



การใช้ประโยชน์เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรตามชุมชนเป็นเชื้อเพลิง สำหรับเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์ไบน์ขนาดเล็ก

โดย

นายวรเทพ สีสัตย์เชื้อ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การใช้ประโยชน์เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรตามชุมชนเป็นเชื้อเพลิง สำหรับเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์
ไบน์ขนาดเล็ก

โดย
นายวรเทพ สีสัตย์เชื้อ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์
ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2551
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

**UTILIZATION OF COMMUNE BIOMASS AS FUEL FOR RUNNING A SMALL SEMI-
CLOSED CYCLE GAS TURBINE ENGINE**

**By
Worathep Srisutsue**

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree

MASTER OF ENGINEERING

Department of Materials Science and Engineering

Graduate School

SILPAKORN UNIVERSITY

2008

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร อนุมัติให้วิทยานิพนธ์เรื่อง “การใช้ประโยชน์
เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรตามชุมชนเป็นเชื้อเพลิง สำหรับเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์โบขนาดเล็ก”
เสนอโดย นายวรเทพ สีสัตยชี้อ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรม
ศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ชินะดังกูร)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน..... พ.ศ.....

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

1.ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรัญ วสันตกรณ์

2.ดร.ฉัตรชัย จันทร์दनดวง

คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(อาจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ ชัยยุตต์)

...../...../.....

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธรรม ปทุมสวัสดิ์)

...../...../.....

..... กรรมการ

(ดร.เกษมา ศิริสมบุญ)

...../...../.....

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรัญ วสันตกรณ์)

...../...../.....

..... กรรมการ

(ดร.ฉัตรชัย จันทร์दनดวง)

...../...../.....

48402223 : สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

คำสำคัญ : เชื้อเพลิงชีวมวล / เครื่องยนต์ก๊าซเทอร์โบ / ห้องเผาไหม้ถ่ายเทความร้อน

วาทะ สัตยชัย : การใช้ประโยชน์เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรตามชุมชนเป็นเชื้อเพลิง สำหรับเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์โบขนาดเล็ก. อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : ผศ.ดร.อรรถ วสันตกรรม และ ดร.ฉัตรชัย จันทร์เด่นดวง. 185 หน้า.

เชื้อเพลิงฟอสซิลซึ่งได้แก่ น้ำมันดิบ ก๊าซธรรมชาติ และถ่านหิน เป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญต่อมนุษย์ที่สุดในปัจจุบัน อัตราการใช้พลังงานมากขึ้นในปัจจุบันจะทำให้ น้ำมันดิบ และก๊าซธรรมชาติหมดลงในเวลาไม่เกิน 30-50 ปี มนุษย์จึงต้องหาเชื้อเพลิงอื่นมาทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลให้ได้ หากพิจารณาให้ดีจะเห็นว่า เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่เรียกว่า ชีวมวล (Biomass) กลายเป็นแหล่งพลังงานที่มีศักยภาพในการแข่งขันกับแหล่งอื่นๆ สูงมาก เพราะเป็นแหล่งเชื้อเพลิงหมุนเวียนที่มนุษย์สามารถผลิต และใช้ได้ทันในช่วงเวลาสั้นๆ ซึ่งมีย่อยมากมายโดยเฉพาะประเทศไทย งานวิจัยนี้ทำการออกแบบและพัฒนาระบบห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์โบขนาดเล็ก สำหรับเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลซึ่งเป็นเชื้อเพลิงแข็งให้เกิดประโยชน์และมีประสิทธิภาพ ข้อแตกต่างของระบบเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์โบที่ได้สร้างขึ้นกับระบบที่มีใช้กันอยู่คือ ระบบอัดอากาศจะใช้แบบลูกสูบ (Reciprocating air compressor) แทนระบบอัดอากาศแบบไหลตามแกน (Axial flow compressor) และห้องเผาไหม้เป็นแบบถ่ายเทความร้อน (Heat exchanger furnace) แทนห้องเผาไหม้แบบสันดาปภายใน ห้องเผาไหม้ที่ออกแบบนั้นจะมีลักษณะเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน คือ ทำการสร้างเป็นถึงทรงกระบอก และมีผิวซ้อนกันเป็น 2 ชั้น ห่างกันประมาณ 3 มิลลิเมตร เพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซร้อนของระบบเผาไหม้เชื้อเพลิง กับอากาศของระบบเทอร์โบ ก๊าซร้อนที่ได้จากการเผาไหม้จะถ่ายเทความร้อนผ่านผนังเตาชั้นในเข้าสู่อากาศของระบบเทอร์โบที่อยู่ระหว่างช่องว่างของผนังเตาโดยโหมดของการแผ่รังสีความร้อนเป็นสำคัญแล้วจึงไหลสู่เทอร์โบต่อไป จากการทดสอบเดินเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์โบนี้โดยใช้ฟางข้าวมาบดเป็นเชื้อเพลิง พบว่าเมื่ออัตราการป้อนเชื้อเพลิงประมาณ 0.0166 กิโลกรัมต่อวินาที จะได้อุณหภูมิเปลวเพลิงภายในเตาได้ประมาณ 440°C เมื่ออากาศอัดตัวจากเครื่องอัดอากาศซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 80°C แลกเปลี่ยนความร้อนกับก๊าซร้อนจากห้องเผาไหม้แล้วจะได้อุณหภูมิของอากาศตรงทางเข้าเทอร์โบเท่ากับ 320°C (ในช่วงเริ่มต้น) แต่จะเริ่มลดลงเล็กน้อย เนื่องจากระบบป้อนเชื้อเพลิงที่ออกแบบมีปัญหาป้อนเชื้อเพลิงได้ไม่มาก ในช่วงเริ่มต้นสามารถวัดความเร็วรอบของเทอร์โบได้ประมาณ 2,200 รอบต่อวินาที และเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อสภาวะการสูญเสียความร้อนคงที่ ความเร็วรอบเทอร์โบจะเริ่มคงที่ ที่ประมาณ 2,800 รอบต่อวินาที ที่อุณหภูมิเข้าเทอร์โบประมาณ 280°C

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ปีการศึกษา 2551

ลายมือชื่อนักศึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ 1. 2.

48402223 : MAJOR : POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING

KEY WORD : BIOMASS / GAS TURBINE / HEAT EXCHANGER FURNACE

WORATHEP SRISUTSUE : UTILIZATION OF COMMUNE BIOMASS AS FUEL FOR
RUNNING A SMALL SEMI-CLOSED CYCLE GAS TURBINE ENGINE. THESIS ADVISORS :
ASST.PROF.ANAN WASANTAKORN, Ph.D., AND CHATRCHAI CHANDENDUANG, Ph.D., 185
pp.

Fossil fuels including oil, natural gas and coal are the most powerful energy source in the world for a long time. Shortage of these fuels is becoming a serious problem and the state of using up is coming with in next 30-50 years. Biomass is the most interested energy source to be expected to replace them. It has high potential to compete with fossil fuels and other sources, especially in agricultural countries like Thailand. This research tries to make our own small gas turbine and utilize commune biomass as fuel for running the turbine. This turbine is different from a conventional turbine system by using a reciprocating compressor instead of an axial flow one and also using a furnace heat exchanger instead of a normal combustion chamber. The furnace heat exchanger was designed as a concentric two-layer cylindrical tank with a clearance of 3 millimeters. The compartment inside the inner layer is used as a combustion chamber to burn biomass. The narrow space between the two layers is for the turbine air flowing through and absorbing heat from the combustion chamber. The flow pattern is hot flue gas going up whereas the turbine air going down. In testing runs of the engine, rice straws are grinded and feed as fuel for the engine with the feeding rate of 0.0166 kg/min. The resulted flame temperature of hot flue gas is about 440°C. At the beginning the compressed air temperature is about 80°C. After exchanging heat with hot flue gas from combustion process, its temperature has been increasing to 320°C. The temperature of this air is decreased because of small feed rate of fuel caused by blocking of higher pressure air inside the combustion chamber. At the beginning, the turbine speed is 2,200 rpm. This number is then increased up to the constant heat loss rate. The turbine speed reaches the constant value of 2,800 rpm at the turbine inlet air temperature at of 280°C.

Department of Materials Science and Engineering Graduate School, Silpakorn University Academic Year 2008

Student's signature

Thesis Advisors' signature 1. 2.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะไม่สำเร็จไปได้ด้วยดีถ้าปราศจากบุคคลทั้งสองคือ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรัญ วสันตกรณ์ และ ดร.ฉัตรชัย จันทร์เด่นดวง ณ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำต่างๆที่ดีมาตลอด อีกทั้งสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัย

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุศรินทร์ เหมะปะบุตร ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธรรม ปทุมสวัสดิ์ และดร.กษมา ศิริสมบุญรณ์ ที่ให้เกียรติมาเป็นกรรมการคุมสอบวิทยานิพนธ์ รวมทั้งให้ความรู้และคำแนะนำต่างๆที่มีประโยชน์เป็นอย่างยิ่ง ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ทุกท่านที่อบรม สั่งสอน ตักเตือน ทั้งด้านการศึกษาและการใช้ชีวิตแก่ผู้วิจัยมาตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา

ผู้วิจัยขอขอบคุณสถาบันพัฒนาฝีมือแรงงานภาค 4 โดยเฉพาะอย่างยิ่ง อาจารย์ สุรินทร์ ที่ให้คำแนะนำ เทคนิควิธีการต่างๆในการทำงาน ขอขอบคุณช่างเทคนิคโดยเฉพาะ คุณไพโรจน์ ตั้งศุภวัช ที่อำนวยความสะดวกและช่วยเหลือทางด้านเครื่องมือในงานวิจัยตลอดมา ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ทุกท่านในภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุที่ได้อำนวยความสะดวกในการขอใช้ห้องปฏิบัติการ และการเบิกจ่ายเงินต่างๆ และขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ช่วยแก้ไขรูปแบบวิทยานิพนธ์ให้มีความถูกต้องและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัว ที่ให้ทั้งกำลังใจ ความอบอุ่น คำปลอบ และกำลังใจที่ดีมาตลอดเวลา ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ และผู้ที่ไม่ได้กล่าวถึงมาในนี้ ที่ให้ความรู้สึที่ดีและประสบการณ์ที่ดีแก่ผู้วิจัยตลอดระยะเวลาที่ศึกษาอยู่ ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ปัญหาและความเป็นมาของงานวิจัย	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
แนวคิดงานวิจัย.....	3
ขอบเขตของงานวิจัย	5
ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	5
ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
2 ทฤษฎีการออกแบบและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
ทฤษฎีในการคำนวณการสร้างห้องเผาไหม้	7
เทอร์โมไดนามิกส์ของเครื่องยนต์เทอร์โบไน์	34
วัฏจักรเบรตันอุดมคติ.....	34
วงจรการทำงานของเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์โบไน์จริง.....	37
อากาศพลศาสตร์ของเทอร์โบไน์แบบไหลตามแกน	39
ทฤษฎีเบื้องต้นของเทอร์โบไน์แบบไหลตามแกน.....	39
เครื่องอัดอากาศ	51
เครื่องอัดอากาศแบบลูกสูบ	52
ผลของปริมาตรหัวสูบ.....	56
แผนภาพจริงของเครื่องอัดแบบลูกสูบ.....	59
ปริมาตรอิสระของอากาศที่ออกจากเครื่องอัด.....	60
เครื่องอัดอากาศแบบลูกสูบหลายชั้น	60
เงื่อนไขอุดมคติของเครื่องอัดแบบหลายชั้น	63

บทที่	หน้า
3	วิธีและขั้นตอนการสร้างชิ้นส่วนเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์โบ
	การออกแบบชิ้นส่วน
	การคำนวณหาพื้นที่การไหลตรงทางเข้าเทอร์โบ
	การหาขนาดห้องเผาไหม้ถ่ายเทความร้อน
	เครื่องอัดอากาศ
	การออกแบบเพลลา
	วิธีสร้างชิ้นส่วนต่างๆ
	การสร้างชิ้นส่วนเทอร์โบ
	วิธีและขั้นตอนสร้างห้องเผาไหม้ถ่ายเทความร้อน
	การประกอบเครื่อง
	การประกอบแฉวใบพัดนิ่ง และแฉวใบพัดหมุนเข้ากับชิ้นส่วนเฟรมทั้งสองแบบ
	การประกอบเพลลาเข้ากับวงล้อใบพัดหมุน
	การประกอบเทอร์โบ
	การประกอบห้องเผาไหม้
	การประกอบเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์โบ
4	ผลการสร้างเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์โบและการวิจารณ์
	ผลการประกอบเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์โบ
	ส่วนเครื่องอัดอากาศแบบลูกสูบ
	ห้องเผาไหม้ที่มีการถ่ายเทความร้อนแบบ Recuperator
	เทอร์โบและชิ้นส่วนย่อยที่ได้ทำการผลิตขึ้น
5	การทดสอบเดินเครื่องของระบบเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์โบ
	ขั้นตอนการติดตั้งและประกอบอุปกรณ์ช่วยเข้ากับตัวเครื่อง
	ขั้นตอนการเริ่มเดินเครื่อง (Start up)
	ขั้นตอนการเดินเครื่องและเก็บข้อมูล
	ผลการทดลองเดินเครื่อง
	ปัญหาการเดินเครื่อง
6	สรุปผลการดำเนินงาน

บทที่	หน้า
การสร้างเครื่องยนต์เทอร์โบ	123
ข้อเสนอแนะ	124
บรรณานุกรม	126
ภาคผนวก	130
ภาคผนวก ก	131
ภาคผนวก ข	140
ภาคผนวก ค	157
ประวัติผู้วิจัย	185

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ความยาวลำแสงเฉลี่ย (Mean Length) ของลำแสง (Radiant Beams) ใน ปริมาตรก๊าซที่มีรูปร่างต่างๆ ตามเตา.....	11
2.2	แสดงความยาวลำแสงสำหรับการแผ่รังสีของก๊าซ (Beam Lengths for Gas Radiation).....	18
2.3	Permissible Average Radiant Rates	33
3.1	แสดงส่วนผสมทางเคมีของ W302	76
4.1	แสดงผลจากการ ปรับสมดุลวงล้อและเพลลาที่สร้างขึ้นมา	114
4.2	แสดง unbalance เริ่มต้น.....	115
4.3	แสดง unbalance ที่เหลือ	115

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	แสดงส่วนประกอบ ของ A semi-closed cycle gas turbine engine และ The Brayton cycle ที่เครื่องยนต์นี้กำลังประพฤติตาม.....	4
2.1	การแผ่รังสีเนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์	12
2.2	การแผ่รังสีเนื่องจากไอน้ำ.....	13
2.3	แสดง Absorption strength ของเปลวเพลิงสว่าง	16
2.4	แสดงความสามารถการแผ่รังสีของเปลวเพลิงสว่าง.....	16
2.5	การประเมินค่าแฟคเตอร์แสดงประสิทธิผล α	20
2.6	แสดงการประเมินค่า α ที่กำลังแสดงให้เห็นการกระจายของฟลักซ์บนเส้น รอบรูปท่อ	22
2.7	แสดงการแผ่รังสีระหว่างระนาบหนึ่งกับหนึ่งแถวท่อหรือมากกว่าที่ขนานกับ ระนาบแผ่รังสีนั้น	23
2.8	ฟลักซ์การแผ่รังสีความร้อน	30
2.9	แสดงค่า overall exchange factor เป็นฟังก์ชันของค่าการปล่อยรังสีของก๊าซ	31
2.10	เปรียบเทียบองค์ประกอบต่างๆ ของเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์โบระบบวงจรเปิด (a) กับระบบวงจรกึ่งปิด (b)	34
2.11	ไดอะแกรม $T-s$ และ $P-v$ แสดงกระบวนการเปลี่ยนแปลงย่อยๆ ที่เกิดขึ้นบน องค์ประกอบต่างๆ ที่กำลังทำงานของเครื่องยนต์เทอร์โบ.....	35
2.12	ความเบี่ยงเบนของวัฏจักรก๊าซเทอร์โบจริงจากวัฏจักรอุดมคติ Brayton เนื่อง จากปัจจัย irreversibilities	37
2.13	1 สเตจของเทอร์โบแบบไหลตามแกน	39
2.14	ไดอะแกรมแสดงเวกเตอร์ต่างๆ ของความเร็วก๊าซและใบพัด	41
2.15	ออกแบบโดยใช้ Percent reaction เท่ากับ 50%	46
2.16	ใบพัดนี้แบบ (a) Convergent-divergent และแบบ (b) Divergent อย่างเดียว ที่กำลังปฏิบัติการที่อัตราส่วนความดันมากกว่าอัตราส่วนความดันวิกฤติ	51
2.17	(ก) และ (ข) แสดงเครื่องอัดอากาศแบบขั้นเดียว	52
2.18	แสดงแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างความดันและปริมาตร ($P - V$) ของ เครื่องอัดอากาศ	53

รูปที่		หน้า
2.19	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรหัวสูบกับความดัน.....	57
2.20	แสดงแผนภาพจริงของเครื่องอัดแบบลูกสูบ	59
2.21	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและปริมาตรของเครื่องอัดอากาศแบบ ลูกสูบหลายชั้น	60
2.22	แสดงเครื่องอัดลมสองชั้น	61
2.23	แสดงการต่อกระบอกสูบของเครื่องอัดแบบสามชั้น.....	62
2.24	แสดงวัฏจักรของเครื่องอัดอากาศหลายชั้นในอุดมคติ.....	63
3.1	แสดงพื้นที่ช่องทางเดินอากาศอิสระของแฉวใบพัดนิ่งที่ใช้ในการคำนวณ	68
3.2	แสดงพื้นที่ช่องทางเดินอากาศอิสระของแฉวใบพัดหมุนที่ใช้ในการคำนวณ ...	69
3.3	แสดงส่วนประกอบของห้องเผาไหม้	70
3.4	บริเวณถึงพักอากาศอัดจากเครื่องอัดอากาศ.....	71
3.5	บริเวณทรงกรวยรับความร้อน	72
3.6	บริเวณส่วนด้านบนรับความร้อน.....	72
3.7	บริเวณทรงกระบอกรับความร้อน	73
3.8	บริเวณกันถึงก่อนเข้าสู่เทอร์ไบน์	73
3.9	แสดงการออกแบบลักษณะเบื้องต้นของเพลลา	75
3.10	แสดงชนิดของลิ้มอัด	75
3.11	แสดงเพลลาเพื่อใช้ในการคำนวณ.....	77
3.12	แสดงส่วนประกอบต่างๆ ของเทอร์ไบน์ที่ออกแบบไว้แล้ว	81
3.13	การวางรองเพลลาโดยใช้ลูกปืนแบบเม็ดกลมร่องลึก (Deep groove ball bearing) สำหรับรองรับแรงตามแนวแกนและแนวตามรัศมีขนาดปานกลาง.....	82
3.14	แสดงเสื้อใส่ตลับลูกปืนที่ออกแบบแล้ว (Housing)	83
3.15	แสดงแบบเฟรมด้านในที่ออกแบบแล้ว (Frame_01)	83
3.16	เฟรมด้านนอกที่ออกแบบแล้ว (Frame_02)	84
3.17	จานยึดแฉวใบพัดนิ่งที่ออกแบบแล้ว (Frame_03)	85
3.18	ชิ้นส่วนกำกับวงล้อแฉวใบพัดนิ่งที่ออกแบบแล้ว (Frame_04)	86
3.19	ชิ้นส่วนป้องกันเพลลาด้านท้ายที่ออกแบบแล้ว (ชีอะระบุในแบบ Frame_05)	87
3.20	ชิ้นส่วนเฟรมสวมวงล้อแฉวใบพัดหมุนที่ออกแบบแล้ว (Frame_06).....	88

รูปที่		หน้า
3.21	แสดงเฟรมทางออกของอากาศที่ออกแบบแล้ว (Frame_07)	89
3.22	แสดงเฟรมยึดส่วนปลายแฉกใบพัดนิ่งที่ออกแบบแล้ว (Stator_01)	89
3.23	แสดงจานยึดส่วนโคนของแฉกใบพัดหมุนที่ออกแบบแล้ว (Rotor_01)	90
3.24	แสดงเพลาชับ(Shaft_01)	91
3.25	แสดงใบพัดนิ่งและใบพัดหมุน (Nozzle and Rotor blade) ที่ออกแบบแล้ว (Turbine blade_Stator, Turbine blade_Rotor).....	92
3.26	(ก) เครื่องเก็บพิกัดสามมิติระบบออปติก (ข) เครื่องซีเอ็นซีมิลลิ่ง แบบ 5 แกน	93
3.27	แสดงห้องเผาไหม้ ชนิดถ่ายเทความร้อนที่ออกแบบไว้	93
3.28	(ก) การประกอบแฉกใบพัดนิ่ง (ข) การประกอบแฉกแฉกใบพัดหมุน เข้ากับ จานหมุนและ shroud	95
3.29	การประกอบเพลาชับเข้ากับเฟรมแฉกใบพัดหมุน (Rotor frame)	95
3.30	ภาพแสดงส่วนประกอบต่างๆ ของเทอร์โบไนท์.....	96
3.31	แสดงส่วนประกอบห้องเผาไหม้	97
3.32	แสดงภาพสเก็ตช์ของเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์โบไนท์ที่สมบูรณ์.....	97
4.1	แสดงระบบเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์โบไนท์	99
4.2	แสดงเครื่องอัดอากาศแบบลูกสูบ	100
4.3	แสดงห้องเผาไหม้ที่ทำการสร้างสำเร็จพร้อมหุ้มฉนวนกันความร้อนอย่าง สมบูรณ์	101
4.4	แสดงภาพสเก็ตช์ของห้องเผาไหม้ที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนผ่านผนัง (ก) และห้องเผาไหม้ที่ผ่านการเชื่อมประกอบแล้วเสร็จสมบูรณ์ (ข).....	102
4.5	แสดงฉนวนกันความร้อนชนิดต่างๆ (ก) อิฐทนไฟ (ข) เซรามิคไฟเบอร์ (ค) กระดาษใย.....	102
4.6	แสดงห้องเผาไหม้ ภาพสเก็ตช์ห้องเผาไหม้ (ก) ห้องเผาไหม้ที่ถ่ายเทความร้อนที่ สร้างเสร็จสมบูรณ์ (ข)	103
4.7	แสดงภาพสเก็ตช์ชิ้นส่วนเทอร์โบไนท์ (ก) ภาพตัดเทอร์โบไนท์ (ข) และเทอร์โบไนท์ที่สร้าง เสร็จสมบูรณ์ (ค)	104
4.8	แสดงเสื้อใส่ตั้บลูกปืนพร้อม Drawing แสดงขนาด (Housing_01, Housing_02)	104

รูปที่		หน้า
4.9	แสดงชิ้นส่วนเฟรมด้านในพร้อม Drawing แสดงขนาด (Frame_01).....	105
4.10	แสดงเฟรมด้านนอกที่สร้างเสร็จพร้อม drawing แสดงขนาด (Frame_02)	106
4.11	แสดงจานีโดใบพัดนิ่ง พร้อมdrawing แสดงขนาด (Frame_03)	107
4.12	แสดงชิ้นส่วนสำหรับใช้สวมเฟรมใบพัดนิ่งที่สร้างเสร็จแล้วพร้อมdrawing แสดงขนาด (Frame_04).....	107
4.13	แสดงชิ้นส่วนป้องกันเพลาด้านท้ายที่สร้างเสร็จแล้วพร้อมdrawing แสดง ขนาด (Frame_05)	108
4.14	แสดงเฟรมสวมใบพัดหมุนที่สร้างเสร็จแล้วพร้อม drawing แสดงขนาด (Frame_06).....	109
4.15	แสดงเฟรมทางออกของอากาศที่สร้างเสร็จ พร้อมdrawing แสดงขนาด (Frame_07).....	109
4.16	แสดงเพลาชับที่สร้างเสร็จแล้วพร้อม drawing แสดงขนาด (Shaft_01).....	110
4.17	แสดงใบพัดนิ่งและใบพัดหมุน ที่สร้างเสร็จแล้วพร้อม drawing แสดงขนาด (Turbine blade_Stator, Turbine blade_Rotor)	111
4.18	แสดงจานยึดใบพัดหมุนที่สร้างเสร็จแล้วพร้อม drawing แสดงขนาด (Turbine blade_Rotor)	112
4.19	แสดงใบพัดนิ่งและใบพัดหมุนเมื่อประกอบเข้ากับจานและ shroud เสร็จ เรียบร้อย.....	113
4.20	แสดงการทำการปรับสมดุลการหมุนของวงล้อและเพลาชับเทอร์ไบน์ที่สร้าง ด้วยเครื่องปรับสมดุล (model zc50, version TC-GV)	114
4.21	แสดงก๊าซเทอร์ไบน์ที่ประกอบสมบูรณ์แล้วพร้อมเชื่อมต่อกับห้องเผาไหม้และ เครื่องอัดอากาศ	115
5.1	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่จุดต่างๆ กับเวลาเดินเครื่อง.....	119
5.2	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เข้าเทอร์ไบน์และความเร็วรอบต่อเวลา	120
5.3	แสดงบริเวณที่เกิดการแตกร้าวเนื่องมาจากการสั่นของเครื่องอัดอากาศ	121
5.4	(ก) แสดงระบบป้องกันเชื้อเพลิงฟางข้าวบด (ข) ฟางข้าวที่บดนำมาทำเชื้อเพลิง	121
5.5	แสดงบริเวณช่องป้องกันเชื้อเพลิงที่เกิดความดันของอากาศในห้องเผาไหม้เมื่อ อุณหภูมิสูง	122

รูปที่		หน้า
5.6	บริเวณตลิ่งถูกปีนทั้งส่วนหน้าและส่วนหลังที่ต้องได้รับการหล่อเย็น.....	122

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ปัญหาและความเป็นมาของงานวิจัย

ปัจจุบันประเทศไทย (หรือแม้แต่ทั่วโลกก็ตาม) กำลังประสบปัญหาด้านการเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วของราคาเชื้อเพลิงฟอสซิล ปัญหานี้เกิดจากการลดลงอย่างรวดเร็วของปริมาณสำรองเชื้อเพลิงฟอสซิลของโลกและกำลังจะหมดลงในระยะเวลาอันใกล้ สถานการณ์เช่นนี้ทำให้เราต้องรีบหาแหล่งเชื้อเพลิงแหล่งใหม่ที่มีศักยภาพและปริมาณที่เพียงพอต่อการบริโภค พลังงานนิวเคลียร์ดูจะยังอันตรายเกินไปสำหรับประเทศที่ยังไม่สามารถพัฒนาเทคโนโลยีนิวเคลียร์ให้ทันสมัย พลังงานลมและพลังงานน้ำมีไม่เพียงพอแน่นอน ที่มีมากจริงๆ คือ พลังงานแสงอาทิตย์ เพียงแต่ว่าเครื่องมือเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ อันได้แก่ เซลล์แสงอาทิตย์ ยังมีประสิทธิภาพต่ำเกินไป ต้องการพัฒนาให้สูงขึ้น

แหล่งพลังงานเชื้อเพลิงที่สำคัญสำหรับประเทศไทยในศตวรรษหน้าน่าจะได้แก่ เชื้อเพลิงชีวมวล เพราะมีวัฏจักรการผลิตสั้นมาก มนุษย์สามารถผลิตและใช้ได้ทันในช่วงการดำเนินชีวิต รวมไปถึงปริมาณก็มีมากด้วย ประเทศไทยนับเป็นประเทศเกษตรกรรมที่สำคัญแห่งหนึ่งของโลก ประชาชนมากกว่าร้อยละ 50 ประกอบอาชีพเกษตรกรรม ผลพลอยได้ที่สำคัญนอกเหนือจากผลผลิตการเกษตรก็คือ วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น ฟางข้าว แกลบ กากอ้อย กาก ใบ และ ทะลายปาล์ม เป็นต้น ปริมาณปริมาณชีวมวลที่ผลิตได้รวมทั้งประเทศ ในปี 2540/41 จะได้ปริมาณชีวมวลประมาณ 31.32 ล้านตัน หรือเทียบเท่าน้ำมันดิบ 8.49 ล้านตัน [1] ซึ่งมีการปล่อยทิ้งให้เน่าเปื่อยและย่อยสลายตามธรรมชาติ เท่ากับว่าพลังงานเคมีที่สะสมอยู่ในตัวมันก็ต้องสูญไปโดยเปล่าประโยชน์ ทั้งๆ ที่ชีวมวล (Biomass) เป็นพลังงานหมุนเวียน ที่ไม่มีวันหมด เป็นพลังงานที่ยั่งยืน และเป็นแหล่งพลังงานเชื้อเพลิงที่มี ค่าความร้อน (Heating value) สูง ชีวมวลแต่ละชนิดมีค่าความร้อนที่แตกต่างกันออกไปและเป็นไฮโดรคาร์บอนที่สะอาดและมีปริมาณมาก หากสามารถนำมาบดย่อย และเผาในห้องเผาไหม้ที่มีประสิทธิภาพสูง จะทำให้สามารถสกัดความร้อนจากชีวมวลเหล่านี้มาผ่านตัวเปลี่ยนพลังงาน (Energy converter) ที่เหมาะสมขึ้นได้แก่ เครื่องยนต์ต่างๆ ก็จะสามารถใช้ประโยชน์ความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ชีวมวลในการผลิตกระแสไฟฟ้าเพื่อมวลมนุษยได้อย่างเพียงพอ แนวทางการสกัดพลังงานจากชีวมวลเพื่อใช้ประโยชน์มีหลายแนวทาง ได้แก่

1. Direct Combustion system คือ การนำชีวมวลไปเผากับอากาศโดยตรงในห้องเผาไหม้ซึ่งจะได้พลังงานความร้อนออกมาเป็นปริมาณมาก ในท่ามกลางเปลวเพลิงที่กำลังเผาไหม้ หากมีเครื่องกำเนิดไอน้ำ (Boiler) ก็สามารถสกัดพลังงานเข้าสู่ก๊าซ (Gas) หรือวัฏจักรไอ (Vapor cycles) ได้
2. Anaerobic Digestion system คือ การนำชีวมวลไปหมักโดยผ่านกระบวนการย่อยสลายโดยแบคทีเรีย ทำให้ได้ก๊าซมีเทน คาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำออกมา วิธีการนี้มีแบคทีเรียเป็นผู้เปลี่ยนปริมาณพลังงาน (Energy content) ของชีวมวลไปเป็นปริมาณพลังงานในก๊าซมีเทน โดยเมื่อเผาก๊าซมีเทน ก็จะได้พลังงานความร้อนไปใช้ประโยชน์ได้ แนวทางนี้จึงถือเป็นการสกัดและใช้ชีวมวลโดยทางอ้อม
3. Gasification system คือ กระบวนการที่นำชีวมวลไปให้ความร้อนผ่านภาชนะปิด ทำให้ได้ก๊าซสังเคราะห์ (Synthesis gas) ออกมา เช่น ก๊าซมีเทน ประมาณ 60-70% และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 30-40% โดยปริมาตร ซึ่ง ก๊าซสังเคราะห์นี้สามารถนำไปทำเป็นเชื้อเพลิงได้ วิธีนี้มีข้อเสียคือต้องใช้ความดันสูงในการผลิต [2]

จากแนวทางการสกัดพลังงานจากชีวมวลข้างต้นพบว่า แนวทางที่ 1 เป็นแนวทางการสกัดความร้อนที่ง่ายและตรงที่สุดเสียค่าใช้จ่ายในการติดตั้งอุปกรณ์น้อยที่สุดจึงเป็นที่สนใจอย่างแพร่หลาย แนวทางที่สองและสามล้วนเป็นแนวทางที่เป็นการสกัดความร้อนทางอ้อม ของการสกัดความร้อนจากเชื้อเพลิงชีวมวล ที่ต้องลงทุนสร้างอุปกรณ์ที่ซับซ้อนซึ่งมีต้นทุนสูงตามไปด้วย

สำหรับสภาวะการใช้และความขาดแคลนเชื้อเพลิงฟอสซิลของประเทศไทยในปัจจุบัน ผู้วิจัยมีความเห็นว่าเรามีทางเลือก 2 แนวทาง ได้แก่

1. ยังคงเลือกที่จะใช้เทคนิคที่ซับซ้อนและยุ่งยากในการพัฒนาเชื้อเพลิงเหลว เช่น ผลิตแอลกอฮอล์ทำก๊าซไฮโดร หรือผลิตไบโอดีเซล เป็นต้น เพื่อนำมาใช้กับเครื่องยนต์สันดาปภายใน (Internal combustion engines, ICE) อยู่ต่อไป ซึ่งทราบกันดีว่าต้องใช้เทคนิคและเครื่องมือที่ทันสมัย และต้นทุนสูงในการผลิต หรือ
2. เลือกใช้เชื้อเพลิงแข็งอย่างชีวมวลที่มีอยู่มากและราคาถูก แต่ต้องพัฒนาเครื่องยนต์เทอร์โบไบน์ขึ้นมาใช้ เนื่องจากเป็นไปไม่ได้ที่เครื่องยนต์สันดาปภายในจะเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง

ผู้วิจัยมุ่งพัฒนาเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์โบระบบปิดขนาดเล็กขึ้นมาใช้ตามชุมชนที่มีชีวมวลอย่างใดอย่างหนึ่งอย่างเพียงพอ เช่น ชุมชนชายทะเลประจวบคีรีขันธ์มีเปลือกมะพร้าวมากก็เผาเปลือกมะพร้าวเป็นเชื้อเพลิง ชุมชนกาญจนบุรีมีต้นอ้อยใบอ้อยมากก็เผาใบอ้อย การออกแบบห้องเผาไหม้เทอร์โบไบนีนี้เป็นระบบปิดจะทำให้ก๊าซร้อนที่ไหลผ่านเทอร์โบไบนีมีความสะอาดพอที่จะไม่ทำ

ให้ใบพัดเทอร์ไบน์เสียหาย นอกจากนี้ยังสามารถนำก๊าซร้อนที่ผ่านก๊าซเทอร์ไบน์ไปต้มน้ำป้อนกังหันไอน้ำต่อ (การต่อเชื่อมเครื่องยนต์กังหันก๊าซกับกังหันไอน้ำที่เรียกว่า “โรงงานพลังงานความร้อนร่วม”) ทำให้ประสิทธิภาพทางความร้อนในการเผาไหม้เชื้อเพลิงสูงขึ้น

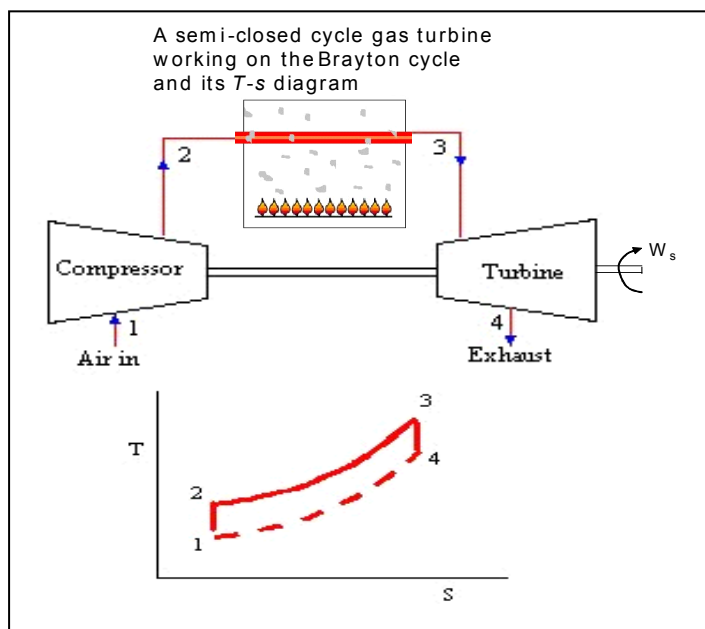
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ต้องการนำเสนอให้นำชีวมวลมาใช้เป็นเชื้อเพลิงโดยผ่านเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์ไบน์ขนาดเล็ก เพื่อแก้ปัญหาขาดแคลนพลังงาน แทนที่การพัฒนาการผลิตเชื้อเพลิงเหลวทดแทนเพื่อมาใช้กับเครื่องยนต์สันดาปภายใน (Internal Combustion Engine, ICE)
2. ต้องการพัฒนาเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์ไบน์แบบกึ่งปิดขนาดเล็ก ที่สามารถใช้เผาเชื้อเพลิงแข็งอย่างชีวมวล เป็นเชื้อเพลิง
3. ต้องการพัฒนาห้องเผาไหม้แบบแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger Furnace) และระบบป้อนเชื้อเพลิงเชื้อเพลิง ชีวมวลเข้าสู่ห้องเผาไหม้ที่มีประสิทธิภาพและก่อกมลพิษต่ำ

1.3 แนวคิดงานวิจัย

เครื่องยนต์ก๊าซเทอร์ไบน์นั้นเป็นเครื่องยนต์ที่สามารถจะเผาไหม้ได้ทั้งเชื้อเพลิงที่เป็นลักษณะของ ก๊าซ เชื้อเพลิงเหลว และเชื้อเพลิงแข็ง โดยเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์ไบน์ ระบบวงจรเปิด (Open cycle gas turbine) จะสามารถเผาไหม้ได้เฉพาะก๊าซและน้ำมัน หรือเชื้อเพลิงคุณภาพดี [3] เท่านั้น มิเช่นนั้นก๊าซร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีกำมะถันจะกัดกร่อนสร้างความเสียหายต่อใบพัด [4-5] เพื่อให้การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งอย่างชีวมวลเป็นไปได้สำหรับเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์ไบน์ จำเป็นต้องเลือกใช้เครื่องยนต์ก๊าซเทอร์ไบน์ระบบวงจรปิด (Closed cycle gas turbine) ซึ่งต้องมีการออกแบบห้องเผาไหม้ที่เหมาะสมที่เรียกว่า Heat exchanger furnace [6-9] ภายในห้องเผาไหม้แบบนี้เชื้อเพลิงแข็งต้องถูกเผาและปล่อยความร้อนออกมา จากนั้นความร้อนจะถูกถ่ายเทผ่านผนังปิดเข้าสู่ระบบหมุนวนของสารทำงาน (Working fluid) ของเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์ไบน์ แบบนี้จะช่วยหลีกเลี่ยงไม่ให้ความสกปรกจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งเช่น ขี้เถ้า (Fly ash) และอนุภาคต่างๆ (Particles) เข้าไปทำลายใบพัด (Blade) ภายในเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์ไบน์ได้ อย่างไรก็ตามผู้วิจัยเห็นว่าเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์ไบน์ระบบวงจรแบบกึ่งปิด (A semi-closed cycle gas turbine) นั้นเหมาะสมกว่าเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์ไบน์ระบบวงจรปิด เพราะไม่ต้องลงทุนสร้างตัวระบายความร้อน (Condenser) โดยหลังจากก๊าซร้อนขยายตัวผ่านเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์ไบน์แล้วก็ปล่อยทิ้งสู่ภายนอก และดึงอากาศเย็นภายนอกเข้าสู่เครื่องอัดอากาศ สิ่งแวดล้อมภายนอกเสมือนเป็นตัวระบายความร้อนไปในตัว รูปที่ 1.1 แสดงส่วนประกอบย่อยของเครื่องยนต์

ก๊าซเทอร์ไบน์ระบบวงจรแบบกึ่งปิดที่กำลังเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลในห้องเผาไหม้โดยเครื่องยนต์นี้ กำลังขับเคลื่อนตาม วัฏจักรเบรย์ตัน (The Brayton cycle) ซึ่งแสดงบน T - s diagram จนได้เป็น งานเพลานอกมา



รูปที่ 1.1 แสดงส่วนประกอบของ A semi-closed cycle gas turbine engine และ The Brayton cycle ที่เครื่องยนต์นี้กำลังประพฤติตาม

ห้องเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งของเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์ไบน์หรือที่เรียกว่า Heat exchanger furnace นั้นมีกลไกการถ่ายเทความร้อนจากก๊าซร้อน (Flue gas) เข้าสู่วงจรก๊าซเทอร์ไบน์ครบทั้ง 3 แบบ นั่นคือ 1.การนำความร้อน (Heat Conduction) 2.การพาความร้อน (Heat Convection) และ 3.การแผ่รังสีความร้อน (Heat Radiation) ห้องเผาไหม้ในลักษณะนี้นั้น ประกอบด้วยบริเวณห้องที่เกิดการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งกับอากาศเรียกว่าห้องเผาไหม้ (Furnace) เหนือห้องเผาไหม้ขึ้นไปเป็นส่วนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) ความร้อนจากเชื้อเพลิงชีวมวลจะเข้าถ่ายเทสู่สารทำงานของก๊าซเทอร์ไบน์ โดยการแผ่รังสีตรงๆ เป็นทางแรก ทางที่สอง คือก๊าซร้อน (Flue gas) จากการเผาไหม้นั้นจะนำความร้อนและพาความร้อนที่สะสมในตัวเข้าสู่สารทำงาน

โดยปกติประสิทธิภาพทางความร้อน (η_h) ของการเผาไหม้เชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์ไบน์จะเพิ่มตามขนาดเครื่อง หมายความว่า เครื่องยิ่งมีขนาดใหญ่ประสิทธิภาพเชิงความร้อนก็จะสูงตาม เช่น โรงไฟฟ้าขนาด 600 MW ย่อมจะมีประสิทธิภาพมากกว่าโรงไฟฟ้าขนาด 400 MW แต่อย่างไรก็ตามผู้วิจัยเห็นว่า การเดินเครื่อง (Start up) หรือ หยุดเครื่อง (Shut down) เครื่องยนต์ขนาดใหญ่จะต้องใช้เวลาและต้นทุนมาก อย่างเช่น โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนจากพลังงานไอน้ำ

นับตั้งแต่เริ่มเดินเครื่องจนกระทั่งสามารถจ่ายไฟฟ้าได้ต้องใช้ระยะเวลาในการต้มให้น้ำนานหลาย ชั่วโมง การใช้เชื้อเพลิงปริมาณสูงมาก เมื่อรวมทั้งค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องกำเนิดมลพิษทางอากาศ เพื่อมิให้มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมีผลทำให้ค่าใช้จ่ายในการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยสูง [3] ผิดกับเครื่องขนาดเล็กที่ทำได้ง่าย รวดเร็ว ไม่เปลืองต้นทุนดำเนินการ

เครื่องยนต์เทอร์โบไบน์สำหรับผลิตไฟฟ้าขนาดใหญ่ไม่สามารถหยุดเดินเครื่องประจำวันได้ แม้ไม่มีผู้ใช้ไฟฟ้า หรือมีแต่น้อย การเดินเครื่องเพื่อปั่นไฟฟ้าจำเป็นต้องใช้เชื้อเพลิงส่วนหนึ่งเพื่อผลิต ศักย์ไฟฟ้าค้างไว้รอผู้ใช้ เมื่อมีผู้มาใช้ไฟฟ้าก็จะเสียเชื้อเพลิงอีกส่วนหนึ่ง เพื่อการผลิตพาหะ กระแสไฟฟ้าซึ่งก็คือ อิเล็กตรอน ดังนั้นเวลาที่ไม่มีผู้ใช้ไฟฟ้า แต่ก็หยุดเดินเครื่องไม่ได้ ต้นทุนที่เสีย ไปก็จะเป็นข้อเสียของระบบขนาดใหญ่ ในขณะที่เครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าขนาดเล็กตามชุมชน สามารถเดินเครื่องหรือหยุดเครื่องได้อย่างสะดวกรวดเร็ว เมื่อตกลงกันใช้ไฟฟ้าได้ก็เดินเครื่อง ประจำวัน หากไม่มีผู้ใช้เวลาดีก็หยุดเดินเครื่อง ก็จะสามารถประหยัดต้นทุนในการเผาเชื้อเพลิง เพื่อสร้างศักย์ไฟฟ้าให้ค้างไว้ในสายได้

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1. สร้างห้องเผาไหม้ที่สามารถเผาเชื้อเพลิงแข็ง
2. สร้างเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์โบไบน์ในแบบ Axial flow
3. ประกอบและทดสอบ ห้องเผาไหม้ และเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์โบไบน์

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ออกแบบและสร้างต้นแบบก๊าซเทอร์โบไบน์ขนาดเล็ก ที่มีรายละเอียดของส่วนที่เป็นใบพัด และเฟรมของก๊าซเทอร์โบไบน์ และส่วนที่เป็นห้องเผาไหม้ที่มีการถ่ายเทความร้อนแบบ Up fire
2. ทำการสร้างแถวใบพัดและเฟรมของก๊าซเทอร์โบไบน์ ซึ่งก๊าซเทอร์โบไบน์จะเป็นแบบไหลตาม แกน (Axial flow)
3. ทำการประกอบและทดสอบทางอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamic) ของตัวเทอร์โบไบน์ที่ สร้างขึ้นเพื่อหาอัตราการไหล (Mass flow rate) ของอากาศที่เหมาะสมต่อการไหลผ่าน เพื่อนำไปคำนวณหาเครื่องอัดอากาศ (Compressor) ที่มีปริมาณการไหลของลมที่ ต้องการ
4. สร้างห้องเผาไหม้ตามต้นแบบที่สร้างไว้ ซึ่งจะหุ้มด้วยอิฐมวลเบาอบนอก พร้อมทั้ง ออกแบบและสร้างส่วนบดย่อยและป้อนอัดเชื้อเพลิงชีวมวล เข้าสู่ห้องเผาไหม้

5. ทดสอบการเผาไหม้ของห้องเผาไหม้ พร้อมทั้งปรับปรุงแก้ไขให้ดีขึ้นก่อนประกอบเข้าไปกับส่วนอื่นๆ
6. ทำการคำนวณและจัดซื้อเครื่องอัดอากาศ ที่มีปริมาณการไหลของลมที่ต้องการ แล้วจึงประกอบทุกส่วนเข้าด้วยกัน
7. ทำการทดสอบเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์โบน์ ที่สร้างเพื่อหางานที่ได้ (Work output) และประสิทธิภาพที่เป็นจริง

1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้เครื่องยนต์ก๊าซเทอร์โบน์ขนาดเล็กที่มี Output ประมาณ 500 Watt ที่สามารถเดินเครื่องได้ด้วยการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง เช่น เชื้อเพลิงแข็ง
2. มีเชื้อเพลิงแข็งเป็นทางเลือกใหม่ที่ต้นทุนถูกกว่ามาก กล่าวคือ ไม่ใช่พัฒนาเชื้อเพลิงเหลว แอลกอฮอล์จากการกลั่นผลิผลธรรมชาติแต่เพียงอย่างเดียว (ซึ่งต้นทุนสูงมาก)
3. สามารถใช้เครื่องยนต์ก๊าซเทอร์โบน์นี้ขับปั๊ม (Pump) และเครื่องปั่นไฟ (Generator) สำหรับครัวเรือน
4. การออกแบบเครื่องป้อนเชื้อเพลิงและห้องเผาไหม้อย่างดีจะช่วยขจัดมลพิษได้ ทั้งนี้ เชื้อเพลิงชีวมวลไม่มีกำมะถันปนเปื้อน ดังเช่น ก๊าซธรรมชาติ น้ำมันดิบ และถ่านหิน อยู่แล้ว จึงไม่ต้องกังวลเรื่องการปล่อย SO_x

บทที่ 2

ทฤษฎีการออกแบบและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีในการคำนวณการสร้างห้องเผาไหม้ [10]

การคำนวณการถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสี (Radiant-heat-transfer) ได้ถูกนำมาศึกษาและประยุกต์ใช้ในการออกแบบหม้อต้มไอน้ำในการผลิตไฟฟ้า (Steam-generating boiler) และห้องเผาไหม้หกลั่นปิโตรเลียม (Petroleum refinery furnace) เครื่องหนึ่งของทฤษฎีสามารถนำไปใช้งานได้จริง บางครั้งตัวทฤษฎีถูกนำไปปรับปรุงใหม่ เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานในการถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสีแบบอื่นๆ เช่น ในเตาเผาอิฐ, เตาอบ, เตาอบเพื่อบำบัดโลหะด้วยความร้อน (Heat-treating) และเตาเผาเพื่อเกิดปฏิกิริยาเคมี (Chemical furnace) ฯลฯ

จุดประสงค์หลักของงานวิจัยคือ เพื่อที่จะแสดงการคำนวณที่เกี่ยวกับส่วนของเตาที่มีการแผ่รังสีความร้อน (Furnace radiant section) ข้อมูลที่จำเป็นต้องใช้ ตัวอย่างและการประยุกต์ใช้งาน ข้อจำกัด รวมถึง boiler และ oil heaters ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน ความสำคัญของการคำนวณฟลักซ์การแผ่รังสีความร้อน (radiant heat transfer flux) ในการนำไปออกแบบ furnace มีตัวแปรหลายตัวที่มีความเกี่ยวข้อง เช่น flux ที่พอยอมรับได้ เมื่อมีการนำไปใช้งานที่สภาวะที่แตกต่างกัน, ขอบเขต และธรรมชาติของท่อในตัวหม้อต้ม (boiler tube) ที่มีผลต่อประสิทธิภาพที่ได้ รวมไปถึงข้อควรระวังไม่ให้มี coke เกิดขึ้น ในส่วนของเตาต้มน้ำมัน (oil heating furnace) หรือเตาระเหยน้ำมัน (vaporizing furnace) ที่พบว่าหากเกิดขึ้นแล้วจะมีผลโดยตรงต่อการออกแบบเตาเผา น้ำมันสำหรับการกลั่น (refinery furnace) ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพลดลง

แฟกเตอร์ของการถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสี (Radiant-heat-transfer Factors) [10]

สมการทั่วไปสำหรับการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีที่กำลังเกิดในเตาเผาไหม้ (Furnace) สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} Q &= F_A F_\epsilon A \sigma (T_1^4 - T_2^4) \\ &= \mathfrak{A}' \sigma (T_1^4 - T_2^4) \end{aligned} \quad (2.1)$$

เมื่อ Q = การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีต่อ A' , Btu/hr

T_1 = อุณหภูมิแหล่งกำเนิดความร้อน, °R

T_2 = อุณหภูมิแหล่งรับความร้อน, °R

$\mathfrak{S}$ = factor to allow both the geometry of the system and the non-bl
emissivities of the hot and cold bodies, dimensionless

A' = พื้นผิวถ่ายเทของแหล่งรับความร้อน (Sink) หรือวัตถุเย็น (Cold body), ft^2

σ = ค่าคงที่ของ Stefan-Boltzmann, $0.173 \times 10^{-8} \text{ Btu}/(\text{hr})(\text{ft}^2)(^\circ\text{R}^4)$

การประยุกต์ใช้สมการ เช่นสมการที่ (2.1) นั้นก็เพื่อใช้แก้ปัญหาทางด้านวิศวกรรม ในทางปฏิบัติจำเป็นต้องอาศัยสมมติฐานต่างๆ (Assumptions) และอาศัยการทำให้สถานะที่ซับซ้อนต่างๆ นี้ทำได้ง่ายขึ้น (Simplifications)

โดยทั่วไปนั้นเตาเผาไหม้ในที่นี้ (กำลังเน้นไปที่ห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์เทอร์โบ) จะประกอบด้วย 3 ส่วนประกอบหลัก คือ 1.แหล่งปล่อยความร้อน (Heat source) ได้แก่ เปลวเพลิง ก๊าซร้อนที่เกิดจากเชื้อเพลิงกำลังถูกเผาไหม้ 2.แหล่งรับความร้อน (Heat receiver หรือ Sink) ได้แก่ สารรับความร้อนที่ไหลผ่านตัวเตา สารทำงาน (Working medium) ของระบบเทอร์โบ และ 3.ผิวปิดรอบนอกตัวรับความร้อน (Enclosing surfaces) ได้แก่ ผนังอิฐทนไฟที่หุ้มรอบเตาซึ่งเป็นแหล่งรับความร้อนแหล่งหนึ่งด้วยเช่นกัน

แหล่งปล่อยความร้อน (Heat Source) [10]

ในเบื้องต้นความร้อนที่เกิดขึ้นในเตาเผาไหม้ได้มาจากสองทาง ได้แก่ ความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาการเผาไหม้และความร้อนสัมผัส (Sensible heat) ที่พาเข้ามาโดยอากาศเพื่อการเผาไหม้ ถ้าอากาศนั้นได้รับการอุ่นก่อนเข้าสู่เตาเผาไหม้ โดยปกติแล้วการเผาไหม้เชื้อเพลิงก๊าซจะให้เปลวเพลิงที่ไม่สว่าง (Nonluminous flames) แต่การเผาไหม้เชื้อเพลิงน้ำมันจะให้เปลวเพลิงที่มีระดับความสว่าง (Degree of luminosity) หลายระดับขึ้นอยู่กับ การออกแบบหัวพ่นไฟ (Burner) การฉีดละอองน้ำมัน และเปอร์เซ็นต์อากาศเกินพอที่ใช้ ส่วนการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งนั้น หัวพ่นไฟสำหรับผงถ่านหินบดละเอียด (Pulverized coal) จะผลิตเปลวเพลิงที่ประกอบด้วยอนุภาคกำลังลุกแดง (Incandescent solid particles) ซึ่งมีระดับความสว่างเหนือกว่าความสว่างต่ำสุดที่ได้จากการเผาไหม้ของการเผาเชื้อเพลิงน้ำมัน การเผาฟืน (Stoker firing) ในเตาจะให้กองเชื้อเพลิงที่กำลังลุกแดง (Incandescent fuel bed) เช่นกัน

ความแตกต่างของคุณลักษณะ (Characteristics) ของเปลวเพลิง หรือแบบแสดงระดับความร้อน (Heat patterns) ที่เกิดขึ้นในการเผาเชื้อเพลิงทั่วไปนั้น เป็นผลให้เกิดการพัฒนาวิธีการคำนวณการส่งผ่านความร้อนด้วยการแผ่รังสี ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้ในทางหนึ่งกับเตาเผาให้ความร้อนของโรงกลั่น (Refinery furnaces) ทั้งที่ใช้ก๊าซและน้ำมันเป็นเชื้อเพลิง และในอีกทางหนึ่งกับเตาเผาที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง (เป็นฟืนหรือผงบดละเอียด) ยังไม่มีวิธีการคำนวณการดูดความ

ร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ที่สามารถประยุกต์ใช้ได้อย่างทั่วไประดับกับเตาทุกประเภท ดังนั้นในเบื้องต้นนี้ การคำนวณต้องทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างเตาเผาไหม้ที่เผาด้วยเชื้อเพลิงก๊าซและน้ำมันกับที่เผาด้วยเชื้อเพลิงแข็ง ซึ่งถ้ากล่าวถึง วิธีคำนวณการดูความร้อนในการออกแบบเตาเผาไหม้ของโรงกลั่น (Refinery furnace) มีความก้าวหน้ากว่า ของงานหม้อต้มไอน้ำ (Boiler) ด้านหนึ่งนั้น อันเนื่องมาจากความซับซ้อนที่มากกว่าของแหล่งปล่อยและแหล่งรับความร้อน (Heat sources and Sinks) วิธีคำนวณการส่งผ่านความร้อนโดยการแผ่รังสีในเตาเผาไหม้ที่กำลังเผาเชื้อเพลิงแข็งอย่างเช่นถ่านหิน ต้องอาศัยข้อมูลที่ได้จากการทดลอง หรือจากประสบการณ์จริง

เปลวเพลิงที่ไม่สว่าง (Nonluminous Flame) [10]

ถ้าพิจารณาให้ดีจะพบว่า การเผาเชื้อเพลิงก๊าซภายในเตาเผาไหม้เตาหนึ่งจะผลิตเปลวเพลิงที่ไม่สว่าง (Nonluminous flames) และเมื่อพิจารณามากกว่านั้นจะพบว่าเส้นทางการเดินของผลผลิตจากการเผาไหม้ (Combustion products) ผ่านทะลุเตาเผาไหม้หนึ่งๆ นั้นสั้นมาก เมื่อเทียบกับขนาดของระนาบที่ตั้งฉากกับเส้นทางการเดินของก๊าซในเตาเผา เช่นนั้น (หมายถึงมีการติดตั้งหัวพ่นไฟขนาดเล็กหลายๆ อันเข้ากับตัวเตา) อาจพิจารณาได้ว่าจะเกิดความผันแปรของอุณหภูมิก๊าซแบบจุดต่อจุดขึ้นเล็กน้อยภายในเตาเผาหรือไม่เกิดเลย ไม่มีเปลวเพลิงที่มีความสว่างที่จะแผ่รังสีไปยังท่อต่างๆ หรือวัสดุทนไฟ แหล่งปฐมภูมิของการแผ่รังสีมีเพียงแหล่งเดียวเท่านั้นคือตัวของผลผลิตจากการเผาไหม้ (Combustion products) เอง และแหล่งนี้ถูกสมมติว่ามีอุณหภูมิสม่ำเสมอ มีความแตกต่างอย่างมากของค่าการปล่อยรังสี (Emissivity) ของก๊าซต่างๆ ที่มีอุณหภูมิเท่ากัน ก๊าซโมเลกุลอะตอมคู่ อย่างเช่น O_2 , N_2 และ H_2 จะมีค่าความสามารถในการปล่อยรังสีที่ต่ำมาก จนกระทั่งถูกพิจารณาว่าเท่ากับศูนย์ในงานออกแบบเตาเผา หรือกล่าวอีกอย่างหนึ่งก๊าซ H_2O , CO_2 และ SO_2 จะให้ค่าความสามารถในการปล่อยรังสีที่ดี (แม้ว่าจะแยกส่วนของแข็งเกือบทุกชนิดมากก็ตาม) และ CO มีค่าความสามารถในการปล่อยรังสีที่ดีพอใช้ แหล่ง (Sources) ของการแผ่รังสีอาจจะถูกอ้างถึงเป็นการเฉพาะไปที่องค์ประกอบตัวต่างๆ ที่กำลังแผ่รังสี ในก๊าซผลผลิตที่เกิดจากปฏิกิริยาการเผาไหม้อย่างธรรมดาๆ ก็มี H_2O และ CO_2 เท่านั้นที่ถูกพิจารณาว่าเป็นตัวแผ่รังสี เนื่องจากมีซัลเฟอร์ (Sulfur) อยู่ในปริมาณที่น้อยมากในเชื้อเพลิงเกือบทุกชนิดจึงตัดทิ้ง และโดยปกติแล้วการเผาไหม้ในเตาเผาจะใช้ปริมาณอากาศเกินพอเพื่อกำจัด CO

