

เครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์
GAS TURBINE ENGINE



โดย

นายจตุพล พบแก้ว

นายจตุพล อึ้งรังษี

นายจักรพันธ์ ภาณุพันธุ์ชัยกุล

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.จารุวัตร เจริญสุข



เลขที่.....
เลขทะเบียน..... 42443
วัน, เดือน, ปี 23 พ.ค. 2545

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

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำออก
๐๕๓๒๖

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

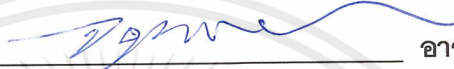
เรื่อง

เครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์

GAS TURBINE ENGINE

ผู้จัดทำ

- | | |
|----------------------------------|-----------------------|
| 1. นายจตุพล พบแก้ว | รหัสประจำตัว 40010107 |
| 2. นายจตุพล อึ้งรังษี | รหัสประจำตัว 40010108 |
| 3. นายจักรพันธ์ ภาณุพันธุ์ชัยกุล | รหัสประจำตัว 40010116 |



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร.จตุวัตร เจริญสุข)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องยนต์แก๊สเทอร์โบ

นายจตุพล พบแก้ว 40010107
นายจตุพล อึ้งรังษี 40010108
นายจักรพันธ์ ภาณุพันธุ์ชัยกุล 40010116
ดร. จารุวัตร เจริญสุข อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2543

บทคัดย่อ

ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันมนุษย์เราได้พัฒนาเครื่องยนต์ให้มีประสิทธิภาพเรื่อยมาโดยให้กำลังงานมากขึ้น ผลประโยชน์ที่ได้รับก็จะมากขึ้นด้วย ซึ่งในปัจจุบันเครื่องยนต์ที่ให้กำลังงานมากชนิดหนึ่งคือเครื่องยนต์แก๊สเทอร์โบ โดยสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างกว้างขวาง เช่น ทำให้เครื่องบินที่มีน้ำหนักหลายตันเคลื่อนที่ และลอยตัวอยู่ในอากาศได้ อีกทั้งยังสามารถนำมาใช้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในโรงงานไฟฟ้า

ในการทำโครงการเครื่องยนต์แก๊สเทอร์โบในครั้งนี้เป็นการศึกษาและนำเครื่องเทอร์โบชาร์จ (Turbocharge) ภายในรถยนต์มาประยุกต์ใช้เป็นเครื่องยนต์แก๊สเทอร์โบ โดยใช้แก๊ส LPG (Liquefied Petroleum Gas) เป็นเชื้อเพลิง

สำหรับโครงการนี้ได้จัดสร้างตัวเครื่องยนต์ให้สามารถทำงานได้โดยทำการออกแบบส่วนประกอบของเครื่องยนต์โดยอาศัยทฤษฎีพื้นฐาน ซึ่งหลักการทำงานจะมีลักษณะเช่นเดียวกับเครื่องยนต์ที่ใช้อากาศทั่วไป คือ อากาศจากบรรยากาศภายนอก จากนั้นจะเพิ่มความดันและให้ความร้อนแก่อากาศ แล้วเปลี่ยนพลังงานความร้อนที่เข้ามาเป็นงานที่เพลลา หรือพลังงานขับเคลื่อน จากนั้นจะนำไปทดสอบหาแรงขับและประสิทธิภาพเปรียบเทียบกับขณะที่มีและไม่มีนอซเซิล (nozzle) ข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะเป็นพื้นฐานในการพัฒนาเครื่องยนต์แก๊สเทอร์โบในโครงการอื่นต่อไป

Gas Turbine Engine

Jatupol Pobkaew 40010107

Jatupol Ungrangsee 40010108

Jakpan Panupanchaikul 40010116

Dr.Jaruwat Churnsook Advisor

2000

ABSTRACT

In the past to the present, The engine was developed for the highest efficiency.that we receive high profit.In the present the engine that develop high- power is gas turbine engine that we can apply this engine widely such as by using in airplane that have high weight move and float in the air.including by using as generator in power plant.

This gas turbine engine project is an education and bring turbocharge in an automotive to apply as gas turbine engine by using basic theory.The principle of working have a characteristic like general gas engine that use air from atmosphere outside later it will increase pressure and transfer heat to air in gas turbine engine. Later we will test to find thrust and efficiency compare between install nozzle and no nozzle.Information from experiment is database of gas turbine engine development in next project.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้คงไม่อาจเสร็จได้ด้วยดี หากไม่ได้รับความช่วยเหลือ และร่วมมือจากหลาย ๆ ฝ่ายด้วยกัน บุคคลแรกที่ต้องกล่าวถึงเพราะเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้วิทยานิพนธ์นี้เสร็จลงได้ก็คือ ดร.จรรุวัตร เจริญสุขอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความเอาใจใส่ แนะนำ และช่วยเหลือมาตลอดจนโครงการนี้สำเร็จได้ด้วยดีรวมทั้งขอขอบคุณอาจารย์ภาควิชาเครื่องกลทุกท่านที่ ให้คำปรึกษา แนะนำ รวมทั้งให้ความช่วยเหลือด้านอุปกรณ์และอำนวยความสะดวกด้านต่างๆ ขอขอบคุณพี่มณฑาและพี่โก้ ที่คอยช่วยเหลือในงานทางด้านช่างต่างๆ ขอขอบคุณเพื่อนๆภาควิชาเครื่องกลที่คอยเป็นกำลังใจให้เสมอมา

ขอขอบคุณห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง ที่ให้ยืมหนังสือสำหรับค้นคว้าอ้างอิง ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณทุกท่านที่ให้การสนับสนุนมา ณ ที่นี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้าที่
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญภาพ	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตของงาน	3
1.4 วิธีการดำเนินงาน	3
บทที่ 2 ทฤษฎี	3
2.1 หลักการทำงานของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ	4
2.2 วัฏจักรกังหันก๊าซ (Gas Turbine Cycles)	4
2.3 วัฏจักรเบรตัน (Brayton Cycle)	7
2.4 วัฏจักรทางทฤษฎี	9
2.5 วัฏจักรที่แท้จริง	12
2.6 การไหลแบบไอเซนทรอปิกผ่านหัวฉีด (nozzles)	19
2.7 การเผาไหม้ (Combustion)	22
2.8 กระบวนการเผาไหม้ทางทฤษฎีและที่แท้จริง	25
2.9 ปฏิกิริยาการสันดาปของเชื้อเพลิง	26
2.10 เชื้อเพลิง (fuels)	27
2.11 เชื้อเพลิงก๊าซ	27
บทที่ 3 การคำนวณและการสร้าง	32
3.1 ส่วนประกอบของเครื่องยนต์กังหันก๊าซโดยทั่วไป	32
3.2 หลักการทำงานของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ	32
3.3 การออกแบบส่วนประกอบของเครื่องยนต์กังหันก๊าซในโครงการนี้	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	36
4.1 คำอธิบายขั้นตอนการทดลอง	36
4.2 การคำนวณหาประสิทธิภาพของเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์	37
4.3 ผลการทดลอง	40
บทที่ 5 บทวิจารณ์และบทสรุป	
5.1 สรุปผลและวิจารณ์ผลการทดลอง	45
5.2 ปัญหาจากการทดลอง	45
ภาคผนวก	46
บรรณานุกรม	48



สารบัญตาราง

	หน้าที่
ตารางที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ ระหว่างอุณหภูมิกับอัตราส่วนปริมาตร	30
ตารางที่ 2 ผลการทดลอง	44



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

	หน้าที่
รูปที่ 2.1 วัฏจักรกังหันก๊าซแบบเปิดชนิดโดยตรง (Direct Open Gas-Turbine Cycle)	5
รูปที่ 2.2 วัฏจักรกังหันก๊าซแบบเปิดชนิดโดยอ้อม (Indirect Open Gas-Turbine Cycle)	5
รูปที่ 2.3 วัฏจักรกังหันก๊าซแบบปิดชนิดโดยตรง	6
รูปที่ 2.4 วัฏจักรของกังหันแบบปิดชนิดโดยอ้อม	7
รูปที่ 2.5 การทำงานของเครื่องกังหันก๊าซเป็นวัฏจักรเปิดและวัฏจักรปิด	8
รูปที่ 2.6 (ก) แผนวัฏจักรเบรตัน	8
รูปที่ 2.6 (ข) แผนภาพ T-S ของวัฏจักรเบรตัน	9
รูปที่ 2.7 P-V diagrams ของวัฏจักรที่มีการไหลสม่ำเสมอ	9
รูปที่ 2.8 แผนภาพ P-V วัฏจักรในเชิงทฤษฎี	10
รูปที่ 2.9 วัฏจักรทางทฤษฎีของคอมเพรสเซอร์และเทอร์ไบน์	13
รูปที่ 2.10 แผนภาพ T-S ของการสูญเสียความดันในห้องเผาไหม้และอุปกรณ์ประกอบ	16
รูปที่ 2.11 วัฏจักรที่มีอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อน	17
รูปที่ 2.12 ผลของ black pressure ต่อการกระจายความดันของตามหัวฉีดลดขนาด	19
รูปที่ 2.13 ผลของค่า back pressure ต่อการไหลเชิงมวลและความดัน ที่ทางออกของหัวฉีดลดขนาด	21
รูปที่ 2.14 การแปรผันของอัตราการไหลเชิงมวลผ่านหัวฉีดซึ่งที่ทางเข้า มีคุณสมบัติแบบสแตกเนชั่น	22
รูปที่ 2.15 สัดส่วนอากาศ-เชื้อเพลิงคือปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิง 1 หน่วย	24
รูปที่ 3.1 คอมเพรสเซอร์ที่ใช้ในโครงการ	33
รูปที่ 3.2 แสดงขนาดท่ออากาศ	34
รูปที่ 3.3 ก. ห้องเผาไหม้	35
รูปที่ 3.3 ข. แสดงขนาดของห้องเผาไหม้	35
รูปที่ 3.4 แสดงลักษณะของ burner	36
รูปที่ 3.5 ก แสดงส่วนประกอบของหัวเทียน	36
รูปที่ 3.5 ข แสดงตำแหน่งติดตั้งหัวเทียน	37
รูปที่ 3.5 ค แสดงส่วนประกอบของวงจรถาร์ค	37
รูปที่ 3.6 แสดงขนาดของนอซเชิลที่ใช้ในการทดลอง	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มา

ในปัจจุบันและในอนาคตข้างหน้าเชื้อเพลิงเป็นสิ่งมีความจำเป็นอย่างมากในการขับเคลื่อนของเครื่องยนต์หรือเป็นเชื้อเพลิงในเครื่องต้นกำลัง เช่น เครื่องบิน เรือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เป็นต้น เครื่องยนต์เหล่านี้ส่วนใหญ่แล้วใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งนับวันกำลังจะหมดไปจากโลก ดังนั้นมนุษย์เราจำเป็นต้องหาเชื้อเพลิงอื่นมาทดแทน และมีเครื่องยนต์ที่มีประสิทธิภาพสูง สามารถให้กำลังงานมากกว่าเดิม

เครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์เป็นเครื่องยนต์ชนิดหนึ่ง ซึ่งถูกพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นในโรงงานนี้จะศึกษาการทำงาน และสร้างเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์ขึ้นมาเพื่อทดสอบหาประสิทธิภาพ โดยเครื่องยนต์ที่นำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างนั้นได้มาจากเครื่องเทอร์โบชาร์จของรถยนต์ จากนั้นจึงทำการออกแบบโดยอาศัยหลักการพื้นฐานของเทอร์โมไดนามิกส์ (thermodynamics)

เครื่องยนต์สันดาปส่วนใหญ่จะใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการสันดาป ซึ่งในเพิ่มกำลังให้กับเครื่องยนต์เครื่องหนึ่งนั้นจะต้องเพิ่มปริมาณอากาศและเชื้อเพลิงเข้าไปภายในห้องเผาไหม้ เครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์ในโรงงานนี้จะอาศัยหลักการพื้นฐานเดียวกัน โดยเครื่องยนต์ที่สร้างขึ้นจะใช้ก๊าซ LPG เป็นเชื้อเพลิง ซึ่งสามารถหาซื้อได้ง่ายและมีราคาถูก

เครื่องยนต์กังหันแก๊สเป็นเครื่องยนต์ความร้อน (heat engine) ซึ่งทำงาน โดยมีกระบวนการทำงานติดต่อกันไป ประกอบด้วยการอัดอากาศจากบรรยากาศปกติ แล้วเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นโดยการเผาไหม้เชื้อเพลิงภายในห้องเผาไหม้ เชื้อเพลิงที่ใช้ส่วนมากเป็นน้ำมันก๊าด แก๊สที่มีอุณหภูมิสูงจะไปขับเคลื่อนกังหันให้หมุนเพื่อไปขับเคลื่อนอีกต่อหนึ่ง ซึ่งการทำงานก็คล้ายกับเครื่องยนต์แก๊สโซลีนและเครื่องยนต์ดีเซล แต่จะแตกต่างกันที่การทำงานของเครื่องยนต์กังหันแก๊สนั้นจะทำงานติดต่อกันไปตลอดเวลา งานที่ได้จากเครื่องยนต์กังหันแก๊สนี้ จะเป็นงานในลักษณะเป็นงานของกระบวนการที่ไหลสม่ำเสมอ (flow work)

เครื่องยนต์กังหันแก๊สอย่างง่าย จะประกอบด้วยเครื่องอัดอากาศหรือคอมเพรสเซอร์ (compressor) ห้องเผาไหม้ (combustion chamber) และชุดกังหันแก๊สหรือเทอร์ไบน์ (turbine unit)

1.1.1 ข้อดีของเครื่องยนต์กังหันแก๊สที่ดีกว่าเครื่องยนต์ใช้ลูกสูบ

1. การหมุนของเพลามีการสมดุลอย่างสมบูรณ์

2. ในเครื่องยนต์ลูกสูบจะมีจังหวะงาน 1 ครั้งต่อการหมุนครบรอบวัฏจักร เช่น ในกรณีเครื่องยนต์ 4 จังหวะ จะมีจังหวะงานในช่วงจังหวะระเบิด ส่วนในจังหวะดูด อัด และคาย จะไม่ได้งาน แต่สำหรับเครื่องยนต์กั๊กกันแก๊สจะได้งานสม่ำเสมอติดต่อกันไปตลอดเวลาที่เพลาลูกสูบไป
3. ในเครื่องยนต์แบบใช้ลูกสูบจะมีการสูญเสียกำลัง เนื่องจากความฝืดที่เกิดจากการเสียดสีระหว่างแหวนลูกสูบกับกระบอกสูบแต่เครื่องยนต์กั๊กกันแก๊สจะไม่มีการสูญเสียในลักษณะนี้
4. ในเครื่องยนต์ใช้ลูกสูบเมื่อใช้ไปนาน ๆ การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจะเพิ่มสูงขึ้น เพราะการสึกหรอของเครื่องยนต์ทำให้ส่วนผสมอากาศกับน้ำมันรั่วไหลออกไปได้ แต่ในเครื่องยนต์กั๊กกันแก๊สจะไม่มีการสึกหรอในลักษณะนี้
5. เครื่องยนต์กั๊กกันแก๊สจะได้ความเร็วของเพลางานสูงกว่ามากเมื่อเทียบกับเครื่องยนต์แบบใช้ลูกสูบ
6. เครื่องยนต์กั๊กกันแก๊สจะใช้ความดันในห้องเผาไหม้ต่ำ ดังนั้นจะมีข้อดีตรงที่ว่าวัสดุชิ้นส่วนที่ใช้เกี่ยวกับห้องเผาไหม้ก็ไม่ต้องคำนึงถึงความดันสูงจากการจุดระเบิดที่เกิดขึ้น
7. เครื่องยนต์กั๊กกันแก๊สสามารถใช้เชื้อเพลิงคุณภาพต่ำได้ ซึ่งแม้แต่ถ่านหินที่บดละเอียดเป็นผงก็สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงภายในห้องเผาไหม้ได้
8. ในเครื่องยนต์แบบใช้ลูกสูบ การอัด การจุดระเบิด และการขยายตัว จะเกิดขึ้นภายในกระบอกสูบและลูกสูบซึ่งเป็นหน่วยเดียวกัน (single unit) แต่สำหรับเครื่องยนต์กั๊กกันแก๊สนั้นได้จัดห้องอัดอากาศห้องเผาไหม้และชุดกั๊กกันแก๊สแยกกันไป จึงง่ายต่อการสร้างและการออกแบบ
 - 1.1.2 ข้อเสียของเครื่องยนต์กั๊กกันแก๊ส
 1. ไม่สามารถทนต่ออุณหภูมิจากการเผาไหม้ที่สูง เช่น เครื่องยนต์ลูกสูบ
 2. ชุดกั๊กกันแก๊สนี้ไบพัดที่ถูกขับจากแก๊สร้อนมีลักษณะบางมาก ดังนั้นวัสดุที่ใช้สร้างจึงต้องออกแบบเป็นพิเศษเพื่อให้ทนต่ออุณหภูมิที่สูงของแก๊สร้อน
 3. ประสิทธิภาพรวม (overall efficiency) ของเครื่องยนต์กั๊กกันแก๊สต่ำกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้ลูกสูบ
 4. เนื่องจากเครื่องยนต์กั๊กกันแก๊สมีความร้อนสูงมาก ดังนั้นเมื่อต้องการใช้งานความเร็วรอบต่ำจำเป็นจะต้องใช้เครื่องทดสอบ (speed reduction devices)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 ศึกษาการทำงานของเครื่องยนต์แก๊สเทอร์โบน์ พร้อมทั้งนำเอาความรู้ที่ได้มาช่วยในการออกแบบ อุปกรณ์ต่างๆให้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ
- 1.2.2 สร้างเครื่องยนต์แก๊สเทอร์โบน์ที่สามารถทำงานได้จริง โดยการนำเอาเทอร์โบชาร์จของรถยนต์มาดัดแปลง
- 1.2.3 คำนวณหาคุณสมบัติต่างๆที่สภาวะการทำงานของเครื่องรวมทั้งประสิทธิภาพของเครื่องเพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลในการเปรียบเทียบกับเครื่องรุ่นต่อไป

1.3 ขอบเขตของงาน

ในการนำเอาเทอร์โบชาร์จของรถยนต์มาดัดแปลงพร้อมทั้งแต่งเติมส่วนต่างๆนั้นทำได้ยากเนื่องจากส่วนประกอบต่างๆที่ได้เพิ่มขึ้นมามีมากมายหลายส่วน ซึ่งถ้าเราจะทำส่วนประกอบต่างๆให้มีประสิทธิภาพสูงในทุกๆส่วนนั้นทำได้ยากมาก ดังนั้นส่วนประกอบต่างๆที่ได้แต่งเติมขึ้นจึงออกแบบให้ง่ายต่อการสร้างและการทดลอง

ดังนั้นผลการทดลองที่ได้จึงเป็นผลการทดลองที่ยังไม่ดีเท่าที่ควร แต่ก็ต้องมีการปรับปรุงส่วนประกอบบางส่วนเพื่อให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ที่ได้ตั้งไว้

1.4 วิธีการดำเนินงาน

นำความรู้ที่ได้ศึกษามาแล้ว มาประยุกต์ใช้ในการสร้างส่วนประกอบต่างๆ จากนั้นจึงทำการทดลองและพิจารณาพฤติกรรมของเครื่องยนต์ว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางใด ถ้าพฤติกรรมของเครื่องยนต์ไม่เป็นไปตามวัตถุประสงค์แล้ว ก็ต้องมีการปรับปรุงส่วนประกอบบางส่วน เพื่อให้พฤติกรรมของเครื่องยนต์เป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ได้ตั้งไว้โดยแนวทางการปรับปรุงส่วนประกอบนั้นต้องเป็นไปทฤษฎีที่ได้ศึกษามาแล้ว

เมื่อการทดลองเป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้แล้ว จากนั้นก็เก็บข้อมูลต่างๆ ที่ได้จากการทดลองไว้เพื่อเป็นฐานข้อมูลใช้ในการเปรียบเทียบกับเครื่องยนต์แก๊สเทอร์โบน์รุ่นต่อไปให้มีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้นไป

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 หลักการทำงานของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ

