มีก๊าซมีเทนเพียงอย่างเดียวดังที่ได้กล่าวไปข้างต้น

งานวิจัยนี้ได้จัดทำอุปกรณ์ทำความสะอาดก๊าซชีวภาพเพื่อดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) เพื่อให้คุณภาพของก๊าซชีวภาพอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานสำหรับการนำไปใช้งานในเครื่องยนต์สันดาปภายใน มาตรฐานของก๊าซชีวภาพที่นำไปใช้งานโดยจะต้องมีส่วนของก๊าซมีเทน (CH_4) มากกว่า 65% และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์น้อยกว่า 23 ppm โดยมีอุปกรณ์และขั้นตอนการทำความสะอาดก๊าซชีวภาพดังนี้

4.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบทำความสะอาดก๊าซชีวภาพ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการจัดสร้างระบบทำความสะอาดก๊าซชีวภาพ จะประกอบไปด้วยส่วนประกอบต่าง ๆ มากมาย ในที่นี้จะอธิบายถึงอุปกรณ์หลัก ๆ ที่ใช้ในการทำความสะอาดก๊าซชีวภาพ เพื่อให้ได้คุณสมบัติของก๊าซชีวภาพตามมาตรฐานการนำไปใช้งาน

1. ชุดคอลัมน์ดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) จัดทำขึ้นจากท่อพีวีซีเกรด 8.5 ขนาด 4 นิ้ว ยาว 1.50 เมตร จำนวน 4 คอลัมน์ ภายในจะบรรจุเหล็กฝอยไว้ดังรูปที่ 4.3
2. ชุดคอลัมน์ดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และฝุ่นละออง จัดทำขึ้นจากท่อพีวีซีเกรด 8.5 ขนาด 4 นิ้ว ยาว 1.50 เมตร จำนวน 2 คอลัมน์ ในส่วนนี้จะทำการติดตั้งหัวฉีดเพื่อสเปรย์น้ำปูนขาวจำนวนคอลัมน์ละ 3 หัวฉีด โดยจะมีปั้มน้ำขนาด 0.5 แรงม้า ในการเพิ่มแรงดันน้ำในการทำความสะอาดก๊าซชีวภาพดังรูปที่ 4.3
3. ชุดคอลัมน์ดักละอองน้ำ จัดทำขึ้นจากท่อพีวีซีเกรด 8.5 ขนาด 4 นิ้ว ยาว 1.50 เมตร จำนวน 2 คอลัมน์ ดังรูปที่ 4.3
4. ถังพักก๊าซชีวภาพ เป็นถังพีวีซีขนาด 200 ลิตรดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ระบบทำความสะอาดก๊าซชีวภาพ

4.2.2 ขั้นตอนการทำงานของระบบทำความสะอาดก๊าซชีวภาพ

4.2.2.1 การดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ที่ปนเปื้อนในก๊าซชีวภาพ เนื่องจากก๊าซชนิดนี้มีคุณสมบัติเป็นก๊าซพิษและเมื่อสัมผัสกับน้ำหรือไอน้ำจะเปลี่ยนสภาพเป็นกรดซัลฟิวริกหรือกรดกำมะถัน ซึ่งเป็นสาเหตุของฝนกรดหรือไอกรดที่สามารถกัดกร่อนโลหะและอุปกรณ์ของเครื่องยนต์ส่วนใหญ่จะทำจากโลหะ ได้แก่ ลูกสูบ วาล์วไอดี วาล์วไอเสีย เป็นต้น ดังนั้นการดูดซับปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) จึงเป็นขั้นตอนที่สำคัญมากในกระบวนการทำความสะอาดก๊าซชีวภาพ ในงานวิจัยนี้จะใช้เหล็กฝอยในการดูดซับ ดังรูปที่ 4.4

4.2.2.2 การดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และกำจัดฝุ่นละอองจากก๊าซชีวภาพ โดยส่วนจะทำการปรับลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในกรณีที่ก๊าซชีวภาพมีสัดส่วนของก๊าซมีเทน (CH_4) ก่อนข้างต่ำจุดอยู่ในระดับที่จุดไฟติดยาก คือมีค่าก๊าซมีเทน (CH_4) ต่ำกว่า 50% แต่ในระบบการผลิตก๊าซชีวภาพสำหรับฟาร์มสุกรนั้นจะไม่มีปัญหาในเรื่องนี้ ดังนั้นการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จึงไม่จำเป็น ในงานวิจัยนี้จะใช้น้ำผสมกับปูนขาวในอัตราส่วนน้ำ 300 ลิตร : ปูนขาว 0.2 กิโลกรัม และทำการสเปรย์น้ำทำความสะอาดจำนวน 2 คอลัมน์

4.2.2.3 ในขั้นตอนนี้จะทำการดักละอองน้ำที่ได้มาจากขั้นตอนที่ 2 ด้วยการให้ก๊าซชีวภาพไหลผ่านไปยังท่อพีวีซีเพื่อให้มวลของน้ำและก๊าซชีวภาพแยกออกจากกันเป็นจำนวน

2 คอลัมน์ โดยละอองน้ำจะตกลงสู่ถังพักน้ำทางด้านล่างของชุดคัดละอองน้ำเพื่อนำมวลน้ำที่ได้กลับไปใช้ในการทำความสะอาดก๊าซชีวภาพอีกครั้ง

4.2.2.4 หลังจากที่ก๊าซชีวภาพผ่านการทำความสะอาดทั้ง 3 ขั้นตอนก่อนหน้าจะทำให้แรงดันของก๊าซชีวภาพที่ส่งมาจากบ่อก๊าซลดต่ำลงจากเดิม ก่อนการนำไปใช้งานจึงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์กักเก็บก๊าซชีวภาพที่มีแรงดันต่ำ เพื่อที่จะได้มีก๊าซชีวภาพเพียงพอต่อการส่งต่อไปยังกระบวนการถัดไป



รูปที่ 4.4 เหล็กฝอย

4.2.3 คุณสมบัติของก๊าซชีวภาพหลังจากผ่านระบบทำความสะอาด

หลังจากเสร็จสิ้นระบบทำความสะอาดก๊าซชีวภาพ ได้ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบและคุณสมบัติของก๊าซชีวภาพหลังการทำความสะอาด โดยทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพด้วยเครื่องวิเคราะห์ก๊าซชีวภาพ Geotech รุ่น Biogas 5000 ดังรูปที่ 4.5 ทำให้ได้คุณสมบัติของก๊าซชีวภาพเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติของก๊าซชีวภาพหลังจากผ่านระบบทำความสะอาด

ก๊าซ	องค์ประกอบเริ่มต้น
มีเทน (CH ₄)	69.2%
คาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂)	23.2%
ออกซิเจน (O ₂)	0.2%
ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H ₂ S)	2 ppm

เครื่องมือวิเคราะห์ห้องค้ประกอบก๊าซชีวภาพ



รูปที่ 4.5 เครื่องวิเคราะห์ห้องค้ประกอบก๊าซชีวภาพ

ตารางที่ 4.3 แสดงรายละเอียดของเครื่องวิเคราะห์ห้องค้ประกอบก๊าซชีวภาพ

ชื่อ	Biotech
รุ่น	Biogas 5000
ก๊าซที่สามารถวัดได้	CH ₄ , CO ₂ , O ₂ , H ₂ S
ช่วงการวัดค่า	CH ₄ = 0 - 100% CO ₂ = 0 - 100% O ₂ = 0 - 25% H ₂ S = 0 - 5000ppm
อัตราการไหล	500 ml/min

หลังจากผ่านกระบวนการทำความสะอาดก๊าซชีวภาพและได้ทำการทดสอบคุณสมบัติของก๊าซชีวภาพเพื่อให้ได้คุณสมบัติก๊าซชีวภาพตามมาตรฐานของการนำก๊าซชีวภาพไปเป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์สันดาปภายใน เนื่องจากในกระบวนการทำความสะอาดมีอยู่ด้วยกันหลายขั้นตอนมีผลทำให้แรงดันก๊าซชีวภาพที่มาจากบ่อก๊าซลดลงต่ำลง ทำให้ต้องมีการเพิ่มแรงดันให้กับก๊าซชีวภาพ ซึ่งจะอยู่ในระบบควบคุมแรงดันก๊าซชีวภาพ ในหัวข้อต่อจากนี้

4.3 ระบบควบคุมแรงดันก๊าซชีวภาพ

เนื่องจากแรงดันของก๊าซชีวภาพที่ออกจากบ่อก๊าซนั้นจะมีแรงดันที่ไม่คงที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของบ่อก๊าซในแต่ละวัน และเมื่อก๊าซชีวภาพผ่านระบบทำความสะอาด ความดันของก๊าซชีวภาพจะลดต่ำลงจากเดิม เพื่อให้การทำงานของเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้าทำงานได้อย่างต่อเนื่อง จึงจำเป็นที่จะต้องควบคุมแรงดันของก๊าซชีวภาพให้มีแรงดันอยู่ในช่วงที่เหมาะสมก่อนการนำไปใช้งาน การควบคุมแรงดันของก๊าซชีวภาพจะสามารถควบคุมอัตราการไหลของเชื้อเพลิงที่ส่งต่อไปยังเครื่องยนต์ได้

4.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบควบคุมแรงดันก๊าซชีวภาพ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการเพิ่มแรงดันและควบคุมแรงดันก๊าซชีวภาพในงานวิจัยนี้ จะมีอุปกรณ์ที่ใช้อยู่หลายอย่าง และแต่ละอย่างจะมีหน้าที่ในการทำงานที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งจะมีรายละเอียดการทำงานของแต่ละอุปกรณ์ ดังนี้



รูปที่ 4.6 อุปกรณ์ควบคุมแรงดันก๊าซชีวภาพ

2.3.1.1 บั้มลม ได้ทำการดัดแปลงบั้มลมมาเป็นอุปกรณ์ในการเพิ่มแรงดันก๊าซชีวภาพ ซึ่งแต่เดิมจะใช้ในการอัดอากาศ โดยทำการเปลี่ยนอุปกรณ์ที่ใช้ในการดูดอากาศมาเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการดูดก๊าซชีวภาพในบริเวณทางเข้าของทางดูดอากาศ และทำการดัดแปลง

ทางออกของก๊าซชีวภาพ เพื่อให้ได้แรงดันก๊าซชีวภาพเหมาะสมกับการส่งถ่ายก๊าซไปยังเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้า โดยมีรายละเอียดของอุปกรณ์เพิ่มแรงดันก๊าซชีวภาพ ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.4 แสดงรายละเอียดอุปกรณ์เพิ่มแรงดันก๊าซชีวภาพ

ยี่ห้อ	Puma
รุ่น	XM - 2550
แรงดันสูงสุด (bar)	7
อัตราการไหล (Liter/min)	260
ความจุถัง (Liter)	50

4.3.1.2 เรกกูเรเตอร์ (Regulator) พร้อมชุดกรองไอน้ำ ในส่วนนี้จะทำหน้าที่ควบคุมแรงดันของก๊าซชีวภาพที่มาจากอุปกรณ์เพิ่มแรงดันก๊าซ เพื่อให้มีแรงดันในการส่งก๊าซชีวภาพคงที่ตลอดระยะเวลาการทำงาน และในอุปกรณ์ชุดนี้จะทำหน้าที่กรองไอน้ำที่มาจากกระบวนการอัดอีกหนึ่งครั้ง เพื่อให้ได้ก๊าซชีวภาพที่มีความบริสุทธิ์มากที่สุด ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 เรกกูเรเตอร์ (Regulator) พร้อมชุดกรองไอน้ำ

4.3.1.3 อุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหล (Flow meter) มีหน้าที่ในการควบคุมอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพก่อนเข้าเครื่องยนต์ เพื่อให้มีอัตราการไหลเหมาะสมกับการทำงานของเครื่องยนต์ขณะทำการผลิตกระแสไฟฟ้าตามที่เครื่องยนต์ต้องการในขณะนั้น ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 อุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ

4.3.1.4 อุปกรณ์ผสมก๊าซชีวภาพกับอากาศ จะทำหน้าที่ในการจ่ายก๊าซเข้าสู่เครื่องยนต์ทางด้านหน้าของท่อร่วมไอดี จะช่วยให้ก๊าซชีวภาพผสมกับอากาศได้ดีกว่าการจ่ายก๊าซชีวภาพแบบทั่วไปที่จะจ่ายก๊าซชีวภาพเข้าท่อร่วมไอดีโดยตรง ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 อุปกรณ์ผสมก๊าซชีวภาพกับอากาศ

4.3.2 ขั้นตอนการทำงานของระบบควบคุมแรงดันก๊าซชีวภาพ

การรักษาแรงดันก๊าซชีวภาพ ได้ทำการดัดแปลงเครื่องอัดอากาศแบบโรตารีมาใช้ในการอัดก๊าซชีวภาพคอมเพรสเซอร์จะดูดก๊าซชีวภาพจากถังพักก๊าซซึ่งมีความดันต่ำประมาณ 20 – 100 มิลลิบาร์ จากนั้นจะทำการอัดก๊าซชีวภาพไปยังถังบรรจุก๊าซด้วยแรงดัน 7 บาร์ เมื่อคอมเพรสเซอร์เพิ่มแรงดันก๊าซชีวภาพได้ตามที่กำหนดแล้วสวิทช์ควบคุมแรงดันก๊าซจะตัดการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเพื่อให้คอมเพรสเซอร์หยุดการทำงาน และเมื่อแรงดันก๊าซชีวภาพต่ำกว่า

3 บาร์ สวิตช์ควบคุมแรงดันจะเริ่มการทำงานของมอเตอร์เพื่อรักษาแรงดันก๊าซชีวภาพให้ได้ 7 บาร์ เช่นเดิม ที่ถึงบรรจุดักชีวภาพจะมีเรกจูเรเตอร์ควบคุมแรงดันก๊าซชีวภาพขาออกและทำการกรองไอน้ำที่ขั้นตอนนี้ด้วย ในงานวิจัยนี้ได้ควบคุมแรงดันก๊าซชีวภาพขาออกไว้ที่ 2 บาร์ เพื่อที่จะทำการควบคุมอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพให้คงที่เช่นกัน อัตราการไหลของก๊าซชีวภาพได้กำหนดไว้ที่ 100 ลิตรต่อนาที เนื่องจากเป็นความต้องการเชื้อเพลิงก๊าซชีวภาพของเครื่องยนต์ในการผลิตไฟฟ้าสูงสุดขนาด และในการควบคุมอัตราการไหลนี้จะใช้ Flow Meter ในการควบคุม

เมื่อทำการเพิ่มแรงดันและรักษาแรงดันให้อยู่ในช่วงการทำงานที่เหมาะสมแล้วจะทำให้การควบคุมอัตราการไหลของเชื้อเพลิงจะสามารถกระทำได้ง่าย แต่อย่างไรก็ตามเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้าที่ทำงานที่ความเร็วรอบคงที่ ดังนั้นในการส่งจ่ายเชื้อเพลิงไปยังเครื่องยนต์จะไม่ได้ทำการปรับเปลี่ยนอัตราการไหล แต่จะปรับเปลี่ยนการควบคุมตำแหน่งลิ้นปีกผีเสื้อในการควบคุมความเร็วรอบของเครื่องยนต์ในระบบต่อจากนี้

4.4 ระบบควบคุมความเร็วรอบของเครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพ

การทำงานของเครื่องยนต์สันดาปภายในเพื่อใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้านั้น จะต้องมีระบบควบคุมความเร็วรอบของเครื่องยนต์ เนื่องจากในการผลิตกระแสไฟฟ้า เครื่องยนต์จะใช้ความเร็วรอบที่ตลอดการใช้งานถึงแม้ภาระกรรมของเครื่องจะเปลี่ยนแปลงไป ระบบควบคุมจะต้องรักษาความเร็วรอบของเครื่องยนต์ให้ได้ความเร็วรอบที่อัลเทอร์เนเตอร์ (Alternator) ต้องการ และการควบคุมความเร็วรอบของเครื่องยนต์นั้นจะเป็นการปรับตำแหน่งลิ้นปีกผีเสื้อในการควบคุมปริมาณอากาศและเชื้อเพลิง ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการปรับตำแหน่งลิ้นปีกผีเสื้อมนุษย์จะเป็นผู้กำหนดเพื่อให้ได้ความเร็วรอบอยู่ในช่วงใช้งาน แต่ในการทำงานแบบอัตโนมัติ ระบบจะต้องทำงานได้ด้วยตนเองเพื่อให้ได้ความเร็วรอบที่อัลเทอร์เนเตอร์ (Alternator) ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในงานวิจัยนี้จะใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Motor) ในการควบคุมตำแหน่งลิ้นปีกผีเสื้อทำงานร่วมกับคอมพิวเตอร์ และอุปกรณ์การเชื่อมต่ออีกหลาย ๆ อย่าง โดยมีรายละเอียดดังนี้

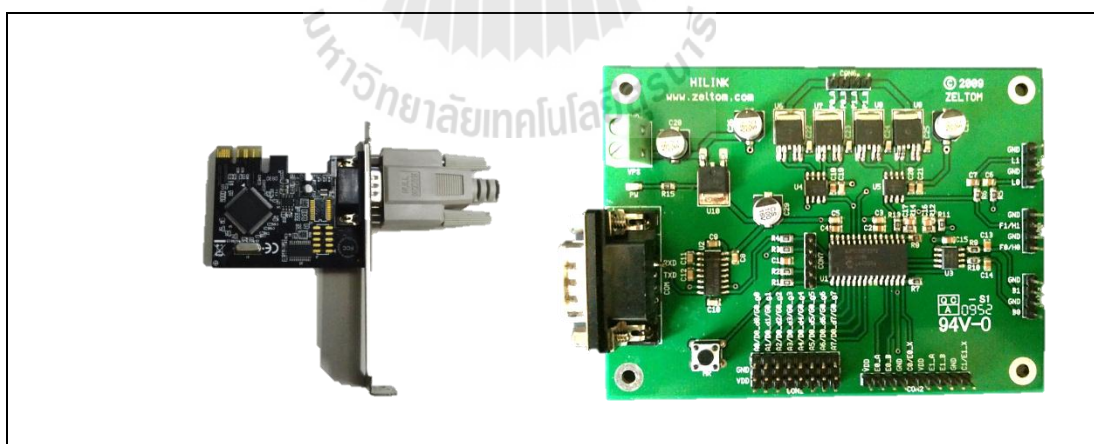
4.4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบควบคุมความเร็วรอบของเครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพ

4.4.1.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดวอร์มเกียร์ (Worm gear motor) ดังรูปที่ 4.10 จะติดตั้งที่อยู่ลิ้นปีกผีเสื้อของเครื่องยนต์ มีหน้าที่ในการปรับตำแหน่งลิ้นปีกผีเสื้อตามที่คอมพิวเตอร์สั่งการทำงานผ่านบอร์ด Controller เพื่อให้ได้ความเร็วรอบที่ตั้งค่าเอาไว้



รูปที่ 4.10 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดworm เกียร์ (Worm gear motor)

4.4.1.2 บอร์ด Controller ชุด Power Amplifier และ PCI Aerial Card ดังรูปที่ 4.11 จะติดตั้งที่อยู่เครื่องคอมพิวเตอร์ โดยคอมพิวเตอร์จะสั่งการทำงานผ่าน PCI Aerial Card ไปยังบอร์ด Controller เพื่อไปสั่งการทำงานมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Motor) ให้ทำตามคำสั่งของผู้ออกแบบระบบควบคุมความเร็วรอบของเครื่องยนต์ และรายละเอียดของบอร์ด Controller แสดงดังตารางที่ 4.4