การแผ่รังสีรวม (Total radiation) ของโมเลกุลของมวลก๊าซที่บรรจุ H_2O และ CO_2 อยู่จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและจำนวนของโมเลกุลที่กำลังแผ่รังสีที่มีอยู่ ดังนั้นปริมาตรก๊าซและความเข้มข้นของโมเลกุลที่กำลังแผ่รังสีต่อหน่วยปริมาตรจะเป็นตัววัดการแผ่รังสี ณ อุณหภูมิที่ให้ ใน

ความเป็นจริงรูปร่างทางเรขาคณิตของมวลก๊าซต้องถูกพิจารณาด้วย เนื่องจากแฟกเตอร์มุมแผ่รังสี (Angle factor) ในโมเลกุลมีความเกี่ยวข้องในการแผ่รังสี

ความยาวลำแสงเฉลี่ย (Mean beam length) L (ft) คือ ค่าความลึกเฉลี่ยของช่องว่างในเตาเผาไหม้ ที่ปกคลุมด้วยก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้ (Flue gas) ซึ่งเฉลี่ยจากแต่ละจุดบนผิวล้อมรอบเตาเผาไหม้ในทุกๆ ทิศทางและค่านี้จะใช้บอกปริมาณเป็นเชิงลูกบาศก์แทนปริมาตรของรูปร่างจริง ความเข้มข้นของโมเลกุลต่างๆ ที่กำลังแผ่รังสีถูกวัดค่าโดย Partial pressure ของก๊าซทั้งหลายในเตาเผาไหม้ ค่าความสามารถปล่อยรังสี (Emissivity) ของมวลก๊าซ (Gas mass) ในห้องเผาไหม้เป็นฟังก์ชันของค่าผลคูณ pL (atm.ft) เมื่อ p เป็นค่า Partial pressure ของก๊าซตัวที่กำลังปล่อยรังสี (ซึ่งได้แก่โมเลกุล H_2O และ CO_2) การมีองค์ประกอบก๊าซที่สามารถปล่อยรังสีมากกว่าหนึ่งตัวเช่นนี้ ค่าการปล่อยรังสีต้องเป็นเชิงผลบวกและต้องมีการแก้ค่าเล็กน้อยสำหรับการรบกวนระหว่างกันของโมเลกุลตัวหนึ่งจากโมเลกุลตัวอื่นๆ ในการคำนวณค่าการปล่อยรังสีของมวลก๊าซ ต้องทำการเพื่ออุณหภูมิทั้งของแหล่งความร้อน (Source) และแหล่งรับความร้อน (Sink) สำหรับการถ่ายเทความร้อนไปยังวัตถุดำ (Black body) เราอาจจะใช้สมการ

$$Q_b = 0.173 F_{bA} \left[\epsilon_G \left(\frac{T_G}{100} \right)^4 - a_G \left(\frac{T_b}{100} \right)^4 \right] A'_b \quad (2.2)$$

เมื่อ Q_b = อัตราการส่งผ่านความร้อนไปยังวัตถุดำ โดยการแผ่รังสีจากก๊าซ (Btu/hr)

A'_b = ผิวที่รับการส่งผ่านความร้อนอย่างมีประสิทธิภาพของวัตถุดำ (ft^2)

a_G = ความสามารถในการดูดกลืนรังสี (Absorptivity) ของก๊าซที่อุณหภูมิ T_b (ไม่มีหน่วย)

F_{bA} = แฟกเตอร์อันเนื่องมาจากรูปร่างของแหล่งปล่อยและแหล่งรับการแผ่รังสีที่รับการแผ่รังสีซึ่งกันและกันโดยไม่บัง (ไม่มีหน่วย)

T_G = อุณหภูมิของก๊าซ (แหล่งแผ่รังสี) ($^{\circ}R$)

T_b = อุณหภูมิของวัตถุดำซึ่งเป็น (แหล่งรับรังสี) ($^{\circ}R$)

ϵ_G = ค่าการปล่อยรังสีของก๊าซที่อุณหภูมิ T_G (ไม่มีหน่วย)

ในทางปฏิบัติเราสามารถแทนค่า a_G ด้วยค่า ϵ_G ที่ถูกประเมินค่าที่อุณหภูมิ T_b ได้ เมื่อองค์ประกอบก๊าซที่กำลังแผ่รังสีมีอยู่ 2 ตัว ได้แก่ H_2O กับ CO_2 เราสามารถเขียนสมการ พลั๊กซ์การส่งผ่านความร้อน (2.2) ใหม่ (ตัดแฟกเตอร์สำหรับแก้ค่า (Correction factor) การรบกวนระหว่างกันของโมเลกุลที่ไม่เหมือนกันซึ่งไม่ต้องนำมาคิด) คือ

$$Q_b = 0.173 \mathfrak{F}_b \left[(\epsilon_C + \epsilon_W)_{T_G} \left(\frac{T_G}{100} \right)^4 - (\epsilon_C + \epsilon_W)_{T_b} \left(\frac{T_b}{100} \right)^4 \right] A'_b \quad (2.3)$$

โดยที่ $(\varepsilon_C + \varepsilon_W)_{T_G}$ = ค่าการปล่อยรังสีของก๊าซที่อุณหภูมิ T_G
 ε_C = ค่าการปล่อยรังสีของ CO_2 ที่ $p_{\text{CO}_2} \cdot L$ และ T_G
 ε_W = ค่าการปล่อยรังสีของ H_2O ที่ $p_{\text{H}_2\text{O}} \cdot L$ และ T_G
 $(\varepsilon_C + \varepsilon_W)_{T_b}$ = ค่าการปล่อยรังสีที่อุณหภูมิ T_b (ใช้แทนที่ค่า Absorptivity)
 ε_C = ค่าการปล่อยรังสีของ CO_2 ที่ $p_{\text{CO}_2} \cdot L$ และ T_b
 ε_W = ค่าการปล่อยรังสีของ H_2O ที่ $p_{\text{H}_2\text{O}} \cdot L$ และ T_b

นอกเหนือจากการที่ใส่แฟกเตอร์แก้ค่าเพื่อปรับแก้การรบกวนระหว่างกันของโมเลกุลแล้ว Egbert ยังพบว่าค่าปลดปล่อยรังสีของไอน้ำเป็นฟังก์ชันของค่า partial pressure ของก๊าซ Hottel [11] ได้หาค่า L สำหรับเตาเผาที่มีรูปทรงเรขาคณิตต่างๆ และแสดงบางส่วนของค่าเหล่านั้นสำหรับงานเตาเผาไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ความยาวลำแสงเฉลี่ย (Mean Length) ของลำแสง (Radiant Beams) ในปริมาตรก๊าซที่มีรูปร่างต่างๆ ตามเตา [10]

Dimensional Ratio (ยาวxกว้างxสูง)	Mean length L (ft)
Rectangular Furnaces :	
1. 1-1-1 to 1-1-3	$(2/3)\sqrt[3]{\text{Furnace Volume, ft}^3}$
1-2-1 to 1-2-4	
2. 1-1-4 to 1-1- ∞	1.0 x smallest dimension
3. 1-2-5 to 1-2-8	1.3 x smallest dimension
4. 1-3-3 to 1- ∞ - ∞	1.8 x smallest dimension
Cylindrical Furnaces :	
5. $d \times d$	$(2/3) \times \text{diameter}$
6. $d \times 2d$ to $d \times \infty d$	1 x diameter
Tube Banks :	
7. เหมือนใน convection sections	$L \text{ (ft)} = 0.4P_T - 0.567\text{OD, in.}$

ในงานออกแบบเตาเผาใหม่ทางอุตสาหกรรม เทอมอัตรา (Rate) ถูกใช้อย่างพ้องกับ เทอมฟลักซ์ (Flux) และไม่มีพิจารณาสัมประสิทธิ์ฟิล์ม (Film coefficients) เป็นแต่ละราย คง

สะดวกถ้าจะมีชาร์ต (Charts) ซึ่งให้ค่าฟลักซ์การแผ่รังสีความร้อน q_c และ q_w ที่เป็นฟังก์ชันของ pL และ T ซึ่งได้แก่

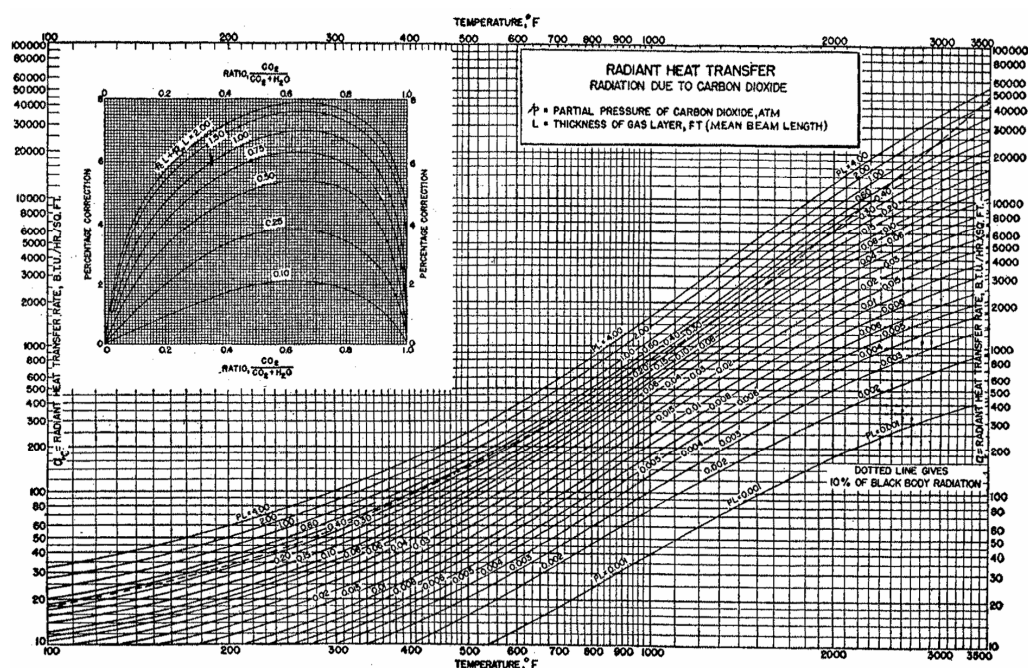
$$q_c = 0.173 \varepsilon_c \left(\frac{T}{100} \right)^4 \text{ ที่ } p_{CO_2} \cdot L \text{ และ } T$$

$$q_w = 0.173 \varepsilon_w \left(\frac{T}{100} \right)^4 \text{ ที่ } p_{H_2O} \cdot L \text{ และ } T$$

$$q_b = 0.173 \varepsilon_b \left(\frac{T}{100} \right)^4 \text{ และ } \varepsilon_b = 0$$

ชาร์ตเหล่านี้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 2.1 และ 2.2 โดยใช้ข้อมูลของ Hottel และ Egbert [10] การแก้ค่าการบรรจบกันระหว่างกันของโมเลกุลถูกกำหนดไว้ในชาร์ตในรูปเปอร์เซ็นต์ และค่าการปล่อยรังสีที่ถูกแก้แล้ว มีค่าเท่ากับ

$$\varepsilon_G = \left[\frac{(q_c + q_w)_{T_G} - (q_c + q_w)_{T_S}}{(q_b)_{T_G} - (q_b)_{T_S}} \right] \frac{100 - \%}{100} \quad (2.4)$$

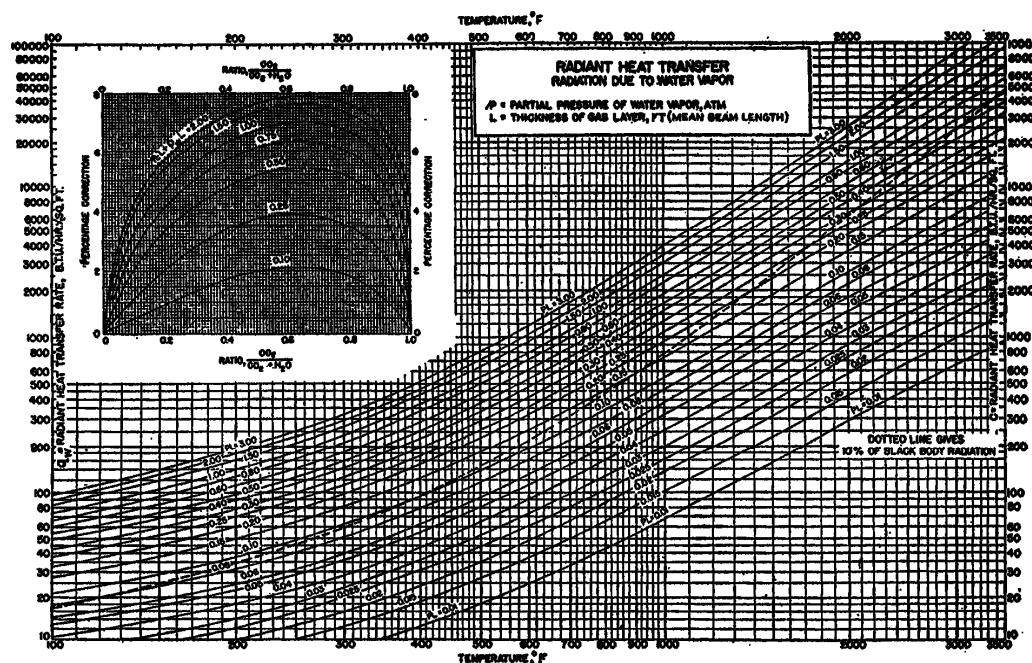


รูปที่ 2.1 การแผ่รังสีเนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์ [10]

ในกรณีของการถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสีจากก๊าซสู่วัตถุหลายกรณี ไม่มีความซับซ้อนที่เกิดจากการใส่แฟกเตอร์มุมแผ่รังสีเข้ามา ดังนั้นสามารถคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ออกจากแหล่งปล่อยโดยรวมๆ ได้ง่ายๆ จาก

$$q = \frac{Q}{A} = \varepsilon_s \left[(q_c + q_w)_{T_G} - (q_c + q_w)_{T_s} \right] \frac{100 - \%}{100} \quad (2.5)$$

โดยที่ตัวห้อย S หมายถึง ผิวเย็นที่เป็นตัวดูดความร้อน และ ε_s เป็นการปล่อยรังสีของผิวเย็นตัวนี้ การปล่อยความร้อนจากแหล่งปล่อยเช่นนี้จะเหมาะสมมากกับกรณีการปล่อยความร้อนสู่กลุ่มท่อ (Tube bundles ซึ่งหมายถึงท่ออยู่ใกล้ๆ กันเป็นกลุ่ม) ในส่วนการพาความร้อน (Convection sections) ของเตาเผาไหม้ที่การแผ่รังสีความร้อนมีความสำคัญอย่างมากในบริเวณนี้ ในกรณีพิเศษเช่นนี้ท่อต่างๆ ในกลุ่มจะถูกห่อหุ้มด้วยก๊าซร้อน จึงไม่มีความจำเป็นต้องใช้แฟกเตอร์มุมมองแผ่รังสี ผิวที่ถูกใช้จะเป็นพื้นที่ผิวรอบท่อ สำหรับกรณีของท่ออยู่กันเป็นแถวหลายๆ แถว (Tube banks) จะมีการแผ่รังสีความร้อนเพิ่มเติมจากผนังอิฐทนไฟด้านข้างด้วย ซึ่งจะต้องรวมเข้าไปกับค่าอัตราการถ่ายเทความร้อน (Heat rate) หรือ ฟลักซ์ (Flux) เฉลี่ย



รูปที่ 2.2 การแผ่รังสีเนื่องจากไอน้ำ [10]

ข้อสรุปบางประการน่าจะถูกดึงจากการขึ้นกับ pL ของการปล่อยรังสีของก๊าซ (Gas emissivity) สำหรับเตาเผาไหม้แบบต่างๆ ที่มีสัดส่วนทางกายภาพเหมือนกันแต่มีขนาดที่ต่างกัน เราอาจคาดได้ว่าเตาเผาไหม้ที่มีขนาดใหญ่กว่าจะให้อัตราการถ่ายเทความร้อน ณ อุณหภูมิก๊าซหนึ่งๆ มากกว่า เนื่องจากมีค่า L ที่มากกว่า ผลกระทบของการเพิ่มอากาศเกินพอในการเผาไหม้ คือจะไปลดค่า Partial pressure ของก๊าซตัวที่ปล่อยรังสี คือลดค่า p ทำให้ค่าการปล่อยรังสีลดลง และดังนั้นจะไปลดอัตราการแผ่รังสีที่อุณหภูมิก๊าซที่ให้งด้วย ผลกระทบของอากาศส่วนเกิน (Excess air) มีไม่มากนัก และประสบการณ์ในเตาเผาต่างๆ ของโรงกลั่นน้ำมัน จึงบอก

ให้ทราบว่าไม่ควรจะปฏิบัติการภายใต้สภาวะ optimum เพราะจะต้องใช้ปริมาณอากาศเกินพออย่างไม่มีกำหนด ตามปกติแล้วสภาวะการเผาไหม้ในเตาเผาไหม้ของหม้อต้มไอน้ำจะถูกควบคุมได้อย่างรวดเร็วกว่าในเตาเผาไหม้ของโรงกลั่นน้ำมัน ทั้งนี้เพราะในโรงงานที่มีหม้อต้มไอน้ำค่าที่ใช้เชื้อเพลิงมากกว่าในโรงงานต้มน้ำมันของโรงกลั่น จึงควบคุมการถ่ายเทความร้อนโดยควบคุมการลดการจ่ายเชื้อเพลิงแทนการเติมอากาศเกินพอ

การแผ่รังสีจากเปลวเพลิงเผาไหม้ของผงถ่านหิน (Radiation from Clouds of Particles) [11]

การปฏิบัติต่อการแผ่รังสีจากเปลวเพลิงเผาไหม้ผงถ่านหิน จากอนุภาคผงภายใต้เปลวเพลิง และจากเปลวเพลิงที่ถูกทำให้สว่างโดยการสลายตัวทางความร้อนของสารไฮโดรคาร์บอนต่างๆ ไปเป็นเขม่า เกี่ยวข้องกับการแผ่รังสีจากกลุ่มของอนุภาค เปลวเพลิงจากการเผาไหม้ผงถ่านหินบรรจุไปด้วยอนุภาคต่างๆ ที่กำลังมีขนาดผันแปรจาก 0.01 ถึง 0.1 นิ้ว ซึ่งมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 0.001 นิ้ว และองค์ประกอบที่กำลังผันแปรจากเปอร์เซ็นต์คาร์บอนสูงไปจนน้อยที่สุดคือเกือบเป็นเถ้า (Ash) บริสุทธิ์ อนุภาคที่แขวนลอยในเปลวเพลิงก๊าซที่มีความสว่างมีจุดกำเนิดของการสลายตัวทางความร้อนของสารไฮโดรคาร์บอนในเปลวเพลิงที่เนื่องจากการผสมที่ไม่สมบูรณ์กับอากาศก่อนถูกทำให้ร้อน ซึ่งอนุภาคแขวนลอยนี้ประกอบด้วยคาร์บอนและไฮโดรคาร์บอนหนักมาก โดยมักมีขนาดอนุภาคตั้งต้นประมาณ 0.000012 นิ้ว อนุภาคผงถ่านหินขนาดเล็กนี้ใหญ่อย่างเพียงพอที่จะทึบแสงต่อการแผ่รังสีที่ตกกระทบ ในขณะที่อนุภาคต่างๆ ในเปลวเพลิงที่มีความสว่าง (Luminous flame ที่กำลังกล่าวถึงในหัวข้อต่อไปหมายถึงเปลวไฟ (Flame) ที่มีเขม่า (Soot) ทำให้สว่าง มิใช่เปลวเพลิงที่ไม่มีอนุภาคใดเลย) มีขนาดเล็กเพื่อกระทำตัวเหมือนเป็นวัตถุทึบโปร่งใส (Semitransparent bodies) เมื่อเกี่ยวข้องกับการแผ่รังสีของคลื่นที่มีความยาวคลื่นยาวหรือของความร้อน ความแตกต่างเรื่องความโปร่งใสของอนุภาคแต่ละรายนี้จะช่วยเป็นเหตุผลให้กับการปฏิบัติแบบแยกต่อชนิดเปลวเพลิง 2 ชนิดนี้

เปลวเพลิงที่มีความสว่าง (Luminous Flame) [11]

การคำนวณเกี่ยวกับการแผ่รังสีจากเปลวเพลิงที่มีความสว่าง (Luminous flame) ต้องการข้อมูลที่ได้จากการทดลองจริงหรือจากประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญ มีวิธีการแก้ปัญหาของการพัฒนาวิธีที่เหมาะสมอันหนึ่งสำหรับทำนายค่าการแผ่รังสีที่ถูกคาดการณ์จากเปลวเพลิงที่มีความสว่างอยู่ 2 วิธี คือ วิธีแรกเป็นการรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับเปลวเพลิงจริง (Actual flames) ภายใต้สภาวะต่างๆ ที่กำลังผันแปร ได้แก่ การให้อากาศ (Aeration) องค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิง (Fuel-gas composition) ปริมาตรเปลวเพลิง (Flame volume) และอื่นๆ และต้องใช้ข้อมูลเหล่านี้เป็นฐานสำหรับการคำนวณต่างๆ แต่ข้อมูลตีพิมพ์ของเรื่องประเภทนี้ (ซึ่งตามปกติประกอบไปด้วย

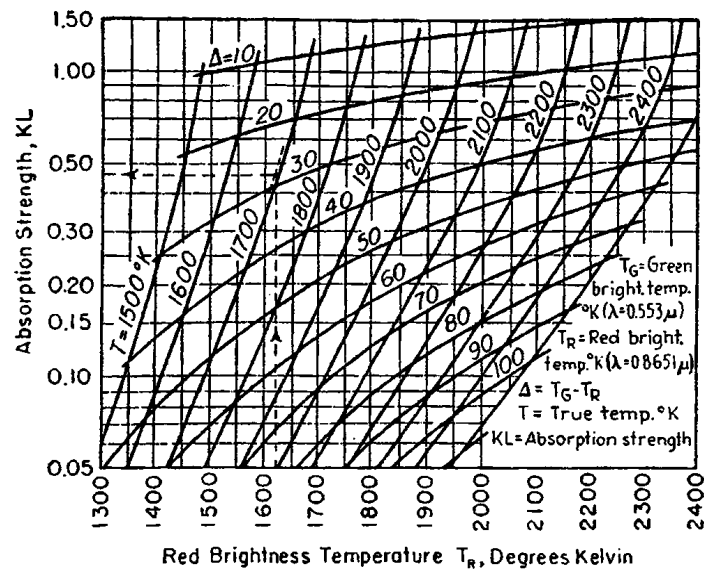
การวัดการแผ่รังสีทั้งหมดจากเปลวเพลิงขนาดเล็กในห้องทดลอง และซึ่งไม่มีฐานอ้างอิงสำหรับการหาความทึบแสง (Opacity) ของเปลวเพลิง หรือที่ตามมาคือไม่มีการแผ่รังสีของเปลวเพลิงชนิดที่คล้ายกันที่ใหญ่กว่า) มีไม่เพียงพอ การเปลี่ยนของความเข้มข้นเข้ามาที่ต้องตามด้วยการเปลี่ยนการออกแบบหัวฟืนไฟ (Burner) ใหม่ รูปร่างของห้องเผาไหม้ ระดับของการปนอากาศชั้นปฐมภูมิ และทุติยภูมิ องค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิง และการวางทิศทางลม (Draft regulation) ทั้งหมดล้วนแล้วแต่ทำให้การประมาณการแผ่รังสีจากเปลวเพลิงที่มีความสว่างนั้น

อย่างไรก็ตามเป็นไปได้ที่จะแสดงให้เห็นถึงวิธีการได้ข้อมูลจากเตาเผาไหม้ที่ทราบสถานะต่างๆ ของการเผาไหม้ และวิธีการประยุกต์ใช้ข้อมูลเหล่านี้กับเตาเผาที่มีขนาดหรือรูปร่างต่างออกไปแต่ยังมีสถานะคงเดิม จากการสืบค้นเชิงปริมาณเพื่อหาความผันแปรของการดูดกลืนคลื่นแสงความยาวคลื่นเดี่ยว (Monochromatic absorption) จากเปลวเพลิงที่มีความสว่างนั้น Hottel และ Broughton ได้แสดง [ในบทความของเขาชื่อ The Determination of True Temperature and Total Radiation from Luminous Flames] ให้เห็นว่าค่าความสามารถในการดูดกลืนและค่าความสามารถในการปล่อยรังสีจะลดลงตามการเพิ่มขึ้นของความยาวคลื่น (คือ ลดลงตามการลดลงของความถี่คลื่น) และแสดงให้เห็นด้วยว่าค่าการปล่อยรังสีรวม (Total emissivity) จะมีค่าน้อยกว่าค่าปล่อยรังสีในช่วงคลื่นที่มองเห็นด้วยตามเปล่า (Visible spectrum) สิ่งนี้เองทำให้การประมาณด้วยตา (Visual estimation) ของค่าปล่อยรังสีของเปลวเพลิงที่มีความสว่างมีค่าผิดไปมาก อย่างไรก็ตามการใช้อุปกรณ์วัดความร้อนแบบมองผ่าน (Optical pyrometer) ที่ประกอบขึ้นด้วยตัวกรองสี (Color screen) ของความยาวคลื่นต่างๆ (สีแดงและสีเขียว) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงอุณหภูมิปรากฏ (Apparent temperatures) 2 ตัว ได้แก่ อุณหภูมิความสว่างสีแดง (Red-brightness temperature, T_r) กับอุณหภูมิความสว่างสีเขียว (Green-brightness temperature, T_g) ซึ่งจะปล่อยให้เราคำนวณอุณหภูมิเปลวเพลิงและค่าการปล่อยรังสีรวม (Total emissivity) ได้ รูปที่ 2.3 เป็นการพล็อตกราฟ (ในรูป $^{\circ}K$) เพื่อเอาไว้ใช้หาค่าอุณหภูมิถูกต้องของเปลวเพลิง (True temperature) เมื่อให้ค่า T_r และค่า Δ ซึ่งเท่ากับ $T_g - T_r$ บนการพล็อตแบบเดียวกันเราจะได้ ค่าความแข็งแกร่งในการดูดกลืน (Absorption strength) เป็น KL โดยที่ K เป็นเทอมที่แสดงถึงความเข้มข้นของเขม่าของเปลวเพลิง และ L คือ ค่าความหนาของเปลวเพลิงซึ่งถูกมองทะลุด้วย Pyrometer ด้วยค่า Absorption strength ที่ทราบค่าแล้ว เราสามารถใช้รูปที่ 2.4 ในการหาค่าการปล่อยเชิงประสิทธิผล (Effective emissivity) ของเปลวเพลิงได้ การถ่ายเทความร้อนจากเปลวเพลิง (Flame envelope) ที่มีพื้นที่ A และอุณหภูมิเปลวเพลิงถูกต้อง T_F ไปบนผนังรับคลื่นที่มีเขตจำกัด (Confining walls) ที่มีอุณหภูมิ T_s สามารถหาได้จาก

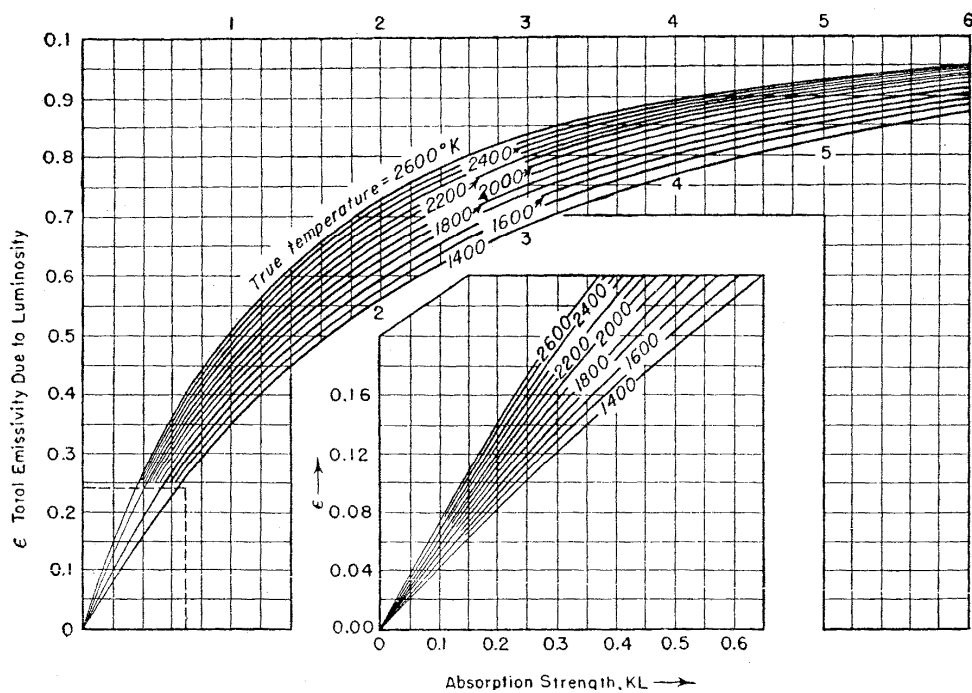
$$q = 0.172A \left[\left(\frac{T_F}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_S}{100} \right)^4 \right] \cdot \epsilon_F \cdot \epsilon'_S \quad (2.6)$$

โดยที่ ϵ_F = ค่าปล่อยรังสีของเปลวเพลิงที่หาจากรูปที่ 2.4 และ

ϵ'_S = ค่าปล่อยเชิงประสิทธิผลของสภาพแวดล้อมรอบเปลวเพลิง



รูปที่ 2.3 แสดง Absorption strength ของเปลวเพลิงสว่าง [11]



รูปที่ 2.4 แสดงความสามารถแผ่รังสีของเปลวเพลิงสว่าง [11]

ถ้าหาไพโรมิเตอร์แบบมองผ่านที่มีตัวกรองทั้งสีแดงและสีเขียวไม่ได้ จะยังคงใช้รูปที่ 2.3 ในการหาค่า Absorption strength ได้ใน 2 กรณี ได้แก่ ก) ถ้าสามารถหาค่าอุณหภูมิความสว่างสีแดง (Red brightness temperature, T_r) ด้วยไพโรมิเตอร์แบบมองผ่านชนิดธรรมดา และหาค่าอุณหภูมิถูกต้อง T_F ด้วยเครื่องเทอร์โมคัปเปิ้ลความเร็วสูง (High – velocity thermocouple) หรือ ข) ถ้าวางกระจกเงาอันหนึ่งหลังเปลวเพลิงในแนวเส้นสายตาของเครื่องไพโรมิเตอร์แบบมองผ่านที่ใช้วิธีแรกอาจทำให้ได้ค่า Absorption strength คือค่า KL นั้น เปลี่ยนอย่างรวดเร็วตามการเปลี่ยนแปลงปกติของค่าปริมาณเล็กน้อย ($T_F - T_r$) ซึ่งกำลังแทนผลต่างระหว่างค่าอุณหภูมิที่อ่านได้ (Temperature readings) จากเครื่องมือวัด 2 ชนิดที่ต่างกันอย่างสมบูรณ์

ในการใช้หลักคลื่นสองสี (Two-color principle) สำหรับหาค่าอุณหภูมิถูกต้อง (True temperature) และค่าปล่อยรังสีรวม (Total emissivity) ของเปลวเพลิงหนึ่ง แนวการมองเห็นผ่านเครื่องไพโรมิเตอร์จะต้องไม่บังจากสิ่งอื่น นอกจากตัวของเปลวเพลิงเองเท่านั้น ตัวอย่างเช่น พื้นหลัง (Background) ของเปลวเพลิง ควรจะเป็นรูเปิด (Open peephole) ที่ผนังด้านหลังของเตาเผาหรือผิวเย็นที่ไม่มีการสะท้อนคลื่น (Cold non-reflecting surface) ที่สำคัญคือต้องไม่ใช่ผิววัสดุทึบไฟ เมื่อทำการวัดอุณหภูมิของเปลวเพลิงอุตสาหกรรมของหนึ่งขนาด (one size) เพื่อหาค่า Absorption strength KL (เพื่อมุ่งหมายที่จะใช้ประมาณค่าการปล่อยรังสีของเปลวเพลิงที่คล้ายคลึงกันแต่ใหญ่กว่า) ค่า Absorption strength KL ที่หาได้จากรูปที่ 2.3 ควรจะถูกคูณด้วยค่าอัตราส่วนความหนาเปลวเพลิง (Dimension ratio) คือค่า L_2/L_1 ก่อนที่จะใช้รูปที่ 2.4 นอกจากนั้นค่า KL ควรจะสอดคล้องกับรูปร่างเฉพาะของเปลวเพลิงภายใต้การพิจารณา กล่าวคือ ควรสอดคล้องกับหลักการต่างๆ ที่เชื่อมโยงกับการใช้ตารางที่ 2.2 (ตารางแสดงความยาวลำแสงสำหรับการแผ่รังสีของก๊าซ (Beam Lengths for Gas Radiation))

ข้อมูลของเปลวเพลิงที่มีความสว่าง ที่หาได้จากในเตาเผาทางอุตสาหกรรม แสดงให้เห็นว่า การแผ่รังสีจากเขม่ามีระดับขนาดที่ใหญ่กว่าการแผ่รังสีจากโมเลกุลก๊าซที่ไม่สว่าง (Non-luminous gas radiation) Lent (1926) ได้ทำการสร้างเปลวเพลิงก๊าซในเตาเผาแบบเป่าลม (Blast-furnace gas flame) ให้เป็นสีดำโดยการเติมเบนซีน (Benzene) เข้าไปเพื่อก่อให้เกิดเขม่าในเปลวเพลิง Haslam และ Boyer (1927) พบว่าเปลวเพลิงที่มีความสว่างของก๊าซอะเซทิลีนนั้นจะสามารถแผ่รังสีได้มากกว่าความร้อนที่แผ่จากเปลวเพลิงแบบเปลวเพลิงที่ไม่สว่างถึง 4 เท่า และขนาดของเปลวเพลิงที่ได้จากการทดลองเผาอะเซทิลีนแสดงให้เห็นว่า ความดำ (Blackness) สูงสุดยังไม่เกิดขึ้นมา Sherman (1934) ได้วัดค่าการปล่อยรังสีของเปลวเพลิงก๊าซที่มีความสว่างในเตาเผาทดลอง

ตารางที่ 2.2 แสดงความยาวลำแสงสำหรับการแผ่รังสีของก๊าซ (Beam Lengths for Gas Radiation) [11]

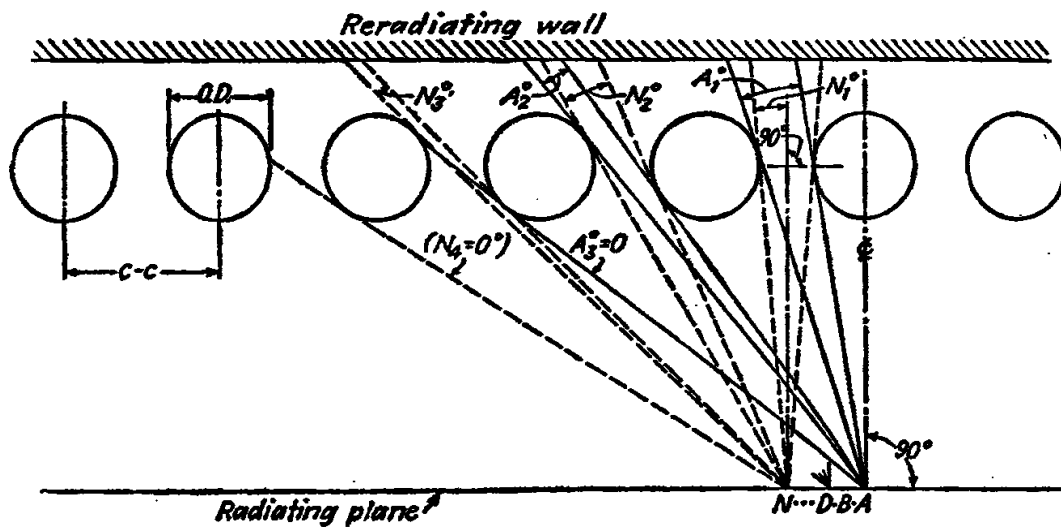
Shape	Characterizing Dimension, D	Factor by which D is multiplied to obtain mean beam length, L	
		When $PL = 0$	For average values of PL
Sphere.....	Diameter	2/3	0.60
Infinite cylinder.....	Diameter	1	0.90
Same, radiating to center of base.....	Diameter		0.90
Right circular cylinder, height = diameter, radiating to center of base..	Diameter		0.77
Same, radiating to whole surface.....	Diameter	2/3	0.60
Infinite cylinder of half-circular cross Section. Radiating to spot on middle of flat side.....	Radius		1.26
Space between infinite parallel planes.	Distance between planes	2	1.8
Cube.....	Edge	2/3	0.60
1 x 2 x 6 rectangular parallelepiped, radiating to.....	Shortest edge		
2 x 6 face.....		1.18	} 1.06
1 x 6 face.....		1.24	
1 x 2 face.....		1.18	
All faces.....		1.20	
Space outside infinite bank of tubes With centers if equilateral tri- Angles; tube diameter = clearance.	Clearance	3.4	2.8
Same as preceding, except tube diameter = one-half clearance.....	Clearance	4.45	3.8
Same, except tube centers on squares; diameter = clearance.....	Clearance	4.1	3.5

เปลวเพลิงเผาไหม้ผงถ่านหิน (Powdered-coal Flames) [11]

การแผ่รังสีจากเปลวเพลิงเผาไหม้ผงถ่านหินถูกกระทำการเชิงวิเคราะห์โดย Wohlenberg และผู้ร่วมงาน ส่วนการศึกษาด้วยการทำการทดลองได้ถูกดำเนินการโดย Lindmark และ Sherman แสดงให้เห็นว่า ค่าการปล่อยรังสีของกลุ่มอนุภาคที่บดแสงกลุ่มหนึ่ง (ถูกอ้างอิงกับพื้นที่ของการห่อหุ้มอนุภาคโดยรวมกลุ่มนั้น) จะอยู่ในรูปของ $(1 - e^{-x})$ เมื่อ x เป็นเทอมผลคูณของ (ความเข้มข้นของอนุภาคต่างๆ) (ภาคตัดขวางเฉลี่ยตามเวลาของหนึ่งอนุภาค) (ความยาวของลำการแผ่รังสีทะลุกลุ่มอนุภาค) ซึ่งเทอมสุดท้ายนี้กำลังถูกให้นิยามเหมือนในตารางที่ 2.2 ภายใต้เรื่องการแผ่รังสีของก๊าซ (Gas Radiation) โดยการสร้างสมมุติฐานที่เหมาะสมต่างๆ ตามกฎของการกระจายขนาดอนุภาค (Laws of particle-size distribution) ในถ่านหินที่บดเป็นผง และอัตราการเผาไหม้อนุภาคแต่ละอนุภาค (Individual particles) แล้ว อาจใช้ความสัมพันธ์เชิงเอ็กโพเนนเชียลเพื่อคำนวณค่าการปล่อยรังสีของเปลวเพลิงของการเผาไหม้ผงถ่านหินได้ อย่างไรก็ตามค่าที่ถูกได้มาแบบนั้นเกือบจะต่ำกว่าค่าการปล่อยรังสีได้จากการวัดอย่างมากและความแตกต่างนี้ (Discrepancy) อาจจะเนื่องมาจากความมีส่วนช่วยของไฮโดรคาร์บอนที่แตกออก (Cracked hydrocarbon) ที่กำลังผลิตความสว่าง เช่นเดียวกันกับอนุภาคขี้เถ้า (Ash) ที่มีอยู่จริงแต่ไม่ใส่เข้าไปให้มีผลตอนคำนวณทางทฤษฎี แต่การติดตั้งเตาเผาผงถ่านหินสมัยใหม่ (Modern pulverized-coal installation) เกี่ยวข้องกับเปลวเพลิงขนาดใหญ่มากเสียจนกระทั่งค่าการปล่อยรังสีของเปลวเพลิงของการเผาไหม้ผงถ่านหินไม่ห่างจาก 1.0 มากนัก

แหล่งรับความร้อน (Heat Sink) [10]

ตัวรับความร้อนตามปกติสำหรับเตาเผาไหม้ทางอุตสาหกรรม จะประกอบไปด้วยท่อจำนวนมากมาถูกจัดเรียงกันเหนือผนังด้านต่างๆ หลังคา และพื้นของเตา หรือถูกตั้งให้ใกล้ศูนย์กลางบริเวณเปลวไฟ (Firebox) มากขึ้น โดยทั่วไปท่อต่างๆ ถูกจัดเรียงในลักษณะแถวเดียวไว้หน้าผนังอิฐทนไฟของเตา แม้ว่าจะมีวิธีการในการประเมินผิวการถ่ายเทความร้อนอย่างมีประสิทธิภาพ (Effective heat-transfer surface) ของการจัดเรียงเช่นนั้นค่อนข้างมากมาย ซึ่งตอนนี้ถูกใช้กันอย่างเกือบจะไม่รวมวิธีอื่นโดยที่ชิ้นส่วนต่างๆ ของเตาเผาไหม้ถูกจัดการอย่างเป็นรายๆ ดีที่สุด และในการประเมินค่าผิวที่มีประสิทธิภาพ หรือผิวที่รับการแผ่รังสีโดยไม่มีการบัง (Effective surface) ของแถวท่อแถวต่างๆ ได้ตั้งสมมุติฐานว่า แหล่งความร้อน เป็นระนาบการแผ่รังสี (Radiating plane) ที่ขนานกับแถวท่อ ผลกระทบปลาย (End effects) ถูกกำจัดออกไปโดยการสมมุติว่าทั้งระนาบของแถวท่อกับระนาบของการแผ่รังสี ขนานกันไปอย่างไม่มีขอบเขต ผิวทั้งหมดถูกสมมุติว่าเป็น black



รูปที่ 2.5 การประเมินค่าแฟกเตอร์แสดงประสิทธิผล α [10]

$$\alpha_{A,direct} = \frac{90^\circ - A_1^\circ - A_2^\circ - A_3^\circ}{90^\circ}$$

$$\alpha_{N,direct} = \frac{90^\circ - N_1^\circ - N_2^\circ - N_3^\circ - N_4^\circ}{90^\circ}$$

$$\alpha_{direct} = \frac{\alpha_{A,direct} + \alpha_{B,direct} + \dots + \alpha_{N,direct}}{N}$$

$$\alpha_{total} = \alpha_{direct} + \alpha_{direct} (1.00 - \alpha_{direct})$$

ค่า $\alpha_{A,direct}$ $\alpha_{B,direct}$ etc., จะมีความเหมาะสมเมื่อระยะระหว่างระนาบแผ่รังสีกับแถวท่อเพิ่มขึ้น

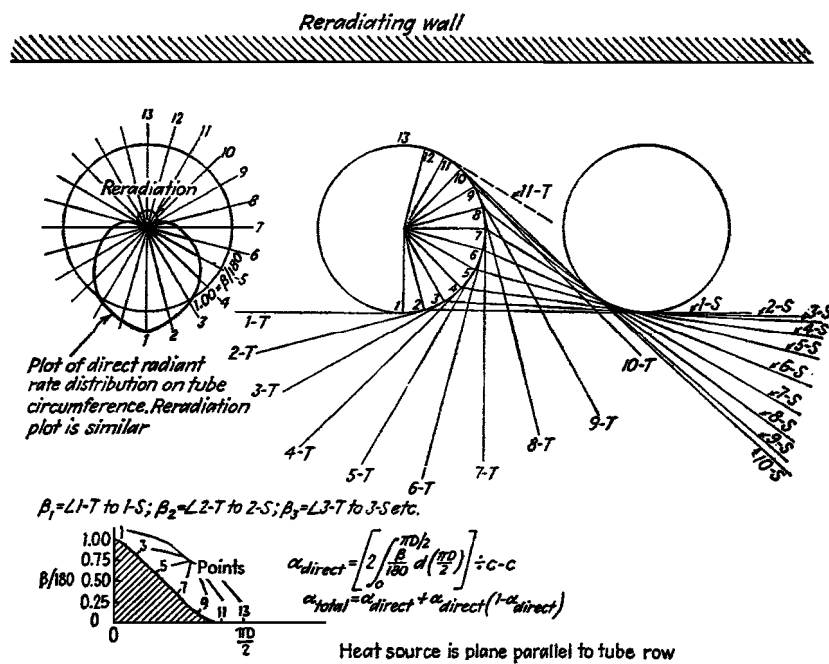
รูปที่ 2.5 แสดงวิธีการประเมินค่าแฟกเตอร์แสดงประสิทธิผล (The effectiveness factor) α ซึ่งจะใช้คูณกับผิวของระนาบที่กำลังแทนแถวท่อที่รับค่าการปล่อยรังสีจากแหล่งปล่อยรังสีที่เท่ากับ 1.0 เพื่อให้ได้ค่าผิวระนาบเย็นสมมูล (Equivalent cold-plane surface) ระนาบที่กำลังแทนท่อต่างๆ A_{cp} มีค่าเท่ากับ จำนวนท่อ x ความยาวท่อ x ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางท่อหนึ่งถึงอีกท่อหนึ่ง (Center-to-center spacing) วิธีแรกที่แสดงเป็นวิธีหนึ่งที่ถูกเสนอโดย Hottel [11] ซึ่งง่ายและรวดเร็ว จะถูกสมมุติว่าการสูญเสียความร้อน (Heat loss) ผ่านทะลุผนังท่อนไฟ (Refractory) มีค่าเท่ากับความร้อนที่ถูกถ่ายเทไปยังผนังท่อนไฟนั้นโดยการพาความร้อน ดังนั้นการแผ่รังสีความร้อนทั้งหมดที่กำลังพุ่งกระทบกับผนังเตาแล้วจะถูกแผ่รังสีกลับมาอีกครั้งหนึ่ง (Reradiated) และพบว่าเมื่อท่อต่างๆ ถูกวางให้ห่างกันมากขึ้น ค่าสัดส่วนของการแผ่รังสีความร้อนที่กำลังมีจุดกำเนิดอยู่ที่จุดๆ หนึ่งบนแหล่งกำเนิดความร้อน (Source) ซึ่งไปถูกวางรับไว้ได้

โดยท่อต่างๆ นั้น จะมีค่าลดน้อยลง ดังนั้นค่า α จะลดลงด้วย ในขณะที่เดียวกันการวางท่อให้ห่างกันมากขึ้นนี้จะให้ค่า A_{cp} ต่อ 1 ท่อจะเพิ่มขึ้น ผลกระทบสุทธิ คือ ค่าผิวประสิทธิผล (Effective surface) ต่อ 1 ท่อจะเพิ่มขึ้น แต่ผิวประสิทธิผลต่อหนึ่งหน่วยพื้นผิวของผนังเตาเผาจะลดลง ค่าประสิทธิผลของท่อจะถูกเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากส่วนที่มากขึ้นของพื้นที่รอบผิวของมันถูกแผ่รังสีกลับออกมา (Irradiation) การแผ่รังสีที่ไม่ถูกขวางและรับไว้โดยท่อต่างๆ จะพุ่งไปถึงผนังท่อนไฟ จากนั้นตัวผนังท่อนไฟก็จะแผ่รังสีที่ได้รับกลับออกไป (Reradiated) อีกทอดหนึ่ง ถ้าถูกสมมุติว่าผนังท่อนไฟอยู่ที่อุณหภูมิสม่ำเสมอ การแผ่รังสีที่กำลังออกจากผนังท่อนไฟนี้จะถูกขวางรับไว้ด้วยขนาดเดียวกัน การแผ่รังสีที่แผ่มาจากแหล่งปล่อยรังสี ดังนั้นการแผ่รังสีทั้งหมดที่ถูกดูดกลืนไว้ได้โดยแถวท่อจะมีค่าเป็นสัดส่วน $[\alpha_{direct} + \alpha_{direct}(1 - \alpha_{direct})]$ ของการแผ่รังสีจากแหล่งกำเนิด ตัวอย่างแสดงให้เห็นว่า หลายๆ จุดตามระนาบการแผ่รังสีควรต้องถูกหา (ครอบคลุมเพียงครึ่งหนึ่งของระยะจากจุดศูนย์กลางท่อหนึ่งถึงอีกท่อหนึ่งเท่านั้น เนื่องจากความสมมาตรของระบบ) เพื่อให้ได้มาซึ่งสัดส่วนเฉลี่ยของการขวางรับ (interception) และเพราะความสมมาตรด้วยเช่นกัน ทำให้ต้องการหาในแต่ละจุด เพียงมุมระหว่าง 90° ถึง 180° เท่านั้น

การทำความเข้าใจที่ดีในเรื่องของการกระจายของอัตราการแผ่รังสีบนเส้นรอบรูปท่อ ได้มาจากรูปที่ 2.6 ซึ่งค่าต่างๆ ในรูปนี้ถูกพัฒนามาจากจุดยืน (Standpoint) ของผิวท่อ จุดบนผิวท่อหนึ่งๆ ซึ่งเป็นจุดที่ตั้งอยู่บนเส้นผ่าศูนย์กลางท่อเส้นที่ตั้งฉากกับระนาบที่กำลังแผ่รังสี และเป็นจุดที่อยู่ด้านบนของท่อที่กำลังหันหน้าสู่ระนาบนี้ จะได้รับการแผ่รังสีตลอดมุมของ 180° และดังนั้นค่า α สำหรับจุดๆ นี้มีค่าเป็น 1.00 จุดอื่นๆ บนเส้นรอบรูปที่เลื่อนไปทางด้านหลังของท่อนี้สามารถมองเห็นการแผ่รังสีได้ด้วยมุมที่เล็กลงเรื่อยๆ จนกระทั่งมาถึงจุดหนึ่งซึ่งเป็นจุดที่ไม่ได้รับการแผ่รังสีตรงๆ จากระนาบที่กำลังแผ่รังสีเลย ค่าประสิทธิผลของแต่ละพื้นที่เล็กๆ ของผิวรอบรูปท่อทั้งหมด A ถูกประเมิน และผลบวกของ effective area เหล่านี้ต้องถูกหารด้วย A_{cp} เพื่อให้ได้ค่า α เนื่องจากมีความสมมาตร ดังนั้นการหาค่าดังกล่าวนี้เพียงครึ่งหนึ่งของเส้นรอบรูปก็พอ และปรากฏว่า ด้านหน้าของท่อดูดกลืนความร้อนมากกว่าจุดอื่นๆ บนผิวรอบรูปของท่ออย่างมาก

การขวางรับ (Interception) การแผ่รังสีกลับออกมาจากผนัง (Reradiation) สามารถถูกประเมินได้ในลักษณะเดียวกัน ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่า ความเข้มของการแผ่รังสีกลับออกมาจากผนังมีค่าเท่ากับ $(1 - \alpha_{direct})$ คูณด้วยความเข้มจากแหล่งกำเนิด สามารถแสดงการพล็อตค่าทั้งหมดของการแผ่รังสีตรงๆ จากแหล่งกำเนิดบวกกับการแผ่รังสีย้อนกลับออกมาจากผนังในระบบแกนอ้างอิงเชิงขั้ว (Polar coordinate) เพื่อแสดงให้เห็นการกระจายความร้อนที่แท้จริง สำคัญที่จะต้องบันทึกอัตราส่วนคร่าวๆ (Poor ratio) ระหว่างค่าเฉลี่ยต่อค่าสูงสุดของค่า α สำหรับจุด

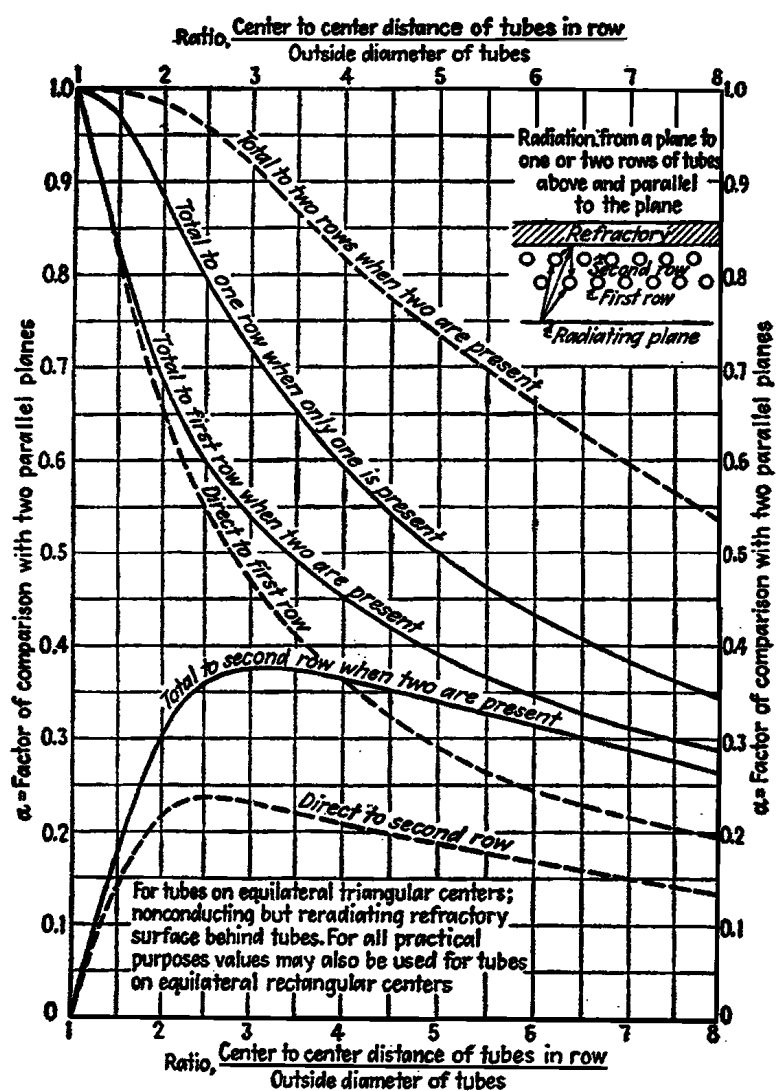
ต่างๆ บนเส้นรอบรูปท่อ สำหรับการให้ระยะห่างระหว่างท่อตามปกติเท่ากับ 1.8 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางนอกของท่อในเตาต้มน้ำมันของโรงกลั่นน้ำมัน อัตราส่วนนี้ควรมีค่าเท่ากับ 2.0 โดยประมาณ แสดงว่าที่ค่าฟลักซ์เฉลี่ยของผิวท่อทั้งหมด A เท่ากับ 10,000 Btu/(hr)(ft²) ค่าฟลักซ์สูงสุด (ตัดทั้งแพ็คเกจที่กำลังมีผลต่อการกระจายความร้อนอื่นที่ไม่ใช่ α) ที่จุดซึ่งอยู่บนผิวด้านหน้าของท่อจะมีค่าเป็น 20,000 Btu/(hr)(ft²) ยิ่งอัตราส่วนระหว่างจุดศูนย์กลางท่อหนึ่งถึงอีกท่อหนึ่งต่อเส้นผ่าศูนย์กลางนอกยิ่งมาก อัตราส่วนระหว่างอัตราการแผ่รังสีสูงสุดต่ออัตราเฉลี่ยก็จะยิ่งต่ำลง และเนื่องจาก α_{max} ในทุกๆ กรณีมีค่าเป็น 1.00 ดังนั้นมันจึงสามารถเห็นได้อย่างดีจากพัฒนาการของค่า α ที่ได้ว่าค่าผิวประสิทธิผล (Effective surface) ของท่อต่างๆ จะเพิ่มขึ้นอย่างไรก็ตามยกเว้นในกรณีเฉพาะ เตาเผาไหม้ราคาถูกที่สุดสามารถทำได้เมื่อวางท่อต่างๆ ให้มีระยะห่างใกล้เคียงกันเท่าที่ข้อจำกัด (Limitations) ทางกลและทางกายภาพของข้อต่อโค้ง (Return bends) จะยอมให้



รูปที่ 2.6 แสดงการประเมินค่า α ที่กำลังแสดงให้เห็นการกระจายของฟลักซ์บนเส้นรอบรูปท่อ [10]

ในกรณีการวางท่อเป็นแบบแถวคู่ (Double rows) ท่อแถวหลังจะได้รับการแผ่รังสีความร้อนประมาณ 1/4 ของการถ่ายเทความร้อนทั้งหมด และมีความสำคัญเช่นกันที่จะต้องบันทึกว่าอัตราส่วนค่าฟลักซ์สูงสุดต่อค่าฟลักซ์เฉลี่ย (รอบๆ ท่อ) สำหรับทั้งสองแถวท่อจะกลายเป็นแย่งกว่าสำหรับแถวเดียวอย่างมาก อัตราส่วนนี้สามารถได้มาโดยการหารผิวรอบท่อทั้งหมด (Total circumferential surface) สำหรับทั้งสองแถวด้วยผลคูณของค่า αA_{cp} สำหรับทั้งสองแถว อันที่

จริงแล้วค่าปล่อยรังสีของท่อ (Tube emissivity) ไม่เท่ากับ 1.00 อย่างที่ได้กำหนด และอันที่จริงจะมีการสะท้อนเกิดขึ้นเป็นบางส่วนจากท่อหนึ่งไปสู่อีกท่อหนึ่ง ผลกระทบสุทธิคือเพิ่มค่าปล่อยเชิงประสิทธิผล (Effective emissivity) ของแถวท่อได้ 2 ถึง 3% ซึ่งถูกตัดทิ้งในการออกแบบในทางปฏิบัติ



รูปที่ 2.7 แสดงการแผ่รังสีระหว่างระนาบหนึ่งกับหนึ่งแถวท่อหรือมากกว่า
ที่ขนานกับระนาบแผ่รังสีนั้น [10]

รูปที่ 2.7 แสดงค่า α ทั้งค่าตรง (Direct) และค่าทั้งหมด (Total) สำหรับท่อแถวเดี่ยวและแถวคู่ที่มีผนังทนความร้อนอยู่ด้านหลังท่อเหล่านี้ ซึ่งถูกพบจากค่าต่างๆ ของ α_{direct} สำหรับแถวที่หนึ่งและแถวที่สองว่า กลุ่มท่อ (Nest of tubes) ที่มีความลึกมากกว่า 2 แถวสามารถถูกสมมุติว่ามีค่าของ α_{total} เท่ากับ 1.0 สำหรับกลุ่มแถวท่อตามขวางที่อยู่ในส่วนการพาความร้อนของเขา

(Convection banks) ที่ท่อต่างๆ ของมันถูกแผ่รังสีมาถึงตรงนั้น ค่า A_{cp} เกือบจะเท่ากับ ความกว้าง คูณความยาวของช่องเปิด (ความกว้าง-ยาวของช่องห่างระหว่างท่อในแถว)