หลักการทำงานพื้นฐานของเครื่องยนต์กังหันก๊าซสามารถสรุปได้เป็น 3 ขั้นตอน คือ

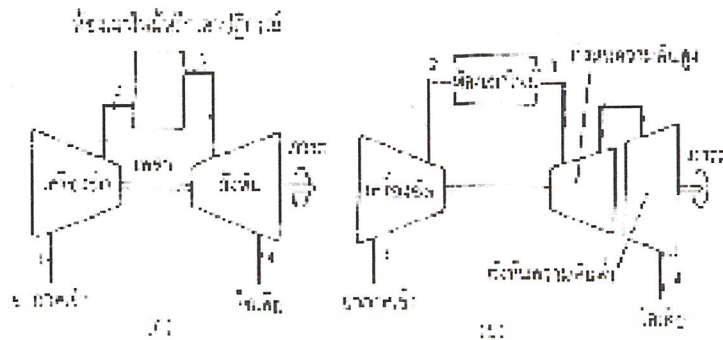
2.1.1 การอัด (Compression) ของไหล (อากาศ) จากภายนอกจะถูกคอมเพรสเซอร์ดูดและอัดให้มีความดันเพิ่มมากขึ้น เพื่อส่งต่อไปยังระบบการเผาไหม้ โดยกระบวนการอัดที่เกิดขึ้นเป็นแบบอะเดียแบติก (Adiabatic) ซึ่งจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น หากเป็นคอมเพรสเซอร์ที่มีหลายขั้น (Stage) จะทำให้ของไหลมีความเร็วและความดันเพิ่มขึ้น

2.1.2 การสันดาป (Combustion) แหล่งจ่ายเชื้อเพลิงจะทำหน้าที่จ่ายเชื้อเพลิงเข้าไปผสมกับอากาศที่เข้ามาด้วยความเร็วจากการอัดของคอมเพรสเซอร์ ทำให้เกิดการสันดาปภายในห้องเผาไหม้ ความดันที่เกิดจากการเผาไหม้จะคงที่ เปลวไฟที่เกิดจากการเผาไหม้จะยาวแนวเดียวกับความยาวท่อ และเนื่องจากความดันของของไหลที่เข้ามาภายในห้องเผาไหม้มีความดันสูง จะทำให้เปลวไฟที่เกิดขึ้นไม่สัมผัสกับผนังของห้องเผาไหม้

2.1.3 การขยายตัว (Expansion) ก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้ซึ่งมีความดันสูง จะถูกปล่อยออกทางเทอร์ไบน์ ในขั้นตอนนี้จะเป็นการเปลี่ยนพลังงานของของไหลให้เป็นพลังงานกล การขยายตัวของก๊าซที่อุณหภูมิและความดันสูง จะถ่ายพลังงานไปที่ใบพัดเทอร์ไบน์ทำให้หมุน โดยงานบางส่วนจะจ่ายกลับไปให้คอมเพรสเซอร์เพื่ออัดอากาศเข้ามาเป็นวัฏจักร และพลังงานส่วนที่เหลือจะถูกนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างอื่น

2.2 วัฏจักรกังหันก๊าซ (Gas Turbine Cycles)

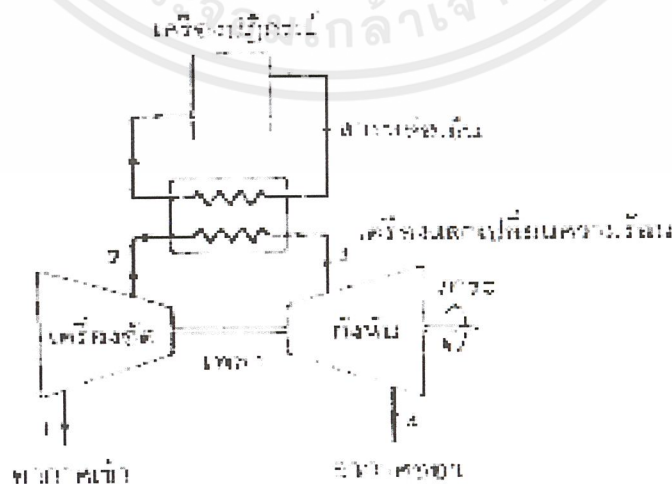
ก๊าซร้อนที่ออกจากห้องเผาไหม้หรือเตาปฏิกรณ์ชนิดก๊าซหล่อเย็น (Gas-Cooled Reactor) สามารถนำมาใช้เป็นของเหลวในเครื่องต้นกำลังได้โดยตรง นั่นคือ โดยการขยายตัวผ่านกังหันก๊าซหรือโดยทางอ้อมโดยการให้ความร้อนของไหลทำงานในขั้นต้นก่อน เรียกวัฏจักรทั้งสองนี้ว่า วัฏจักรโดยตรงและวัฏจักรโดยอ้อม (Direct and indirect Cycle) ซึ่งยังแบ่งย่อยในแต่ละชนิดออกเป็นวัฏจักรเปิดและวัฏจักรปิด (Open and Closed Cycle) ดังนี้



รูปที่ 2.1 วัฏจักรกังหันก๊าซแบบเปิดชนิดโดยตรง (Direct Open Gas-Turbine Cycle) : (ก) เฟลาเดี่ยว และ (ข) สอง เฟลา

2.2.1 วัฏจักรเปิดชนิดโดยตรง (Direct Open Cycle) วัฏจักรเปิดชนิดโดยตรงดังแสดงในรูปที่ 2.1 ก๊าซเข้าเครื่องอัดอากาศที่จุด 1 ซึ่งจะถูกอัดไปที่จุด 2 จากนั้นก๊าซเข้าสู่ห้องเผาไหม้หรือเตาปฏิกรณ์และรับความร้อนที่ความดันคงที่ (เชิงอุดมคติ) และออกที่จุด 3 แล้วขยายตัวผ่านกังหันมาที่จุด 4 ก๊าซไอเสียร้อนที่ออกมาจะผสมกับบรรยากาศด้านนอกวัฏจักร และอากาศเย็นที่บริสุทธิ์ ง่ายเข้าวัฏจักรที่จุด 1 กำลังของกังหันจ่ายให้กับเครื่องอัดอากาศ วนกำลังงานใช้ประโยชน์อาจจ่ายโดยกังหัน หรือโดยการที่ก๊าซขยายตัวออกได้อีกในหัวฉีดซึ่งจ่ายแรงขับ (Propulsion) สู่วานที่ติดตั้งเครื่องต้นกำลัง เช่น เครื่องบินเจ็ทเพราะว่าวัฏจักรเป็นแบบเปิดฉะนั้นของไหลทำงานจึงเป็นไปได้เฉพาะอากาศเท่านั้น (บนโลก)

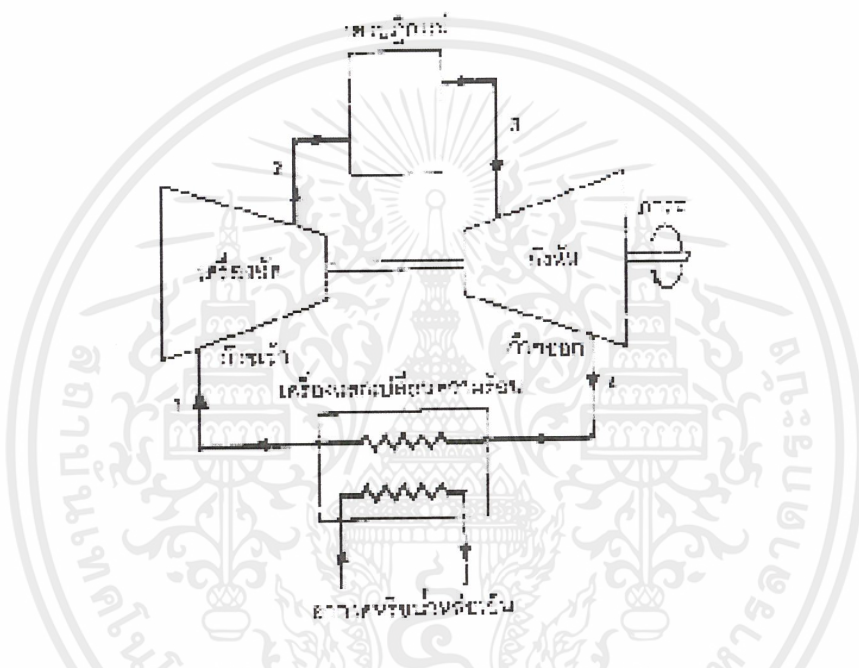
2.2.2 วัฏจักรเปิดชนิดโดยอ้อม (Indirect Open Cycle) องค์ประกอบของวัฏจักรเปิดชนิดโดยอ้อม (รูปที่ 2.2) คล้ายคลึงกับของวัฏจักรเปิดชนิดโดยตรง ยกเว้นอากาศ ซึ่งเป็นของไหลทำงานรับความร้อนจากสารหล่อเย็น (Coolant) ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน วัฏจักรนี้เหมาะสำหรับใช้เมื่อต้องการป้องกันมลภาวะทางอากาศจากการรับความร้อนโดยตรง เช่น จากเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ซึ่งอาจมีรังสีถูกปล่อยกระจายสู่บรรยากาศ อย่างไรก็ตามการใช้วัฏจักรเปิดเหมาะสมกับปฏิกรณ์นิวเคลียร์มากกว่า



รูปที่ 2.2 วัฏจักรกังหันก๊าซแบบเปิดชนิดโดยอ้อม (Indirect Open Gas-Turbine Cycle)

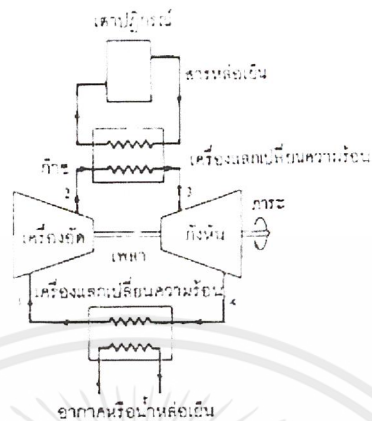
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 วัฏจักรปิดชนิดโดยตรง (Direct Closed Cycle) ในวัฏจักรปิดชนิดโดยตรง (รูปที่ 2.3) ก๊าซหล่อเย็น (Gas Coolant) ได้รับความร้อนในเตาปฏิกรณ์, ขยายตัวผ่านกังหันสู เครื่องยนต์ เปลี่ยนความร้อนและถูกอัดกลับสู่เครื่องปฏิกรณ์ ในวัฏจักรนี้นอกจากอากาศอาจใช้ก๊าซอื่นเป็นสารทำงานได้ และในสภาพทำงานปกติจะไม่มีรังสีของก๊าซผ่านออกสู่บรรยากาศ ระบบปิดสามารถใช้ของเหลวภายใต้สภาวะอัดตัวเป็นของไหลทำงานได้ ซึ่งทำให้ลดขนาดของเครื่องอัดลง ของเหลวทำงานที่เหมาะสมมากที่สุดกรณีนี้คือ ฮีเลียม



รูปที่ 2.3 วัฏจักรกังหันก๊าซแบบปิดชนิดโดยตรง

2.2.4 วัฏจักรปิดชนิดโดยอ้อม (Indirect Closed Cycle) วัฏจักรปิดชนิดโดยอ้อมเป็นแบบผสมของวัฏจักรเปิดชนิดโดยอ้อมและวัฏจักรปิดชนิดโดยตรง ซึ่งเครื่องปฏิกรณ์ถูกแยกออกจากของไหลทำงานโดยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ขณะที่ก๊าซทำงานปลดปล่อยความร้อนสู่บรรยากาศผ่านทางเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเช่นกัน (รูปที่ 2.4) สารหล่อเย็นเริ่มแรกอาจเป็นน้ำ, โลหะเหลว, หรือก๊าซเช่นฮีเลียม



รูปที่ 2.4 วัฏจักรของกังหันแบบปิดชนิดโดยอ้อม

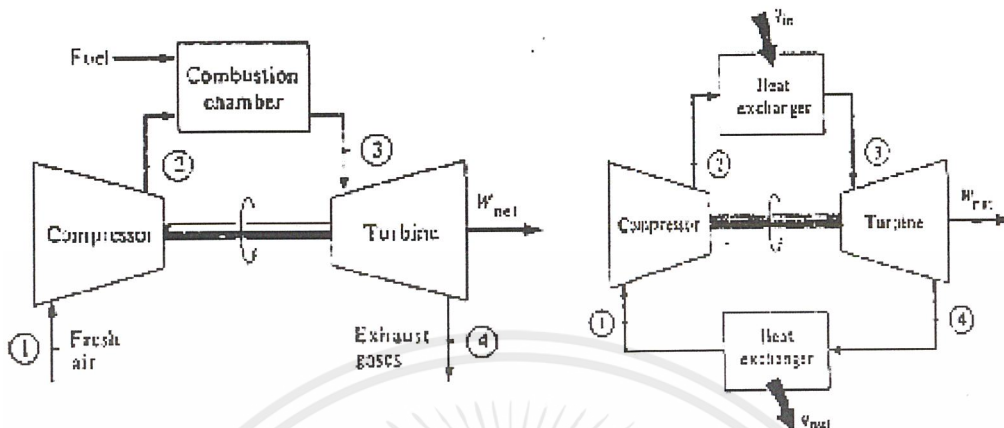
2.3 วัฏจักรเบรตัน (Brayton Cycle)

วัฏจักรเบรตัน (Brayton Cycle) ได้รับการค้นคิดครั้ง George Brayton” สำหรับใช้กับเครื่องแบบข้อต่อ-ข้อต่อเมื่อประมาณ ค.ศ. 1870 แต่ปัจจุบันนี้มันถูกนำมาใช้กับเครื่องกังหันก๊าซ ตามปกติเครื่องกังหันก๊าซทำงานในลักษณะวัฏจักรเปิด (Open Cycle) ตามที่แสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งมีลักษณะการทำงานคือ อากาศจากภายนอกถูกดูดเข้าสู่เครื่องอัด (Compressor) และ ถูกกดอัดให้มีอุณหภูมิและความดันสูงขึ้น อากาศที่มีความดันสูงนี้จะถูกส่งเข้าห้องเผาไหม้เพื่อทำการเผาไหม้กับน้ำมันเชื้อเพลิงในลักษณะความดันคงที่ ก๊าซร้อนซึ่งได้มาจากการเผาไหม้จะถูกส่งไปยังเครื่องกังหันและขยายตัวจนความดันลดลงเท่ากับความดันบรรยากาศ การขยายตัวนี้เป็นผลให้เกิดการผลิตกำลังงานซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่าง ๆ ได้ ส่วนก๊าซร้อนที่ออกจากเครื่องกังหันนี้จะถูกส่งออกภายนอกในลักษณะของก๊าซเสีย

การทำงานของเครื่องกังหันก๊าซที่กล่าวข้างต้นสามารถแทนได้ด้วยวัฏจักรปิด (Closed Cycle) ซึ่งสะดวกต่อการวิเคราะห์โดยการใช้ข้อสมมุติอากาศมาตรฐาน (Air-standard Assumption) ด้านล่างของรูป 2.5 แสดงถึงวัฏจักรดังกล่าว ในกรณีนี้กระบวนการอัด (Compression) และขยายตัว (Expansion) ยังคงเป็นเช่นเดิม แต่กระบวนการเผาไหม้นั้นถูกแทนด้วยกระบวนการให้ความร้อน (heat addition) ที่ความดันคงที่ และกระบวนการขับไล่ก๊าซเสียนั้นถูกแทนด้วยกระบวนการคายความร้อน (Heat Rejection) ที่ความดันคงที่ วัฏจักรดังกล่าวนี้เป็นวัฏจักรทางอุณหพลศาสตร์ซึ่งสารตัวทำงานวนเวียนอยู่ในวัฏจักร วัฏจักรนี้มีชื่อเรียกว่าวัฏจักรเบรตัน (Brayton Cycle) อันประกอบไปด้วยวัฏจักรซึ่งเป็นแบบรีเวิร์สซิเบิลภายใน (Internally reversible)

วัฏจักรนี้นำมาใช้กับเครื่องยนต์กังหันแก๊ส (gas turbine) ซึ่งประกอบด้วยกระบวนการต่าง ๆ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

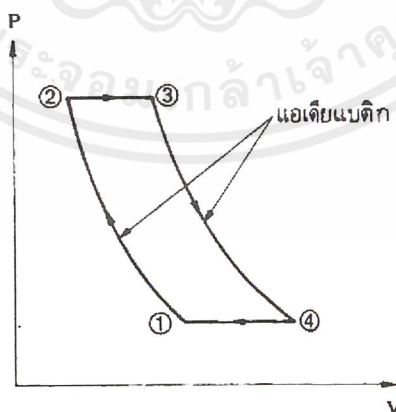


รูปที่ 2.5 การทำงานของเครื่องกังหันก๊าซเป็นวัฏจักรเปิดและวัฏจักรปิด

จากจุดที่ 1-2 เป็นกระบวนการอัดตัวแบบเอนทาลปีเบตติก อากาศถูกอัดในคอมเพรสเซอร์
 จากจุดที่ 2-3 เป็นการให้ความร้อนในแบบดันคงที่ (constant pressure) เชื้อเพลิงจะถูกเผาไหม้พร้อมกับ
 อากาศที่ถูกอัดผ่านคอมเพรสเซอร์เข้ามายังห้องเผาไหม้

จากจุดที่ 3-4 เป็นการขยายตัวในแบบเอนทาลปีเบตติก แก๊สที่ถูกเผาไหม้จากห้องเผาไหม้จะถูกส่ง
 ผ่านเข้ามายังกังหัน (turbine) และขยายตัว (expansion)

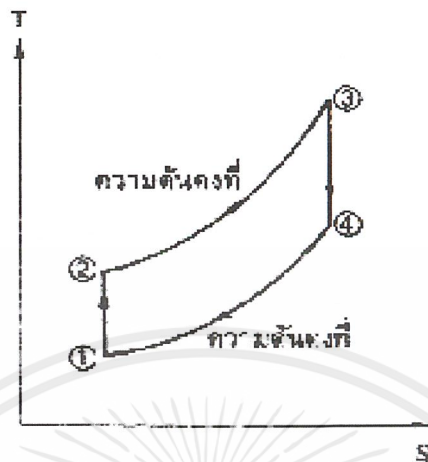
จากจุดที่ 4-1 เป็นการส่งความร้อนออกในแบบความดันคงที่ จากจุดที่ 4-1 นี้เป็นจิ้งหระคายหรือ
 ไลโอเลียออก



(ก)

รูปที่ 2.6 (ก) แผนภาพ P-V ของวัฏจักรเบรตัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

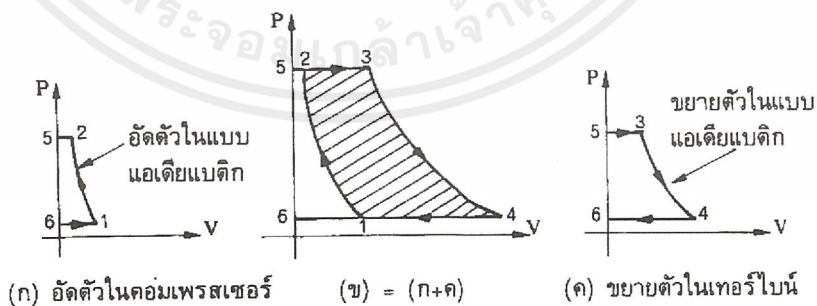


รูปที่ 2.6 (ข) แผนภาพ T-S ของวัฏจักรเบรตัน

พื้นที่ทางด้านซ้ายมือและขวามือเมื่อคิดออกมารูปของพลังงานจะมีค่าเท่ากัน เพียงแต่รูปที่ 2.6 (ก) จะอยู่ในรูปของพลังงานกล สำหรับรูปที่ 2.6 (ข) จะเป็นรูปของพลังงานความร้อน

2.4 วัฏจักรทางทฤษฎี

ลักษณะการทำงานของเครื่องยนต์กังหันแก๊สตั้งได้กล่าวมาแล้วจะทำงานในลักษณะที่มีกระบวนการที่ไหลสม่ำเสมอ (flow work) ซึ่งมีวงจรการทำงานและแผนภาพ p-v ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 P-V diagrams ของวัฏจักรที่มีการไหลสม่ำเสมอ

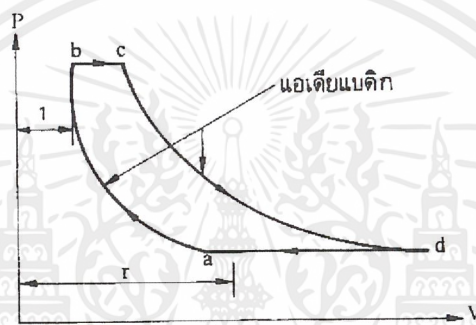
หลักการทำงานของการเผาไหม้ (ให้ความร้อน) อาจจะเป็นแบบปริมาตรคงที่ (constant volume)