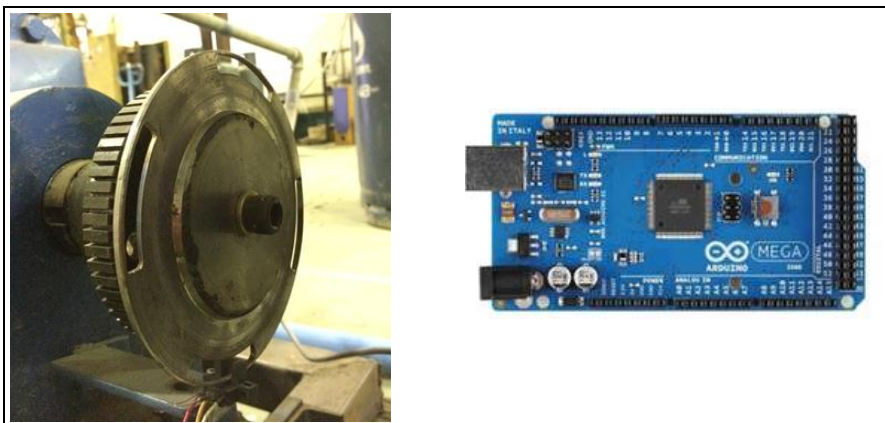


รูปที่ 4.11 PCI Serial Card และบอร์ด RAPCON

ตารางที่ 4.5 แสดงรายละเอียดต่าง ๆ ของ RAPCON Board (RAPCON Real – Time Rapid Control Prototyping Platform for MATLAB/SIMULINK)

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

4.4.1.3 เซ็นเซอร์วัดความเร็วรอบ (Speed sensor) และบอร์ด Arduino ดังรูปที่ 4.12 เซ็นเซอร์วัดความเร็วรอบจะติดตั้งอยู่ที่เพลาของเครื่องยนต์และส่งสัญญาณมายังบอร์ด Arduino เพื่อทำการประมวลผลส่งไปยังคอมพิวเตอร์ในการส่งการปรับองศาปีกผีเสื้อเพื่อให้ได้ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ตามต้องการ



รูปที่ 4.12 เซนเซอร์วัดความเร็วรอบ (Speed sensor) และบอร์ด Arduino

4.4.2 ขั้นตอนการทำงานของระบบควบคุมความเร็วรอบเครื่องยนต์ของก๊าซชีวภาพ

การควบคุมโดยใช้คอมพิวเตอร์ ซึ่งโปรแกรมที่ใช้ควบคุมคือ MATLAB/Simulink เชื่อมต่อสัญญาณการควบคุมระหว่างคอมพิวเตอร์ จะใช้ PCI Serial Card ในการเชื่อมต่อผ่านสาย Serial Crossover Cable เข้ากับ RAPCON Platform ซึ่งเป็นบอร์ด Controller ในการเชื่อมต่อ MATLAB/Simulink กับ Real – Time Windows Target ภายใน Windows และบอร์ดนี้สามารถทำงานได้ทั้ง Input และ Output เป็นบอร์ดควบคุมแบบ Real Time การทำงานของระบบจะถูกควบคุมโดยสัญญาณที่เป็น Digital Signal จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์จากนั้นสัญญาณจะถูกเปลี่ยนจาก Digital Signal ไปเป็น Analog Signal โดย Digital to Analog ด้วยบอร์ด RAPCON และสัญญาณจะถูกขยายขึ้นอีกโดย Power Amplifier เพื่อป้อนไฟฟ้ากระแสตรงให้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดวอร์มเกียร์ในการปรับตำแหน่งลิ้นปีกผีเสื้อของเครื่องยนต์เพื่อให้ได้ความเร็วรอบตามต้องการ โดยมีเซนเซอร์วัดความเร็วรอบในรูปของค่าสัญญาณความต่างศักย์ (Voltage) ที่เป็น Analog Signal จะถูกส่งต่อไปยังบอร์ด RAPCON เพื่อแปลงสัญญาณ Analog เป็น Digital แล้วส่งกลับไปประมวลผลในโปรแกรมควบคุมการทำงานต่อไป

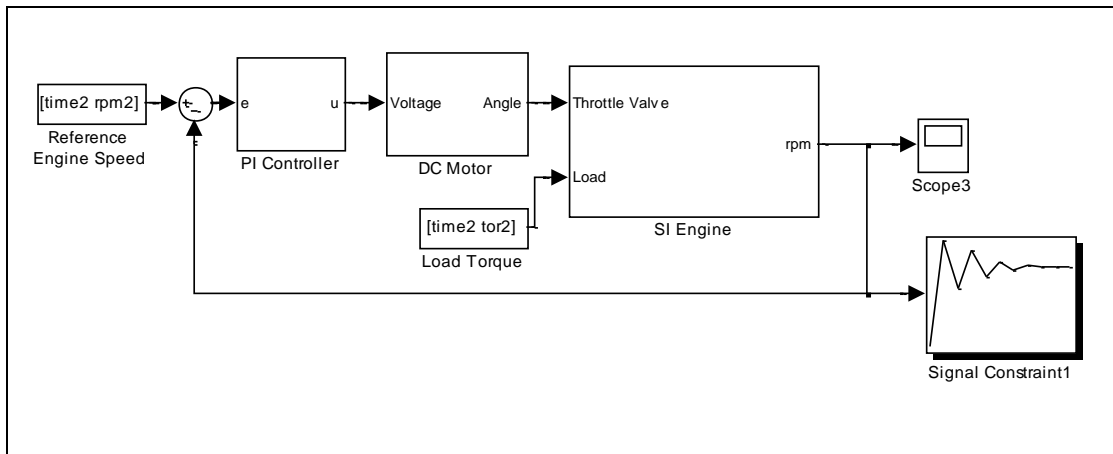
ในการปรับตำแหน่งลิ้นปีกผีเสื้อเพื่อควบคุมความเร็วรอบของเครื่องยนต์นั้น ก่อนการทำงานในภาคปฏิบัติจะต้องมีการออกแบบระบบควบคุมเพื่อนำไปใช้ในการทำงานว่าต้องการผลตอบสนองของระบบในลักษณะใด ดังนั้นจึงได้ทำการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอเพื่อใช้ในการปรับตำแหน่งลิ้นปีกผีเสื้อเพื่อให้มีการตอบสนองของความเร็วรอบเครื่องยนต์ตามต้องการ

4.5 การออกแบบจำลองอ้างอิงระบบควบคุมความเร็วรอบของเครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพ

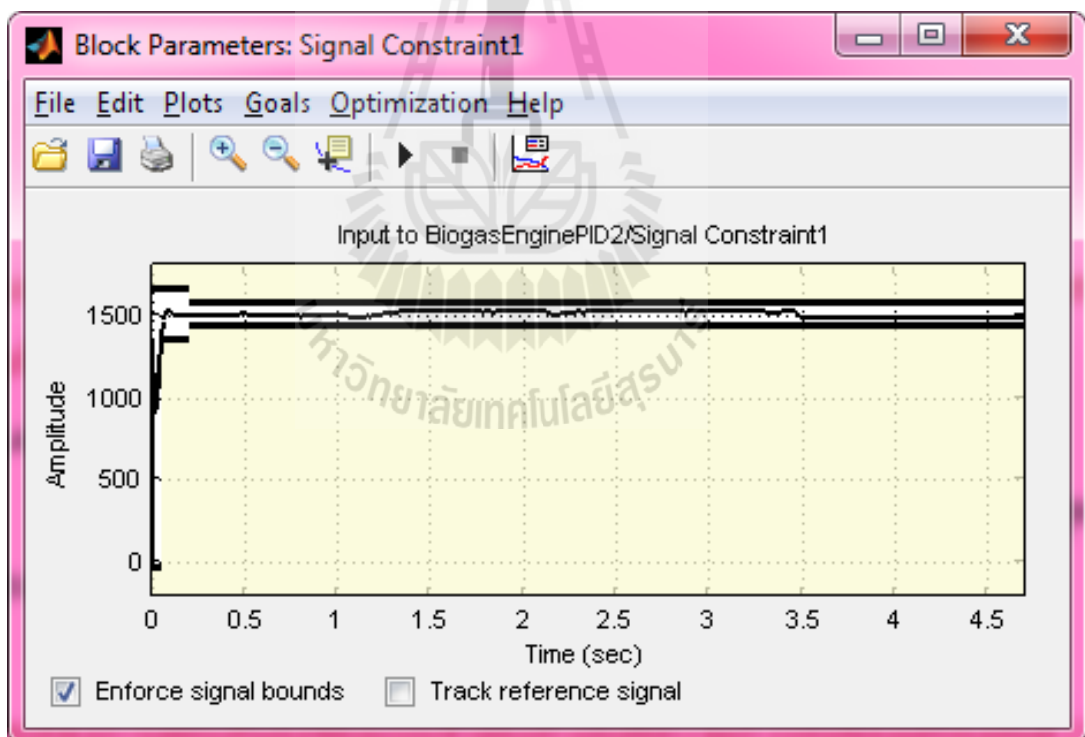
จากการประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องยนต์เบนซิน (SI engine) และมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Motor) ที่สร้างไว้ในบทที่ 3 แบบจำลองที่สร้างมีความสำคัญเพราะเป็นตัวกำหนดรูปแบบการตอบสนองของความเร็วรอบของเครื่องยนต์ให้มีการตอบสนองตามที่ต้องการ โดยอัลกอริทึมจะทำหน้าที่ปรับค่าตัวแปรของตัวควบคุมพีไอของพลันต์หรือระบบควบคุมความเร็วรอบของเครื่องยนต์ โดยการควบคุมตำแหน่งลิ้นปีกผีเสื้อด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ให้มีการตอบสนองตามแบบจำลองอ้างอิง จากปัจจัยความต้องการ และปัญหาในการรักษาความเร็วรอบของเครื่องยนต์จะถูกใช้พิจารณา เพื่อสร้างแบบจำลองอ้างอิงที่เป็นรูปแบบการตอบสนองความเร็วรอบของเครื่องยนต์ที่ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งจะต้องคำนึงถึงขีดจำกัดและความสามารถของฮาร์ดแวร์ เพราะจะมีผลโดยตรงกับรูปแบบการตอบสนองของความเร็วรอบเครื่องยนต์และความเป็นไปได้ในการควบคุม ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองอ้างอิงดังนี้

4.5.1 ขั้นตอนการประมาณแบบจำลองอ้างอิง

1. สร้างแบบจำลองระบบควบคุมความเร็วรอบของเครื่องยนต์ในระบบปิดและมีตัวควบคุมแบบพีไอ ในโปรแกรม MATLAB/Simulink แสดงดังรูปที่ 4.13
2. ระบบที่พิจารณามีตัวแปรทั้งหมด 10 ตัว คือ I , L_d , R , k_b , k_t , c , f , I_e , V_m และ b แต่สำหรับการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้การตอบสนองความเร็วรอบของเครื่องยนต์ตามที่ต้องการ จะหาเพียง 2 ตัว คือ K_p และ K_i ซึ่งเป็นค่าตัวแปรควบคุมพีไอของแบบจำลองอ้างอิง สำหรับตัวแปรอีก 10 ตัว คือ ค่าของตัวแปรที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ที่ได้จากจัดทำในข้างต้น
3. การกำหนดลักษณะการตอบสนองที่เหมาะสมที่สุดเพื่อหาค่าตัวแปรตัวควบคุมของแบบจำลองอ้างอิงจะใช้เครื่องมือของโปรแกรม MATLAB/Simulink ในส่วนของ Response Optimization โดยข้อกำหนดในการออกแบบคือ Percent Overshoot น้อยกว่า 5%, Rise Time น้อยกว่า 0.05 sec. และ Settling Time น้อยกว่า 0.2 sec. ซึ่งข้อกำหนดเหล่านี้จะใช้กำหนด Signal Constrain ในหน้าต่างของโปรแกรมเพื่อกำหนดขอบเขตการตอบสนองของแบบจำลองอ้างอิง ดังรูปที่ 4.14 สำหรับวิธีการใช้งาน Response Optimization ได้แสดงไว้ใน ภาคผนวก ง



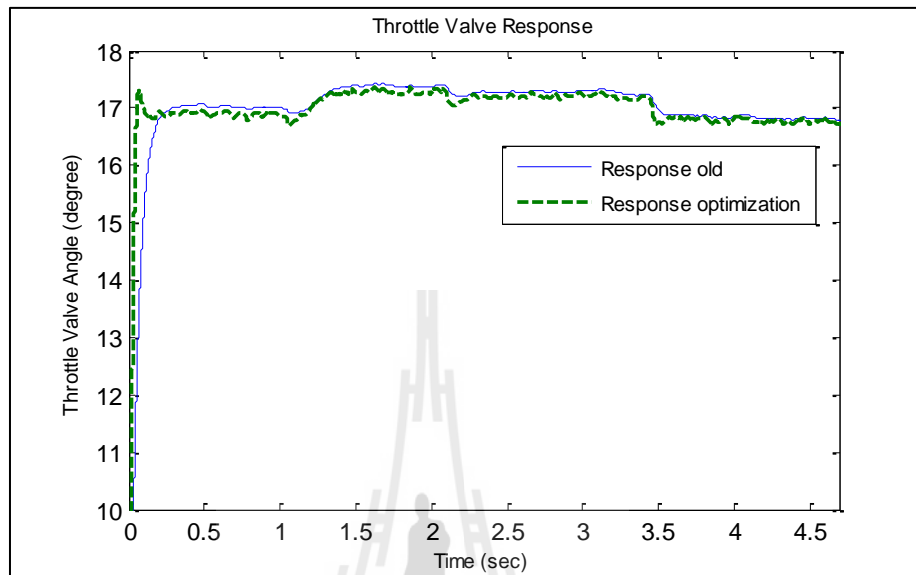
รูปที่ 4.13 แผนภาพของระบบควบคุมความเร็วรอบเครื่องยนต์เบนซินในระบบปิด และมีตัวควบคุมแบบพีไอในโปรแกรม MATLAB/Simulink



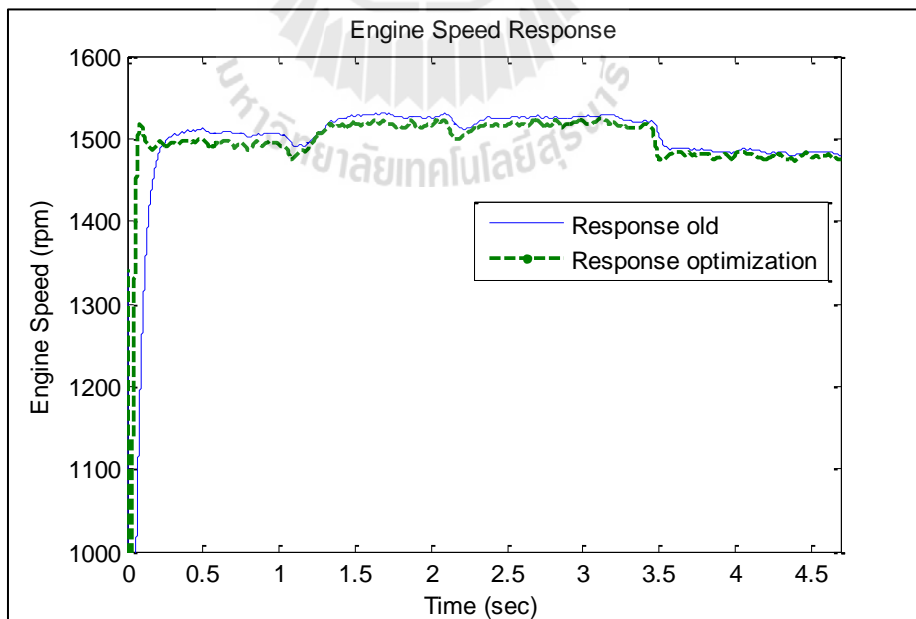
รูปที่ 4.14 แผนภาพแสดงการตอบสนองของแบบจำลองอ้างอิงที่ได้จากการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของตัวควบคุมพีไอโดยใช้ Response Optimization

4.5.2 ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวควบคุมพีไอ

ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวควบคุมพีไอ คือ $K_p = 14.51$ และ $K_i = 0.1$