ในเตาเผาไหม้ของหม้อต้มไอน้ำต่างๆ บางครั้งท่ออาจจะถูกฝังลึกในผนังทนความร้อน ครั้งหนึ่ง บางครั้งท่อถูกติดครีฟ (Finned) และบางโอกาสถูกติดด้วยบล็อกที่หันหน้าหาอิฐทนไฟ (refractory-faced blocks) สำหรับการพัฒนาในรายละเอียดของค่า α ที่มากกว่านี้สำหรับการ จัดเรียงท่อเช่นนั้น

Mullikin ได้แสดงวิธีการประเมินค่า The effective radiant-heat-transfer surface สำหรับท่อที่ถูกจัดเรียงในหม้อต้มไอน้ำต่างๆ ไว้วิธีหนึ่ง สำหรับท่อที่มีตะกรัน (Slag) จับของตัว หม้อต้มไอน้ำบางแบบนั้น ค่าผิวประสิทธิผล (Effective surface) มีค่าเป็น

$$(\alpha A_{cp})_s = A_{cp} \alpha F_C F_S F_E \quad (2.7)$$

เมื่อ A_{cp} = ผิวระนาบเย็นสมมูลย์ (Equivalent cold-plane surface)

α = แฟกเตอร์แสดงประสิทธิผล (Effectiveness factor) ใช้ตัวห้อย s แสดงว่า อยู่ในสภาวะที่มีตะกรันเกิดขึ้น

F_C = แฟกเตอร์การนำความร้อน (Conductivity factor); ไม่มีหน่วย

F_S = แฟกเตอร์แสดงการเกาะของตะกรัน (Slag factor); ไม่มีหน่วย

F_E = แฟกเตอร์การปล่อยรังสี (Emissivity factor); ไม่มีหน่วย

สังเกตว่ามีการให้ค่าการปล่อยรังสีของท่อเข้าไปในการประเมินค่าผิวประสิทธิผล (Effective surface) ในกรณีนี้ จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่าค่าการปล่อยรังสี จะพิจารณาอยู่ในค่า exchange factor $\mathfrak{N}$ ซึ่งอันที่จริงไม่มีผล เนื่องจากค่า $(\alpha A_{cp})_s$ นั้น ค่า F_E ถูกกำหนดว่ามีค่าเป็น 1.00 ค่าต่างๆ ในทางปฏิบัติของ F_C เท่ากับ 1.00 สำหรับท่อเปลือย และท่อติดครีฟ เท่ากับ 0.70 สำหรับท่อที่ประกบด้วยบล็อกโลหะหันหน้าออกจากผนังเตา (Bar-faced metal blocks) และท่อตัวไปบนท่อจะเท่ากับ 0.33 และสำหรับบล็อกโลหะหันหน้าสู่ผนังเตา (refractory-face metal blocks) นั้น ค่าแฟกเตอร์แสดงการเกาะของตะกรัน F_S จะมีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง 0.6 ถึง 0.9 หรือ 1.00 สำหรับหม้อต้มไอน้ำที่ปฏิบัติงานอย่างดี เมื่อท่อต่างๆ สะอาด F_S จะมีค่าเท่ากับ 1.0 แต่จากการพิจารณาผลการทดสอบหม้อต้มไอน้ำต่างๆ ที่ตีพิมพ์ปรากฏว่าแฟกเตอร์แสดงการเกาะของตะกรัน (Slag factor) มีค่าอยู่ในช่วง 0.8 ถึง 0.9 และเป็นไปไม่ได้ที่จะกล่าวเป็นหลักทั่วไป (Generalization) เกี่ยวกับการเกิดขึ้นของตะกรัน (Slag) ที่เกิดจากการเผาไหม้ถ่านหินชนิดต่างๆ และเชื้อเพลิงน้ำมันบางตัว และเกิดความผันแปรของอุณหภูมิในเตาเผา ซึ่งแฟกเตอร์แสดงการเกาะของตะกรัน ในกรณีเช่นนั้นสามารถคาดคะเนจากข้อมูลเชิงเปรียบเทียบ หม้อต้มไอน้ำที่

บริการเป็นครั้งคราว (Intermittent service) มีแนวโน้มที่จะทำความสะอาดตัวเองได้ ขณะที่หม้อต้มไอน้ำที่บริการต่อเนื่องจะมาถึงสภาวะสมดุล ซึ่งผลกระทบของตะกอนจะไม่เปลี่ยนแปลงมากนักตามที่ปรากฏจะพบว่ามี ความแตกต่างระหว่างการลดลงของการดูดกลืนความร้อนเนื่องจากเถ้าแห้ง (Dry ash) เถ้าบนต่อการลดลงของการดูดกลืนความร้อนเนื่องจากเถ้าหลอมและไหลตามผิวท่อเป็นอย่างมาก การเปลี่ยนแปลงสภาวะการปฏิบัติการ อาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาวะการเกิดตะกอน (Slag) ขึ้นได้ และจะเป็นสาเหตุให้เกิดความผันแปรของความถูกต้องของบางสมการซึ่งพิจารณา หลักการของการถ่ายเทความร้อนโดยปราศจากปัจจัยทางปฏิบัติ

ผิวปิดรอบนอกตัวรับความร้อน (Enclosing Surfaces) [10]

เป็นเรื่องยากที่จะทำให้มองเห็นและเข้าใจการถ่ายเทความร้อนจากก๊าซร้อนสู่ผิวเย็น (Cold surface) ในส่วนซึ่งถูกแสดงโดยผนังอิฐทนไฟ ส่วนหลังคา พื้นล่าง และอื่นๆ ของเตาเผาไหม้ อีกทั้งมวลก๊าซ (Gas mass) จะแผ่รังสีในทุกๆ ทิศทาง ค่าการปล่อยรังสีของก๊าซในเตาเผาไหม้ (ซึ่งถูกประเมินจากค่า p และ L ดังที่ได้กล่าวมาก่อนหน้านี้) เป็นไปในทิศทางที่จะแสดงการแผ่รังสีที่กำลังตกกระทบบนจุดจุดหนึ่งของผิวเย็นบนผิวปิดของเตาเผาไหม้ ทั้งหมดของการแผ่รังสีนี้จะถูกกำกับจากส่วนต่างๆ ของมวลก๊าซให้ไปยังจุดเฉพาะนั้น อย่างไรก็ตามส่วนต่างๆ ของมวลก๊าซเหล่านี้จะแผ่รังสีไปในทิศทางอื่นๆ ด้วย บางส่วนของการแผ่รังสีนี้อาจจะถูกกำกับให้ไปยังผิวอิฐทนไฟ (ซึ่งไม่เย็น) เมื่อผิวอิฐทนไฟรับรังสีที่กำลังแผ่มาถึงแล้วก็จะแผ่รังสีกลับออกไป (Reradiate) หรือสะท้อน (Reflect) รังสีนั้น บางส่วนของรังสีที่แผ่กลับออกมาที่กำลังถูกกำกับให้กลับไปยังจุดเดิม มวลก๊าซเหล่านี้ไปรังสีอย่างมากต่อการแผ่รังสีกลับออกไป (Reradiate) รังสีมากกว่าที่จะสะท้อน เนื่องจากคุณลักษณะทางคลื่น (Spectral characteristics) ของการแผ่รังสีกลับออกมาอีกครั้งนั้น ขึ้นกับคุณลักษณะต่างๆ ของผิวอิฐทนไฟ ดังนั้นจุดจุดนั้นบนผิวเย็นจะได้รับการแผ่รังสีมากกว่าที่อาจจะถูกประเมินจากค่าปล่อยรังสีของก๊าซ อิฐทนไฟจึงค่อนข้างจะแสดงเป็นตัวสะท้อนการแผ่รังสีที่ถูกล้างไว้หลังแหล่งปล่อยแสง

วิธีทางที่มีประสิทธิภาพ (Effective means) ของการแสดงให้เห็นผลกระทบของอิฐทนไฟวิธีหนึ่ง คือต้องเริ่มต้นด้วยผิวปิดผิวหนึ่งที่ไม่มีความร้อนบรรจุอยู่เลย ผิวปิดนี้บรรจุด้วยก๊าซตัวหนึ่งที่มีค่าการปล่อยรังสีที่แน่นอนค่าหนึ่งที่อุณหภูมิที่กำหนดให้ ถ้าทำช่องเปิดเล็กๆ ช่องหนึ่งไว้ในผิวปิดนี้ การแผ่รังสีที่กำลังไหลเป็นลำทะลุผ่านช่องเปิดนี้จะมีค่าเท่ากับการแผ่รังสีที่กำลังออกจากวัตถุดำ (Black body) ตัวหนึ่งที่มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิก๊าซ โดยไม่สำคัญว่าค่าการปล่อยรังสีของก๊าซจะเป็นเท่าไร แต่ขอให้ผนังผิวปิดถูกหุ้มฉนวนอย่างดี และระบบได้มาถึงสมดุลความร้อนก็พอตอนนี้สมมุติว่าเราวางส่วนเล็กๆ ของผิวเย็นอันหนึ่งไปแทรกในผิวปิดแทนที่ช่องเปิดนั้น เราจะได้ว่า

การแผ่รังสีที่กำลังตกบนส่วนของผิวเย็นเล็กๆ นี้จะมีค่าเท่ากับการแผ่รังสี ซึ่งอาจจะมาจากสิ่งแวดล้อมสีดำ (Black surroundings) ที่มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิก๊าซ ผลกระทบของอัตราส่วนที่มีค่าสูงมากของผิวอิฐทนไฟต่อผิวเย็นทำให้ได้ค่าการปล่อยรังสีของเตาเผาไหม้มีค่าเท่ากับ 1.0 แม้ว่าค่าปล่อยรังสีของก๊าซจะมีค่าต่ำก็ตาม

หรือกล่าวอีกอย่างหนึ่งว่า ถ้าผิวปิดทั้งหมด (Entire enclosing surface) เป็นผิวเย็นและเป็นวัตถุดำด้วย แต่ละจุดบนผิวเย็นจะได้รับการแผ่รังสีจากส่วนที่แผ่ตรงมาถึงมันในตอนแรกเท่านั้น (ไม่มีส่วนที่ปล่อยต่อมาจากผิวอื่นที่ไม่ใช่แหล่งคลื่น) เนื่องจากการแผ่รังสีในทิศทางอื่นๆ ถูกดูดกลืนไว้อย่างสมบูรณ์ และดังนั้นค่าการปล่อยรังสีของเตาเผาไหม้จึงมีค่าเท่ากับค่าการปล่อยรังสีของก๊าซ ถ้าค่าการปล่อยรังสีของผิวเย็นมีค่าน้อยกว่า 1.0 แสดงว่าบางส่วนของ การแผ่รังสีจะถูกสะท้อน และแม้ว่าผลกระทบสุทธิของค่าการปล่อยรังสีจากผิวเย็นที่มีค่าต่ำกว่า (a lower cold surface emissivity) ค่าหนึ่งๆ จะเป็นการทำให้การถ่ายเทความร้อนสำหรับผลต่างอุณหภูมิที่กำหนดให้ลดลงก็ตาม แต่ว่าการลดลงของการถ่ายเทความร้อนดังกล่าวก็จะเป็นสัดส่วนกับการลดลงของค่าการปล่อยรังสีการสะท้อนต่างๆ จะถูกดูดกลืนเพียงบางส่วนเท่านั้น (โดยก๊าซ) และส่วนที่ไม่ถูกดูดกลืนจะถูกรวมเข้ากับการแผ่รังสีปฐมภูมิไปยังส่วนอื่น (other portion) ของผิวเย็น ยิ่งค่าการปล่อยรังสีของก๊าซยิ่งต่ำ (ค่า Absorptivity ด้วย) ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าการปล่อยรังสีของผิวเย็นก็ยิ่งจะมีค่าน้อย ซึ่งในหม้อไอน้ำแบบท่อไฟ (Fire-tube boiler) ตัวหนึ่งๆ เราสามารถประเมินการถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสีได้โดยการประยุกต์ใช้หลักการเหล่านี้ และจะปลอดภัยโดยที่จะกำหนดว่าค่าการปล่อยรังสีของผิวท่อบีค่าเท่ากับ 1.0

ต่อมาได้มีการแสดงถึงการถ่ายเทความร้อนแบบแผ่รังสีสุทธิจะเพิ่มขึ้นสำหรับค่าการปล่อยรังสีของก๊าซ ค่าการปล่อยรังสีของผิวเย็นและค่าอุณหภูมิของก๊าซกับของผิวเย็น ที่กำหนดให้ค่าหนึ่งๆ ได้ โดยการเพิ่มอัตราส่วนระหว่างผิวผนังทนไฟต่อผิวเย็น อย่างไรก็ตามการเพิ่มอย่างอิสระ (Random) ของผนังทนไฟ [ในรูปของผนังกันแบ่งตามแนวระดับ (Partition) และตามแนวบนล่าง (Bridge wall)] จะไม่แสดงการเพิ่มค่าฟลักซ์การแผ่รังสีความร้อนโดยปราศจากการเพิ่มอุณหภูมิก๊าซในเตาเผาไหม้ ด้วยเหตุนี้ค่าอัตราส่วนระหว่างผิวผนังทนไฟต่อผิวเย็นน่าจะถูกเพิ่ม ซึ่งจะถูกเพิ่มด้วยรายจ่ายของการลดลงของความยาวลำแสง (Mean beam length) ของเตาเผาไหม้ ในเตาเผาไหม้ที่เรียกว่าแบบมีส่วนการแผ่รังสี 2 เท่า การจัดการแต่ละส่วนให้ดีที่สุดคือการแยกเตาเผาไหม้เป็นอิสระจากกัน

การประเมินผลกระทบของผิวผนังท่อนไฟในเชิงปริมาณยุ่งยากมากและเกินเลยช่วงของการสามารถปฏิบัติได้ สำหรับงานวิศวกรรม Hottel ได้พัฒนาสมการสำหรับหาค่า Overall exchange factor ขึ้นสมการหนึ่ง ได้แก่

$$F_{\varepsilon} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\varepsilon_F}\right) + \left(\frac{1}{\varepsilon_S}\right) - 1} \quad (2.8)$$

โดยที่ ε_S = ค่าการปล่อยรังสีของผิวเย็น (Cold surface)

ε_F = ค่าการปล่อยรังสีเชิงประสิทธิผล (Effective emissivity) ของโพรงเตาเผาไหม้ (ซึ่งจะใหญ่กว่า ε_G ถ้าบางส่วนของผิวปิดไม่เย็น) Hottel ให้นิยามเลยไปถึงว่า ε_F เป็นฟังก์ชันของค่าการปล่อยรังสีของก๊าซ ค่าอัตราส่วนระหว่างผิวผนังท่อนไฟต่อผิวเย็น และค่า Angle factor ที่กำลังขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์เชิงเรขาคณิตต่างๆ ระหว่างส่วนต่างๆ ของผิวเย็นและผิวผนังท่อนไฟ

โดยสรุป ผิวท่อนถูกประเมินเป็นผิวระนาบสมมูล (Equivalent plane surface) ค่าการปล่อยรังสีของมวลก๊าซเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ ของอุณหภูมิผิวเย็น ของค่าความยาวลำแสง (mean beam length) ของเตาเผาไหม้ และของค่า partial pressure ขององค์ประกอบต่างๆ ที่กำลังแผ่รังสี ค่าการปล่อยรังสีเชิงประสิทธิผล (Effective emissivity) ของเตาเผาไหม้เป็นฟังก์ชันของค่าการปล่อยรังสีของก๊าซ และค่าอัตราส่วนระหว่างผิวผนังท่อนไฟต่อผิวเย็น ค่า overall exchange factor สำหรับใช้ในสมการ Stefan-Boltzmann เพื่อคำนวณการถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสี จะได้มาจากค่าการปล่อยรังสีของเตาเผาไหม้และผิวเย็น ดังสมการต่อไปนี้

$$Q = 0.173 \mathfrak{z} \left[\left(\frac{T_G}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_S}{100} \right)^4 \right] \alpha A_{cp} \quad (2.9)$$

โดยทางทฤษฎีแล้ว ค่าเฉลี่ยเฉพาะของ T_G ต้องถูกใช้ในสมการนี้ หรือการคำนวณของเตาเผาไหม้รูปทรงยาวต้องถูกดำเนินการในลักษณะเป็นขั้นๆ อันที่จริงจะพิจารณาอุณหภูมิของก๊าซต่างๆ ที่กำลังไหลออกจากส่วนแผ่รังสีของเตาเผาไหม้ (Furnace radiant section) เป็นอุณหภูมิเฉลี่ย เมื่อระดับความปั่นป่วน (Turbulent) ของก๊าซต่างๆ เหล่านั้นสูง เมื่อใช้เตาเผาไหม้มีเปลวเพลิงที่มีความสว่างอย่างสูง (Highly luminous flames) อยู่หรือเป็นเตาฟืน (Stoke firing) ก็ตาม ต้องมีการใช้ข้อมูลเพิ่มเติม วิธีต่างๆ สำหรับทำการคำนวณอัตรา (Rates) หรือฟลักซ์ (Fluxes) การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยในส่วนที่มีการแผ่รังสีความร้อนของเตา (Radiant section) จะไม่ให้ผลการวัดที่มีความสม่ำเสมอของอัตราการแผ่รังสีความร้อนเหล่านั้นบนท่อต่างๆ ถึงตอนนี้ต้องใช้

ประสบการณ์หรือไม่ก็การคำนวณเชิงวิเคราะห์ขั้นสูง (Highly analytical calculations) เพื่อกะประมาณอัตราการแผ่รังสีความร้อนเฉพาะ

วิธีการออกแบบเตาเผาไหม้ (Design Method for a Furnace) [10]

วิธีพื้นฐานสำหรับการทำการคำนวณการดูดกลืนความร้อนในส่วนที่มีการแผ่รังสีความร้อนของเตาเผาไหม้มีหลายวิธี อาทิเช่น วิธีของ Lobo และ Evans วิธีของ Wilson Lobo และ Hottel วิธีใช้สมการ OrrokHudson และวิธีการทำให้ง่ายขึ้นของ Wohlenberg ซึ่งเป็นวิธีที่ทำให้สมการ OrrokHudson ง่ายและแม่นยำมากขึ้น วิธี Lobo และ Evans เป็นวิธีเดียวในบรรดาวิธีเหล่านี้ที่ไม่ใช้สมการเอมไพริคัลที่มาจากการปฏิบัติจริง แต่เป็นวิธีที่มีการคำนวณด้วยการอ้างอิงพื้นฐานของทฤษฎีการแผ่รังสีความร้อนอยู่มากที่สุด วิธีนี้ถูกทดสอบกับการออกแบบเตาเผาไหม้ของโรงกลั่นน้ำมันที่แตกต่างกันจำนวน 19 โรง ทั้งหมด 85 การทดลองย่อย พบว่ามีความผันแปรของผลการถ่ายเทความร้อนเพียง 5.3% เท่านั้น และความผันแปรที่สูงที่สุด คือ 16% วิธี Lobo และ Evans ใช้สมการพื้นฐานสำหรับการแผ่รังสีความร้อนจากแหล่งแผ่รังสีผิวเย็นดังนี้

$$Q = 0.173 \mathfrak{S} \left[\left(\frac{T_G}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_S}{100} \right)^4 \right] \alpha A_{cp} \quad (2.10)$$

นอกจากจะมีการแผ่รังสีความร้อนเกิดขึ้นภายในเตาเผาไหม้แล้ว ยังมีความร้อนบางส่วนถูกถ่ายเทในโหมดการพาความร้อนอีกด้วย และการถ่ายเทความร้อนทั้งหมดไปยังผิวเย็น เป็นดังสมการ

$$Q = 0.173 \mathfrak{S} \left[\left(\frac{T_G}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_S}{100} \right)^4 \right] \alpha A_{cp} + h_c A (T_G - T_S) \quad (2.11)$$

เมื่อ A = ผิวทอทั้งหมด [ft^2]

A_{cp} = ผิวระนาบเย็นสมมูลย์ (Equivalent cold plane surface) [ft^2]

$\mathfrak{S}$ = แฟกเตอร์แสดงการแลกเปลี่ยนการแผ่รังสีความร้อน (overall exchange factor)
[ไม่มีหน่วย]

h_c = สัมประสิทธิ์การพาความร้อน [$\text{Btu}/(\text{hr}\cdot\text{ft}^2\cdot^\circ\text{F})$]

ΣQ = อัตราการถ่ายเทความร้อนทั้งหมดไปที่ผิวเย็น [Btu/hr]

T_G = อุณหภูมิก๊าซร้อนจากการเผาไหม้ที่กำลังออกจากส่วนของการแผ่รังสี (Radiant section) ของเตา [$^\circ\text{R}$]

T_S = อุณหภูมิผิวทอ [$^\circ\text{R}$]

α = แฟกเตอร์ซึ่ง A_{cp} ต้องถูกคูณลดเพื่อให้ได้ผิวเย็นประสิทธิผล (Effective cold surface)
[ไม่มีหน่วย]

สามารถทำเทอมการพาความร้อน (Convection) ให้ง่ายขึ้นได้ด้วยการกำหนดค่า $h_c = 2.0$ และค่า A ของเทอมนี้มีค่าโดยประมาณเป็น $2.0\alpha A_{cp}$ เนื่องจากมีความต้องการหารตลอดทุกเทอมด้วย $\mathfrak{V}$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.57 ดังนั้นต้องมีการจัดรูปสมการที่ (2.11) ใหม่เป็น

$$Q = 0.173\mathfrak{V} \left[\left(\frac{T_G}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_S}{100} \right)^4 \right] \alpha A_{cp} + 7(T_G - T_S) \quad (2.12)$$

ความสัมพันธ์นี้ถูกแสดงให้เห็นโดยกราฟในรูปที่ 2.8 นอกเหนือจากหลักการแผ่รังสีความร้อนแล้ว ดุลความร้อนก็จำเป็นสำหรับใช้หาคำตอบของปัญหาการดูดกลืนความร้อน ดุลความร้อนที่เกิดภายในเตาเผาไหม้ เป็นดังนี้

$$Q = Q_F + Q_A + Q_R + Q_S - Q_W - Q_G \quad (2.13)$$

เมื่อ Q = ความร้อนทั้งหมดที่ถ่ายเทในส่วนของแผ่รังสีของเตาเผาไหม้ [Btu/hr]

Q_F = ความร้อนที่ปลดปล่อยออกมาขณะเผาไหม้เชื้อเพลิง (ใช้ค่า LHV) [Btu/hr]

Q_A = ความร้อนสัมผัส (หรือ enthalpy) เหนือระดับอ้างอิงที่ 60°F ของอากาศเพื่อการเผาไหม้ [Btu/hr]

Q_R = ความร้อนสัมผัสเหนือระดับอ้างอิงที่ 60°F ของก๊าซไอเสียจากการเผาไหม้ที่ถูกไหลหมุนวนสู่การเผาไหม้อีก [Btu/hr]

Q_S = ความร้อนสัมผัสเหนือระดับอ้างอิงที่ 60°F ของไอน้ำที่ใช้พ่นเชื้อเพลิงเป็นละออง [Btu/hr]

Q_G = ความร้อนสัมผัสของก๊าซไอเสียจากการเผาไหม้ (Flue gases) ที่กำลังไหลพ้นจากในส่วนของแผ่รังสีของเตาเผาไหม้ [Btu/hr]

Q_W = ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาเผาไหม้ (คิด 1 ถึง 10 % ของ Q_F ขึ้นกับขนาดอุณหภูมิและโครงสร้างของเตาเผาไหม้ 2 % เป็นตัวเลขที่ดีของการออกแบบ)

ทำให้ง่ายขึ้นต่อไปด้วยการตัดค่า Q_S ที่ไม่นำมาคิด ดังนั้นได้ค่าความร้อนที่ปลดปล่อยออกมาสุทธิเท่ากับ

$$Q_{net} = Q_F + Q_A + Q_R - Q_W \quad (2.14)$$

ความร้อนติดตัวก๊าซไอเสียที่จะต้องปล่อยทิ้งไปเมื่อก๊าซไอเสียออกจากเตาเผาไหม้ที่อุณหภูมิก๊าซขาออก T_G คือ

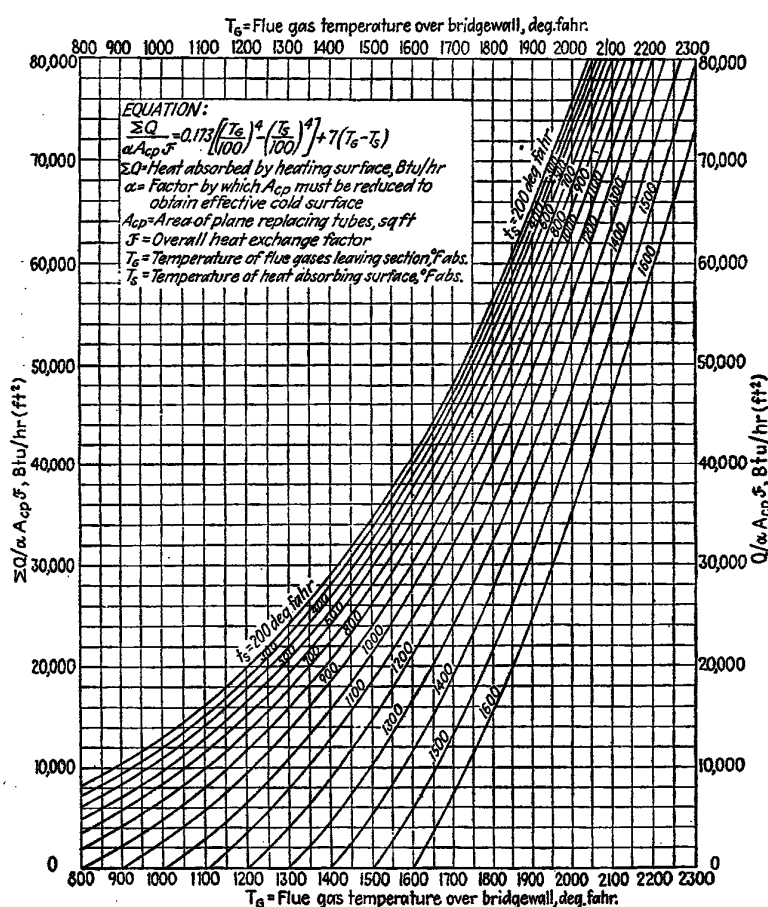
$$Q_G = W(1 + G')C_{av}(T_G - 520) \quad (2.15)$$

เมื่อ W = อัตราการป้อนเชื้อเพลิง [lb/hr]

$(1 + G')$ = อัตราส่วนของปริมาณก๊าซไอเสียจากการเผาไหม้ ในส่วนของแฟรงก์ต่อเชื้อเพลิงที่เผา [lb/lb]

G' = อัตราส่วนของอากาศที่ใช้ต่อเชื้อเพลิง [lb/lb]

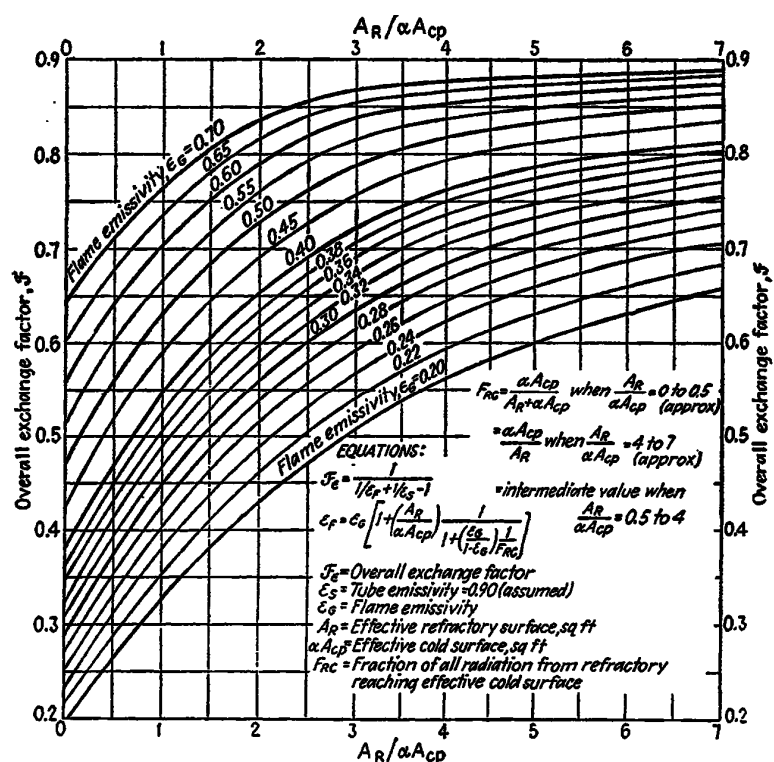
C_{av} = ค่าความร้อนจำเพาะ (Specific heat) เฉลี่ยของก๊าซไอเสียจากการเผาที่เฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิ T_G กับ 520°R [Btu/(lb)($^\circ\text{F}$)]



รูปที่ 2.8 พลั๊กการแผ่รังสีความร้อน [10]

ในการประยุกต์ใช้สมการเหล่านี้ สามารถประเมินค่าผิวระนาบเย็นสมมูลย์ (Equivalent cold plane surface) ได้โดยใช้รูปที่ 2.7 ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในตอนต้นว่า A_{cp} เป็นผิวของระนาบที่กำลังแทนที่แถวของท่อ และมีค่าเป็นผลคูณของจำนวนท่อคูณความยาวท่อส่วนที่แช่อยู่ในแหล่งปล่อยรังสี คุณระยะห่างจากจุดศูนย์กลางท่อหนึ่งถึงจุดศูนย์กลางของอีกท่อหนึ่ง (Center-to-center spacing) (คิดในหน่วยฟุต) เมื่อส่วนที่มีการถ่ายเทความร้อนแบบการพาของเตา

(Convection section) ถูกตั้งอยู่ในลักษณะที่ว่ามันได้รับประโยชน์ของการแผ่รังสีตรงๆ จากส่วนที่มีการแผ่รังสีความร้อน (radiant section) ซึ่งก็ควรจะถูกรวมเข้ากับผิวระนาบเย็นสมมูลย์สำหรับการไถเตาเผาไหม้ที่มีแถวท่อเรียงรอบผิวเตามากกว่า 2 แถวในด้านลึกลงนั้นน่าจะใช้ค่า α เท่ากับ 1.0 และค่า αA_{cp} เกือบจะเป็นผลคูณของความยาวท่อส่วนที่แช่ในก๊าซร้อนคูณกับความกว้างของช่องเปิด (ช่องห่าง) ของแถวท่อในส่วนการพาความร้อน (Convection bank) เมื่อแถวท่อในส่วนการพาความร้อนถูกแยกจากส่วนการแผ่รังสีความร้อนมันก็ไม่ต้องถูกรวมในการคำนวณของส่วนที่มีการแผ่รังสีความร้อน (Radiant-section calculations)



รูปที่ 2.9 แสดงค่า overall exchange factor เป็นฟังก์ชันของค่าการปล่อยรังสีของก๊าซ [10]

ซึ่งสามารถคำนวณค่าการปล่อยรังสีของก๊าซได้จากค่าความยาวแสงเฉลี่ย (Mean beam length) ค่า partial pressure ขององค์ประกอบต่างๆ ที่กำลังแผ่รังสี อุณหภูมิผิวท่อ และอุณหภูมิของก๊าซร้อน (ซึ่งตามปกติแล้วจะถูกสมมุติขึ้นก่อนในการทำ trial & error ของการคำนวณ) รูปที่ 2.9 แสดงค่า overall exchange factor F_e เป็นฟังก์ชันของค่าการปล่อยรังสีของก๊าซ (ของเปลวไฟ) กับค่าอัตราส่วนระหว่างค่าผิวอิฐทนไฟเชิงประสิทธิภาพ (effective refractory surface) A_R ต่อค่าผิวระนาบเย็นสมมูลย์ โดยที่

$$A_R = A_T - \alpha A_{cp} \quad (2.16)$$

ซึ่งมี A_R = ค่าผิวอิฐทนไฟเชิงประสิทธิภาพ (Effective refractory surface) [ft²]

A_T = พื้นที่ทั้งหมดของผิวเตาเผาไหม้ [ft^2]

αA_{cp} = ผิวระนาบเย็นสมมูลย์ (Equivalent cold plane surface) [ft^2]

อุณหภูมิก๊าซขาออกถูกได้มาจากการคำนวณแบบทำ trial & error จนกระทั่งสอดคล้องกับทั้งการถ่ายเทความร้อนและสมการดุลความร้อน เพื่อให้ปริมาณของการคำนวณที่ถูกต้องในการประยุกต์ใช้วิธีของ Lobo และ Evans รูปที่ 2.8 ให้ค่าของ $\Sigma Q/\alpha A_{cp} \Delta T$ สำหรับการเชื่อมโยงต่างๆ ของ T_G และ T_s

และมีการแนะนำว่า ในเตาเผาไหม้ใดๆ ซึ่งมีความยาวเส้นทางการเคลื่อนที่ของก๊าซ (path of the gas) มากกว่า 1.5 เท่าของมิติที่มีค่าต่ำสุด (Minimum dimension) ของพื้นที่ภาคตัดขวางต่างๆ ตลอดเส้นทางการไหลของก๊าซ ให้ทำการคำนวณไปตามขั้นต่างๆ (Stepwise calculation) ตัวอย่างของกรณีเช่นนั้นอาจจะได้แก่ การเผาไหม้ที่ให้เปลวไฟในแนวตั้ง อย่างเช่นกรณีเตาเผาไหม้รูปทรงกระบอกแนวตั้งที่ความสูงของมันเป็น 2 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลาง ครึ่งบนและครึ่งล่างของเตาเผาไหม้นี้จะถูกคำนวณเป็นแบบแยกออก 2 ตัวนอกเสียจากว่า ก๊าซไอเสียจากครึ่งล่างเป็นตัวปล่อยความร้อนให้แก่ตัวบน

ในทางปฏิบัติต้องคำนวณภาระการถ่ายเทความร้อนทั้งหมดในเตาเผา (Total furnace duty) ก่อน ซึ่งประกอบไปด้วย ความร้อนสัมผัส (Sensible heat) ความร้อนของการกลายเป็นไอ และความร้อนของการเกิดปฏิกิริยา ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาเผาไหม้ คือ η_{th} ถูกให้โดย

$$\eta_{th} = \frac{\Sigma Q}{Q_F} \times 100\% \quad (2.17)$$

และหาได้จากการจับให้เท่ากันระหว่างต้นทุนเชื้อเพลิง (Fuel costs) กับต้นทุนการลงทุน (First cost) ของเตาเผาไหม้ (บวกกับระบบอุ่นอากาศ (Air preheater) ถ้าถูกใช้) ปริมาณของอากาศเกินพอที่ถูกใช้ขึ้นกับ ชนิดของเชื้อเพลิง ชนิดของหัวพ่นไฟ (Burners) ชนิดของการเคลื่อนที่ของลมร้อนผ่านเตา (ว่าดูดหรือเป่า) และอุณหภูมิอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติใช้ปริมาณอากาศเกินพอ 40% สำหรับการออกแบบเตาเผาไหม้ที่มีการไหลของก๊าซไอเสียร้อนเป็นแบบธรรมชาติ หรือแบบใช้พัดลมดูด (Natural- or induced-draft furnaces) และใช้ปริมาณอากาศเกินพอ 25% สำหรับเตาเผาไหม้ที่มีการไหลของก๊าซไอเสียร้อนเป็นแบบใช้พัดลมเป่า (Forced-draft furnaces)

การใช้การอุ่นอากาศ (Air preheat) ก่อนการเผาไหม้จะถูกกำหนดโดยอุณหภูมิของวัสดุที่เย็นที่สุด ต้นทุนเชื้อเพลิง และต้นทุนของพื้นผิวเตา และถูกกำหนดไปถึงบางระดับที่ปฏิบัติกันโดย

ทั่วไป (Conventional practices) การใช้ระบบอุ่นอากาศ (Air preheaters) ถูกให้เหตุผลก็คือ เพื่อประหยัดต้นทุนเชื้อเพลิง แม้ว่าจะทำให้การปฏิบัติการของเตาเผาไหม้มีความซับซ้อนเกิดขึ้น และต้องการการซ่อมบำรุงเพิ่มเติม (อากาศเย็นเมื่อผ่านเข้าไปในเตาเผาไหม้จะไปดูดความร้อนจากการเผาไหม้และออกจากเตาไปทั้งๆ ที่อุณหภูมิยังสูงอยู่ มิได้ปล่อยความร้อนคืนไว้ในเตา จึงเปลืองเชื้อเพลิงมากกว่าปกติ)

เมื่อหาความร้อนที่ปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ได้แล้ว การออกแบบเตาเผาไหม้ปิโตรเลียม (Petroleum furnace) จึงถูกสร้างขึ้นบนพื้นฐานของอัตราการแผ่รังสีเฉลี่ยที่เกิดขึ้นในส่วนแผ่รังสีของเตาที่ยอมรับได้ (Permissible average radiant-section rate) ดังที่ได้ถูกกำหนดไว้ในตารางที่ 2.3 เส้นผ่าศูนย์กลางท่อขึ้นอยู่กับการพิจารณาเรื่อง สัมประสิทธิ์ฟิล์ม (Film coefficient) ความดันลด และอัตราการแผ่รังสี ช่องว่างระหว่างท่อต่างๆ ขึ้นกับคุณลักษณะต่างๆ ของหัวรวมท่อ (Headers) และท่อโค้งกลับ (Return bends) ของหม้อต้มไอน้ำ ช่องว่างระหว่างท่อใกล้ที่สุดที่เป็นไปได้ (Closest possible spacing) ควรถูกนำมาใช้ นอกเสียจากเมื่อมีความต้องการเป็นการเฉพาะเพิ่มขึ้นมา อย่างเช่นต้องการปรับปรุงความสม่ำเสมอของค่าฟลักซ์การรับการแผ่รังสีบนเส้นรอบรูปท่อ

ตารางที่ 2.3 Permissible Average Radiant Rates [10]

Type of furnace	Allowable rate, Btu/(hr)(ft ² of circumferential tube area)
Crude	10,000-16,000
Vacuum	5,000-10,000
Naphtha reforming	1,000-18,000
Gas oil cracking :	
Heating	10,000-15,000
Soaking	10,000
Visbreaking	10,000-12,000

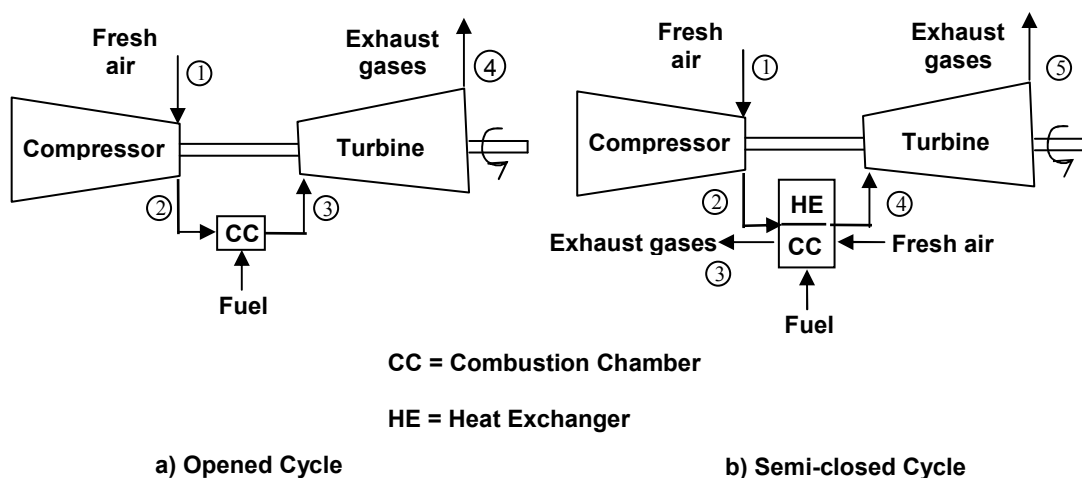
การออกแบบเตาเผาไหม้ที่ประหยัดที่สุดจะใช้ค่าความยาวท่อสูงสุดที่สามารถสอดคล้องกันได้ (Compatible) กับภาคตัดขวางเตา และที่ให้ระยะห่าง (Clearance) ระหว่างท่อและหัวพันไฟที่เพียงพอ แม้ว่าท่อยาว 40 ฟุตจะเป็นขอบเขตปกติมากกว่าก็ตาม แต่ในบางหน่วยกลับใช้ท่อยาวถึง

60 ฟุต ในหม้อต้มไอน้ำนั้นความยาวท่อ (Tube lengths) (ส่วนที่แซ่ในการแผ่รังสี) อาจยาวกว่าปกติได้

2.2 เทอร์โมไดนามิกส์ของเครื่องยนต์เทอร์โบ [12-13]

2.2.1 วัฏจักรเบรตันอุดมคติ (The ideal Brayton Cycle)

เครื่องยนต์ก๊าซเทอร์โบมีระบบวงจรเปิดและระบบวงจรกึ่งปิดมีองค์ประกอบต่างๆ เหมือนกันเกือบทั้งหมด ต่างกันเพียงตรงที่กระบวนการป้อนความร้อนสู่ระบบการทำงานเท่านั้น จากรูปที่ 2.10 ประกอบจะเห็นว่าในระบบวงจรเปิดจะมีการเชื้อเพลิงเหลวหรือก๊าซที่สะอาดเข้าไปเผาไหม้ตรงๆ กับอากาศที่อัดด้วยเครื่องอัดอากาศ ได้ก๊าซไอเสียร้อนไปผ่านเทอร์โบไบน์ตรงๆ ในขณะที่ในระบบกึ่งวงจรปิด เชื้อเพลิงซึ่งเป็นของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซก็ได้ สะอาดหรือไม่สะอาดก็ได้ เข้าไปเผาไหม้กับอากาศส่วนหนึ่งในห้องเผาไหม้ เมื่อเกิดความร้อนขึ้นความร้อนถ่ายเทเข้าสู่อากาศอัดตัวที่มาจากเครื่องอัดอากาศ (Compressor) ทำให้อากาศร้อนขึ้นและไปขยายตัวผ่านเทอร์โบไบน์



รูปที่ 2.10 เปรียบเทียบองค์ประกอบต่างๆ ของเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์โบ

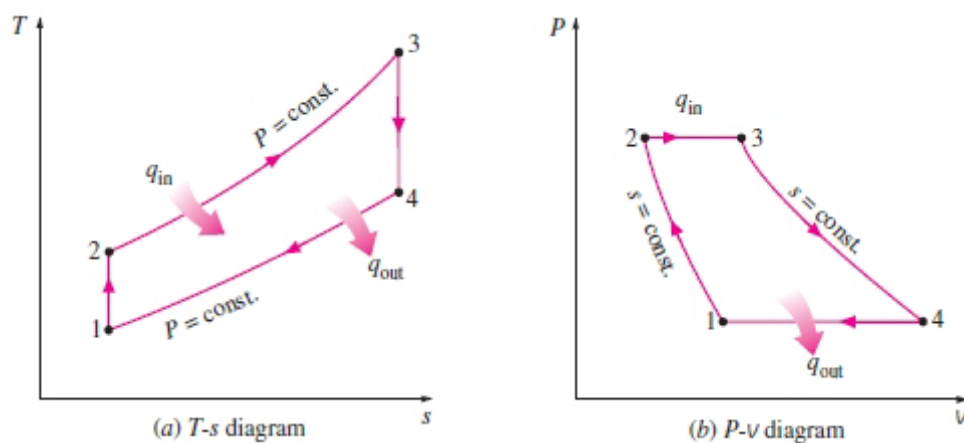
ระบบวงจรเปิด (a) กับระบบวงจรกึ่งปิด (b)

เครื่องยนต์ก๊าซเทอร์โบอุดมคติที่กำลังทำงานบนวงจรเบรตันอุดมคติ (The ideal Brayton cycle) ประกอบด้วยกระบวนการทำงานอย่างภายในย่อยๆ 4 กระบวนการที่แสดงด้วยไดอะแกรม $T-s$ ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.11 ได้แก่

- 1-2 กระบวนการอัดตัวแบบเอ็นโทรปีเท่าในตัวอัดอากาศ
- 2-3 กระบวนการเติมความร้อนที่ความดันคงที่ในห้องเผาไหม้

3-4 กระบวนการขยายตัวแบบเอ็นโทรปีเท่าในตัวเทอร์โบ

4-1 กระบวนการระบายความร้อนสู่สภาพแวดล้อมที่ความดันคงที่



รูปที่ 2.11 ไดอะแกรม $T-s$ และ $P-v$ แสดงกระบวนการเปลี่ยนแปลงย่อยๆ ที่เกิดขึ้นบนองค์ประกอบต่างๆ ที่กำลังทำงานของเครื่องยนต์เทอร์โบ [13]

1. กระบวนการอัดอากาศในตัวอัดอากาศจาก 1 → 2 เป็นการทำให้อากาศมีความดันสูงขึ้นเป็น P_2 ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าอุณหภูมิของอากาศจะเพิ่มขึ้นด้วย กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่เอ็นโทรปีคงที่ ก็คืออัตราส่วนการเพิ่มอุณหภูมิเท่ากับอัตราส่วนการเพิ่มความดันยกกำลังด้วยตัวคงที่

$$\frac{T_2}{T_1} = \left[\frac{P_2}{P_1} \right]^{(k-1)/k} \quad \text{โดยที่ } k = \frac{C_p}{C_v} \quad (2.18)$$

สำหรับแต่ละสาร พลังงานที่ใช้ในการบีบอัดอากาศเพื่อเพิ่มความดันมีค่าเท่ากับ

$$W_{comp} = c_{p_n}(T_2 - T_1) \quad (2.19)$$

2. กระบวนการเพิ่มความร้อนให้กับสารทำงานที่ความดันคงที่ 2 → 3 เป็นกระบวนการที่สารทำงานดูดความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงเข้าไปทำให้เอ็นโทรปีสูงขึ้นดังสมการ

$$q_{in} = q_{23} = h_3 - h_2 = C_p(T_3 - T_2) \quad (2.20)$$

3. กระบวนการขยายตัวทางความร้อนผ่านใบพัดเทอร์โบแบบเอ็นโทรปีคงที่ ก๊าซร้อนที่มีทั้งอุณหภูมิและความดันสูง พลังงานจลน์สูงจะไปไหลดบนใบพัดเทอร์โบถ่ายเทพลังงานจลน์ของมันให้กับใบพัดเทอร์โบหมุนอุณหภูมิและความดันของก๊าซจึงลดลง ดังสมการ

$$\frac{T_3}{T_4} = \left[\frac{P_3}{P_4} \right]^{(k-1)/k} \quad (2.21)$$

งานเพลที่ได้จากเทอร์โบไบน์หาจากสมการ

$$W_{tur} = C p_m (T_3 - T_4) \quad (2.22)$$

4. กระบวนการปล่อยความร้อนสู่สภาวะแวดล้อมที่ความดันคงที่ $4 \rightarrow 1$ เป็นกระบวนการสมมุติที่ก๊าซร้อนที่ออกจากเทอร์โบไบน์ปล่อยความร้อนบรรยากาศ ขณะที่ก๊าซเย็นจากบรรยากาศถูกดูดเข้าสู่ตัวอัดอากาศความร้อนที่ถ่ายเท คือ

$$q_{out} = -q_{41} = h_4 - h_1 = C p_m (T_4 - T_1) \quad (2.23)$$

$$\begin{aligned} \text{*งานสุทธิที่ได้จากเครื่องยนต์เทอร์โบไบน์} &= W_{turb} - W_{comp} = q_{in} - q_{out} = W_{net} \\ &= \text{area } 1234 / \text{area } 2356 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{*ประสิทธิภาพทางความร้อน: } \eta_{th, Brayton} &= \frac{W_{net}}{q_{in}} = \frac{q_{in} - q_{out}}{q_{in}} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}} \\ &= 1 - \frac{C p_m (T_4 - T_1)}{C p_m (T_3 - T_2)} \end{aligned} \quad (2.24)$$

เนื่องจาก กระบวนการ 1-2 และ 3-4 เป็นกระบวนการที่เ็นโทรปีคงที่ทั้งคู่ และ $P_2 = P_3$ กับ $P_4 = P_1$ ดังนั้น $C p_m$ ในสมการ 2.24 จึงเท่ากันและได้ว่า

$$\begin{aligned} \frac{T_2}{T_1} &= \left[\frac{P_3}{P_4} \right]^{(k-1)/k} = \frac{T_3}{T_4} \quad \text{หรือ} \\ \frac{T_4}{T_1} &= \frac{T_3}{T_2} \end{aligned} \quad (2.25)$$

สมการ (2.24) จะลดรูปเป็น

$$\eta_{th, Brayton} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

เมื่ออาศัยสมการ (2.25) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \eta_{th, Brayton} &= 1 - \frac{T_1}{T_2} \\ &= 1 - \left[\frac{P_1}{P_2} \right]^{(k-1)/k} = 1 - \frac{1}{\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(k-1)/k}} \end{aligned}$$

$$\eta_{th, Brayton} = 1 - \frac{1}{(R_p)^{(k-1)/k}} \text{ เมื่อ } R_p = \left[\frac{P_2}{P_1} \right] = \text{อัตราส่วนการอัดอากาศ} \quad (2.26)$$

เมื่อสภาวะ $2a$ และ $4a$ เป็นสภาวะของก๊าซที่ทางออกจากเครื่องอัดอากาศ และเทอร์ไบน์จริง ส่วนสภาวะ $2s$ และ $4s$ เป็นสภาวะไอเซนโทรปิก (Isentropic) ที่สมนัยกับสภาวะที่เกิดขึ้นจริง $2a$ และ $4a$ ตามลำดับ

สำหรับเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์ไบน์จริงสามารถคำนวณประสิทธิภาพเชิงความร้อน (η_{th}) และงานที่ได้ (work output) ภายใต้สภาวะการทำงานของอุปกรณ์ประกอบต่างๆ ที่ละตัว เริ่มจาก Compressor สามารถคำนวณอุณหภูมิอากาศขาออก และงานที่ทำจริงในการอัดอากาศได้จากการดัดแปลงสมการ (2.18) และ (2.19) ดังนี้

$$T_2 = T_1 \times R_p^{\frac{(k-1)}{k}} \cdot \frac{1}{n_c} \quad (2.29)$$

$$W_{comp} = \frac{1}{\eta_{mc}} (h_{2a} - h_{1a}) \quad \text{โดยที่ } \eta_m = \text{ประสิทธิภาพเชิงกล} \quad (2.30)$$

ที่ combustion chamber สามารถคำนวณอัตราส่วนอากาศ/เชื้อเพลิง ($Air/fuel \text{ ratio} = \alpha_{GT}$) ได้โดยทำสมดุลพลังงานรอบๆ ห้องเผาไหม้ (CC) โดยอ้างอิงกับ 1 kg ของอากาศที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้ ใช้คุณสมบัติอ้างอิงของการเกิดปฏิกิริยาที่ 298 K อุณหภูมิเผาไหม้เท่ากับ T_{3a} ใช้ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (η_b) ของห้องเผาไหม้เท่ากับ 98% ค่าเอ็นโทรปีของเชื้อเพลิงใช้สมการของ zetala คือ

$$H_f = 2.42T_f - 478.8$$

สมดุลพลังงานเข้าและออกจากห้องเผาไหม้

$$\left[1 + \frac{1}{\alpha_{GT}} \right] \times [H_{3a}^T - H_{3a}^{298}] = [H_{2a}^T - H_{2a}^{298}] + \frac{(H_f^T - H_f^{298})}{\alpha_{GT}} + \frac{T_n \eta_{bGT}}{\alpha_{GT}} \quad (2.31)$$

$$\therefore \alpha_{GT} = \frac{T_n \mu_{bGT} + (H_f^T - H_f^{298}) - (H_{3a}^T - H_{3a}^{298})}{(H_{3a}^T - H_{3a}^{298}) - (H_{2a}^T - H_{2a}^{298})} \quad (2.32)$$

เมื่อก๊าซร้อนถ่ายเทความร้อนสู่อากาศของระบบเทอร์ไบน์ผ่านผนัง heat exchanger โดยระบบถ่ายเทความร้อนทั้ง 3 โหมด ได้แก่ การแผ่รังสีความร้อน การพาและการนำความร้อนทำให้อุณหภูมิของอากาศร้อนขึ้นจาก T_{2a} เป็น T_{4a} ในขณะที่อุณหภูมิเปลวไฟของก๊าซร้อนลดจาก T_{3a} เหลือ T_{6a}

Heat exchanger effectiveness (ε) เท่ากับ

$$\varepsilon = \frac{T_{4a} - T_{2a}}{T_{3a} - T_{2a}} = \frac{Cp(T_{4a} - T_{2a})}{Cp(T_{3a} - T_{2a})} \quad (2.33)$$

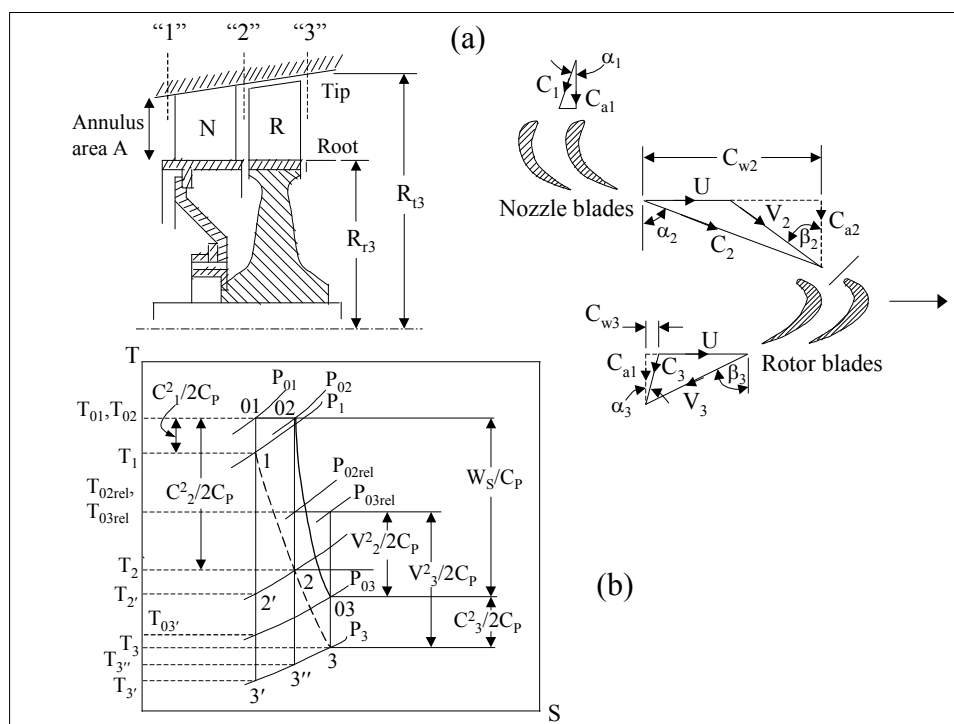
อากาศร้อน T_{4a} ขยายตัวผ่านเทอร์ไบน์ จากอุณหภูมิ T_{4a} ลดเหลือ T_{5a} เราสามารถคำนวณ อุณหภูมิอากาศขาออกจากเทอร์ไบน์และงานเพลาดังสมการต่อไปนี้

$$T_{5a} = \frac{T_{4a}}{\left(R_p\right)^{\frac{k-1}{k}} \cdot \eta_{pGT}} \quad (2.34)$$

$$W_{GT} = \left[1 + \frac{1}{\alpha_{GT}}\right] \times [H_{4a} - H_{5a}] \times \eta_{mGT} \quad (2.35)$$

2.3 อากาศพลศาสตร์ของเทอร์ไบน์แบบไหลตามแกน (Aerodynamics of Axial Flow Turbine) [14]

2.3.1 ทฤษฎีเบื้องต้นของเทอร์ไบน์แบบไหลตามแกน (axial flow turbine)



รูปที่ 2.13 1 สเตจของเทอร์ไบน์แบบไหลตามแกน [14]

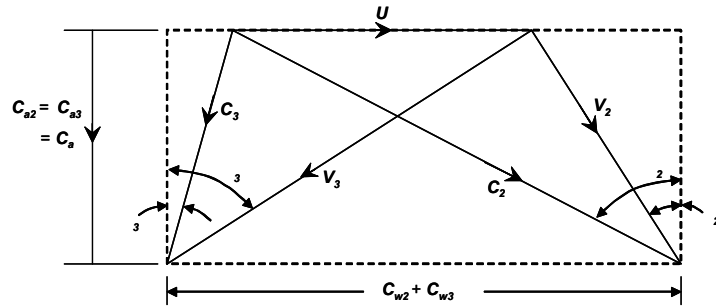
รูปที่ 2.13 แสดงสามเหลี่ยมความเร็ว (Velocity triangles) สำหรับเทอร์ไบน์แบบไหลตามแกน (axial flow turbine) ขนาด 1 สเตจ (stage) ตัวหนึ่ง พร้อมชื่อเรียกเวกเตอร์ต่างๆ ก๊าซซึ่งมีอุณหภูมิสถิตย (static temperature) T_1 ความดันสถิตย (Static pressure) p_1 และความเร็วสมบูรณ์ (absolute velocity) C_1 ขยายตัวผ่านแฉาบพัดนิง (nozzle blades) ไปที่สถานะ T_2 กับ p_2 และทั้งแฉาบพัดนิงไปด้วยความเร็วสมบูรณ์ C_2 ที่มุม α_2 มุมที่ทางเข้าแฉาบพัดนุน (Rotor

blade inlet angle) β_2 จะต้องถูกเลือกเพื่อให้ได้ทิศทางของความเร็วสัมผัสของก๊าซที่สัมผัสกับความเร็วของใบพัดที่ทางเข้า คือ V_2 ที่เหมาะสมเราสามารถหา β_2 และ V_2 ได้จากการลบของเวกเตอร์ความเร็วของใบพัด U ออกจากความเร็วสมบูรณ์ของก๊าซ C_2 หลังจากการถูกกระทบและการถูกกระจายเลยต่อไปในช่องทางของใบพัดหมุน ก๊าซจะออกจากใบพัดหมุนที่ T_3 กับ p_3 ด้วยความเร็วสัมผัส V_3 ที่มุม β_3 การรวมทางเวกเตอร์ของ U กับ V_3 จะได้ขนาดและทิศทางของความเร็วสมบูรณ์ของก๊าซที่ทางออกจากสเตจของเทอร์ไบน์เป็น C_3 และ α_3 ซึ่ง α_3 นี้ถูกเรียกว่ามุมของการส่าย (swirl angle)