หรือแบบความดันคงที่ (constant pressure) สำหรับแบบปริมาตรคงที่ในปัจจุบันไม่มีการสร้างมาใช้ ก็คง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหลือในแบบความดันคงที่ ซึ่งแผนภาพ p-v ของการเผาไหม้แบบความดันคงที่จากจุดที่ 2-3 ได้แสดงให้เห็นในรูปที่ 8.3 จากรูปจะเห็นว่า มีแผนภาพ p-v อยู่ 3 รูป รูป (ก) เป็นการอัดตัวในคอมเพรสเซอร์ (จากจุดที่ 1-2) รูป (ข) เป็นแผนภาพ p-v รวมถึงแต่การอัดตัวจากจุดที่ 1-2 ในคอมเพรสเซอร์ เผาไหม้จากจุดที่ 2-3 ในห้องเผาไหม้และขยายตัวจากจุดที่ 3-4 ในเทอร์ไบน์ สำหรับรูป (ค) เป็นการขยายตัวในเทอร์ไบน์จากจุดที่ 3-4

จากแผนภาพ p-v ในรูปที่ 2.7 ที่กล่าวมาแล้ว รูป (ข) เราสามารถนำมาเขียนใหม่ในเชิงทฤษฎีดังนี้



รูปที่ 2.8 แผนภาพ P-V วัฏจักรในเชิงทฤษฎี

จากรูปที่ 2.8 จาก a ไป b เป็นการอัดตัวในแบบแอดเดียแบติกในคอมเพรสเซอร์จาก b ไป c เป็นการให้ความร้อน (heat addition) ในแบบความดันคงที่ในห้องเผาไหม้จาก c ไป d เป็นการขยายตัวในแบบแอดเดียแบติก ในเทอร์ไบน์ และ d ไป a เป็นการไล่อิเสัยออกในแบบความดันคงที่ ดังนั้นจากหลักการของวิชาเทอร์โมไดนามิกส์ เราจะได้สมการดังต่อไปนี้

$$\text{ความร้อนที่ให้ (heat addition)} \quad Q_A = C_p (T_c - T_b)$$

$$\text{ความร้อนที่ส่งออก (heat rejected)} \quad Q_R = C_p (T_d - T_a)$$

$$\begin{aligned} \text{ประสิทธิภาพของวัฏจักร} \quad \eta_i &= \frac{Q_A - Q_R}{Q_A} \\ &= \frac{C_p (T_c - T_b) - C_p (T_d - T_a)}{C_p (T_c - T_b)} \end{aligned}$$

$$\text{ประสิทธิภาพของวัฏจักร} = 1 - \frac{(T_d - T_a)}{(T_c - T_b)} \quad \dots\dots\dots(2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากอัตราส่วนการอัดตัว และอัตราส่วนการขยายตัวเท่ากัน (พิจารณาแผนภาพ p-v รูปที่ 2.3 (ข)) จะเห็นว่าที่จุด 1 และ 4 มีความดันเท่ากันคือ ความดันบรรยากาศและที่จุด 2 และ 3 มีความดันเท่ากัน คือ เป็นความดันในห้องเผาไหม้ จะได้ว่า

$$r_p = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_3}{P_4}$$

เมื่อ r_p คือ อัตราส่วนความดัน

จากสมการของกระบวนการเอดเคียแบติก $\frac{T_2}{T_1} = \left[\frac{P_2}{P_1} \right]^{(k-1)/k} = \left[\frac{V_1}{V_2} \right]^{k-1}$

ดังนั้น $\frac{T_b}{T_a} \left[\frac{P_b}{P_c} \right]^{(k-1)/k} = r_p^{(k-1)/k}$

และ $\frac{T_c}{T_d} = \left[\frac{P_c}{P_d} \right]^{(k-1)/k} = r_p^{(k-1)/k}$

เพราะฉะนั้น $T_c = T_d \cdot r_p^{(k-1)/k}$

และ $T_b = T_a \cdot r_p^{(k-1)/k}$

แทนค่า T_c, T_b ในสมการที่ (2.1) $= 1 - \left(\frac{T_d - T_a}{T_d \cdot r_p^{(k-1)/k} - T_a \cdot r_p^{(k-1)/k}} \right) \dots (2.2)$

ประสิทธิภาพ $\eta_t = 1 - \left(\frac{T_d - T_a}{r_p^{(k-1)/k} (T_d - T_a)} \right)$
 $= 1 - \left(\frac{1}{r_p} \right)^{(k-1)/k}$

เมื่อ η_t คือ ประสิทธิภาพความร้อน (thermal efficiency)

หรือถ้าให้ $r_c = \frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4}$

เมื่อ r_c คือ อัตราส่วนการอัดอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{ดังนั้น} \quad \frac{T_b}{T_a} = \left(\frac{V_a}{V_c} \right)^k = r_c^{k-1}$$

$$\text{และ} \quad \frac{T_c}{T_d} = \left(\frac{V_d}{V_c} \right) = r_c^{k-1}$$

$$\therefore T_b = T_a \cdot r_c^{k-1}$$

$$\text{และ} \quad T_c = T_d \cdot r_c^{k-1}$$

$$\begin{aligned} \text{แทนค่าในสมการที่ (8.1) ประสิทธิภาพ } \eta_t &= 1 - \left(\frac{T_d - T_a}{T_d r_c^{k-1} - T_a r_c^{k-1}} \right) \\ &= 1 - \left(\frac{T_d - T_a}{r_c^{k-1} (T_d - T_a)} \right) \\ &= 1 - \left(\frac{1}{r_c} \right)^{k-1} \end{aligned}$$

2.5 วัฏจักรที่แท้จริง

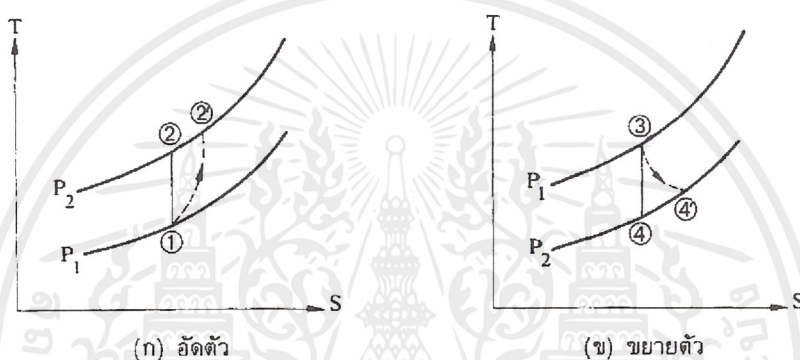
ข้อแตกต่างของการทำงานของวัฏจักรที่แท้จริง (Actual Cycle) ของเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์จะไม่เป็นไปตามวัฏจักรทางทฤษฎี (Ideal Cycle) ทั้งนี้เป็นเพราะว่าในวัฏจักรที่เกิดขึ้นจริง ๆ นั้น มีตัวแปรอยู่หลายอย่างที่ทำให้วัฏจักรไม่เป็นไปตามทฤษฎี ดังนั้นในการคำนวณหาค่าต่าง ๆ ของวัฏจักรจึงต้องคำนึงถึงข้อแตกต่างเหล่านั้น และเราสามารถจะแบ่งออกเป็นข้อใหญ่ ๆ ได้ดังต่อไปนี้

1. การอัดในคอมเพรสเซอร์และการขยายตัวในเทอร์ไบน์ไม่เป็นไปตามกระบวนการไอเซนโทรปิก (Isentropic process)
2. ค่าความร้อนจำเพาะของสารตัวกลาง คือ อากาศที่ผ่านคอมเพรสเซอร์ และแก๊สที่ผ่านเทอร์ไบน์มีค่าไม่เท่ากัน
3. มวลของสารตัวกลางที่ผ่านคอมเพรสเซอร์และเทอร์ไบน์มีปริมาณไม่เท่ากัน
4. การสูญเสียความดันในห้องเผาไหม้ที่อัดและส่งมาจากคอมเพรสเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1 การอัดอากาศในคอมเพรสเซอร์และการขยายตัวของแก๊สในเทอร์ไบน์ เป็นไปตามกระบวนการแอเดียแบติก แต่เนื่องจากกระบวนการแอเดียแบติกมี 2 แบบคือ แอเดียแบติกแบบย้อนกลับได้ และแอเดียแบติกแบบย้อนกลับไม่ได้

จากรูปถ้าเป็นการอัดตัวแบบแอเดียแบติกแบบย้อนกลับได้ ซึ่งเป็นวัฏจักรทางทฤษฎี การอัดตัวก็จะอัดตัวจากจุดที่ 1-2 แต่ในวัฏจักรที่แท้จริงแล้ว การอัดตัวจะเป็นแบบแอเดียแบติกแบบย้อนกลับไม่ได้ การอัดตัวก็จะเริ่มจากจุดที่ 1-2



รูปที่ 2.9 วัฏจักรทางทฤษฎีของคอมเพรสเซอร์และเทอร์ไบน์

ในการทำงานเดียวกันในจังหวะการขยายตัวของแก๊สในเทอร์ไบน์ ถ้าการขยายตัวเป็นไปในทางทฤษฎีคือเป็นไปตามแอเดียแบติกแบบย้อนกลับได้ การขยายตัวก็จะเริ่มจากจุดที่ 3-4 แต่ในวัฏจักรที่เกิดขึ้นจริง ๆ จะขยายตัวแบบแอเดียแบติกแบบย้อนกลับไม่ได้ คือขยายตัวจากจุดที่ 3-4

สาเหตุการทำงานของวัฏจักรเป็นแบบแอเดียแบติกแบบย้อนกลับไม่ได้ ก็เนื่องจากว่าทั้งคอมเพรสเซอร์และเทอร์ไบน์ จะต้องมีการสูญเสียเกิดขึ้น เนื่องจากความฝืด (friction) ภายในคอมเพรสเซอร์และเทอร์ไบน์ หรือพูดได้ง่าย ๆ ว่า ประสิทธิภาพของคอมเพรสเซอร์และเทอร์ไบน์ จะมีค่าประสิทธิภาพไม่เต็ม 100 เปอร์เซ็นต์

ในจังหวะอัดเนื่องจากคอมเพรสเซอร์มีความฝืด (actual cycle) จึงทำให้ค่าอุณหภูมิของอากาศที่ออกจากคอมเพรสเซอร์มีค่าสูงขึ้น จาก T_2 เป็น T_2' ซึ่งถ้าเราพูดถึงการทำงานของคอมเพรสเซอร์ ถ้าคอมเพรสเซอร์มีประสิทธิภาพไม่เต็ม 100% ก็หมายความว่างานที่เราให้คอมเพรสเซอร์ในการอัดอากาศจะมีค่าสูงกว่างานที่ใช้จริง หรือจะเขียนเป็นสมการที่เราคุ้นเคยอยู่บ่อย ๆ ก็คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{ประสิทธิภาพของคอมเพรสเซอร์ } (n_c) = \frac{\text{งานที่ใช้จริง}}{\text{งานที่ให้แก่อคอมเพรสเซอร์}}$$

$$\text{ประสิทธิภาพของคอมเพรสเซอร์ } (n_c) = \frac{\text{งานของกระบวนการไอเซนโทรปิก}}{\text{งานที่ใช้จริง}}$$

จากรูปที่ 2.9 เราหางานของกระบวนการไอเซนโทรปิก และงานที่ใช้จริงของคอมเพรสเซอร์ได้ดังนี้

$$\text{งานของกระบวนการไอเซนโทรปิก} = W_{Cp}(T_2-T_1)$$

$$\text{งานที่ใช้จริง} = W_{Cp}(T_2-T_1)$$

$$\text{ดังนั้น ประสิทธิภาพของคอมเพรสเซอร์ } (n_c) = \frac{W_{Cp}(T_2-T_1)}{W_{Cp}(T_2-T_1)}$$

$$(n_c) = \frac{T_2-T_1}{T_2-T_1}$$

ในทำนองเดียวกัน เมื่อเป็นงานของเทอร์ไบน์ เนื่องจากงานที่ได้จากเทอร์ไบน์เมื่อคิดถึงประสิทธิภาพของเทอร์ไบน์ ซึ่งมีค่าไม่ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ แล้วงานที่ได้จากเทอร์ไบน์จริง (actual work) ก็จะมีค่าน้อยกว่างานที่ได้ตามทฤษฎี (reversible adiabatic work หรือ isentropic work) ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{ประสิทธิภาพของเทอร์ไบน์ } (\eta_t) = \frac{\text{งานที่ใช้จริง}}{\text{งานของกระบวนการไอเซนโทรปิก}}$$

จากรูปที่ 2.9 เราสามารถทำงานของกระบวนการไอเซนโทรปิก และงานที่ใช้จริงของเทอร์ไบน์ได้ดังนี้

$$\text{งานของกระบวนการไอเซนโทรปิก} = W_{Cp}(T_3-T_4)$$

$$\text{งานที่ใช้จริง} = W_{Cp}(T_3-T_4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น ประสิทธิภาพของเทอร์โบไบน (}\eta_t\text{)} &= \frac{W_{Cp}(T_3-T_4)}{W_{Cp}(T_3-T_4')} \\ \eta_t &= \frac{T_3 - T_4}{T_3 - T_4'} \end{aligned}$$

2.5.2 ความแตกต่างของอากาศที่ผ่านคอมเพรสเซอร์กับแก๊สที่ไหลผ่านเทอร์โบไบนจะมีค่าความร้อนจำเพาะ (C_p) ของอากาศและของแก๊สไม่เท่ากัน

เมื่อคิดถึงค่าของงานในคอมเพรสเซอร์ ซึ่งเกิดขึ้นโดยใช้อากาศเป็นตัวกลาง ค่าของงานตามสมการ $W_{Cp}(T_2-T_1)$ ก็จะต้องใช้ค่า C_p ของอากาศ และในทำนองเดียวกัน เมื่อคิดถึงงานในเทอร์โบไบน ซึ่งเกิดขึ้นโดยใช้แก๊สเป็นสารตัวกลาง ค่าของงานตามสมการ $W_{Cp}(T_3-T_4)$ ของแก๊สนั้น ดังนั้นงานที่ได้ก็คือ

$$W_C = W_{Cp}(\text{อากาศ})(T_2-T_1)$$

$$W_T = W_{Cp}(\text{แก๊ส})(T_3-T_4)$$

2.5.3 มวลของสารตัวกลางที่ผ่านคอมเพรสเซอร์และเทอร์โบไบนมีปริมาณไม่เท่ากัน

เนื่องจากในการทำงานของแก๊สเทอร์โบไบน อากาศถูกดูดผ่านเพรสเซอร์และส่งผ่านเข้าไปยังห้องเผาไหม้ เมื่ออากาศที่ถูกอัดตัวเข้าไปในห้องเผาไหม้จะรวมตัวกับเชื้อเพลิงที่ส่งเข้ามาในห้องเผาไหม้ ทำให้ปริมาณของสารตัวกลางที่จะส่งไปยังเทอร์โบไบนมีปริมาณเพิ่มขึ้นเท่ากับปริมาณของเชื้อเพลิงที่ถูกส่งเข้ามา ดังนั้นในการคำนวณงานคอมเพรสเซอร์และงานของเทอร์โบไบน จึงใช้มวลของสารตัวกลางไม่เท่ากัน ซึ่งนั่นก็คือ

ถ้าให้มวลของอากาศที่ผ่านคอมเพรสเซอร์เท่ากับ m_a

และมวลของเชื้อเพลิงที่ส่งเข้าไปยังห้องเผาไหม้เท่ากับ m_f

เราจะได้อัตราของคอมเพรสเซอร์และงานของเทอร์โบไบนดังนี้

$$\text{งานของคอมเพรสเซอร์} \quad W_C = m_a C_p (\text{อากาศ})(T_2-T_1)$$

$$\text{งานของเทอร์โบไบน} \quad W_T = (m_a+m_f)C_p (\text{แก๊ส})(T_3-T_4')$$

2.5.4 การสูญเสียความดันในห้องเผาไหม้และอุปกรณ์ประกอบ

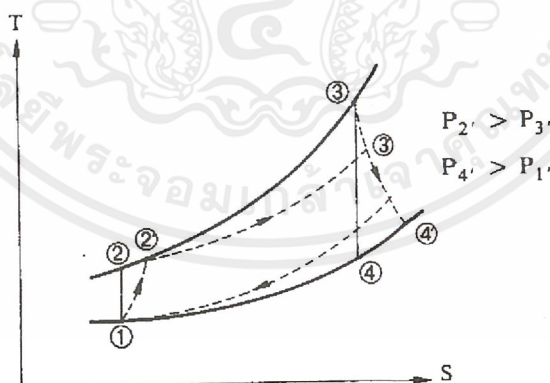
ในขณะที่คอมเพรสเซอร์อัดอากาศเข้าไปยังห้องเผาไหม้ด้วยความดันที่สูงขึ้น และอากาศที่ถูกอัดนี้ถูกส่งผ่านเข้าไปยังห้องเผาไหม้ ภายหลังจากการเผาไหม้อากาศจะถูกส่งผ่านทางท่อต่าง ๆ และผ่านเข้าไปยังเทอร์โบไบน ความดันที่เทอร์

ไบนจะปรากฏว่ามีค่าน้อยกว่าความดันที่ออกจากคอมเพรสเซอร์ ทั้งนี้เนื่องจากการสูญเสียความดัน (pressure loss) ภายในห้องเผาไหม้และท่อทางต่าง ๆ จึงทำให้ความดันที่จะเข้าเทอร์ไบน์มีค่าต่ำกว่าความดันที่ออกจากความเพรสเซอร์

ในการใช้งานจริง ๆ ปรากฏว่ามีการสูญเสียความดันในอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- การสูญเสียในห้องเผาไหม้ (combustion chamber loss)
- การสูญเสียด้านอากาศเข้าเทอร์ไบน์ ในอุปกรณ์การถ่ายเทความร้อน (air side heat-exchanger loss)
- การสูญเสียด้านแก๊สออกจากเทอร์ไบน์ ในอุปกรณ์การถ่ายเทความร้อน (gas side heat-exchanger)
- การสูญเสียด้านอากาศออกจากคอมเพรสเซอร์ ในอุปกรณ์การถ่ายเทความร้อน (air side intercooler loss)
- การสูญเสียภายในท่อของอุปกรณ์ ซึ่งอยู่ระหว่างอากาศเข้า (intake) และอากาศออก (exhaust)

สำหรับแผนภาพ T-S ของการสูญเสียความดันในห้องเผาไหม้และอุปกรณ์ประกอบ สามารถแสดงได้ดังนี้