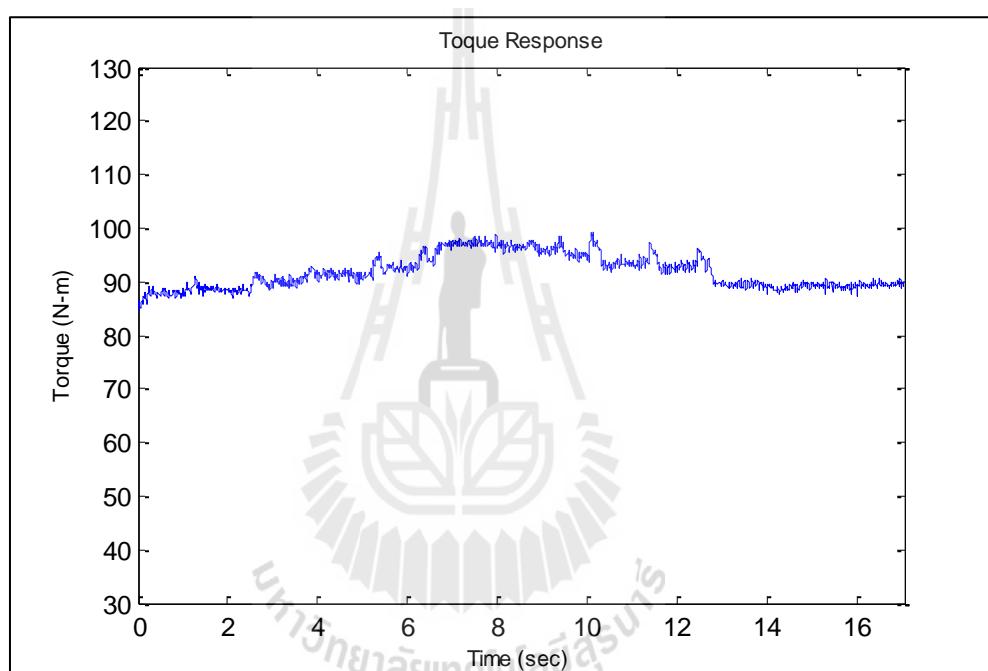


รูปที่ 4.15 แสดงผลการเปรียบเทียบการตอบสนองของตำแหน่งลิ้นปีผีเสื้อ

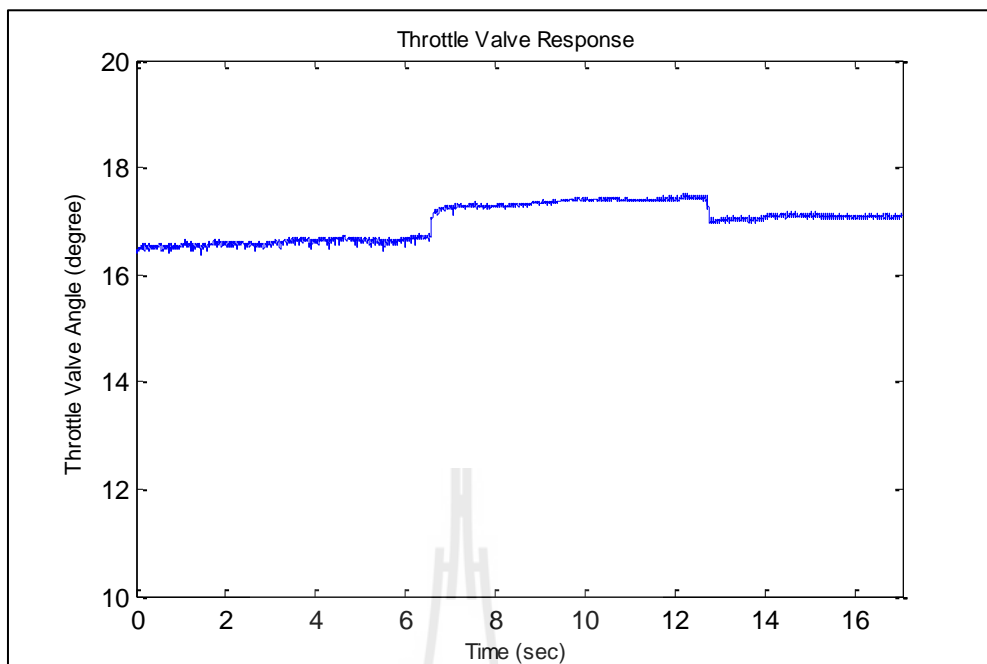


รูปที่ 4.16 แสดงผลการเปรียบเทียบการตอบสนองความเร็วรอบของเครื่องยนต์ที่ 1500 RPM

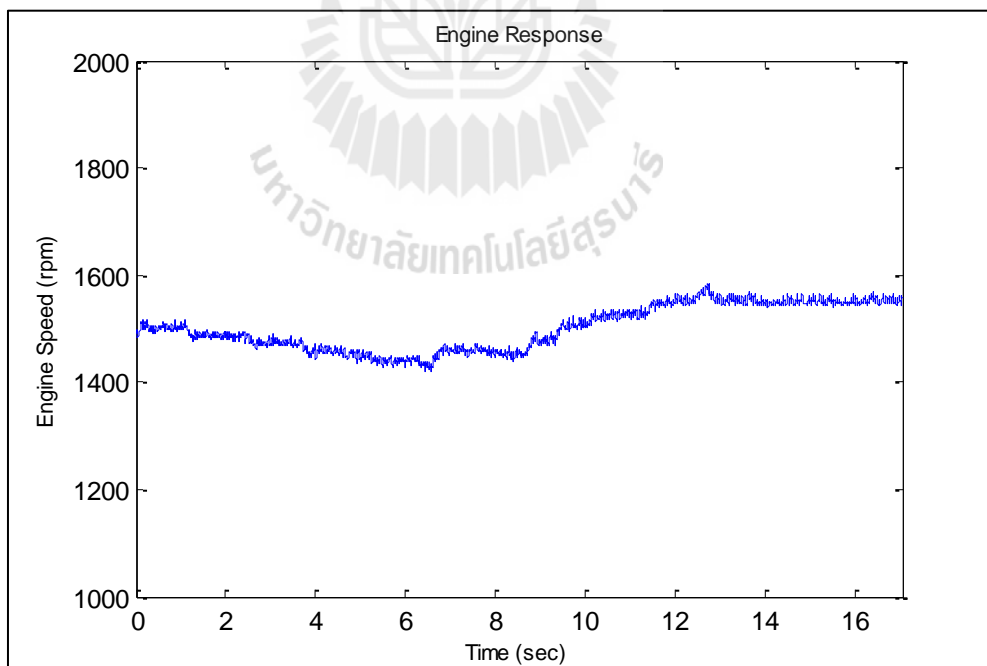
จากผลการประมาณแบบจำลองอ้างอิงตัวควบคุมแบบพีไอ ในรูปที่ 4.15 และ 4.16 ตามขอบเขตที่กำหนดในโปรแกรม MATLAB/Simulink ในส่วนของ Response Optimization พบว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบผลการตอบสนองของตำแหน่งลื่นปีกผีเสื้อและความเร็วรอบของเครื่องยนต์ที่ใช้ค่าพีไอที่ได้จากการสุ่ม เปรียบเทียบกับผลการตอบสนองของแบบจำลองอ้างอิงที่ได้มีการตอบสนองกำหนดขอบเขตให้เป็นไปตามเงื่อนไขที่กำหนด จะเห็นได้ว่าผลการตอบสนองของเครื่องยนต์จะมีการทำงานที่รวดเร็วกว่าขึ้น และแบบจำลองอ้างอิงที่สร้างขึ้นจะถูกนำไปใช้ในการควบคุมความเร็วรอบของเครื่องยนต์ในทางปฏิบัติ แสดงดังรูปที่ 4.17, 4.18 และ 4.19



รูปที่ 4.17 ภาระกรรมของเครื่องยนต์



รูปที่ 4.18 ผลการตอบสนองของตำแหน่งลิ้นปีกผีเสื้อ



รูปที่ 4.19 ผลการตอบสนองความเร็วรอบของเครื่องยนต์

เมื่อนำค่า K_p และ K_i ที่ได้จากแบบจำลองอ้างอิงไปควบคุมการทำงานของเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้า โดยทำการปรับระบบด้วยการเพิ่มภาระกรรมให้กับเครื่องยนต์ ดังรูปที่ 4.17 จะส่งผลให้ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ลดต่ำลง ดังรูปที่ 4.19 ซึ่งขอบเขตการทำงานของเครื่องยนต์จะอยู่ที่ 1500 ± 50 รอบต่อนาที เมื่อความเร็วรอบของเครื่องยนต์อยู่ต่ำกว่าขอบเขตการทำงาน ระบบควบคุมจะสั่งการให้ปรับเพิ่มตำแหน่งลินปีกผีเสื้อ ดังรูปที่ 4.18 เพื่อให้ความเร็วรอบของเครื่องยนต์เพิ่มขึ้นอยู่ในขอบเขตที่กำหนด และเมื่อทำการลดภาระกรรมของเครื่องยนต์ จะส่งผลให้ความเร็วรอบของเครื่องยนต์สูงกว่าขอบเขตที่กำหนด ระบบควบคุมจะสั่งการให้ปรับลดตำแหน่งลินปีกผีเสื้อ เพื่อให้ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ลดต่ำลงเช่นกัน ระบบควบคุมจะทำงานเช่นนี้ไปตลอดระยะเวลาการทำงานของเครื่องยนต์ในการผลิตกระแสไฟฟ้า

4.6 เครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพ

สำหรับงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เครื่องยนต์เบนซินขนาด 3000 ซีซี จำนวน 6 สูบ ดังรูปที่ 4.8 ซึ่งเครื่องยนต์ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเครื่องที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว ดังนั้นก่อนจะนำมาใช้งานได้ทำการทดสอบกำลังและแรงบิดของเครื่องยนต์ เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกำลังและแรงบิด หลังจากได้ทำการปรับปรุงเป็นเครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพ รายละเอียดของเครื่องยนต์มีดัง ตารางที่ 4.5



รูปที่ 4.20 เครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพ

ตารางที่ 4.6 แสดงรายละเอียดเครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพ

Engine	Toyota 2JZ VVTI
Engine power (HP)	230
Engine torque (N-m)	290
MAX. Speed (rpm)	6000
Bore (mm)	86
Stroke(mm)	86
Orifice diameter (mm)	69
Compression ratio	10:1

4.6.1 เครื่องมือทดสอบเครื่องยนต์

ในการทดสอบเครื่องยนต์เบนซิน (เครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟ : Spark ignition engine) จะแตกต่างจากการทดสอบเครื่องยนต์ดีเซล (เครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด : Compression Ignition Engine) เนื่องจากเครื่องยนต์เบนซินนั้นจะมีกำลังและแรงบิดในความเร็วรอบสูง ส่วนเครื่องยนต์ดีเซลจะมีกำลังและแรงบิดในความเร็วรอบต่ำ ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ไดนาโมมิเตอร์ ดังรูปที่ 4.5 ไดนาโมมิเตอร์ที่ใช้ทดสอบนั้นเป็นแบบ Hydraulic Brake ซึ่งสามารถปรับขนาดของ Load ได้ด้วยการปรับอัตราการไหลของน้ำที่เข้าสู่ไดนาโมมิเตอร์ รายละเอียดของไดนาโมมิเตอร์และเครื่องมือวัดอื่น ๆ มีดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.21 ไดนาโมมิเตอร์ (Dynamometer)

ตารางที่ 4.7 แสดงรายละเอียดของไดนาโมมิเตอร์ (Dynamometer)

อุปกรณ์	รายละเอียด	คุณสมบัติ
Dynamometer	Make	SAJ Group
	Capacity	160 HP.
	Type	Hydraulic
	Maximum Speed	7500 RPM
	Load	Water
Load Cell	Model	614
	Type	M
	Range	300 kg
	Output	2 mV/V

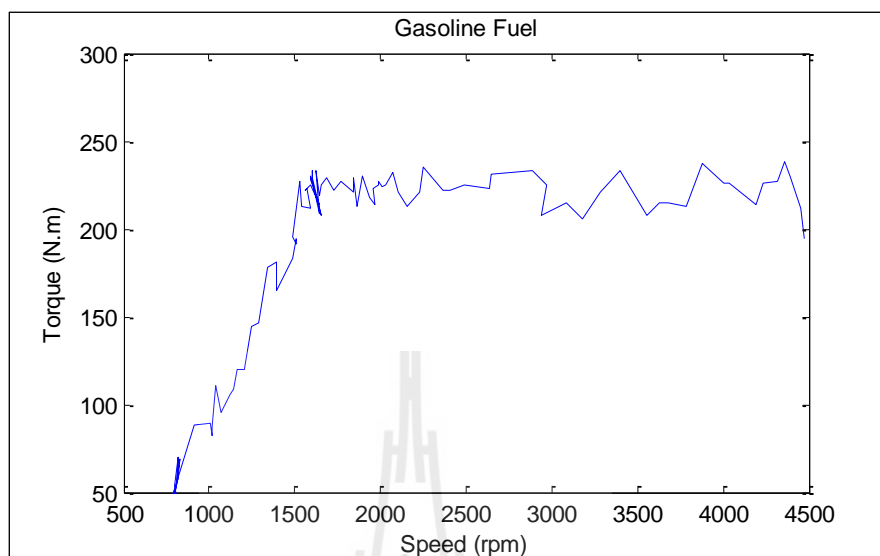
4.6.2 ขั้นตอนการทดสอบกำลังและแรงบิดของเครื่องยนต์

ทำการทดสอบโดยใช้คอมพิวเตอร์ในการวัดกำลังและแรงบิดของเครื่องยนต์ ซึ่งโปรแกรมที่ใช้ทดสอบคือ MATLAB/Simulink เชื่อมต่อสัญญาณการควบคุมระหว่างคอมพิวเตอร์กับไดนาโมมิเตอร์และเครื่องยนต์ การเชื่อมต่อจะเป็นลักษณะเดียวกันกับระบบควบคุมความเร็วรอบของเครื่องยนต์ การวัดกำลังและแรงบิดของเครื่องยนต์นั้น ไดนาโมมิเตอร์จะมี Load Cell เป็นตัววัดแรงเบรกของไดนาโมมิเตอร์และส่งสัญญาณออกมาในรูปของความต่างศักย์ (Voltage) ที่เป็น Analog Signal จะถูกส่งต่อไปยังบอร์ด RAPCON เพื่อแปลงสัญญาณ Analog เป็น Digital แล้วส่งกลับไปประมวลผลในโปรแกรม MATLAB/Simulink ทำการทดสอบดังนี้

ขั้นตอนการทดลองที่ 1 และ 2

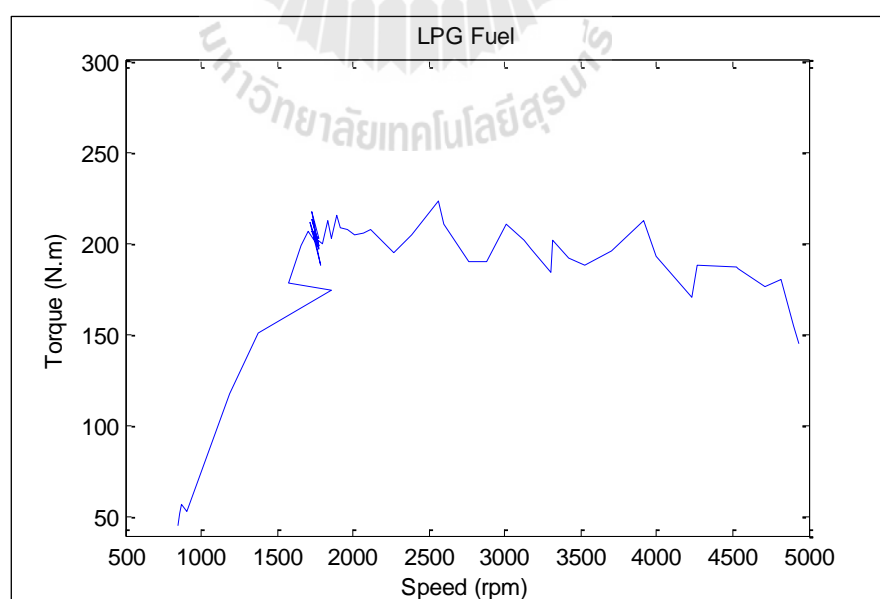
1. อุ่นเครื่องยนต์ด้วยน้ำมันเบนซิน โดยรอบเดินเบาที่ 1,000 รอบต่อนาที หมุน Loading Valve บนไดนาโมมิเตอร์ทวนเข็มนาฬิกาเพื่อปลดภาระกรรม(แรงบิด) ที่อยู่ในไดนาโมมิเตอร์ให้หมดไปแล้วให้คงสภาพนั้นไว้จนอุณหภูมิเครื่องยนต์ขึ้นไปถึง 70 องศาเซลเซียส
2. เปิดองศาลิ้นปีกผีเสื้อจนสุดหรือที่ 90 องศา ความเร็วรอบของเครื่องยนต์จะมีค่ามากที่สุดเนื่องจากไม่มีภาระกรรมในระบบ
3. พิ่มภาระกรรมให้กับเครื่องยนต์โดยค่อยๆ หมุน Loading Valve บนไดนาโมมิเตอร์ตามเข็มนาฬิกาจนกระทั่งรอบเครื่องยนต์จากตำแหน่งสูงสุดให้มาอยู่ที่ 1,000 รอบต่อนาที บันทึกผลแรงบนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink

ผลการสอบที่ 1 ใช้น้ำมันเบนซิน



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงบิด(ใช้น้ำมันเบนซินเป็นเชื้อเพลิง)

ผลการสอบที่ 2 ใช้ LPG เป็นเชื้อเพลิง



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงบิด(ใช้ LPG เป็นเชื้อเพลิง)

การทดสอบที่ 2 ใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิง

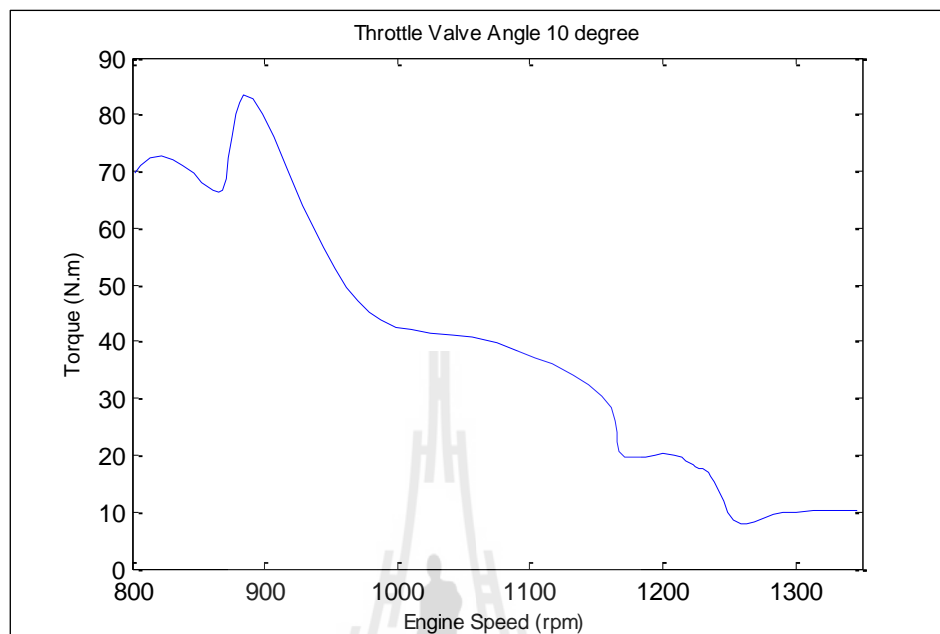
วัตถุประสงค์เพื่อทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์เบนซินเมื่อใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันเบนซินและ LPG ซึ่งการทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์โดยทั่วไปกับเครื่องยนต์สันดาปภายในเกือบทุกชนิด ทำการทดสอบ โดยเปิดองศาลิ้นปีกผีเสื้อสูงสุดโดยใช้น้ำมันเบนซินหรือ LPG แต่สำหรับงานวิจัยนี้จะทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์เบนซินเพื่อใช้ในการผลิตไฟฟ้าขนาด 20 กิโลวัตต์ และใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิง เนื่องจากการผลิตไฟฟ้าขนาด 20 กิโลวัตต์จะต้องใช้แรงบิดของเครื่องยนต์ ประมาณ 90 N-m ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1500 รอบต่อนาที แรงบิดนี้จะเพียงพอสำหรับการผลิตไฟฟ้า โดยทำการกำหนดขอบเขตของการทดลองเพื่อหาจุดที่เหมาะสมของตำแหน่งลิ้นปีกผีเสื้อสำหรับอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพที่ 100 ลิตรต่อนาทีที่เครื่องยนต์ยังคงสามารถทำงานได้ ตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบ แสดงไว้ใน ตารางที่ 4.7 ดังนี้

1. อุ่นเครื่องยนต์ด้วยน้ำมันเบนซิน โดยรอบเดินเบาที่ 1,000 รอบต่อนาที หมุน Loading Valve บนไดนาโมมิเตอร์ทวนเข็มนาฬิกาเพื่อปลดภาระกรรม (แรงบิด) ที่อยู่ในไดนาโมมิเตอร์ให้หมดไปแล้วให้คงสภาพนั้นไว้จนอุณหภูมิเครื่องยนต์ขึ้นไปถึง 70 องศาเซลเซียส
2. รับความเร็วรอบของเครื่องยนต์ด้วยการปรับตำแหน่งลิ้นปีกผีเสื้อตั้งและเปลี่ยนเชื้อเพลิงจากน้ำมันเบนซินเป็นก๊าซชีวภาพ โดยความเร็วรอบของเครื่องยนต์เท่ากับความเร็วรอบในขณะที่ใช้น้ำมันเบนซินเป็นเชื้อเพลิง
3. เพิ่มภาระกรรมให้กับเครื่องยนต์โดยค่อย ๆ หมุน Loading Valve บนไดนาโมมิเตอร์ตามเข็มนาฬิกาจนกระทั่งรอบของเครื่องยนต์ลดลงจากความเร็วรอบสูงสุดในแต่ละตำแหน่งองศาลิ้นปีกผีเสื้อมาถึงตำแหน่งความเร็วรอบ 1,500 รอบต่อนาที บันทึกผลแรงบิดบนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink

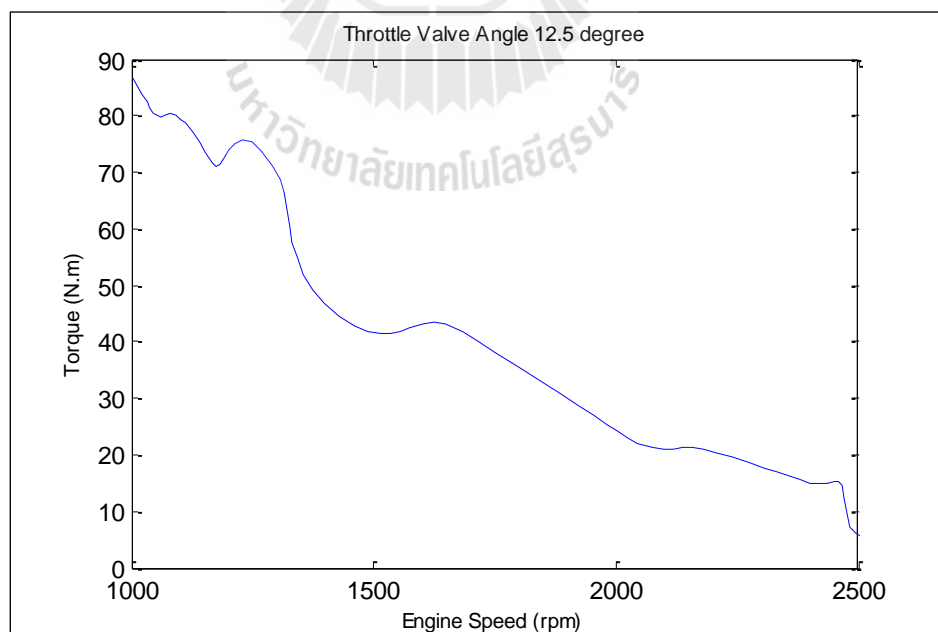
ตารางที่ 4.8 ตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์เมื่อใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิง

ตัวแปร	เครื่องยนต์เบนซิน
ตัวแปรควบคุม	- อัตราการไหลก๊าซชีวภาพ 100 l/min - ตำแหน่งลิ้นปีกผีเสื้อ 10, 12.5, 15, 17.5 และ 20 องศา
ตัวแปรอิสระ	- ความเร็วรอบของเครื่องยนต์
ตัวแปรตาม	- แรงบิดของเครื่องยนต์

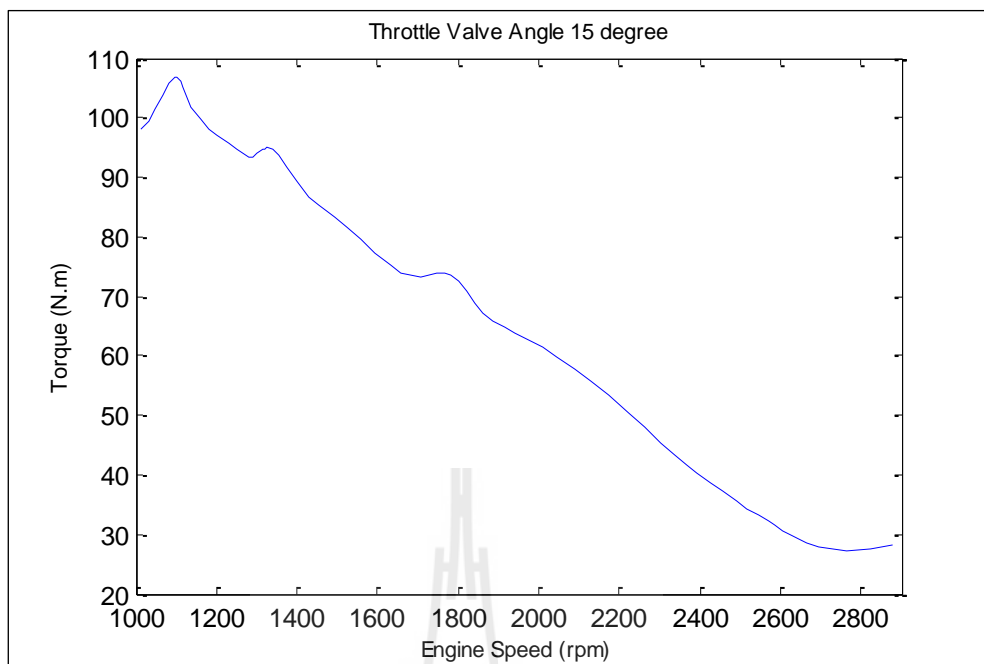
ผลการทดสอบที่ 3 ใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิง



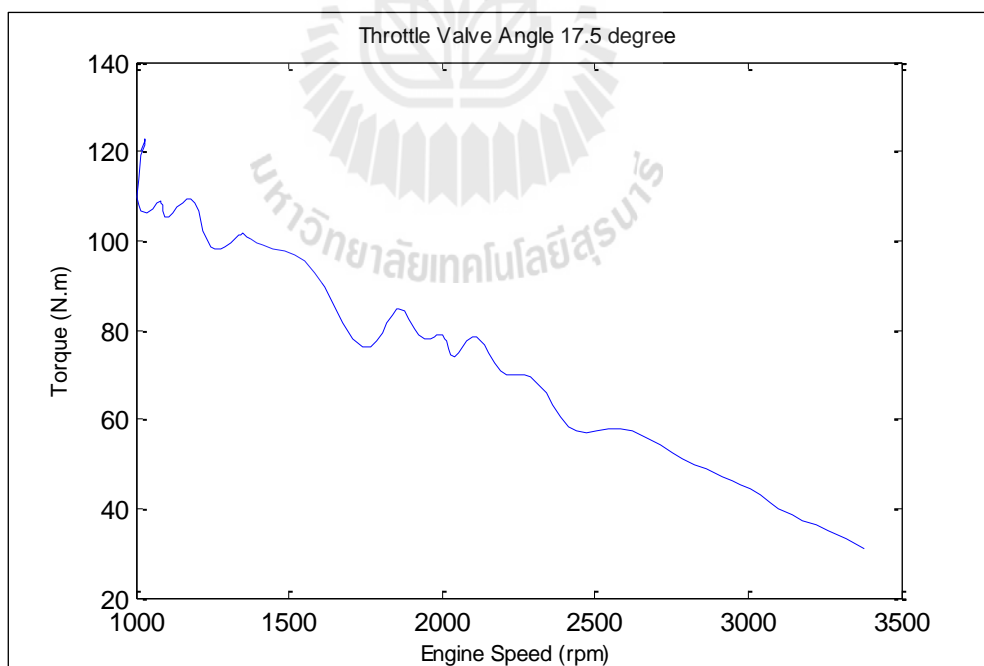
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงบิดที่ตำแหน่งลิ้นปีกผีเสื้อ 10 องศา



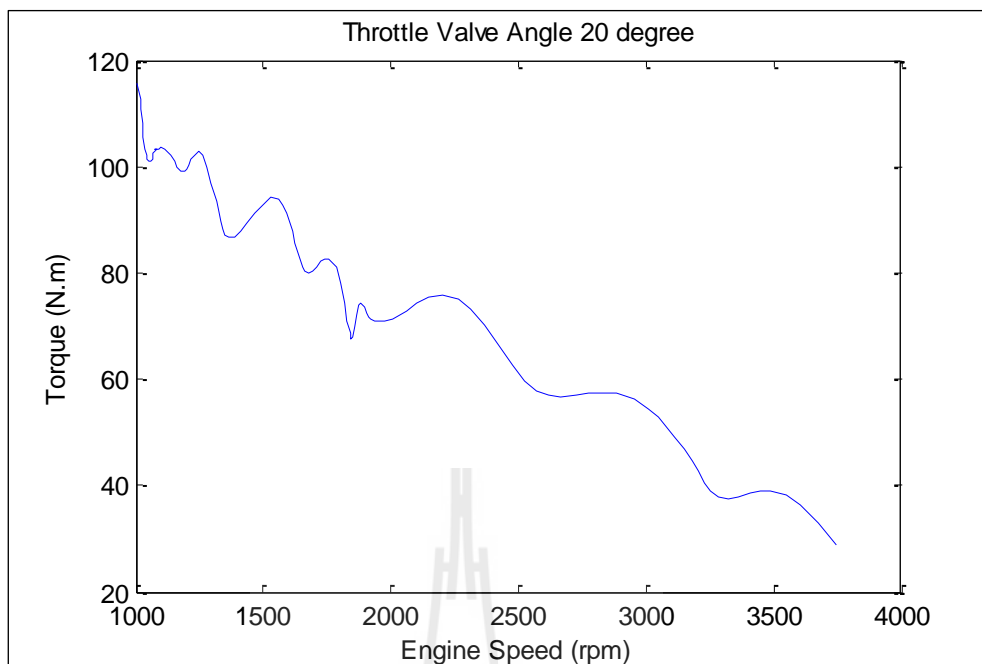
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงบิดที่ตำแหน่งลิ้นปีกผีเสื้อ 12.5 องศา



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงบิดที่ตำแหน่งลิ้นปีกผีเสื้อ 15 องศา



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงบิดที่ตำแหน่งลิ้นปีกผีเสื้อ 17.5 องศา



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงบิดที่ตำแหน่งลิ้นปีกผีเสื้อ 20 องศา

ผลที่ได้จากการทดสอบเครื่องยนต์โดยใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงด้วยและกำหนดอัตราการไหลของเชื้อเพลิงที่ 100 ลิตรต่อนาที พบว่าที่ตำแหน่งลิ้นปีกผีเสื้อทำงานในช่วง 17.5 – 20 องศา โดยที่อัตราการไหลของอากาศประมาณ 6.65 m/s เนื่องจากการผลิตไฟฟ้าต้องใช้แรงบิดประมาณ 90 N-m ในการผลิตกระแสไฟฟ้า 70 % ของโหลดสูงสุด

4.7 สรุป

การทำงานของระบบผลิตกระแสไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ เริ่มต้นด้วยระบบทำความสะอาดก๊าซชีวภาพที่สามารถทำให้คุณสมบัติของก๊าซอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของการนำไปใช้งานสำหรับเครื่องยนต์สันดาปภายใน โดยก๊าซมีเทนมากกว่า 65 เปอร์เซ็นต์และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์น้อยกว่า 23 ppm ในส่วนระบบควบคุมแรงดันที่สามารถเพิ่มแรงดันก๊าซชีวภาพให้มีการส่งถ่ายก๊าซที่เพียงพอต่อความต้องการของเครื่องยนต์ที่ 100 ลิตรต่อนาที และระบบควบคุมความเร็วของเครื่องยนต์ที่ 1500 รอบต่อนาที ที่มีการตอบสนองการทำงานที่รวดเร็วต่อการทำงานของระบบ

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอ การดัดแปลงเครื่องยนต์เบนซินสำหรับใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิง ระบบทำความสะอาดก๊าซชีวภาพ ระบบควบคุมแรงดันก๊าซชีวภาพและการออกแบบระบบควบคุมความเร็วรอบของเครื่องยนต์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าขนาด 20 กิโลวัตต์ ซึ่งได้แบ่งขั้นตอนของการทดลองดังนี้

1. ระบบทำความสะอาดก๊าซชีวภาพ จะกรองก๊าซที่ไม่พึงประสงค์ออกจากก๊าซชีวภาพ เช่น CO_2 , H_2S เป็นต้น เพื่อให้ก๊าซชีวภาพมีคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการเผาไหม้ของเครื่องยนต์เบนซินได้ แสดงดังตารางที่ 5.1 แสดงคุณสมบัติของก๊าซชีวภาพก่อนและหลังผ่านระบบทำความสะอาดก๊าซชีวภาพ

ตารางที่ 5.1 แสดงคุณสมบัติของก๊าซชีวภาพก่อนและหลังทำความสะอาด

ก๊าซ	ก่อนทำความสะอาด	หลังทำความสะอาด
มีเทน (CH_4)	58.4%	69.2%
คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)	39.2%	23.2%
ออกซิเจน (O_2)	0.2%	4.2%
ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S)	>2000 ppm	2 ppm

2. ระบบควบคุมแรงดันก๊าซชีวภาพให้มีความดันอยู่ที่ 3 - 7 บาร์ และสามารถส่งก๊าซชีวภาพ 100 ลิตรต่อนาที เข้าสู่เครื่องยนต์ได้

3. ได้ออกแบบระบบควบคุมความเร็วรอบของเครื่องยนต์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าขนาด 20 กิโลวัตต์ ผ่านมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในการเปิด - ปิด ongsalinnpiakissue โดยเลือกความเร็วรอบเฉลี่ย 1500 รอบต่อนาที, แรงบิด 90 N-m ให้เหมาะสมกับการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 20 กิโลวัตต์

4. การประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องยนต์เบนซินที่มีการควบคุมความเร็วรอบ 1500 รอบต่อนาที และมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ควบคุมลิ้นปีกผีเสื้อ โดยวิธีการระบุเอกลักษณ์ของระบบ

5. ออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอ เพื่อใช้ควบคุมความเร็วรอบของเครื่องยนต์ให้เหมาะสมกับการผลิตกระแสไฟฟ้าขนาด 20 กิโลวัตต์

6. การทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์เบนซินขนาด 3,000 ซีซี ที่ภาระกรรม 90 N-m โดยทำการทดสอบที่ 70 เปอร์เซ็นต์ของโหลดสูงสุดที่ความเร็วรอบ 1,500 รอบต่อนาที

- กำลังเบรกสูงสุด 14.13 กิโลวัตต์
- อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก 488.32 กรัม/กิโลวัตต์-ชั่วโมง
- ประสิทธิภาพทางความร้อนของน้ำมันเชื้อเพลิงเบรก 30 เปอร์เซ็นต์
- อัตราส่วนอากาศต่อน้ำมันเชื้อเพลิง 9.34 : 1

5.2 ข้อเสนอแนะ

การออกแบบระบบควบคุมเครื่องยนต์เบนซินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ เพื่อให้ระบบการทำงานของเครื่องยนต์มีเสถียรภาพมากขึ้น มีข้อเสนอแนะดังนี้

1. ในกระบวนการทำความสะอาดก๊าซชีวภาพควรทำการตรวจสอบคุณภาพก๊าซชีวภาพอย่างน้อยเดือนละ 1 ครั้ง เนื่องจากวัสดุที่ใช้ในการลดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จะเสื่อมสภาพตามระยะเวลาการใช้งาน

2. ในการเพิ่มแรงดันไม่ควรเพิ่มแรงดันก๊าซชีวภาพในถังเก็บสูงเกินความสามารถของถังบรรจุ เพื่อป้องกันอันตราย

3. ในการอัดก๊าซชีวภาพมาทดสอบคุณภาพของก๊าซชีวภาพ ควรทำการแวกคัมถังบรรจุไม่ให้มีก๊าซอื่น ๆ ตกค้าง เช่น ออกซิเจน (O_2) และไนโตรเจน (N_2) เป็นต้น เพื่อให้ได้ข้อมูลคุณภาพของก๊าซชีวภาพที่ถูกต้องมากขึ้น

4. ในการเก็บข้อมูลของเครื่องยนต์เพื่อนำมาใช้ในการประมาณค่าตัวแปรของระบบ ควรเก็บข้อมูลในสภาพแวดล้อมเดียวกันกับการทำงานของเครื่องยนต์ เนื่องจากสภาพแวดล้อมต่างๆ มีผลต่อระบบของเครื่องยนต์ ได้แก่ อุณหภูมิ น้ำหล่อเย็น อุณหภูมิ น้ำมันเครื่องยนต์ เป็นต้น

รายการอ้างอิง

- จันทิมา ชั่งสิริพร วันใหม่ เลิศตระการสกุล ผกาพรรณ อ่อนขวัญเพชร และนิรติศัย รักมาก (2551). การกำจัด H_2S ในแก๊สชีวภาพด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 7, 8-9 พฤษภาคม; หน้า 84-88.
- ณัฐวุฒิ พลศรี และรัชพล สันติวารกร (2554). การศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะของเครื่องยนต์ดีเซลดัดแปลงเมื่อใช้น้ำมันเบนซิน ก๊าซหุงต้มและก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิง. วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยขอนแก่น: มกราคม-มีนาคม 2554.
- ปิยะพงษ์ สิงห์บัว และรัชพล สันติวารกร (2554). การอัดก๊าซชีวภาพและใช้ประโยชน์ในรถจักรยานยนต์. วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยขอนแก่น: 39-50
- ประเทือง พันแก้ว (2554). การหาสมรรถนะของเครื่องยนต์เล็กดีเซลโดยใช้เชื้อเพลิงร่วมกับก๊าซชีวภาพ. การประชุมวิชาการครุศาสตร์อุตสาหกรรมระดับชาติ ครั้งที่ 4, 7-8 กรกฎาคม; หน้า 156-161.
- วีระศักดิ์ กรัยวิเชียร (2542). เครื่องยนต์เผาไหม้ภายในและทฤษฎีการคำนวณ. (แปลจากต้นฉบับของ Heywood, J.B., 1998); วิทยพัฒน์, กรุงเทพฯ. 564 หน้า.
- สุชน ตั้งทวีวัฒน์ ่องอาจ ส่องสี และบุญล้อม ชีวะอิสระกุล (2555). การกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกจากก๊าซชีวภาพสำหรับใช้ในชุมชน. แก่นเกษตร 40 ฉบับพิเศษ 2 : 201-204
- สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน (2550). สถานการณ์พลังงานปี 2550 และแนวโน้มปี 2551. <http://www.energy.go.th>
- Bindu, R., and Namboothiripad, M. K. (2012). Tuning of PID Controller for DC Servo Motor using Genetic Algorithm. **International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering**, March; vol.2(3): pp.310-314.
- Cesario, N., Taglialatela, F., and Lavorgna, M. (2005). SI Engine Control Applications Based on In-Cylinder Pressure Signal Processing. **IEEE Conference on Vehicle Power and Propulsion**, September 7-9; pp.790-800. **Safety, Advanced System Application R&D via Remo De Feo 1**. pp.790-800.

- Guo, J., Qin, C., and Schmitz, G. (2010). Numerical Investigation on the Performance of Spark Ignition Engine Used for Electricity Production Fuelled by Natural Gas/Liquefied Petroleum Gas-Biogas Blends with Modelica. **The 2nd International Conference on Computer Engineering and Technology**, April 16-18; vol.6: pp.682-687.
- Guo, J. Qin, C., Dai, W., and Tang, J. (2010). Numerical Investigation on the Effects of LPG-Biogas Blends on Engine Combustion and Emission. **International Conference on Environmental science and Information Application Technology**, July, 17-18: Vol.3: pp.179-182.
- Luo, L., Guo, L., and Fu, H. (2011). The Control and Modeling of Diesel Generator Set in Electric PropulsionShip. **International Journal on Information Technology and Computer Science**. pp.31-37.
- Tran, M, T., Pham, X, M., Nguyen, D, H., and Huynh, T, C. (2010). A Study on Characteristics of Power Generation System using Biogas from the Waste of Pig Farm. **International Union of Food Science and Technology**. pp.1-5.
- Wang, L., and Lin, P.Y. (2009). Analysis of a Commercial Biogas Generation System Using a Gas Engine-Induction Generator Set. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, March; Vol.24(1): pp.230-239.



ภาคผนวก ก

การใช้งาน Arduino

ก.1 ข้อมูลทางเทคนิค Arduino Board

Arduino is an open-source physical computing platform based on a simple i/o board and a development environment that implements the Processing/Wiring language. Arduino can be used to develop stand-alone interactive objects or can be connected to software on your computer (e.g. Flash, Processing, MaxMSP). The open-source IDE can be downloaded for free (currently for Mac OS X, Windows, and Linux).

The Arduino Mega is a microcontroller board based on the ATmega2560. It has 54 digital input/output pins (of which 14 can be used as PWM outputs), 16 analog inputs, 4 UARTs (hardware serial ports), a 16 MHz crystal oscillator, a USB connection, a power jack, an ICSP header, and a reset button. It contains everything needed to support the microcontroller; simply connect it to a computer with a USB cable or power it with a AC-to-DC adapter or battery to get started. The Mega is compatible with most shields designed for the Arduino Duemilanove or Diecimila.

Additional features coming with the R3 version are:

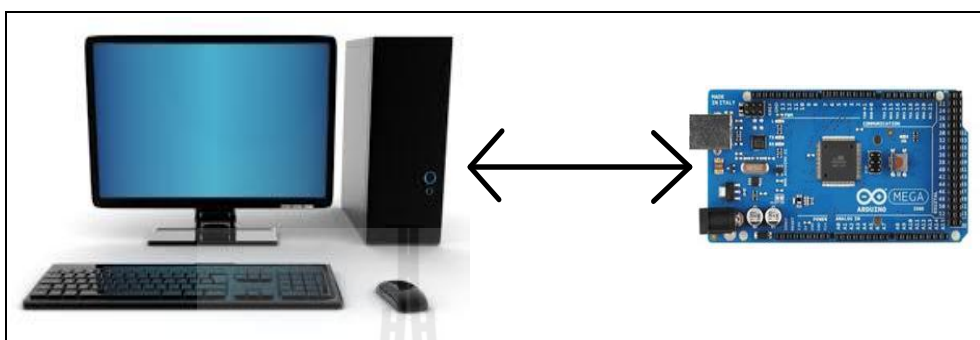
- ATmega16U2 instead 8U2 as USB-to-Serial converter.
- 1.0 pinout: added SDA and SCL pins for TWI communication placed near to the AREF pin and two other new pins placed near to the RESET pin, the IOREF that allow the shields to adapt to the voltage provided from the board and the second one is a not connected pin, that is reserved for future purposes.
- stronger RESET circuit.