ในเทอร์ไบน์ 1 สเตจ (single stage turbine) ตัวหนึ่ง C_1 จะอยู่ในแนวตามแกน อย่างเช่น $\alpha_1 = 0$ และ $C_1 = C_a$ (หมายถึงจากห้องเผาไหม้ก๊าซวิ่งมาตรงๆ สู่แนวใบพัดเทอร์ไบน์) แต่ถ้าเป็นเทอร์ไบน์หลายตอน (Multi-stage turbine) C_1 และ α_1 จะเท่ากับ C_3 และ α_3 เพื่อว่าจะสามารถใช้รูปร่างใบพัดเหมือนกันในตอนต่างๆ ที่ต่อเนื่องกันไปของเทอร์ไบน์ได้ ดังนั้นบางครั้งจึงถูกเรียกว่า สเตจซ้ำ (Repeating stage) เนื่องจากความเร็วใบพัด U (เป็นความเร็วเชิงเส้น) เพิ่มตามการเพิ่มขึ้นของรัศมีใบพัด ดังนั้นรูปร่างของสามเหลี่ยมความเร็วจะแปรเปลี่ยนตั้งแต่โคน (Root) จนถึงปลาย (Tip) ใบพัด จะสมมุติในส่วนนี้ว่ากำลังกล่าวถึงสภาวะต่างๆ ตรงเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย (ระหว่างโคนกับปลายใบพัด) ของช่องทางวิ่งวงแหวน (Annulus) ที่ก๊าซวิ่ง และจะสมมุติด้วยการไหลเชิงมวลทั้งหมด m ของก๊าซมีความหนาแน่นสม่ำเสมอตั้งแต่โคนถึงปลายใบพัดขณะที่ผ่านสเตจต่างๆ ของเทอร์ไบน์ การเข้าสู่คำตอบ (approach) โดยการสมมุติเช่นนี้จะมีเหตุผลได้ต่อเมื่ออัตราส่วนความยาวรัศมีปลายต่อโคนใบพัด (Tip-to-root ratio) มีค่าต่ำ เช่น กรณีใบพัดสั้นสำหรับกรณีใบพัดยาวจำเป็นจะต้องแสดงผลการไหล 3 ทิศทาง ดังกล่าวต่อไป

$(C_{w2} + C_{w3})$ แทนการเปลี่ยนขององค์ประกอบในแนวส่าย (swirl component) ของโมเมนตัมต่อหน่วยการไหลของก๊าซซึ่งเป็นตัวผลิตแรงบิดที่เป็นประโยชน์ (useful torque) การเปลี่ยนขององค์ประกอบแนวแกน คือ $(C_{a2} - C_{a3})$ จะเป็นตัวผลิตแรงดันแนวแกน (Axial thrust) ให้กับส่วนหมุน (Rotor) ของเทอร์ไบน์ ซึ่งได้มาจากรายจ่ายของแรงดันก๊าซที่กำลังลดลงไปเพราะความดันลด $(p_2 - p_3)$ ในเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์ไบน์แรงดันแนวแกนสุทธิ (Net thrust) บนส่วนหมุนของเทอร์ไบน์ (Turbine rotor) จะถูกดุลย์ไปบางส่วนด้วยแรงดันแนวแกนบนส่วนหมุนของเครื่องอัดอากาศ (Compressor rotor) จึงไม่ต้องการใช้ตัลบลูกปืนประเภทรับแรงแนวแกนสูง (Large thrust bearings) ต่อไปจะให้ความสนใจกับการออกแบบเทอร์ไบน์ที่มีความเร็วการไหลแนวแกน คือ C_a คงที่ตลอดแนวส่วนหมุน กล่าวสิ่งนี้เพื่อจะบอกเป็นนัยว่าช่องทางวิ่งวงแหวน (Annulus) จะต้องถูกฉายออกอย่างในรูปที่ 2.13 (a) เพื่อให้ความหนาแน่นก๊าซลดลงขณะ

ขยายตัวผ่านสเตจนั้นของเทอร์ไบน์ ด้วยข้อจำกัดนี้ทำให้เมื่อนำสามเหลี่ยมความเร็วของทั้งส่วนนิ่ง และส่วนหมุนของสเตจนี้มาซ้อนทับกันตามวิธีปกติจะได้สามเหลี่ยมความเร็วสำหรับสเตจเป็นดัง รูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ไดอะแกรมแสดงเวกเตอร์ต่างๆ ของความเร็วก๊าซและใบพัด [14]

ซึ่งสามารถอ่านความสัมพันธ์ต่อไปนี้ออกมาจากไดอะแกรมที่มีรูปร่างได้ดังในรูปที่ 2.14

$$\frac{U}{C_a} = \tan \alpha_2 - \tan \beta_2 = \tan \beta_3 - \tan \alpha_3 \quad (2.36)$$

การประยุกต์ใช้หลักการโมเมนตัมเชิงมุมเข้ากับส่วนหมุน (Rotor) จะทำให้ได้งานออกมา (Work output) ต่อหน่วยอัตราการไหลเป็น

$$W_S = U(C_{w2} + C_{w3}) = UC_a(\tan \alpha_2 + \tan \alpha_3)$$

เมื่อนำไปเชื่อมกับสมการที่ (2.36) เราจะได้ W_S ในเทอมของมุมต่างๆ ของก๊าซที่เกี่ยวข้องกับ เฉพาะใบพัดของ rotor เป็น

$$W_S = UC_a(\tan \beta_2 + \tan \beta_3) \quad (2.37)$$

โปรดสังเกตว่า ไม่มีความจำเป็นต้องใช้แฟกเตอร์งาน (Work-done factor) เหมือนที่เคยถูกใช้ มาแล้วในกรณีการออกแบบเครื่องอัดอากาศแบบไหลตามแนวแกนในตอนนี้นี้ ทั้งนี้เพราะว่าในการ ไหลแบบเร่ง (Accelerating flow) นั้น ผลของการโตขึ้นของชั้นขอบเขต (Boundary layer) ตาม แนวผนังของช่องทางวิ่งวงแหวนน้อยกว่าเมื่อมีการไหลแบบหน่วง (Decelerating flow) ที่มี Pressure gradient ตรงข้าม ค่อนข้างมาก

จากสมการพลังงานของการไหลแบบคงที่ตามเวลา $W_S = C_p \Delta T_{0s}$ โดยที่ ΔT_{0s} = ส่วนลด ของอุณหภูมินิ่ง (Stagnation temperature drop) ของก๊าซที่มีความเร็วในสเตจนี้ ดังนั้น

$$C_p \Delta T_{0s} = UC_a(\tan \beta_2 + \tan \beta_3) \quad (2.38)$$

เมื่อความเร็วก๊าซที่ทางเข้าและทางออกสเตจมีค่าเท่ากัน เช่น $C_1 = C_3$ สมการที่ (2.38) จะ ให้ส่วนลดของอุณหภูมิสถิตย (Static temperature drop) ΔT_S ของสเตจนี้ด้วย ในการคำนวณ

เกี่ยวกับเทอร์ไบน์ส่วนใหญ่เราจะใช้ค่าความร้อนจำเพาะ (Specific heat) C_p และค่าอัตราส่วนความร้อนจำเพาะ (Specific heat ratio) γ ของก๊าซไอเสียจากการเผาไหม้คร่าวๆ เป็นค่าใกล้เคียงกับของอากาศ ได้แก่ $C_p = 1.148 \text{ kJ/kg K}$ และ $\gamma = 1.333$ หรือ $\gamma/\gamma - 1 = 4$ และโปรดสังเกตว่าค่าเหล่านี้สอดคล้องกับค่าคงที่ของก๊าซ $R = 0.287 \text{ kJ/kg K}$ ค่าเหล่านี้เพียงพอสำหรับการคำนวณเพื่อการออกแบบเบื้องต้น ซึ่งสามารถใช้ได้กับการออกแบบในงานวิจัยนี้ได้และด้วยความเร็วในหน่วยเมตรต่อวินาที (m/s) เราสามารถหา ΔT_{0s} ในหน่วยเคลวิน (Kelvin) ได้อย่างสะดวกโดยสมการ

$$\Delta T_{0s} = 8.72 \left(\frac{U}{100} \right) \left(\frac{C_a}{100} \right) (\tan \beta_2 + \tan \beta_3) \quad (2.39)$$

สามารถหาอัตราส่วนความดันนิ่ง (Stagnation pressure ratio) ของสเตจ ซึ่งคือค่า p_{01}/p_{03} ได้จาก

$$\Delta T_{0s} = \eta_s T_{01} \left[1 - \left(\frac{1}{p_{01}/p_{03}} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right] \quad (2.40)$$

โดยที่ η_s = ประสิทธิภาพของสเตจแบบเอ็นโทรปีคงที่ (Isentropic stage efficiency) ที่ถูกอ้างอิงบน Stagnation temperature (หรือบางคนเรียกว่า Total temperature) บ่อยครั้งที่ค่า η_s ถูกเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า ประสิทธิภาพของสเตจแบบ total-to-total (Total-to-total stage efficiency) ซึ่งเป็นตัวประสิทธิภาพที่เหมาะสมต่อการใช้ ถ้าสเตจนั้นของเทอร์ไบน์มีสเตจอื่นๆ รองรับต่อไป นั่นคือ เป็นแบบหลายสเตจ (Multi-stage turbine) ทั้งนี้เนื่องจากพลังงานจลน์ ($C_3^2/2$) ที่ออกจากสเตจหนึ่งๆ สามารถถูกใช้ประโยชน์ในสเตจถัดไปได้ และถ้าสเตจนี้เป็นส่วนของเครื่องยนต์เทอร์โบเจ็ทแม้จะมีสเตจเดียวก็ยังสามารถใช้ได้ เพราะพลังงานจลน์ของก๊าซร้อนที่กำลังปล่อยจากแฉวยพัดหมุนถูกใช้ต่อในแฉวยพัดนิ่งเพื่อการขับเคลื่อน (Propelling nozzle) ซึ่งคล้ายกับว่าเป็นสเตจสุดท้ายของโรงงานอุตสาหกรรมที่กำลังปล่อยก๊าซร้อนสู่บรรยากาศ พลังงานจลน์ที่กำลังปล่อยออกไปถูกกักเก็บคืนในตัวกระจายลม (Diffuser) หรือ ก้นหอย (Volute) เราจึงสามารถใส่ $p_{03} = p_a$ และยอมรับ η_s เป็นตัวประสิทธิภาพรวม (Combined efficiency) ของสเตจสุดท้ายกับตัวกระจายลมได้ สำหรับประสิทธิภาพเอ็นโทรปีคงที่แบบ total-to-static (total-to-static isentropic efficiency) แม้ว่าเราจะไม่ใช้มันแต่ถ้าจะใช้ก็ควรจะจดจำว่าบางครั้งไม่ควรใช้สำหรับเทอร์ไบน์ตัวหนึ่งเป็นส่วนรวม และสำหรับที่มีสเตจเดียวและมันน่าจะถูกใช้ในที่ซึ่งมีการแยกการ

สูญเสียที่เทอร์ไบน์กับที่ตัวกระจายไอเสีย (exhaust diffuser) ออกจากกัน เมื่อมันถูกประยุกต์ใช้กับสแตกๆ หนึ่ง เราจะมี

$$\text{ประสิทธิภาพแบบรวมต่อสถิตย (total-to-static efficiency)} = \frac{T_{01} - T_{03}}{T_{01} - T_3'}$$

โดยที่ $T_3' =$ อุณหภูมิสถิตยที่ลงมาถึง หลังการขยายตัวของก๊าซแบบเอ็นโทรปีเท่าจากความดัน p_{01} ถึง p_3 คาดการณ์ได้ว่า ทรายเท่าที่ยังเกี่ยวข้องกับตัวเทอร์ไบน์เป็นการเฉพาะ พลังงานจลน์ทั้งหมดของก๊าซที่กำลังออกจากเทอร์ไบน์ก็จะถูกปล่อยทิ้งเลย (เนื่องจากไม่มี diffuser มาต่อท้าย) และค่าของประสิทธิภาพตัวนี้ค่อนข้างจะน้อยกว่าประสิทธิภาพแบบทั้งหมดต่อทั้งหมด (total-to-total efficiency) ซึ่งเป็นตัวที่เราจะใช้ในบ้นี้

ในการออกแบบเทอร์ไบน์จะมีพารามิเตอร์ที่เป็นประโยชน์อยู่ 3 พารามิเตอร์ คือ พารามิเตอร์แรก (ซึ่งบอกขนาดความจุการทำงานของสแตกหนึ่งๆ) ถูกเรียกว่า สัมประสิทธิ์การไหลพลังงานไปบนใบพัด (Blade loading coefficient) หรือบางทีเรียกว่า สัมประสิทธิ์การลดอุณหภูมิ (Temperature drop coefficient) ใช้สัญลักษณ์เป็น Ψ โดยเราจะนิยามเป็น $C_p \Delta T_{0s} / 1/2 U^2$ หรือบางครั้งอาจนิยามเป็น $C_p \Delta T_{0s} / U^2$ ด้วยก็ตาม ด้วยเหตุนี้เมื่ออาศัยสมการที่ 2.38 จะได้

$$\Psi = \frac{2C_p \Delta T_{0s}}{U^2} = \frac{2C_a}{U} (\tan \beta_2 + \tan \beta_3) \quad (2.41)$$

พารามิเตอร์ที่เป็นประโยชน์อีกตัวหนึ่ง คือ ระดับของการเปลี่ยนแปลง (Degree of reaction) ใช้สัญลักษณ์ว่า A พารามิเตอร์ตัวนี้แสดงสัดส่วนการขยายตัวที่เกิดในส่วนหมุน (Rotor) ต่อการขยายตัวทั้งหมดหนึ่งสแตก และตามปกติแล้วจะนิยามในเทอมของส่วนลดของอุณหภูมิสถิตยหรือของเอนทัลปี (Temperature or enthalpy drops) ค่อนข้างจะมากกว่า ส่วนลดของความดัน (Pressure drop) ดังนี้

$$A = \frac{T_2 - T_3}{T_1 - T_3}$$

สำหรับชนิดของสแตกในรูปที่ 2.13 ที่เรากำลังพิจารณา ซึ่ง $C_{a2} = C_{a3} = C_a$ และ $C_3 = C_1$ นั้น สมการง่ายๆ อันหนึ่งสำหรับ A สามารถดัดแปรสืบเนื่องมาจากสมการที่ (2.39) ได้ดังนี้

$$C_p (T_1 - T_3) = C_p (T_{01} - T_{03}) = U C_a (\tan \beta_2 + \tan \beta_3)$$

ถ้าสัมพันธ์กับใบพัดหมุนแล้ว ถือว่าการไหลของก๊าซไม่ได้ทำงาน และดังนั้นสมการพลังงานของการไหลแบบสม่ำเสมอตามเวลา (steady flow) จะให้

$$\begin{aligned}
C_p(T_2 - T_3) &= \frac{1}{2}(V_3^2 - V_2^2) \\
&= \frac{1}{2}C_a^2(\sec^2 \beta_3 - \sec^2 \beta_2) \\
&= \frac{1}{2}C_a^2(\tan^2 \beta_3 - \tan^2 \beta_2)
\end{aligned}$$

และด้วยเหตุนี้

$$A = \frac{C_a}{2U}(\tan \beta_3 - \tan \beta_2) \quad (2.42)$$

พารามิเตอร์ไร้หน่วยตัวที่ 3 ซึ่งถูกอ้างถึงบ่อยๆ ในการออกแบบกังหันเทอร์ไบน์ปรากฏอยู่ในสมการทั้งคู่ ทั้งสมการที่ (2.41) และ (2.42) กล่าวคือ เป็นอัตราส่วน C_a/U ซึ่งถูกเรียกว่า สัมประสิทธิ์การไหล (Flow coefficient) ใช้สัญลักษณ์ว่า ϕ [ซึ่งแสดงบทบาทเหมือนกับอัตราส่วนความเร็วใบพัด (Blade speed ratio) U/C_a ซึ่งถูกใช้โดยนักออกแบบกังหันไอน้ำ] ด้วยเหตุนี้สามารถเขียนสมการที่ (2.41) และ (2.42) ใหม่ได้เป็น

$$\Psi = 2\phi(\tan \beta_2 + \tan \beta_3) \quad (2.43)$$

$$A = \frac{\phi}{2}(\tan \beta_3 - \tan \beta_2) \quad (2.44)$$

ถึงตอนนี้ สามารถแสดงมุมต่างๆ ของกังหันในเทอมของ Ψ , A และ ϕ ได้ดังต่อไปนี้ การบวกและลบสมการ (2.43) และ (2.44) ครั้งละสมการ จะได้

$$\tan \beta_3 = \frac{1}{2\phi} \left(\frac{1}{2}\Psi + 2A \right) \quad (2.45)$$

$$\tan \beta_2 = \frac{1}{2\phi} \left(\frac{1}{2}\Psi - 2A \right) \quad (2.46)$$

เมื่อใช้สมการที่ (2.36) เข้ามาช่วยเราจะได้

$$\tan \alpha_3 = \tan \beta_3 - \frac{1}{\phi} \quad (2.47)$$

$$\tan \alpha_2 = \tan \beta_2 + \frac{1}{\phi} \quad (2.48)$$

แม้ด้วยข้อจำกัดที่เราได้เสนอไปแล้วว่า $C_{a3} = C_{a2}$ และ $C_3 = C_1$ และด้วยการจดจำว่าการพิจารณาที่เน้นหนักจะเป็นการวางข้อจำกัดไปที่ความเร็วใบพัด U แต่ก็ยังคงมีทางเลือกอื่นอย่างไม่จำกัดที่กำลังเผชิญต่อนักออกแบบ ตัวอย่างเช่น แม้ว่าจะกำหนดให้อุณหภูมิผลิตของเทอร์ไบน์โดยรวม (Overall turbine temperature drop) คงที่โดยการคำนวณเป็นวัฏจักร แต่มันก็ยังเปิดต่อ

นักออกแบบว่าจะเลือกมี 1 หรือ 2 สเตจของค่า Ψ ที่มีค่าสูง หรือจะเลือกหลายสเตจแต่มีค่า Ψ ต่ำกว่า เพื่อที่จะจำกัดการตกปัญหา ณ จุดนี้ของเราให้เดินหน้าต่อไป เราอาจสังเกตว่าเทอร์ไบน์ก๊าซบางตัวสำหรับโรงผลิตไฟฟ้าเป็นเครื่องจักรอัตราส่วนความดันต่ำ (Low pressure ratio machine) เมื่อเทียบกับมาตรฐานของเทอร์ไบน์ไอน้ำ (เช่น ในขอบเขตของ 10 : 1 เมื่อถูกเทียบกับของเทอร์ไบน์ไอน้ำที่มากถึง 1000 : 1 สำหรับวัฏจักรที่กำลังปฏิบัติการในระดับความดันไอน้ำต่ำกว่าความดันวิกฤติ (Subcritical steam pressures) ด้วยเหตุนี้จึงมีกรณีสำหรับรับเอาสเตจชนิดกระตุ้น (Impulse stages) คือ $A=0$ ซึ่งพบการใช้ที่ปลายแรงดันสูงของเทอร์ไบน์ไอน้ำมาใช้ค่อนข้างน้อย เทอร์ไบน์ชนิดกระตุ้น (Impulse designs) เป็นชนิดที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดสำหรับการใช้งานที่ความดันสูงๆ เนื่องจากภายใต้สภาวะเช่นนั้น ความสูญเสียจากการรั่ว (Leakage losses) ที่เกี่ยวข้องกับช่องว่างที่ปลายใบพัดหมุน (Rotor blade tip clearance) เกินกว่าในสเตจที่เปลี่ยนแปลง (Reaction stages) ต้องจำไว้ว่าที่ปลายแรงดันสูงของการขยายตัวอัตราส่วนแรงดันจะสูง ความแตกต่างของแรงดันสเตจมีค่าน่าพิจารณาแม้ว่าอัตราส่วนความดันของสเตจนั้นจะไม่มากนักก็ตาม ดังนั้นถ้าให้ลดตัดค่า A ที่ใกล้ศูนย์ออกไปก่อน และสำหรับความต้องการ moment ลองพิจารณาการออกแบบที่ใช้ค่า reactions ที่ 50 เปอร์เซ็นต์ ($A = 50\%$) ความรู้ทั่วไปของเราเกี่ยวกับพฤติกรรมตามธรรมชาติอาจช่วยแนะนำได้ว่า สามารถบรรลุผลสำเร็จในการออกแบบที่มีประสิทธิภาพสูงสุดได้เมื่อมีการแบ่งสัดส่วนการขยายตัวของก๊าซในแถวใบพัดหนึ่งและในแถวใบพัดหมุนอย่างเท่าเทียมกัน เราจะเห็นในภายหลังว่า reaction นี้จะผันแปรตั้งแต่โคนถึงปลายใบพัด แต่ที่นี้เรากำลังคิดใช้ค่า reaction เท่ากับ 50 % และเป็น reaction ตรงเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (คือ ตรงกึ่งกลางของโคนและปลายใบพัด)

ใส่ $A = 0.5$ ในสมการที่ (2.44) จะมี

$$\frac{1}{\phi} = \tan \beta_3 - \tan \beta_2 \quad (2.49)$$

เมื่อเปรียบเทียบสมการนี้ตรงๆ กับความสัมพันธ์ตามสมการที่ (2.36) จะได้ว่า

$$\beta_3 = \alpha_2 \quad \text{และ} \quad \beta_2 = \alpha_3 \quad (2.50)$$

กรณีเช่นนี้สามเหลี่ยมความเร็วจะกลายเป็นสมมาตร ยิ่งไปกว่านั้นถ้าเรากำลังพิจารณาสเตจเข้าอันหนึ่ง ที่มี $C_3 = C_1$ ทั้งทิศทางและขนาด เราจะได้ว่า $\alpha_1 = \alpha_3 = \beta_2$ ด้วย ถ้าเช่นนั้นใบพัดหนึ่งกับใบพัดหมุนจะมีมุมทางเข้าและมุมทางออกเดียวกัน ในที่สุด จากสมการ (2.45) และสมการ (2.50) สำหรับค่า $A = 0.5$ เราจะได้

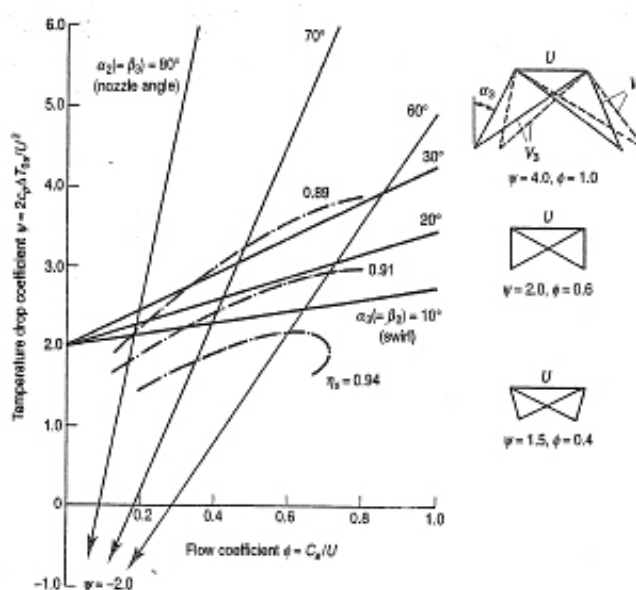
$$\Psi = 4\phi \tan \beta_3 - 2 = 4\phi \tan \alpha_2 - 2 \quad (2.51)$$

และจากสมการที่ (2.46) และ (2.50) เราจะได้

$$\Psi = 4\phi \tan \beta_2 + 2 = 4\phi \tan \alpha_3 + 2 \quad (2.52)$$

สมการที่ (2.50) (2.51) และ (2.52) ให้มุมก๊าซทุกมุมในเทอมของ Ψ และ ϕ รูปที่ 2.15 แสดงผลของการพล็อตมุมทางออกใบพัดหนึ่ง (Nozzle outlet angles) คือ α_2 กับมุมส่ายของทางออกสเตจ (Stage outlet swirl angle) คือ α_3 ไปบนฐาน $\Psi - \phi$

เนื่องจากสามารถหารูปร่างใบพัดภายในขอบเขตปิด (Close limits) เช่น อุโมงค์ลมได้ โดยศึกษามุมต่างๆ ของก๊าซที่กำลังไหลผ่านแถวใบพัด ดังนั้นมันจึงเป็นไปได้ที่จะใช้ ผลของการทดสอบการไหลของก๊าซเป็นทอดๆ (Results of cascade tests) ไปบนแถวใบพัดต่างๆ เพื่อทำนายความสูญเสีย (Losses) ที่เกิดขึ้นและเพื่อประมาณประสิทธิภาพสเตจของช่วงของแบบต่างๆ ที่ออกแบบโดยใช้ Percent reaction เท่ากับ 50% (50 percent reaction designs) ซึ่งถูกรวบรวมโดยรูปที่ 2.15 การประมาณเช่นนั้นถูกแสดงโดยคอนทัวร์ของประสิทธิภาพ (Efficiency contours) ที่ตั้งซ้อนกันไว้บนชาร์ต $\Psi - \phi$ ค่าต่างๆ ของ η_s บนคอนทัวร์แทนค่าเฉลี่ยของการกะประมาณ มีการใช้สมมุติฐานหลายอย่าง อาทิเช่นโครงร่างของใบพัด (Blade profile) อัตราส่วนความสูงต่อความยาวคอर्ड (Blade aspect ratio) ช่องห่างของปลายใบพัดกับเฟรม (Tip clearance) และอื่นๆ และไม่ควรวางใจเกี่ยวกับค่าประสิทธิภาพสเตจที่แสดงในรูป 2.15 มากนัก แม้กระนั้นยังถือว่าเป็นความรู้เกี่ยวกับแนวทางทั่วไป (General trend) ที่มีคุณค่าและมีความจำเป็นต่อการออกแบบ กราฟแสดงเส้นโค้งที่คล้ายกันสำหรับค่า reaction อื่นๆ



รูปที่ 2.15 ออกแบบโดยใช้ Percent reaction เท่ากับ 50%

อาจสังเกตได้ว่าการออกแบบที่มีค่า Ψ และค่า ϕ ต่ำ จะให้ประสิทธิภาพพลเตจ (η_s) ดีที่สุด การอ้างถึงสามเหลี่ยมความเร็วเชิงเปรียบเทียบซึ่งให้ไว้ในรูปที่ 2.15 (ถูกวาดสำหรับกรณีความเร็วใบพัด U คงที่) ทำให้เราเห็นว่าค่าต่ำๆ ของ Ψ กับ ϕ จะให้ค่าความเร็วก๊าซมีค่าต่ำ ดังนั้นจึงช่วยลดความสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทาน (Friction losses) ค่า Ψ ต่ำ หมายถึง ต้องการหลายสเตจมากกว่าในการที่จะให้ได้เอาท์พุทของเทอร์ไบน์โดยรวมตามต้องการ ขณะที่ค่า ϕ ต่ำ หมายถึง ต้องการพื้นที่ตัดขวางวงแหวน (Annulus area) ของเทอร์ไบน์ให้มากขึ้นเพื่อจะได้ปริมาณการไหลของก๊าซตามต้องการ สำหรับเครื่องยนต์เทอร์ไบน์ก๊าซในทางอุตสาหกรรมตัวหนึ่งๆ เมื่อไม่เห็นความสำคัญของขนาดและน้ำหนักมากนัก และยังให้ความสำคัญกับการกินเชื้อเพลิงต่ำ (low s.f.c.) ด้วยแล้ว มันก็อาจจะไว (sensible) ต่อการออกแบบด้วยค่า Ψ และ ϕ ที่ต่ำๆ แน่แน่นอนว่าในสเตจสุดท้ายน่าจะต้องการความเร็วแนวแกน (C_a) และมุมสาย α_3 เล็ก เพื่อควบคุมให้ความสูญเสียต่างๆ ที่เกิดขึ้นในตัวกระจายก๊าซ (Exhaust diffuser) มีค่าต่ำลง อย่างไรก็ตามมันสำคัญมากสำหรับหน่วยขับเคลื่อนอากาศยาน (Aircraft propulsion unit) ในการที่จะรักษาน้ำหนักตัวและพื้นที่ส่วนหน้า (frontal area) ให้ต่ำที่สุด จึงอาจต้องใช้ค่า Ψ และ ϕ ที่สูงกว่า การออกแบบพลเตจให้มีประสิทธิภาพสูงสุดเป็นวิธีการหนึ่งที่จะนำไปสู่การออกแบบให้ได้โรงไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูงสุดตามความมุ่งหมาย และการกล่าวถึงค่า optimum ของ Ψ กับ ϕ ก็ไม่สามารถหาโดยปราศจากการคำนวณในรายละเอียดของการปฏิบัติงาน (Performance) ของอากาศยานโดยรวม อาจจะปรากฏจากวิธีปฏิบัติของอากาศยาน (Aircraft practice) ในปัจจุบันว่า ค่า optimum สำหรับ Ψ จะอยู่ในช่วง 3 ถึง 5 ขณะที่ค่า ϕ อยู่ในช่วง 0.8 ถึง 1.0 มุมสาย (Swirl angle) ต่ำ กล่าวคือ $\alpha_3 < 20^\circ$ น่าจะเป็นที่ต้องการ เนื่องจากการสายจะไปเพิ่มความสูญเสีย (Losses) ในท่อเจ็ท (Jet pipe) และช่องขับเคลื่อน (Propelling nozzle) นั่นคือ เพื่อรักษาค่า Ψ ให้สูง และค่า α_3 ให้ต่ำไว้ตามต้องการ ซึ่งอาจจำเป็นที่จะต้องใช้ค่า Degree of reaction ที่ค่อนข้างต่ำกว่า 50% เส้นปะในสามเหลี่ยมความเร็ว สำหรับค่า $\Psi = 4$ แสดงถึงสิ่งที่เกิดขึ้นเมื่อมีการลดสัดส่วนของการขยายตัวที่ถูกดำเนินงานในส่วนหมุน (Rotor) และ V_3 จะยิ่งเท่ากับ V_2 มากขึ้น ในขณะที่กำลังรักษาค่า U ค่า Ψ และค่า ϕ ให้คงที่

ในส่วนนี้จะแสดงตัวอย่างให้เห็นถึงการออกแบบโดยใช้เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเป็นเชิงทดลองเริ่มแรก (First tentative mean-diameter design) และอธิบายค่าสูญเสีย (Loss) ต่างๆ ในแถวใบพัด มีการนำพารามิเตอร์หลัก 2 ตัว ซึ่งถูกอ้างอิงกับเทอมส่วนลดของอุณหภูมิและความดัน (Temperature and pressure drops) มาใช้อธิบาย โดยที่เราสามารถอธิบายพารามิเตอร์เหล่านี้ได้ดีที่สุดโดยการสังเกตวัฏจักรกระบวนการไหลในช่องต่างๆ (Passages) ของแถวใบพัดนิ่งและแถว

ใบพัดหมุนบนไดอะแกรม $T-s$ อย่างในรูปที่ 2.13 ด้านล่าง เส้นปะเท่าและเส้นปะสั้นยาวเชื่อมสถานะรวม (stagnation state) และสถานะสถิตย (Static state) ตามลำดับ $T_{02} = T_{01}$ เพราะว่าไม่มีการทำงานเกิดขึ้นขณะก๊าซขยายตัวผ่านช่องต่างๆ ของแถวใบพัดหนึ่ง ส่วนแนวระดับสั้นๆ ของเส้นที่บจะแทนส่วนลดความดันรวม (Stagnation pressure drop) คือ $p_{01} - p_{02}$ ที่เกิดเนื่องจากการที่ก๊าซเสียดทานกับผนังใบพัดหนึ่ง (Nozzles) ความสูญเสีย (Losses) จริงๆ อาจจะเป็นจากรูป เมื่อกำลังอยู่ที่อุณหภูมิที่สมมูลย์กับความเร็วก๊าซที่กำลังทิ้งแถวใบพัดหนึ่งออกมา เราอาจจะกล่าวได้ว่า ก๊าซนี้กำลังขยายตัวอย่างอุดมคติจาก T_{01} ถึง T_2' แต่ปรากฏว่าอุณหภูมิที่ลดจริงๆ เนื่องจากการเสียดทานจนมาถึงทางออกใบพัดหนึ่งเท่ากับ T_2 เท่านั้น ซึ่งค่อนข้างสูงกว่า T_2' สัมประสิทธิ์ความสูญเสีย (Loss coefficient) สำหรับการขยายตัวผ่านแถวใบพัดหนึ่งถูกนิยามดังนี้

$$\lambda_N = \frac{T_2 - T_2'}{C_2^2 / 2C_p} \quad \text{หรือ} \quad Y_N = \frac{p_{01} - p_{02}}{p_{02} - p_2} \quad (2.53)$$

ทั้ง λ และ Y แสดงสัดส่วนเล็กๆ ของพลังงานจลน์ทั้งหมดของก๊าซที่กำลังขยายตัวผ่านใบพัดหนึ่ง (Leaving energy) ที่สูญเสียไปเพราะการเสียดทาน เราสามารถทำการวัดค่า Y_N สัมพัทธ์ได้โดยทำ Cascade tests [โดยผลต่างๆ ที่ได้กำลังถูกดัดแปรเพื่อให้ใช้สำหรับผลกระทบ 3 มิติ (Three-dimensional effects) บนเส้นเดียวกันกับที่ได้แสดงไว้สำหรับเครื่องอัดอากาศแนวแกน (Axial compressors) ได้ด้วย] ในขณะที่สามารถใช้ λ_N ในการออกแบบได้ง่ายกว่า อย่างไรก็ตามสามารถแสดงให้เห็นได้ว่า λ_N และ Y_N ไม่มีความแตกต่างกันเชิงตัวเลขมากนัก

จากไดอะแกรม $T-s$ รูปที่ 2.13 จะเห็นว่าการขยายตัวต่อไปผ่านช่องแคบต่างๆ ของแถวใบพัดหมุน ความดันจะลดลงไปอยู่ที่ P_3 การขยายตัวแบบไอเซนโทรปิก (Isentropic expansion) โดยรวมของทั้งสแตจจะเป็นผลให้ได้อุณหภูมิสุดท้ายเป็น T_3' ถ้าพิจารณาการขยายตัวผ่านช่องแคบของแถวใบพัดหมุนเพียงอย่างเดียวอุณหภูมิจะลดไปที่ T_3'' แต่การขยายตัวที่มีการเสียดทานด้วยนำไปสู่การลดของอุณหภูมิไปที่ T_3 ความสูญเสียเมื่อผ่านแถวใบพัดหมุน (rotor blade loss) สามารถแสดงได้โดย

$$\lambda_R = \frac{T_3 - T_3''}{V_3^2 / 2C_p}$$

สังเกตได้ว่า λ_R ถูกนิยามเป็นสัดส่วนขนาดเล็กของพลังงานที่สูญเสียเนื่องจากการเสียดทานต่อพลังงานจลน์ทั้งหมดของก๊าซที่กำลังไหลผ่านใบพัดสัมพันธ์กับการหมุนของแถวใบพัดนั้น เพื่อว่ามันจะสามารถถูกทำให้สัมพันธ์กับผลจากการทำ Cascade tests ได้ เนื่องจากถ้าสัมพันธ์

กับใบพัดแล้ว ไม่มีการทำงานโดยก๊าซเกิดขึ้น ดังนั้น $T_{03rel} = T_{02rel}$ สัมประสิทธิ์ความสูญเสีย (Loss coefficient) ในเทอมของความดันลด (Pressure drop) ถูกนิยามโดย

$$Y_R = \frac{p_{02rel} - p_{03rel}}{p_{03rel} - p_3}$$

เราอาจจะแสดงให้เห็นว่า λ และ Y ไม่แตกต่างกันในเชิงตัวเลขมากนักได้ด้วยข้อโต้แย้งที่จะแสดงต่อไปนี้ (ซึ่งประยุกต์ใช้กับแถวใบพัดนิ่งและแถวใบพัดหมุนแบบเท่ากัน แม้ว่าจะถูกพิสูจน์ให้เห็นสำหรับแถวใบพัดนิ่งเท่านั้นก็ตาม)

$$Y_N = \frac{p_{01} - p_{02}}{p_{02} - p_2} = \frac{(p_{01}/p_{02}) - 1}{1 - (p_2/p_{02})}$$

แต่เนื่องจากว่า

$$\begin{aligned} \frac{p_{01}}{p_{02}} &= \frac{p_{01}}{p_2} \frac{p_2}{p_{02}} = \left(\frac{T_{01}}{T_2'} \right)^{\gamma/(\gamma-1)} \left(\frac{T_2}{T_{02}} \right)^{\gamma/(\gamma-1)} \\ &= \left(\frac{T_2}{T_2'} \right)^{\gamma/(\gamma-1)} \quad \text{เพราะว่า } T_{01} = T_{02} \end{aligned}$$

ดังนั้นจะได้

$$Y_N = \frac{\left(T_2/T_2' \right)^{\gamma/(\gamma-1)} - 1}{1 - \left(T_2/T_{02} \right)^{\gamma/(\gamma-1)}} = \frac{\left[1 + \frac{T_2 - T_2'}{T_2'} \right]^{\gamma/(\gamma-1)} - 1}{1 - \left[\frac{T_2 - T_{02}}{T_{02}} + 1 \right]^{\gamma/(\gamma-1)}}$$

การกระจายนิพจน์ที่มีวงเล็บอย่าง binomial และใช้เฉพาะเทอมแรกเท่านั้น เราจะมี

$$Y_N = \frac{T_2 - T_2'}{T_{02} - T_2} \times \frac{T_{02}}{T_2'} = \lambda_N \left(\frac{T_{02}}{T_2'} \right) \cong \lambda_N \left(\frac{T_{02}}{T_2} \right) \quad (2.54)$$

จากสมการที่ (8) ใน Appendix A [14] เรามีความสัมพันธ์ทั่วไปอยู่ว่า

$$\frac{T_{02}}{T_2} = \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_2^2 \right)$$

แม้แต่ถ้า Mach number ที่ทางออกใบพัดหมุนนี้มีค่าเท่ากับ 1 (เนื่องจากอาจจะเป็นสแดงที่ถูกไหลอย่างสูงสำหรับใบพัดนิ่ง) ก็ยังจะได้ว่า $\lambda = 0.86Y$ และด้วยเหตุนี้ก็จะเห็นว่า λ ก็ยังมีค่าน้อยกว่า Y เพียง 14% เท่านั้น ประเภทของข้อมูลที่มีอยู่สำหรับทำนายค่าของ λ หรือ Y ถูก

อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 7.4 ใน [14] λ_N และ λ_R เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพไอเซนโทรปิก (Isentropic efficiency) ของสเตจ (η_s) ตามความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$\eta_s = \frac{T_{01} - T_{03}}{T_{01} - T'_{03}} = \frac{1}{1 + (T_{03} - T'_{03}) / (T_{01} - T_{03})}$$

จากรูปที่ 2.13 จะเห็นว่า

$$T_{03} - T'_{03} \approx (T_3 - T'_3) = (T_3 - T''_3) + (T''_3 + T'_3)$$

แต่ $(T'_2/T'_3) = (T_3/T''_3)$ เนื่องจากทั้งคู่ต่างก็เท่ากับ $(p_2/p_3)^{(\gamma-1)/\gamma}$ การจัดเรียงเทอมใหม่และการลบทั้งสองข้างด้วย 1 เราจะได้

$$\frac{T''_3 - T'_3}{T'_3} = \frac{T_2 - T'_2}{T'_2} \quad \text{หรือ} \quad (T''_3 - T'_3) \cong (T_2 - T'_2) \frac{T_3}{T_2}$$

ดังนั้นจะได้

$$\begin{aligned} \eta_s &\cong \frac{1}{1 + [(T_3 - T''_3) + (T_3/T_2)(T_2 - T'_2)] / (T_{01} - T_{03})} \\ &\cong \frac{1}{1 + [\lambda_R (V_3^2 / 2C_p) + (T_3/T_2) \lambda_N (C_2^2 / 2C_p)] / (T_{01} - T_{03})} \end{aligned} \quad (2.55)$$

การแทนบางตัวในสมการที่ (2.55) ด้วย

$$V_3 = C_a \sec \beta_3$$

$$C_2 = C_a \sec \alpha_2$$

$$\begin{aligned} \text{และ } C_p (T_{01} - T_{03}) &= UC_a (\tan \beta_3 + \tan \beta_2) \\ &= UC_a [\tan \beta_3 + \tan \alpha_2 - (U/C_a)] \end{aligned}$$

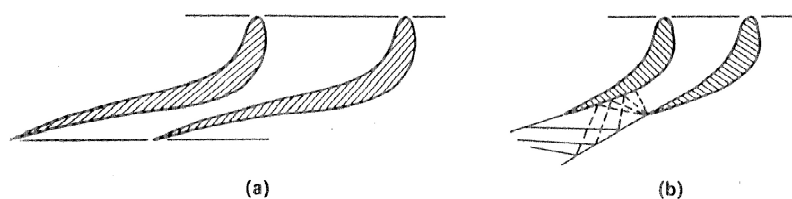
เราจะสามารถเขียนสมการที่ (2.55) ได้ใหม่เป็น

$$\eta_s \cong \frac{1}{1 + \frac{C_a}{2U} \left[\frac{\lambda_R \sec^2 \beta_3 + (T_3/T_2) \lambda_N \sec^2 \alpha_2}{\tan \beta_3 + \tan \alpha_2 - (U/C_a)} \right]} \quad (2.56)$$

เนื่องจาก $Y \approx \lambda$ ดังนั้นสามารถแทนค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสีย Y_R และ Y_N ด้วยค่า λ_R และ λ_N ในสมการที่ (2.55) และ (2.56) ได้ ถ้าต้องการ

สำหรับความมุ่งหมายของตัวอย่างที่จะกล่าวต่อไป เราจะสมมุติว่า $\lambda_N = 0.05$ และ $\eta_s = 0.9$ โดยในการแนะนำให้ใช้ค่า $\lambda_N = 0.05$ เนื่องจากเราสมมุติว่า Convergent nozzles กำลังถูกใช้งาน และสมมุติด้วยว่าใบพัดนิ่ง (Nozzles) เหล่านี้กำลังปฏิบัติการด้วยอัตราส่วนความดัน

p_{01}/p_2 ที่น้อยกว่าอัตราส่วนความดันวิกฤติ $[(\gamma + 1)/2]^{\gamma/(\gamma-1)}$ การที่ Convergent-divergent nozzles เหมือนที่แสดงในรูปที่ 2.16 (a) ไม่ได้ถูกนำมาใช้ ส่วนหนึ่งเนื่องจากมันทั้งหลายมีแนวโน้มด้วยประสิทธิภาพที่อัตราส่วนความดันอื่นๆ ที่นอกเหนือจากค่าที่ออกแบบ (ตัวอย่าง เช่น ตอนที่ใช้ part load) แต่อีกส่วนหนึ่งเนื่องจากโดยปกติแล้วค่า C_2 ที่สูงจะแสดงเป็นนัยให้รู้ว่ามันจะให้ค่า V_2 ที่สูง ถ้าค่า Mach number ซึ่งสัมพันธ์กับใบพัดที่กำลังหมุนตรงทางเข้า คือ M_{V_2} ที่มีค่าเกินกว่า 0.75 แล้ว อาจจะทำให้เกิดความสูญเสียส่วนเพิ่ม (Additional losses) ขึ้นได้ โดยการเกิดขึ้นของการอัดตัวของคลื่นเสียง (Shock wave) ในช่องใบพัดหมุน ความจริงถ้า V_2 ไม่สูงเกินไป (บางที่เป็นเพราะว่าค่า Flow coefficient ที่กำลังถูกใช้มีค่าต่ำเหมือนในเทอร์ไบน์ก๊าซทางอุตสาหกรรม) ก็ไม่มีเหตุผลว่าทำไมถึงไม่ควรใช้ Convergent nozzles ในการปฏิบัติการที่อัตราส่วนความดันซึ่งกำลังให้ความเร็วขาออกที่เร็วเหนือเสียง (Supersonic) เล็กน้อย (คือ $1 < M_2 < 1.2$) เพราะดูเหมือนว่าเกิดความสูญเสียส่วนเพิ่ม (Additional loss) ขึ้นน้อยมาก ความดันที่คอคอของใบพัดนี้ (Nozzles) เป็นความดันวิกฤติ แต่มีการขยายตัวต่อไปเป็นแบบกึ่งควบคุม (Semi-controlled expansion) จนถึง P_2 หลังจากผ่านจุดคอคอ ภาพที่วาดในรูปที่ 2.16 (b) แสดงให้เห็นว่า การไหลจะถูกควบคุมโดยขอบด้านหาง (Trailing edge) ของใบพัดทางด้านโค้งบนบนอีกด้านหนึ่งกระแสซูเปอร์โซนิกจะขยายตัวราวกับว่ากำลังหมุนรอบมุม กล่าวคือ ก็เป็นไปได้ที่จะคิดว่าเป็นการหักเหของกระแสโดยการยึดถือเป็นการขยายตัวแบบ Prandtl-Meyer และโดยใช้วิธีของคุณลักษณะ (Method of characteristics) ขอให้ลองดู section A.8 ของ Appendix A ของ Cohen [14] สำหรับรายละเอียดที่ลึกเข้าไป



รูปที่ 2.16 ใบพัดนี้แบบ (a) Convergent-divergent และแบบ (b) Divergent อย่างเดียวที่กำลังปฏิบัติการที่อัตราส่วนความดันมากกว่าอัตราส่วนความดันวิกฤติ [14]

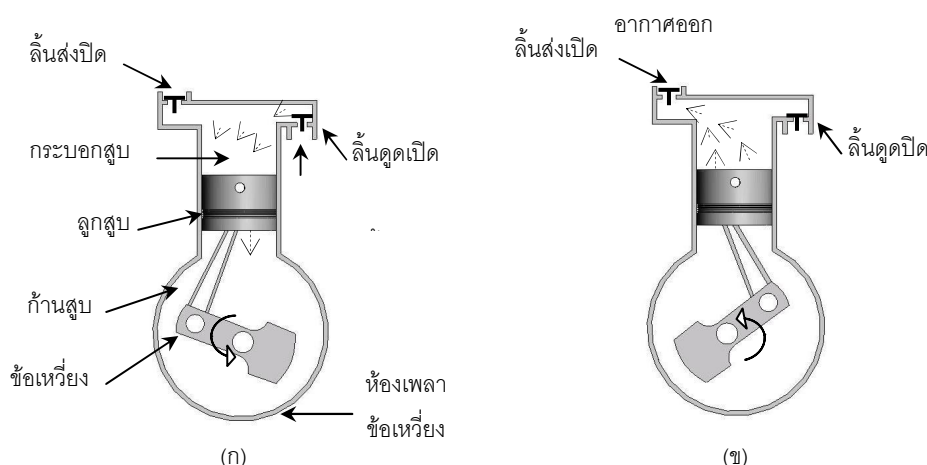
2.4 เครื่องอัดอากาศ (Air Compressor)

เครื่องอัดลมมีหน้าที่ดูดก๊าซเข้ามาทางท่อดูด อัดให้ก๊าซนั้นมีความกดดันสูงขึ้น แล้วจึงปล่อยออกไปทางท่อปล่อย การอัดก๊าซเท่ากับเป็นการกดอัดก๊าซนั้นให้มีปริมาตรเล็กลง ความกดดันสูงขึ้น และอุณหภูมิของก๊าซ จะร้อนขึ้นจากเดิมด้วย ความร้อนจากการอัดก๊าซนี้เป็นขีดจำกัด

ในการออกแบบสร้างเครื่องอัดลม ว่าจะสามารถอัดได้ไม่เกินค่าใดค่าหนึ่ง เพราะมีฉะนั้นก๊าซจะร้อนจัดเกินไป วัสดุสร้างเครื่องอัดลมอาจไม่แข็งแรงพอได้ ปกติเมื่ออัดก๊าซแล้วครั้งหนึ่งๆ จะต้องผลิตความร้อนนั้นออกก่อนที่จะอัดต่อในขั้นที่สอง หรือนำไปใช้งาน [15]

2.4.1 เครื่องอัดอากาศแบบลูกสูบ (Reciprocating Air Compressor) [16]

เครื่องอัดอากาศแบบขั้นเดียวแสดงในรูปที่ 2.17 (ก) และ (ข)



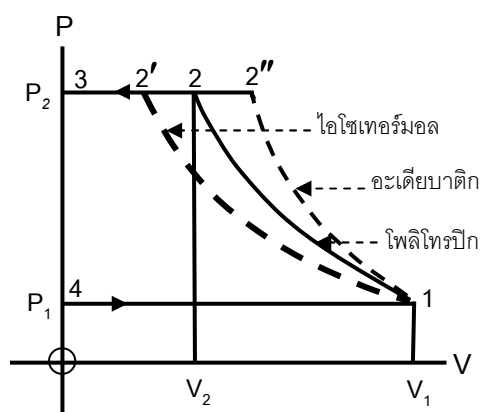
รูปที่ 2.17 (ก) และ (ข) แสดงเครื่องอัดอากาศแบบขั้นเดียว [15]

เครื่องอัดอากาศแบบนี้ประกอบด้วยลูกสูบที่เคลื่อนในกระบอกสูบโดยรับกำลังขับเคลื่อนผ่านก้านสูบและข้อเหวี่ยงที่ประกอบอยู่ในห้องเพลาลูกสูบ ข้อเหวี่ยง มีลิ้นดูดและลิ้นส่งติดอยู่ตอนบนของหัวสูบ ลิ้นแบบนี้ทำงานโดยความดันแตกต่างกัน ซึ่งหมายความว่าทำงานเมื่อมีความดันแตกต่างกันระหว่างหน้าและหลังลิ้น การทำงานของเครื่องอัดอากาศเหล่านี้เป็นดังนี้

ในรูปที่ 2.17 (ก) ลูกสูบเคลื่อนที่ลงในกระบอกสูบอากาศที่ถูกอัดในจังหวะก่อนหน้าที่ยังหลงเหลืออยู่จะขยายตัวจนมีความดันต่ำกว่าความดันดูดเข้าเล็กน้อย ซึ่งหมายความว่าอากาศด้านนอกของลิ้นดูดจะสูงกว่าด้านใน ดังนั้นลิ้นจะเปิดให้อากาศเข้า ในระหว่างจังหวะนี้ ลิ้นส่งจะปิดเพราะขณะนี้ความดันด้านนอกของลิ้นส่งจะสูงกว่าความดันภายในกระบอกสูบ ในรูปที่ 2.17 (ข) ขณะนี้ลูกสูบเคลื่อนที่ขึ้น ในช่วงแรกของจังหวะเคลื่อนขึ้น ความดันในกระบอกสูบสูงขึ้นเล็กน้อยเพียงพอที่จะทำให้ลิ้นดูดปิด ความดันของอากาศภายในกระบอกสูบจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อถูกปิดอยู่ในกระบอกสูบอย่างสนิท จนมีความดันสูงกว่าความดันด้านนอกของลิ้นส่ง ซึ่งจะทำให้ลิ้นส่งเปิด ทำให้อากาศความดันสูงออกจากกระบอกสูบ และลิ้นส่งจะปิดในที่สุดเมื่อสุดจังหวะอัด ลูกสูบก็จะเริ่มเลื่อนลงในกระบอกสูบ ลิ้นดูดก็จะเปิดอีกครั้งหนึ่ง และวัฏจักรจะทำการซ้ำๆ ต่อไป อากาศที่ถูกปิดอยู่ในกระบอกสูบของเครื่องอัดอากาศแบบนี้จะสามารถอัดให้มีความดันได้สูงมาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของวัสดุที่ทำชิ้นส่วนของเครื่องอัดและกำลังขับเคลื่อน

มอเตอร์ เป็นที่น่าสังเกตว่าในเครื่องอัดอากาศแบบลูกสูบ การไหลของอากาศจะมีการหยุดเป็นจังหวะๆ

ในรูปที่ 2.18 แสดงแผนภาพ $P-V$ ตามทฤษฎีสำหรับการทำงานของเครื่องอัดอากาศ โดยไม่คิดช่องว่างหัวสูบ



รูปที่ 2.18 แสดงแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างความดันและปริมาตร ($P-V$) ของเครื่องอัดอากาศ [16]

การทำงานช่วงต่างๆ ในแผนภาพเป็นดังนี้คือ

4-1 อากาศปริมาตร V_1 ที่ความดัน P_1 และอุณหภูมิ T_1 เข้าไปในกระบอกสูบ

1-2 อากาศถูกอัดตามกฎ $PV^n = C$ จากความดัน P_1 จนสูงขึ้นเป็น P_2 ปริมาตรลดลงจาก V_1 เหลือ V_2 และอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิ T_1 ขึ้นเป็น T_2

2-3 อากาศความดันสูง P_2 ปริมาตร V_2 และอุณหภูมิ T_2 ออกจากเครื่องอัด

ในระหว่างจังหวะอัด เนื่องจากอากาศที่ถูกอัดอุณหภูมิสูงกว่าบริเวณรอบๆ เครื่องอัดอากาศจะเสียความร้อนไปบ้างแม้จะไม่พิจารณาความเสียดทานภายในระหว่างกระบอกสูบของลูกสูบซึ่งน้อยมากแต่เครื่องอัดแบบลูกสูบก็ยังมี ค่าดัชนี n ที่น้อยกว่าค่าดัชนีอะเดียบาติก γ ดังนั้นงานที่ต้องทำเพื่ออัดอากาศส่งเข้าก็ยังมีความมากกว่าการอัดแบบอะเดียบาติก ความพยายามในการลดความสูญเสียต่างๆ ย่อมหมายถึงการลดงานส่งเข้า

พิจารณาแผนภาพ $P-V$ ดังรูปที่ 2.18 แสดงขอบเขตการอะเดียบาติกแบบไม่มีความเสียดทานช่วง $1-2''$ และถ้ากระบวนการอัดเป็นไปตามขอบเขตการไอโซเทอร์มอล $1-2'$ แทนที่จะเป็นตามขอบเขตการโพลีโทรปิก $1-2$ ดังนั้นงานก็คือพื้นที่ของแผนภาพจะลดลง ซึ่งตามความเป็นจริงจะเป็นค่าต่ำสุด ขบวนการอัดแบบไอโซเทอร์มอลไม่สามารถจะทำได้ในทางปฏิบัติ แต่ได้มีความพยายามที่จะให้ขบวนการใกล้เคียงไอโซเทอร์มอล เช่น กรณีการหล่อเย็นเครื่องอัดโดยทำครีบริบายความร้อน หรือการทำตาน้ำหล่อเย็นที่เสื่อสูบเป็นต้น

สำหรับเครื่องอัดแบบลูกสูบ การเปรียบเทียบระหว่างงานจริงที่ทำระหว่างจังหวะอัดและงานไอโซเทอร์มอลตามอุดมคติเรียกว่า ประสิทธิภาพไอโซเทอร์มอล ซึ่งนิยามไว้ดังนี้

$$\text{ประสิทธิภาพไอโซเทอร์มอล} = \frac{\text{งานไอโซเทอร์มอล}}{\text{งานจริง}} \quad (2.57)$$

ค่าประสิทธิภาพไอโซเทอร์มอลยิ่งสูงเท่าไรก็หมายถึงว่า ขบวนการอัดจริงจะเข้าใกล้ขบวนการอัดไอโซเทอร์มอลตามอุดมคติเท่านั้น

เมื่อไม่พิจารณาการเปลี่ยนแปลงพลังงานศักย์ และถ้า $H =$ เอนทัลปีของมวลจริงผ่านเครื่องอัด และไม่นำเอาการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์มาพิจารณา เนื่องจากมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ดังนั้นเมื่อทำการหาสมดุลพลังงานของเครื่องอัดแบบลูกสูบจะได้สมการพลังงานเป็นดังนี้คือ

$$H_1 + Q = H_2 + W \quad (2.58)$$

$$\text{หรือ} \quad W = (H_1 - H_2) + Q \quad (2.59)$$

$$= mC_p(T_1 - T_2) + \frac{(\gamma - n)(P_1V_1 - P_2V_2)}{(\gamma - 1)(n - 1)} \quad (2.60)$$

$$\text{จาก } C_p - C_v = R \text{ และ } \frac{C_p}{C_v} = \gamma$$

$$\therefore C_v = \frac{C_p}{\gamma}$$

$$\text{ดังนั้น } C_p - \frac{C_p}{\gamma} = R$$

$$\therefore C_p \left(\frac{\gamma - 1}{\gamma} \right) = R \quad (2.61)$$

$$\text{หรือ } C_p = \frac{R\gamma}{(\gamma - 1)}$$

แทนค่าสมการ (2.61) ในสมการ (2.60)

$$\begin{aligned} W &= \frac{\gamma}{\gamma - 1} mR(T_1 - T_2) + \frac{(\gamma - n)(P_1V_1 - P_2V_2)}{(\gamma - 1)(n - 1)} \\ &= \frac{\gamma}{\gamma - 1} (P_1V_1 - P_2V_2) + \frac{(\gamma - n)(P_1V_1 - P_2V_2)}{(\gamma - 1)(n - 1)} \end{aligned}$$

เพราะว่า $PV = mRT$ ดังนั้น

$$\begin{aligned}
W &= \frac{(P_1V_1 - P_2V_2)}{(\gamma - 1)} \left[\gamma + \frac{(\gamma - n)}{(n - 1)} \right] \\
&= \frac{(P_1V_1 - P_2V_2)}{(\gamma - 1)} \left[\frac{\gamma n - \gamma + \gamma - n}{(n - 1)} \right] \\
&= \frac{(P_1V_1 - P_2V_2)}{(\gamma - 1)} \left[\frac{n(\gamma - 1)}{(n - 1)} \right] \\
&= \frac{n}{n - 1} (P_1V_1 - P_2V_2) \tag{2.62}
\end{aligned}$$

$$W = \frac{n}{n - 1} mR(T_1 - T_2) \tag{2.63}$$

ค่าของงานนี้ก็คือพื้นที่ของแผนภาพ $P - V$ ในรูป 2.18

$$\oint W = \text{พื้นที่สุทธิของแผนภาพ}$$

$\oint W$ หมายถึงงานต่อวัฏจักร

$$\begin{aligned}
&= \text{พื้นที่ } 4 - 1 - 2 - 3 \\
&= (\text{พื้นที่ใต้ } 4 - 1) - (\text{พื้นที่ใต้ } 1 - 2) - (\text{พื้นที่ใต้ } 2 - 3) \\
&= P_1V_1 - \left(\frac{P_2V_2 - P_1V_1}{n - 1} \right) - P_2V_2 \\
&= (P_1V_1 - P_2V_2) - \left(\frac{P_2V_2 - P_1V_1}{n - 1} \right) \\
&= (P_1V_1 - P_2V_2) + \left(\frac{P_1V_1 - P_2V_2}{n - 1} \right) \\
&= \left(1 + \frac{1}{n - 1} \right) (P_1V_1 - P_2V_2) \\
\oint W &= \frac{n}{n - 1} (P_1V_1 - P_2V_2) \tag{2.64}
\end{aligned}$$