รูปที่ 2.10 แผนภาพ T-S ของการสูญเสียความดันในห้องเผาไหม้และอุปกรณ์ประกอบ

$$P_2' = P_3 \text{ (ไม่มี loss)}$$

$$P_3 = P_2' - \text{loss (มี loss)}$$

และ $P_4' = P_1$ (ไม่มี loss)

$$P_1 = P_4' - \text{loss (มี loss)}$$

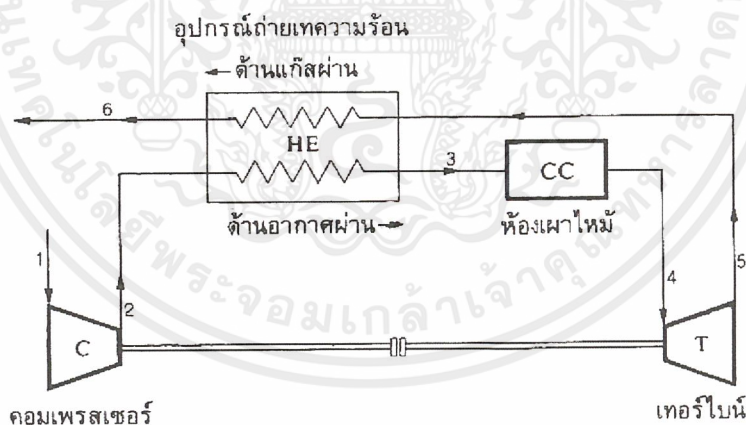
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสูญเสียความดันในห้องเผาไหม้ที่อัดมาจากคอมเพรสเซอร์ ปกติคอมเพรสเซอร์จะอัดอากาศเข้าสู่ห้องเผาไหม้ด้วยความดันค่าหนึ่ง เช่น สมมติว่ามีค่าเท่ากับ 10 kg/cm^2 ความดันนี้เมื่อเข้าสู่ห้องเผาไหม้และส่งออกไปยังเทอร์ไบน์ ก็ควรจะมีค่าเท่าเดิมแต่ความเป็นจริงปรากฏว่าจะมีการสูญเสียความดันจากช่วงเข้าห้องเผาไหม้ไปยังเทอร์ไบน์ เช่น สมมติว่าสูญเสียไป 0.5 kg/cm^2 ดังนั้นจะเหลือความจริง ๆ ที่ส่งผ่านเทอร์ไบน์เพียง 9.5 kg/cm^2 ซึ่งในลักษณะเช่นนี้จะทำให้อัตราส่วนความดันที่ใช้คำนวณหาค่าของงานของคอมเพรสเซอร์ของเทอร์ไบน์มีค่าเปลี่ยนไป นั่นก็คือ P_2 (ความดันที่ออกจากคอมเพรสเซอร์) กับ P_3 (ความดันที่เข้าเทอร์ไบน์) จะมีค่าไม่เท่ากัน

$$P_2 - P_3 = \text{การสูญเสียความดันในห้องเผาไหม้ (pressure loss)}$$

หรือ
$$P_3 = P_2 - \text{pressure loss}$$

การสูญเสียความดันในอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อน ในกรณีอากาศที่ออกจากคอมเพรสเซอร์ก่อนเข้าห้องเผาไหม้ ถูกอุ่นด้วยแก๊สร้อนที่ออกจากเทอร์ไบน์ ภายในอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อน (heat-exchanger) ถ้ามีการสูญเสียความดันให้อุปกรณ์ถ่ายเทความร้อน ค่าความดันจุดต่าง ๆ จะมีค่าดังนี้



รูปที่ 2.11 วงจรที่มีอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อน

ที่หมายเลข 1 อากาศก่อนเข้าคอมเพรสเซอร์จะมีความดัน P_1 หมายเลข 2 อากาศออกจากคอมเพรสเซอร์จะมีความดัน P_2 ที่หมายเลข 3, 4, 5, 6 อากาศก็จะมีค่าความดัน P_3, P_4, P_5 และ P_6 ตามลำดับ

ถ้าไม่มีการสูญเสียความดัน (pressure loss) P_2, P_3 และ P_4 จะมีค่าเท่ากัน และในทำนองเดียวกัน P_5 และ P_6 จะมีค่าเท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้ามีการสูญเสียความดัน P_2 , P_3 และ P_4 จะมีค่าไม่เท่ากัน และในทำนองเดียวกัน P_5 และ P_6 ก็จะมีค่าไม่เท่ากัน ซึ่งสามารถเขียนสมการแสดงไว้ดังนี้

$$P_3 = P_2 - \text{การสูญเสียความดันในอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนด้านอากาศผ่าน} \\ \text{(air-side)}$$

และ $P_4 = P_3 - \text{การสูญเสียความดันในห้องเผาไหม้}$

$$P_6 = P_5 - \text{การสูญเสียความดันในอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนด้านแก๊สผ่าน (gas side)}$$

2.5.5 การสูญเสียความร้อนของเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ และการสูญเสียงานในการส่งกำลังจากเทอร์ไบน์ไปขับเคลื่อนคอมเพรสเซอร์ ความร้อนที่ได้จากห้องเผาไหม้และนำไปใช้งานนั้น จะไม่ได้ 100% เต็ม แต่จะมีการสูญเสียไปจำนวนหนึ่ง ซึ่งอยู่ประกับประสิทธิภาพการเผาไหม้ (combustion efficiency) ตัวอย่างเช่น ความร้อนจากเชื้อเพลิงที่ได้ในห้องเผาไหม้จริง ๆ 100 kcal แต่สูญเสียไป 100 kcal ประสิทธิภาพของห้องเผาไหม้มีค่าเท่ากับ 90% ในการคำนวณจึงต้องนำมาพิจารณาด้วย

อีกประการหนึ่งที่จะต้องกล่าวถึงก็คือ การสูญเสียงานในการส่งกำลังจากเทอร์ไบน์ไปขับเคลื่อนคอมเพรสเซอร์ ถ้าประสิทธิภาพการส่งกำลัง (transmission efficiency) มีการสูญเสียน้อย ก็แสดงว่าประสิทธิภาพของการส่งกำลังสูง เช่น เทอร์ไบน์ส่งงานไปขับเคลื่อนคอมเพรสเซอร์มีค่าเท่ากับ 50 kcal/kg งานที่คอมเพรสเซอร์ได้รับเท่ากับ 50 kcal/kg แต่คอมเพรสเซอร์ได้รับ 40 kcal/kg ก็แสดงว่ามีการสูญเสียไป 10 kcal/kg ในระบบส่งกำลังหรืออาจกล่าวได้ว่า ประสิทธิภาพในการส่งกำลังจากเทอร์ไบน์ไปขับเคลื่อนคอมเพรสเซอร์มีค่าเท่ากับ 80% ดังนั้นในการคำนวณหางานของคอมเพรสเซอร์จึงต้องนำค่าประสิทธิภาพของการส่งกำลังมาพิจารณาด้วย

วัฏจักรของเครื่องยนต์ที่ใช้งานตามความจริงนี้มีความสลับซับซ้อนมาก แต่เพื่อที่จะให้การวิเคราะห์วัฏจักรเป็นไปได้เราจึงใช้ข้อสมมุติซึ่งเรียกว่า อากาศมาตรฐาน (air-standard assumptions) ซึ่งมีลักษณะดังต่อไปนี้

1. สารตัวทำงานเป็นอากาศซึ่งวนเวียนอยู่ในวัฏจักรอย่างต่อเนื่อง และอากาศนี้มีพฤติกรรมเป็นก๊าซอุดมคติ (ideal gas)
2. ทุกกระบวนการที่ประกอบเป็นวัฏจักรมีลักษณะเป็นรีเวอร์ซิเบิลภายใน (internally reversible)
3. ใช้กระบวนการให้ความร้อน (heat addition) จากแหล่งภายนอกแทนกระบวนการเผาไหม้ซึ่งเกิดขึ้นตามความจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

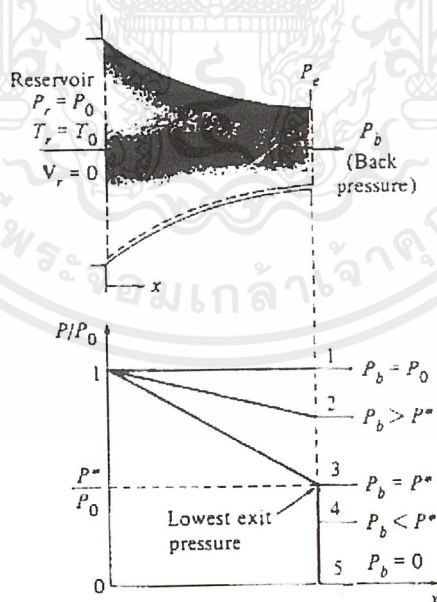
4. ใช้กระบวนการถ่ายความร้อน (heat-rejection) ออกสู่แหล่งภายนอกแทนกระบวนการถ่ายก๊าซเสียและสารตัวทำงานกลับคืนสู่สภาวะเริ่มต้นหลังจากกระบวนการนี้ (คือคิดว่าเป็นวัฏจักรปิด)

ข้อสมมุติอีกข้อหนึ่งซึ่งใช้บ่อยและช่วยให้การวิเคราะห์ง่ายขึ้นได้แก่การคิดว่าความร้อนจำเพาะของอากาศมีค่าคงที่ และมีค่าเท่ากับที่อุณหภูมิห้องปกติ (25°C หรือ 77°F) เมื่อใช้ข้อสมมุติเข้ารวมด้วย เราเรียกว่า อากาศเย็น (cold-air-standard assumptions) วัฏจักรที่วิเคราะห์โดยใช้ข้อสมมุติอากาศมาตรฐานมีชื่อเรียกว่า วัฏจักรอากาศมาตรฐาน (air-standard cycles)

ข้อสมมุติต่าง ๆ ที่กล่าวข้างต้นทำให้การวิเคราะห์วัฏจักรก๊าซผลิตกำลังงานง่ายขึ้นมาก และการทำงานของวัฏจักรทางอุดมคติเหล่านี้ก็ไม่แตกต่างจากของจริงไปมากนัก วัฏจักรทางอุดมคติต่าง ๆ ช่วยให้เราสามารถศึกษาอิทธิพลของตัวแปรหลักต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์ที่ใช้งานตามความจริง

2.6 การไหลแบบไอเซนทรอปิกผ่านหัวฉีด (nozzles)

หัวฉีดแบบลดขนาด (converging nozzle) หรือแบบ “converging-diverging nozzles” นั้นสามารถพบได้ทั่วไปในทางปฏิบัติ ซึ่งก็รวมทั้งในเครื่องกังหันไอน้ำ เครื่องกังหันก๊าซ ระบบขับเคลื่อนเครื่องบิน หรือแม้กระทั่งหัวฉีดรดน้ำต้นไม้ ในหัวข้อนี้จะพิจารณาผลของความดันในแผนการไหลที่ออกจากหัวฉีด ความดันดังกล่าวนี้เรียกว่า “back pressure” ซึ่งจะมีผลต่อความเร็วของไหลตรงทางออก ต่ออัตราการไหลเชิงมวล และต่อการกระจายความดัน (pressure distribution) ภายในหัวฉีด



รูปที่ 2.12 ผลของ back pressure ต่อการกระจายความดันของตามหัวฉีดลดขนาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.1 หัวฉีดแบบลดขนาด (converging nozzle)

พิจารณาการไหลที่มีความเร็วต่ำกว่าเสียงในหัวฉีดแบบลดขนาด ที่ทางเข้าของหัวฉีดนี้ต่ออยู่กับ “reservoir” ซึ่งมีความดัน P และอุณหภูมิ T โดยที่ “reservoir” ดังกล่าวมีขนาดใหญ่มาก จนกระทั่งความเร็วของของไหลบริเวณทางเข้าของหัวฉีดมีค่าน้อยมาก เนื่องจากความเร็วของของไหลใน “reservoir” มีค่าเป็นศูนย์และสมมุติว่าการไหลในหัวฉีดเป็นแบบไอเซนทรอปิก พบว่าความดัน และ อุณหภูมิสแตคนั้นของของไหล ณ หน้าตัดใด ๆ จะมีค่าเท่ากับความดันและอุณหภูมิใน “reservoir”

ต่อมาเราเริ่มโดยการลดค่า “back pressure” (P) ลงเรื่อย ๆ และจะสังเกตเห็นได้ว่าการกระจายความดันไปตามความยาวของหัวฉีดเป็นไปดังแสดงในรูปดังแสดงในรูป 10.9 ถ้า P มีค่าเท่ากับ P ซึ่งเท่ากับ P ก็จะไม่มีการไหลของความดันภายในหัวฉีดจะมีค่าเท่ากันตลอด ต่อมาเมื่อ P ลดลงเป็น P ความดันของไหล ณ หน้าตัดตรงปลายหัวฉีด (P) จะลดลงเป็น P ด้วย ซึ่งก็จะทำให้ความดันในหัวฉีดลดลงตามทิศทางไหล

เมื่อ P ลดลงเท่ากับ P ซึ่งเท่ากับ P* หรือความดันที่จะทำให้ความเร็วของไหล ณ หน้าตัด ตรงปลายหัวฉีด (exit plane) เพิ่มขึ้นเท่ากับความเร็วเสียง อัตราการไหลเชิงมวลจะถึงค่าที่สูงที่สุด และเรากล่าวว่าการไหลเกิดการ “choked” การลดค่า P ลงต่ำกว่า P* (ถึงค่า P) จะไม่เป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่อการกระจายความดันภายในหัวฉีดอีกต่อไป

ภายใต้สภาวะการไหลแบบคงตัว (steady-flow) อัตราการไหลเชิงมวลภายในหัวฉีดจะเป็นค่าคงที่ และสามารถเขียนได้เป็น

$$m' = \rho A V = (P/RT) A [M(kRT)^{1/2}] = P A M (k/RT)^{1/2} \dots\dots\dots(2.3)$$

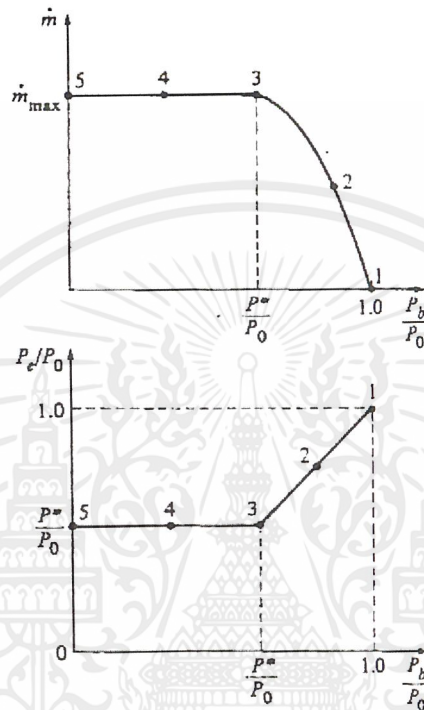
ดังนั้นเห็นได้ว่าอัตราการไหลเชิงมวลของของไหลชนิดหนึ่ง ๆ ภายในหัวฉีดนั้นขึ้นอยู่กับค่าคุณสมบัติสแตคนั้นของของไหล พื้นที่หน้าตัดและค่า “mach number” สมการ (10.4.1) สามารถนำไปใช้คำนวณอัตราการไหลเชิงมวล ณ หน้าตัดใด ๆ ก็ได้

สำหรับที่ค่า A, P₀, T₀ หนึ่ง ๆ เราสามารถหาอัตราการไหลเชิงมวลสูงสุดได้ โดยการดิฟเฟอเรนเชียลสมการ(10.4.1) เทียบกับ M และให้เท่ากับศูนย์ ซึ่งจะได้ว่าค่าสูงสุดดังกล่าวเกิดขึ้นเมื่อ M = 1 แต่ตำแหน่งที่ค่า “Mach number” จะเท่ากับหนึ่งได้มีเพียงที่คอคคอด (throat) เท่านั้น ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าอัตราการไหลเชิงมวลจะมีค่าสูงสุดเมื่อการไหลที่คอคคอดของหัวฉีดมีค่า “Mach number” เท่ากับหนึ่ง ถ้าให้ A* คือพื้นที่หน้าตัด (คอคคอด) ซึ่ง M = 1 ถ้าอัตราการไหลเชิงมวลสูงสุด หาได้โดยการแทนค่า M=1 ลงในสมการ (10.4.1) ซึ่งจะได้

$$m'_{max} = A^* P_0 (kRT)^{1/2} [2/(k+1)]^{(k+1)/2(k-1)} \dots\dots\dots(2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นสำหรับการไหลของก๊าซอุดมคติชนิดหนึ่ง ๆ อัตราการไหลเชิงมวลสูงสุดภายในหัวฉีดซึ่งมีพื้นที่กวดคอดตามที่กำหนดนั้น สามารถควบคุมได้ด้วยการเปลี่ยนแปลงค่าความดันสแตกเนชั่น หรือ อุณหภูมิสแตกเนชั่น และในบางครั้งหัวฉีดลดขนาดนี้จึงถูกนำไปใช้เป็นมาตรวัดอัตราการไหล (การควบคุมอัตราการไหลอีกวิธีหนึ่งซึ่งเห็นได้ชัดเจนก็คือการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่กวดคอด)



รูปที่ 2.13 ผลของค่า back pressure ต่อการไหลเชิงมวลและความดันที่ทางออกของหัวฉีดลดขนาด

รูป 2.13 แสดงการพล็อตค่าอัตราการไหลเชิงมวลเทียบกับสัดส่วน (P_b/P_0) สำหรับหัวฉีดแบบลดขนาด สังกะยได้ว่าอัตราการไหลเชิงมวลจะสูงขึ้นเมื่อค่า (P_b/P_0) ลดลงและจะมีค่าสูงสุดเมื่อ $P_b = P^*$ และหลังจากนั้นมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงแม้ค่า (P_b/P_0) จะลดลงต่ำกว่าค่านี้ นอกจากนั้นแล้วในรูปยังแสดงถึงผลของ “back pressure” ต่อค่าความดันที่ปลายหัวฉีด (P_c) ซึ่งเราสังเกตเห็นได้ว่า

$$P_c = P_b \quad \text{สำหรับ} \quad P_b \geq P^*$$

$$P_c = P^* \quad \text{สำหรับ} \quad P_b < P^*$$

โดยสรุปคือ สำหรับค่า “back pressure” ทั้งหมดที่ต่ำกว่าค่า “critical pressure” (P^*) ความดันของไหลที่ปลายหัวฉีด (P_c) จะเท่ากับ P^* เสมอ และค่า “Mach number” ณ บริเวณดังกล่าวจะเท่ากับหนึ่ง และอัตราการไหลเชิงมวลจะเป็นค่าสูงสุด เนื่องจากความเร็วที่คอคอดมีค่าเท่ากับความเร็วเสียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

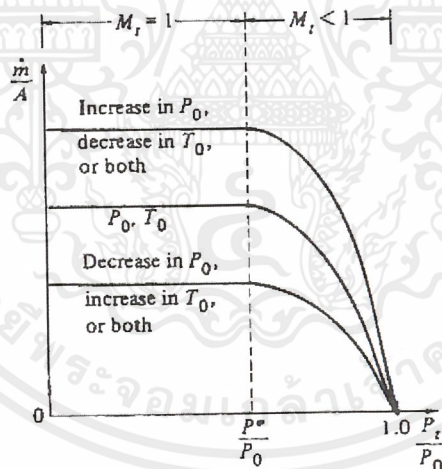
ความดัน “back pressure” ที่ต่ำกว่า P^* จึงไม่สามารถส่งผลไปยังต้นกระแสนไหล (upstream) จึงไม่มีผลต่ออัตราการไหลเชิงมวล

รูป 2.14 แสดงถึงผลของอุณหภูมิสถณเนชัน (T_0) และความดันสถณเนชัน (P_0) ต่ออัตราการไหลเชิงมวลในกรณีการไหลในหัวฉีดลดขนาดนี้ในรูปแบบการพล็อตค่า “mass flux” (อัตราการไหลเชิงมวลต่อพื้นที่หน้าตัด) เทียบกับสัดส่วนระหว่างความดันสถณตติกต่อความดันสถณเนชัน (P/P_0) ที่คอออก การเพิ่มค่า P_0 (หรือลดค่า T_0) จะเป็นการเพิ่ม “mass flux” ส่วนการลดค่า P_0 (หรือเพิ่ม T_0) ก็จะเป็นการลด “mass flux” ซึ่งที่จริงแล้วเราสามารถพิจารณาได้จากสมการ (2.3) และ (2.4) ได้เช่นเดียวกัน

ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่หน้าตัดใด ๆ เทียบกับพื้นที่คอออก (A^*) สำหรับที่อัตราการไหลเชิงมวลและคุณสมบัติสถณเนชันค่าเดียวกันของไหลชนิดเดียวกัน ซึ่งจะได้เป็น

$$A/A^* = (1/M) \{ [2/(k+1)] [1 + (k-1/2)M^2] \}^{(k+1)/(2(k-1))} \dots\dots\dots (2.5)$$

ค่าของ (A/A^*) นั้นสามารถมีค่า “Mach number” ได้สองค่าคือค่าต่ำกว่าเสียง (subsonic) หรือเหนือเสียง (supersonic)



รูปที่ 2.14 การแปรผันของอัตราการไหลเชิงมวลผ่านหัวฉีดซึ่งที่ทางเข้ามีคุณสมบัติแบบสถณเนชัน

2.7 การเผาไหม้ (Combustion)

ปฏิกิริยาเคมีซึ่งเชื้อเพลิงทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (เรียกว่าถูก “oxidized”) และ ให้พลังงานออกมาเป็นจำนวนมากเรียกว่า การสันดาปหรือ การเผาไหม้ (combustion) อากาศเป็นตัว “oxidizer” ที่ใช้บ่อยที่สุดในกระบวนการเผาไหม้ ทั้งนี้เพราะมันสามารถหาได้ง่ายโดยไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายใด ๆ ส่วนออกซิเจนบริสุทธิ์ (pure oxygen ; O_2) นั้นถูกใช้เป็นตัว “oxidizer” เฉพาะในกรณีพิเศษซึ่งไม่สามารถใช้