Technical Specifications

Microcontroller	ATmega2560
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limits)	6-20V
Digital I/O Pins	54 (of which 14 provide PWM output , 4 UART TTL)
Analog Input Pins	16
DC Current per I/O Pin	40 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	256 KB of which 8 KB used by bootloader
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Clock Speed	16 MHz

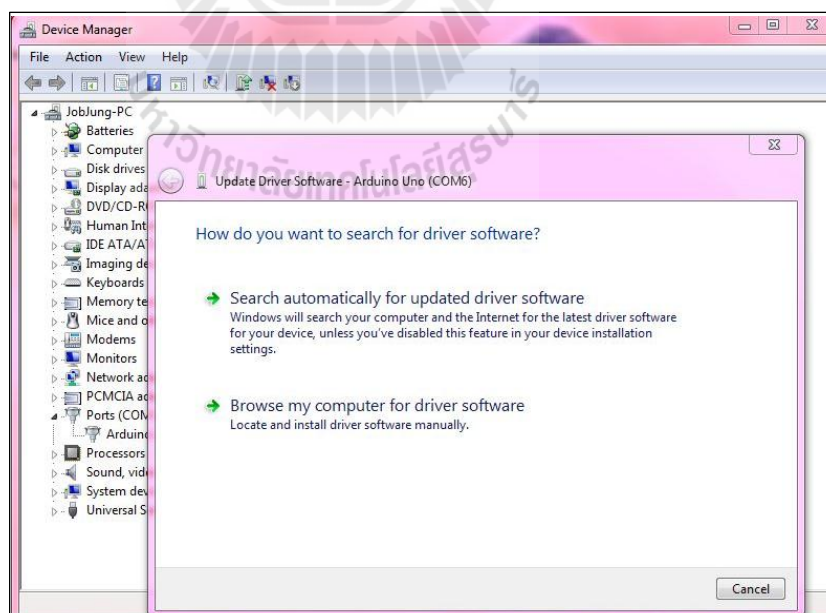
ก.2 การติดตั้ง Hardware กับโปรแกรม

1. ติดตั้ง Driver Arduino IDE ลงบนคอมพิวเตอร์จาก www.arduino.cc/en/Main/Software
2. ต่อบอร์ด Arduino เข้ากับคอมพิวเตอร์



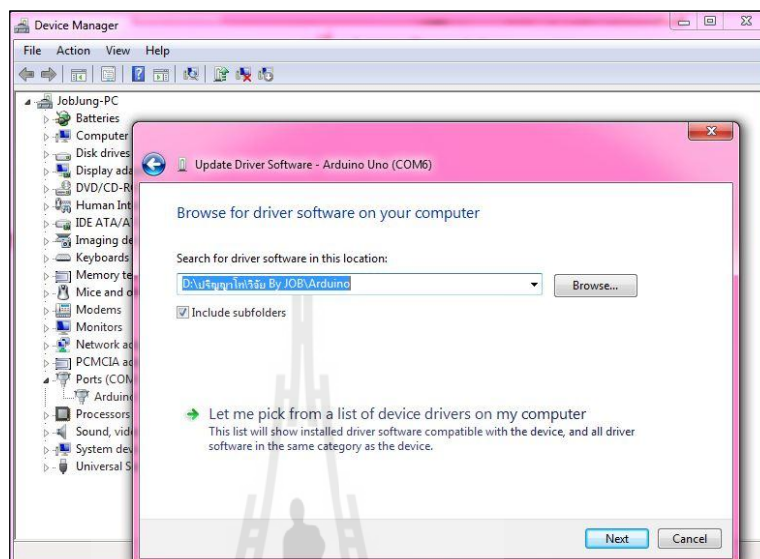
รูปที่ ก.1 การเชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์กับ Arduino

3. ให้เข้าไปที่ Device Manager แล้วคลิกขวาที่ Unknown แล้วเลือก Update Driver เลือกเมนู Browse my computer



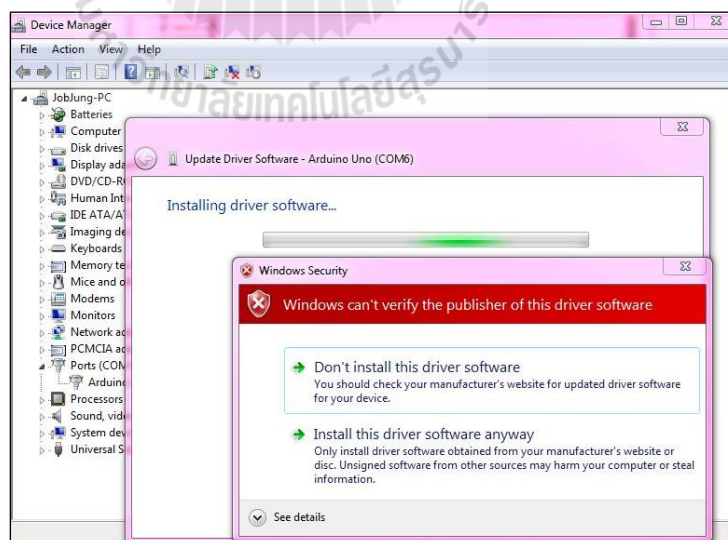
รูปที่ ก.2 การลง Driver Arduino

4. เลือก Brown ไปที่ Driver Arduino โดยจะอยู่ที่ X:xxx\arduino-x.x.x\drivers และเอาเครื่องหมายที่ช่อง Include subfolders ออก



รูปที่ ก.3 การลง Driver Arduino (ต่อ)

5. เลือก Install this driver software any ware เป็นการเสร็จสิ้นการลง Driver



รูปที่ ก.4 การลง Driver Arduino (ต่อ)



ภาคผนวก ข

การใช้งาน Rapcon

ข.1 ข้อมูลทางเทคนิคของ RABCON Board

1. INTRODUCTION

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

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

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

1.1. Specifications

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

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

1.2. Requirements

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

1.3. Absolute Maximum Ratings

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

2. HARDWARE

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

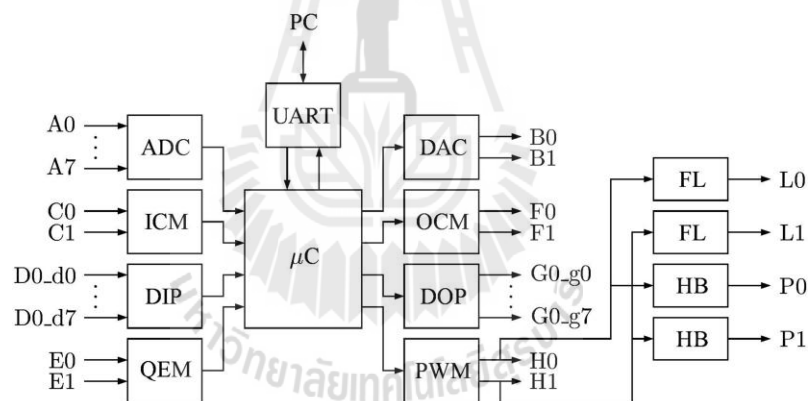


Figure 1. Functional block diagram of the board.

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

ข.2 การติดตั้ง Hardware กับโปรแกรม

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

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

5. เข้าไปหาไฟล์ที่ชื่อว่า rtwin_main.c ภายในคอมพิวเตอร์ เช่น

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

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

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

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

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

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

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

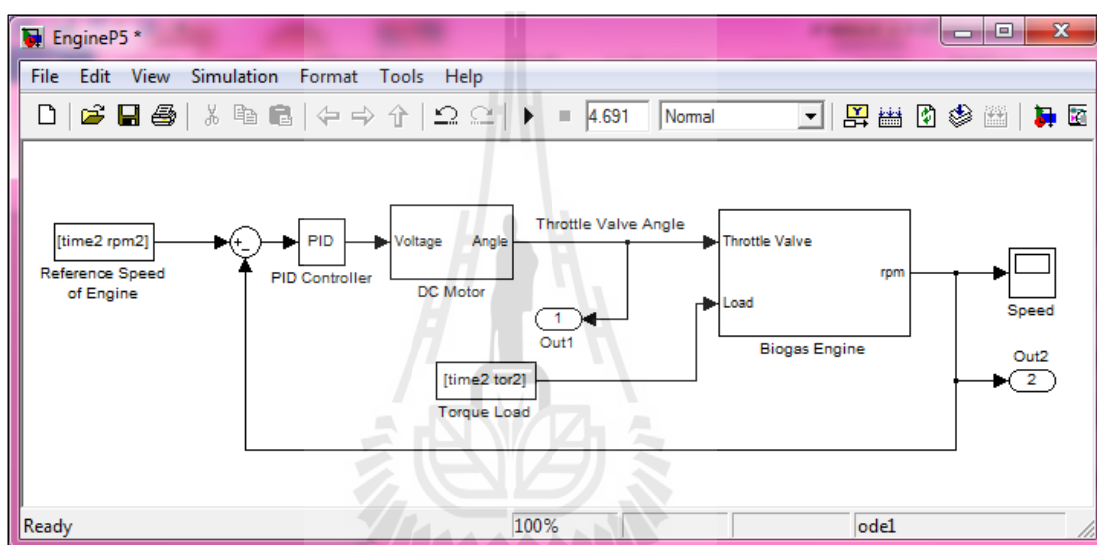


ภาคผนวก ค
การใช้งาน Simulink Parameter Estimation

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ค. การใช้โปรแกรม Simulink Parameter Estimation

1. Import Data จากการทดลองไว้ใน Work Space ของโปรแกรม MATLAB แต่ในการแสดงตัวอย่างการใช้งานจะสร้างแบบจำลองของระบบโดยใช้ Simulink โดยกำหนดตัวแปรและค่าของตัวแปรของระบบลงไปโดยข้อมูลที่ได้อาจการรันโปรแกรมเปรียบเทียบกับว่าเป็นข้อมูลจากการทดลอง โปรแกรมนี้เป็นการจำลองระบบควบคุมความเร็วรอบของเครื่องยนต์เพื่อผลิตไฟฟ้าที่ความเร็ว 1,500 รอบต่อนาที ดังรูปที่ ค.1 ซึ่งเป็นระบบที่มีตัวควบคุมแบบพีไอ และเมื่อรันโปรแกรมข้อมูลการตอบสนองถูกแสดงผลที่ Scope และจะได้ข้อมูลใน Work Space ดังรูปที่ ค.2

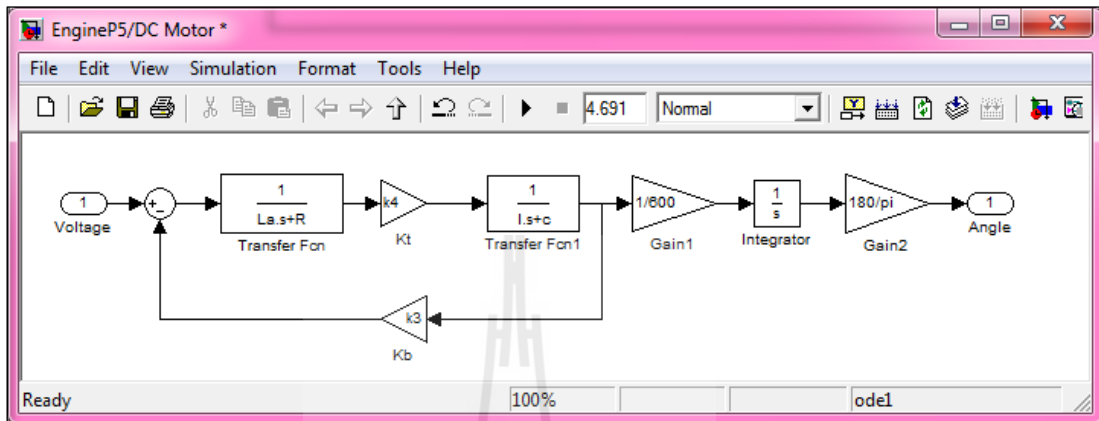


รูปที่ ค.1 แผนภาพการจำลองระบบควบคุมความเร็วรอบของเครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพ

Name	Value	Min	Max
angle	<46911x3 double>	0	17.4289
rpm	<4692x1 double>	1.4652...	1.5451...

รูปที่ ค.2 แผนภาพข้อมูลการตอบสนองใน Work Space

2. สร้างแบบจำลองของระบบโดยกำหนดตัวแปรและค่าเริ่มต้นของตัวแปรที่ต้องการให้โปรแกรมประมาณค่าตัวแปร แบบจำลองระบบควบคุมความเร็วรอบเครื่องยนต์ประกอบด้วยกัน 2 ส่วน คือ แบบจำลองมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ดังรูปที่ ค.3 และแบบจำลองเครื่องยนต์ดังรูปที่ ค.4



รูปที่ ค.3 แผนภาพแบบจำลองมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

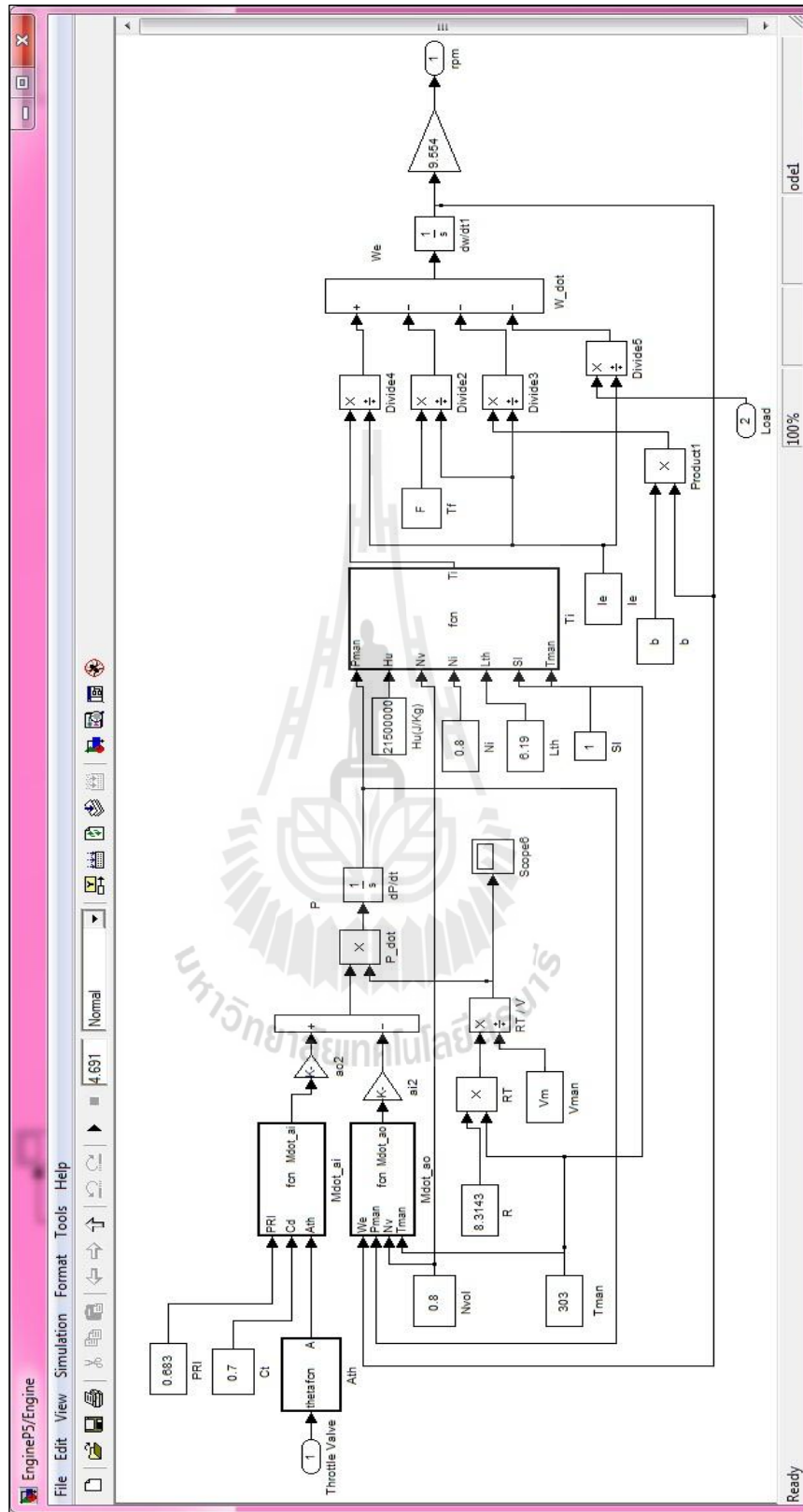
ซึ่งตัวแปรที่ต้องการประมาณค่ามี 10 ตัวแปร ประกอบไปด้วยตัวแปรของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 6 ตัวแปร ได้แก่ I , L_a , R , k_b , k_t , c และตัวแปรของเครื่องยนต์ 4 ตัวแปร ได้แก่ f , I_c , V_m , b ก่อนที่จะทำการประมาณค่าตัวแปรจะต้องกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับตัวแปรแต่ละตัวก่อนทำการรัน โปรแกรม โดยสามารถกำหนดค่าเริ่มต้นได้ที่ Command Window ดังนี้

ค่าเริ่มต้นของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

```
>>I = 0.001; La = 0.001; R = 1; Kb = 0.001; Kt = 0.001; c = 0.0001;
```

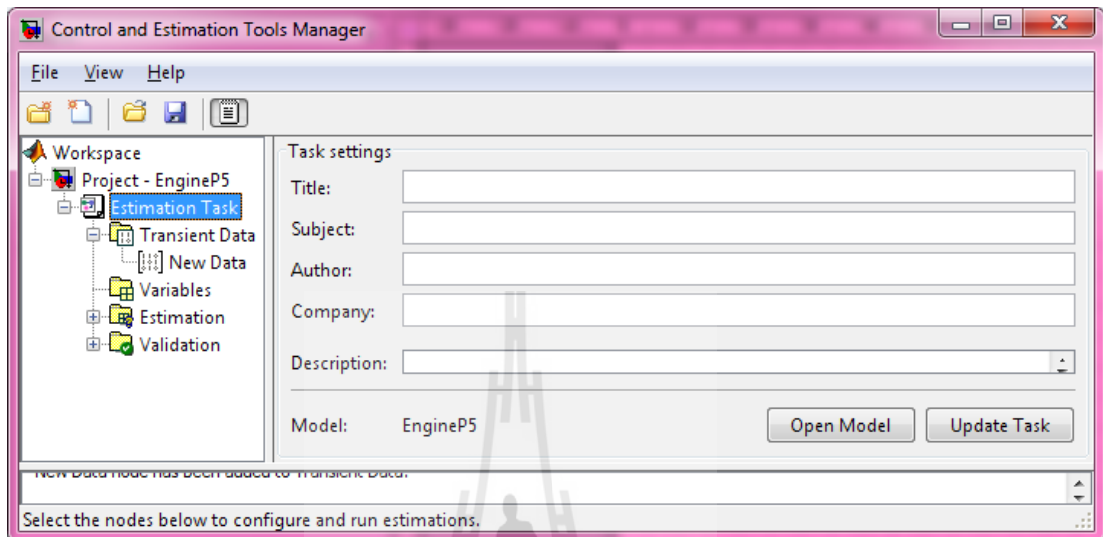
ค่าเริ่มต้นของเครื่องยนต์

```
>>f = 0.1; Ic = 0.01; Vm = 0.0001; b = 0.01;
```