สมการ (2.64) นี้เมื่อเขียนใหม่จะได้

$$\begin{aligned}
\oint W &= \frac{n}{n - 1} (P_1V_1 - P_2V_2) \\
&= \frac{n}{n - 1} P_1V_1 \left(1 - \frac{P_2V_2}{P_1V_1} \right) \tag{2.65}
\end{aligned}$$

จาก $P_1V_1^n = P_2V_2^n$

$$\therefore \frac{V_2}{V_1} = \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{1/n}$$

แทนค่านี้ลงในสมการ (2.65)

$$\begin{aligned} \oint W &= \frac{n}{n-1} P_1 V_1 \left[1 - \frac{P_2}{P_1} \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{1/n} \right] \\ &= \frac{n}{n-1} P_1 V_1 \left[1 - \frac{P_2}{P_1} \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{-1/n} \right] \\ &= \frac{n}{n-1} P_1 V_1 \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{1-1/n} \right] \\ &= \frac{n}{n-1} P_1 V_1 \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(n-1)/n} \right] \end{aligned} \quad (2.66)$$

เมื่อแทนค่าสมการนี้ ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นลบเสมอ ซึ่งหมายความว่าต้องเสียงานเพื่อการอัดของเครื่องอัด ถ้าจะหาเพียงค่าของงานเท่านั้น ก็อาจหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\oint W = \frac{n}{n-1} P_1 V_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(n-1)/n} - 1 \right] \quad (2.67)$$

$$= \frac{n}{n-1} m R T_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(n-1)/n} - 1 \right] \quad (2.68)$$

ถ้าต้องการหาอุณหภูมิของอากาศที่ออกจากเครื่องอัดจะหาได้จากสมการ

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(n-1)/n}$$

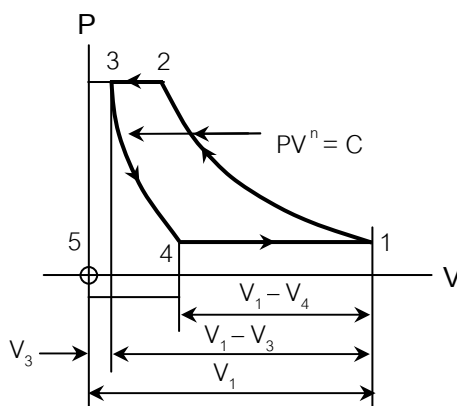
หรือ

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(n-1)/n} \quad (2.69)$$

2.4.2 ผลของปริมาตรหัวสูบ (Effect of Clearance Volume)

สำหรับเครื่องอัดอากาศแบบลูกสูบทุกชนิด ในทางปฏิบัติจะต้องมีปริมาตรหัวสูบเสมอ ซึ่งหมายถึงปริมาตรของช่องว่างในกระบอกสูบหลังจากที่ลูกสูบเคลื่อนขึ้นสุดในจังหวะอัด

การมีปริมาตรหัวสูบจะมีผลดังนี้



รูปที่ 2.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรหัวสูบกับความดัน [16]

เมื่อพิจารณาที่จุด 1 ของรูป 2.19 กระบอกสูบจะดูดอากาศเข้าเต็มที่ มีปริมาตร V_1 และอยู่ที่จุดเริ่มต้นของจังหวะอัด อากาศจะถูกอัดแบบโพลิโทรปิกตามกฎ $PV^n = C$ จนความดันสูงขึ้นเป็น P_2 และปริมาตรเป็น V_2 ที่จุด 2 ตามทฤษฎีลิ้นจะเปิด และในจังหวะจาก 2 ไป 3 อากาศที่ถูกอัดจะถูกส่งออกจากกระบอกสูบ ที่จุด 3 ลูกสูบถึงจุดสุดท้ายของการเคลื่อนที่ขึ้น การจ่ายลมจะหยุดลงที่ V_3 ก็คือ ปริมาตรหัวสูบ ซึ่งยังคงมีอากาศที่ถูกอัดเหลืออยู่ ขณะลูกสูบเริ่มจังหวะดูด อากาศจำนวนนี้จะขยายตัวตามกฎ $PV^n = C$ และลิ้นดูดจะยังไม่เปิดให้อากาศเข้าจนกว่าความดันจะลดลงจนถึงความดันจุดที่จุด 4 อากาศใหม่จึงจะเข้าไปในกระบอกสูบ ปริมาตรที่เข้าใหม่เท่ากับ $(V_1 - V_4)$ ซึ่งเรียกว่า ปริมาณแทนที่ใช้งาน (Effective swept volume)

อัตราส่วน

$$\frac{\text{ปริมาณแทนที่ใช้งาน}}{\text{ปริมาณแทนที่}} = \frac{V_1 - V_4}{V_1 - V_3} \quad (2.70)$$

เรียกว่า ประสิทธิภาพโดยปริมาตร เนื่องจากมีปริมาตรหัวสูบ ค่านี้จะน้อยกว่าหนึ่งเสมอ

เปอร์เซ็นต์ของประสิทธิภาพโดยปริมาตรจะอยู่ระหว่าง 60 ถึง 85 เปอร์เซ็นต์

อัตราส่วน

$$\frac{\text{ปริมาตรหัวสูบ}}{\text{ปริมาตรแทนที่}} = \frac{V_3}{V_1 - V_3} \quad (2.71)$$

เรียกว่า อัตราส่วนปริมาตรหัวสูบ

เมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนนี้จะมีค่าโดยทั่วไปอยู่ระหว่าง 4% และ 10% อัตราส่วนความดันของเครื่องอัดยิ่งมากเท่าไร ผลของปริมาตรหัวสูบจะมากขึ้นเท่านั้น เมื่ออากาศตอนหัวสูบขยายตัวมีปริมาตรมากกว่า ก่อนจะถึงสภาวะของการดูดเข้า ขนาดของกระบอกสูบและระยะชัก

คงที่ ซึ่งหมายถึงว่าปริมาตรแทนที่ใช้งาน $(V_1 - V_4)$ จะลดลง ขณะที่อัตราส่วนความดันเพิ่มขึ้น มีผลให้ประสิทธิภาพโดยปริมาตรลดลงด้วย เหตุผลนี้แสดงให้เห็นได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \text{ประสิทธิภาพโดยปริมาตร} &= \frac{V_1 - V_4}{V_1 - V_3} \\
 &= \frac{(V_1 - V_3) + (V_3 - V_4)}{(V_1 - V_3)} \\
 &= 1 + \frac{V_3}{(V_1 - V_3)} - \frac{V_4}{(V_1 - V_3)} \\
 &= 1 + \frac{V_3}{(V_1 - V_3)} - \frac{V_4}{(V_1 - V_3)} \frac{V_3}{V_3} \\
 &= 1 + \frac{V_3}{(V_1 - V_3)} - \frac{V_3}{(V_1 - V_3)} \frac{V_4}{V_3} \\
 &= 1 + \frac{V_3}{(V_1 - V_3)} \left[1 - \frac{V_4}{V_3} \right] \\
 &= 1 - \frac{V_3}{(V_1 - V_3)} \left[\frac{V_4}{V_3} - 1 \right] \\
 &= 1 - \frac{V_3}{(V_1 - V_3)} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{1/n} - 1 \right] \quad (2.72)
 \end{aligned}$$

$$\text{เพราะว่า } \frac{V_4}{V_3} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{1/n}$$

ซึ่งแสดงให้เห็นว่า สำหรับสถานะของกระบอกสูบคงที่ที่ V_1 และ V_3 อัตราส่วนความดัน P_2/P_1 มากขึ้น ดังนั้นประสิทธิภาพโดยปริมาตรจะน้อยลง

$$\begin{aligned}
 \text{งาน/วัฏจักร} &= \text{พื้นที่จริง } 1-2-3-4 \\
 &= (\text{พื้นที่ } 5-1-2-6) - (\text{พื้นที่ } 5-4-3-6)
 \end{aligned}$$

สมมติว่า ค่าดัชนีของขบวนการโพลิโทรปิกของการอัดและการขยายตัวของปริมาตรหัวสูบมีค่าเท่ากัน ดังนั้น

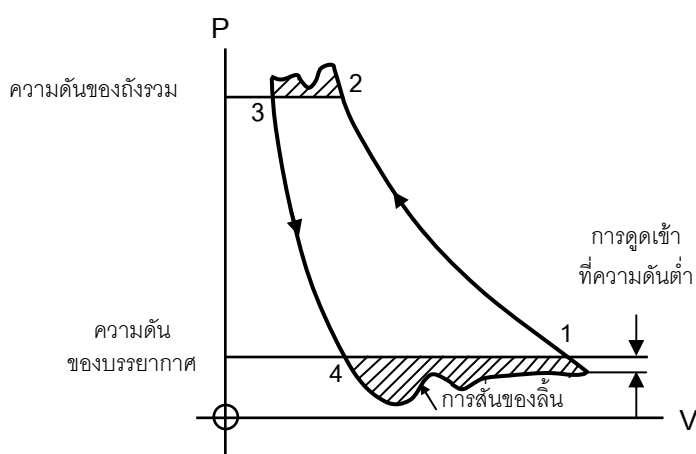
$$\oint W = \frac{n}{n-1} P_1 V_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(n-1)/n} - 1 \right] - \frac{n}{n-1} P_4 V_4 \left[\left(\frac{P_3}{P_4} \right)^{(n-1)/n} - 1 \right] \quad (2.73)$$

แต่ความดัน $P_4 = P_1$ และ $P_3 = P_2$ ดังนั้นสมการ (2.73) จะกลายเป็น

$$\begin{aligned} \oint W &= \frac{n}{n-1} P_1 V_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(n-1)/n} - 1 \right] - \frac{n}{n-1} P_1 V_4 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(n-1)/n} - 1 \right] \\ &= \frac{n}{n-1} P_1 (V_1 - V_4) \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(n-1)/n} - 1 \right] \end{aligned}$$

2.4.3 แผนภาพจริงของเครื่องอัดแบบลูกสูบ (Actual Reciprocating Compressor Diagram)

รูปที่ 2.20 แสดงแผนภาพจริงของเครื่องอัดโดยมีจุด 1-2-3-4 เป็นแผนภาพ $P - V$ ตามทฤษฎีที่ได้กล่าวมาแล้ว



รูปที่ 2.20 แสดงแผนภาพจริงของเครื่องอัดแบบลูกสูบ [16]

ที่จุด 4 เมื่ออากาศที่หัวสูบลดความดันลงเหลือเท่ากับความดันของบรรยากาศ ในทางปฏิบัติลิ้นดูดจะยังไม่เปิดให้อากาศเข้า ทั้งนี้มีเหตุผลอยู่ 2 ประการ ประการแรกจะต้องมีความดันแตกต่างที่ลิ้นดูดที่จะทำให้ลิ้นเปิด ประการที่สองก็คือจะต้องมีแรงเฉื่อยในการเปิดลิ้น เมื่อความดันต่ำลงจนลิ้นถูกกดออกจากบ่าลิ้น ลิ้นบางตัวจะสั่นก่อนจะเข้าที่ซึ่งแสดงไว้เป็นเส้นลูกคลื่น และบางทีการดูดเข้าค่อนข้างจะสม่ำเสมอที่ความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศความแตกต่างในทางลบของความดัน เรียกว่า การดูดเข้าที่ความดันต่ำ (Intake Depression)

ในสภาวะการคล้ายๆ กันที่จุด 2 หรือที่จุดเริ่มต้นของการจ่ายลม เมื่อความดันสูงขึ้นและมีการสิ้นของลิ้น ความดันของไอจะสูงกว่าความดันของอากาศนอกถังส่ง อากาศโดยปกติจะออกไปเข้าถังรวม (Receiver) ความดันจ่ายด้านนอกของลิ้นส่งบางที่เรียกว่า ความดันของถังรวม (Receiver Pressure) ผลเล็กน้อยที่เกิดขึ้นตรงทางดูดและทางส่งก็คือแรงเฉื่อยของก๊าซ และการ

ไหลวน (Turbulence) ของอากาศ ผลต่างๆ ที่เกิดขึ้นในทางปฏิบัติที่ได้กล่าวมาแล้วนี้แสดงไว้ที่พื้นที่แรงในรูป 2.20 ที่ต่อจากพื้นที่ตามทฤษฎี 1-2-3-4

2.4.4 ปริมาตรอิสระของอากาศที่ออกจากเครื่องอัด (Free Air Delivery)

ถ้าปริมาตรของอากาศที่ถูกอัดด้วยเครื่องอัดลดลงจนมีอุณหภูมิและความดันเท่ากับบรรยากาศ ปริมาตรของอากาศนี้เรียกว่า ปริมาตรอิสระของอากาศ

ควรจำไว้ ณ ที่นี้ว่า เนื่องจากการไหลต่อเนื่องเราจะได้

$$\text{มวลส่ง} = \text{มวลดูด}$$

เมื่อใช้สมการของก๊าซ และสมมติว่ามีปริมาตรหัวสูบ

$$\frac{P_f V_f}{T_f} = \frac{P_1 (V_1 - V_4)}{T_1} = \frac{P_2 (V_2 - V_3)}{T_2} \quad (2.74)$$

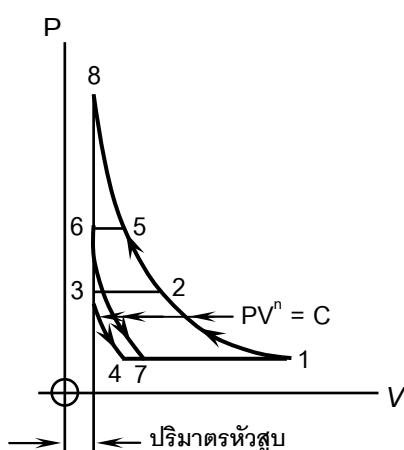
ถ้าไม่คิดปริมาตรหัวสูบ สมการ (2.74) จะเปลี่ยนเป็น

$$\frac{P_f V_f}{T_f} = \frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \quad (2.75)$$

โดย P_f และ T_f คือความดันและอุณหภูมิปกติซึ่งเท่ากับ $0.101325 \text{ MNm}^{-2}$ ($101.325 \text{ kNm}^{-1} = 1.01325 \text{ bar}$) และ 288 K (15°C) ตามลำดับ

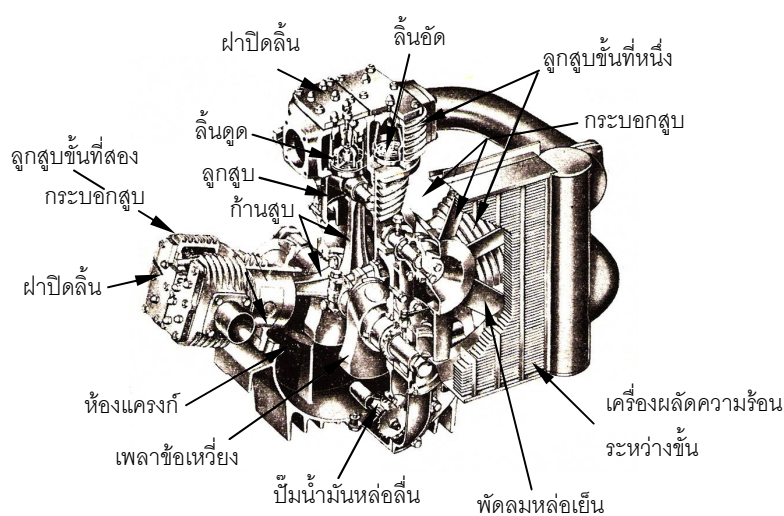
2.4.5 เครื่องอัดอากาศแบบลูกสูบหลายชั้น (Multistage Reciprocating Compressor)

เมื่อการส่งอากาศออกของเครื่องอัดแบบลูกสูบเดี่ยวถูกกีดขวาง ย่อมจะทำให้ความดันยิ่งเพิ่มขึ้น ถ้าความดันของอากาศส่งออกสูงมากเกินไปก็จะมีข้อเสียเกิดขึ้น



รูปที่ 2.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและปริมาตรของเครื่องอัดอากาศแบบลูกสูบหลายชั้น [16]

พิจารณารูป 2.21 ประกอบ สมมุติว่าความดันของเครื่องอัดอากาศชั้นเดียวสูงขึ้นเป็น P_2 ดังนั้น วัฏจักรที่สมบูรณ์จะเป็นไปตาม 1-2-3-4 ปริมาตรของอากาศที่เหลือที่หัวสูบที่ขยายตัวออกจะเป็นไปตาม 3-4 และมวลของอากาศไหลผ่านเครื่องอัดจะถูกควบคุมด้วยปริมาตรคงที่ $(V_1 - V_4)$ สมมุติว่าขณะนี้อากาศถูกกีดขวางทางด้านส่งออก ความดันส่งออกสูงขึ้นเป็น P_5 และวัฏจักรใหม่กลายเป็น 1-5-6-7 ปริมาตรของอากาศที่หัวสูบจะขยายตัวตาม 6-7 มวลของอากาศไหลผ่านเครื่องอัดก็就会被ควบคุมด้วยปริมาตรแทนที่ $(V_1 - V_7)$ ซึ่งน้อยกว่าปริมาตรแทนที่ครั้งแรก $(V_1 - V_4)$



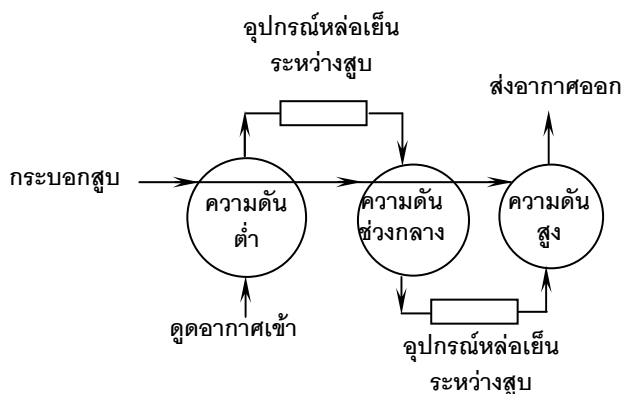
รูปที่ 2.22 แสดงเครื่องอัดลมสองชั้น [16]

ในขอบเขตจำกัดนี้ สมมุติว่าเครื่องอัดแข็งแรงพอ ซึ่งการอัดจะเป็นไปตาม 1-8 โดย V_8 = ปริมาตรหัวสูบ ซึ่งในกรณีนี้จะไม่มีส่วนส่งอากาศออก จะเห็นว่าเมื่อความดันส่งออกของเครื่องอัดแบบลูกสูบชั้นเดียวเพิ่มขึ้น มวลของอากาศที่ไหลผ่านเครื่องอัดจะน้อยลง

ข้อสังเกตอีกจุดหนึ่งคือ เมื่อความดันส่งออกสูงขึ้น อุณหภูมิของอากาศส่งออกก็จะสูงขึ้นด้วย จากรูป 2.21 อุณหภูมิ $T_8 > T_5 > T_2$ ถ้าเราไม่ต้องการอากาศที่มีอุณหภูมิสูง การที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นย่อมหมายถึงการสูญเสียพลังงานนั่นเอง

ถ้าต้องการให้เครื่องอัดอากาศแบบชั้นเดียวอัดอากาศให้ได้ความดันสูงๆ ก็จำเป็นที่จะต้องสร้างให้มีโครงสร้างให้แข็งแรงมาก รวมทั้งต้องใช้ชิ้นส่วนประกอบที่แข็งแรงพอด้วย ทั้งนี้อาจจะมีปัญหาทางด้านการสมดุล และเมื่อมีทอร์คสูง ซึ่งย่อมต้องใช้ล้อเหวี่ยงขนาดใหญ่ขึ้นด้วย

เนื่องจากข้อเสียต่างๆ ของเครื่องอัดอากาศแบบชั้นเดียวที่ได้กล่าวมาแล้วมีมาก จึงได้หันมาใช้เครื่องอัดอากาศแบบหลายชั้น ซึ่งประกอบด้วยกระบอกสูบหลายกระบอกต่อเนื่องกัน โดยอากาศที่ส่งออกจากกระบอกสูบหนึ่งจะวิ่งไปเข้ากระบอกสูบถัดไป



รูปที่ 2.23 แสดงการต่อกระบอกสูบของเครื่องอัดแบบสามขั้น [16]

จากรูปที่ 2.23 อัตราส่วนความดันต่ำในกระบอกสูบความดันต่ำหมายถึงว่า การขยายตัวของปริมาตรของอากาศที่หัวสูบจะลดลง ซึ่งจะทำให้ปริมาตรแทนที่จริงในกระบอกสูบเพิ่มขึ้น ซึ่งกระบอกสูบนี้จะทำหน้าที่ควบคุมมวลของอากาศที่ไหลผ่านเครื่องอัดอากาศทั้งหมด เพราะกระบอกสูบนี้ทำหน้าที่ดูดอากาศเข้ามาในเครื่องเพียงสูบเดียว ดังนั้น เครื่องอัดแบบหลายขั้นจึงสามารถส่งมวลผ่านเครื่องอัดได้มากกว่าเครื่องแบบขั้นเดียว

เพื่อที่จะลดอุณหภูมิของอากาศที่ออกจากเครื่องอัดจึงได้ติดตั้งอุปกรณ์หล่อเย็นระหว่างลูกสูบเอาไว้ การลดอุณหภูมิย่อมหมายถึงการลดพลังงานภายในของอากาศที่ออกจากเครื่องอัดด้วย และเมื่อพลังงานนี้ได้มาจากพลังงานที่ใช้ในการอัดของเครื่องอัด ผลอันนี้จึงเป็นการช่วยลดงานที่ต้องใช้ในการอัดลง เครื่องอัดแบบหลายขั้นสามารถจะปรับให้สมดุลได้ง่าย และมีทอร์คต่ำกว่าแบบขั้นเดียว

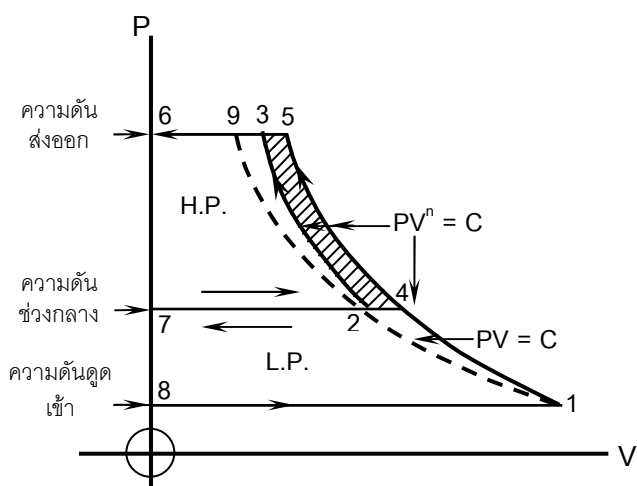
โดยทั่วไปจะพบเครื่องอัดแบบสองหรือสามขั้น จะสังเกตได้จากรูป 2.23 ว่า ขนาดของกระบอกสูบจะลดลงเมื่อความดันเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากว่าเมื่อความดันเพิ่มขึ้น ปริมาตรของอากาศที่กำหนดมวลมาให้อาจลดลงเมื่อกระบอกสูบต่อเนื่องกัน มวลของอากาศก็จะไหลต่อเนื่องกันไปตลอดเครื่องอัด และเมื่อลูกสูบต่อไปมีปริมาตรเข้าน้อยเนื่องจากความดันสูงขึ้น จึงทำให้ขนาดของกระบอกสูบเล็กลงตามลำดับ

รูปที่ 2.24 แสดงถึงวัฏจักรของเครื่องอัดอากาศหลายขั้นในอุดมคติ เพื่อให้ง่ายเข้า จะดเว้นการพิจารณาปริมาตรหัวสูบไว้ก่อน ซึ่งผลของปริมาตรหัวสูบได้กล่าวไว้แล้วในข้อ 2.4.2

ตามรูป 2.24 ช่วงความดันตลอดเครื่องจะเท่ากับ P_1 ถึง P_3

ให้ 8-1-5-6 เป็นวัฏจักรของเครื่องอัดขั้นเดียว และ 8-1-4-7 กับ 7-4-5-6 เป็นวัฏจักรของเครื่องอัดสองขั้น โดยไม่มีอุปกรณ์ระบายความร้อนระหว่างลูกสูบ ส่วน 8-1-4-7 และ 7-2-3-6 เป็นวัฏจักรของเครื่องอัดสองขั้น ซึ่งมีอุปกรณ์ระบายความร้อนระหว่างสูบอย่างสมบูรณ์

คำว่าระบายความร้อนอย่างสมบูรณ์หมายถึงว่าหลังจากการอัดในระบบสูบความดันต่ำ (L.P.) แล้ว อากาศจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นแล้วลดอุณหภูมิลงมาเท่ากับอุณหภูมิเริ่มต้นอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งก็หมายความว่า $T_2 = T_1$ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.24 ในกรณีนี้ จุด 2 จะอยู่บนเส้นไอโซเทอรัลที่ผ่านจุด 1 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การลดอุณหภูมิระหว่างลูกสูบอย่างสมบูรณ์นั้นขบวนการอัดจะเข้าใกล้ขบวนการอัดแบบไอโซเทอรัลมากกว่าการอัดในเครื่องอัดเครื่องเดียว



รูปที่ 2.24 แสดงวัฏจักรของเครื่องอัดอากาศหลายชั้นในอุดมคติ [16]

2.4.6 เงื่อนไขอุดมคติของเครื่องอัดแบบหลายชั้น (Ideal conditions for multistage compressor)

พิจารณารูป 2.24 ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่า วัฏจักร 8-1-5-6 เป็นของเครื่องอัดชั้นเดียว ไม่คิดปริมาตรหัวสูบ สำหรับวัฏจักรนี้

$$\oint W = \frac{n}{n-1} P_1 V_1 \left[\left(\frac{P_5}{P_1} \right)^{(n-1)/n} - 1 \right] \quad (2.76)$$

$$\begin{aligned} T_5 &= T_1 \left(\frac{P_5}{P_1} \right)^{(n-1)/n} \\ &= \text{อุณหภูมิส่งออก} \end{aligned} \quad (2.77)$$

ต่อไปสำหรับเครื่องอัดแบบสองชั้น ไม่มีการหล่อเย็นระหว่างสูบ 8-1-4-7 เป็นวัฏจักรความดันต่ำ และ 7-4-5-6 เป็นวัฏจักรความดันสูง สำหรับระบบนี้

$$\oint W = \frac{n}{n-1} P_1 V_1 \left[\left(\frac{P_4}{P_1} \right)^{(n-1)/n} - 1 \right] + \frac{n}{n-1} P_4 V_4 \left[\left(\frac{P_5}{P_4} \right)^{(n-1)/n} - 1 \right] \quad (2.78)$$

สมการนี้จะมีผลลัพธ์เท่ากับสมการ (2.76) อุณหภูมิส่งออกจะหาได้จากสมการ (2.77) เนื่องจากไม่มีการหล่อเย็นระหว่างสูบ

สำหรับเครื่องอัดแบบสองชั้น มีการหล่อเย็นระหว่างสูบอย่างสมบูรณ์ มี 8-1-4-7 เป็นวัฏจักรของสูบความดันต่ำและ 7-2-3-6 เป็นวัฏจักรของสูบความดันสูง ในกรณีนี้

$$\oint W = \frac{n}{n-1} P_1 V_1 \left[\left(\frac{P_4}{P_1} \right)^{(n-1)/n} - 1 \right] + \frac{n}{n-1} P_2 V_2 \left[\left(\frac{P_3}{P_2} \right)^{(n-1)/n} - 1 \right] \quad (2.79)$$

อุณหภูมิส่งออกหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$T_3 = T_2 \left(\frac{P_3}{P_2} \right)^{(n-1)/n} = T_1 \left(\frac{P_3}{P_2} \right)^{(n-1)/n} \quad (2.80)$$

เพราะว่า $T_2 = T_1$ ดังนั้น

$$P_2 V_2 = P_1 V_1 \quad (2.81)$$

$$\text{และ} \quad P_4 = P_2 \quad (2.82)$$

แทนค่าสมการ (2.81) และ (2.82) ในสมการ (2.79)

$$\oint W = \frac{n}{n-1} P_1 V_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(n-1)/n} + \left(\frac{P_3}{P_2} \right)^{(n-1)/n} - 2 \right] \quad (2.83)$$

เมื่อพิจารณาจากรูป 2.24 จะเห็นว่าพื้นที่แรเงา 2-4-5-3 ซึ่งเป็นการประหยั้งงาน เมื่อใช้การหล่อเย็นระหว่างสูบและจะพบว่าถ้าความดันช่วงกลาง P_2 ลดลงไปหา P_1 ดังนั้นพื้นที่ 2-4-5-3 จะลดไปหาศูนย์ด้วย และถ้า P_2 เพิ่มขึ้นไปหา P_3 พื้นที่ 2-4-5-3 ก็ จะลดไปหาศูนย์ด้วย ซึ่งหมายความว่า ขณะนี้ความดันช่วงกลาง P_2 อยู่ ณ ที่ที่ทำให้พื้นที่ 2-4-5-3 สูงสุด นี่คือสถานะที่ $\oint W$ ต่ำสุด

เมื่อตรวจสอบสมการ (2.83) จะเห็นได้ว่าสำหรับ $\oint W$ ต่ำสุดแล้วค่า

$$\left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(n-1)/n} + \left(\frac{P_3}{P_2} \right)^{(n-1)/n} \right]$$

จะต้องมีค่าต่ำสุด ค่าอื่นๆ ทั้งหมดของสมการในที่นี้จะคงที่และ P_2 เป็นตัวแปร

ดังนั้นสำหรับค่า $\oint W$ ต่ำสุด

$$\frac{d\left[\left(P_2/P_1\right)^{(n-1)/n} + \left(P_3/P_2\right)^{(n-1)/n}\right]}{dP} = 0$$

Differentiating เทียบกับ P_2 จะได้

$$\frac{1}{P^{(n-1)/n}} \times \frac{n}{n-1} P_2^{((n-1)/n)-1} + P_3^{(n-1)/n} \left[-\frac{n-1}{n} P_2^{(-(n-1)/n)-1} \right] = 0$$

$$\frac{1}{P^{(n-1)/n}} \times \left(\frac{n}{n-1} \right) P_2^{-1/n} = P_3^{(n-1)/n} \times \left(\frac{n-1}{n} \right) P_2^{(-2n+1)/n}$$

$$\frac{P_2^{-1/n}}{P_2^{(-2n+1)/n}} = (P_1 P_3)^{(n-1)/n}$$

$$P_2^{-1/n} P_2^{(2n-1)/n} = (P_1 P_3)^{(n-1)/n}$$

$$P_2^{(2n-2)/n} = (P_1 P_3)^{(n-1)/n}$$

$$P_2^{2((n-1)/n)} = (P_1 P_3)^{(n-1)/n}$$

$$\therefore P_2^2 = P_1 P_3 \quad (2.84)$$

$$\text{จากนี้จะได้} \quad P_2 = (P_1 P_3)^{1/2} = \sqrt{(P_1 P_3)} \quad (2.85)$$

$$\text{และ} \quad \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_3}{P_2} \quad (2.86)$$

หรือ อัตราส่วนความดัน/ชั้น เท่ากัน

P_2 ที่หาได้สมการ (2.85) จะเป็นค่าความดันระหว่างสับตามอุดมคติ ซึ่งเมื่อมีการหล่อเย็นระหว่างสับสมบูรณ์ จะได้ค่า $\oint W$ ต่ำสุด ตามเงื่อนไขอุดมคตินี้ แทนค่าสมการ (2.81), (2.82) และ (2.86) ลงในสมการ (2.79) ซึ่งแสดงให้เห็นว่างานแต่ละสับเท่ากัน ดังนั้น

$$\oint W = \frac{2n}{n-1} P_1 V_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(n-1)/n} - 1 \right] \quad (2.87)$$

แทนค่าสมการ (2.85) ในสมการ (2.87)

$$\oint W = \frac{2n}{n-1} P_1 V_1 \left[\left(\frac{(P_1 P_3)^{1/2}}{P_1} \right)^{(n-1)/n} - 1 \right]$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{2n}{n-1} P_1 V_1 \left[\left(\left(\frac{P_3}{P_1} \right)^{1/2} \right)^{(n-1)/n} - 1 \right] \\
&= \frac{2n}{n-1} P_1 V_1 \left[\left(\frac{P_3}{P_1} \right)^{(n-1)/2n} - 1 \right] \tag{2.88}
\end{aligned}$$

ให้จำไว้ว่า P_3/P_1 คืออัตราส่วนความดันตลอดเครื่องอัด

จากการวิเคราะห์เครื่องอัดจะเป็นดังนี้คือ

สำหรับเครื่องอัดแบบขั้นเดียว

$$\oint W = \frac{n}{n-1} P_1 V_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(n-1)/n} - 1 \right]$$

สำหรับเครื่องอัดสองขั้น

$$\oint W = \frac{2n}{n-1} P_1 V_1 \left[\left(\frac{P_3}{P_2} \right)^{(n-1)/2n} - 1 \right]$$

ในทำนองเดียวกัน สำหรับเครื่องอัดสามขั้น

$$\oint W = \frac{3n}{n-1} P_1 V_1 \left[\left(\frac{P_4}{P_1} \right)^{(n-1)/3n} - 1 \right]$$

หรือ สำหรับเครื่องซึ่งมี x ขั้น

$$\oint W = \frac{xn}{n-1} P_1 V_1 \left[\left(\frac{P_{x+1}}{P_1} \right)^{(n-1)/xn} - 1 \right] \tag{2.89}$$

และ P_{x+1}/P_1 ก็คืออัตราส่วนความดันตลอดเครื่องอัดในแต่ละกรณี ถ้าเป็นเครื่องอัดตามอุดมคติที่มี x ขั้นแล้ว จะมีงานต่อกระบอกสูบเท่ากัน และสำหรับเครื่อง x ขั้น

$$\oint W = \frac{xn}{n-1} P_1 V_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(n-1)/n} - 1 \right] \tag{2.90}$$

ในการหาความดันช่วงกลาง สำหรับเครื่อง x ขั้น ภายใต้เงื่อนไขอุดมคติ ใช้สมการ (2.86) ซึ่งได้แสดงว่า อัตราส่วนความดันในแต่ละขั้นเท่ากัน

ดังนั้นสำหรับเครื่อง x ขั้น

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{P_3}{P_2} = \frac{P_4}{P_3} = \dots = \frac{P_{x+1}}{P_x} = k \quad (2.91)$$

จากนี้

$$P_2 = kP_1$$

$$P_3 = kP_2 = k^2 P_1$$

$$P_4 = kP_3 = k^3 P_1$$

$$\vdots$$

$$P_{x+1} = kP_x = k^x P_1$$

$$\therefore k^x = \left(\frac{P_{x+1}}{P_1} \right)$$

ดังนั้น

$$k = \sqrt[x]{\left(\frac{P_{x+1}}{P_1} \right)}$$

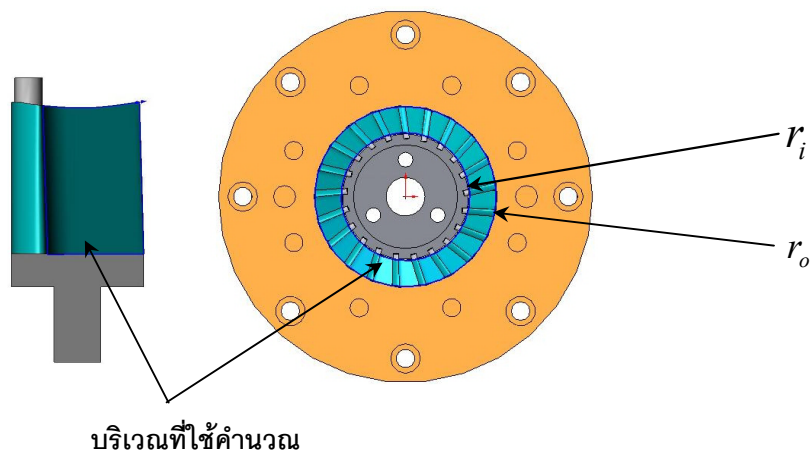
บทที่ 3
วิธีและขั้นตอนการสร้างชิ้นส่วนเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์โบ

3.1 การออกแบบชิ้นส่วน

3.1.1 การคำนวณหาพื้นที่การไหลตรงทางเข้าเทอร์โบ

ในการคำนวณจะเลือกพื้นที่ช่องทางเดินอากาศที่ทางเข้าแฉวใบพัดนิ่งเป็นเกณฑ์ หมายความว่า เป็นพื้นที่ช่องทางเดินอากาศที่แคบที่สุดอากาศมีการอัดตัวสูงสุด หลังจากนั้นไปจะเกิดการขยายตัวผ่านแฉวใบพัดหมุน ส่วนช่องทางอากาศก่อนหน้านี้ได้แก่ ที่ห้องเผาไหม้ ที่เครื่องอัดอากาศ จะต้องใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ เนื่องด้วยหลังจากทางเข้าเครื่องอัดอากาศ อากาศจะถูกอัดตัวขึ้นเรื่อยๆ จนถึงสุดขณะทางเข้าแฉวใบพัดนิ่ง

การหาพื้นที่การไหลอิสระตรงทางเข้าแฉวใบพัดนิ่ง (Nozzle blade)



รูปที่ 3.1 แสดงพื้นที่ช่องทางเดินอากาศอิสระของแฉวใบพัดนิ่งที่ใช้ในการคำนวณ

ขนาดพื้นที่วงแหวน (Annulus area) ตรงทางเข้าแฉวใบพัดนิ่งสามารถหาได้ดังนี้คือ

รัศมีวงใน	r_i	=	34.200	มิลลิเมตร
รัศมีวงนอก	r_o	=	48.700	มิลลิเมตร
พื้นที่บริเวณความหนาของใบพัด		=	58.600	ตารางมิลลิเมตร
จำนวนใบพัดทั้งหมด		=	21.000	ชิ้น

$$\text{พื้นที่วงแหวน} = \pi(r_o^2 - r_i^2)$$

$$= \pi(48.700^2 - 34.200^2) = 3,776.350 \text{ ตารางมิลลิเมตร}$$

เพราะฉะนั้นพื้นที่วงแหวนแฉวใบพัดนี้เท่ากับ 3,776.350 ตารางมิลลิเมตร

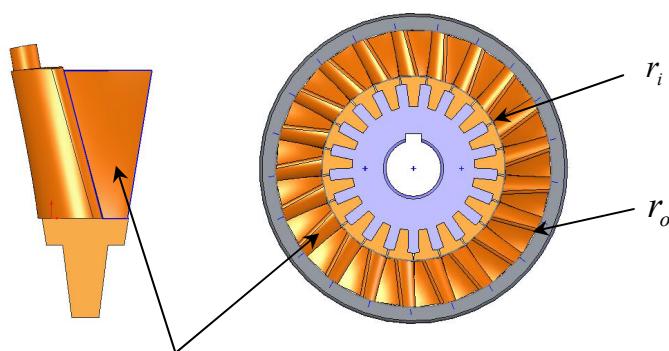
พื้นที่ช่องทางเดินอากาศอิสระสำหรับการไหลของแฉวใบพัดนี้ = พื้นที่วงแหวนแฉวใบพัดนี้ - (พื้นที่ความหนาของแฉวใบพัดนี้แต่ละใบ X จำนวนใบพัดนี้ทั้งหมด)

$$= 3,776.350 - (58.600 \times 21.000)$$

$$= 2,545.750 \text{ ตารางมิลลิเมตร}$$

ฉะนั้น ช่องทางเดินอากาศอิสระสำหรับการไหลของแฉวใบพัดนี้ เท่ากับ 2,545.750 ตารางมิลลิเมตร

การหาพื้นที่การไหลอิสระตรงทางเข้าแฉวใบพัดหมุน (Rotor blade)



บริเวณที่ใช้คำนวณ

รูปที่ 3.2 แสดงพื้นที่ช่องทางเดินอากาศอิสระของแฉวใบพัดหมุนที่ใช้ในการคำนวณ

ขนาดพื้นที่วงแหวนตรงทางเข้าแฉวใบพัดหมุนสามารถหาได้ดังนี้คือ

รัศมีวงใน	r_i	=	33.270	มิลลิเมตร
รัศมีวงนอก	r_o	=	50.250	มิลลิเมตร
พื้นที่ความหนาของใบพัด		=	104.960	ตารางมิลลิเมตร
จำนวนใบพัด		=	21.000	ชิ้น

$$\text{พื้นที่ในวงแหวน} = \pi(r_o^2 - r_i^2)$$

$$= \pi(50.250^2 - 33.270^2)$$

$$= 4,455.310 \text{ ตารางมิลลิเมตร}$$

เพราะฉะนั้นพื้นที่วงแหวนของแฉวใบพัดหมุน เท่ากับ 4,455.310 ตารางมิลลิเมตร

พื้นที่ช่องทางเดินอากาศอิสระสำหรับการไหลของแกวไพบัดหมุน = พื้นที่วงแหวนแกวไพบัดหมุน – (พื้นที่ความหนาของไพบัดหมุนแต่ละใบ X จำนวนใบพัดหมุนทั้งหมด)

$$= 4,454.270 - (104.960 \times 21.000)$$

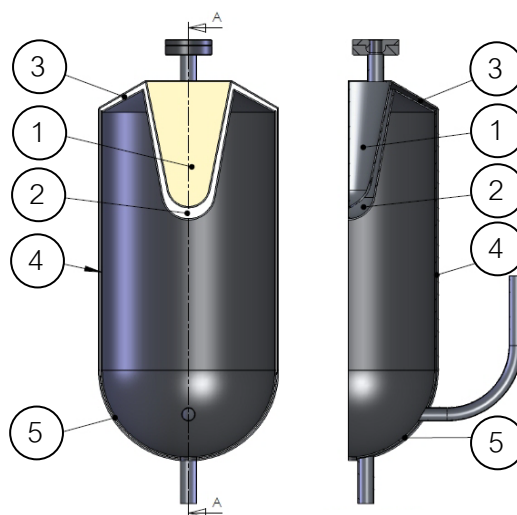
$$= 2,251.150 \text{ ตารางมิลลิเมตร}$$

ฉะนั้น ช่องทางเดินอากาศอิสระสำหรับการไหลของแกวไพบัดหมุน เท่ากับ 2,251.150 ตารางมิลลิเมตร

เราจะยึดพื้นที่การไหลของอากาศตรงทางเข้าแกวไพบัดนึ่งเป็นเกณฑ์ ในพื้นที่การไหลของอากาศตรงนี้จะแคบที่สุด และอากาศเกิดการอัดตัวสูงสุด หลังจากตรงนี้ไปอากาศจะเกิดการขยายตัวเมื่อเข้าสู่ไพบัดหมุน

ลักษณะของการออกแบบ จะทำการออกแบบให้เกิดการอัดตัวของอากาศ โดยจะทำการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดสำหรับการไหลลงมาจากพื้นที่หน้าตัดใหญ่ที่สุดที่ทางเข้าเครื่องอัดอากาศ ไปสู่หน้าตัดที่เล็กกว่าขณะที่ไหลผ่านห้องเผาไหม้และเล็กลงอีกเรื่อยๆ จนเล็กที่สุดเพื่อไหลลงสู่ไพบัดนึ่ง ในที่นี้เมื่อสามารถคำนวณหาพื้นที่การไหลตรงแกวไพบัดนึ่งได้แล้ว จะนำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณหาขนาดเฟรม ที่ใช้เป็นทางเดินของอากาศก่อนที่จะเข้าปะทะแกวไพบัดนึ่ง

3.1.2 การหาขนาดห้องเผาไหม้ถ่ายเทความร้อน

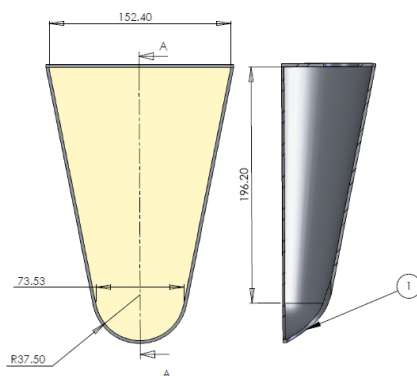


รูปที่ 3.3 แสดงส่วน ประกอบของห้องเผาไหม้

- | | |
|---|-------------------------------|
| 1.บริเวณ ถังพักอากาศอัดจากเครื่องอัดอากาศ | 2.บริเวณ ทรงกรวยรับความร้อน |
| 3.บริเวณ ส่วนด้านบนรับความร้อน | 4.บริเวณ ทรงกระบอกรับความร้อน |
| 5.บริเวณ กันถังก่อนเข้าสู่ เทอร์ไบน์ | |

การออกแบบห้องเผาไหม้ถ่ายเทความร้อนนั้น จะทำการออกแบบให้ห้องเผาไหม้ทำด้วยโลหะและทำการผ่าครึ่งออกเป็นสองส่วน มีลักษณะเป็นถังโลหะสองชั้นซ้อนกันอยู่มีระยะห่างระหว่างถัง (Clearance) 2-3 มิลลิเมตร สำหรับเป็นทางเดินอากาศของระบบเทอร์ไบน์ ซึ่งพื้นที่ทางเดินอากาศนี้ จะต้องมีความกว้างใหญ่กว่าช่องที่ทางเข้าแถวใบพัดนี้ แต่เล็กกว่าของเครื่องอัดอากาศ เมื่อประกอบถังโลหะทั้งสองส่วนเข้ากันแล้วห้องบริเวณภายในถังชั้นใน จะมีการวางตะแกรงลงไป เพื่อใส่เชื้อเพลิงแข็งลงบนตะแกรง และป้อนอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ตรงบริเวณส่วนล่างตรงช่องป้อนอากาศ เมื่อเผาเชื้อเพลิงจะได้ความร้อนถ่ายเทเข้าสู่ระบบอากาศของเทอร์ไบน์และออกแบบให้มีช่องออกของไอเสียอยู่ด้านล่างของห้องเผาไหม้ เพื่อป้องกันความร้อนออกสู่สิ่งแวดล้อมจะทำการหุ้มด้วยฉนวนกันความร้อน ด้วยอิฐทนไฟที่มีค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ที่ต่ำ เพื่อเก็บความร้อนจากอิฐมวลเบาทำการหุ้มฉนวนเซรามิกไฟเบอร์ (Ceramic fiber) ที่มีค่าการนำความร้อนต่ำกว่าอิฐทนไฟอีกชั้นหนึ่ง เพื่อป้องกันการนำความร้อนออกนอกห้องเผาไหม้ แล้วทำการหุ้มกระจกเงาอีกชั้นหนึ่ง เพื่อป้องกันการแผ่รังสีความร้อนออกนอกห้องเผาไหม้ เพื่อให้ห้องเผาไหม้สูญเสียความร้อนน้อยที่สุด จะทำการหุ้มโลหะแผ่นบาง เพื่อเพิ่มความแข็งแรงแก่ฉนวนกันความร้อนอีกชั้นหนึ่ง

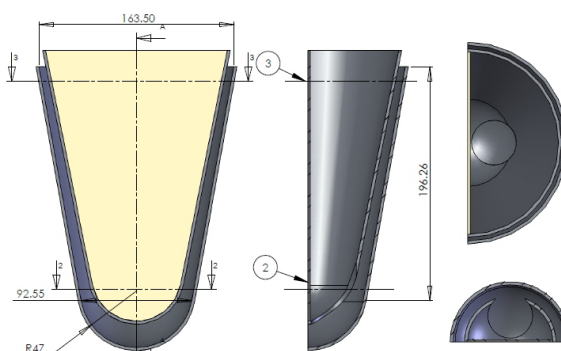
1. บริเวณถังพักอากาศอัดจากเครื่องอัดอากาศ



รูปที่ 3.4 บริเวณถังพักอากาศอัดจากเครื่องอัดอากาศ

บริเวณที่ 1	ขนาดเตาหนึ่งส่วน	ขนาดเตาทั้งสองส่วน	หน่วย
พื้นที่หน้าตัดระนาบ 1	2,026.830	4,053.660	ตารางมิลลิเมตร
ปริมาตร	1,062,246.390	2,124,492.780	ลูกบาศก์มิลลิเมตร

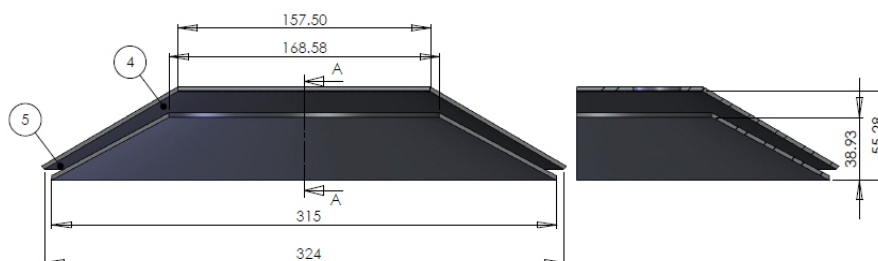
2. บริเวณทรงกรวยรับความร้อน



รูปที่ 3.5 บริเวณทรงกรวยรับความร้อน

บริเวณที่ 2	ขนาดเตาหนึ่งส่วน	ขนาดเตาทั้งสองส่วน	หน่วย
พื้นที่หน้าตัดระนาบ 2	1,307.950	2,615.900	ตารางมิลลิเมตร
พื้นที่หน้าตัดระนาบ 3	1,426.500	2,853.000	ตารางมิลลิเมตร
ปริมาตร	224,092.550	448,185.100	ลูกบาศก์มิลลิเมตร
พื้นที่ผิว	48101.150	96,202.300	ตารางมิลลิเมตร

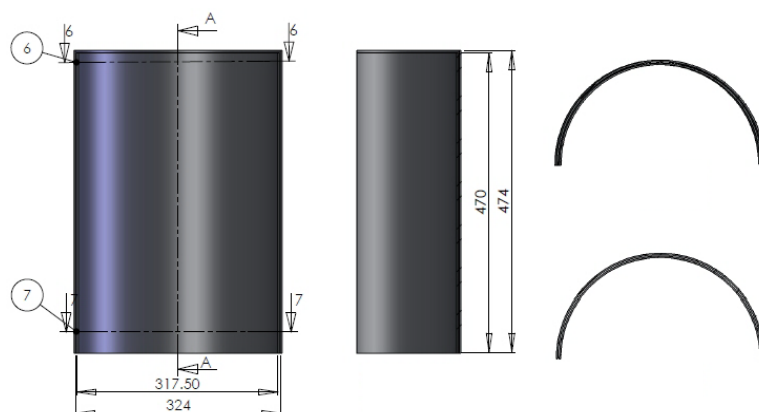
3. บริเวณส่วนด้านบนรับความร้อน



รูปที่ 3.6 บริเวณส่วนด้านบนรับความร้อน

บริเวณที่ 3	ขนาดเตาหนึ่งส่วน	ขนาดเตาทั้งสองส่วน	หน่วย
พื้นที่หน้าตัดระนาบ 4	2338.125	4,676.250	ตารางมิลลิเมตร
พื้นที่หน้าตัดระนาบ 5	2,862.920	5,725.840	ตารางมิลลิเมตร
ปริมาตร	349,914.670	699,829.340	ลูกบาศก์มิลลิเมตร
พื้นที่ผิว	31,491.530	62,983.060	ตารางมิลลิเมตร

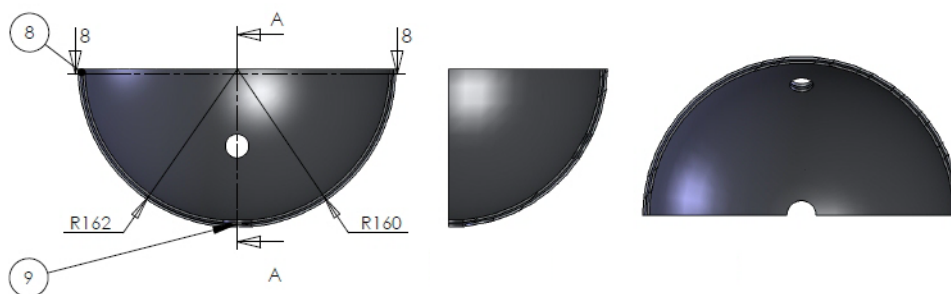
4. บริเวณทรงกระบอกรับความร้อน



รูปที่ 3.7 บริเวณทรงกระบอกรับความร้อน

บริเวณที่ 4	ขนาดเดาหนึ่งส่วน	ขนาดเดาทั้งสองส่วน	หน่วย
พื้นที่หน้าตัดระนาบ 6	1,522.100	3,044.200	ตารางมิลลิเมตร
พื้นที่หน้าตัดระนาบ 7	1,522.100	3,044.200	ตารางมิลลิเมตร
ปริมาตร	715,387.770	1,430,775.540	ลูกบาศก์มิลลิเมตร
พื้นที่ผิว	232,556.400	465,112.800	ตารางมิลลิเมตร

5. บริเวณก้นถังก่อนเข้าสู่เทอร์ไบน์



รูปที่ 3.8 บริเวณก้นถังก่อนเข้าสู่เทอร์ไบน์

บริเวณที่ 5	ขนาดเดาหนึ่งส่วน	ขนาดเดาทั้งสองส่วน	หน่วย
พื้นที่หน้าตัดระนาบ 8	1,522.100	3,044.200	ตารางมิลลิเมตร
พื้นที่หน้าตัดระนาบ 9	1,385.440	2,770.880	ตารางมิลลิเมตร
ปริมาตร	162,160.140	324,320.280	ลูกบาศก์มิลลิเมตร
พื้นที่ผิว	77,028.040	154,056.080	ตารางมิลลิเมตร

3.1.3 เครื่องอัดอากาศ (Reciprocating Air Compressor)

งานวิจัยนี้เลือกใช้เครื่องอัดอากาศชนิดลูกสูบ (Reciprocating air compressor) เนื่องจากให้แรงดันสูงและหาง่ายในท้องตลาด จึงเลือกซื้อเครื่องที่ให้ปริมาณลมที่พอเหมาะกับเทอร์โบโบว์ ได้แก่ ยี่ห้อ PUMA รุ่น PP275 ขนาด 7.5 HP, 5.5 KW, จำนวนหัวสูบ 2 หัว, ปริมาณลมที่ให้ 1,280 l/min

หาอุณหภูมิของอากาศที่ออกจากเครื่องอัดอากาศ

โดยกำหนดให้ ค่าดัชนีโพลีโทรปิก เท่ากับ 1.300

ความดันในการอัด เท่ากับ 1,378.950 กิโลปาสคาล

ตลอดขบวนการสภาวะของอากาศเข้ามีความดัน 97.000 กิโลปาสคาล

ตลอดขบวนการสภาวะของอากาศเข้ามีอุณหภูมิ 25.000 องศาเซลเซียส

$$\text{จากสมการที่ 69} \quad T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(n-1)/n}$$

$$\begin{aligned} \text{แทนค่าในสมการ} \quad T_2 &= 298.000K \left(\frac{1,378.950kPa}{97.000kPa} \right)^{(1.3-1)/1.3} \\ &= 548.720 K \end{aligned}$$

$$T_2 = (548.720 - 273.000) = 215.720 ^\circ\text{C}$$

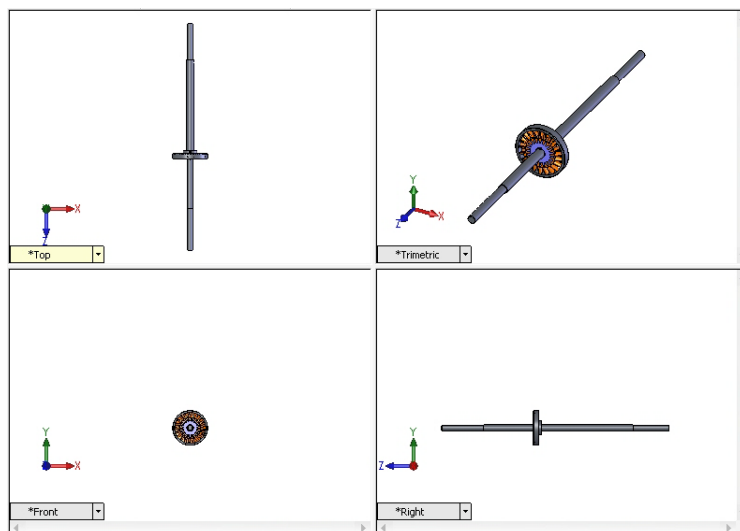
เพราะฉะนั้น อุณหภูมิอากาศที่ออกจากเครื่องอัดคือ 215.720 องศาเซลเซียส

3.1.4 การออกแบบเพลลา

ทำการออกแบบลักษณะของเพลลาที่ต้องการ ซึ่งรายละเอียดในการออกแบบ ได้แก่ ลักษณะของเพลลา ขนาดของเพลลาที่ต้องการ วัสดุในการผลิต ตำแหน่งและการยึดแบริโอพัดหมุน (Rotor) เข้ากับตัวเพลลาขับ ตำแหน่งของรองเพลลา (Bearing) ชนิดของรองเพลลา

ในขั้นแรกนั้นทำการออกแบบลักษณะของเพลลาและวิธีจับยึดเพลลา โดยจะทำการออกแบบด้วยคอมพิวเตอร์ เพื่อที่จะสามารถทราบรายละเอียดได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.9

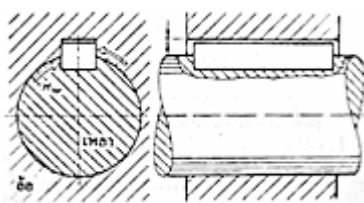
เมื่อได้ทำการการออกแบบลักษณะเบื้องต้นของเพลลาโดยคำนึงถึง ตำแหน่งของการสวมแบริโอพัดหมุน (Rotor) และรองเพลลา (Bearing) แล้ว ขั้นต่อไปจะทำการออกแบบการจับยึดชิ้นส่วนของแบริโอพัดหมุนเข้ากับเพลลาขับ