อากาศได้ ดังนั้นเราจึงจะพิจารณองศ์ประกอบของอากาศก่อนที่จะไปพิจารณาด้านอื่นๆ เช่น พลังงานจากการเผาไหม้

ตามจำนวนโมล (หรือปริมาตร) นั้นพบว่าอากาศหนึ่งประกอบไปด้วยออกซิเจน 20.9% ไนโตรเจน 78.1% อาร์กอน 0.9% และสารอื่นๆ จำนวนเล็กน้อย ในการวิเคราะห์กระบวนการเผาไหม้ อาร์กอนในอากาศจะพิจารณาว่าเป็นไนโตรเจน และสารอื่นๆ ที่มีจำนวนเล็กน้อยจะไม่นำมาพิจารณา ดังนั้นเราจึงพิจารณาว่าอากาศหนึ่งประกอบไปด้วยออกซิเจน 21% ไนโตรเจน 79% (ตามจำนวนโมล) ดังนั้นแต่ละโมลของออกซิเจนจะมีไนโตรเจนจำนวน 3.76 โมลผสมอยู่ด้วยในอากาศ (รูป 2.15) นั่นคือ



ที่อุณหภูมิการเผาไหม้ปกติ ไนโตรเจนมีพฤติกรรมเป็นก๊าซเฉื่อย ซึ่งไม่ทำปฏิกิริยากับสารอื่น อย่างไรก็ตามแม้ไนโตรเจนไม่ทำปฏิกิริยาแต่ก็มีผลต่อกระบวนการเผาไหม้อย่างมากทั้งนี้เพราะไนโตรเจนจะเข้าสู่ห้องเผาไหม้ในปริมาณมากที่อุณหภูมิต่ำ และออกจากห้องเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงในไนโตรเจนจำนวนหนึ่ง (ซึ่งอาจไม่มากนัก) จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนให้สารที่เป็นพิษ เช่น “nitric oxide” (เช่นในก๊าซเสียของเครื่องยนต์สันดาปภายใน)

อากาศที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้มักจะมีละอองน้ำปนอยู่ด้วย ละอองน้ำจะต้องนำมาพิจารณาแม้ว่าในกระบวนการเผาไหม้ส่วนใหญ่เราคิดได้ว่ามันเป็นก๊าซเฉื่อยเช่นเดียวกับไนโตรเจน อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิสูงละอองน้ำอาจแยกตัว (dissociate) เป็น H_2 และ O_2 รวมทั้งอาจแยกเป็น H , O , OH และเมื่อก๊าซจากการเผาไหม้ถูกทำให้เย็นลงต่ำกว่าอุณหภูมิน้ำจุดค้าง (dew point temperature) ของละอองน้ำ จะทำให้ละอองน้ำส่วนหนึ่งกลั่นตัวออกมาเป็นหยดน้ำ และเราจำเป็นต้องรู้อุณหภูมิจุดน้ำค้างนี้เพราะหยดน้ำมักจะรวมตัวกับ “sulfur dioxide” ซึ่งอาจมากับก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้ กลายเป็นกรดกำมะถัน (sulfuric acid) ซึ่งทำให้เกิดการผุกร่อนต่อเครื่องยนต์อย่างมาก

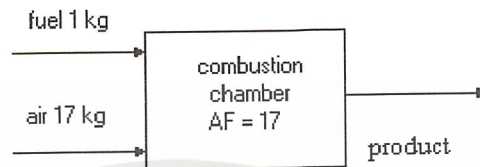
ในระหว่างกระบวนการเผาไหม้ องค์ประกอบก่อนการเผาไหม้เรียกว่าสารตั้งต้น (reactants) และ องค์ประกอบหลังการเผาไหม้เรียกว่าผลิตภัณฑ์ (products) ตัวอย่าง เช่น การเผาไหม้ของคาร์บอนจำนวน 1 kmol กับออกซิเจนบริสุทธิ์จำนวน 1 kmol ซึ่งได้คาร์บอนไดออกไซด์



การนำเชื้อเพลิงมาสัมผัสกับออกซิเจนเพียงอย่างเดียวนั้นไม่เป็นการเพียงพอต่อการเริ่มการเผาไหม้ (มิฉะนั้นแล้วโลกคงจะกำลังลุกเป็นไฟ) เชื้อเพลิงจะต้องถูกทำให้มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิจุดติดไฟ (ignition temperature) ของมัน อุณหภูมิต่ำสุดในการจุดติดไฟของเชื้อเพลิงต่าง ๆ ในบรรยากาศทั่วไปได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แก่ 260 °C สำหรับแก๊สโซลีน ; 580 °C สำหรับไฮโดรเจน ; 610 °C สำหรับคาร์บอนมอนอกไซด์ และ 630 °C สำหรับมีเทน ; นอกจากนั้นแล้วสัดส่วนของเชื้อเพลิงและอากาศจะต้องอยู่ในปริมาณที่เหมาะสม สำหรับการเริ่มการเผาไหม้



รูปที่ 2.15 สัดส่วนอากาศ-เชื้อเพลิงคือปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิง 1 หน่วย

ย้อนกลับไปทีววิชาเคมีเบื้องต้น คงจะจำได้ว่าสมการเคมีนั้นถูกทำให้สมดุลโดยกฎการไม่สูญหายของมวลสารซึ่งอาจกล่าวได้ว่า “มวลสารทั้งหมดของแต่ละองค์ประกอบจะถูกคงไว้ในระหว่างปฏิกิริยาเคมี” นั่นคือมวลทั้งหมดขององค์ประกอบที่ด้านขวาของสมการ (products) จะต้องเท่ากับมวลทั้งหมดขององค์ประกอบนั้นที่ด้านซ้ายของสมการ (reactants) นอกจากนั้นแล้วจำนวนอะตอมของแต่ละองค์ประกอบจะถูกคงไว้ในระหว่างปฏิกิริยาคด้วย ทั้งนี้เพราะจำนวนอะตอมทั้งหมดขององค์ประกอบมีค่าเท่ากับมวลทั้งหมดขององค์ประกอบนั้นหารด้วยค่ามวลอะตอม (atomic mass) ของมัน

ตัวอย่างเช่นทั้งสองข้างของสมการ ประกอบด้วยคาร์บอน 12 kg และออกซิเจน 32 kg แม้ว่าคาร์บอนและออกซิเจนจะอยู่ในรูปของธาตุ (elements) ในสารตั้งต้น และอยู่ในรูปของสารประกอบ (compound) ในผลิตภัณฑ์ นอกจากนั้นแล้วมวลทั้งหมดของสารตั้งต้น และผลิตภัณฑ์มีค่าเท่ากัน (44 kg) (ปกติเราสามารถปิดค่ามวลโมเลกุล (molar mass) เป็นจำนวนเต็มได้เมื่อไม่ต้องการความถูกต้องที่ละเอียดมาก ๆ) อย่างไรก็ตามสังเกตุดูได้ว่าจำนวนโมลของสารตั้งต้น (2 kmol) นั้นไม่เท่ากับของผลิตภัณฑ์ (1 kmol) กล่าวคือจำนวนโมลรวมไม่จำเป็นจะต้องคงเดิมในระหว่างปฏิกิริยาเคมี

ปริมาณที่ใช้บ่อยในการวิเคราะห์การเผาไหม้ได้แก่สัดส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง (air-fuel ratio ; AF) ปกติแล้วมันจะเขียนอยู่ในรูปสัดส่วนเชิงมวลและมีค่าจำกัดความเป็น “มวลของอากาศต่อมวลของเชื้อเพลิงในระหว่างกระบวนการเผาไหม้” นั่นคือ

$$AF = (m_{\text{air}}/m_{\text{fuel}})$$

มวลสาร (m) ของสารนั้นสัมพันธ์กับจำนวนโมล (N) โดยสมการ $m = NM$ โดยที่ M คือ มวลโมเลกุล (molar mass) ของสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัดส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงนี้สามารถเขียนอยู่ในรูปของจำนวนโมลได้เป็นจำนวนโมล ของอากาศต่อจำนวนโมลของเชื้อเพลิง (แต่เราจะใช้สัดส่วนเชิงมวลในที่นี้) ส่วนกลับของ AF เรียกว่า สัดส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศ (fuel-air ratio)

2.8 กระบวนการเผาไหม้ทางทฤษฎีและที่แท้จริง

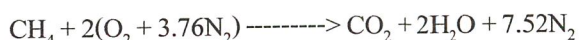
(Theoretical and Actual Combustion processes)

บ่อยครั้งการพิจารณาว่าการเผาไหม้เป็นไปโดยสมบูรณ์ (complete combustion) นั้นเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาระบวนการเผาไหม้มาก เรากล่าวว่าการเผาไหม้เป็นไปโดยสมบูรณ์เมื่อคาร์บอนทั้งหมดในเชื้อเพลิงทำปฏิกิริยาเป็น CO_2 ไฮโดรเจนทั้งหมดทำปฏิกิริยาเป็น H_2O และถ้ามีกำมะถัน (sulfur) ก็จะทำปฏิกิริยาเป็น SO_2 ในทางตรงกันข้ามเรากล่าวว่าการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (incomplete) ถ้าผลิตภัณฑ์ของการเผาไหม้ประกอบด้วยองค์ประกอบของเชื้อเพลิงที่ไม่ถูกเผาไหม้ เช่น C, H_2 , CO หรือ OH

สาเหตุประการหนึ่งที่ทำให้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ได้แก่ การที่มีจำนวนออกซิเจนไม่เพียงพอ อย่างไรก็ตามแม้ว่าปริมาณออกซิเจนจะมีมากกว่าที่สามารถให้การเผาไหม้สมบูรณ์ การเผาไหม้ที่แท้จริงก็อาจไม่สมบูรณ์ได้ทั้งนี้อาจเป็นสาเหตุมาจากการผสมผสานระหว่างเชื้อเพลิงและออกซิเจนในห้องเผาไหม้ไม่ดีพอเนื่องจากการเผาไหม้นั้นมีเวลาจำกัด อีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ คือการแยกตัวของก๊าซ (dissociation) ในระหว่างการเผาไหม้ การแยกตัวดังกล่าวเกิดขึ้นเมื่อก๊าซมีอุณหภูมิสูงมาก

ออกซิเจนรวมตัวกับไฮโดรเจนได้ดีกว่ากับคาร์บอน ดังนั้น ไฮโดรเจนในเชื้อเพลิงจึงมักเผาไหม้สมบูรณ์ (กลายเป็น H_2O) แม้ว่าจำนวนออกซิเจนมีน้อยกว่าที่จำเป็นสำหรับการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ อย่างไรก็ตามคาร์บอนบางส่วนจะหลงเหลือในผลิตภัณฑ์เป็น CO หรือ C

ปริมาณของอากาศจำนวนน้อยที่สุดที่จำเป็นสำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงชนิดหนึ่ง ๆ โดยสมบูรณ์เรียกว่า อากาศทางทฤษฎี (“theoretical air” หรือ “stoichiometric air”) ดังนั้นเมื่อเชื้อเพลิงชนิดนั้น ๆ ทำการเผาไหม้กับอากาศในปริมาณทางทฤษฎีของมันจะไม่มีออกซิเจนหลงเหลืออย่างโดยเดียวในผลิตภัณฑ์ คือมันรวมกับธาตุอื่นทั้งหมด (เช่นเป็น CO หรือ H_2O) บางครั้งอากาศทางทฤษฎีอาจใช้ท้อเรียกว่า ปริมาณของอากาศที่ถูกต้องทางเคมี (chemically correct) หรือ อากาศทางทฤษฎีร้อยเปอร์เซ็นต์ (100 % theoretical air) กระบวนการเผาไหม้ที่ใช้อากาศจำนวนน้อยกว่านี้จะเป็นการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ กระบวนการเผาไหม้ทางอุดมคติซึ่งเชื้อเพลิงถูกเผาไหม้โดยอากาศทางทฤษฎีอย่างสมบูรณ์ เรียกว่าการเผาไหม้ทางทฤษฎี (“stoichiometric theoretical combustion) ตัวอย่างเช่น การเผาไหม้ทางทฤษฎีของมีเทนได้แก่



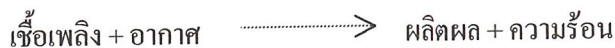
ในการเผาไหม้ที่แท้จริงมักจะใช้ปริมาณของอากาศมากกว่าอากาศทางทฤษฎีเพื่อเป็นการเพิ่มโอกาสของการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ หรือเพื่อควบคุมอุณหภูมิของห้องเผาไหม้ ปริมาณของอากาศที่เกินปริมาณของอากาศทางทฤษฎี อาจบอกเป็นเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน (percentage of excess air) หรือเปอร์เซ็นต์อากาศทางทฤษฎี (percentage of theoretical air)

การคาดหมายปริมาณขององค์ประกอบของผลิตภัณฑ์นั้นไม่เป็นเรื่องที่ย่งยากถ้าเราสมมุติว่าเป็นการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ซึ่งรู้ปริมาณของเชื้อเพลิงและอากาศที่ใช้ ในกรณีนี้เราเพียงแต่ใช้การไม่สูญหายของมวลสารสำหรับแต่ละธาตุที่ปรากฏในสามการเคมี ไม่จำเป็นต้องทำการวัดค่าใด ๆ อย่างไรก็ตามปริมาณต่าง ๆ ในการเผาไหม้ที่แท้จริงนั้นไม่เป็นเรื่องง่ายดังที่กล่าวถึงนี้เนื่องจากการเผาไหม้มักจะไม่สมบูรณ์แม้ว่าจะใช้อากาศเกินปริมาณทางทฤษฎีมากก็ตาม ดังนั้นจึงเป็นไปได้ที่จะคาดหมายองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์โดยการไม่สูญหายของมวลสารเพียงอย่างเดียวเราจำเป็นต้องวัดปริมาณขององค์ประกอบต่าง ๆ ในผลิตภัณฑ์โดยตรงด้วย

อุปกรณ์ที่ใช้วัดองค์ประกอบของก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้ที่พบบ่อยได้แก่ เครื่องมือวิเคราะห์ก๊าซแบบออร์สแตท (Orsat gas analyzer) ซึ่งมีการทำงานดังนี้คือก๊าซจากการเผาไหม้จะถูกเก็บเข้าอุปกรณ์นี้และทำให้เย็นลงจนมีอุณหภูมิและความดันเท่ากับบรรยากาศปกติ ที่จุดนี้จะมีการวัดปริมาตรของก๊าซดังกล่าวจะถูกนำไปผ่านสารเคมีซึ่งดูดซับ CO_2 ก๊าซที่เหลืออยู่จะถูกทำให้อุณหภูมิและความดันเท่ากับบรรยากาศปกติ และทำการวัดปริมาตรใหม่ สัดส่วนของปริมาตรที่ลดลงต่อปริมาตรเริ่มต้นคือ “volume fraction” ของ CO_2 ซึ่งจะเท่ากับสัดส่วนโดยจำนวนโมล (mole fraction) ของมันถ้าเราสมมุติว่าเป็นก๊าซอุดมคติ “Volume fraction” สำหรับองค์ประกอบอื่น ๆ ก็จะสามารถหาได้โดยการทำตามวิธีการนี้ ในอุปกรณ์นี้ก๊าซจะถูกเก็บอยู่เหนือผิวน้ำ ซึ่งอิมมัลชันอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นความดันไอ (vapor pressure) ของน้ำมีค่าคงที่ตลอดเวลาที่ทำการตรวจสอบก๊าซจึงไม่สามารถบอกสัดส่วนจำนวนโมลของละอองน้ำได้ ด้วยเหตุนี้เราจึงไม่นำละอองน้ำที่ปะปนอยู่ในอุปกรณ์มาคิด และข้อมูลที่ได้จะไม่มีการรายงานเกี่ยวกับละอองน้ำ (ข้อมูลดังกล่าวเรียกว่าการรายงานแบบแห้ง dry basis)) อย่างไรก็ตามปริมาณของ H_2O ที่เกิดขึ้นในระหว่างการเผาไหม้สามารถหาได้โดยง่ายจากการสมดุลของสมการการเผาไหม้

2.9 ปฏิกริยาการสันดาปของเชื้อเพลิง

เมื่อเชื้อเพลิงเกิดการออกซิเดชันกับอากาศจะให้ผลิตภัณฑ์และความร้อนออกมา หรือ



โดยเชื้อเพลิงจะประกอบด้วยธาตุที่สันดาปได้ เช่น คาร์บอน (C), ไฮโดรเจน (H) และ กำมะถัน (S) ตลอดจนออกซิเจน (O), ไนโตรเจน (N) ซัลเฟอร์และความชื้นในกรณีของเชื้อเพลิงแข็งและเชื้อเพลิงเหลว ส่วนก๊าซเชื้อเพลิงจะประกอบด้วยก๊าซไฮโดรคาร์บอนต่าง ๆ (C_mH_n) เช่น มีเทน (CH_4), อีเทน (C_2H_6) โพรเพน (C_3H_8) เป็นต้นและก๊าซผสมของไฮโดรเจน (H_2), คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)

สำหรับอากาศที่ทำให้ปฏิกิริยาให้เกิดการสันดาปคือ ออกซิเจน (O_2) เมื่อเกิดปฏิกิริยาสันดาปกับเชื้อเพลิงแล้ว ผลผลิตที่ได้จะออกมาในรูปของก๊าซสันดาป (Dry Gas) ชนิดต่าง ๆ และน้ำ (H_2O) โดยมีพลังงานความร้อนเป็นจุดประสงค์ที่ต้องการ ดังสมการพื้นฐานต่อไปนี้



เป็นการสันดาปอย่างสมบูรณ์ของธาตุคาร์บอน

2.10 เชื้อเพลิง (Fuels)

สารใดก็ตามที่เมื่อนำไปเผาไหม้แล้วให้พลังงานออกมาเรียกว่าเชื้อเพลิง (fuel) เชื้อเพลิงที่ใช้กันบ่อยจะประกอบไปด้วยไฮโดรเจน และคาร์บอนเป็นหลัก สารประเภทนี้มีชื่อเรียกว่าเชื้อเพลิงประเภทไฮโดรเจน และคาร์บอนเป็นหลัก สารประเภทนี้มีชื่อเรียกว่าเชื้อเพลิงประเภทไฮโดรคาร์บอน (hydrocarbon fuels) และมีสัญลักษณ์ทั่วไปเป็น " C_nH_m " สารประเภทนี้มีอยู่ในทุกสถานะ

องค์ประกอบหลักของถ่านหินได้แก่คาร์บอน และองค์ประกอบย่อย ๆ ของมัน ได้แก่ ออกซิเจน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน กำมะถัน ความชื้น และเถ้าถ่าน การวิเคราะห์มวลของถ่านหินนั้นเป็นเรื่องยาก เพราะองค์ประกอบของมันเปลี่ยนแปลงไป ขึ้นอยู่กับตำบลที่ที่ค้นพบมัน เชื้อเพลิงประเภทไฮโดรคาร์บอนที่เป็นของเหลว นั้นมักเป็นสารผสมไฮโดรคาร์บอนหลายชนิด และได้มาจากน้ำมันดิบโดยการกลั่น (distillation)

สารไฮโดรคาร์บอนที่ระเหยง่ายที่สุดจะระเหยก่อนและรวมตัวกันเป็นสิ่งที่เราเรียกว่า "gasoline" (หรือ น้ำมันเบนซิน) เชื้อเพลิงอื่น ๆ ที่ระเหยยากกว่าและได้มาระหว่าง การกลั่นได้แก่ "kerosene" (น้ำมันก๊าด) น้ำมันดีเซล และน้ำมันเตา (fuel oil) องค์ประกอบของเชื้อเพลิงแต่ละชนิดขึ้นอยู่กับแหล่งน้ำมันดิบ รวมทั้งกระบวนการแยก-กลั่น

แม้ว่าเชื้อเพลิงประเภทไฮโดรคาร์บอนเหลวจะเป็นสารผสมของสารไฮโดรคาร์บอนหลายชนิด แต่เพื่อความสะดวกเรามักพิจารณาว่ามันเป็นสารไฮโดรคาร์บอนชนิดเดียว