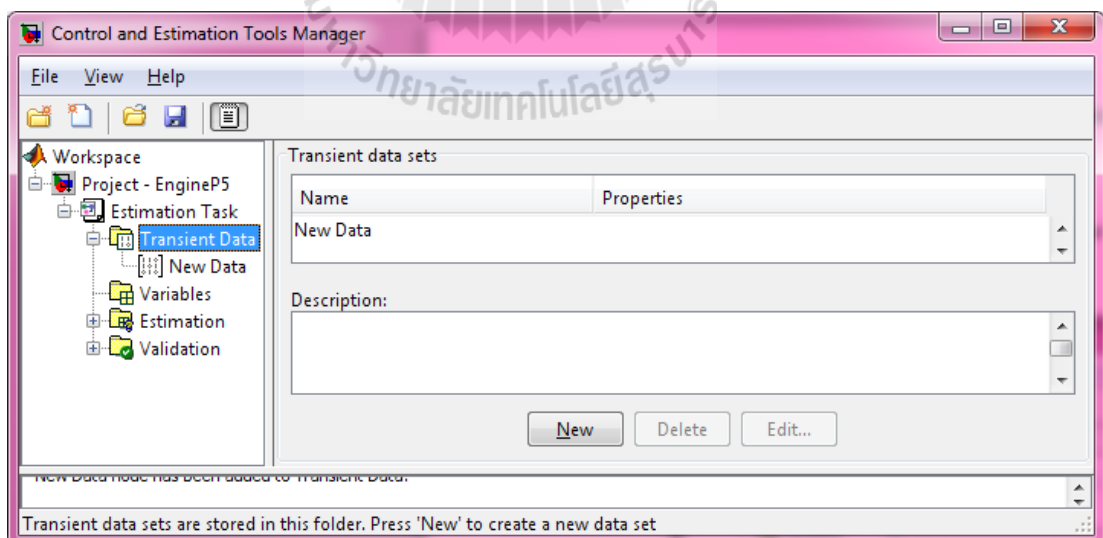
รูปที่ ค.4 แผนภาพแบบจำลองเครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพ

3. เปิด Parameter Estimation บนหน้าต่างต่างของ Simulink ที่จะทำการประมาณค่า โดยเลือก tool => **Parameter Estimation** จะปรากฏหน้าต่างนี้ขึ้นมา



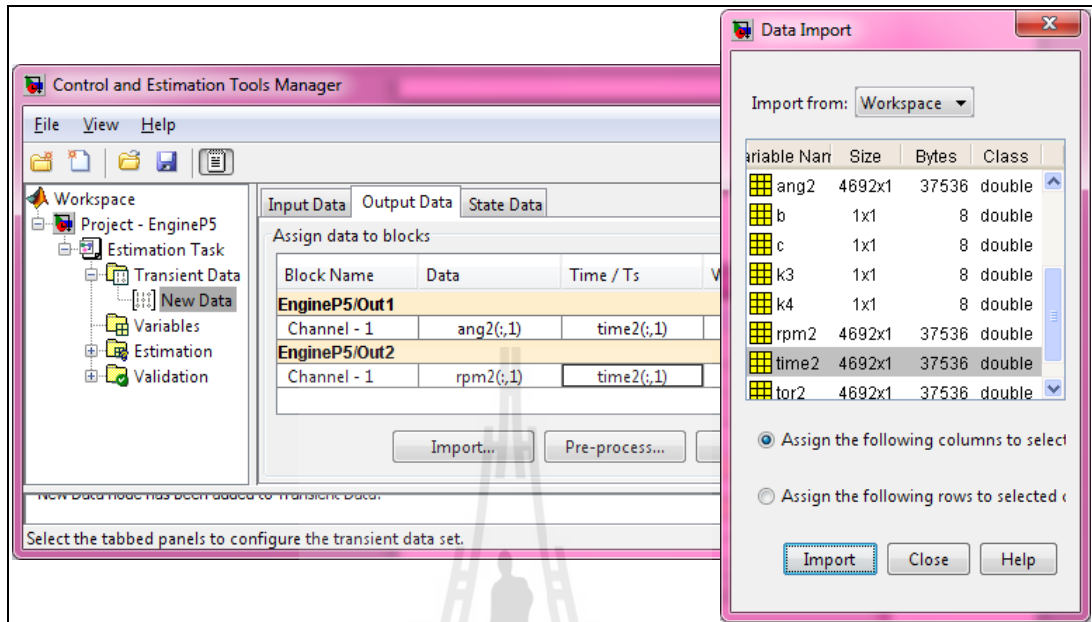
รูปที่ ค.5 แผนภาพแสดงหน้าต่างของ Control and Estimation Tool Manager

4. Click เลือก **Transient Data** => **New**



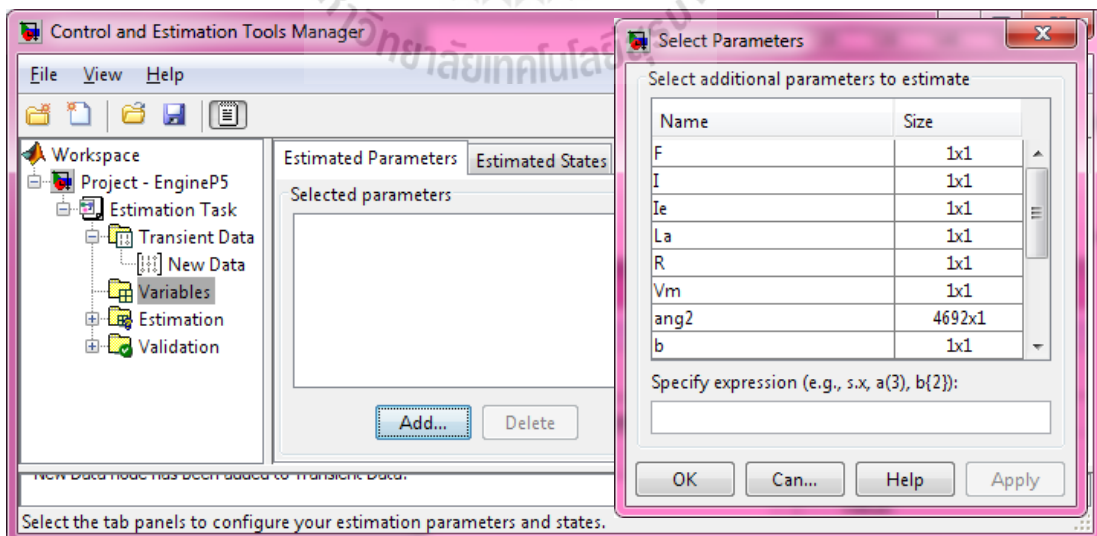
รูปที่ ค.6 แผนภาพแสดงหน้าต่างของการเลือก New Data

5. Click **New Data** => **Output Data** => **Import** เพื่อเลือก ang2, rpm2 และ time2



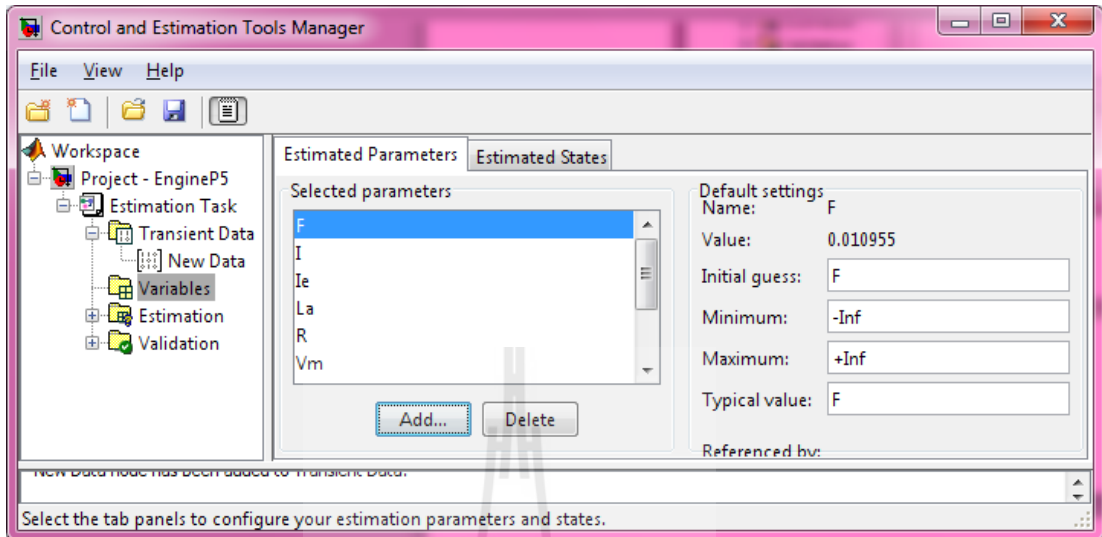
รูปที่ ค.7 แผนภาพแสดงหน้าต่างการเลือกข้อมูลเข้า

6. Click **Variables** => **Add** => เลือกตัวแปรที่ต้องการประมาณค่า => **OK**



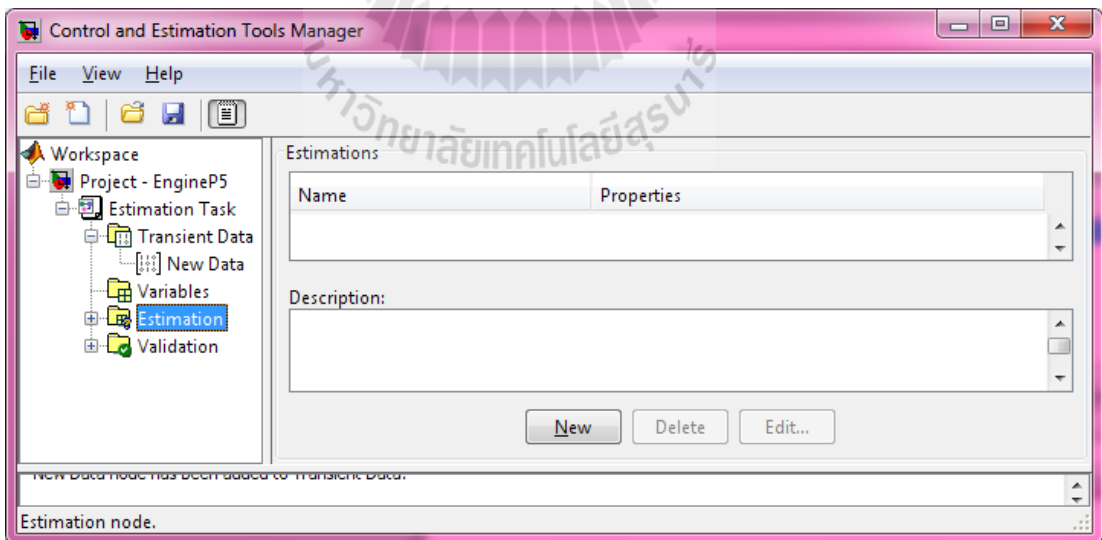
รูปที่ ค.8 แผนภาพแสดงหน้าต่างการเลือกตัวแปรที่ต้องการประมาณค่า

7. กำหนดขอบเขตของตัวแปรที่จะประมาณค่าในส่วนของ **Default settings**



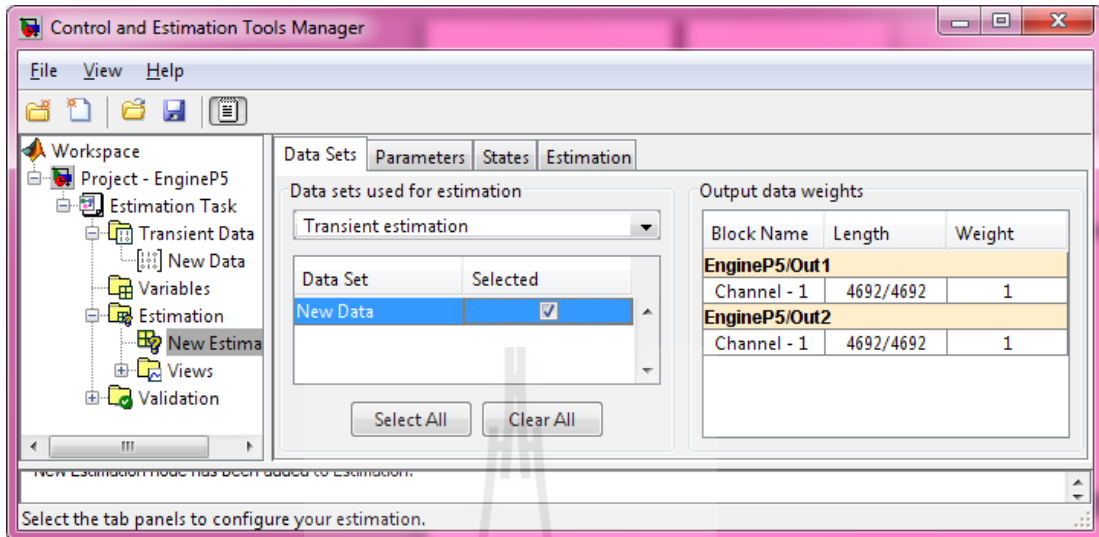
รูปที่ ค.9 แผนภาพแสดงการกำหนดขอบเขตตัวแปร

8. Click **New Estimation** => **New** (จะปรากฏ New Estimation)



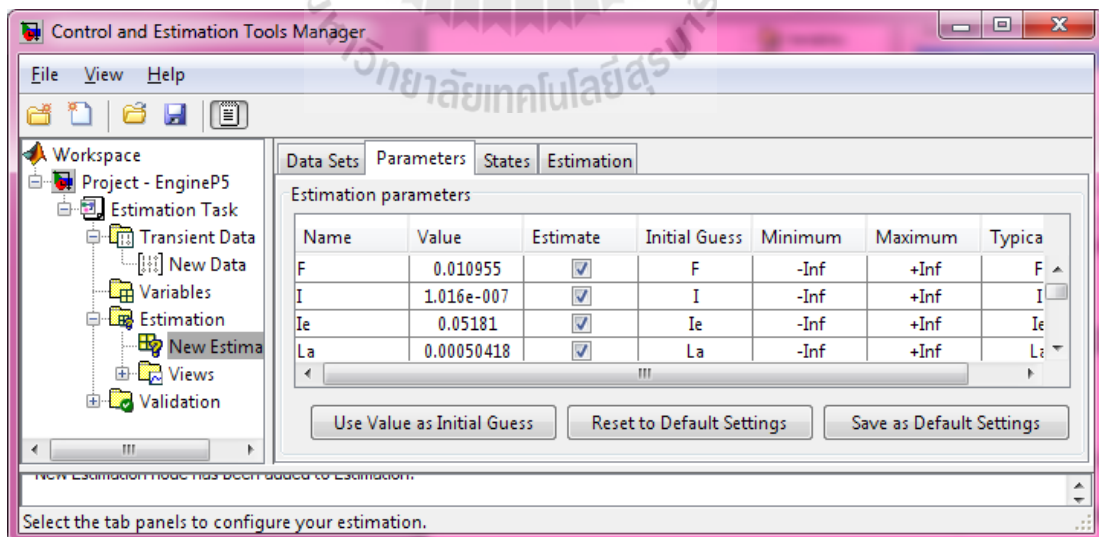
รูปที่ ค.10 แผนภาพแสดงหน้าต่างการสร้าง New Estimation

9. Click New => Select All

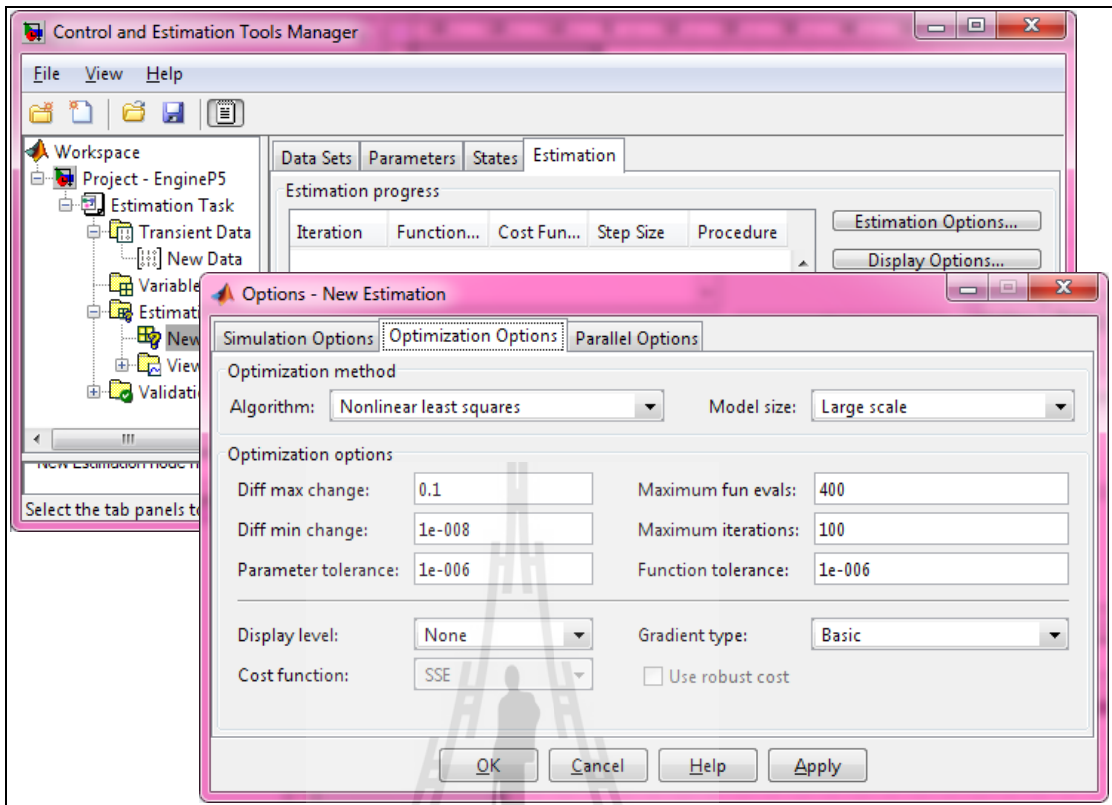


รูปที่ ค.11 แผนภาพแสดงหน้าต่างการเลือกข้อมูลในการ Estimate

10. Click **Parameters** => Click เลือก Estimate ทุกตัวแปร ดังรูปที่ ง.12 และ Click **Estimation** => **Estimation Option** เพื่อกำหนดอัลกอริทึมในการประมาณค่าตัวแปร ดังรูปที่ ง.13