รูปที่ 3.9 แสดงการออกแบบลักษณะเบื้องต้นของเพลลา

การยึดเพลากับแฉวใบพัดหมุน

ในขั้นตอนนี้จะเลือกลักษณะของลิ้มและร่องลิ้มที่เป็นแบบลิ้มอัด (Flat keys) โดยลิ้มชนิดนี้จะไม่มีความลาดตามแนวยาวของลิ้ม แรงที่ขับเพลาลให้หมุนจะกระทำผ่านผิวด้านข้างของลิ้มอัด นั่นคือ ผิวด้านข้างจะได้รับภาระเฉือนและมีข้อดีกว่านี้คือ ระหว่างล้อกับเพลาก็จะไม่มีการเยื้องศูนย์เหมือนลิ้มส่งกำลัง [17] ทำการยึดระหว่างเพลากับวงล้อแฉวใบพัดเทอร์ไบน์ และลิ้มอัดกระทำด้วยการวางลิ้มอัดบนร่องเพลลา แล้วอัดให้ลงไปสนิทกับร่องเพลลาจากนั้นจึงประกอบเข้าจานแฉวใบพัดโดยให้ร่องของจานแฉวใบพัดสวมเข้ากับลิ้มอัด (มีส่วนที่เหลือโผล่ขึ้นมาจากร่องเพลลา) ส่วนมากจะนิยมใช้งานกับเพลลาที่หมุนขับด้วยทอร์ก (Torque) ไปในทิศทางเดียว ข้อดีของลิ้มอัดชนิดนี้คือ เหมาะกับงานที่มีความเร็วรอบสูงได้ [18]



รูปที่ 3.10 แสดงชนิดของลิ้มอัด

ขั้นต่อไปจะเป็นจะทำการเลือกวัสดุในการออกแบบให้ตรงกับการใช้งาน ตัวอย่างเช่น ความทนทานในการใช้งานที่อุณหภูมิสูง ทนการขัดถู ความแข็งแรง ความสามารถในการขึ้นรูป เป็นต้น

การเลือกวัสดุในการผลิตเพลลา

การเลือกวัสดุในการผลิตเพลลา เพื่อใช้สำหรับยึดกับจานของแฉวไบพัตเตอร์ไบน์ จะต้องคำนึงถึง คุณสมบัติในการใช้งาน ความแข็งแรง การทนต่อความสึกหรอ เป็นต้น ดังนั้นจึงทำการเลือกใช้งาน เหล็กกล้าสำหรับงานร้อน (Hot work tool steel) W 302 เนื่องจากมีสมบัติที่ดีมาก ได้แก่ มีความแข็งแรงมากที่อุณหภูมิปกติ และคงความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูงดี ทนต่อการสึกหรอที่อุณหภูมิสูง ทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน ทนต่อการล้าร้อน ต้านทานต่อการเกิดออกไซด์ที่อุณหภูมิสูง ความเหนียวแกร่งสูงมาก ชุบแข็งไม่เสียรูป ตัดกลึงง่าย สามารถขัดเงาได้ดี นอกจากนี้ยังมีความเหนียวสูงและทนทานต่อการเสียดสีหรือการสึกหรอดีเป็นเลิศ [19-20]

ตารางที่ 3.1 แสดงส่วนผสมทางเคมีของ W302

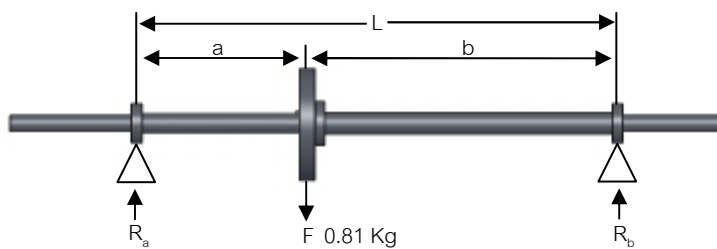
เกรดเหล็ก (BOHLER)	ส่วนผสมทางเคมี					
	C	Si	Mn	Cr	Mo	V
W 302	0.38	1.05	0.40	5.20	1.40	1.00

เมื่อทำการออกแบบลักษณะของเพลลาขับ วิธีในการจับยึด (ซึ่งมีผลต่อความแข็งแรง) และวัสดุในการผลิตเพลลาได้แล้ว ต่อไปจะทำการคำนวณขนาดของเพลลาขับที่ต้องการเพราะ ขนาดของเพลลาขับจะเป็นตัวกำหนด ระยะโก่งของเพลลาและความเร็ววิกฤติ ซึ่งจะต้องคำนึงถึงอย่างมากในการออกแบบเพอร์ไบน์ เนื่องจากการมีความเร็วรอบสูงที่สูงเกินไปจะทำให้ โมเมนต์บิด องศาการบิด และค่าความเค้นเฉือน ล้วนมีค่าสูงก่อให้เกิดการพังเสียหายได้ง่าย

ความเร็ววิกฤติของเพลลา(Critical speed and shaft deflection) [21-28]

ในทางปฏิบัติจุดศูนย์ถ่วงของเพลลา อาจจะเยื้องไปจากแนวศูนย์กลางของการหมุนเนื่องจาก ในกระบวนการผลิตอาจทำให้มวลกระจายรอบแกนไม่สม่ำเสมอ หรือระยะแอนสถิติที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักของเพลลา เฟือง (Gear) พูลเลย์ (Pulley) และส่วนอื่นๆ

เมื่อเพลลาหมุนด้วยความเร็วที่เพิ่มขึ้น จะเกิดแรงปฏิกิริยาหนีศูนย์กลาง (Centrifugal force) ที่จุดศูนย์กลางมวล (Centre of mass) ทำให้เพลามีแนวโน้มที่จะเกิดการโก่งขึ้นได้และถ้าการโก่งที่เกิดขึ้นนั้นมีค่ามากพอ อาจจะสามารถทำให้เกิดการแตกหักของเพลลา เกิดความเสียหายต่อรองเพลลา และในบางกรณีอาจจะทำให้เกิดการสั่นของเครื่องจักรอันนำไปสู่ความเสียหายต่อเครื่องจักรโดยรวมได้



รูปที่ 3.11 แสดงเพลลาเพื่อใช้ในการคำนวณ

สามารถ หาระยะโก่งของเพลลาขึ้น ได้จากสมการต่อไปนี้

$$y = \frac{Fb(L^2 - b^2)^{3/2}}{9\sqrt{3}EIL} \quad (3.1)$$

เมื่อกำหนดให้	a (ความยาวระหว่าง R_a ถึงแรง F) =	176	มิลลิเมตร
	b (ความยาวระหว่าง R_b ถึงแรง F) =	302	มิลลิเมตร
	d (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพลลา) =	20	มิลลิเมตร
	L (ความยาวเพลลาจาก R_a ถึง R_b) =	478	มิลลิเมตร
	W (น้ำหนัก) =	0.81	กิโลกรัม
	E (อีลาสติกโมดูลัส) =	185.3	กิโลนิวตันต่อตารางมิลลิเมตร
	F (แรงดึง) =	$0.81 \times 9.81 = 7.94$	นิวตัน

$$I = \frac{\pi d^4}{64} = \frac{\pi 20^4}{64} = 7,853.98 \quad (3.2)$$

แทนค่าลงในสมการที่ (3.1) จะได้

$$y = \frac{7.94 \times 302 \times (478^2 - 302^2)^{3/2}}{9\sqrt{3} \times 185.30 \times 1000 \times 7,853.98 \times 478}$$

$$= 0.011 \text{ มิลลิเมตร}$$

ดังนั้นจะได้การโก่งของเพลลาขึ้น ณ ตำแหน่งของน้ำหนัก F เท่ากับ 0.011 มิลลิเมตร

จากนั้นนำค่าระยะโก่งที่ได้ มาหาค่าความเร็ววิกฤตของการหมุนของเพลลา ซึ่งหาได้

$$\text{จากสมการ } n_c = 945 \left[\frac{\sum W y}{\sum W y^2} \right]^{1/2} \quad (3.3)$$

เมื่อ n_c คือ ความเร็ววิกฤต

$\sum W$ คือ ผลรวมจำนวนน้ำหนักแต่ละชิ้น (แต่ในที่นี้มีเพียงชิ้นเดียว) = 0.81 กิโลกรัม

y คือ ระยะโก่งของเพลลา = 0.011 มิลลิเมตร

เมื่อแทนค่าต่างๆ ในสมการที่ (3.3) เราจะได้

$$n_c = 945 \left[\frac{0.81 \times 0.011}{0.81 \times 0.011^2} \right]^{1/2}$$

$$= 9,010 \text{ รอบต่อนาที}$$

เพราะฉะนั้นความเร็ววิกฤติของเพลาชับมีค่า เท่ากับ 9,010 รอบต่อนาที ซึ่งค่าความเร็ววิกฤตทางทฤษฎีค่านี้นี้จะสูงกว่าค่าที่ได้จากการทดลองเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากการหน่วงตัวเอง (Self damping) ของวัสดุเพลลา ในทางปฏิบัติมักจะออกแบบให้เพลลาทำงานที่ความเร็วต่ำกว่าความเร็ววิกฤติอย่างน้อย 25% เพื่อหลีกเลี่ยงการสั่นสะเทือนอย่างรุนแรงของเพลลา [22]

โมเมนต์บิด

โมเมนต์บิด หรือ แรงบิด คือ โมเมนต์ที่กระทำรอบแกนที่ตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดของเพลลา ชับ (คือแกนของเพลลา) เมื่อใส่แรงบิดให้กับเพลลาจะทำให้วัสดุคือเพลลาเกิดการเปลี่ยนรูปซึ่งเราสามารถหาโมเมนต์บิดได้จากสมการต่อไปนี้

$$W_p = T\omega = 2\pi nT \quad (3.4)$$

$$T = \frac{W_p}{2\pi n} = \frac{7,500 \times 60}{2\pi \times 5,000} = 14.32 \text{ Nm}$$

เพราะฉะนั้นเพลลาของเทอร์ไบน์มีโมเมนต์บิดไม่ควรเกินเท่ากับ 14.32 นิวตันเมตร

มุมการบิด

ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่มีพื้นที่หน้าตัดกลมที่อยู่ภายใต้โมเมนต์บิด (Torque) จะบิดไปเป็นมุมเรียกว่า มุมบิด (Angle of twist) เป็นค่ามุมบิดองศาสามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$\theta = \frac{584TL}{Gd^4} \quad (3.5)$$

เมื่อแทนค่าต่างๆ ที่ทราบลงในสมการ (3.5) จะได้

$$\theta = \frac{584 (14.32) (478)}{(71.26)(20^4)}$$

$$= 0.35^\circ$$

ถึงแม้ว่าจะไม่มีมาตรฐานสำหรับพิกัดมุมบิดของเพลลา ในทางปฏิบัติแล้วมักจะให้มุมบิดของเพลลาในเครื่องจักรกลทั่วไปไม่เกิน 0.3° ต่อความยาวเพลลา 1 เมตร [22]

ความเค้นเฉือนที่เกิดจากการบิดของเพลาชั้บจะมีค่าผันแปรตามระยะจากจุดศูนย์กลางออกมาและจะมีค่าสูงสุดที่ผิวนอกของเพลาชั้บ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\tau = \frac{Tr}{J} \quad (3.6)$$

เมื่อ J คือโมเมนต์ความเฉื่อยเชิงขั้วหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าโมเมนต์อันดับสองของพื้นที่ (2^{nd} moment of area) (Polar moment of inertia) หาได้จาก

$$J = \frac{\pi}{32} d^4 \quad (3.7)$$

แทนค่าลงไปในสมการ (3.7) จะได้ $J = \frac{\pi}{32} 20^4 = 15,707.96 \text{ mm}^4$

นำค่า J และอื่นๆแทนลงในสมการที่ (3.6) จะได้ความเค้นเฉือน

$$\tau = \frac{14.32 \times 10}{15,707.96} = 9.11 \text{ N/mm}^2$$

เพราะฉะนั้นความเค้นเฉือนที่เกิดจากการรับโมเมนต์บิดจะมีค่าเท่ากับ 9.11 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร

การคำนวณขนาดเพล่า [22]

สมการคำนวณขนาดเพล่าชั้บได้โดยใช้วิธีการไซเดอร์เบอร์ร่วมกับทฤษฎีความเสียหาย

วิธีทำ กำลังงานที่เพล่า $= W_p = 2\pi nT$

$$75,000 = 2\pi \left[\frac{5,000}{60} \right] T$$

จะได้โมเมนต์บิด $T = 143.24 \text{ Nm}$

ทำสมดุลโมเมนต์ที่ปลาย A; $0 = (176+302)R_b - (176 \times 0.81 \times 9.81)$

$$R_b = 2.925 \text{ N}$$

ดังนั้นโมเมนต์ดัดสูงสุด $M_a = 2.925 \times 302 = 883.58 \text{ Nmm}$

เนื่องจากความเค้นดัดที่เกิดในเพล่านั้นได้ค่า $\sigma_{MAX} = -\sigma_{MIN}$

เพราะฉะนั้น $\sigma_m = \frac{\sigma_{MAX} + \sigma_{MIN}}{2} = 0$

และ $\sigma_a = \frac{\sigma_{MAX} - \sigma_{MIN}}{2} = \sigma_{MAX}$

จากสมการ
$$\sigma_a = \frac{32M_a}{\pi d^3 (1 - K^4)} \quad (3.8)$$

ในกรณีของเพลาดัน

$$K = \frac{d_i}{d} = 0$$

แทนค่าในสมการที่ (3.8); $\sigma_a = \frac{32M_a}{\pi d^3(1-K^4)} = \frac{32 \times 883.58}{\pi d^3}$
 $= \frac{9,000}{d^3}$

เนื่องจากโมเมนต์บิดมีค่าคงตัวจึงทำให้ความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากันตลอดรอบผิวของเพลาดังนั้น $\tau_a = 0$

จากสมการ

$$\tau_m = \frac{16T_m}{\pi d^3(1-K^4)} \quad (3.9)$$

$$\tau_m = \frac{16T_m}{\pi d^3(1-K^4)} = \frac{16 \times 143,240}{\pi d^3}$$

$$= \frac{729,31.16}{d^3}$$

จากตารางที่ ก.1 กำหนดให้ $K_f = K_{fs} = 1.6$

จากตารางที่ ก.2 ค่าเฉลี่ยความเค้นคือ

$$\sigma_u = 856.22 \quad N/mm^2$$

$$\sigma_y = 702.78 \quad N/mm^2$$

$$\sigma'_n = 0.5\sigma_u = 0.5 \times 856.22 = 428.11 \quad N/mm^2$$

จากรูปที่ ก.1 ตัวประกอบของผิว $K_a = 0.89$

สมมติว่าเพลาดันมีขนาดเล็กกว่า 50 mm ดังนั้นตัวประกอบของขนาด $K_b = 0.85$

เพราะฉะนั้น $\sigma_n = 0.89 \times 0.85 \times 428.11 = 323.865 \quad N/mm^2$

เมื่อใช้ใช้ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด เราจะได้

$$\tau_y = 0.5\sigma_y = 0.5 \times 702.78 = 351.39 \quad N/mm^2$$

จากสมการ

$$\frac{1}{N} = \left[\left[\frac{\sigma_m}{\sigma_y} + K_f \frac{\sigma_a}{\sigma_n} \right]^2 + \left[\frac{\tau_m}{\tau_y} + K_{fs} \frac{\tau_a}{\tau_n} \right]^2 \right]^{1/2}$$

เมื่อแทนค่า $\sigma_m = \tau_a = 0$ ลงในสมการบน

สมการจะลดรูปลงเหลือ
$$\frac{1}{N} = \left[\left[K_f \frac{\sigma_a}{\sigma_n} \right]^2 + \left[\frac{\tau_m}{\tau_y} \right]^2 \right]^{1/2}$$

กำหนดให้เพลามีร่องลิ้นแบบ Sled runner และผิวหน้าผ่านการเจียระไน ให้ใช้ค่า $N=1.8$

และเมื่อแทนค่าต่างๆที่ทราบค่าลงในสมการ

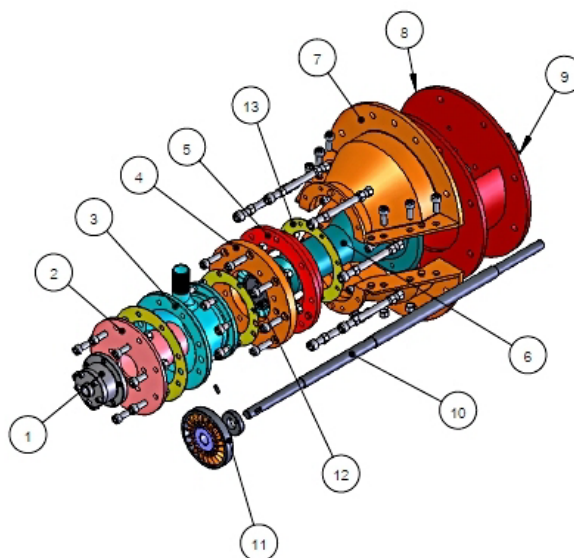
เราจะได้
$$\frac{1}{1.8} = \left[\left[1.6 \times \frac{9,000}{323.865 d^3} \right]^2 + \left[\frac{72931.16}{351.39 d^3} \right]^2 \right]^{1/2}$$

 $d = 7.2 \text{ mm}$

จากการคำนวณขนาดของเพลาโดยใช้วิธีการไซเดอร์เบอร์ร่วมกับทฤษฎีความเสียหายเราได้ขนาดเพลามีค่าเท่ากับ 7.2 มิลลิเมตร แต่จากการนำขนาดเพลานี้ไปคำนวณค่าความเร็ววิกฤติ ผลปรากฏว่าขนาดเพลานี้ใช้ไม่สามารถรองรับความเร็วที่ต้องการได้ เพราะจะทำให้เกิดการโก่งของเพลารุ่งขึ้นถึง 6.17 มิลลิเมตร จึงต้องทำการเพิ่มขนาดเพลเพื่อให้สามารถรองรับความเร็วการใช้งานได้ ดังนั้นจึงเลือกขนาดเพลเป็น 20 มิลลิเมตร เพื่อใช้งานที่ความเร็ววิกฤติ เท่ากับ 9,010 รอบต่ออนาที

3.2 วิธีสร้างชิ้นส่วนต่างๆ

3.2.1 การสร้างชิ้นส่วนเทอร์ไบน์



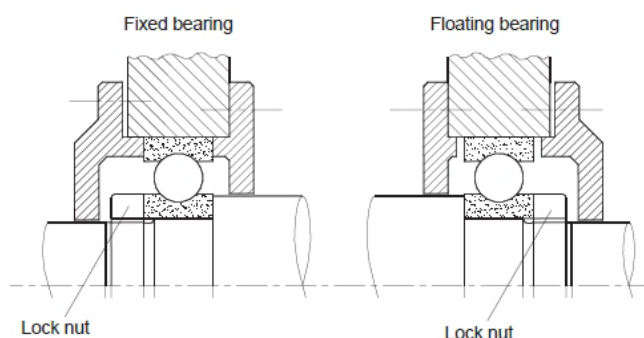
รูปที่ 3.12 แสดงส่วนประกอบ ต่างๆของเทอร์ไบน์ที่ออกแบบไว้แล้ว

- | | |
|--|--|
| 1.เสื้อใส่ตลับลูกปืน (Housing_01, 02) | 2.เฟรมด้านใน (Frame_01) |
| 3.เฟรมด้านนอก (Frame_02) | 4.ชิ้นส่วนยึดใบพัดนิ่ง (Frame_03) |
| 5.ชิ้นส่วนสำหรับใช้สวมเฟรมใบพัดนิ่ง (Frame_04) | 6.ชิ้นส่วนป้องกันเพลาด้านท้าย (Frame_05) |
| 7.เฟรมสวมใบพัดหมุน (Frame_06) | 8.เฟรมทางออกของอากาศ (Frame_07) |
| 9. เสื้อใส่ตลับลูกปืน (Housing) | 10.เพลาชับ (Shaft_01) |
| 11.โรเตอร์ (Rotor_01) | 12.สเตเตอร์ (Stator_01) |

ในขั้นตอนแรก จะทำการศึกษารวบรวมรายละเอียดต่างๆของชิ้นส่วนเทอร์โบน์ ทำการกำหนดรายละเอียดทางชิ้นส่วนต่างๆ จากนั้นทำการผลิตชิ้นส่วนโดยคำนึงถึงวิธีการ ขั้นตอน ในการผลิต เครื่องจักรที่ใช้ในการผลิต และวัสดุที่นำมาผลิตรายละเอียดของชิ้นส่วนต่างๆที่ได้ ออกแบบแล้ว แสดงในรูปที่ 3.12 ดังต่อไปนี้

3.2.1.1 เสื้อใส่ตลับลูกปืน (Housing) (Housing_01, Housing_02)

เสื้อใส่ตลับลูกปืนทำหน้าที่ทั้งกำกับตลับลูกปืน (Bearing) ให้อยู่ภายใน และรองรับเพลาด้วย ดังแสดงในรูปที่ 3.14 ในระหว่างการใช้งานจะมีการขยายตัวของเพลานี้เนื่องจากการรับภาระ (Load) ในแนวรัศมีหรือไม่ก็ขยายตัวเนื่องจากความร้อน ทำให้ลูกปืนถูกเบียดทางด้านข้างค่อนข้างมาก จึงอาจเสียหายเร็วกว่าปกติ ดังนั้นจำเป็นต้องให้เบริงตัวใดตัวหนึ่งปรับตัว ขยับตามแนวแกนได้บ้าง รองเพลาด้านที่ยึดแน่น (Fixed bearing) จะรับแรงตามแนวแกนและแนวรัศมี ส่วนรองเพลายืดอิสระ (Floating bearing) จะสามารถรับแรงในแนวรัศมีเพียงอย่างเดียว [24] ในการออกแบบจะใช้รองเพลาด้านที่ยึดแน่น 1 ตัว และรองเพลายืดอิสระ 1 ตัว มีระยะขับที่ แหวนในกับเพลาดังรูปที่ 3-13

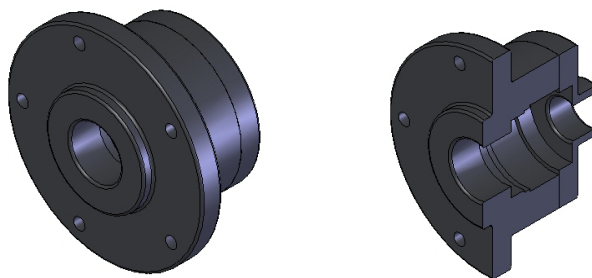


รูปที่ 3.13 การวางรองเพลาโดยใช้ลูกปืนแบบเม็ดกลมร่องลึก (Deep groove ball bearing)

สำหรับรองรับแรงตามแนวแกนและแนวตามรัศมีขนาดปานกลาง [28]

รายละเอียดกระบวนการผลิตชิ้นส่วนของเสื้อใส่ตลับลูกปืนสามารถแบ่งได้ดังต่อไปนี้คือ

3.2.1.1.1 ศึกษารายละเอียดชิ้นส่วนที่ได้ทำการออกแบบ จากนั้นเริ่มขั้นตอนเขียนแบบชิ้นส่วนโดยใช้ซอฟต์แวร์ CAD (Computer Aided Design) พร้อมทั้งจัดทำรายละเอียดในการผลิตชิ้นส่วนของเสื้อใส่ตลับลูกปืนที่ถูกออกแบบดังแสดงในรูปที่ 3.14



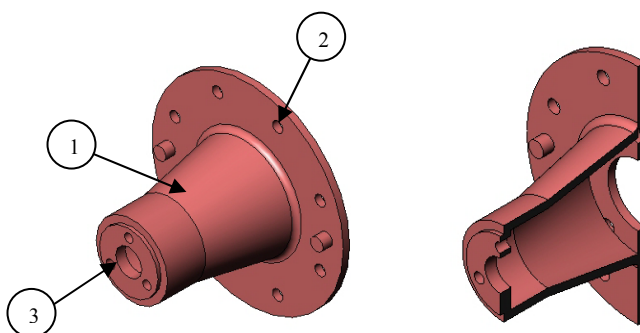
รูปที่ 3.14 แสดงเสื้อใส่ตลับลูกปืนที่ออกแบบแล้ว (Housing)

3.2.1.1.2 กระบวนการผลิตชิ้นส่วนประกอบไปด้วย

- เลือกใช้เหล็กกล้าผสม 4140 (ตามมาตรฐาน AISI ของอเมริกา) มาทำการขึ้นรูปด้วยการกลึงให้ได้ขนาดของชิ้นส่วนตามที่ระบุไว้ในแบบ
- ทำการเจาะรูร้อยbolt (Bolt)
- ทำเกลียวใน ตามขนาดตามที่ระบุไว้ในแบบ
- ทำการประกอบและตกแต่งผิวงานอีกครั้งหนึ่ง

3.2.1.2 เฟรมด้านใน (Frame_01)

ทำหน้าที่หลักคือ เป็นชิ้นส่วนหนึ่งของช่องทางการไหลของอากาศร้อนที่ได้รับมาจากห้องเผาไหม้ก่อนที่จะเข้าสู่แฉวไบพาสเทอร์ไบน์ อีกทั้งยังทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้อากาศร้อนของผ่านไปสู่เพลาชักได้ เฟรมกำกับการไหลอากาศร้อนที่ออกแบบแล้ว แสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 แสดงแบบเฟรมด้านในที่ออกแบบแล้ว (Frame_01)

รายละเอียดกระบวนการผลิตชิ้นส่วนเฟรมด้านในสามารถแบ่งได้ดังต่อไปนี้คือ

3.2.1.2.1 ศึกษารายละเอียดชิ้นส่วนที่จะทำการออกแบบ จากนั้นเริ่มขั้นตอนเขียนแบบชิ้นส่วนโดยใช้ซอฟต์แวร์ CAD (Computer Aided Design) พร้อมทั้งจัดทำรายละเอียดในการผลิตชิ้นส่วน

3.2.1.2.2 กระบวนการผลิตชิ้นส่วนเฟรมด้านในประกอบด้วย

- เลือกใช้เหล็กเหนียว SS 400 (ตามมาตรฐาน JIS ของญี่ปุ่น) ในการผลิตชิ้นส่วนรูปทรงกรวย (ลูกศรหมายเลข 1) โดยนำมาทำการม้วนขึ้นรูปด้วยเครื่องม้วนโลหะ (Sheet Metal Rolling Machine)

- ทำการขึ้นรูปหน้าแปลน (Flange) (ลูกศรหมายเลข 2) ทำการขึ้นรูปด้วยการกลึง

- เจาะรูร้อยโบล์ท

- ทำการกลึงชิ้นส่วนให้ได้ขนาดตามที่ระบุในแบบ (ลูกศรหมายเลข 3) และทำเกลียวใน

- นำทั้ง 3 ส่วน (ลูกศรหมายเลข 1 2 และ 3) มาทำการเชื่อมประกอบเข้าด้วยกัน โดยการเชื่อมนั้นต้องทำตัวจับยึดชิ้นส่วน ฟิกซ์เจอร์ (Fixture) เพื่อความเที่ยงตรงของชิ้นงาน [29-30]

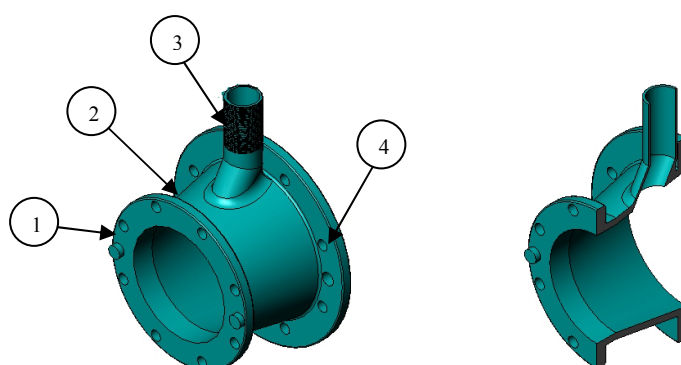
- ทำการกลึงปาดด้านหน้าและด้านหลังของเฟรม (ลูกศรหมายเลข 2 และ 3)

- ทำการใส่ลิ้มกำหนดตำแหน่งไปยังหน้าแปลน

- ปรับแต่งผิวชิ้นส่วน และตรวรอยเชื่อมประกอบ

3.2.1.3 เฟรมด้านนอก (Frame_02)

หน้าที่หลักของเฟรมด้านนอกคือ เป็นชิ้นส่วนด้านนอกของช่องทางการไหลอากาศร้อนที่ได้รับมาจากห้องเผาไหม้ก่อนที่จะเข้าสู่แฉวใบพัดเทอร์ไบน์ ซึ่งจะต้องประกอบกับเฟรมด้านใน (Frame_01) เฟรมด้านนอกที่ออกแบบเสร็จแล้วแสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 เฟรมด้านนอกที่ออกแบบแล้ว (Frame_02)

รายละเอียดกระบวนการผลิตชิ้นส่วนเฟรมด้านนอกสามารถแบ่งได้ดังต่อไปนี้คือ

3.2.1.3.1 ศึกษารายละเอียดชิ้นส่วนที่จะทำการออกแบบ จากนั้นเริ่มขั้นตอนเขียนแบบชิ้นส่วนโดยใช้ซอฟต์แวร์ CAD (Computer Aided Design) พร้อมทั้งจัดทำรายละเอียดในการผลิตชิ้นส่วน

3.2.1.3.2 กระบวนการผลิตชิ้นส่วนเฟรมด้านนอกประกอบด้วย

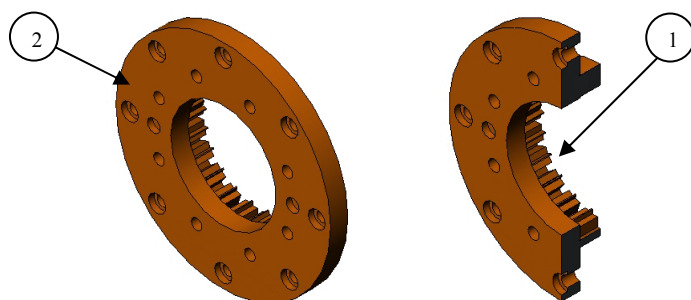
- เลือกใช้เหล็กเหนียว SS 400 (ตามมาตรฐาน JIS ของญี่ปุ่น) ในการผลิตชิ้นส่วนรูปทรงกรวย (ลูกศรหมายเลข 2) จากนั้นนำมาทำการม้วนขึ้นรูปด้วยเครื่องมือโลหะและทำการเจาะรูเพื่อใส่ท่ออากาศเข้า

- ทำการขึ้นรูปหน้าแปลน (ลูกศรหมายเลข 1 และ 4) ด้วยการกลึง
- เจาะรูตามที่ระบุไว้ในแบบ
- ทำการกลึงเกลียวท่อ (ลูกศรหมายเลข 3) ตามขนาดตามที่กำหนดไว้
- นำทั้ง 3 ส่วน (ลูกศรหมายเลข 1 2 และ 4) มาทำการเชื่อมประกอบเข้าด้วยกัน ในการเชื่อมต้องทำตัวจับยึดชิ้นส่วน ฟิกซ์เจอร์ ป้องกันการบิดของชิ้นงานระหว่างทำการเชื่อม

- ทำการกลึงปาดหน้าของหน้าแปลนทั้งสองด้าน (ลูกศรหมายเลข 2 และ 4)
- ทำการเชื่อมประกอบท่อทางเข้า (ลูกศรหมายเลข 3) เข้ากับส่วนที่ 2 (ลูกศรหมายเลข 2)
- ทำการใส่ลิ้มกำหนดตำแหน่งที่ยังหน้าแปลน
- ปรับแต่งผิวชิ้นส่วนเฟรมด้านนอก และรอยเชื่อมประกอบเพื่อลดความเค้นตกค้าง

3.2.1.4 จานยึดแฉกใบพัดนิ่ง (Stator disc) (Frame_03)

เป็นชิ้นส่วนสำคัญสำหรับประกอบเข้ากับแฉกใบพัดนิ่ง (Nozzle blade) ออกแบบเสร็จแล้วมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 จานยึดแฉกใบพัดนิ่งที่ออกแบบแล้ว (Frame_03)

รายละเอียดของกระบวนการผลิตชิ้นส่วนจานยึดแฉกใบพัดนิ่งสามารถแบ่งได้ดังต่อไปนี้คือ

3.2.1.4.1 ศึกษารายละเอียดชิ้นส่วนที่ได้จากการออกแบบ จากนั้นเริ่มขั้นตอนเขียนแบบชิ้นส่วนโดยใช้ซอฟต์แวร์ CAD (Computer Aided Design) พร้อมทั้งจัดทำรายละเอียดในการผลิตชิ้นส่วน

3.2.1.4.2 กระบวนการผลิตชิ้นส่วนจานยึดแฉกใบพัดนิ่งประกอบด้วย

- เลือกใช้สแตนเลส สตีล เกรด 316 (ตามมาตรฐาน AISI ของอเมริกา) โดยในขั้นแรก (ลูกศรหมายเลข 1) จะทำการตัดเฉือนชิ้นส่วนด้วยเครื่องตัดปาดด้วยการจ่ายประจุไฟฟ้าผ่านเส้น

ลวด (Wire-cut Electric Discharge Machine) จากนั้นในส่วนที่สอง (ลูกศรหมายเลข 2) ทำการกลึงขึ้นส่วนให้ได้ขนาดตามที่แบบระบุ

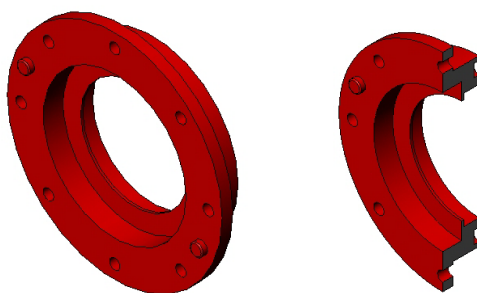
- เจาะรูรูลิม
- ทำเกลียวใน ขนาดตามระบุในแบบ
- เชื่อมประกอบด้วยเครื่องเชื่อมทิก (TIG) ในขั้นตอนการเชื่อมให้ทำอุปกรณ์จับยึดขึ้นส่วน

ฟิกซ์เจอร์ (Fixture)

- ทำการกลึงปาดด้านหน้าในส่วนที่ 2 (ลูกศรหมายเลข 2) อีกครั้งหนึ่ง
- ปรับแต่งรอยเชื่อมประกอบ

3.2.1.5 ขึ้นส่วนกำกับวงล้อแกวโบพัดนิ่ง (Frame_04)

เป็นขึ้นส่วนที่ใช้สำหรับบรรจุวงล้อแกวโบพัดนิ่ง สวมเข้ามาเป็นช่องที่อยู่ระหว่างแกวโบพัดนิ่งและแกวโบพัดหมุน ขึ้นส่วนที่ออกแบบแล้วมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 ขึ้นส่วนกำกับวงล้อแกวโบพัดนิ่ง ที่ออกแบบแล้ว (Frame_04)

รายละเอียดของกระบวนการผลิตขึ้นส่วนกำกับวงล้อแกวโบพัดนิ่ง สามารถแบ่งได้ดังต่อไปนี้คือ

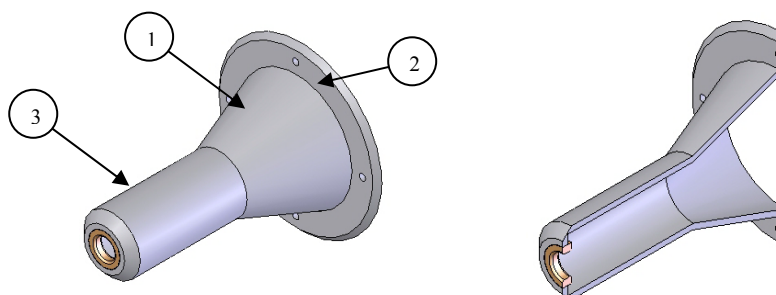
3.2.1.5.1 ศึกษารายละเอียดขึ้นส่วนที่จะทำการออกแบบ จากนั้นเริ่มขั้นตอนเขียนแบบขึ้นส่วนโดยใช้ซอฟต์แวร์ CAD (Computer Aided Design) พร้อมทั้งจัดทำรายละเอียดในการผลิตขึ้นส่วน

3.2.1.5.2 กระบวนการผลิตขึ้นส่วนกำกับวงล้อแกวโบพัดนิ่ง ประกอบด้วย

- เลือกใช้เหล็กกล้าผสม 4140 (ตามมาตรฐาน AISI ของอเมริกา) มาทำการกลึงขึ้นรูปขึ้นส่วน
- เจาะรูรูลิม
- ทำเกลียวใน
- ใส่ลิมกำหนดตำแหน่ง

3.2.1.6 ชั้นส่วนป้องกันเพลาด้านท้าย (Frame_05)

ชั้นส่วนนี้มีหน้าที่หลักคือ เป็นชั้นส่วนที่ป้องกันความร้อนของอากาศในขณะที่ผ่านมาออกจากแฉวใบพัดหมุนมาสัมผัสกับเพลาชับ ซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายกับเพลได้ ชั้นส่วนป้องกันเพลาด้านท้าย ดังแสดงในรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 ชั้นส่วนป้องกันเพลาด้านท้ายที่ออกแบบแล้ว (ชื่อระบุในแบบ Frame_05)

รายละเอียดของกระบวนการผลิตชิ้นส่วนชั้นส่วนป้องกันเพลาด้านท้าย สามารถแบ่งได้ดังต่อไปนี้ คือ

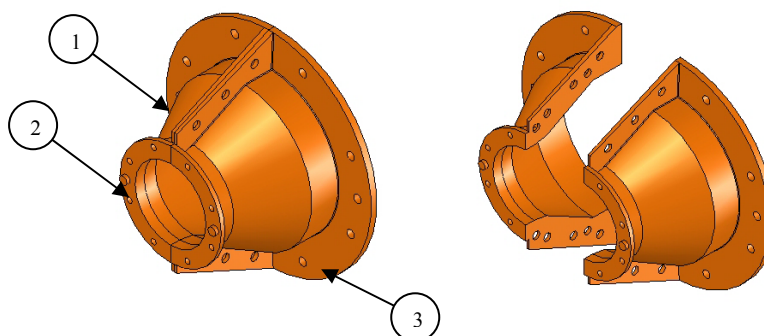
3.2.1.6.1 ศึกษารายละเอียดชิ้นส่วนที่จะทำการออกแบบ จากนั้นเริ่มขั้นตอนเขียนแบบชิ้นส่วนโดยใช้ซอฟต์แวร์ CAD (Computer Aided Design) พร้อมทั้งจัดทำรายละเอียดในการผลิตชิ้นส่วน

3.2.1.6.2 กระบวนการผลิตชิ้นส่วนชั้นส่วนป้องกันเพลาด้านท้ายประกอบด้วย

- เลือกใช้เหล็กเหนียว SS 400 (ตามมาตรฐาน JIS ของญี่ปุ่น) โดยนำ ส่วนแรกนำมาขึ้นรูปด้วยเครื่องม้วนโลหะ (ลูกศรหมายเลข 1) ทำการขึ้นรูปส่วนที่สอง และส่วนที่ 3 (ลูกศรหมายเลข 2 และ 3) ด้วยการกลึง
- ทำการกลึงทองเหลืองน้ำมัน (Bronze Oil Impregnated) ปิดัดความเผื่อสวมอัด
- ทำการสวมอัดทองเหลืองน้ำมันเข้ากับส่วนที่ 3
- ทำการเจาะรูในส่วนที่สองตามที่ระบุในแบบ
- นำทั้งสามส่วนมาทำการเชื่อมประกอบ โดยขั้นตอนการ เชื่อมให้ทำอุปกรณ์จับยึดชิ้นส่วน ฟิกซ์เจอร์ และทำการกลึงร่วมศูนย์กลางอีกครั้ง
- ปรับแต่งผิวชิ้นส่วน และรอยเชื่อมประกอบ

3.2.1.7 เฟรมสวมวงล้อแฉวใบพัดหมุน (Frame_06)

เฟรมส่วนนี้จะทำหน้าที่เป็นเสื้อสำหรับบรรจุวงล้อให้แฉวใบพัดหมุน และทำหน้าที่เป็นช่องทางผ่านของอากาศร้อนที่ขยายตัวออกมาจากแฉวใบพัดหมุนคือทำหน้าที่เป็น diffuser ไปในตัว ชิ้นส่วนเฟรมสวมวงล้อ แฉวใบพัดหมุนที่ออกแบบเสร็จ ดังแสดงในรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 ชิ้นส่วนเฟรมสวมวงล้อแกวไปพัดหมุนที่ออกแบบแล้ว (Frame_06)

รายละเอียดของกระบวนการผลิตชิ้นส่วนชิ้นส่วนเฟรมสวมวงล้อแกวไปพัดหมุน สามารถแบ่งได้ดังต่อไปนี้คือ

3.2.1.7.1 ศึกษารายละเอียดชิ้นส่วนที่จะทำการออกแบบ จากนั้นเริ่มขั้นตอนเขียนแบบชิ้นส่วนโดยใช้ซอฟต์แวร์ CAD (Computer Aided Design) พร้อมทั้งจัดทำรายละเอียดในการผลิตชิ้นส่วน

3.2.1.7.2 กระบวนการผลิตชิ้นส่วนชิ้นส่วนเฟรมสวมวงล้อแกวไปพัดหมุน ประกอบด้วย

- ส่วนที่ 1 (ลูกศรหมายเลข 1) จะนำชิ้นส่วนมาตรฐานของข้อลดร่วมศูนย์ (Concentric reduce) ขนาด 4.5 นิ้ว มาทำการผ่าครึ่งและทำหน้าแปลนสำหรับยึดร้อยโบลท์ ตามที่แสดงในภาพที่ 3.20

- นำทั้งสองครึ่งมาประกบกันด้วยโบลท์ และทำการกลึงให้ได้รูปร่างตามที่ระบุในแบบ

- ทำการขึ้นรูป ส่วนที่ 2 และ 3 (ลูกศรหมายเลข 2 และ 3) ด้วยการกลึงขึ้นรูปพร้อมทั้งเจาะร้อยโบลท์

- นำทั้งสามส่วน (ลูกศรหมายเลข 1 2 และ 3) มาทำการเชื่อมประกอบ โดยในขั้นตอนการเชื่อมให้ทำอุปกรณ์จับยึดชิ้นส่วน ฟิกซ์เจอร์ เพื่อป้องกันการบิดตัวของชิ้นงานหลังเชื่อม

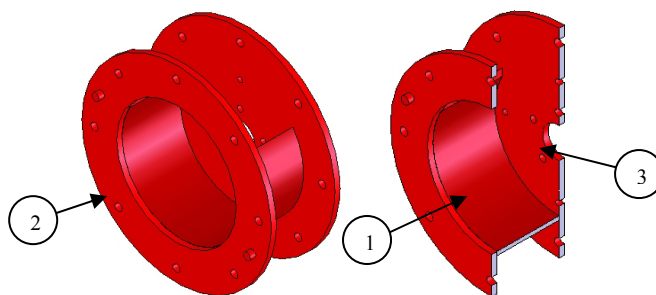
- ทำการกลึงปาดผิวหน้าของหน้าแปลนทั้งสองข้างอีกครั้ง

- ทำการใส่ลิ้มกำหนดตำแหน่งที่หน้าแปลนดังแสดงในส่วนที่ 2 (ลูกศรหมายเลข 2)

- ปรับแต่งผิวชิ้นส่วน และรอยเชื่อมประกอบ

3.2.1.8 เฟรมทางออกของอากาศ (Frame_07)

เป็นเฟรมส่วนสุดท้ายทำหน้าที่เป็นทางออกของอากาศเมื่อเกิดการขยายตัวออกจากใบพัดแกวหมุนแล้ว และยังทำหน้าที่ในการเป็นฐานสำหรับการยึดเสื่อใส่ตลับลูกปืน ชิ้นส่วนนี้เมื่อออกแบบเสร็จแล้ว ดังแสดงในรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 แสดงเฟรม ทางออกของอากาศที่ออกแบบแล้ว (Frame_07)

รายละเอียดของกระบวนการผลิตชิ้นส่วนเฟรมทางออกของอากาศ สามารถแบ่งได้ดังต่อไปนี้คือ

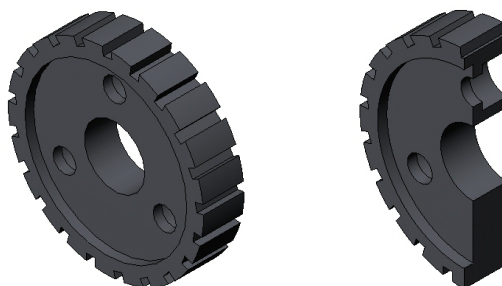
3.2.1.8.1 ศึกษารายละเอียดชิ้นส่วนที่จะทำการออกแบบ จากนั้นเริ่มขั้นตอนเขียนแบบชิ้นส่วนโดยใช้ซอฟต์แวร์ CAD (Computer Aided Design) พร้อมทั้งจัดทำรายละเอียดในการผลิตชิ้นส่วน

3.2.1.8.2 กระบวนการผลิตชิ้นส่วนเฟรมทางออกของอากาศ ประกอบด้วย

- เลือกใช้เหล็กเหนียว SS 400 (ตามมาตรฐาน JIS ของญี่ปุ่น) โดยนำมาขึ้นชิ้นส่วนรูปทรงกระบอก (ลูกศรหมายเลข 1) ด้วยเครื่องม้วนโลหะ
- ทำการขึ้นรูปหน้าแปลน (ลูกศรหมายเลข 2 และ 3) ด้วยการกลึง
- ทำการเจาะรูร้อยโบล์ท
- ทำการเชื่อมทั้ง 3 ส่วน (ลูกศรหมายเลข 1 2 และ 3)
- ทำการกลึงปาดผิวหน้าของหน้าแปลนทั้งสองข้างอีกครั้ง
- ทำการใส่ลิ้มกำหนดตำแหน่งที่หน้าแปลนของส่วนที่ 2 (ลูกศรหมายเลข 2)
- ปรับแต่งผิวชิ้นส่วน และรอยเชื่อมประกอบ

3.2.1.9 เฟรมยึดส่วนปลายแฉกใบพัดนิ่ง (Shroud) (Stator_01)

ชิ้นส่วนนี้มีหน้าที่ในการยึดปลายชิ้นส่วนของแฉกใบพัดนิ่ง (Nozzle blade) เพื่อที่เป็นตัวควบคุมปลายใบพัดให้ร่วมศูนย์กลางเดียวกันของใบพัดทั้งหมด และช่วยกำหนดช่องทางวิ่งของอากาศก่อนเข้าเฟรมของแฉกใบพัดหมุน (Nozzle frame) ชิ้นส่วนที่ออกแบบแล้วมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 แสดงเฟรมยึดส่วนปลาย แฉกใบพัดนิ่งที่ออกแบบแล้ว (Stator_01)

รายละเอียดของกระบวนการผลิตชิ้นส่วนเฟรมยึดส่วนปลายแฉวใบพัดหนึ่ง สามารถแบ่งได้ดังต่อไปนี้คือ

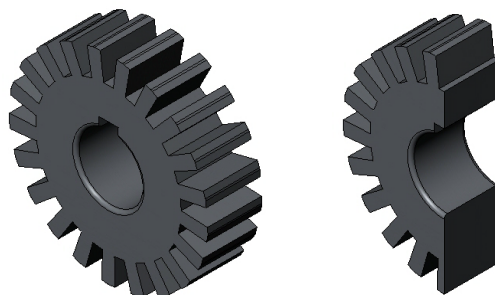
3.2.1.9.1 ศึกษารายละเอียดชิ้นส่วนที่จะทำการออกแบบ จากนั้นเริ่มขั้นตอนเขียนแบบชิ้นส่วนโดยใช้ซอฟต์แวร์ CAD (Computer Aided Design) พร้อมทั้งจัดทำรายละเอียดในการผลิตชิ้นส่วน

3.2.1.9.2 กระบวนการผลิตชิ้นส่วนเฟรมยึดส่วนปลายแฉวใบพัดหนึ่งประกอบด้วย

- เลือกใช้สแตนเลส สตีล เกรด 316 (ตามมาตรฐาน AISI ของอเมริกา) ชิ้นส่วนที่มีลักษณะร่องฟัน จะทำการตัดเฉือนด้วยเครื่องตัดปาดด้วยการจ่ายประจุไฟฟ้าผ่านเส้นลวด
- ทำการตัดเฉือนชิ้นส่วนด้วยการกลึงในส่วนของร่องรอยเพลลา และร่องตกล่า การกลึงนั้นจะต้องกลึงให้ร่วมศูนย์กลางเดียวกันกับขอบนอก
- เจาะรูร้อยโบลท์ และทำเกลียวในตามขนาดแบบระบุ

3.2.1.10 งานยึดส่วนโคนของแฉวใบพัดหมุน (Rotor disc) (Rotor_01)

ชิ้นส่วนนี้ไว้สำหรับทำหน้าที่ในการยึดส่วนโคนของแฉวใบพัดหมุน (Rotor blade) ให้ยึดติดกับเฟรมของแฉวใบพัดหมุนและทำหน้าที่ประกอบกับเพลลาขับ ชิ้นส่วนที่ออกแบบเสร็จแล้วมีลักษณะดังที่แสดงในรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 แสดงงานยึด ส่วนโคนของแฉวใบพัดหมุนที่ออกแบบแล้ว (Rotor_01)

รายละเอียดของกระบวนการผลิตชิ้นส่วนงานยึดส่วนโคนของแฉวใบพัดหมุน สามารถแบ่งได้ดังต่อไปนี้คือ

3.2.1.10.1 ศึกษารายละเอียดชิ้นส่วนที่จะทำการออกแบบ จากนั้นเริ่มขั้นตอนเขียนแบบชิ้นส่วนโดยใช้ซอฟต์แวร์ CAD (Computer Aided Design) พร้อมทั้งจัดทำรายละเอียดในการผลิตชิ้นส่วน

3.2.1.10.2 กระบวนการผลิตชิ้นส่วนงานยึดส่วนโคนของแฉวใบพัดหมุนประกอบด้วย

- เลือกใช้ สแตนเลส สตีล เกรด 316 (ตามมาตรฐาน AISI ของอเมริกา) ในการผลิตจะทำการตัดเฉือนขึ้นส่วนตรงบริเวณที่มีลักษณะร่องฟัน ด้วยเครื่องตัดปาดด้วยการจ่ายประจุไฟฟ้าผ่านเส้นลวด
- ทำการขึ้นรูปขึ้นส่วนด้วยการกลึงในส่วนของร่องรอยเพลาชับ
- จะทำการตัดเฉือนขึ้นส่วนตรงบริเวณร่องลิ้น ด้วยเครื่องตัดปาดด้วยการจ่ายประจุไฟฟ้าผ่านเส้นลวด

3.2.1.11 เพลาชับ (Shaft_01)

เพลาทำหน้าที่ในการส่งกำลัง และช่วยยึดจานยึดส่วนโคนของแฉกใบพัดหมุน ลักษณะเพลาท่อออกแบบเสร็จแล้ว แสดงในรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 แสดงเพลาชับ(Shaft_01)

รายละเอียดของกระบวนการผลิตขึ้นส่วนเพลาชับ สามารถแบ่งได้ดังต่อไปนี้คือ

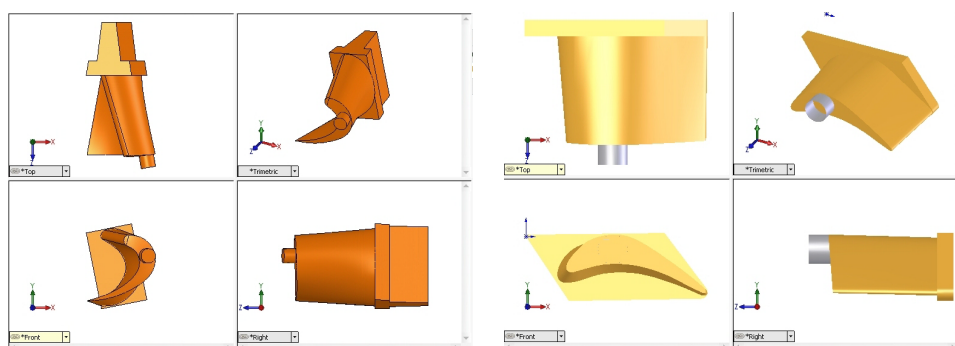
3.2.1.11.1 ศึกษารายละเอียดขึ้นส่วนที่จะทำการออกแบบเบื้องต้น จากนั้นเริ่มขั้นตอนเขียนแบบขึ้นส่วนโดยใช้ซอฟต์แวร์ CAD (Computer Aided Design) พร้อมทั้งจัดทำรายละเอียดในการผลิตขึ้นส่วน

3.2.1.11.2 กระบวนการผลิตขึ้นส่วนเพลาชับ ประกอบด้วย

- เลือกใช้เหล็กกล้างานร้อน (Hot work tool, ตามมาตรฐาน BOHLER) ในการผลิตทำการกลึงระหว่างศูนย์ (Turning between center) ป้องกันไม่ให้งานเรียว และไม่ได้กลึงลงบนศูนย์คงที่ [31]
- นำเพลามาทำการกัดร่องลิ้น โดยใช้มีดกัดร่องสลีต [32]
- นำเพลามาทำการเจียรระในผิวให้ได้ขนาดตามพิภคความเผื่อที่กำหนด และร่วมศูนย์กลางเดียวกันของเพล

3.2.1.12 ใบพัดนิ่งและใบพัดหมุน (Nozzle and Rotor blade) (Turbine blade_Stator, Turbine blade_Rotor)

แถวใบพัดนิ่งจะทำหน้าที่ในการกำกับอากาศร้อนที่มาจากห้องเผาไหม้ให้พุ่งกระทบใบพัดหมุนเพื่อถ่ายเทพลังงานจลน์ เมื่อแถวใบพัดหมุนได้รับพลังงานจลน์จากอากาศร้อนที่พุ่งมาจากแถวใบพัดนิ่งจะเกิดการหมุนขึ้น อากาศร้อนที่ไหลอย่างต่อเนื่องจะไหลดพลังงานจลน์ลงบนใบพัดหมุนตลอดเวลาจึงขับแถวใบพัดหมุนเคลื่อนที่จึงทำให้เกิดงานเพลาร้อนขึ้นมา จะเกิดงานเพลามากหรือน้อยแล้วแต่ความโค้งและการบิดของใบพัด (Reaction) ใบพัดนิ่งและใบพัดหมุนที่ออกแบบแล้วมีลักษณะ แสดงในรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 แสดงใบพัดนิ่งและใบพัดหมุน (Nozzle and Rotor blade) ที่ออกแบบแล้ว (Turbine blade_Stator, Turbine blade_Rotor)

รายละเอียดของกระบวนการผลิตชิ้นส่วนใบพัดนิ่งและใบพัดหมุน สามารถแบ่งได้ดังต่อไปนี้คือ

3.2.1.12.1 ศึกษารายละเอียดชิ้นส่วนที่จะทำการออกแบบ จากนั้นเริ่มขั้นตอนเขียนแบบชิ้นส่วนโดยใช้ซอฟต์แวร์ CAD (Computer Aided Design) พร้อมทั้งจัดทำรายละเอียดในการผลิตชิ้นส่วน

3.2.1.12.2 กระบวนการผลิตชิ้นส่วนใบพัดนิ่งและใบพัดหมุน ประกอบด้วย

- ทำการขึ้นรูปชิ้นส่วนต้นแบบด้วยดินเหนียว เพื่อที่จะทำให้สามารถทราบขนาด และลักษณะของใบพัด ทิศทางการบิดตัวของใบพัดจากโคนถึงปลาย

- นำชิ้นส่วนที่ได้ไปทำการเผาและขัดชิ้นส่วนให้ได้รูปทรงและความเรียบตามต้องการ

- ชิ้นส่วนที่ได้จะถูกใช้เป็นแบบวัตถุแข็ง (Solid model) เพื่อนำไปทำการสแกน (Scan) เพื่อทำการเก็บข้อมูลรายละเอียดในรูปแบบจำลองคอมพิวเตอร์ (Cad model) ด้วยเครื่องเก็บพิกัดสามมิติระบบออฟติก [33-35] ดังแสดงในรูปที่ 3.26 (ก)

- ข้อมูลที่ได้จากการสแกนพื้นผิวนั้นยังไม่สมบูรณ์จำเป็นต้องทำการซ่อมแซมพื้นผิวจากการสแกนให้สมบูรณ์

- เลือกใช้ สแตนเลสตีล เกรด 316 (ตามมาตรฐาน AISI ของอเมริกา) ในการผลิตโดยทำการตัดเฉือนชิ้นส่วนตรงบริเวณส่วนฐานไปด้วยเครื่องตัดปาดด้วยการจ่ายประจุไฟฟ้าผ่านเส้นลวด
- นำชิ้นส่วนที่ได้มาเข้าเครื่องกัดชนิด 5 แกน (CNC milling machining center, 5 axes) เพื่อทำการกัดชิ้นส่วน ดังแสดงในรูปที่ 3.26(ข)



(ก)

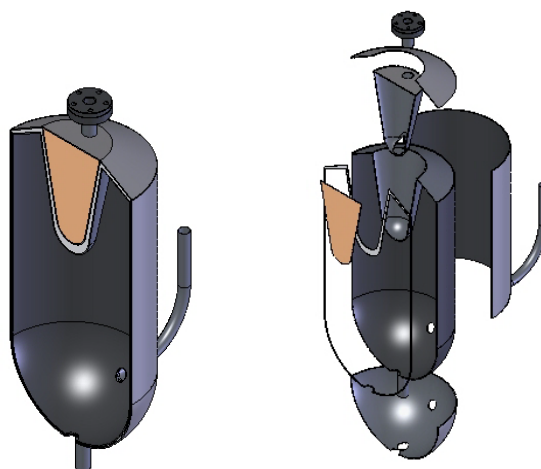


(ข)

รูปที่ 3.26 (ก) เครื่องเก็บพิกัดสามมิติระบบฮอปติก (ข) เครื่องซีเอ็นซีมิลลิ่ง แบบ 5 แกน

3.2.2 วิธีและขั้นตอนสร้างห้องเผาไหม้ถ่ายเทความร้อน

ห้องเผาไหม้ซึ่งมีลักษณะเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนไปในตัวด้วยนั้นจะทำการถูกสร้างเป็นถึงรูปทรงกระบอก ซ้อนกันเป็น 2 ชั้น ในลักษณะแนวศูนย์กลางร่วม (Concentric tubes) ห่างกันประมาณ 3 มิลลิเมตร เพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซร้อนของระบบเผาไหม้เชื้อเพลิง กับอากาศของระบบเทอร์โบไน์ ก๊าซร้อนที่ได้จากการเผาไหม้จะถ่ายเทความร้อนผ่านผนังเตาชั้นในเข้าสู่อากาศของระบบเทอร์โบไน์ที่อยู่กำลังไหลระหว่างช่องว่างของผนังเตา ห้องเผาไหม้ถ่ายเทความร้อนที่ออกแบบไว้มีรูปร่างลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.27 แสดงห้องเผาไหม้ ชนิดถ่ายเทความร้อนที่ออกแบบไว้ (Heat exchanger furnace)