2.11 เชื้อเพลิงก๊าซ

เชื้อเพลิงก๊าซ (gaseous fuel) หมายถึง ก๊าซทุกชนิดที่ทำให้ปฏิกิริยากับออกซิเจนแล้วเกิดการเผาไหม้ ทำให้ได้พลังงานความร้อนที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ก๊าซที่นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงส่วนใหญ่จะเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน

2.11.1 ประเภทของก๊าซ

ก๊าซที่นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงมีหลายชนิดและมีชื่อเรียกแตกต่างกันออกไป บางชนิดมีส่วนประกอบคล้ายกันแต่มีชื่อแตกต่างกัน

1. ก๊าซชีวมวล (bio mass) เป็นก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้จากกระบวนการผลิตโดยการใช้ถ่านหินเป็นวัตถุดิบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ก๊าซชีวภาพ (bio gas) คือก๊าซที่เกิดจากการหมักและการย่อยสลายของสารอินทรีย์ (organic substance) เช่น มูลสัตว์ประเภทต่างๆ ตลอดจนวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและอุตสาหกรรม เช่น วัชพืชและเศษอาหาร
3. ก๊าซธรรมชาติ (natural gas) เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดหนึ่ง โดยที่ธาตุคาร์บอนและธาตุไฮโดรเจนจับตัวกันเป็นโมเลกุลเช่นเดียวกับน้ำมันแต่มีสถานะในรูปของก๊าซ แบ่งออกเป็นชนิดใหญ่ๆ ได้ 2 ชนิด คือ ก๊าซธรรมชาติแห้ง (dry natural gas) และก๊าซธรรมชาติชื้นหรือเปียก (wet natural gas)
4. ก๊าซน้ำมัน (oil gas) เป็นก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้จากกระบวนการผลิตโดยใช้น้ำมันหรือก๊าซจากการเผา โดยมีอากาศและไอน้ำเป็นตัวสำคัญในกระบวนการผลิต
5. ก๊าซที่ได้จากกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบ หรือที่เรียกย่อๆว่า ก๊าซ LPG (liquefied petroleum gas) หรือก๊าซหุงต้ม

2.11.2 ก๊าซ LPG

ปัจจุบันนี้เชื้อเพลิงก๊าซได้เข้ามามีบทบาทแทนเชื้อเพลิงแข็งและเชื้อเพลิงเหลวมากขึ้นอันเนื่องมาจากการได้มี

การพัฒนาเทคโนโลยีเกี่ยวกับอุปกรณ์และเครื่องควบคุมก๊าซจึงทำให้ผู้ใช้มีความสะดวกและปลอดภัยมากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะก๊าซที่ได้จากการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม ซึ่งประกอบไปด้วย ก๊าซโพรเพนและก๊าซบิวเทน ก๊าซหุงต้มที่ใช้กันปัจจุบันนี้เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกลั่นน้ำมันดิบหรือที่เรียกว่า ก๊าซปิโตรเลียมเหลว อันเป็นส่วนประกอบของก๊าซโพรเพนและก๊าซบิวเทนในอัตราส่วน 30:70 ก๊าซทั้งสองชนิดดังกล่าวนี้สามารถนำมาแยกเป็นก๊าซหุงต้มได้ โดยนำก๊าซธรรมชาติมาผ่านกระบวนการแยกก๊าซในโรงแยกก๊าซ คำว่า LPG เป็นศัพท์ทางการที่ใช้ในการเรียกก๊าซปิโตรเลียมเหลว แต่ที่เรารู้จักกันทั่วไปคือก๊าซหุงต้ม ก๊าซชนิดนี้มีลักษณะเป็นไอแต่ถ้าอยู่ภายใต้ความดันสูงก๊าซจะมีลักษณะเป็นของเหลว

2.11.3 กระบวนการผลิตก๊าซ LPG

ก๊าซ LPG มีอยู่สองชนิดคือ ชนิดก๊าซบ่อน้ำมันที่ได้จากการแยกและกลั่นก๊าซธรรมชาติกับชนิดก๊าซกลั่นน้ำมันที่ได้จากการแยกก๊าซ ซึ่งเป็นผลพลอยได้ที่เกิดจากการกลั่นน้ำมันดิบ เนื่องจากก๊าซ LPG มีสภาพเป็นก๊าซที่อุณหภูมิสูงและความดันปกติ จึงต้องทำให้เป็นของเหลวอยู่เสมอโดยการอัดความดันหรือแช่แข็ง และต้องขนส่งด้วยเรือที่ทำขึ้นเพื่อใช้บรรจุก๊าซ LPG

2.11.4 คุณสมบัติของก๊าซ LPG

1. สี ก๊าซ LPG จะไม่มีสี เมื่อก๊าซเกิดการรั่วจากถังเราจึงไม่สามารถที่จะมองเห็นก๊าซที่รั่วออกมาได้ นอกจากก๊าซจะรั่วออกมามากเราจึงจะมองเห็นเป็นละอองขาว ซึ่งละอองขาว

- เหล่านี้ก็คือละอองน้ำที่มีอยู่ในอากาศทำการกลั่นตัวเมื่อได้รับความเย็นจัดจากการระเหยตัวของก๊าซ
2. **ความเป็นพิษ** ก๊าซชนิดนี้จะไม่เป็นพิษ เมื่อนำไปเผาไหม้อย่างสมบูรณ์จะไม่ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์หรือก๊าซพิษ เนื่องจากก๊าซนี้มีน้ำหนักมากกว่าอากาศ ดังนั้นเมื่อเกิดการรั่วภายในห้องแคบแล้ว มันจะเข้าไปแทนที่อากาศทำให้ปริมาณออกซิเจนบริเวณนั้นมีไม่เพียงพอ ผู้ที่สูดดมก๊าซเข้าไปอาจมีอาการคลื่นเหียนและเป็นลมได้
 3. **กลิ่น** เป็นก๊าซที่ไม่มีกลิ่น เนื่องจากก๊าซที่ผลิตได้นี้ไม่มีกลิ่น จึงจำเป็นต้องใส่สารที่มีกลิ่นฉุนลงไปเพื่อเป็นการเตือนเมื่อเกิดก๊าซรั่ว สารที่เติมในส่วนมากจะใช้ เอทิลเมอร์แคปแทน (C_2H_5SH)
 4. **น้ำหนัก** เป็นก๊าซที่เบากว่าน้ำและและหนักกว่าอากาศ เมื่อก๊าซอยู่ในสถานะที่เป็นของเหลว ก๊าซจะมีน้ำหนักครึ่งหนึ่งของน้ำ ดังนั้นก๊าซเหลวจะลอยอยู่บนน้ำ หากก๊าซรั่วลงไปในคูน้ำ ท่อน้ำ หรือแม่น้ำมันอาจจะลอยไปติดไฟในจุดที่ห่างออกไปได้ แล้วลุกลามมายังจุดที่ก๊าซรั่วได้อย่างรวดเร็ว เมื่ออยู่ในสถานะที่เป็นไอ ไอก๊าซจะหนักประมาณสองเท่าของอากาศ ดังนั้นเมื่อก๊าซรั่วก๊าซจะเคลื่อนตัวไหลไปรวมในที่ที่ต่ำกว่า
 5. **จุดเดือด** จุดเดือดของก๊าซจะต่ำประมาณ 0 องศาเซลเซียส แต่อุณหภูมิเฉลี่ยของบ้านเราประมาณ 20 องศาเซลเซียส ดังนั้นเมื่อก๊าซถูกปล่อยออกจากภาชนะบรรจุก็จะเดือด โดยเปลี่ยนสถานะจากของเหลวที่ถูกกดดันอยู่กลายเป็นไอทันที ก๊าซที่เปลี่ยนสถานะจากเหลวเป็นไอจำเป็นต้องดูดความร้อนจากบริเวณใกล้เคียง ซึ่งจะทำให้บริเวณนั้นหรือบริเวณปลายท่อที่ปล่อยก๊าซออกมีน้ำแข็งเกาะทำให้ท่อเกิดการตัน
 6. **ความชันไฟ** ก๊าซ LPG มีความชันไฟต่ำจึงทำให้เกิดการรั่วได้ง่าย ดังนั้นอุปกรณ์ที่ไขกับก๊าซจึงต้องออกแบบให้แข็งแรง ทนต่อความดันสูง ดังนั้นการใช้ภาชนะ เช่น ถังบรรจุก๊าซที่ไม่ได้มาตรฐานตามที่กำหนดอาจทำให้เกิดอันตรายร้ายแรงได้
 7. **อัตราการขยายตัว** ก๊าซ LPG มีอัตราการขยายตัวสูง ดังนั้นการเติมก๊าซใส่ลงไปในภาชนะจึงไม่ควรเติมให้เต็ม ต้องมีช่องว่างสำหรับการขยายตัวของก๊าซเมื่อได้รับความร้อน อัตราการขยายตัวของก๊าซที่สถานะของเหลวกลายเป็นก๊าซที่สถานะไอ คือ ก๊าซเหลว 1 หน่วย ปริมาณจะเปลี่ยนเป็นไอก๊าซได้ประมาณ 250 หน่วยปริมาณ ดังนั้นเมื่อก๊าซเหลวรั่วจะมีอันตรายมากกว่าไอก๊าซรั่ว
 8. **ส่วนผสมของก๊าซกับอากาศที่ทำให้ติดไฟได้** อัตราส่วนของก๊าซในอากาศที่ทำให้ติดไฟได้คือประมาณ 15-9 ส่วนในส่วนผสม 100 ส่วน จะเห็นได้ว่าหากมีอากาศน้อยหรือมากกว่าสัดส่วนดังกล่าวก๊าซจะไม่ติดไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. ค่าออกเทนัมเบอร์ (octane number) ค่าออกเทนัมเบอร์ของ โพรเพนเท่ากับ 111.4 ไอโซบิวเทนเท่ากับ 102.4 และนอร์มัลบิวเทนเท่ากับ 94.0 ซึ่งสูงกว่าน้ำมันเบนซินทั่วไปโดยประมาณ 10-20 ฉะนั้นก๊าซ LPG จึงเหมาะกับการใช้เป็นเชื้อเพลิงให้กับเครื่องยนต์มาก
10. คุณสมบัติทางปฏิกิริยาเคมี เนื่องจากก๊าซ LPG มีคุณสมบัติละลายสารจำพวกยางธรรมชาติได้ดี ฉะนั้นจึงควรใช้สารที่มีความทนต่อก๊าซ LPG หนึ่งถ้าเก็บก๊าซ LPG ซึ่งมีโพรพิลีนและบิวทิลีนผสมอยู่ไว้ในถัง อาจเกิดสารพวกยางหรือน้ำมันดิน (TAR) ขึ้นได้

2.11.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนผสมกับอุณหภูมิและความดัน

ก๊าซ LPG ที่บรรจุอยู่ในถัง จะมีโมเลกุลของโพรเพนและบิวเทนเคลื่อนที่ชนกับผนังของถังอยู่ ความแรงของการชนคิดเป็นกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรเรียกค่านี้ว่า ความดันไอของก๊าซ ซึ่งสามารถถือได้ว่าเป็นความดันของก๊าซ LPG ในถังนั่นเอง และที่อุณหภูมิเดียวกันถ้าปริมาณของก๊าซโพรเพนเพิ่มขึ้นจะทำให้ความดันไอเพิ่มขึ้น เช่นที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ก๊าซผสมที่มีอัตราส่วนระหว่างโพรเพนและบิวเทนเป็น 30 : 70 จะมีความดันไอประมาณ 3.8 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ถ้าเปลี่ยนอัตราส่วนเป็น 40 : 60 จะมีความดันไอประมาณ 4.3 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และถ้าอุณหภูมิของก๊าซเพิ่มขึ้นก็จะมีผลให้ก๊าซผสมนั้นมีความดันไอสูงขึ้นด้วย ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับอัตราส่วนปริมาตรของก๊าซโพรเพนและบิวเทน (นอร์มัลบิวเทน) แสดงไว้ดังตาราง ซึ่งเป็นอัตราส่วนปริมาตรเมื่อให้ปริมาตรของก๊าซ LPG เหลวที่ 15 องศาเซลเซียส เป็น 100

ชื่อ / อุณหภูมิ (°C)	-20	0	10	15	20	30	40	50	60
โพรเพน	91.4	96.2	98.7	100	101.7	104.9	109.1	113.8	119.3
นอร์มัลบิวเทน	94.3	97.4	99.0	100	101.1	103.0	105.2	107.5	109.8

ตารางที่ 1. แสดงความสัมพันธ์ ระหว่างอุณหภูมิกับอัตราส่วนปริมาตร

จากตารางสรุปความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับอัตราส่วนปริมาตรได้ดังนี้

1. เมื่ออุณหภูมิสูงความดันก็สูงด้วย เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นการเคลื่อนที่ของโมเลกุลจะเกิดขึ้น โมเลกุลจะชนกับฝาผนังของภาชนะแรงขึ้น ผลก็คือความดันจะสูงขึ้น ในทางกลับกันถ้าอุณหภูมิต่ำลง การเคลื่อนที่ก็จะช้าลงเรื่อยๆและเมื่อทำให้อุณหภูมิต่ำมากขึ้นการเคลื่อนที่ช้าลง
2. ถ้ามีส่วนประกอบโพรเพนมากความดันจะสูง เนื่องจากโมเลกุลของโพรเพนเคลื่อนที่ได้ดีกว่าโมเลกุลของบิวเทน ดังนั้นในกรณีที่อุณหภูมิเท่ากัน ก๊าซ LPG ที่มีส่วนประกอบของโพรเพนมากกว่าจะมีความดันสูงกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ปริมาตรของของเหลวไม่มีความสัมพันธ์กับความดัน ไม่ว่าจะมิก๊าซ LPG อยู่เต็มถังหรือมีอยู่เพียงเล็กน้อยก็ตาม ถ้าอุณหภูมิและองค์ประกอบไม่เปลี่ยนแปลงแล้วความดันก็ไม่เปลี่ยน ดังนั้นสิ่งที่ทำให้ความดันในถังเปลี่ยนไปจะมีแต่อุณหภูมิและอัตราส่วนของก๊าซผสมเท่านั้น เนื่องจากโดยทั่วไป อุณหภูมิจะเป็นอุณหภูมิของบรรยากาศ ฉะนั้นสิ่งที่จะเปลี่ยนแปลงได้โดยฝีมือคนก็คืออัตราส่วนผสมเท่านั้น

ความถ่วงจำเพาะ ก๊าซ LPG มีค่าความถ่วงจำเพาะสองชนิด คือ ในสถานะที่เป็นของเหลวและในสถานะที่เป็นก๊าซ ความถ่วงจำเพาะในสถานะของเหลว จะเปรียบเทียบกับน้ำที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ซึ่งให้มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1 ส่วนความถ่วงจำเพาะในสถานะก๊าซ จะเปรียบเทียบกับอากาศที่ 0 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บรรยากาศ ซึ่งให้มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1

ความถ่วงจำเพาะในสถานะที่เป็นของเหลว จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ถ้าสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวตามอุณหภูมิมีก่าสูงขึ้น ค่าความถ่วงจำเพาะก็จะยิ่งลดลง ที่อุณหภูมิปกติ (15 องศาเซลเซียส) โพรเพนเหลวมีความถ่วงจำเพาะเป็น 0.508 ส่วนบิวเทนมีความถ่วงจำเพาะเป็น 0.584

ความถ่วงจำเพาะในสถานะที่เป็นก๊าซหรือไอ ความถ่วงจำเพาะในสถานะที่เป็นก๊าซของโพรเพนเป็น 1.55 และของบิวเทนเป็น 2.07

บทที่ 3

การออกแบบและการสร้างเครื่องยนต์กังหันก๊าซ

กำลังสูงสุดที่เครื่องยนต์เครื่องหนึ่งสามารถทำได้จะถูกจำกัดโดยปริมาณเชื้อเพลิงที่สามารถเผาไหม้ได้อย่างมีประสิทธิภาพในกระบอกสูบ ซึ่งปริมาณเชื้อเพลิงนี้จะถูกจำกัดโดยปริมาณอากาศที่ถูกนำเข้าไปในแต่ละสูบ แต่ละวัฏจักรอีกทีหนึ่ง ดังนั้นถ้าอากาศที่ถูกนำเข้ามาถูกอัดให้มีความหนาแน่นมากกว่าอากาศโดยรอบก่อนที่จะนำไปในกระบอกสูบ เครื่องยนต์ขนาดความจุของกระบอกสูบเท่าเดิมก็สามารถให้กำลังสูงสุดได้มากขึ้น การเพิ่มความหนาแน่นของอากาศ (สารผสม) โดยการเพิ่มความดันก่อนเข้าไปในกระบอกสูบนี้เรียกว่าการชาร์จเปอร์ซาร์จ (Supercharging)

3.1 ส่วนประกอบของเครื่องยนต์กังหันก๊าซโดยทั่วไป

เครื่องยนต์กังหันก๊าซมีรูปแบบง่ายๆประกอบด้วย

1. เครื่องอัดอากาศ (Compressor)
2. ห้องสันดาป (Combustion chamber)
3. กังหัน (Turbine)
4. ชุดอุปกรณ์ป้อนเชื้อเพลิง
5. อื่นๆ ได้แก่ ป้อนน้ำ ป้อนลม และป้อนน้ำมัน

3.2 หลักการทำงานของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ

หลักการทำงานพื้นฐานของเครื่องยนต์กังหันก๊าซสามารถสรุปได้เป็น 3 ขั้นตอน คือ

3.2.1 การอัด (Compression) ของไหล (อากาศ) จากภายนอกจะถูกคอมเพรสเซอร์ดูดและอัดให้มีความดันเพิ่มมากขึ้น เพื่อส่งต่อไปยังระบบการเผาไหม้ โดยกระบวนการอัดที่เกิดขึ้นเป็นแบบอะเดียแบติก (adiabatic) ซึ่งจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น หากเป็นคอมเพรสเซอร์ที่มีหลายขั้น (stage) จะทำให้ของไหลมีความเร็วและความดันเพิ่มขึ้น

3.2.2 การสันดาป (Combustion) แหล่งจ่ายเชื้อเพลิงจะทำหน้าที่จ่ายเชื้อเพลิงเข้าไปผสมกับอากาศที่เข้ามาด้วยความเร็วจากการอัดของคอมเพรสเซอร์ ทำให้เกิดการสันดาปภายในห้องเผาไหม้ ความดันที่เกิดจากการเผาไหม้จะคงที่ เปลวไฟที่เกิดจากการเผาไหม้จะยาวแนวเดียวกับความยาวท่อ และเนื่องจากความดันของของไหลที่เข้ามาภายในห้องเผาไหม้มีความดันสูง จะทำให้เปลวไฟที่เกิดขึ้นไม่สัมผัสกับผนังของห้องเผาไหม้

3.2.3 การขยายตัว (Expansion) ก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้ซึ่งมีความดันสูง จะถูกปล่อยออกทางเทอร์ไบน์ ในขั้นตอนนี้จะเป็นการเปลี่ยนพลังงานของของไหลให้เป็นพลังงานกล การขยายตัวของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก๊าซที่อุณหภูมิและความดันสูง จะถ่ายพลังงานไปที่ใบพัดเทอร์ไบน์ทำให้หมุน โดยงานบางส่วนจะจ่ายกลับไปให้คอมเพรสเซอร์เพื่ออัดอากาศเข้ามาเป็นวัฏจักร และพลังงานส่วนที่เหลือจะถูกนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างอื่น