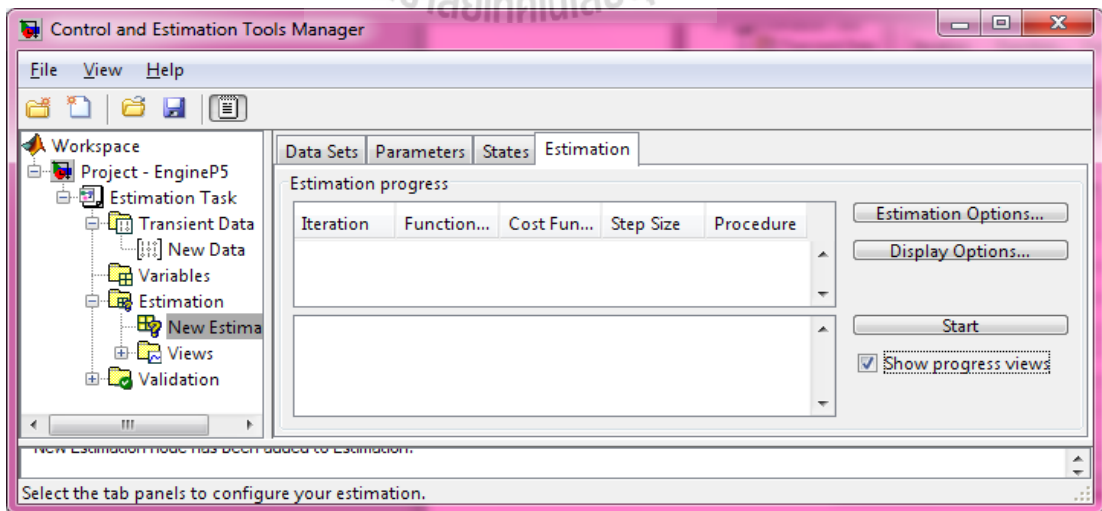


รูปที่ ค.12 แผนภาพแสดงหน้าต่างการกำหนดตัวแปรที่ต้องการประมาณค่า

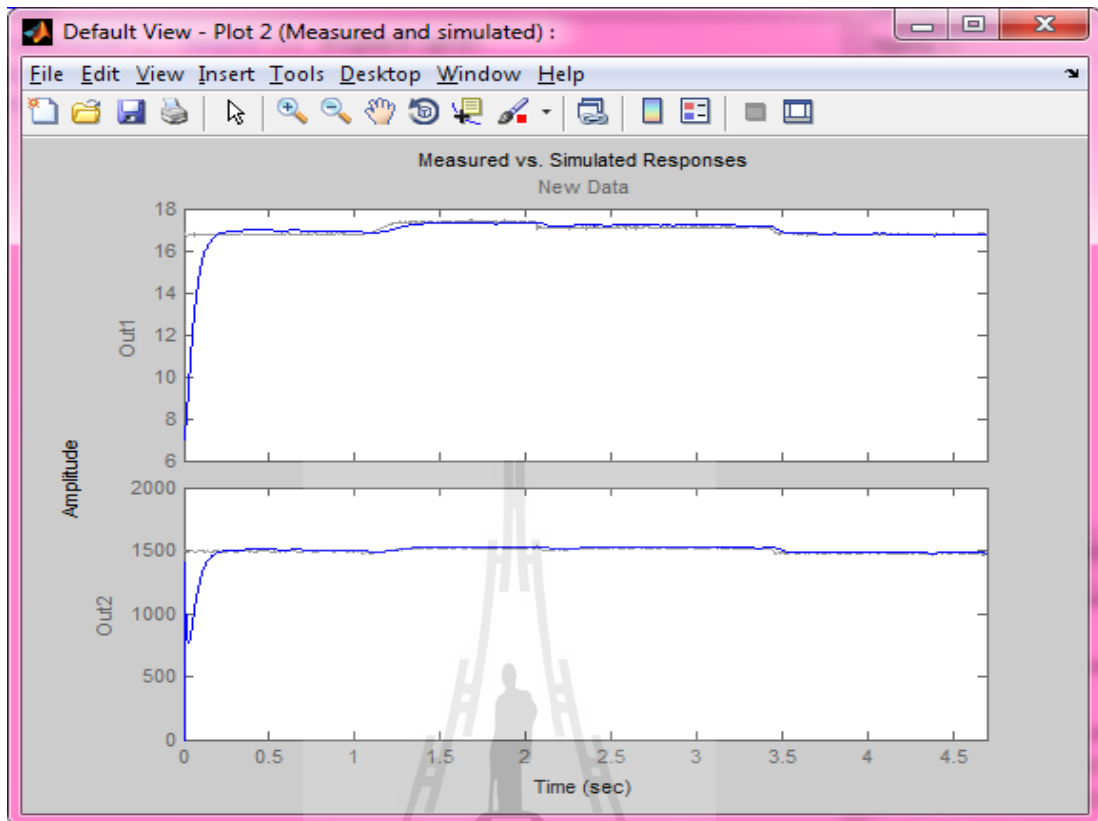


รูปที่ ค.13 แผนภาพแสดงการกำหนดอัลกอริทึมในการประมาณค่าตัวแปร

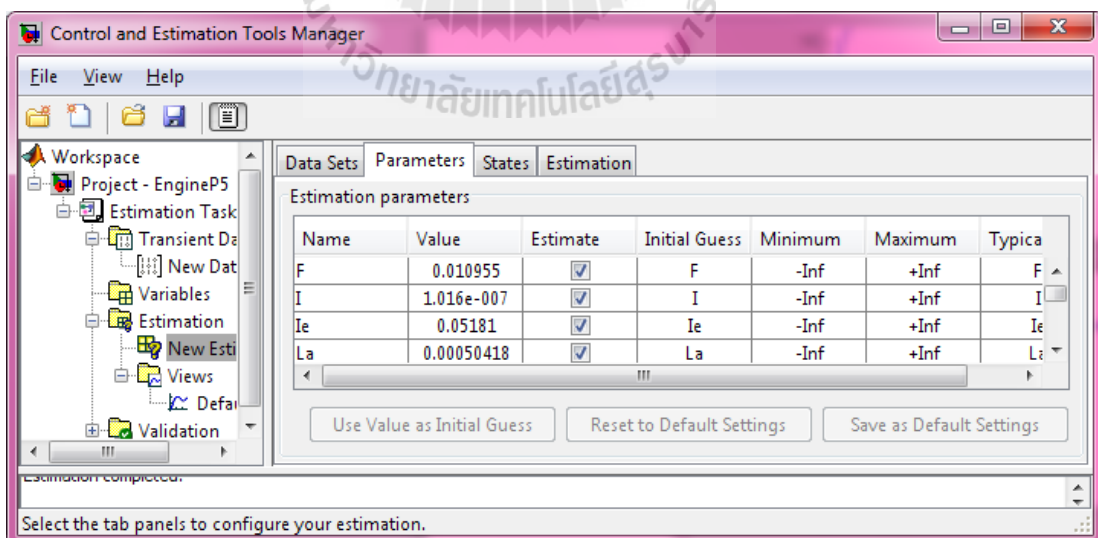
10. Click Estimation => Show Progress View => Start ดังรูปที่ ง.14



รูปที่ ค.14 แผนภาพแสดงการเริ่มการประมาณค่าตัวแปร



รูปที่ ค. 15 แผนภาพแสดงการตอบสนองจากการประมาณค่าตัวแปรเทียบกับข้อมูล



รูปที่ ค.16 แผนภาพแสดงค่าตัวแปรที่โปรแกรมประมาณได้



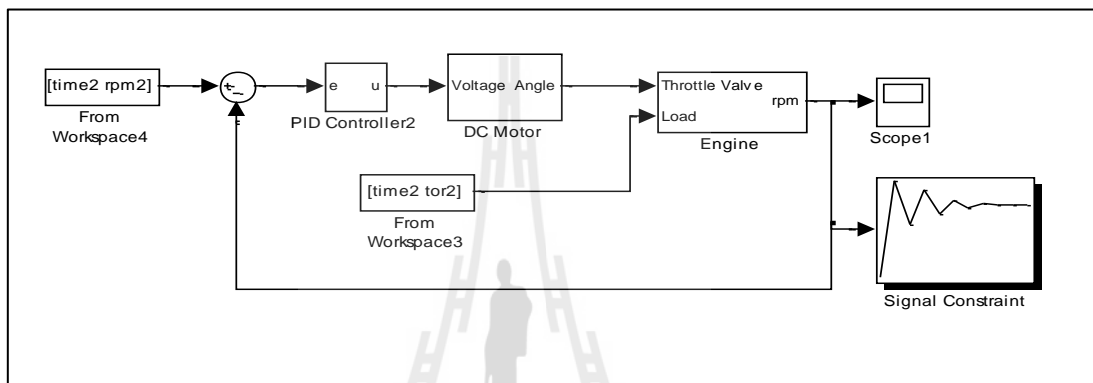
ภาคผนวก ง

การใช้งาน Simulink Response Optimization

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

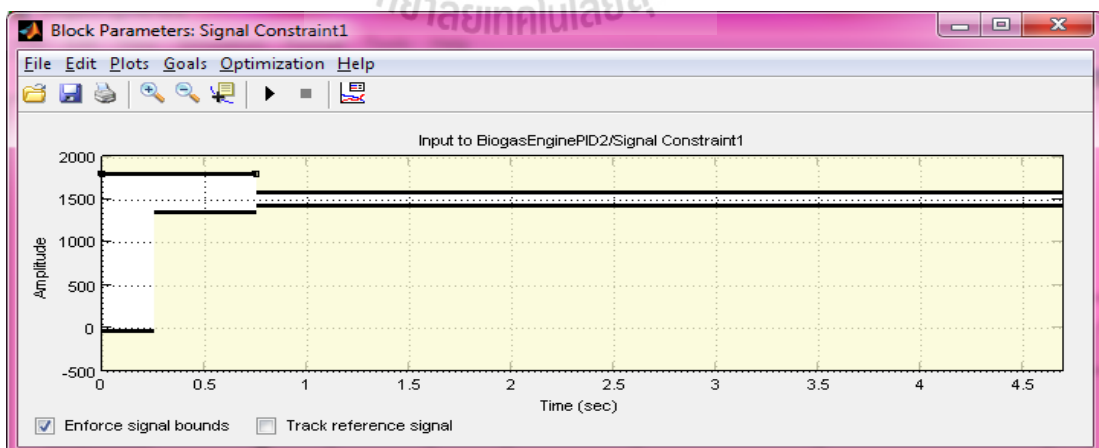
ง. การใช้โปรแกรม Simulink Response Optimization

1. สร้างแบบจำลองของระบบโดยใช้ MATLAB/Simulink โดยกำหนดตัวแปรและค่าเริ่มต้นตัวแปรที่ต้องการให้โปรแกรมประมาณค่าที่ทำให้ได้การตอบสนองตามขอบเขตที่ต้องการ
2. ติดตั้งตัวบังคับสัญญาณ Signal Constraint ที่ตำแหน่งของสัญญาณที่ต้องการบังคับในแบบจำลองที่สร้างขึ้น โดยตัว Signal Constraint Block จะอยู่ใน Simulink Library ที่ชื่อว่า Simulink Response Optimization



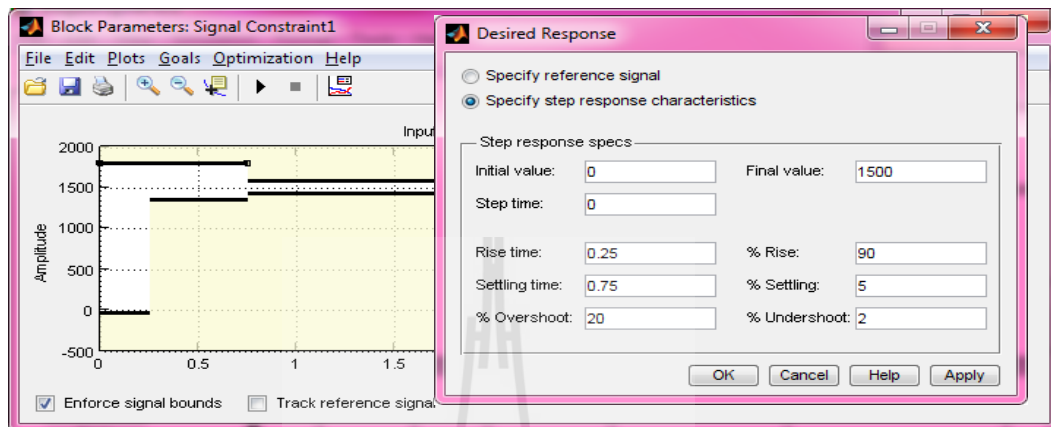
รูปที่ ง.1 แผนภาพแบบจำลองในโปรแกรม MATLAB/Simulink

3. Double – click ที่ตัว Signal Constrain Block เพื่อแสดง Signal Constraint window



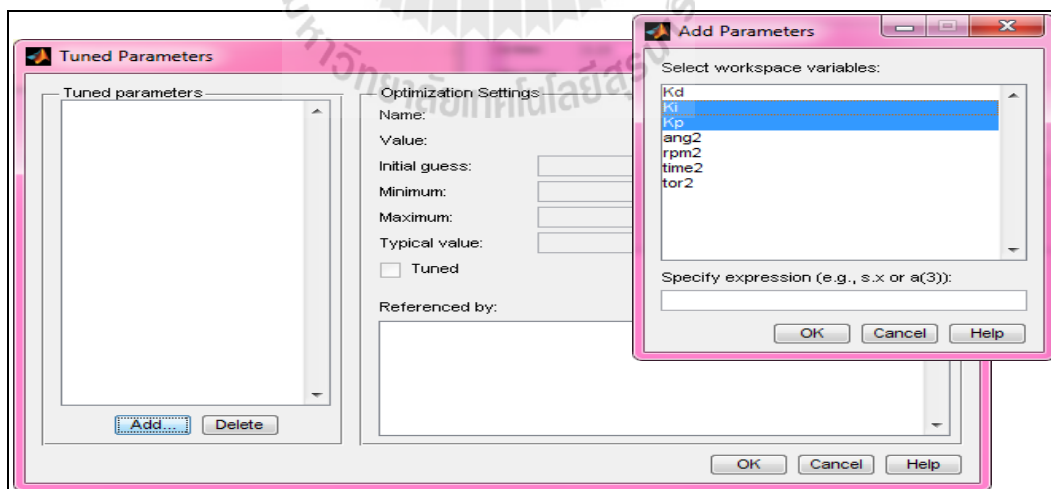
รูปที่ ง.2 แผนภาพแสดง Signal Constraint Window

4. กำหนดรูปแบบของสัญญาณ Output ที่ต้องการบังคับ ซึ่งสัญญาณจะถูกบังคับให้อยู่ในขอบเขตที่กำหนด การกำหนดขอบเขตของสัญญาณทำได้โดย Click ที่ Goals => Desired Response กำหนด Percent Overshoot, Rise Time และ Setting Time ตามขอบเขต ดังรูปที่ ง.3



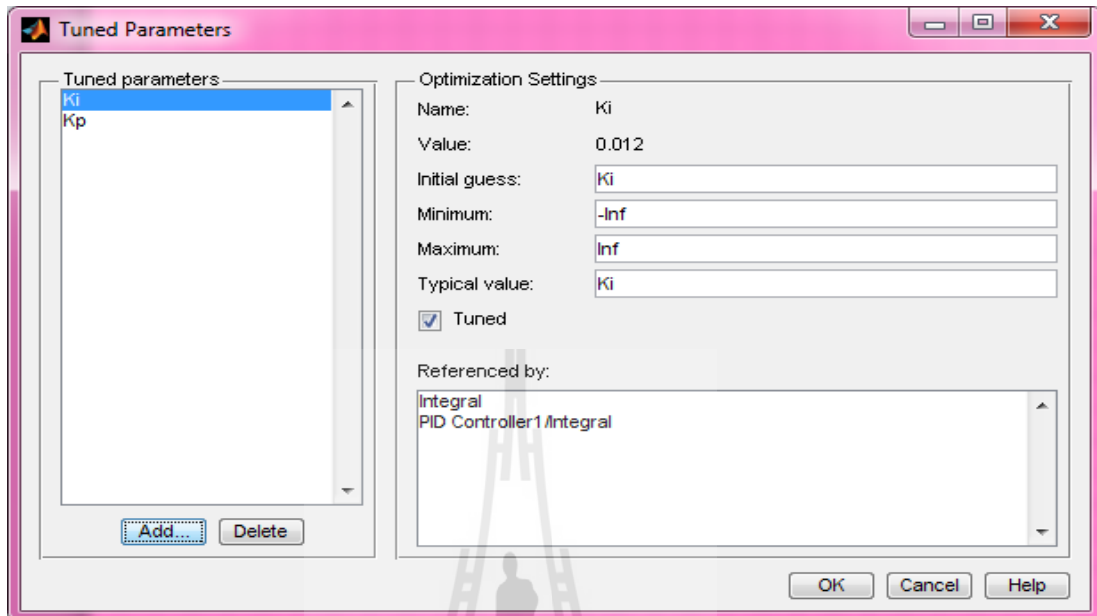
รูปที่ ง.3 แผนภาพแสดงการกำหนดขอบเขตการตอบสนอง

5. เปิด Tuned Parameters Dialog Box จากการเลือก Optimization => Tuned Parameters ในหน้าจอของ Signal window จากนั้น Click Add เลือกพารามิเตอร์ที่ต้องการปรับแต่ง



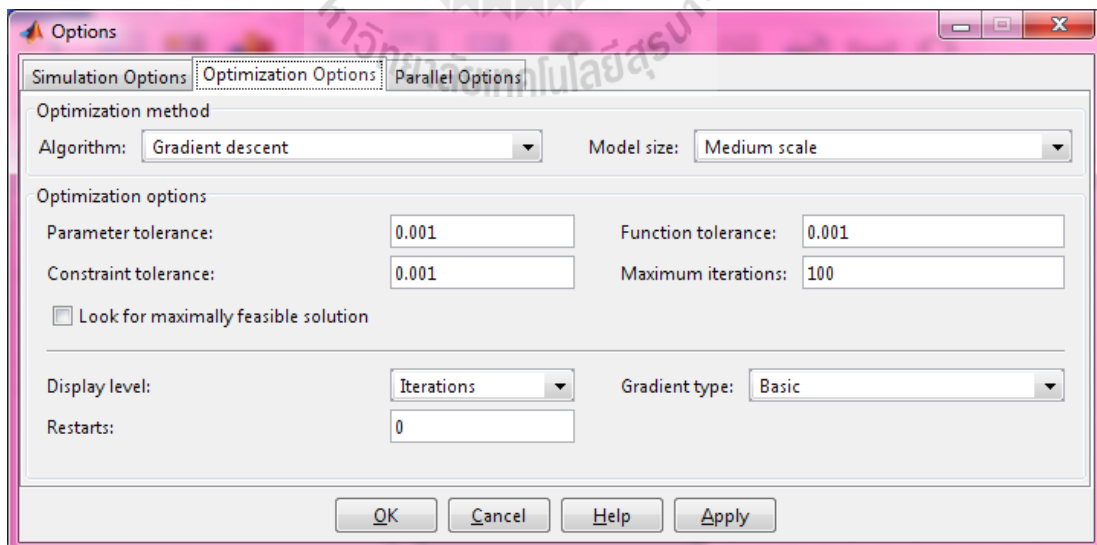
รูปที่ ง.4 แผนภาพแสดงการ Add Parameter

6. กำหนดค่าเริ่มต้นของพารามิเตอร์แต่ละตัวและขอบเขตในการปรับแต่งสัญญาณ



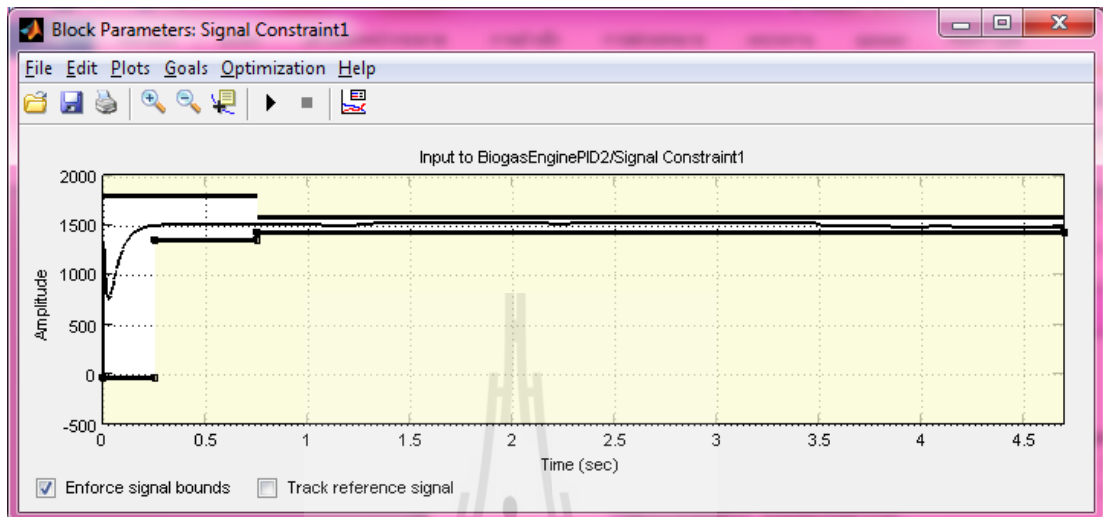
รูปที่ ง.5 แผนภาพแสดงการกำหนดขอบเขตพารามิเตอร์