รายละเอียดของกระบวนการผลิตชิ้นส่วนห้องเผาไหม้ชนิดถ่ายเทความร้อนสามารถแบ่งได้ดังต่อไปนี้คือ

3.2.2.1 ศึกษารายละเอียดชิ้นส่วนที่จะทำการออกแบบ จากนั้นเริ่มขั้นตอนเขียนแบบชิ้นส่วนโดยใช้ซอฟต์แวร์ CAD (Computer Aided Design) พร้อมทั้งจัดทำรายละเอียดในการผลิตชิ้นส่วน

3.2.2.2 กระบวนการผลิตชิ้นส่วนห้องเผาไหม้ชนิดถ่ายเทความร้อนประกอบด้วย

- สร้างห้องเผาไหม้โดยเลือกใช้แผ่นเหล็ก SS 400 (ตามมาตรฐาน JIS ของญี่ปุ่น) มาทำการตัดให้ได้ขนาดและความยาวที่ต้องการ
- งานในลักษณะรูปทรงกระบอก จะนำเหล็กแผ่นเหล็กม้วนขึ้นรูปด้วยเครื่องม้วนโลหะ (Sheet Metal Rolling Machine) ส่วนงานตรงบริเวณก้นถังที่มีลักษณะโค้งนั้น จะขึ้นรูปด้วยการปั๊มขึ้นรูป (Hydraulic Power Press)
- ชิ้นส่วนทั้งหมดจะนำมาเชื่อมประกอบด้วยการเชื่อมทิก (TIG)
- ในระหว่างการประกอบนั้นจะทำการใส่ลิ้มให้ขนาดในระหว่างชั้นของถังทั้งสอง เพื่อความถูกต้องของระยะห่างระหว่างถังทั้งสองใบ และความง่ายในการประกอบชิ้นส่วน

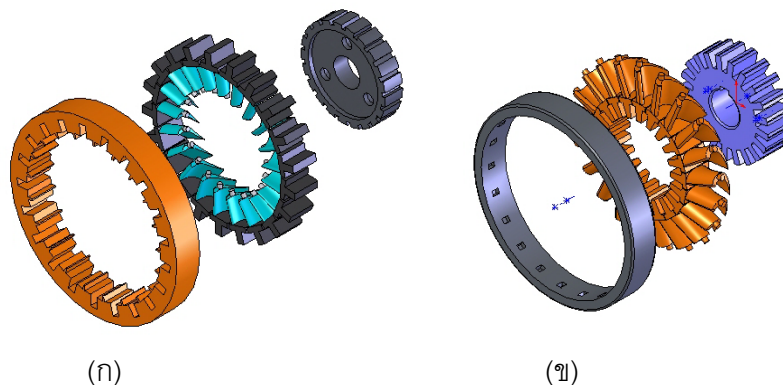
3.3 การประกอบเครื่อง (Assembly)

3.3.1 การประกอบแฉวใบพัดนิ่ง และแฉวใบพัดหมุนเข้ากับชิ้นส่วนเฟรมทั้งสองแบบ

การประกอบชิ้นส่วนนั้น จะแสดงการประกอบชิ้นส่วนที่สำคัญคือ การประกอบแฉวใบพัดนิ่ง (Nozzle blade) และแฉวใบพัดหมุน (Rotor blade) เข้ากับจานหมุนและ shroud โดยการประกอบทั้งสองแบบนี้ จะทำการประกอบด้วยการเชื่อมทิก (TIG) เนื่องจากเป็นเทคนิคการเชื่อมที่เหมาะสม การเชื่อมแบบทิก (TIG) หลักการทั่วไปคล้ายกับการเชื่อมโลหะด้วยไฟฟ้า กล่าวคือ ความร้อนที่ทำให้โลหะหลอมละลายนั้นเกิดจากการอาร์ค ระหว่างอิเล็กโทรด (Tungsten Electrode) กับชิ้นงาน ขณะเดียวกันบริเวณที่เกิดอาร์คจะมีแก๊สเฉื่อย (Inert Gas) ปกคลุมรอบบริเวณนั้น เพื่อป้องกันออกซิเจน ไนโตรเจน และความชื้น ซึ่งมีในอากาศ เข้ามารวมกับโลหะที่กำลังหลอมละลาย [36-37]

ในการเชื่อมประกอบนั้นจำเป็นต้องอย่างยิ่งที่จะต้องให้ความสำคัญเกี่ยวกับการบิดตัวของชิ้นงานที่ทำการเชื่อมประกอบ ดังนั้นในขั้นตอนก่อนการเชื่อมจำเป็นต้องทำอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานในการเชื่อมด้วย อุปกรณ์นี้เรียกว่า ฟิกซ์เจอร์ ซึ่งเป็นเครื่องมือสำหรับใช้ทำงานในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นงานให้เที่ยงตรงเหมือนกันทุกชิ้น ความสัมพันธ์และความถูกต้องระหว่าง

ฟิกซ์เจอร์กับชิ้นงานจะต้องถูกรักษาให้คงเดิมอยู่ตลอดเวลา ฟิกซ์เจอร์ ถูกออกแบบและสร้างขึ้นมาเพื่อยึดจับ รองรับ และกำหนดตำแหน่งชิ้นงานทุกชิ้น



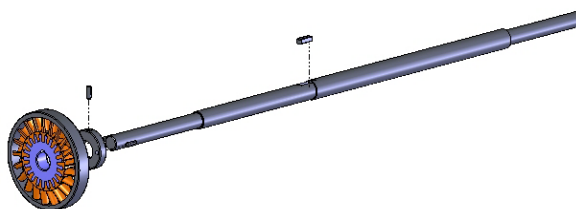
รูปที่ 3.28 (ก) การประกอบแฉวใบพัดนิ่ง (ข) การประกอบแฉวแฉวใบพัดหมุน เข้ากับจานหมุนและ shroud

การประกอบแฉวใบพัดนิ่ง ที่แสดงในรูปที่ 3.28 (ก) และแฉวใบพัดหมุน ที่แสดงในรูปที่ 3.28 (ข) เข้ากับจานหมุนและ shroud มีขั้นตอนการประกอบดังนี้คือ

- ทำการออกแบบ ฟิกซ์เจอร์ (Fixture) เพื่อใช้ในการจับยึดชิ้นส่วนในขณะทำการเชื่อม
- ทำการเชื่อมประกอบด้วยเทคนิคการเชื่อมแบบทิก (TIG)
- ทำการเจียรระในด้านหน้าและด้านหลังของตัวเฟรม เพื่อที่จะให้ได้ขนาดตามพิสัยความเผื่อที่ระบุ และต้องให้ร่วมศูนย์กลางเดียวกันของทั้งชิ้นส่วน

3.3.2 การประกอบเพลาชับ (Shaft_01) เข้ากับวงล้อใบพัดหมุน (Rotor disc)

หลังจากที่ได้ทำการประกอบตัวใบพัดเข้ากับตัวจานหมุนแล้ว shroud แล้วนั้น จะนำวงล้อใบพัดหมุนที่ได้มาประกอบเข้ากับเพลาชับที่ทอดหนึ่ง ซึ่งมีความสำคัญมากเช่นกัน เพราะไม่เพียงแต่การประกอบให้เข้ากันได้เท่านั้น แต่จะต้องไม่เกิดการเยื้องศูนย์กลาง ดังแสดงในรูปที่ 3.29



รูปที่ 3.29 การประกอบเพลาชับเข้ากับเฟรมแฉวใบพัดหมุน (Rotor frame)

การประกอบการประกอบเพลาชับ เข้ากับวงล้อแฉวใบพัดหมุน มีขั้นตอนการประกอบดังนี้คือ

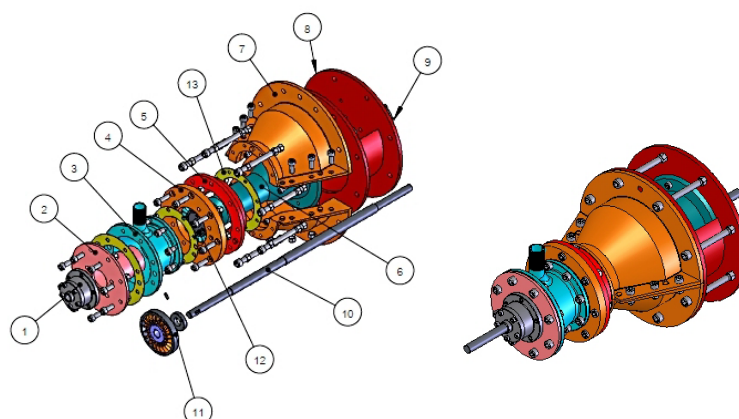
- ใส่ลิ้มอัด (Flat key) เข้าในร่องลิ้ม

- สวมวงล้อใบพัดเข้ากับเพลาลูกเบี้ยวและค่อยๆ เคาเข้าไปในลิ้ม การสวมนั้นพยายามเข้าพร้อมกันทั้งระนาบ

- ทำการยึดวงล้อเข้ากับล้อเพลาลูกเบี้ยวด้วยสกรูล็อก

3.3.3 การประกอบเทอร์ไบน์

ทำการประกอบส่วนประกอบต่างๆ ของเทอร์ไบน์ที่ได้กล่าวถึงขั้นตอนการผลิตมาแล้วมาประกอบเข้าด้วยกัน โดยขั้นตอนการประกอบได้แก่



รูปที่ 3.30 ภาพแสดงส่วน ประกอบต่างๆ ของเทอร์ไบน์

- ทำการประกอบเสื้อใส่ตลับลูกปืน (Housing) เข้ากับตลับลูกปืนทั้งสองชุด

- ประกอบเพลาลูกเบี้ยว เข้ากับวงล้อใบพัดหมุน

- ทำการประกอบชิ้นส่วนทั้งหมดเข้าด้วยกัน โดยเริ่มจากทางด้านท้ายของเทอร์ไบน์ ดังแสดงในภาพประกอบ ของในรูปที่ 3.30

- นำชิ้นส่วนมาตรฐานต่างๆ เช่น นัต (Nut) ประเก็น (Gasket) มาทำการประกอบ

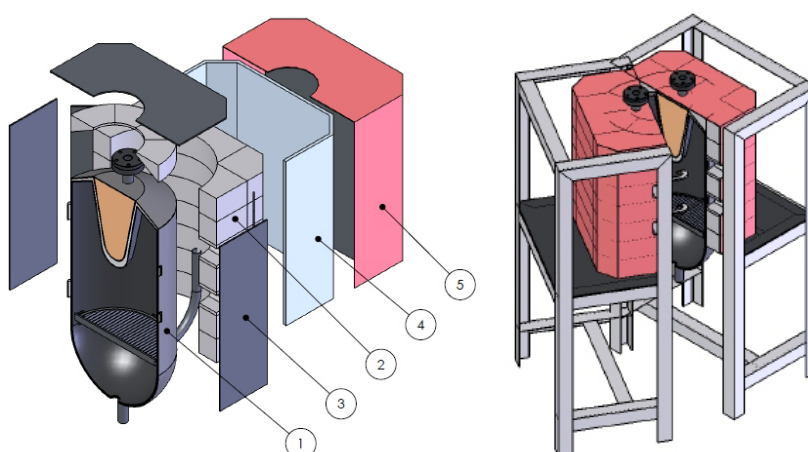
- เมื่อทำการประกอบเสร็จทดลองการหมุนด้วยมือ ถ้าเกิดการติดขัดจะต้องทำการปรับตั้งศูนย์ของเสื้อใส่ตลับลูกปืนอีกครั้ง

3.3.4 การประกอบห้องเผาไหม้

- นำห้องเผาไหม้ที่ทำมาเชื่อมประกอบโดยสมบูรณ์มาประกอบเข้ากับโครงเหล็กเพื่อความแข็งแรง

- ทำการต่ออุปกรณ์วัดอุณหภูมิซึ่งได้แก่ (เทอร์โมคัปเปิล) ชนิด K ซึ่งเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายมากที่สุด สามารถใช้กับสภาวะงานที่เป็น Oxidizing หรือ Inert ได้ดีกว่าแบบอื่น สามารถทนอุณหภูมิได้ถึง 1260°C ($2,300^{\circ}\text{F}$) และที่อุณหภูมิต่ำถึง -250°C (-420°F) ในสภาพงานที่ต้องรับการแผ่รังสีโดยตรงจากแหล่งกำเนิดความร้อน แบบ K ก็สามารถใช้งานได้ดีเช่นกัน [38]

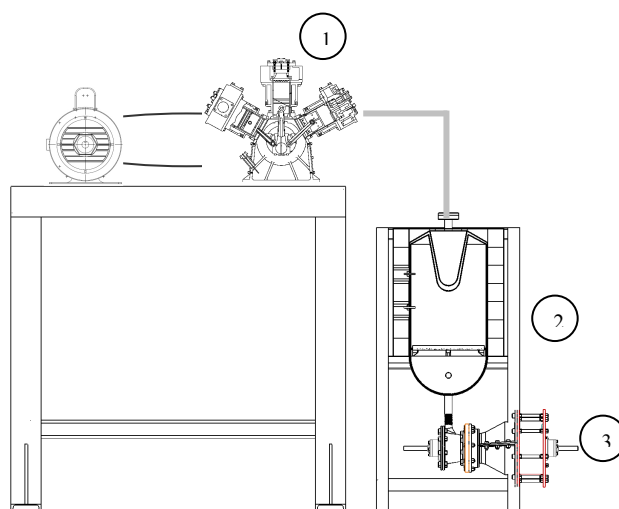
- เชื่อมประกอบหน้าแปลน (Flange) เพื่อเป็นทางเข้าและทางออกของอากาศในระบบเทอร์ไบน์
- เชื่อมประกอบท่อทางเข้าของอากาศเพื่อการเผาไหม้และท่อทางออกของไอเสีย
- ทำการหุ้มฉนวนเตาเผาไหม้ด้วยอิฐทนไฟ (Brick Insulator) และเพื่อที่จะได้เก็บความร้อนได้ดียิ่งขึ้นจะทำการหุ้มด้วยเซรามิคไฟเบอร์ (Ceramic Fiber) รอบอิฐทนไฟอีกชั้น ในชั้นสุดท้ายจะติดกระจกเงาเพื่อช่วยป้องกันการถ่ายเทความร้อนแบบการแผ่รังสี (Radiation)



รูปที่ 3.31 แสดงส่วนประกอบห้องเผาไหม้

- | | |
|------------------|-------------------|
| 1. ห้องเผาไหม้ | 2. อิฐทนไฟ |
| 3. กระจกเงา | 4. เซรามิคไฟเบอร์ |
| 5. โครงเหล็กแผ่น | |

3.3.5 การประกอบเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์ไบน์

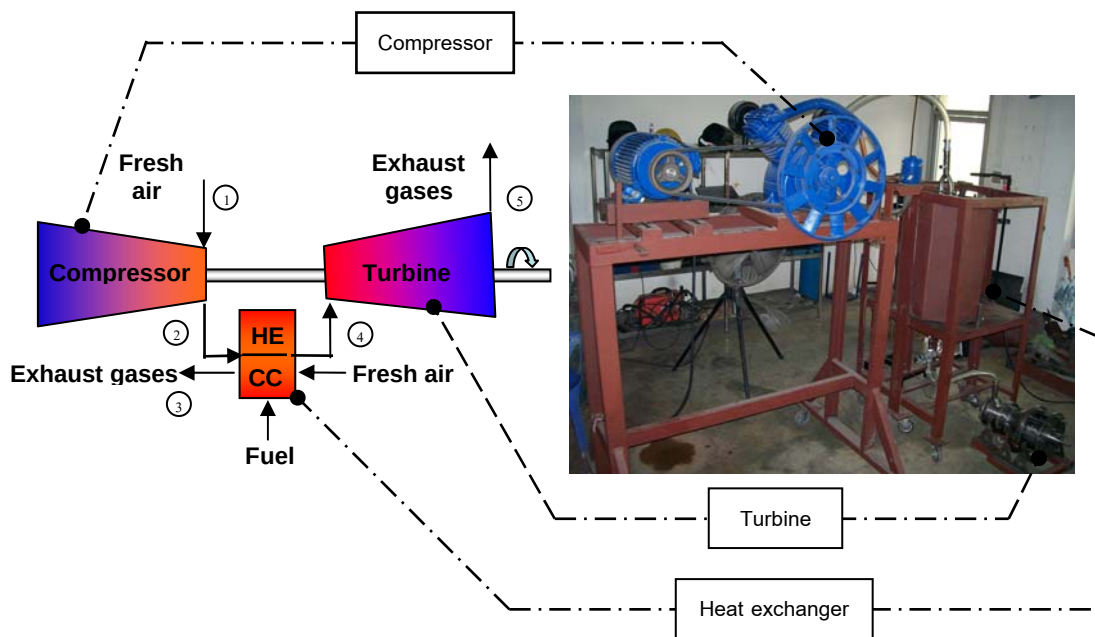


รูปที่ 3.32 แสดงภาพสเก็ตช์ของ เครื่องยนต์ก๊าซเทอร์ไบน์ที่สมบูรณ์

การประกอบเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์ไบน์ ทำโดยการประกอบส่วนย่อย 3 ส่วนได้แก่ 1.เครื่องอัดอากาศ (Air compressor) 2.ห้องเผาไหม้ถ่ายเทความร้อน (Heat exchanger furnace) 3.เทอร์ไบน์ (Turbine) เข้าด้วยกัน ซึ่งเมื่อประกอบเสร็จแล้ว จะได้เครื่องยนต์ก๊าซเทอร์ไบน์มีลักษณะดังภาพเก็ทที่ แสดงในรูปที่ 3.32

บทที่ 4
ผลการสร้างเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์ไบน์และการวิจารณ์

4.1 ผลการประกอบเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์ไบน์



รูปที่ 4.1 แสดงระบบเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์ไบน์

เครื่องยนต์ก๊าซเทอร์ไบน์ในงานวิจัยนี้จะเป็นระบบวงจรกึ่งปิดมีองค์ประกอบต่างๆ เหมือนกับระบบเปิด ต่างกันเพียงตรงที่กระบวนการป้อนความร้อนสู่ระบบการทำงานเท่านั้น ซึ่งในระบบวงจรเปิดจะมีการป้อนเชื้อเพลิงเหลวหรือก๊าซที่สะอาดเข้าไปเผาไหม้กับอากาศที่อัดด้วยเครื่องอัดอากาศโดยตรง แต่ในวงจรกึ่งปิดนั้นเชื้อเพลิงที่ใช้จะเป็นของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซ เข้าไปเผาไหม้กับอากาศส่วนหนึ่งในห้องเผาไหม้ เมื่อเกิดความร้อนขึ้นจะความร้อนถ่ายเทเข้าสู่อากาศอัดตัวมาจากเครื่องอัดอากาศ (Compressor) ทำให้อากาศมีแรงดันและอุณหภูมิสูง จึงขยายตัวผ่านเทอร์ไบน์ไปยังความดันบรรยากาศ ทำให้ได้กำลังออกมา ซึ่งเครื่องอัดอากาศในงานวิจัยนี้จะใช้เครื่องอัดอากาศชนิดลูกสูบ (Reciprocating air compressor) มาทำการอัดอากาศ ซึ่งสามารถสร้างความดันได้สูง ห้องเผาไหม้ที่สร้างขึ้นนั้นจะมีลักษณะเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนไปด้วยในตัว (Heat exchanger furnace) ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งเพื่อสกัดความร้อนออกมาเทอร์ไบน์นั้นเป็นแบบไหลตามแกน (Axial flow gas turbine) ดังแสดงในรูปที่ 4.1

4.2 ส่วนเครื่องอัดอากาศแบบลูกสูบ (Reciprocating air compressor)

เครื่องอัดอากาศที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เครื่องอัดอากาศชนิดลูกสูบ (Reciprocating air compressor) สำเร็จรูป ยี่ห้อ PUMA รุ่น PP275 ขนาด 7.5 HP, 5.5 KW, จำนวนหัวสูบ 2 หัว ซึ่งให้ปริมาณลมเท่ากับ 1,280 l/min เพื่อนำมาใช้งาน



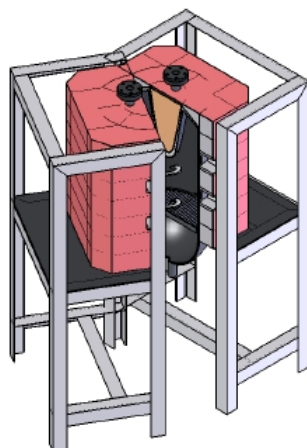
รูปที่ 4.2 แสดงเครื่องอัดอากาศแบบลูกสูบ (Reciprocating Air Compressor)

เครื่องอัดอากาศแบบลูกสูบนี้นี้ แสดงในรูปที่ 4.2 เป็นที่นิยมใช้กันมากที่สุด ในภาคอุตสาหกรรม ทั้งในการอัดอากาศและการอัดความเย็น อากาศที่ถูกปิดอยู่ในกระบอกสูบของเครื่องอัดอากาศแบบนี้จะสามารถอัดให้ความดันได้สูงมาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของวัสดุที่ทำชิ้นส่วนของอัด และกำลังขับของมอเตอร์ เครื่องอัดอากาศแบบนี้ จะอัดให้มีการไหลของอากาศเป็นจังหวะๆ ซึ่งแตกต่างจากระบบการอัดอากาศที่นิยมใช้กันทั่วไปกับเครื่องยนต์เทอร์โบไบน์ซึ่งเป็นแบบอัดในแนวแกน (Axial flow compressor) เครื่องอัดอากาศแบบไหลตามแกนให้ที่มีปริมาณอากาศมาก ๆ และต่อเนื่อง ความเร็วของลมที่ถูกดูดไหลผ่านใบพัดเปลี่ยนจากพลังงานจลน์เป็นพลังงานลมอัด แต่เนื่องจากเครื่องอัดอากาศแบบลูกสูบหาได้ง่ายกว่ามาก อันเนื่องมาจากเทคโนโลยีที่ไม่ซับซ้อน ราคาไม่แพง และค่าบำรุงรักษาที่ไม่มาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกนำมาใช้ทำงาน ถึงแม้ว่าเครื่องอัดอากาศแบบลูกสูบจะผลิตความดันได้สูงแต่ปริมาณลมที่ได้นั้นจะต่ำ (ขึ้นอยู่กับขนาดลูกสูบ และกำลังของมอเตอร์) เมื่อเทียบกับเครื่องอัดในแนวแกน แต่สามารถทำการปรับปรุงได้คือนำเครื่องอัดอากาศมากกว่าหนึ่งตัวมาต่อเพิ่มเพื่อให้ได้ปริมาณลมที่ต้องการ การไหลเป็นจังหวะๆ ของอากาศแก้ไขได้โดยให้เครื่องอัดอากาศอยู่ห่างจากเทอร์โบไบน์ให้มาก ปล่อยให้ก๊าซไหลผ่านท่อก่อนถึงเทอร์โบไบน์ จะช่วยลดการกระเพื่อมของการไหลให้กับเทอร์โบไบน์

4.3 ห้องเผาไหม้ที่มีการถ่ายเทความร้อนแบบ Recuperator

ห้องเผาไหม้ที่สร้างนั้นมีลักษณะเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนไปด้วยในตัว โดยทำการสร้างห้องเผาไหม้เป็นรูปทรงกระบอก และมีผิวซ้อนกันเป็น 2 ชั้น ห่างกันประมาณ 2-3

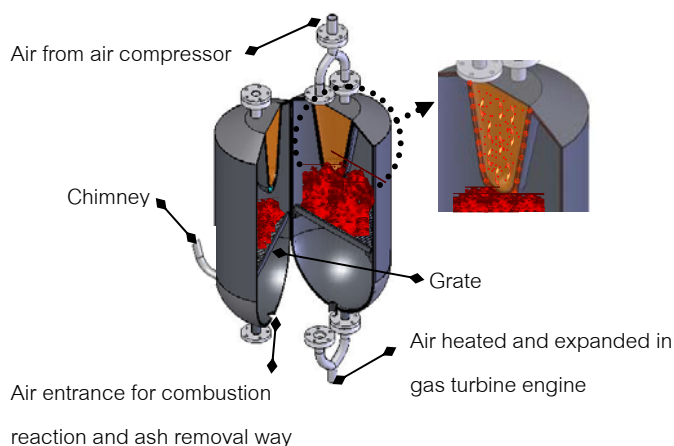
มิลลิเมตร เพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซร้อนของระบบเผาไหม้เชื้อเพลิง กับ อากาศของระบบเทอร์โบไบน์ที่มาจากเครื่องอัดอากาศ ก๊าซร้อนที่ได้จากการเผาไหม้จะถ่ายเทความร้อนผ่านผนังเตาชั้นในเข้าสู่อากาศของระบบเทอร์โบไบน์ที่อยู่ระหว่างช่องว่างของผนังเตาห้องเผาไหม้แบบแลกเปลี่ยนความร้อนผ่านผนังที่สร้างสำเร็จในรูปที่ 4.3 ซึ่งแสดงให้เห็นห้องเผาไหม้ที่ถูกหุ้มฉนวนกันความร้อนอย่างสมบูรณ์



รูปที่ 4.3 แสดงห้องเผาไหม้ที่ทำการสร้างสำเร็จพร้อมหุ้มฉนวนกันความร้อนอย่างสมบูรณ์

ห้องเผาไหม้แบบถ่ายเทความร้อนถูกสร้างขึ้นโดยใช้แผ่นเหล็กเหนียว SS 400 ซึ่งเป็นเหล็กแผ่นรีดร้อนที่มีคุณสมบัติในการเชื่อมที่ดี สามารถเชื่อมต่อได้ง่าย มาทำการตัดให้ได้ขนาดและความยาวที่ต้องการ และนำมาขึ้นรูปด้วยเครื่องม้วนโลหะ (Sheet metal rolling machine) โดยมีพิคัดความเผื่อที่ยอมได้ไม่เกิน ± 1.5 มิลลิเมตร สำหรับส่วนกันถังที่มีลักษณะโค้ง ขึ้นรูปด้วยการปั๊มขึ้นรูป (Hydraulic power press) มีพิคัดความเผื่อไม่เกิน ± 1.5 มิลลิเมตร เช่นกัน ห้องเผาไหม้ที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนผ่านผนังที่สร้างแล้วเสร็จ แสดงในรูปที่ 4.4

การเชื่อมประกอบผนังห้องเผาไหม้จะใช้เทคนิคการเชื่อมทิก (TIG) เพราะการเชื่อมทิกจะเกิดการซึมลึกของการเชื่อมค่อนข้างดี รอยเชื่อมที่ได้จะมีขนาดเล็ก [37-38] ซึ่งจะไปลดปัญหาการบิดตัวของชิ้นงานเมื่อทำการประกอบ ในระหว่างขั้นตอนของการประกอบมีการใส่ลิ้มเพื่อกันระหว่างชั้นให้ได้ระยะห่าง 3 มิลลิเมตร เพื่อให้ทำการประกอบได้ง่ายและได้ระยะห่างที่ถูกต้องในระหว่างชั้นทั้งสองตามที่ต้องการ



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.4 แสดงภาพสเก็ตของห้องเผาไหม้ที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนผ่านผนัง (ก) และห้องเผาไหม้ที่ผ่านการเชื่อมประกอบแล้วเสร็จสมบูรณ์ (ข)

ทำการหุ้มฉนวนห้องเผาไหม้ที่สร้างในรูปที่ 4.4 (ข) เพื่อป้องกันการถ่ายเทความร้อนออกสู่สิ่งแวดล้อมชั้นแรกหุ้มด้วยอิฐมวลเบาทนไฟ (แสดงในรูปที่ 4.5 (ก)) และเพื่อที่จะได้เก็บความร้อนได้ดียิ่งขึ้น ชั้นที่สองจึงได้หุ้มด้วยเซรามิคไฟเบอร์ (แสดงในรูปที่ 4.5 (ข)) อีกชั้นหนึ่ง ซึ่งทั้งอิฐมวลเบาทนไฟและเซรามิคไฟเบอร์มีค่านำความร้อนที่ต่ำมาก ๆ การหุ้มฉนวนทั้งสองชนิดนี้ จะทำหน้าที่บล็อกการถ่ายเทความร้อนแบบนำความร้อนออกจากเตาสู่สิ่งแวดล้อม ส่วนการบล็อกการแผ่รังสีความร้อน จะทำโดยการใส่กระจกเงารอบๆเตา (แสดงในรูปที่ 4.5 (ค)) ต่อจากชั้นเซรามิคไฟเบอร์เป็นชั้นที่สามเพื่อสะท้อนรังสีความร้อน



(ก)



(ข)

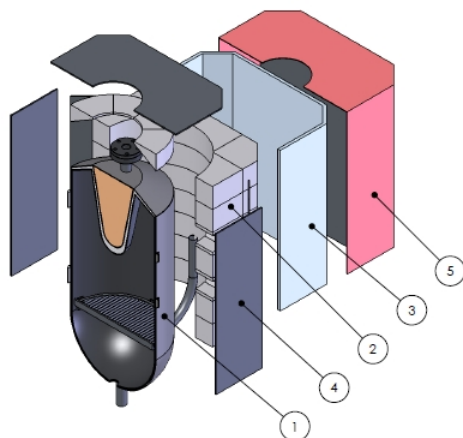


(ค)

รูปที่ 4.5 แสดงฉนวนกันความร้อนชนิดต่างๆ (ก) อิฐทนไฟ (ข) เซรามิคไฟเบอร์ (ค) กระจกเงา

เมื่อทำการหุ้มฉนวนกันความร้อนครบทั้งสามชั้นแล้ว ในขั้นสุดท้ายจะทำการหุ้มด้วยเหล็กแผ่น เพื่อให้ความแข็งแรงกับฉนวนกันความร้อนของห้องเผาไหม้อีกชั้นหนึ่งได้ห้องเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 จากนั้นทำการต่ออุปกรณ์วัดอุณหภูมิซึ่งเทอร์โมคัปเปิล ชนิด K โลหะที่ใช้หุ้มหลอดเทอร์โมคัปเปิล (Sheath) นั้นจะใช้เป็น อินโคเนล (Inconel) ซึ่งอุณหภูมิสูงสุดในการใช้

งานคือประมาณ 1140°C (2100°F) สามารถทำการวัดในสภาวะที่เป็น Oxidizing หรือ Inert และในสภาวะที่ต้องรับการแผ่รังสีโดยตรงได้ดี [39] จากนั้นทำการต่อหน้าแปลน (Flange) เพื่อเป็นทางเข้าของอากาศที่มาจากเครื่องอัดอากาศและเป็นทางออกของอากาศเพื่อไหลสู่ถังหักก๊าซ



(ก)

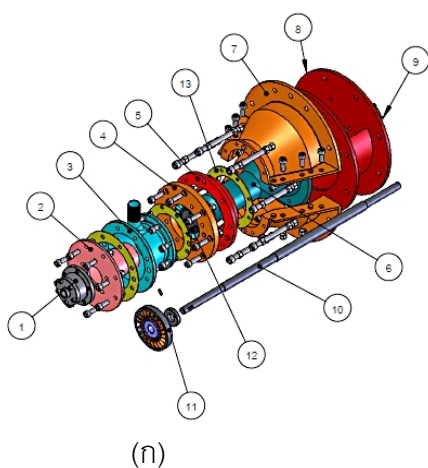


(ข)

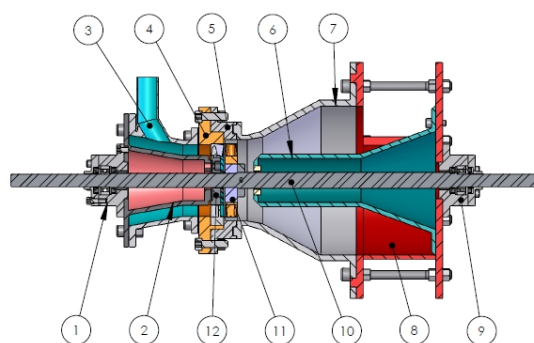
รูปที่ 4.6 แสดงห้องเผาไหม้ ภาพสเก็ตห้องเผาไหม้ (ก) ห้องเผาไหม้ที่ถ่ายเทความร้อนที่สร้างเสร็จสมบูรณ์ (ข)

- | | |
|-------------------|-------------|
| 1. ห้องเผาไหม้ | 2. อิฐทนไฟ |
| 3. เซรามิคไฟเบอร์ | 4. กระจกเงา |
| 5. โครงเหล็กแผ่น | |

4.4 เทอร์ไบน์และชิ้นส่วนย่อยที่ได้ทำการผลิตขึ้น



(ก)



(ข)



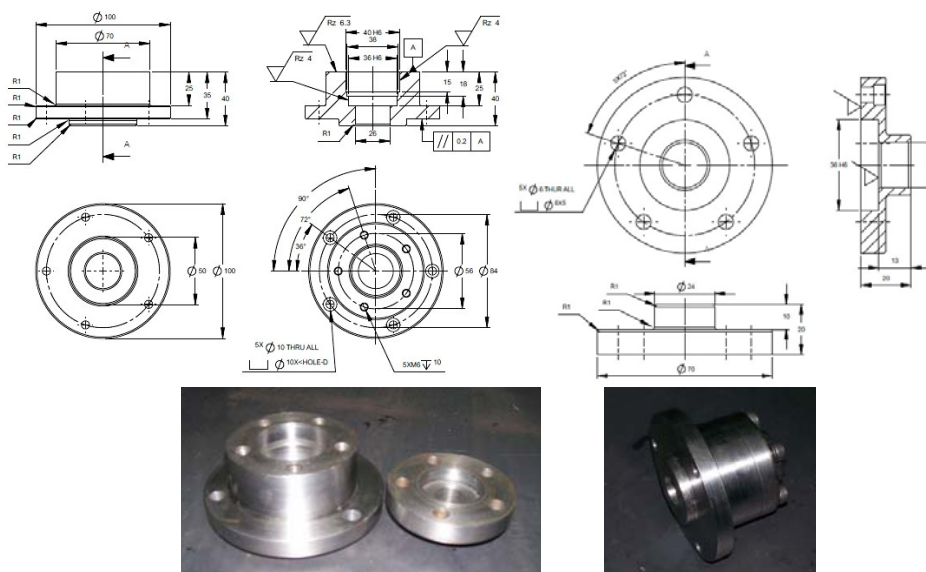
(ค)

รูปที่ 4.7 แสดงภาพเก็ตชิ้นส่วนเทอร์ไบน์ (ก) ภาพตัดเทอร์ไบน์ (ข) และเทอร์ไบน์ที่สร้างเสร็จสมบูรณ์ (ค)

- | | |
|---|---|
| 1. เสื้อใส่ตลับลูกปืน (Housing_01, 02) | 2. เฟรมด้านใน (Frame_01) |
| 3. เฟรมด้านนอก (Frame_02) | 4. ชิ้นส่วนยึดใบพัดนิ่ง (Frame_03) |
| 5. ชิ้นส่วนสำหรับใช้สวมเฟรมใบพัดนิ่ง (Frame_04) | 6. ชิ้นส่วนป้องกันเพลาด้านท้าย (Frame_05) |
| 7. เฟรมสวมใบพัดหมุน (Frame_06) | 8. เฟรมทางออกของอากาศ (Frame_07) |
| 9. เสื้อใส่ตลับลูกปืน (Housing) | 10. เพลาชับ (Shaft_01) |
| 11. โรเตอร์ | 12. สเตเตอร์ |

สามารถแสดงรายละเอียดพร้อม Drawing ของส่วนประกอบย่อยของเทอร์ไบน์ที่สร้างขึ้นได้ดังนี้

4.4.1 เสื้อใส่ตลับลูกปืน (Housing_01, Housing_02)

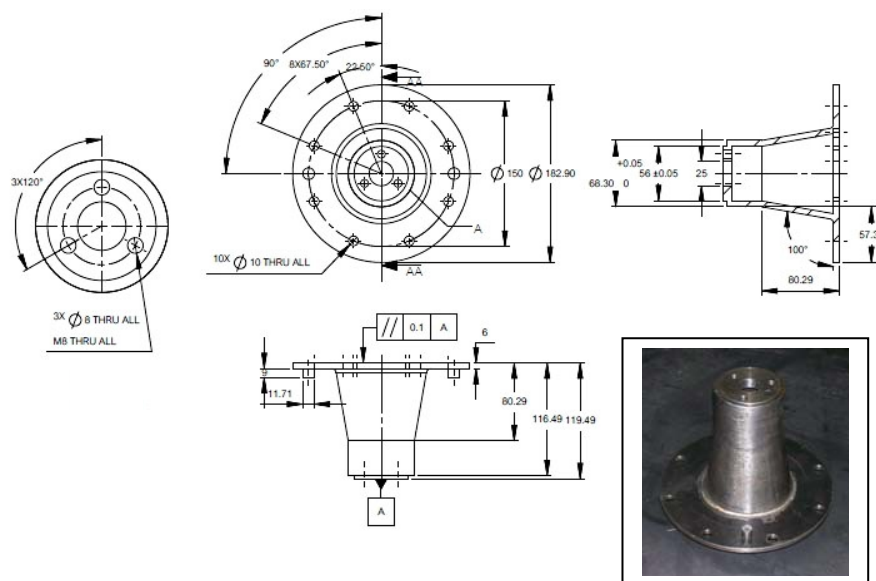


รูปที่ 4.8 แสดงเสื้อใส่ตลับลูกปืนพร้อม Drawing แสดงขนาด (Housing_01, Housing_02)

รูปที่ 4.8 แสดงเสื้อใส่ตลับลูกปืน (Housing) ที่สร้างเสร็จแล้วพร้อม Drawing แสดงขนาดต่างๆ ซึ่งเสื้อใส่ตลับลูกปืนทำหน้าที่ในการบรรจุตลับลูกปืน (Bearing) เพื่อรองรับเพลาชับ ตลับลูกปืนและออยซีล (Oil seal) ที่สร้าง ทำการกลึงจนได้พิคัดความเผื่อประมาณ +0.02 มิลลิเมตร และปรับแต่งจนผิวด้านในเรียบสนิท เพื่อว่าจะทำให้สามารถใส่ตลับลูกปืนได้อย่างพอดี ถ้าเกินขนาดพิคัดความเผื่อที่กำหนด ตลับลูกปืนจะเกิดการหลวมคลอนและอาจเกิดความเสียหายแก่ตลับลูกปืน

4.4.2 เฟรมด้านใน (Frame_01)

ทำหน้าที่เป็นชิ้นส่วนด้านใน ในการกำกับการไหลอากาศร้อนที่ได้รับมาจากห้องเผาไหม้ ก่อนที่จะเข้าสู่แฉวใบพัดเทอร์ไบน์ อีกทั้งยังทำหน้าที่ในการป้องกันความร้อนจากอากาศร้อนของห้องเผาไหม้ที่อาจจะผ่านมาสู่เพลาชับได้ รูปที่ 4.9 แสดงชิ้นส่วนนี้ที่สร้างขึ้นแล้วเสร็จพร้อม Drawing แสดงขนาด

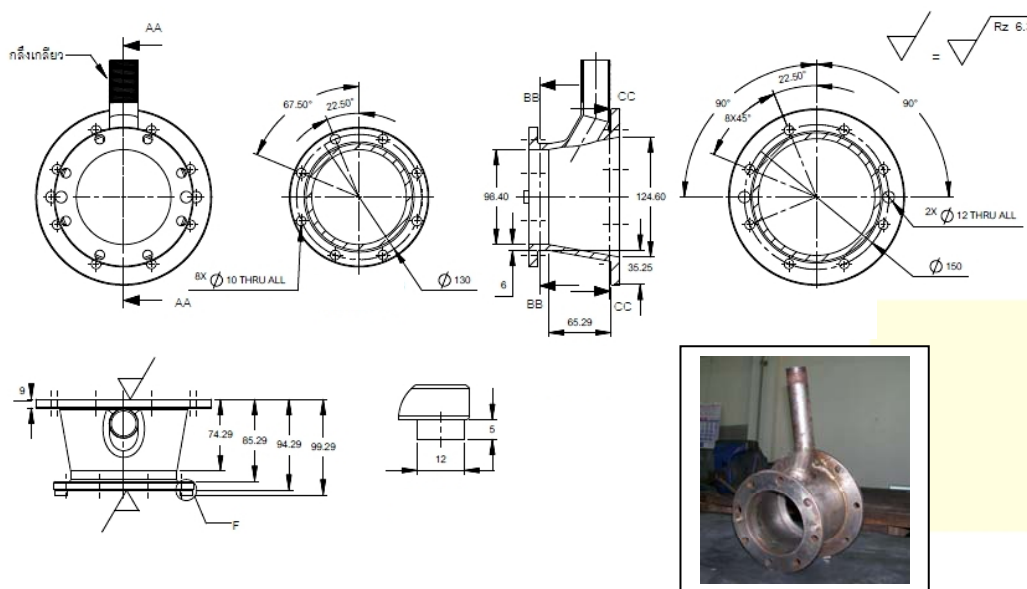


รูปที่ 4.9 แสดงชิ้นส่วนเฟรมด้านในพร้อม Drawing แสดงขนาด (Frame_01)

ความยุ่งยากของการสร้างขึ้นส่วนอยู่ที่ขั้นตอนการกลึงรูร้อยเพล่า ซึ่งจำเป็นที่ต้องคำนึงถึงความร่วมศูนย์กันของด้านหน้าและด้านหลังของรูร้อยเพล่า ถ้าไม่ร่วมศูนย์กันแล้วจะเกิดปัญหาในขั้นตอนการประกอบตัวก๊าซเทอร์ไบน์ อาจเกิดการขัดกันของเพลาชับ การมีลิ้มกำหนดตำแหน่งบนหน้าแปลน (Flange) เพื่อให้สามารถประกอบได้แม่นยำมากขึ้น และในขั้นตอนการเชื่อมประกอบนั้นได้คำนึงถึงการบิดตัวของหน้าแปลนอันเนื่องมาจากความร้อนเป็นอย่างมาก แต่สามารถทำการแก้ไขได้โดยการทำตัวจับยึดชิ้นงาน ฟิกซ์เจอร์ (Fixture) ช่วยจับยึดในขณะที่เชื่อม

4.4.3 เฟรมด้านนอก (Frame_02)

ทำหน้าที่ เป็นชิ้นส่วนด้านนอกในการกำกับการไหลอากาศร้อนที่ได้รับมาจากห้องเผาไหม้ ก่อนที่จะเข้าสู่ใบพัดเทอร์ไบน์ ซึ่งจะต้องประกอบกับเฟรมด้านใน (Frame_01) รูปที่ 4.10แสดง เฟรมด้านนอกที่สร้างเสร็จพร้อมใช้งาน พร้อม Drawing แสดงขนาดต่างๆ



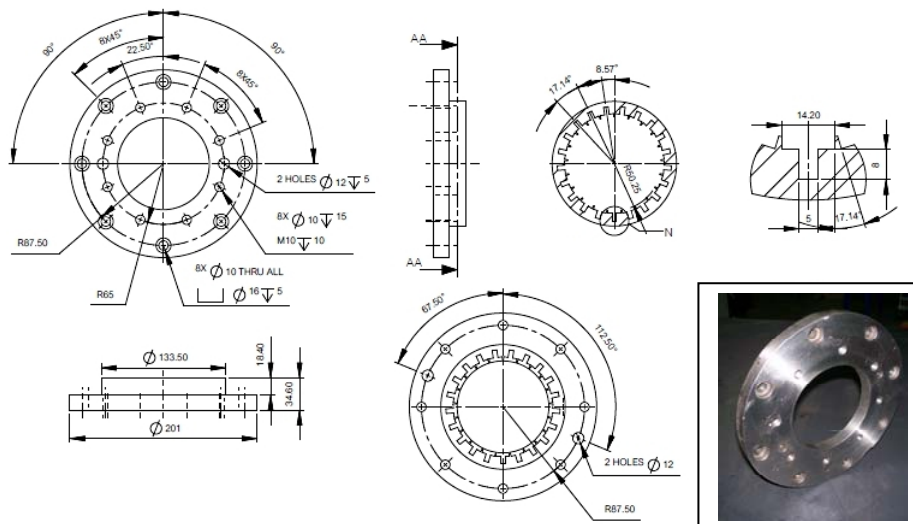
รูปที่ 4.10 แสดงเฟรมด้านนอกที่สร้างเสร็จพร้อม drawing แสดงขนาด (Frame_02)

เป็นขั้นตอนการผลิตที่ต้องให้ความสำคัญเกี่ยวกับการเชื่อมประกอบเป็นอย่างมาก เพราะนอกเหนือจากการบิดตัวของหน้าแปลนทั้งสองด้านที่เกิดจากความร้อนในขณะเชื่อมประกอบแล้ว การรั่วของท่อส่งของอากาศร้อนที่มาจากห้องเผาไหม้ก็มีความสำคัญมากเช่นกัน เมื่อเชื่อมเสร็จแล้วได้ทำการทดสอบการรั่วซึมของรอยต่อเชื่อมในบริเวณนี้ การเจาะรูร่องลิ้ม และการใส่ลิ้มมีความถูกต้องของตำแหน่งไม่เกิน ± 0.5 มิลลิเมตร ผิวด้านหน้าของหน้าแปลนทั้งสองด้านถูกปรับจนเรียบ เพราะมีผลต่อความสามารถกันการรั่วซึมของปะเก็น (Gasket)

4.4.4 จานยึดใบพัดนิ่ง (Frame_03)

ชิ้นส่วนนี้มีหน้าที่ในการเป็นจานสำหรับเสียบยึดใบพัดนิ่ง (Nozzle blade) ผลิตมาจาก 2 ขั้นตอน ได้แก่ ส่วนแรก เป็นส่วนหน้าแปลน ความสำคัญที่ต้องคำนึง คือ ในขั้นตอนการกลึงนั้น จะต้องให้ได้ความขนานของทั้งสองด้านของหน้าแปลน และขนาดรูในนั้นควรกลึงได้ขนาดความเผื่อ $98.4+0.02$ มิลลิเมตร ส่วนที่สองเป็นส่วนที่ใช้เสียบยึดใบพัดนิ่ง ขั้นตอนการผลิตจะต้องมีการตัดเฉือนชิ้นงานด้วยเครื่องตัดปาดด้วยการจ่ายประจุไฟฟ้าผ่านเส้นลวด (Wire-cut Electric Discharge Machine) เนื่องจากต้องการความเที่ยงตรงสูง คือพิสัยความเผื่อไม่ควรเกิน ± 0.01

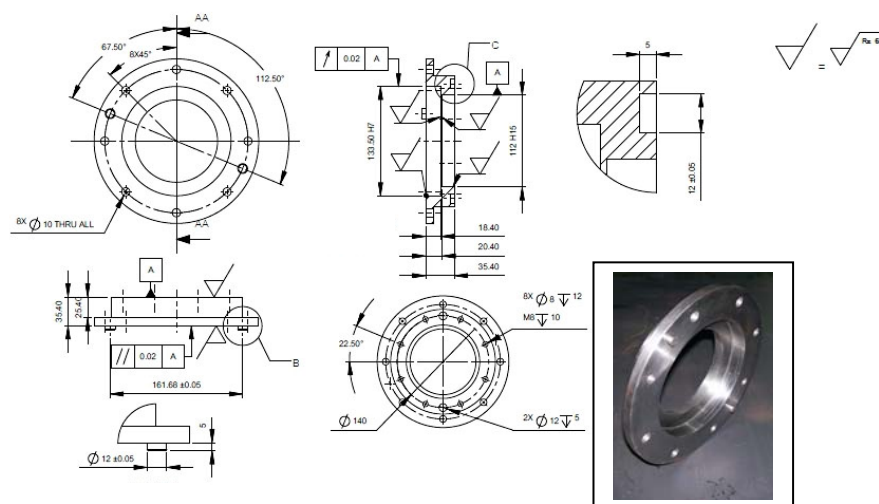
มิลลิเมตร หรือ 10 ไมครอน จึงทำให้การประกอบเข้ากับฐานของใบพัดที่มีความพิทพอดีจนยึดใบพัดที่สร้างเสร็จแล้วพร้อม drawing แสดงขนาด แสดงในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 แสดงงานยึดใบพัดที่สร้างเสร็จแล้วพร้อม drawing แสดงขนาด (Frame_03)

4.4.5 ชิ้นส่วนสำหรับใช้สวมเฟรมใบพัด (Frame_04)

ชิ้นส่วนนี้จะใช้สำหรับเป็นเสื้อสวมเฟรมของพัด (Nozzle frame) เป็นช่องที่อยู่ระหว่างใบพัดและใบพัดหมุน ชิ้นส่วนที่สร้างเสร็จแล้วพร้อม drawing แสดงขนาด แสดงในรูปที่ 4.12



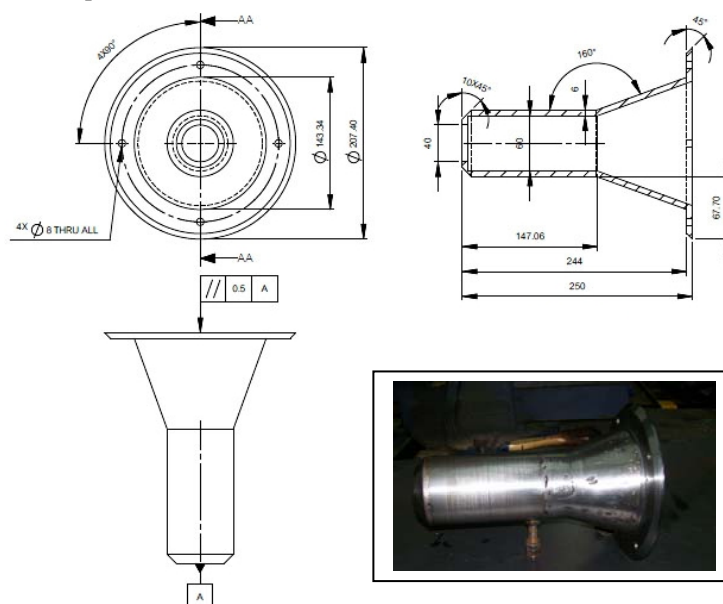
รูปที่ 4.12 แสดงชิ้นส่วนสำหรับใช้สวมเฟรมใบพัดที่สร้างเสร็จแล้วพร้อม drawing แสดงขนาด (Frame_04)

ในขั้นตอนการกลึงบริเวณช่องสวมของเฟรมใบพัดนี้พยายามกลึงจนได้พิทพอดีตามที่กำหนดคือประมาณ 133.5 ± 0.02 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องเฟรมที่สวมกับ

ใบพัดหมุนนั้นก็กลึงจนมีขนาดพิกัดสวมคลอนเพียง ประมาณ 112 +0.5 มิลลิเมตร เพื่อป้องกันการเสียดสีกันขณะหมุนระหว่างผนังของเฟรมด้านในกับผนังเฟรมด้านนอกของแฉวใบพัดหมุนซึ่งทำได้โดยให้เส้นผ่านศูนย์กลางทั้งสองร่วมศูนย์กันในขณะกลึง

4.4.6 ชั้นส่วนป้องกันเพลาด้านท้าย (Frame_05)

ชั้นส่วนนี้มีหน้าที่ เป็นชั้นส่วนป้องกันอากาศร้อนที่ไหลออกมาจากแฉวใบพัดหมุนมาสัมผัสกับเพลาชับ ซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายกับเพลาชับขึ้นได้ ชั้นส่วนป้องกันเพลาด้านท้ายที่สร้างเสร็จแล้ว แสดงในรูปที่ 4.13



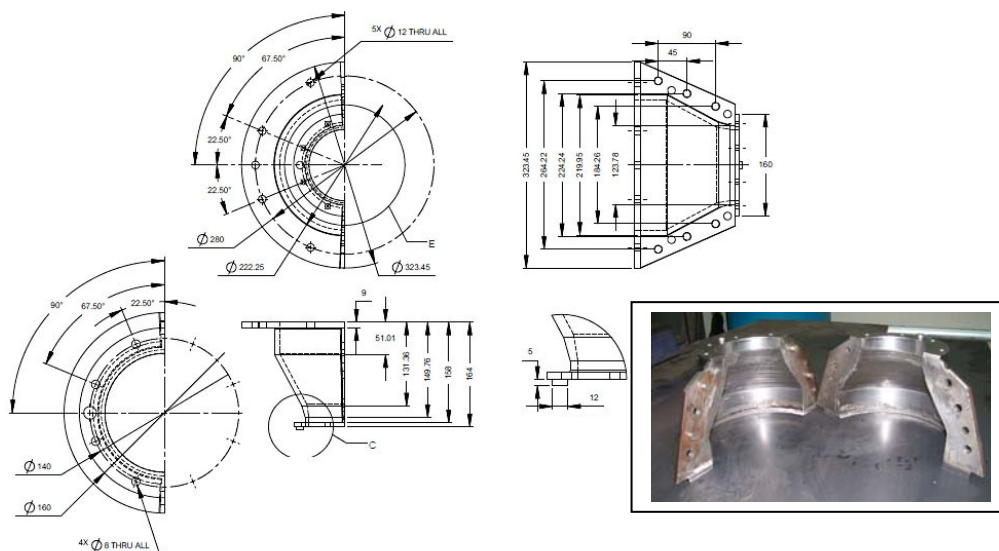
รูปที่ 4.13 แสดงชั้นส่วนป้องกันเพลาด้านท้ายที่สร้างเสร็จแล้วพร้อม drawing แสดงขนาด (Frame_05)

ชั้นส่วนนี้ต้องมีขนาดพิกัดความเผื่อสวมคลอน เพราะเป็นชั้นส่วนที่ป้องกันอากาศร้อนที่ขยายตัวจากแฉวใบพัดหมุนเท่านั้น ส่วนบริเวณช่องสวมเพลาชับ ใช้ทองเหลืองน้ำมันทำบุชรองเพื่อป้องกันการเสียดสีกับเพลาชับ หรืออาจเกิดการขัดตัวกับเพลาชับได้ ความยาวต้องไม่เกินกว่าขนาดกำหนดเช่นกัน เนื่องจากอาจเกิดการชนกับเฟรมของใบพัดหมุนในขั้นตอนการประกอบ

4.4.7 เฟรมสวมใบพัดหมุน (Frame_06)

เฟรมส่วนนี้ทำหน้าที่ในการเป็นส่วนให้เฟรมของใบพัดหมุนนั้นสวมเข้ามา และเป็นช่องทางออกของอากาศร้อนที่ขยายตัวออกมาจากแฉวใบพัดหมุน เฟรมสวมใบพัดหมุนที่สร้างเสร็จแล้วมีลักษณะ แสดงในรูปที่ 4.14

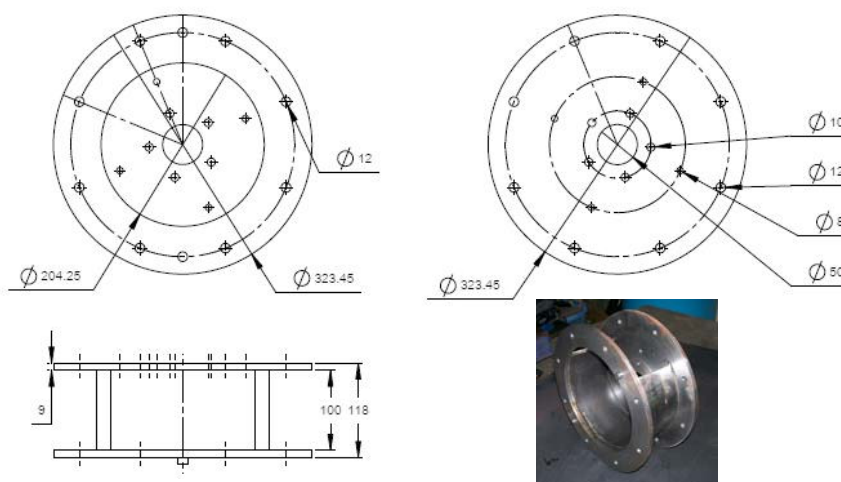
ชิ้นส่วนนี้จะผลิตได้ผลิตขึ้นโดยทำการผ่าครึ่งข้อลดแบบร่วมศูนย์ (Concentric Reduce) แบบมาตรฐาน ขนาด 4.5 นิ้ว แล้วจึงนำมากลึงให้ได้ขนาดตามที่ต้องการ ส่วนด้านหน้าของเฟรมบริเวณที่ไปพัดหมุนสวม จำเป็นต้องให้ได้เส้นผ่านศูนย์กลางตามพิสัยความเผื่อแบบสวมคลอน



รูปที่ 4.14 แสดงเฟรมสวมใบพัดหมุนที่สร้างเสร็จแล้วพร้อม drawing แสดงขนาด (Frame_06)

4.4.8 เฟรมทางออกของอากาศ (Frame_07)

เป็นเฟรมส่วนสุดท้ายทำหน้าที่เป็นทางออกของอากาศเมื่อเกิดการขยายตัวออกจากแถวใบพัดหมุนแล้ว และยังทำหน้าที่ในการเป็นฐานสำหรับการยึดเสื่อไส้ตลับลูกปืน ชิ้นส่วนที่สร้างเสร็จแล้วพร้อม Drawing แสดงในรูปที่ 4.15 ให้ความสำคัญกับการเชื่อมประกอบชิ้นส่วนนี้มาก เพราะไม่อย่างให้เกิดการเยื้องศูนย์กันของบริเวณที่ยึดกับเสื่อไส้ตลับลูกปืนจนทำให้เกิดการขัดกันของตลับลูกปืนในที่สุด