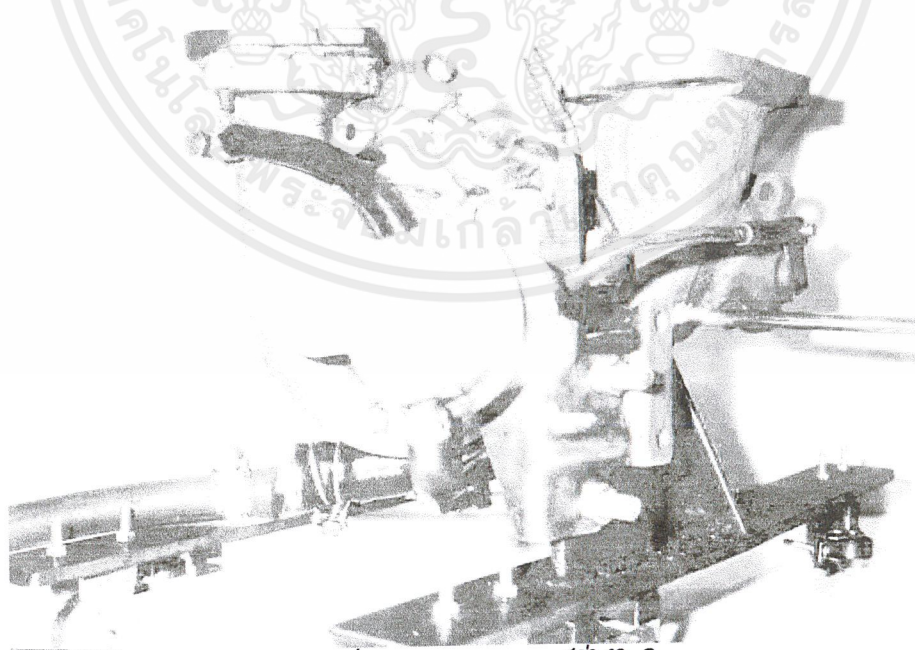
การใช้งานกังหันโดยทั่วไป จะพบได้ในโรงจักรกำลังไอน้ำ (Steam power plant) โรงจักรกำลังก๊าซ (Gas power plant) ซึ่งพลังงานจากการทำงานของกังหันจะถูกนำไปใช้ในการขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Electric generator) เพื่อแปลงพลังงานให้เป็นพลังงานไฟฟ้า หรือใช้กับเครื่องอัด (Compressor) ในอุปกรณ์ต่างๆ

สำหรับเครื่องอัด (Compressor) และปั๊ม (Pump) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้งานเพื่อเพิ่มความดันให้แก่ของไหล โดยเครื่องอัดจะใช้กับสารทำงานที่เป็นก๊าซหรือไอ ตัวอย่างการใช้งานเครื่องอัด เช่น ใช้ในเครื่องทำความเย็นหรือใช้ในเครื่องยนต์ในเครื่องบินเพื่อเพิ่มความดันให้แก่อากาศที่จะเข้าห้องเผาไหม้ สำหรับปั๊มจะใช้กับสารทำงานที่เป็นของเหลวโดยใช้อัดเพื่อเพิ่มความดันเพื่อที่จะส่งของเหลวไปยังระดับที่สูงขึ้น ในการทำงานของเครื่องอัดและปั๊มจะได้รับจากงานภายนอก ดังนั้นงานที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์พวกนี้จึงเป็นงานที่ใส่ระบบ ซึ่งมีค่าเป็นลบ

3.3 การออกแบบส่วนประกอบของเครื่องยนต์กังหันก๊าซในโครงการนี้

ส่วนประกอบของเครื่องยนต์กังหันก๊าซสำหรับโครงการนี้ได้แก่

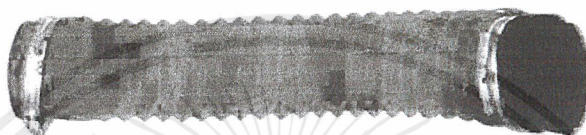
3.3.1 คอมเพรสเซอร์ (Compressor) คอมเพรสเซอร์ของเครื่องเทอร์โบชาร์จี้เป็นแบบ radial โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัด 53 มิลลิเมตรดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 คอมเพรสเซอร์ที่ใช้ในโครงการ

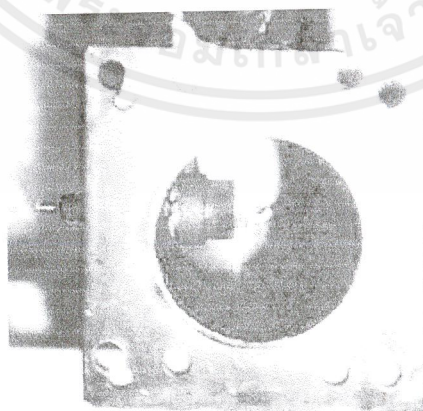
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 ท่ออากาศ (Air tube) เนื่องจากการออกแบบเครื่อง เราต้องการให้ทางออกของ คอมเพรสเซอร์และที่ทางเข้าของเทอร์ไบน์อยู่ในลักษณะที่ขนานกัน เพื่อให้ง่ายต่อการต่อท่ออากาศกับ ห้องเผาไหม้ ในส่วนของท่ออากาศที่นำอากาศจากคอมเพรสเซอร์เป็นส่วนที่มีความร้อนไม่มากนัก ดังนั้นเราจึงเลือกใช้ท่ออากาศของรถยนต์แทน เพราะเป็นการยากที่จะตัดท่อเหล็กให้โค้ง 180 องศา โดยที่รัศมีมีความโค้งเพียง 90 มิลลิเมตร ท่ออากาศแสดงดังรูปที่ 3.2 เนื่องจากท่ออากาศมีลักษณะที่เป็นลอน ทำให้มี pressure drop เกิดขึ้น



รูปที่ 3.2 แสดงขนาดท่ออากาศ

3.3.3 ห้องเผาไหม้ (Combustion chamber) ห้องเผาไหม้เป็นส่วนที่ใช้ในการสันดาปของเชื้อเพลิงและ อากาศ เนื่องจากอุณหภูมิที่เกิดจากการเผาไหม้มีอุณหภูมิสูง ดังนั้นวัสดุที่ใช้ต้องทนความร้อน ห้องเผา ไหม้ในโครงการนี้ทำจากท่อเหล็กสแตนเลสโดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 64 มิลลิเมตร ความยาว ของห้องเผาไหม้มีผลต่องานที่เกิดจากการเผาไหม้ หากห้องเผาไหม้มีขนาดที่ยาวเกินไปจะทำให้เกิด pressure drop มากขึ้นภายในท่อ ความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้รั่วไหลได้มากขึ้นเนื่องจากมีพื้นที่ใน การถ่ายเทความร้อนออกนอกระบบ ความยาวของห้องเผาไหม้ที่ออกแบบไว้มีขนาด 290 มิลลิเมตร การหาขนาดความยาวของห้องเผาไหม้หาได้จากกรทดลอง โดยการทดลองจุดไฟที่หัวเผาให้อยู่ภายในห้อง เผาไหม้ที่ออกแบบไว้แล้ววัดขนาดของความยาวของเปลวไฟที่พอดีกับห้องเผาไหม้



รูปที่ 3.3 ก. ห้องเผาไหม้

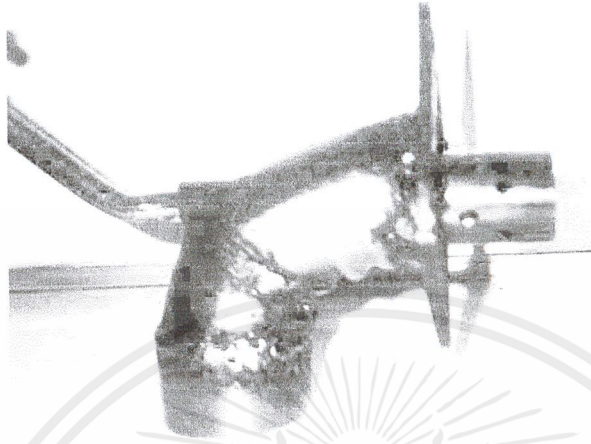
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 ข. แสดงขนาดของห้องเผาไหม้

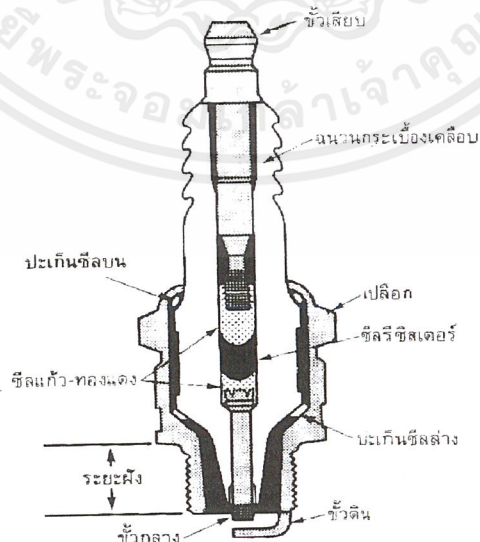
3.3.4 เทอร์ไบน์ (Turbine) เทอร์ไบน์ที่ใช้เป็นแบบ radial โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัด 44 มิลลิเมตร เนื่องจากเครื่องยนต์ไม่สามารถทำงานด้วยตัวเองได้ในช่วงสตาร์ทเพราะไม่มีกำลังงานที่จะให้คอมเพรสเซอร์เอาไปอัดอากาศ ดังนั้นในการออกแบบจึงต้องเจาะรูที่ตัวเรือน (housing) ของเทอร์โบชาร์จเพื่อให้อากาศจากปั๊มลมทำหน้าที่หมุนใบพัดเทอร์ไบน์ ลักษณะของเทอร์ไบน์แสดงในรูปที่ 3.1

3.3.5 หัวเผา (Burner) หัวเผามีหน้าที่สำหรับจ่ายเชื้อเพลิงให้กับห้องเผาไหม้และยังช่วยให้เกิดการผสมของเชื้อเพลิงและอากาศได้ดียิ่งขึ้นในช่วงสตาร์ทเครื่อง โดยติดตั้งไว้บริเวณส่วนบนของห้องเผาไหม้ หัวเผาที่เลือกใช้มีลักษณะดังรูปที่ 3.4 จากนั้นจึงทำการตัดแปลงโดยให้มีขนาดตามต้องการ ขนาดของรูจ่ายเชื้อเพลิงมีผลต่ออัตราการไหลของเชื้อเพลิง เนื่องจากในการทดลองพบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเชื้อเพลิง 1 มิลลิเมตรนั้นให้งานจากการเผาไหม้ไม่เพียงพอต่อการเดินเครื่องด้วยตัวเอง และจากการคำนวณขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเชื้อเพลิงควรจะเป็น 3 มิลลิเมตร เมื่อขนาดของรูเชื้อเพลิงกว้างขึ้น ดังนั้นจึงต้องออกแบบให้อากาศกับเชื้อเพลิงมีการผสมได้ดีขึ้นในช่วงสตาร์ท บริเวณที่ครอบ burner ได้ตัดแปลงโดยเพิ่มจำนวนรูรอบๆให้มากขึ้น



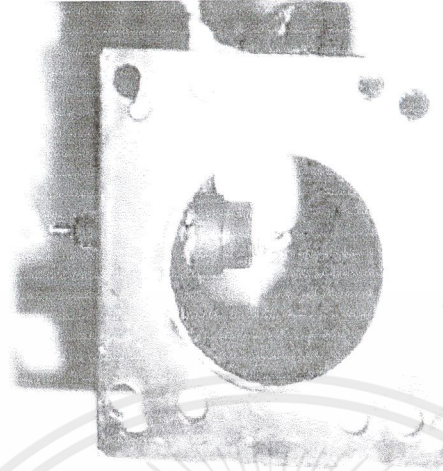
รูปที่ 3.4 แสดงลักษณะของ burner

3.3.6 วงจรสปาร์กและหัวสปาร์ก สำหรับในรถยนต์นั้น ระบบจุดระเบิดจะประกอบด้วย แบตเตอรี่ จานจ่าย คอยล์จุดระเบิดและหัวเทียน จานจ่ายและคอยล์จะทำงานร่วมกันเพื่อเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าต่ำจากแบตเตอรี่เป็นแรงดันไฟฟ้าสูงเพื่อการเกิดประกายไฟที่หัวเทียนในห้องเผาไหม้ โดยแรงดันไฟฟ้าสูงนั้นอาจมีค่าสูงถึง 47,000 โวลต์หรือมากกว่านี้



รูปที่ 3.5 ก แสดงส่วนประกอบของหัวเทียน

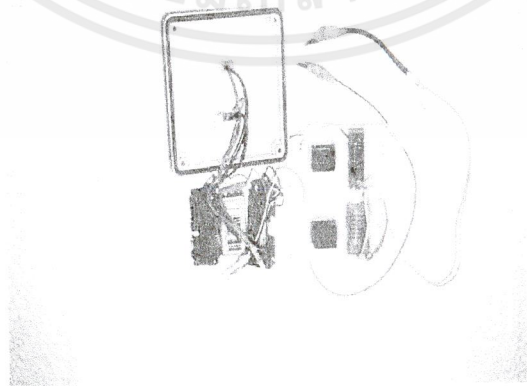
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 ข แสดงตำแหน่งติดตั้งหัวเทียน

หัวสปาร์กเป็นส่วนที่เกิดการสปาร์กของกระแสไฟ ในส่วนนี้ต้องติดตั้งอยู่ในห้องเผาไหม้ดังนั้นต้องทำด้วยวัสดุที่ทนความร้อนได้สูง ดังนั้นจึงเลือกใช้หัวเทียน หัวเทียนมีเปลือกนอกเป็นโลหะและมีฉนวนกระเบื้องเคลือบอยู่ภายใน ขั้วกลางยื่นผ่านศูนย์กลางของฉนวน เปลือกโลหะมีขั้วดินยึดติดอยู่ ขั้วดินและขั้วกลางมีระยะห่างที่เหมาะสม ระยะห่างนี้เรียกว่า ระยะเจ็ยหัวเทียน

สำหรับโครงการนี้ วงจรสปาร์กเป็นส่วนที่ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าแรงดันสูงให้กับหัวสปาร์กโดยใช้แหล่งจ่ายแรงดัน 1.5 โวลต์ แสดงดังรูปที่ 3.5 ค โดยดัดแปลงมาจากวงจรสปาร์กของที่จุดประกายไฟของเตาแก๊ส เนื่องจากสะดวกและง่ายในการนำมาประยุกต์ใช้ รวมทั้งหาซื้อได้ตามร้านค้า

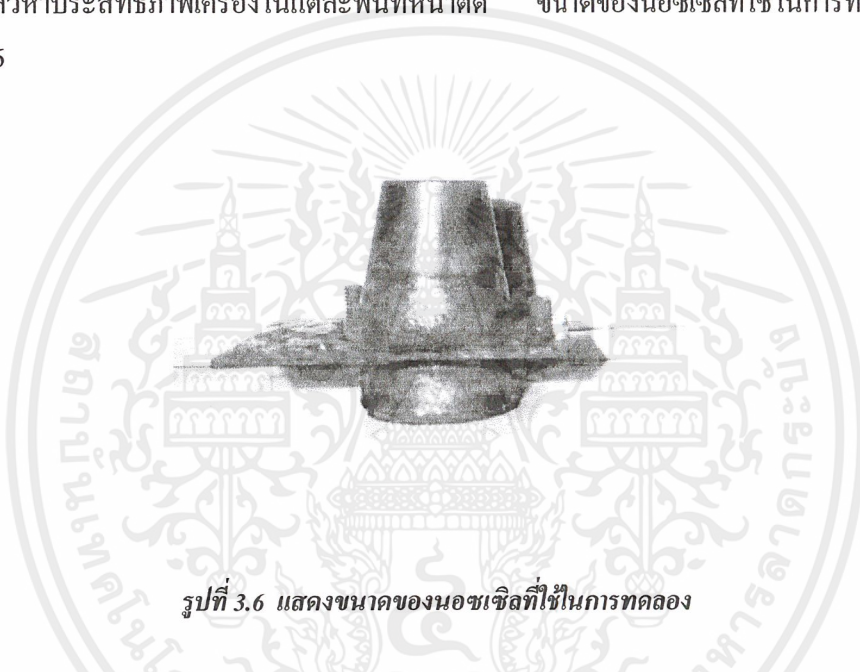


รูปที่ 3.5 ค แสดงส่วนประกอบของวงจรสปาร์ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองพบว่า เมื่อทดลองเปิดวงจรสปาร์คและเชื้อเพลิง ตำแหน่งของหัวเทียนกับ burner ที่ห่างกันเหมาะสมเป็น 50 มิลลิเมตร มีระยะห่างของเขี้ยวหัวเทียนเป็น 3 มิลลิเมตร โดยหัวเทียนยื่นเข้าไปภายในห้องเผาไหม้ 32 มิลลิเมตร

3.3.7 นอซเซิล (Nozzle) เป็นอุปกรณ์เสริมที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ ระหว่างติดตั้งกับไม่ได้ติดตั้ง การออกแบบนอซเซิลจะมีความยุ่งยากเมื่อมีพื้นที่จำกัด เนื่องจากที่ทางออกของไอเสียหลังเทอร์ไบน์มีพื้นที่หน้าตัดเป็น 44 มิลลิเมตร ในการหาพื้นที่หน้าตัดที่เหมาะสมของนอซเซิล เพื่อให้เครื่องยนต์มีแรงขับสูงสุดนั้นหาได้จากการทดลองเดินเครื่องยนต์ขณะที่ติดนอซเซิลแล้วหาประสิทธิภาพเครื่องในแต่ละพื้นที่หน้าตัด ขนาดของนอซเซิลที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แสดงขนาดของนอซเซิลที่ใช้ในการทดลอง

3.3.8 ปัมลม (Air Compressor) เนื่องจากในเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์ไม่สามารถทำงานได้ด้วยตัวเองในช่วงสตาร์ทเครื่อง เพราะไม่มีอากาศเพียงพอภายในห้องเผาไหม้ขณะที่คอมเพรสเซอร์ไม่ทำงาน ดังนั้นในการทดลองนี้จึงต้องเจาะช่องสำหรับดูดลมจากปั๊มลมเข้าทางตัวเรือนของเทอร์ไบน์ เพื่อให้คอมเพรสเซอร์อัดอากาศจากการหมุนของเทอร์ไบน์ พอเครื่องยนต์เข้าสู่สภาวะเสถียรแล้วจึงจะสามารถปิด ปั๊มลมได้

3.3.9 ระบบหล่อเย็นและระบบหล่อลื่น จุดประสงค์ของระบบหล่อเย็นคือ รักษาอุณหภูมิการทำงาน of เครื่องยนต์ภายใต้สภาพการทำงานทุกสภาพ ในการทดลองนี้ใช้น้ำสะอาดเป็นสารหล่อเย็น โดยมีปั๊มหอยโข่งทำหน้าที่ส่งแรงดันน้ำเข้าที่ตัวเรือน โดยระหว่างคอมเพรสเซอร์และเทอร์ไบน์จะมีรูสำหรับทางน้ำเข้าและทางน้ำออกอยู่

เนื่องจากการทำงานของเครื่องยนต์อาศัยการหมุนของเพลลาของคอมเพรสเซอร์และเทอร์ไบน์ น้ำมันหล่อลื่นจึงทำหน้าที่หลายอย่างดังนี้

- น้ำมันหล่อลื่นเข้าไปหล่อเลี้ยงแกนเพลลาและแบร็ง เพื่อลดการสึกหรอโดยชิ้นส่วนเหล่านั้นเคลื่อนที่ไปบนฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นซึ่งแทรกตัวอยู่ระหว่างระยะช่องว่างของชิ้นส่วนเหล่านั้น
- ช่วยลดความฝืด
- การไหลเวียนของน้ำมันหล่อลื่นในระบบจะทำให้เครื่องยนต์เย็นลง
- ทำหน้าที่เป็นตัวทำความสะอาด

ในการทดลองนี้พบว่า เมื่อใช้น้ำมันเครื่องของเครื่องยนต์เบนซินมาหล่อลื่นจะทำให้ น้ำมันไหลยากเนื่องจากมีความหนืดมากเกินไป ดังนั้นจึงเปลี่ยนมาใช้ น้ำมันจักรซึ่งมีความหนืดลดลงกว่าเดิม แต่มีข้อเสียคือขณะที่เครื่องทำงานแล้วระยะหนึ่ง น้ำมันจะมีความหนืดลดลงส่งผลให้ฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นบางมาก อาจทำให้ชิ้นส่วนของโลหะเสียดสีกันจนสึกหรอ สำหรับเครื่องยนต์ที่ทดลองนี้จะมีรูสำหรับน้ำมันเข้าและออกระหว่างคอมเพรสเซอร์และเทอร์ไบน์ โดยอาศัยแรงขับจากปั๊ม



บทที่ 4

วิธีการทดลองและการคำนวณ

ในการทดลองนั้นเราต้องรู้ว่าที่เราทดลองนั้นเราต้องการอะไร แล้วจะอย่างไรให้ได้ผลการทดลองเป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้

ในโปรเจกต์นี้วัตถุประสงค์หลักคือ การทำให้เครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์เครื่องนี้ทำงานได้ นั่นหมายความว่าเราสามารถป้อนแต่เชื้อเพลิงอย่างเดียว เครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์ตัวนี้ก็สามารถทำงานเองได้ โดยไม่ต้องใช้ลมเข้าช่วย และวัดค่าต่างๆเก็บไว้เป็นข้อมูลพื้นฐานของเครื่องยนต์ตัวนี้เพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลในการเปรียบเทียบกับเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์ในรุ่นต่อไปที่ได้มีการพัฒนาแล้วให้มีคุณสมบัติที่ดียิ่งขึ้นไป