7. Click => Optimization => Optimization Options เพื่อกำหนดวิธีการ Optimization



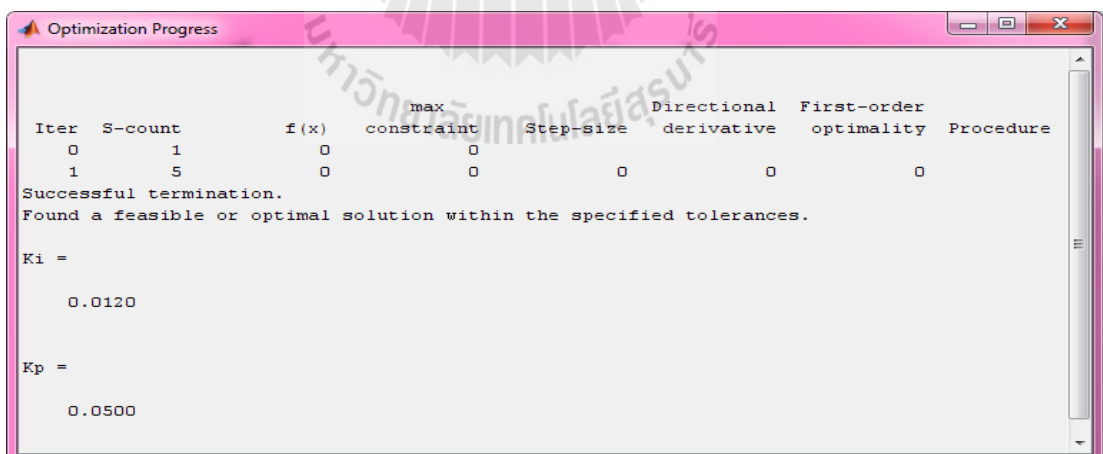
รูปที่ ง.6 แผนภาพแสดง Options ของการ Optimize

8. Click ที่ Start button ที่ Optimization menu เพื่อเริ่มการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ เพื่อให้ได้สัญญาณอยู่ในขอบเขตที่กำหนด ดังรูปที่ ง.7



รูปที่ ง.7 แผนภาพแสดงการตอบสนองของสัญญาณในขอบเขต

จากนั้นแสดงความก้าวหน้าการทำงานของโปรแกรมและแสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้ปรับแต่ง



รูปที่ ง.8 แผนภาพแสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้ปรับแต่ง

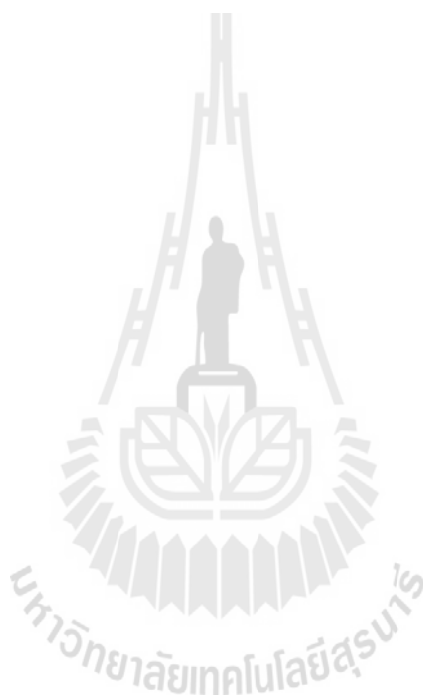


ภาคผนวก จ

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

Odnagam, S., Khaewnak, N., Dolwichai, T., and Sriserpol, J. (2014). A Comparative Study on Gasoline, LPG and Biogas Affecting the Dynamic Responses of SI Engine. **The 2014 International Conference on Advanced Mechanical and Industrial Engineering and Control**, MICS2014 - ID5, 29 – 30 June 2014. Zhangjiajie, China. 6 pp.



A Comparative Study on Gasoline, LPG and Biogas Affecting the Dynamic Responses of SI Engine

Odngam S.¹, Khaewnak N.², Dolwichai T.³ and Srisertpol J.⁴

System & Control Engineering Laboratory,
School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering,
Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand, 30000
Odngam.s@outlook.com¹, b03me12@hotmail.com²
prapun@sut.ac.th³, jiraphon@sut.ac.th⁴

Abstract. Nowadays biogas is used in agriculture and industrial sectors especially in electric production because its production cost lower is than other fuels such as gasoline and LPG. However, biogas from the waste of swine farm has only 50 – 70 % of methane that decreases the efficiency and power of SI engine. This paper presents a comparative study of gasoline LPG and biogas affecting the dynamic responses of SI engine. The system identification of SI engine uses mean value model with parameter estimation. A mean value model is a mathematical SI engine model which is the intermediate between large cyclic simulation models and simplistic transfer function models. The simulation and experimental results are found useful in the development of control system for biogas engine-generator system and LPG plus biogas engine-generator system.

Keywords: Mathematical model of the SI engine, Parameter estimation

1 Introduction

The major concern of most people nowadays is the use and availability of energy. They spend a large portion of their gas propane and oil. These fossil fuels have being continuously used to a large extent. Because these forms of energy are non-renewable, the availability will continue to decrease but the costs will to increase. This has led to research for new energy sources. The properties of gasoline, liquefied petroleum gas (LPG) and biogas were analyzed by Chiang Mai University as shown in Table 1. The calorific of biogas has lower value than other fuels. A mean value modeling of SI engine is applied to system identification. Some nonlinear time-base in-cycle thermodynamic model of a linear combustion engine is posing as an open thermodynamic system [1]. Model of the injection system proposed a physics-based state space model in [2-4]. The parameters estimation and the specification of the identity of mathematical models for biogas or LPG engine were also studied [5-6]. This comparative study of gasoline LPG and biogas affects the dynamic responses

of SI engine. The results are found useful in the development of control system for biogas engine-generator system and LPG plus biogas engine-generator system.

Table 1. Properties of fuels

Fuel	Density	Calorific Value (kJ/kg)	Stoichiometric air/fuel ratio(kg/kg)
LPG	0.54 kg/litter	46,000	15.50
Gasoline	0.75 kg/litter	43,000	15.60
Biogas(60% CH ₄)	1.20 kg/m ³	18,000	10.20

2 Mean value modeling of SI engine

The SI engine system modeling is a complex system and non-linear equation. Also, the parameter of system changes overtime. The SI engine models are on the basic principle such as fundamental thermodynamics, fluid mechanic and rigid body mechanics. There are three principles consisting of air path model, torque production model and rotational dynamic model. The diagram of SI engine is show in Fig. 1.

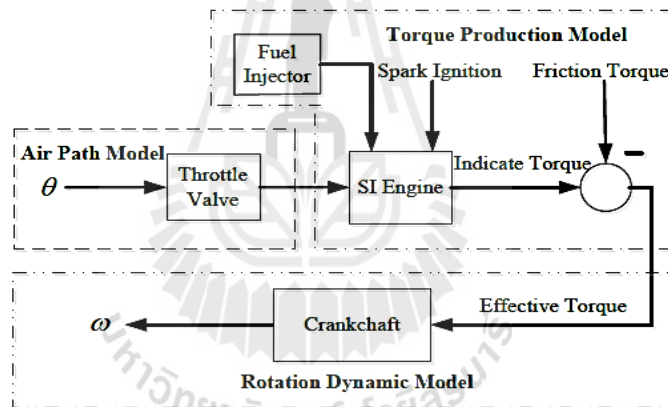


Fig. 1. Mean value modeling diagram of the SI engine

2.1 Air path model

The air mass flow rate (\dot{m}_{ai}) flying through the throttle valve into manifold can be calculated from standard orifice equation for compressible fluid as follows

$$\dot{m}_{ai} = C_d \frac{P_{amb} A_{th}}{\sqrt{RT_{amb}}} PRI \quad (1)$$

where C_d is flow rate coefficient, P_{amb} is ambient pressure, T_{amb} is ambient temperature, R is ideal gas constant, A_{th} is throttle area and PRI is the pressure ratio influence function, which describes the choked/sonic flow that occurs through the throttle valve.

The most common throttle body used on spark ignition engines is the throttle valve. Fig. 2 shows an end view of a throttle valve assembly. The purpose is to limit the flow of air into the intake manifold and the combustion chamber. By limiting the airflow into the engine, the power output of the engine is controlled.

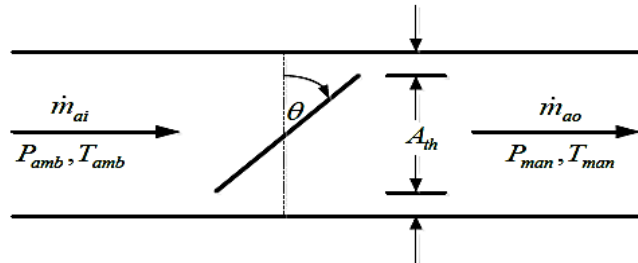


Fig. 2. Throttle valve body

The flow path of throttle

$$A_{th} = \frac{\pi d^2}{4} - \frac{\pi d^2 \cos \theta}{4 \cos \theta_0} \quad (2)$$

where d is the diameter of the throttle, θ is throttle angle and $\theta_0 = 5^\circ$

2.2 Torque production and rotation dynamic model

The air mass flow rate out of intake manifold (\dot{m}_{ao}) is

$$\dot{m}_{ao} = \frac{V_d \eta_v P_{man} n}{120 RT_{man}} \quad (3)$$

where n is the engine speed (rpm), V_d is the displacement volume of the engine cylinders, T_{man} is the intake manifold temperature, η_v is the volumetric efficiency. The fuel mass flow rate into the cylinder (\dot{m}_f) is

$$\dot{m}_f = \frac{\dot{m}_{ao}}{\lambda L_{th}} \quad (4)$$

when λ is air fuel equivalence ratio (usually equal to 1), L_{th} is the theoretical air fuel ratio. The indicated power (P_i) forces the crankshaft from fuel

$$P_i = H_u \eta_i \dot{m}_f \quad (5)$$

where H_u is the fuel low heating value and η_i is the indicated efficiency. Substitute (3), (4) to (5) and divide the result by engine speed ($\omega = n\pi/30$), the indicate torque with function of ignition ($SI(\alpha)$).can be derived from

$$T_{ind} = \frac{H_u V_d \eta_i \eta_v}{4\pi R \lambda L_{th} T_{man}} \cdot SI(\alpha) \cdot P_{man} \quad (6)$$

The friction torque (T_f) is loss in the rotational movement of the crankshaft. The mean effective torque (T_e) can be obtained from

$$T_e = \frac{H_u V_d \eta_i \eta_v}{4\pi R \lambda L_{th} T_{man}} \cdot SI(\alpha) \cdot P_{man} - T_f \quad (7)$$

The engine rotation dynamic model can be derived directly from Newton's second law as follows

$$I_e \dot{\omega} = T_e - T_L - b\omega \quad (8)$$

where I_e is the equivalent inertia of crankshaft, T_L is the load torque, ω is engine speed (rad/s) and b is viscous damping constant of the crankshaft bearing.

3 System identification

This method used Parameter Estimation toolbox in MATLAB for the parameters identification of the SI engine. Parameter Estimation toolbox is a Simulink-based product for estimating parameters of model from experimental data.

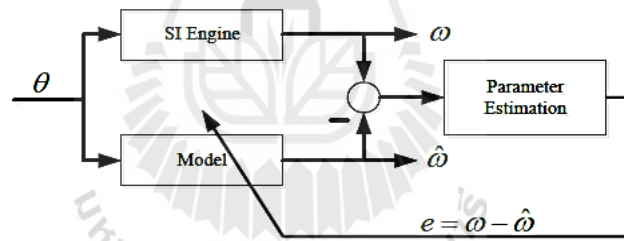


Fig. 3. Parameter estimation diagram

From Fig. 3, the investigation of the coefficients in the mathematical models (1), (2), (3), (7) and (8) is a very complex problem because of restricted information, input throttle angle and engine speed can be measured, where $\hat{\omega}$ is the engine speed from the mathematical model and e is the difference between two outputs

$$e = \omega - \hat{\omega} \quad (9)$$

4 Simulation and experimental results

This section presented the dynamic response of SI engine model using parameter's value from parameters estimation for each fuel. Toyota 2JZ, 230 hp is used for experimental setup. The parameters of the mathematical model are estimated by the

mean values of SI engine as shown in Table 2. The cost function typically calculates a least-square error between the signals of empirical and model data. The parameters of the mathematical models of SI engine could be estimated as shown in Table 3. Dynamic responses of SI engine model and experiment for gasoline, LPG and biogas are shown in Fig. 4, 5 and 6 respectively.

Table 2. Mean value models of SI engine

	V_d (m ³)	R (J/mol.K)	T_{amb} (K)	T_{man} (K)	P_{amb} (N/m ²)	P_{man} (N/m ²)	η_i	η_v
value	0.0029	8.3144	303	303	101325	80000	0.8	0.8

Table 3. Parameter Estimation of SI engine for each fuels

<i>Fuel</i>	<i>Parameter Estimation</i>			
	T_f (N.m)	I_e (kg.m ²)	b (N.m.(s/rad))	V_m (m ³)
Gasoline	23.9260	0.0276	0.5812	4.3216e-7
LPG	27.5760	0.0212	0.4143	2.5360e-7
Biogas	70.7800	0.0172	0.1883	5.7486e-7

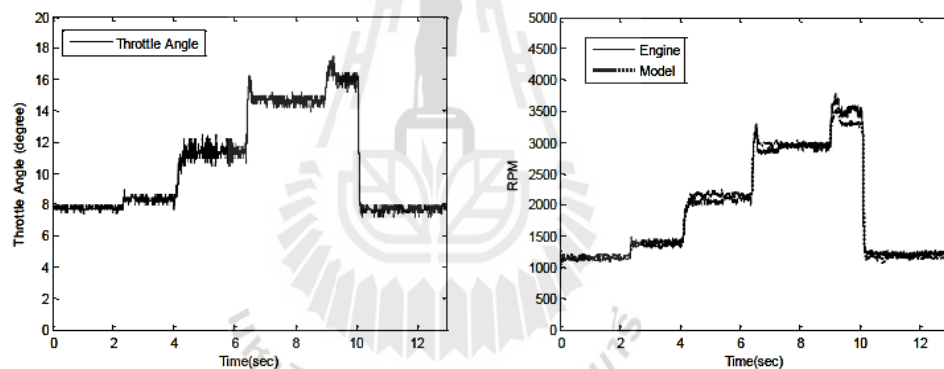


Fig. 4. Throttle angle and speed responses of SI engine using gasoline

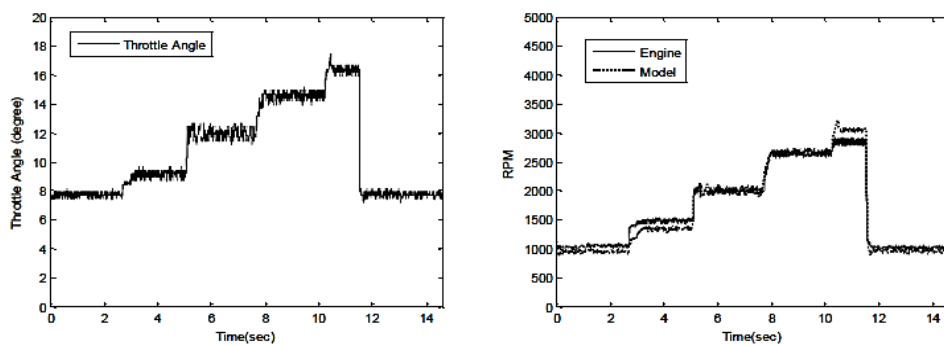


Fig. 5. Throttle angle and speed responses of SI engine using LPG

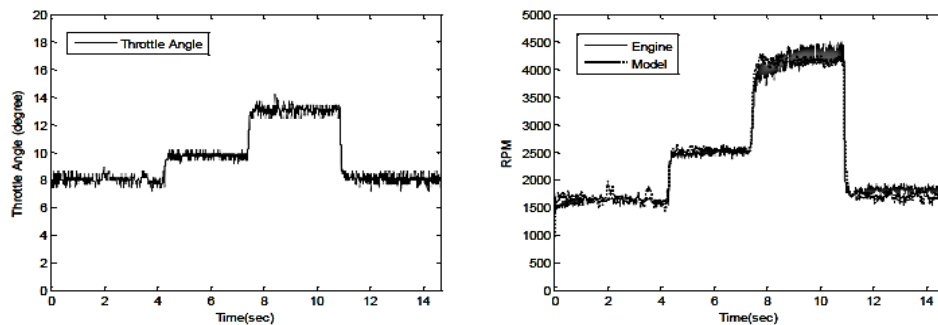


Fig. 6. Throttle angle and speed responses of the SI engine using biogas

5 Conclusions

The results of system identification of SI engine using biogas have more friction torque than those using LPG and gasoline engine. The dynamical responses of the mathematical model with mean value modeling compared with the experimental data by parameter estimation can be used to analyze the factors that affect the SI engine performance. As the results of the study, the variable from fuel can be used to estimate speed engine and applied to design controller for controlling SI engine-generator using biogas.

Acknowledgements. The authors would like to thankfully acknowledge the research grant from Suranaree University of Technology (SUT).

References

1. Pavel Deutsch and Ondrej Vysoky., "In-cycle thermodynamic model of linear combustion engine", Proceeding of the 2006 IEEE International Conference on Control Applications, Munich, Germany, 2006.
2. P. Lino., B. Maione., C. Amorese and Sisto De Matthaeis., "Modeling and predictive control of new injection system for compressed natural gas engine", Proceeding of the 2006 IEEE International Conference on Control Applications, Munich, Germany, 2006.
3. P.V. Manivannan, M.Singaperumal and A. Ramesh., "Development of an idle speed engine model using in-cylinder pressure data and an idle speed controller for a small capacity port fuel injected SI engine", International Journal of Automotive Technology, vol.12(1), pp.11-20, 2011.
4. Munan Hong, Tielong Shen, Member, Minggao Ouyang, and Junichi Kako., "Torque observers design for SI engines with different intake air measurement sensors", IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol.19(1), pp.229-237, 2011.
5. Bo-Chiuan Chen, Yuh-Yih Wu, and Feng-Chi Hsieh., "Estimation of engine rotational dynamics using Kalman filter based on a kinematic model", IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol.59(8), pp.3728-3735, 2010.
6. V. R. Mamilla., V.Gopinath., C.V.Subba Rao and L. N. Rao., "Performance and emission characteristic of 4 stroke petrol engine fueled with biogas/LPG blends", International Journal of Advanced Engineering Technology, vol.2(1), pp.209-213, 2011.

ประวัติผู้เขียน

นายสุนทร โอบธุงาม เกิดเมื่อวันอาทิตย์ที่ 28 มิถุนายน 2531 ที่อำเภอเมือง จังหวัดสุรินทร์ เริ่มการศึกษาระดับประถมศึกษาชั้นปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนเมืองสุรินทร์ จังหวัดสุรินทร์ และระดับมัธยมศึกษาชั้นปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนสุรวิทยาคาร จังหวัดสุรินทร์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (หลักสูตรวิศวกรรมยานยนต์) สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2553 และได้ศึกษาต่อระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ณ สถาบันการศึกษาเดิม โดยได้รับการสนับสนุนทุนการศึกษา จำนวน 2 ทุน คือ ทุนการศึกษาสำหรับผู้มีศักยภาพเข้าศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาในมหาวิทยาลัยฯ และทุนการศึกษาแก่นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาที่คณาจารย์ได้รับทุนวิจัยจากแหล่งทุนภายนอก

ขณะศึกษาในระดับมหาบัณฑิตได้เป็นผู้สอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล จำนวน 6 รายวิชา ได้แก่

- (1) วิชาเขียนแบบวิศวกรรม 1
- (2) วิชาเขียนแบบวิศวกรรม 2
- (3) ปฏิบัติการวิศวกรรมยนต์ 1
- (4) ปฏิบัติการวิศวกรรมยานยนต์ 4
- (5) ปฏิบัติการวิศวกรรมการผลิต 3
- (6) ปฏิบัติการวิศวกรรมอากาศยาน 3

และได้นำเสนอผลงานทางวิชาการเรื่อง “A Comparative Study on Gasoline, LPG and Biogas Affecting to Dynamic Responses of SI Engine” ในการประชุมวิชาการ The 2014 International Conference on Advanced Mechanical and Industrial Engineering and Control (MICS-14) ระหว่างวันที่ 28-31 พฤษภาคม 2557 ณ เมืองจางเจี๋ย มณฑลหูหนาน ประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน มีรายละเอียดปรากฏในภาคผนวก จ.