เมื่อเราได้มีการเลือกชิ้นส่วนอุปกรณ์ต่างๆแล้วทำการประกอบส่วนต่างๆจนเสร็จเรียบร้อยแล้ว เราสามารถแบ่งวิธีการทดลองออกเป็นขั้นตอนต่างๆดังนี้

1. เปิดปั๊มลมเพื่ออัดลมเข้าทางเทอร์ไบน์
2. เปิดปั๊มน้ำหล่อเย็น
3. เปิดปั๊มน้ำมันหล่อลื่น
4. เปิดสวิตช์ของวงจรสปาร์กเพื่อสร้างประกายไฟในห้องเผาไหม้
5. ปลดปล่อยเชื้อเพลิงเข้าห้องเผาไหม้
6. ปิดปั๊มลมเมื่อเครื่องสามารถเดินด้วยตัวเองได้
7. อยุคป้อนเชื้อเพลิงเมื่อต้องการดับเครื่อง

4.1 คำอธิบายขั้นตอนการทดลอง

ในขั้นตอนที่ 1 เราเปิดปั๊มลมเพื่ออัดลมเข้าทางเทอร์ไบน์ซึ่งเป็นการทำให้เทอร์ไบน์หมุนด้วยความเร็วรอบที่สูงเพียงพอกับการที่จะทำให้เครื่องติดได้ เนื่องจากแกนเพลลาของคอมเพรสเซอร์และเทอร์ไบน์เป็นแกนเดียวกัน จึงทำให้คอมเพรสเซอร์หมุนไปพร้อมกับเทอร์ไบน์ด้วย ซึ่งคอมเพรสเซอร์จะทำหน้าที่ดูดอากาศจากภายนอกเข้าไปในห้องเผาไหม้เพื่อใช้ในการเผาไหม้

ในขั้นตอนที่ 2 เปิดปั๊มน้ำหล่อเย็นเพื่อใช้ในการหล่อเย็นตัวเรือน เนื่องจากเมื่อเครื่องยนต์ติดแล้วตัวเรือนจะมีอุณหภูมิ ซึ่งเป็นผลมาจากความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้

ในขั้นตอนที่ 3 เปิดปั๊มน้ำมันหล่อลื่นเพื่อช่วยในการหล่อลื่นแกนเพลลาของคอมเพรสเซอร์และเทอร์ไบน์ไม่ให้ไหม้ และยังช่วยในการระบายความร้อนที่เกิดขึ้นได้อีกด้วย ในเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์นี้ระบบของน้ำมันหล่อลื่นเป็นแบบหยดน้ำ หมายความว่า น้ำมันจะถูกป้อนเข้าเครื่องยนต์โดยการดูดเข้าไปของเครื่องยนต์เอง ไม่ใช่การปั๊มน้ำมันหล่อลื่นเข้าเครื่องโดยตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขั้นตอนที่ 4 เปิดสวิตช์ของวงจรสปาร์คเพื่อสร้างประกายไฟในห้องเผาไหม้ วงจรสปาร์คเป็นวงจรที่ได้มาจากหัวจุดเตาแก๊สที่มีขายโดยทั่วไปแล้วนำมาดัดแปลง โดยส่วนที่จะเกิดการสปาร์คนั้นเราใช้เป็นหัวเทียนแทน เนื่องจากส่วนนี้จะอยู่ในห้องเผาไหม้ซึ่งมีอุณหภูมิสูง จึงต้องใช้อุปกรณ์ที่ทนความร้อนได้ดี

ในขั้นตอนที่ 5 ปลดปล่อยเชื้อเพลิงเข้าไปในห้องเผาไหม้ การควบคุมปริมาณเชื้อเพลิงจะใช้วาล์ว 2 ตัว วาล์วตัวแรกจะติดอยู่กับถังแก๊ส วาล์วตัวนี้มีหน้าที่เปิดหรือปิดเพื่อส่งแก๊สไปสู่วาล์วตัวที่สอง วาล์วตัวที่สองนี้เป็นตัวควบคุมปริมาณของแก๊สที่เข้าไปในห้องเผาไหม้ เหตุผลที่ต้องมีวาล์วตัวที่สองเพราะว่าในการติดไฟของเชื้อเพลิงนั้น ถ้ามีปริมาณของแก๊สมากเกินไปแล้ว การเผาไหม้จะไม่เกิดขึ้น เพราะว่า การเผาไหม้จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีส่วนผสมที่พอเหมาะพอดีระหว่างแก๊สกับอากาศที่เข้ามา ในการทดลองนี้ ในขั้นตอนการติดไฟทำได้โดย เปิดสวิตช์ของวงจรสปาร์คเพื่อสร้างประกายไฟ จากนั้นก็เปิดวาล์วปล่อยแก๊สเข้าห้องเผาไหม้ โดยเราควบคุมปริมาณของแก๊สด้วยวาล์วตัวที่สอง โดยในตอนแรกเราจะเปิดวาล์วตัวที่สองเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แล้วค่อยๆเพิ่มขึ้นเนื่องจากในการติดไฟของแก๊สนั้น ถ้าเราเปิดวาล์วมากจะทำให้ปริมาณของแก๊สไหลเข้าห้องเผาไหม้มากเกินไป และความแรงของแก๊สที่ออกมาจะทำให้ประกายไฟดับอีกด้วย เมื่อแก๊สเกิดการเผาไหม้แล้วเราก็สามารถเร่งเชื้อเพลิงพร้อมกับอัดลมเข้าทางเทอร์ไบน์ให้มากขึ้น จนเครื่องสามารถเดินเองได้

ในขั้นตอนที่ 6 ปิดปั๊มลมเมื่อเครื่องสามารถเดินเองได้ เราสังเกตได้จากการอัดลมเข้า โดยเมื่อเราเร่งเชื้อเพลิงขึ้นเราก็ต้องอัดลมเข้ามากขึ้นด้วยเพื่อให้การเผาไหม้เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง แต่ถ้าเราหยุดการเพิ่มเชื้อเพลิง นั่นคือให้เชื้อเพลิงในอัตราที่คงที่ แล้วลดการอัดลมเข้า ถ้าเครื่องยังสามารถเดินเองได้ก็แสดงว่า ณ ที่จุดนั้นเป็นจุดที่เครื่องเริ่มทำงานเองได้โดยการใช้ลมอัดเข้าเป็นการสตาร์ทเครื่องเท่านั้น

ในขั้นตอนที่ 7 หยุดป้อนเชื้อเพลิงเมื่อต้องการดับเครื่อง เนื่องจากเมื่อเครื่องสามารถทำงานได้แล้วเราเพียงแต่ปล่อยเชื้อเพลิงเข้าอย่างต่อเนื่องเท่านั้น ดังนั้นในการดับเครื่องยนต์ก็เพียงแต่เราหยุดการป้อนเชื้อเพลิงเข้าไป การเผาไหม้ก็จะไม่เกิดขึ้น งานที่ได้จากการเผาไหม้ก็จะไม่มี เครื่องจึงหยุดการทำงาน

4.2 การคำนวณหาประสิทธิภาพของเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์

ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์เราสามารถหาได้จาก Output power หารด้วย Input power ซึ่งในที่นี้ Output power ของเราพิจารณาแรงขับที่ได้จากแก๊สร้อนที่ออกจากเทอร์ไบน์ และ Input power ของเราจะอยู่ในรูปของความร้อนที่ป้อนเข้ามาของเชื้อเพลิง ดังนั้นประสิทธิภาพที่เราหาได้ก็คือ ประสิทธิภาพรวมของเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์นั่นเอง

ความร้อนที่ป้อนให้กับเครื่องยนต์เราหาได้จากสมการ

$$Q = \dot{m}_f \times \text{HHV} \quad \dots\dots\dots(1)$$

ซึ่ง Q = ความร้อนที่ป้อนให้กับเครื่องยนต์ (Watt)

\dot{m}_f = mass flow rate ของเชื้อเพลิง (kg/s)

HHV = ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (J/kg)

$$\dot{m}_i = \rho v \quad \dots\dots\dots(2)$$

ซึ่ง \dot{m}_i = mass flow rate (kg/s)

ρ = ความหนาแน่น (kg/m³)

v = อัตราการไหล (m³/s)

ในการทดลองค่าอัตราการไหลของเชื้อเพลิงเราสามารถหาได้จากการปรับอัตราการไหลของเชื้อเพลิงให้มีปริมาณมากขึ้นเรื่อยๆจนมีปริมาณมากเพียงพอกับความต้องการของเครื่องยนต์ ในการทดลองเราได้ค่าอัตราการไหลสูงสุดมีค่าเท่ากับ 12.75 lpm หรือ 0.2125×10^{-3} m³/s และความหนาแน่นของเชื้อเพลิงมีค่าเท่ากับ 2.49 kg/m³ ดังนั้นเราสามารถหา \dot{m}_f ได้จากสมการที่ (2)

$$\begin{aligned} \dot{m}_f &= 2.49 \times 0.2125 \times 10^{-3} \\ &= 0.529 \times 10^{-3} \text{ kg/s} \end{aligned}$$

จากค่า HHV = 49561.8 (kJ/kg) : ค่านี้ได้มาจาก ปตท.

จากสมการที่ (1) เราสามารถหาค่าความร้อนที่ต้องให้กับเครื่องยนต์มีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} Q &= 0.529 \times 10^{-3} \times 49561.8 \\ &= 26.22 \text{ kw} \end{aligned}$$

และเราสามารถหา Output power ได้จากสมการ

$$\text{Output power} = \dot{m} v^2 \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$\dot{m}_i = \rho V A \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$\rho = P/RT \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$\dot{m}_i = \dot{m}_a + \dot{m}_f \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$\eta = \text{Output power} / \text{Input power}$$

จากการทดลองหาความเร็วของแก๊สร้อนที่ออกจากเทอร์ไบน์ได้จาก

$$\rho_{\text{ปรอท}} \Delta h = \rho_{\text{อากาศ}} v^2 / 2g \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$\rho = P/RT \quad \dots\dots\dots(8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 8 หา $\rho_{\text{อากาศ}}$ ได้จาก

$$\begin{aligned}\rho_{\text{อากาศ}} &= P_{\text{atm}} / RT \\ &= (1.01325 \times 10^5) / (287 \times 673) \\ &= 0.525 \text{ kg/m}^3\end{aligned}$$

และ $\rho_{\text{ปรอท}} = 13550 \text{ kg/m}^3$

จากสมการที่ (7) สามารถหาความเร็วของแก๊สร้อนที่ออกจากเทอร์ไบน์ได้จาก

$$\begin{aligned}v^2 &= (13550 \times 0.006 \times 2 \times 9.81) / 0.525 \\ v &= 55.12 \text{ m/s}\end{aligned}$$

จากความเร็วที่ได้ นำไปแทนในสมการที่ (4) เราจะสามารถหา m' ได้โดย m' คือ mass flow rate ของอากาศที่เข้ามาทางคอมเพรสเซอร์กับเชื้อเพลิงที่เข้ามาทาง burner ดังนั้น

$$\begin{aligned}m' &= 0.525 \times 55.12 \times (\pi \times 0.044^2 / 4) \\ &= 44 \times 10^{-3} \text{ kg/s}\end{aligned}$$

และจากสมการที่ (6) เราสามารถหา m'_a ได้จาก

$$\begin{aligned}m'_a &= m' - m'_f \\ &= 44 \times 10^{-3} - 0.529 \times 10^{-3} \\ &= 43.47 \times 10^{-3} \text{ kg/s}\end{aligned}$$

จากสมการที่ (3) เราสามารถหา Output power ได้จาก

$$\begin{aligned}\text{Output power} &= 0.044 \times 55.12^2 \\ &= 133.68 \text{ watt}\end{aligned}$$

ดังนั้นประสิทธิภาพของเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์มีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned}\eta &= 133.68 / 26.22 \times 10^3 \\ &= 5.1 \times 10^{-3} \\ \text{Air Fuel ratio} &= 43.47 \times 10^{-3} / 0.529 \times 10^{-3} \\ &= 82.2\end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองหาความเร็วของแก๊สร้อนที่ออกจากรอกนอซเซิลได้จากสมการที่ (7) จากนั้นเราสามารถหา m_i , m_a , Output power ,ประสิทธิภาพ และ Air Fuel ratio ได้ด้วยวิธีการข้างต้น จะได้ค่าดังนี้

$$v = 96.79 \text{ m/s}$$

$$m_i = 40.87 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$$

$$m_a = 40.34 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$$

$$\text{Output power} = 382.88 \text{ watt}$$

$$\eta = 14.6 \times 10^{-3}$$

$$\text{Air Fuel ratio} = 76.26$$

4.3 ผลการทดลอง

(หมายเหตุ : ผลการทดลองนี้เป็นผลการทดลองที่เครื่องทำงานในสภาวะสูงสุด)

	ไม่มีนอซเซิล	มีนอซเซิล
v อัตราการไหล (m^3/s)	0.2125×10^{-3}	0.2125×10^{-3}
m_a (kg/s)	0.04347	0.04084
Air Fuel ratio	82.2	76.26
Pressure ratio	1.23	1.16
อุณหภูมิทางเข้าเทอร์ไบน์($^{\circ}\text{C}$)	723	864
อุณหภูมิทางออกเทอร์ไบน์($^{\circ}\text{C}$)	400	712
อุณหภูมิทางออกนอซเซิล($^{\circ}\text{C}$)	-	686
ความเร็วออกจากเทอร์ไบน์ (m/s)	55.12	-
ความเร็วออกจากนอซเซิล (m/s)	-	96.79
Output power (watt)	133.68	382.88
Overall efficiency	5.1×10^{-3}	14.6×10^{-3}

ตารางที่ 2 ผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

5.1 สรุปผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

1.ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์มีค่าน้อยมาก เนื่องจากงานที่ได้จากการเผาไหม้ส่วนใหญ่เทอร์ไบน์จะส่งคืนให้กับคอมเพรสเซอร์ ทำให้กำลังที่ได้จากเครื่องมีค่าน้อย

2.เมื่อเปรียบเทียบขณะใส่และไม่ใส่โนซเซิล ประสิทธิภาพของเครื่องขณะใส่โนซเซิลจะสูงกว่า เนื่องจากกำลังงานที่ได้จากเครื่องขณะใส่โนซเซิลมากกว่า ในขณะที่ค่าความร้อนที่ให้ออกเชื้อเพลิงมีค่าเท่ากัน

3.จากการออกแบบและการทดลองสรุปได้ว่าการทำงานของเครื่องยนต์ทำงานได้โดยใช้ลมอัดกระตุ้นในช่วงแรกให้ทำงาน พอเครื่องยนต์เข้าสู่สภาวะ Steady State ก็สามารถเอาปั๊มลมออกได้

4.การสูญเสียพลังงานส่วนใหญ่เกิดมาจากการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัด ท่อโค้ง และความร้อนถูกถ่ายเทออกนอกระบบด้วย

5.2 ปัญหาจากการทดลอง

1.เครื่องมือวัดต้องมีคุณสมบัติที่ทนความร้อนสูง เนื่องจากไอร้อนที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้มีอุณหภูมิสูง

2.เพื่อให้ง่ายต่อการออกแบบจึงใช้วัสดุที่หาได้ง่ายแต่ก็ทำให้เกิด loss ด้วย

3.เนื่องจากเครื่องเทอร์โบที่นำมาจากร้านเครื่องยนต์มีสองเพราะมีราคาแพง ซึ่งไม่สามารถรู้ข้อมูลทางเทคนิคของเครื่องเทอร์โบตัวนี้ได้ ทำให้ยากต่อการออกแบบ

4.เนื่องจากเครื่องเทอร์โบนี้ปกติใช้ภายในรถยนต์ เมื่อนำมาประยุกต์ใช้เป็นเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์แล้วทำให้ไบเทอร์ไบน์เกิดการเสียหายเนื่องจากเพรสเซอร์ที่ออกจากเทอร์ไบน์ขณะติดโนซเซิลมีค่าสูง

ภาคผนวก

ตาราง A AVERAGE HEATING VALUE

ผลิตภัณฑ์	ความหนาแน่น	ความถ่วงจำเพาะ	ค่าความร้อน(calorific value gross)		
			BTU/LB	BTU/KG	BTU/L
LPG โพรเพน:บิวเทน 50:50%VOL	0.5422	0.542	21305	46978	25471
LPG โพรเพน:บิวเทน 60:40%VOL	0.5353	0.535	21343	47061	25187
LPG โพรเพน:บิวเทน 70:30%VOL	0.545	0.515	21382	47147	24903
แก๊สธรรมชาติเหลว (NGL STAB)	0.6639	0.664	22670	49900	34080
น้ำมันก๊าด (KEROSENE)	0.8036	0.804	20421	45000	36184
น้ำมันดีเซลความเร็ว (HIGH SPEED DIESEL)	0.8242	0.8246	19361	42300	35186
น้ำมันดีเซลหมุนช้า (LOW SPEED DIESEL)	0.8692	0.8697	19201	42336	36798
น้ำมันเตาชนิดที่ 1 (HFO 600)	0.9390	0.9396	18984	41859	39305
น้ำมันเตาชนิดที่ 4 (HFO 1500)	0.9510	0.95421	18894	41661	39619
น้ำมันเตาชนิดที่ 5 (HFO 2000)	0.9415	0.925	18497	39300	38399
น้ำมันเตาชนิดที่ 6 (HFO 26000)	-	0.926	19075	42000	38940
ก๊าซธรรมชาติ (NATURAL GAS)	-	-	19518	43030	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง B องค์ประกอบและค่าความร้อนของก๊าซธรรมชาติ

องค์ประกอบ (%)	ก๊าซธรรมชาติชนิดแห้ง	ก๊าซธรรมชาติชนิดชื้น
C_nH_{2n+2}	75 – 92.5	99
C_mH_n	0 – 0.2	-
CO_2	-	0.3
O_2	0.1 – 0.8	-
N_2	0 – 0.05	-
ค่าความร้อน(kJ/m^3)	37800 – 39900	43680 - 50400

หมายเหตุ C_nH_{2n+2} คือ มีเทน CH_4 , อีเทน C_2H_6 , โพรเพน C_3H_8 เป็นต้น
 C_mH_n คือ เอทิลีน C_2H_4 , โพรพิลีน C_3H_6 เป็นต้น

ตาราง C คุณสมบัติขององค์ประกอบของก๊าซธรรมชาติ

องค์ประกอบ	สูตรโมเลกุล	ค่าความร้อน (kJ/m^3)	ความถ่วงจำเพาะ (เทียบกับอากาศ)	ความหนาแน่น (kg/m^3)
มีเทน	CH_4	39984	0.554	0.7168
อีเทน	C_2H_6	70770	1.049	1.356
โพรเพน	C_3H_8	101472	1.550	2.004
เอทิลีน	C_2H_4	63630	0.9750	1.2604
โพรพิลีน	C_3H_6	93870	1.481	1.9370
คาร์บอนไดออกไซด์	CO_2	-	1.5291	1.9769
ออกซิเจน	O_2	-	1.1053	1.4290
ไนโตรเจน	N_2	-	0.9673	1.2505

ความหนาแน่นของอากาศแห้งในสภาวะมาตรฐาน = 1.293 kg/m^3

บรรณานุกรม

- [1] เชื้อ ชูขำ และ อุตสาหกรรม จิลากรณณ์, "เครื่องยนต์สันดาปภายใน", 384 หน้า, 2542
- [2] ปกรณ์ สรรพพิทักษ์เสรี และ ผดุงศักดิ์ สุระรัมย์, "การใช้ก๊าซ LPG ในเครื่องยนต์ระบบหัวฉีด", คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง, 2-8 หน้า, 2539
- [3] มนต์ชัย กาทอง, "เอกสารวิชาเทอร์โมไดนามิกส์ 2", 457 หน้า, 2532
- [4] M.M. El-Wakil, "POWER PLANT TECHNOLOGY", McGraw-Hill Book Company, 841 p., 1960
- [5] William W. Bathie, "FUNDAMENTALS OF GAS TURBINE", John Wiley and Sons, Inc, 453 p, 1996
- [6] William W. Crouse and Donald L. Anglin, "Automotive Engines", 654 p., 1984