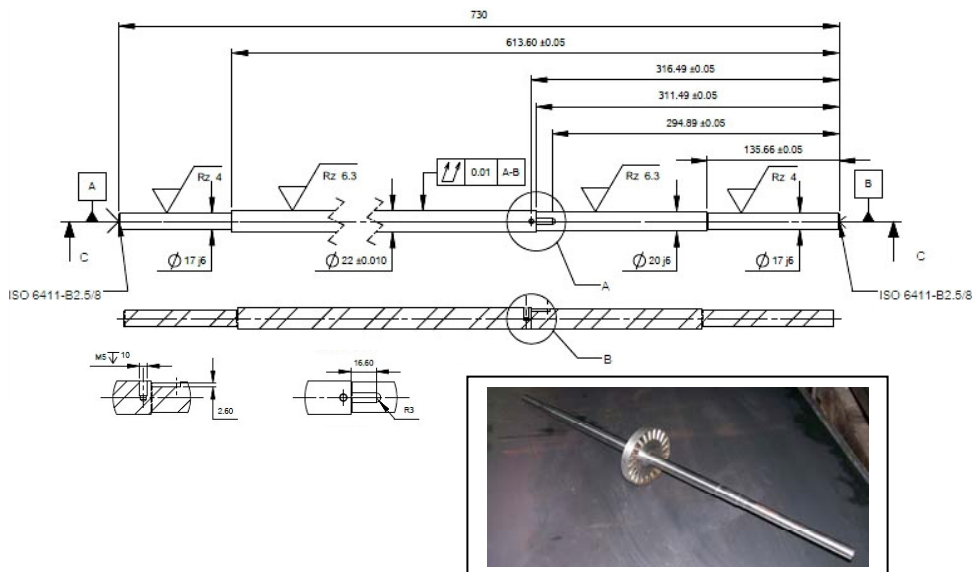


รูปที่ 4.15 แสดงเฟรมทางออกของอากาศที่สร้างเสร็จพร้อม drawing แสดงขนาด (Frame_07)

มีการระมัดระวังไม่ให้เกิดการบิดตัวของหน้าแปลนอันเนื่องมาจากความร้อนในขณะเชื่อมด้วยเช่นกัน จึงจำเป็นที่จะต้องทำที่จับยึดในระหว่างการเชื่อม การเจาะรูรองลิ้มและรูร้อยโบล์ท ความเที่ยงตรงเพื่อไม่ให้มีปัญหาในขั้นตอนของการประกอบ

4.4.9 เฟลาขับ (Shaft_01)

ทำหน้าที่ในการส่งกำลัง และจับยึดจานของแฉวใบพัดหมุน (Rotor Blade)



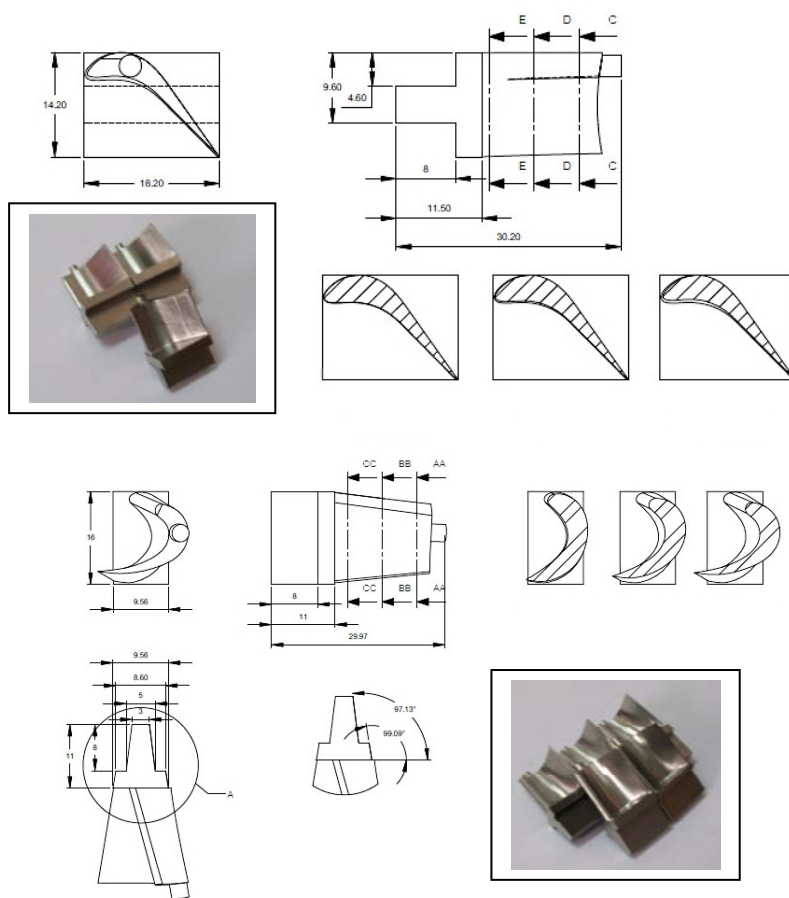
รูปที่ 4.16 แสดงเฟลาขับที่สร้างเสร็จแล้วพร้อม drawing แสดงขนาด (Shaft_01)

เฟลาขับนี้ได้ผ่านการผลิตด้วยเครื่องกลึงเป็นอันดับแรก โดยพยายามกลึงให้ได้ความร่วมศูนย์กลางของปลายเฟลาทั้งสองด้าน การกลึงในลักษณะนี้จะเรียกว่าการกลึงระหว่างศูนย์ (Turning between center) กลึงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฟลาให้ใหญ่กว่าขนาดแบบประมาณ 0.5 มิลลิเมตร เพื่อเผื่อไว้สำหรับการเจียระไนในขั้นตอนต่อไป จากนั้นจึงนำเฟลาไปเข้าเครื่องกัดเพื่อทำการกัดร่องลิ้มให้ได้ขนาดตามพิคัดความเผื่อแบบสวมพอดีกับลิ้มอัด ขั้นตอนสุดท้ายนำเข้าเครื่องเจียระไน ซึ่งเป็นเครื่องมือกลที่ใช้ในการเจียระไนผิวงานให้เรียบ (Surface finishing) และได้ขนาดพิคัดความเผื่อ (Tolerance) มากที่สุด พยายามเจียระไนแบบร่วมศูนย์ทั้งสองด้านเพื่อความ เป็นศูนย์กลางเดียวกัน เจียระไนจนได้ขนาดพอดี โดยทดลองประกอบเฟลาเข้ากับใบพัดหมุน (Rotor) และตลับลูกปืน เฟลาขับที่ประกอบกับวงล้อหมุนที่สร้างเสร็จแล้วแสดงในรูปที่ 4.16 ทำการวัดความร่วมศูนย์แล้วได้ค่าไม่เกิน 10 ไมครอนตลอดความยาวเฟลา

4.4.10 แฉวใบพัดนิ่งและแฉวใบพัดหมุน (Turbine blade_Stator, Turbine blade_Rotor)

แฉวใบพัดนิ่งทำหน้าที่ในการกักอากาศร้อนที่มาจากห้องเผาไหม้ไปยังแฉวใบพัดหมุน เพื่อให้ชนกับใบพัดหมุนแล้วขยายตัวไปยังความดันบรรยากาศ ทำให้เกิดการหมุนของเฟลาขับทำ

ให้เกิดงานเพลาชั้ขึ้นมา ใบพัดหมุนและใบพัดนิ่งที่สร้างเสร็จแล้วแสดงในรูปที่ 4.17 เลือกใช้ เหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 (C 0.08%, Cr 17.0%, Mo 2.5%, Fe 65%, Mn 2.0%, Ni 12.0%) [39-40] ทำใบพัดเนื่องจากคาดว่าเทอร์ไบน์นี้จะรับความร้อนที่ไม่สูงมาก เหล็กกล้าไร้สนิม มีสมบัติทนทานต่อการกัดกร่อนจากก๊าซและจากการถูกออกซิไดซ์ในที่อุณหภูมิสูงได้ดีเนื่องจากมี โครเมียมและนิกเกิลเป็นส่วนผสม การมีคาร์บอนและธาตุอื่นๆหลายตัวทำให้เหล็กนี้มีขอบเกรนที่ สมบูรณ์ขึ้นทำให้สามารถเพิ่มครีพสเตร้ง (Creep strength) ได้มากขึ้นขณะใช้งานในที่อุณหภูมิสูง



รูปที่ 4.17 แสดงใบพัดนิ่งและใบพัดหมุนที่สร้างเสร็จแล้วพร้อม drawing แสดงขนาด (Turbine blade_Stator, Turbine blade_Rotor)

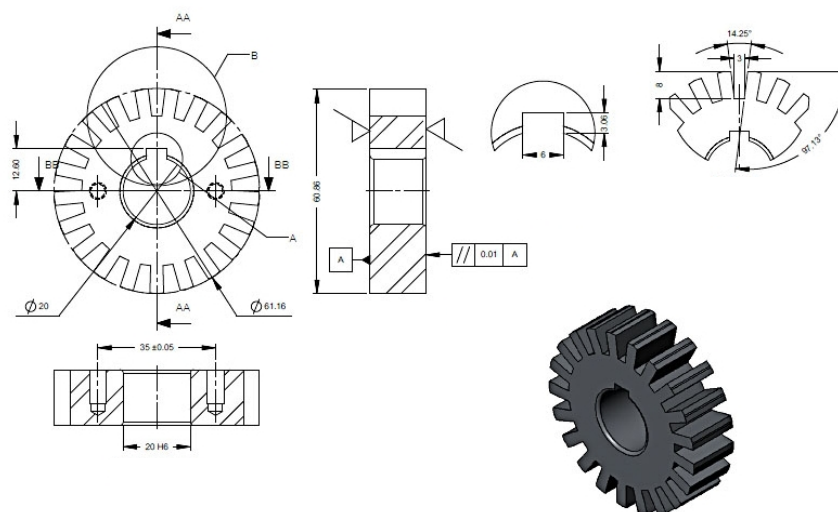
ในขั้นแรกก่อนทำการกัดชิ้นงานส่วนบริเวณใบพัด ได้ทำการตัดเฉือนชิ้นงานบริเวณส่วนฐานของใบพัดก่อน ด้วยเครื่องตัดปาดด้วยการจ่ายประจุไฟฟ้าผ่านเส้นลวด ซึ่งเป็นเครื่องมือกลที่ให้ความแม่นยำสูงพิคัดความเผื่อของขนาด 10 ไมครอน เพื่อนำไปประกอบเข้ากับช่องบนเฟรมในการประกอบแถวใบพัด

ชิ้นงานบริเวณใบพัดที่มีผิวโค้งถูกผลิตโดยใช้เครื่องกัดอัตโนมัติชนิด 5 แกน (5 axes) โดยปกติการขึ้นรูปผิวโค้งที่มีความซับซ้อนทางสมการคณิตศาสตร์สูง (Profiling with five axis) ใบพัด

เทอร์ไบน์สำหรับเครื่องยนต์ไอพ่นและเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้า พื้นผิวของชิ้นส่วนในอุตสาหกรรมยานยนต์ อากาศยาน หรือเป็นพื้นผิวที่ Undercut จะไม่สามารถขึ้นรูปได้อย่างละเอียดสมบูรณ์โดยใช้เครื่องกัด 3 แกน เครื่องกัด 5 แกนจะมีอุปกรณ์จับชิ้นงานและอุปกรณ์จับมีดตัดเฉือนสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระทุกทิศทาง สัมพัทธ์กันโดยอาศัยแกนทั้ง 5 เคลื่อนที่พร้อม ๆ กัน ตามตำแหน่งของจุดและมุมเอียงของชิ้นงานและมีดตัดเฉือนบนพื้นผิวที่จะทำ การคำนวณเพื่อกำหนดตำแหน่งการกัดเหล่านี้ต้องใช้ Software ของเครื่องช่วยในการคำนวณ [41] จึงจะผลิตได้

4.4.11 งานสำหรับยึดใบพัดหมุน (Turbine blade_Rotor)

งานนี้ใช้เลียบใบพัดหมุนเพื่อทำการประกอบเป็นวงล้อใบพัดหมุน การผลิตชิ้นส่วนนั้นต้องอาศัยเครื่องมือที่มีความแม่นยำค่อนข้างสูงในการตัดเฉือนนี้จึงได้ทำการเลือกเครื่องตัดปาดด้วยการจ่ายประจุไฟฟ้าผ่านเส้นลวดเป็นตัวตัดชิ้นงาน การตัดชิ้นงานที่ทำมาแล้วให้มีความสำคัญกับขนาดเป็นอย่างมาก เนื่องจากต้องนำไปสวมเข้ากันฐานของใบพัดหมุน จึงได้ตั้งพิถีพิถันความเผื่อไม่เกิน 10 ไมครอน



รูปที่ 4.18 แสดงงานยึดใบพัดหมุนที่สร้างเสร็จแล้วพร้อม drawing แสดงขนาด (Turbine blade_Rotor)

อีกทั้งการตัดร่องลิ้นร้อยเพลาดด้วยความระมัดระวังเป็นอย่างยิ่งเพื่อให้ได้ศูนย์กลางเดียวกันกับร่อง (Slot) ที่ใช้ในการใส่ฐานใบพัด

4.4.12 การประกอบ (Assembly) ใบพัดนิ่ง และใบพัดหมุนเข้ากับจานและ shroud

การประกอบชิ้นงานทั้งสองแบบของแถวใบพัดมีความสำคัญอย่างมากสำหรับเทอร์ไบน์ การประกอบแถวใบพัดหมุนต้องไม่ให้เกิดการบิดงอขึ้นเนื่องมาจากการหดตัวตรงบริเวณแนวเชื่อม

ซึ่งมีทั้งการหดตัวแนวยาวของรอยเชื่อม และหดตัวแนวขวางรอยเชื่อม การหดตัวที่เกิดขึ้นไม่พร้อมกันทั้งชิ้นงานเป็นสาเหตุทำให้เกิดการบิดงอเสียหายของใบพัด รูปที่ 4.11 แสดงใบพัดนิ่งและใบพัดหมุนเมื่อประกอบเข้ากับจานและ shroud อย่างสมบูรณ์



รูปที่ 4.19 แสดงใบพัดนิ่งและใบพัดหมุนเมื่อประกอบเข้ากับจานและ shroud เสร็จเรียบร้อย

ในขั้นตอนก่อนการเชื่อมผู้วิจัยได้ทำอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานในการเชื่อม อุปกรณ์นี้เรียกว่า ฟิกซ์เจอร์ เพื่อช่วยป้องกันการบิดตัวของชิ้นงานในระหว่างทำการเชื่อมการเชื่อมใบพัดเข้ากับจานและ shroud ใช้เทคนิคการเชื่อมทิก (TIG) ซึ่งเหมาะสมกับการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม เพราะวาร์รอยเชื่อมและแนวเชื่อมมีคุณภาพสูง ทนต่อการสึกกร่อนได้ดีกว่าการเชื่อมวิธีอื่น การบิดงอในชิ้นงานเกิดน้อย

4.4.13 การปรับสมดุลของเพลลา

สิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาในการออกแบบอุปกรณ์ที่มีการหมุน (Rotating Equipment) ด้วยความเร็วสูง ก็คือความสมดุล (Balancing) ชิ้นส่วนที่ไม่สมดุลเวลาหมุนด้วยความเร็วสูงจะทำให้เกิดการสั่นสะเทือน เสียงดัง เกิดความเสียหายต่อชิ้นส่วน และลดอายุการใช้งานของรองลื่นหรือลูกปืนลงอย่างมาก ความไม่สมดุลมีสาเหตุจากมวลส่วนเกิน เยื้องศูนย์กับแนวแกนการหมุน ทำให้เกิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่จะพยายามเหวี่ยงตัวชิ้นส่วนหมุนให้หนีออกจาก แนวแกนหมุน โดยขนาดของความไม่สมดุลขึ้นอยู่กับมวลส่วนเกินกับค่าความเยื้องศูนย์กลางของแนวแกนหมุน

การเกิดความสมดุลนั้นจะมีความสัมพันธ์กับ shaking force และ shaking moment ซึ่งสามารถที่จะอธิบายได้ โดยเป็นผลมาจากแรงเฉื่อย (Inertia forces) และ โมเมนต์ของการเคลื่อนที่ที่นำมาต่อกัน เมื่อมีการให้ขนาดกลไกการเคลื่อนที่ (Mechanism) ความเร็วเข้าไป แรงเฉื่อยนั้นจะขึ้นอยู่กับการกระจายตัวของมวล (Mass distribution) ของส่วนเคลื่อนที่ที่เชื่อมต่อ [42]

เทอร์ไบน์เป็นอุปกรณ์ที่มีความเร็วในการหมุนสูงมาก เช่นเครื่องผลิตไฟฟ้าหมุนถึง 3,600 รอบต่อนาที ดังนั้นจึงต้องหลีกเลี่ยงปัญหาที่เกิดจากความไม่สมดุลในขณะหมุน สำหรับเทอร์ไบน์ที่

สร้างชิ้นนี้เมื่อทำการประกอบวงล้อใบพัดหมุน (Rotor) เข้ากับเพลาขับ (Shaft) แล้วได้ทำการทดสอบความไม่สมดุลในขณะหมุน (Dynamic balance) ของส่วนประกอบทั้งสองที่สวมเข้าด้วยกัน วิธีการและเครื่องมือการทดสอบการปรับสมดุล (model zc50, version TC-GV) แสดงในรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 แสดงการทำการปรับสมดุลการหมุนของวงล้อและเพลาขับเทอร์ไบน์ที่สร้าง ด้วยเครื่องปรับสมดุล (model zc50, version TC-GV)

การถ่วงสมดุลขณะหมุนในกรณีนี้ เครื่องถ่วงสมดุลจะมีลูกปืน 2 ชุด และปลายด้านหนึ่งจะมีระบบวัดคอยตรวจวัด ดังนั้นความไม่สมดุลที่เกิดขึ้นที่ระนาบทั้ง 2 ข้างจะถูกตรวจสอบได้อย่างอิสระ รวดเร็ว และถูกต้องแม่นยำด้วย ทำให้สามารถสร้างระนาบแก้ไขความไม่สมดุล ณ ตำแหน่งใด ๆ ได้โดยจะสัมพันธ์กับการหมุน เริ่มต้นการทดสอบจะทำการหมุนชิ้นงานผ่านระบบสายพานด้วยการป้อนความเร็วใช้งานสู่ระบบ เครื่องตรวจวัดก็จะทำการเก็บข้อมูลและประมวลผลแสดงองศาของการไม่สมดุลขึ้นมา จากนั้นจึงต้องทำการปรับมวลส่วนเกินของชิ้นงาน จนกระทั่งความไม่สมดุลนั้นมีค่าน้อยที่สุด เป็นที่ยอมรับได้ในความเร็วใช้งาน

ตารางที่ 4.1 แสดงผลจากการปรับสมดุลวงล้อและเพลาที่สร้างขึ้นมา

Balancing speed	3,834 rpm
Tolerance with standards	ISO/1940
Degree of balancing	6.300
Total weight	3 Kg
Service speed	8,000 rpm

ตารางที่ 4.2 แสดง unbalance เริ่มต้น

Initial unbalance	
4.7987 g	53°

ตารางที่ 4.3 แสดง unbalance ที่เหลือ

Residual unbalance	
0.2881g	17°
0.3*Tol	

4.4.14 ผลการประกอบส่วนกังหันก๊าซ

การประกอบชิ้นส่วนที่ผ่านการขึ้นรูปและขึ้นส่วนมาตรฐานต่างๆ อย่างเช่น โบลท์ (Bolt) ขนาดต่างๆ ตลับลูกปืน (Bearing) เข้าด้วยกันเป็นเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์โบนั้นขั้นตอนของการประกอบแต่ละชิ้นต้องทำอย่างระมัดระวังและต้องทำตามลำดับขั้น โดยสิ่งที่คุณผู้วิจัยให้ความสำคัญอย่างมากสำหรับเทอร์โบที่สร้างคือ การประกอบเพลลาขับเนื่องจากอาจเกิดการโก่งตัว และขัดตัวกันของตลับลูกปืนเกิดขึ้น รูปที่ 4.21 แสดงก๊าซเทอร์โบที่ประกอบสมบูรณ์แล้ว พร้อมนำไปต่อเชื่อมกับห้องเผาไหม้และเครื่องอัดอากาศให้ได้ตัวเครื่องยนต์



รูปที่ 4.21 แสดงก๊าซเทอร์โบที่ประกอบสมบูรณ์แล้วพร้อมเชื่อมต่อกับห้องเผาไหม้และเครื่องอัดอากาศ

ชิ้นส่วนที่สัมผัสต่อกันได้ถูกทำการซีล (Seal) ด้วยปะเก็น (Gasket) และปะเก็นที่ใช้ทำมาจากใยแอสเบสตอส (Asbestos) หรือใยหินอัด โดยใยหินอัดนี้ประกอบเข้าด้วยใยหินที่ถูกยึดติดกันด้วยวัสดุยึดหยุ่นจำนวนหนึ่งที่สัมพันธ์กัน และเนื่องจากใยหินอัดมีความยืดหยุ่นที่ดีในการปรับตัวเอง จึงเป็นปะเก็นที่ได้รับความนิยมใช้สูง สามารถทนทานต่ออุณหภูมิสูงประมาณ 550°C โดยโครงสร้างวัสดุไม่เปลี่ยนแปลง [43] หลังจากทำการประกอบเทอร์โบเรียบร้อยแล้วทดลองหมุน

เพลาชับ ปรากฏว่าไม่เกิดการติดหรือขัดกันของตลับลูกปืนจึงถือว่าใช้ได้ หากเกิดการติดขัด จำเป็นต้องทำการปรับตั้งใหม่จนกว่าจะไม่เกิดการขัดกัน

บทที่ 5

การทดสอบเดินเครื่องของระบบเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์โบ

การทดสอบเดินเครื่องระบบก๊าซเทอร์โบที่สร้างขึ้น ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ 1. ขั้นตอนการติดตั้งอุปกรณ์ช่วยของตัวระบบเครื่องยนต์ 2. ขั้นตอนการสตาร์ทเครื่อง และ 3. ขั้นตอนการเดินเครื่อง

5.1 ขั้นตอนการติดตั้งและประกอบอุปกรณ์ช่วยเข้ากับตัวเครื่อง

5.1.1 ทำการประกอบองค์ประกอบต่างๆของเครื่องยนต์เทอร์โบเข้าด้วยกัน ได้แก่ เครื่องอัดอากาศแบบลูกสูบ ห้องเผาไหม้ และเทอร์โบ จากนั้นประกอบอุปกรณ์ช่วยเข้าไป

- ระบบป้อนเชื้อเพลิงแบบเกลียวสกรู (Screw feeder)
- ระบบป้อนอากาศเพื่อใช้ในการเผาไหม้ (Air blower)
- เครื่องมือวัดอุณหภูมิและความดันตามจุดต่างๆ

5.1.2 ทำการตรวจสอบการรั่วซึมของอากาศอัดตรงบริเวณหน้าแปลนต่างๆ ที่ประกอบหรือต่อเข้าด้วยกัน และตรวจสอบการสั่นของเครื่องอัดอากาศและเทอร์โบ

5.1.3 ทำการทดสอบการหมุนของเทอร์โบว่าสะดวกและราบรื่นหรือไม่ ถ้าเกิดการติดขัดหรือไม่สะดวก จะต้องแก้ไขให้เรียบร้อยก่อนการทดสอบเดินเครื่อง ซึ่งสาเหตุอาจจะเกิดจากการติดตั้งเทอร์โบเข้ากับห้องเผาไหม้ที่ไม่ถูกต้อง

5.1.4 ตรวจสอบเครื่องมือวัด เช่น อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ อุปกรณ์วัดความเร็วรอบ (Tachometer) ให้พร้อมใช้งาน

5.1.5 ตรวจสอบระบบการป้อนเชื้อเพลิง และระบบป้อนอากาศเพื่อใช้ในการเผาไหม้

5.2 ขั้นตอนการเริ่มเดินเครื่อง (Start up)

5.2.1 ทำการเปิดเครื่องอัดอากาศและตรวจสอบการหมุนของเทอร์โบอีกครั้ง โดยต้องหมุนได้สะดวกไม่เกิดการติดขัดและความเร็วคงที่

5.2.2 ทำการติดไฟถ่านไม้เพื่อใช้เป็นเชื้อในการเริ่มเผาไหม้เชื้อเพลิงจริง (ฟางข้าว) โดยใช้ถ่านไม้ปริมาณ 2.5 กิโลกรัมมาทำการติดไฟภายนอกห้องเผาไหม้ก่อน

5.2.3 ป้อนถ่านไม้ที่ติดไฟแล้วเข้าสู่บนตะแกรงในห้องเผาไหม้

5.2.4 เปิดระบบป้อนอากาศเข้าสู่ห้องเผาไหม้ในอัตราพอประมาณ แล้วรออุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้สูงประมาณ 350°C จึงทำการป้อนเชื้อเพลิงฟางข้าวบดเข้าสู่ภายในห้องเผาไหม้ การเผาไหม้จะเป็นแบบ Entrained flow คือ อนุภาคเชื้อเพลิงลอยตัวอยู่ท่ามกลางเปลวเพลิง

5.3 ขั้นตอนการเดินเครื่องและเก็บข้อมูล

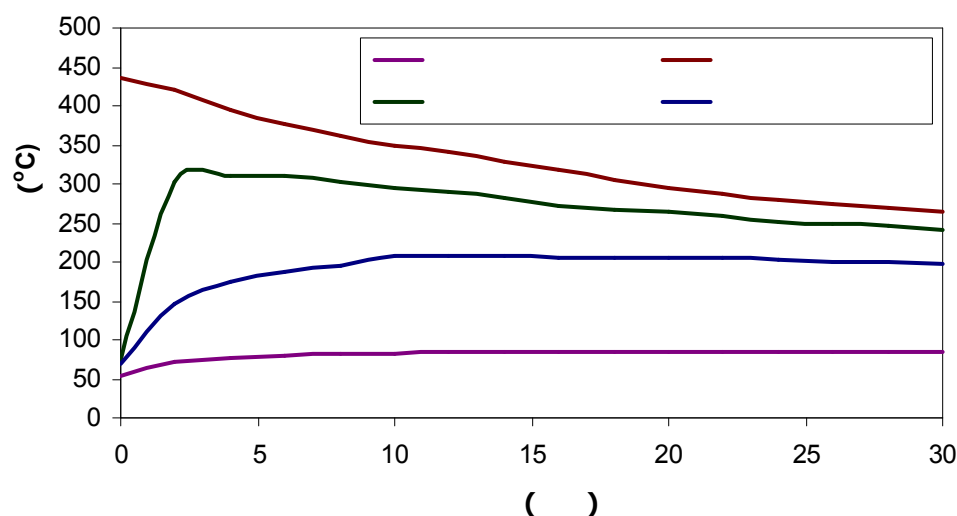
5.3.1 ทำการเปิดเครื่องอัดอากาศเพื่ออัดอากาศผ่านผนังห้องเผาไหม้ และเข้าสู่เทอร์ไบน์ต่อไป

5.3.2 เมื่ออุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้สูงประมาณ 350°C ให้ทำการปรับเพิ่มอัตราการป้อนเชื้อเพลิงฟางข้าวบดเข้าห้องเผาไหม้ขึ้นเรื่อยๆจนมีค่าประมาณ 0.0166 กิโลกรัมต่อนาที

5.3.3 เมื่อเทอร์ไบน์หมุนด้วยความเร็วรอบเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนคงที่แล้วจึงทำการบันทึก เวลา อุณหภูมิจุดต่างๆ ความเร็วรอบเทอร์ไบน์

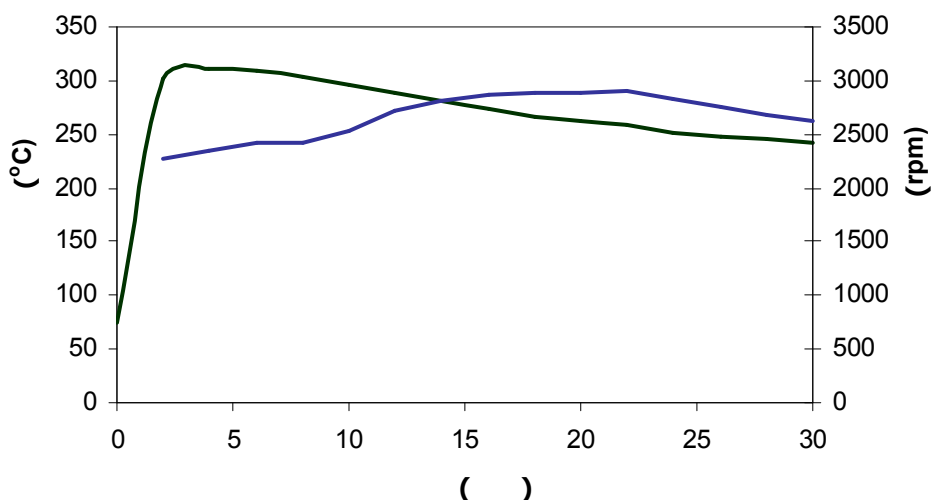
5.4 ผลการทดลองเดินเครื่อง

ก่อนทำการทดลองจะทำการเผาไหม้ถ่านไม้ให้ติดไฟภายนอกห้องเผาไหม้ก่อน เพื่อเป็นเชื้อไฟเริ่มต้นในการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟางข้าว นำถ่านติดไฟป้อนบนตะแกรงภายในห้องเผาไหม้ที่จะใช้ทำการทดลอง เปิดระบบป้อนอากาศเผาไหม้และรอจนอุณหภูมิเริ่มต้นภายในห้องเผาไหม้ประมาณ 350°C จึงเริ่มป้อนเชื้อเพลิงฟางข้าวบดเข้าสู่ภายในห้องเผาไหม้เพื่อสกัดความร้อนออกมา ผลการทดลองปรากฏว่า เมื่อทำการเผาไหม้เชื้อเพลิง อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้จะเริ่มสูงขึ้นจนถึงอุณหภูมิประมาณ 440°C อากาศภายในห้องเผาไหม้จะเกิดการขยายตัวเนื่องจากการรับความร้อนจากการเผาไหม้ ทำให้ความดันภายในห้องเผาไหม้สูงขึ้น อากาศร้อนภายในห้องเผาไหม้จึงพยายามดันตัวเองออกมาทางช่องป้อนเชื้อเพลิงแทนที่จะเป็นทางปล่องที่ออกแบบไว้ 2 ปล่อง เนื่องจากอยู่ในตำแหน่งที่ตรงกว่า หมายความว่าป้อนเชื้อเพลิงไม่เข้าห้องเผาไหม้ได้น้อย ทำให้ระบบป้อนเชื้อเพลิงในลักษณะที่ไปรยลงมาจากด้านบนนั้นไม่สามารถทำได้อย่างสมบูรณ์ เมื่อไม่สามารถป้อนเชื้อเพลิงได้อย่างสมบูรณ์ความร้อนในห้องเผาไหม้จะลดลง ดังแสดงในรูปที่ 5.1 เส้นที่แสดงอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ (เส้นสีน้ำตาล) สามารถทำการเผาไหม้ได้อุณหภูมิเปลวเพลิงเพียงประมาณ 440°C เพราะว่าป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ได้น้อย อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้จะเริ่มคงที่ หลังจากนั้นจึงเริ่มทำการเดินเครื่องอัดอากาศเพื่อนำอากาศที่อัดตัวมาแลกเปลี่ยนความร้อนจากห้องเผาไหม้เพื่อเข้าสู่เทอร์ไบน์



รูปที่ 5.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่จุดต่างๆ กับเวลาเดินเครื่อง

รูปที่ 5.1 จะเห็นเส้นสีเขียวแสดงอุณหภูมิอากาศอัดตัวตรงทางเข้าเทอร์โบ การแลกเปลี่ยนความร้อนกับก๊าซร้อนจากห้องเผาไหม้ ในช่วงแรก จะเห็นอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อเทียบกับอุณหภูมิเริ่มต้นของอากาศอัดตัวที่ออกมาจากเครื่องอัดอากาศซึ่งมีประมาณ 80°C เท่านั้น ทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างภายในห้องเผาไหม้กับอากาศที่ถูกอัดตัวที่แตกต่างกันมาก อากาศที่ถูกอัดตัวจึงดูดความร้อนจากห้องเผาไหม้อย่างรวดเร็ว แต่กลับลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น เมื่ออากาศอัดตัวมาแลกเปลี่ยนความด้วยก็ทำให้อุณหภูมิก๊าซร้อนภายในห้องเผาไหม้ลดลงด้วยเช่นกัน การแลกเปลี่ยนความร้อนกับเปลวเพลิง (ทั้งส่วนการนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน) ทำให้อากาศอัดตัวมีอุณหภูมิสูง และเมื่ออากาศอัดตัวที่มีอุณหภูมิสูงนั้นไหลไปกระทบใบพัดเทอร์โบจะถ่ายเทพลังงานจลน์แก่ใบพัดส่วนหนึ่ง ทำให้อุณหภูมิของอากาศอัดตัวลดลงดังแสดงในรูปที่ 5.1 ซึ่งแสดงด้วยเส้นสีน้ำเงินซึ่งเป็นเส้นที่แสดงอุณหภูมิขาออกจากเทอร์โบ สาเหตุของการลดลงของอุณหภูมิอากาศอัดตัวนั้น เนื่องมาจากการสูญเสียพลังงานจลน์ให้กับตัวใบพัด รวมไปถึงการสูญเสียเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อม และรูปที่ 5.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เข้าเทอร์โบต่อความเร็วรอบของเทอร์โบ โดยก่อนทำการเผาไหม้เชื้อเพลิงเมื่อทำการเปิดเครื่องอัดอากาศเพื่อให้อากาศไหลหมุนวนในระบบเทอร์โบ



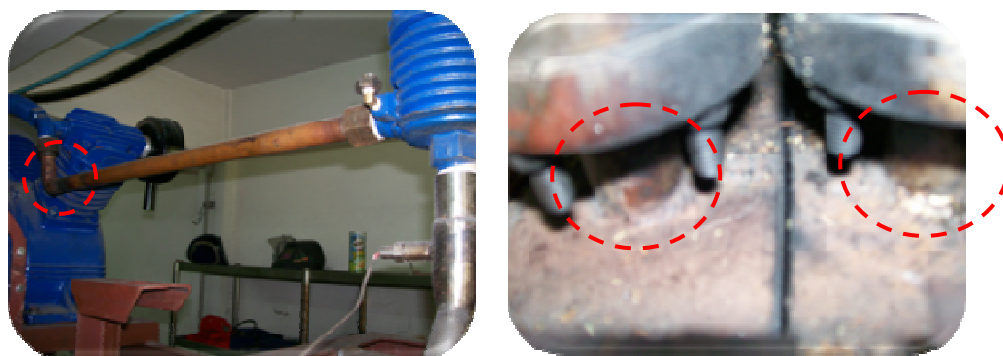
รูปที่ 5.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เข้าเทอร์ไบน์และความเร็วรอบต่อเวลา

ผลปรากฏว่าเมื่อได้ทำการวัดความเร็วรอบของเทอร์ไบน์ สามารถวัดค่าได้ประมาณ 520 รอบต่อนาที แต่หลังจากทำการเผาไหม้เชื้อเพลิงแล้ว (กล่าวคืออุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ประมาณ 440°C อุณหภูมิอากาศของระบบเทอร์ไบน์ที่ถูกอัดตัวหลังจากผ่านการแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศร้อนในห้องเผาไหม้มีอุณหภูมิตรงบริเวณทางเข้าเทอร์ไบน์ประมาณ 320°C) เมื่อวัดความเร็วรอบเทอร์ไบน์อีกครั้งได้ประมาณ 2,200 รอบต่อนาที ซึ่งในช่วงแรก (ประมาณ 10 นาทีแรก) ความเร็วรอบของเทอร์ไบน์จะค่อยๆเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากความร้อนของอากาศอัดตัวที่มีอุณหภูมิสูงตรงทางเข้าเทอร์ไบน์ยังไม่คงที่ เกิดการสูญเสียความร้อนในช่วงเริ่มต้นให้กับสิ่งแวดล้อม อย่างเช่น การสูญเสียความร้อนให้กับเฟรมของเทอร์ไบน์ หรือสูญเสียออกสู่ภายนอก (รูปที่ 5.1 แสดงอุณหภูมิทางเข้าเทอร์ไบน์ และออกเทอร์ไบน์) แต่เมื่อการสูญเสียความร้อนเริ่มคงที่ ทำการวัดความเร็วเทอร์ไบน์ใหม่ได้ประมาณ 2,800 รอบต่อนาที หลังจากนั้นความเร็วเทอร์ไบน์จะเริ่มลดลงบ้างตามเวลาและอุณหภูมิการเผาไหม้ที่ลดลงเล็กน้อย เนื่องจากการป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ได้น้อยนั่นเอง ทั้งนี้เห็นว่าหากใช้ถ่านเป็นเชื้อเพลิงและป้อนอากาศที่เหมาะสม ห้องเผาไหม้นี้จะสร้างอุณหภูมิเปลวเพลิงที่เกิน 500°C ขึ้นไปแน่นอน

5.5 ปัญหาการเดินเครื่อง

5.5.1 ในระหว่างการหมุนของเครื่องอัดอากาศ จะเกิดแรงสั่นสะเทือนของเครื่องอัดอากาศเกิดขึ้น แรงสั่นสะเทือนส่งผลมาถึงห้องเผาไหม้ ทำให้เกิดการแตกร้าวตรงบริเวณรอยต่อเชื่อมของท่อทางเดินอากาศที่มาจากเครื่องอัดอากาศเข้าสู่ห้องเผาไหม้ เกิดการรั่วซึมของอากาศที่อัดตัวมา

จากเครื่องอัดอากาศ อีกทั้งตรงบริเวณท่อทองแดงที่ต่อมาจากเครื่องอัดอากาศที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้ ก็เกิดการแตกร้าวด้วยเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 แสดงบริเวณที่เกิดการแตกร้าวเนื่องมาจากการสั่นของเครื่องอัดอากาศ

5.5.2 ระบบการป้อนเชื้อเพลิง การป้อนเชื้อเพลิงฟางข้าวที่ผ่านการบดมาแล้วนั้น ได้จัดทำระบบป้อนเชื้อเพลิง โดยการนำเครื่องบดหมูมาดัดแปลงเป็นระบบป้อนเชื้อเพลิง ทำการต่อระบบส่งกำลังด้วยมอเตอร์ขนาด $\frac{1}{4}$ แรงม้า ดังรูปที่ 5.4 ปัญหาที่เกิดขึ้นคือ ในระบบส่งกำลังขนาดของมอเตอร์ที่มีอยู่มีขนาดแรงม้าต่ำ จึงทำให้เมื่อทำการป้อนเชื้อเพลิงที่ความเร็วรอบที่ต่ำไม่สามารถทำได้ เพราะว่าแรงบิดเริ่มต้นนั้นมีค่ามากกำลังของมอเตอร์ไม่เพียงพอในการหมุนระบบป้อนเชื้อเพลิง



(ก)



(ข)

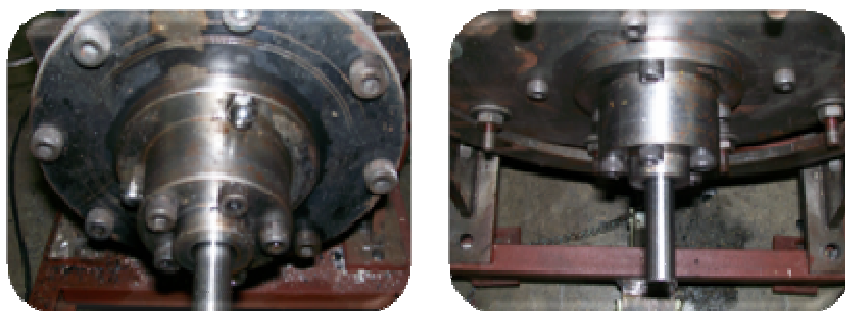
รูปที่ 5.4 (ก) แสดงระบบป้อนเชื้อเพลิงฟางข้าวบด (ข) ฟางข้าวที่บดนำมาทำเชื้อเพลิง

5.5.3 การป้อนเชื้อเพลิงเพื่อใช้ในการเผาไหม้ ปัญหาที่เกิดขึ้นคือ เมื่ออุณหภูมิในห้องเผาไหม้เริ่มสูงขึ้นมากกว่า 420°C อากาศภายในห้องเผาไหม้เมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการขยายตัวที่สูง ทำให้เกิดความดันภายในห้องเผาไหม้สูงตามไปด้วย อากาศที่อยู่ภายในห้องเผาไหม้นั้นพยายามที่จะดันเชื้อเพลิงออกมา ทำให้ระบบป้อนเชื้อเพลิงในลักษณะที่โปรยลงมาจากด้านบนนั้นไม่สามารถที่จะทำได้ เชื้อเพลิงที่โปรยลงไปจะถูกดันออกมาโดยอากาศภายในห้องเผาไหม้ เมื่อไม่สามารถเติมเชื้อเพลิงได้ความร้อนในห้องเผาไหม้ก็ลดลง



รูปที่ 5.5 แสดงบริเวณช่องป้อนเชื้อเพลิงที่เกิดความดันของอากาศในห้องเผาไหม้เมื่ออุณหภูมิสูง

5.5.4 ระบบหล่อเย็นของก๊าซเทอร์ไบน์ ในการเดินเครื่องเมื่ออุณหภูมิเข้าก๊าซเทอร์ไบน์นั้นมีอุณหภูมิที่สูงจะเกิดถ่ายเทความร้อนมายังเพลาชับและตัวเฟรมของเทอร์ไบน์ ทำให้เกิดการขยายตัวทางความร้อน และถ่ายเทไปยังตั้บลูกปืนทำให้เกิดการติดขัดของระบบการหมุนของเพลาลูก



รูปที่ 5.6 บริเวณตั้บลูกปืนทั้งส่วนหน้าและส่วนหลังที่ต้องได้รับการหล่อเย็น

บทที่ 6

สรุปผลการดำเนินงาน

6.1 การสร้างเครื่องยนต์เทอร์โบ

ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบและสร้างเครื่องยนต์เทอร์โบขนาดเล็ก ที่สามารถเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งอย่างเช่น ชีวมวล โดยได้สร้างห้องเผาไหม้ที่สามารถแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซร้อนจากการเผาไหม้กับอากาศของเทอร์โบ (Heat exchanger furnace) ภายในห้องเผาไหม้ที่สร้างนี้ เชื้อเพลิงแข็งถูกเผาและปล่อยความร้อนออกมา จากนั้นความร้อนจะถูกถ่ายเทผ่านผนังปิดเข้าสู่อากาศอัด (Compressor air) ของเครื่องยนต์เทอร์โบ อากาศอัดเมื่อได้รับความร้อนจะมีแรงดันและอุณหภูมิสูง จึงขยายตัวผ่านเทอร์โบไปยังความดันบรรยากาศทำให้ได้กำลังออกมา งานวิจัยนี้เลือกใช้เครื่องอัดอากาศชนิดลูกสูบ (Reciprocating air compressor) โดยเลือกยี่ห้อ PUMA รุ่น PP275 ขนาด 7.5 HP, 5.5 KW, จำนวนหัวสูบ 2 หัว ซึ่งให้ปริมาณลม 1,280 l/min อากาศที่ถูกปิดอยู่ในกระบอกสูบของเครื่องอัดอากาศแบบนี้จะสามารถอัดให้ความดันได้สูงมาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของวัสดุที่ทำขึ้นส่วนของอัดและกำลังขับของมอเตอร์ ในเครื่องอัดอากาศแบบลูกสูบนี้อากาศอัดจะมีการหยุดทำงานเป็นจังหวะๆ จึงต้องระวังอากาศที่ไหลผ่านเทอร์โบต้องเรียบพอสมควร

6.1.1 ห้องเผาไหม้ถ่ายเทความร้อน (Heat exchanger furnace)

ห้องเผาไหม้ที่สร้างมีลักษณะเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนไปในตัว สร้างจากแผ่นเหล็ก SS 400 เป็นถึงรูปทรงกระบอก ซ้อนกันเป็น 2 ชั้น ในลักษณะแนวศูนย์กลางร่วม (Concentric tubes) ห่างกันประมาณ (Clearance) 2-3 มิลลิเมตร มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางห้องเผาไหม้เท่ากับ 331 มิลลิเมตร มีความสูงเท่ากับ 680 มิลลิเมตร และมีพื้นถ่ายเทความร้อนเท่ากับ 778,354.52 ตารางมิลลิเมตร (0.77835452 ตารางเมตร) ทำการหุ้มฉนวนห้องเผาไหม้ด้วยอิฐฉนวนความร้อนอย่างดีเพื่อป้องกันการถ่ายเทความร้อนออกสู่สิ่งแวดล้อมและหุ้มด้วยกระจกเงาชั้นนอกสุด เพื่อป้องกันการแผ่รังสีความร้อนออกจากเตา ชั้นนอกสุดหุ้มเหล็กแผ่นบางเพื่อความแข็งแรงของเตา

6.1.2 เทอร์โบ (Turbine)

เทอร์โบที่สร้างจะเป็นแบบไหลตามแกน (Axial flow gas turbine) แกวใบพัดนี้ทำหน้าที่ในการกำกับอากาศอัดที่มีอุณหภูมิสูงที่มาจากห้องเผาไหม้ให้พุ่งกระทบใบพัดหมุนเพื่อ

ถ่ายเทพลังงานจลน์ เมื่อแกวโบพัดหมุนได้รับพลังงานจลน์จากอากาศอัดที่มีอุณหภูมิสูงที่พุ่งมาจากแกวโบพัดนี้จะเกิดการหมุนขึ้นทำให้เกิดงานเพลาลิ้น ผู้วิจัยได้เลือกผลิตโบพัดทั้งสองแบบจากเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 ด้วยคุณสมบัติทนทานต่อการกัดกร่อนจากก๊าซและจากการถูกออกซิไดซ์ในที่อุณหภูมิสูงได้ดีเนื่องจากมีโครเมียมและนิกเกิลเป็นส่วนผสม ปริมาณคาร์บอนของเหล็กกลุ่มนี้มีมาก ทั้งนี้เพื่อเพิ่มครีปสเตร้ง (Creep strength) ของเหล็กให้มากขึ้นเนื่องจากต้องใช้ในที่อุณหภูมิสูง จำนวนโบพัดหนึ่งและโบพัดหมุนที่ผลิตมานั้น มีแบบละ 21 ใบ มีช่องทางเดินอากาศอิสระสำหรับการไหลของแกวโบพัดหนึ่ง เท่ากับ 2,545.750 ตารางมิลลิเมตร และช่องทางเดินอากาศอิสระสำหรับการไหลของแกวโบหมุน เท่ากับ 2,251.150 ตารางมิลลิเมตร ขึ้นส่วนเพลานั้นทำจาก เหล็กกล้าสำหรับงานร้อน W 302 เนื่องจากมีสมบัติที่ดีมากได้แก่ มีความแข็งแรงมากที่อุณหภูมิปกติ และคงความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูงดี ทนต่อการสึกหรอที่อุณหภูมิสูง ทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน ทนต่อการล้าร้อน ด้านทนต่อการเกิดออกไซด์ที่อุณหภูมิสูง ความเหนียวแกร่งสูงมาก

6.1.3 การทดสอบเดินเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์โบ

การทดสอบเดินเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์โบครั้งนี้ใช้ฟางข้าวมาดเป็นเชื้อเพลิง อัตราการป้อนเชื้อเพลิงประมาณ 0.0166 กิโลกรัมต่อวินาทีซึ่งไม่มากไปกว่านี้เพราะมีปัญหาที่ระบบป้อนเชื้อเพลิง โดยสามารถทำการเผาไหม้ได้อุณหภูมิเปลวเพลิงภายในเตาได้ประมาณ 440°C อุณหภูมิของอากาศอัดตัวมาจากเครื่องอัดอากาศประมาณ 80°C เมื่อทำการแลกเปลี่ยนความร้อนกับก๊าซร้อนจากห้องเผาไหม้แล้วจะได้อุณหภูมิของอากาศตรงทางเข้าเทอร์โบสูงขึ้นเป็น 320°C (ในช่วงเริ่มต้น) และเริ่มลดลงอย่างต่อเนื่องเพราะปัญหาที่ระบบป้อนเชื้อเพลิงที่ออกแบบมีปัญหาป้อนเชื้อเพลิงได้ไม่มาก ในช่วงเริ่มต้นสามารถวัดความเร็วรอบของเทอร์โบได้ประมาณ 2,200 รอบต่อวินาที และเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อสภาวะการสูญเสียความร้อนคงที่ ความเร็วรอบเทอร์โบจะเริ่มคงที่ ที่ประมาณ 2,800 รอบต่อวินาที ที่อุณหภูมิเข้าเทอร์โบประมาณ 280°C หลังจากนั้นความเร็วเทอร์โบจะเริ่มลดลงเล็กน้อยตามเวลาแลตาม อุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้เนื่องจากระบบป้อนเชื้อเพลิงมีปัญหาป้อนเชื้อเพลิงได้ไม่มาก ซึ่งต้องแก้ไขต่อไป

6.2 ข้อเสนอแนะ

6.2.1 ทำการปรับปรุงระบบป้อนเชื้อเพลิงให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยการเปลี่ยนมอเตอร์ส่งกำลังที่ใช้ในระบบป้อนเชื้อเพลิงให้มีขนาดใหญ่ขึ้นมีระบบทดกำลังของมอเตอร์ที่ส่งไปยังส่วนเกลียวสกรูป้อนเชื้อเพลิง มีอุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์ (Inverter) ที่

เที่ยงตรง และลักษณะการป้อนเชื้อเพลิงให้เหมาะสมรวมไปถึงน่าจะมีการเปลี่ยนตำแหน่งสกรูป้อนเชื้อเพลิงไปอยู่ ณ ตำแหน่งด้านใต้ตรงตำแหน่งเดียวกับช่องป้อนอากาศ

6.2.2 ทำการติดตั้งระบบหล่อเย็นของตลับลูกปืนเพื่อป้องกันความเสียหายของตลับลูกปืนอันเนื่องมาจากความร้อนที่ได้รับมาจากเพลลาและตัวเฟรมของเทอร์ไบน์ เพราะหากระบบป้อนเชื้อเพลิงสมบรูณ์คาดว่าก๊าซร้อนจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นอีกมาก

6.2.3 ทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงบิด เพื่อที่จะสามารถวัดแรงบิดของเทอร์ไบน์ได้ และคำนวณงานที่ได้รับ (Work output) ได้ต่อไป

6.2.4 ทำการปรับปรุงระบบเครื่องยนต์เทอร์ไบน์ให้สมบรูณ์มากขึ้น โดยอาจทำการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อผลิตไฟฟ้าสำหรับใช้กับเครื่องอัดอากาศ

บรรณานุกรม

1. ชินวัฒน์ เลิศสิริปัญญาศาล, สุธิดา สหัสทัต และ อลิศรา ศรีราตรี. “เครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์ขนาดเล็กที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง: การวิเคราะห์ทางการตลาดและเศรษฐศาสตร์.” ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2549.
2. Higman, C., and M. van der Burgt. Gasification. Burlington: Elsevier Publishers, 2003.
3. สุวัฒน์ นิลาณ, โรงไฟฟ้าพลังความร้อนกับสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.
4. Carter, T.J. “Common failures in gas turbine blades.” Engineering Failure Analysis 12 (April 2005): 237–247
5. Yan, J. and L. Eidensten. “Status and perspective of externally fired gas turbines.” Propulsion and Power. 16, 4 (July-August 2000): 572-576.
6. Eberhardt, J.D. et al. “Indirectly heated gas turbine engine.” United states patent, No.4761957 [online]. Accessed 13 September 2007. Available from <http://www.freepatentsonline.com/> (1988): 1-6.
7. Bronicki, L.Y. et al. “Externally fired combined cycle gas turbine system.” United states patent, No.5687570 [online]. Accessed 30 October 2006. Available from <http://www.freepatentsonline.com/> (1997): 1-21.
8. Bram, S., J. De Ruyck, and A. Novak-Zdravkovic. “Status of external firing of biomass in gas turbine.” Power and Energy. 219 (June 2004): 137-145.
9. Traverso, A., A.F. Massardo, and R. Scarpellini. “Externally fired micro-gas turbine: Modelling and experimental performance.” Applied Thermal Engineering. 26 (March 2006): 1935-1941.
10. Kern, D.Q. Process heat transfer. Singapore: McGraw-Hill, 1984.
11. Hottel, H.C. “Radiant-Heat Transmission.” The Nature of Thermal Radiation. n.p., 483-498.
12. เกษม ปรารบิรูปตูลง, เทอร์โมไดนามิกส์, พิมพ์ครั้งที่ 3. ขอนแก่น: งานผลิตเอกสาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2529: 204-206.

13. ยูนุส เซงเกล และ ไมเคิล โบลด์. เทอร์โมไดนามิกส์. แปลและเรียบเรียงโดย สมชาย อัครทิวา และ ขวัญจิต วงษ์ขารี. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ท้อป, 2547.
14. Cohen, H., G.F.C. Rogers, and Y.R. Mayhew. Gas turbine theory. 4th ed. n.p., 1996.
15. บุญศักดิ์ ใจจงกิจ. อนุกรมเครื่องต้นกำลัง-3 เครื่องสูบ เครื่องอัดลม เครื่องเป่า และพัดลม. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า, 2520.
16. ธนกาญจน์ ภัทรากาญจน์ และ บรรเลง ศรีนิล. เทอร์โมไดนามิกส์ประยุกต์. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าวิทยาเขตพระนครเหนือ, 2524.
17. มานพ ตัณตระบัดนิตย, สำลี แสงห้าว และ สุทิน จิตรเจริญ. ชิ้นส่วนเครื่องจักรกล. พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพมหานคร: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2544, 187-219
18. มานพ ตัณตระบัดนิตย. เขียนแบบวิศวกรรม (ฉบับปรับปรุง). พิมพ์ครั้งที่ 8. กรุงเทพมหานคร: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2548, 317-326
19. เหล็กเครื่องมืองานร้อน [Online]. Accessed 5 January 2008. Available from <http://www.chanasteel.com/spec/hot.htm>
20. Hot work tool steel [Online]. Accessed 5 January 2008. Available from http://www.oss.co.th/index.php?option=com_content&task=view&id=19&Itemid=26
21. Shigley, J.E., and C.R. Mischke. Mechanical Engineering Design. 6st ed. n.p., 2001.
22. วรวิทย์ อึ้งภากรณ์ และ ชาญ ถนัดงาน. การออกแบบเครื่องจักรกล เล่ม 1. กรุงเทพมหานคร: บริษัท เอส.เอ็น.กรุ๊ป จำกัด, 2537.
23. จำรูญ ตันติพิศาลกุล. การออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกล 1. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร: บริษัท เอส อาร์ ฟรินติ้ง แมสโปรดักส์ จำกัด, 2545,
24. บรรเลง ศรีนิล และ กิตติ นิงสานนท์. การคำนวณและออกแบบชิ้นส่วนเครื่องกล. กรุงเทพมหานคร: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ม.ป.ป.
25. Timoshenko, S. Vibration problems in engineering. 2nd ed. New york: D. Van Nostrand Company, Inc., 1937, 92-98
26. Shigley, J.E., and C.R. Mischke. Mechanical Engineering Design. 6st ed. n.p., 2001
27. Marghitu, D. B. Mechanical Engineer's Handbook. California: Academic Press, 2001.
28. Childs, Peter R. N. Mechanical Design. 2nd ed. Burlington: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004

29. วชิระ มีทอง. การออกแบบจิ๊กและฟิกซ์เจอร์. พิมพ์ครั้งที่ 16. กรุงเทพมหานคร: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2549.
30. ศุภชัย รมยานนท์. การออกแบบอุปกรณ์นำเจาะและจับงาน. กรุงเทพมหานคร: ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2539.
31. ชาญชัย เดชะเสฏฐดี, นพพร ตริเทวี และ สมศักดิ์ ชำนาญทองไพวัลย์. คู่มือช่างกลโรงงาน: ภาคปฏิบัติ. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ยูไนเต็ดบุ๊คส์, 2539.
32. ขวลิต แข่งทอง, มณฑล แสงประไพทิพย์ และ อนันต์ มีนาค. งานกัด. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์คุรุสภาลาดพร้าว, 2549.
33. ฉัตรชัย จันทร์เด่นดวง, ณรงค์ พิทักษ์ทรัพย์สิน และ ประสิทธิ์ วัฒนวงศ์สกุล. “การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสแกน 3 มิติในกระบวนการวิศวกรรมย้อนรอยและการตรวจสอบมิติ.” ในการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 18 จังหวัดขอนแก่น, 18-20 ตุลาคม 2547
34. ศุภสิทธิ์ รอดขวัญ และคณะ. “การศึกษาการเปรียบเทียบการใช้งานของเครื่องเก็บค่าพิกดสามมิติระบบเลเซอร์และระบบออปติกที่ใช้สำหรับงานวิศวกรรมย้อนรอย.” ในการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 20 จังหวัดนครราชสีมา, 18-20 ตุลาคม 2549
35. ATOS II [Online]. Accessed 12 August 2006. Available from <http://www.gom.com/EN/measuring.systems/atos/system/variations/atos.ii.html>
36. คณะวิศวกรรมโท. การเชื่อมโลหะด้วยวิธีทิก. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร : ห้างหุ้นส่วนจำกัด ภาพพิมพ์, 2543.
37. _____. คู่มือการเชื่อมโลหะ 2. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: ห้างหุ้นส่วนจำกัด ภาพพิมพ์, 2545.
38. สมศักดิ์ กิรติวุฒิเศรษฐ์. หลักการและการใช้งานเครื่องมือวัดอุตสาหกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 14. กรุงเทพมหานคร: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2542, 2-1 - 2-15
39. วิลเลียมส์ ดี, คาลิสเตอร์. เจ. อาร์. วัสดุศาสตร์และวิศวกรรมวัสดุพื้นฐาน. แปลและเรียบเรียงโดย สุวันชัย พงษ์สุกิจวัฒน์ และคณะ. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ท็อป, 2548.
40. ชาญวุฒิ ตั้งจิตวิทยา และ สาโรช สุทธิเกียรติพงศ์. วัสดุในงานวิศวกรรม กรุงเทพมหานคร: ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2541.

41. ชนะ รักษศิริ และคณะ. “การประยุกต์ใช้เครื่องกัดซีเอ็นซีห้าแกนสำหรับกระบวนการผลิตใบพัด.” ในการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 20 จังหวัดนครราชสีมา, 18-20 ตุลาคม 2549
42. Chaudhary, H., and S.K. Saha. Dynamics and Balancing of Multibody Systems. Edited by F. Pfeiffer, and P. Wriggers. n.p., 2009.
43. ตระการ ก้าวกลิกรรม. คู่มือปะเก็นแก๊สเกิด. กรุงเทพมหานคร: บริษัท เอ็มแอนด์อี จำกัด, ม.ป.ป.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
คำศัพท์ประกอบความหนาแน่น

1. ตัวประกอบของผิว

ค่าขีดจำกัดความทนทานสำหรับขึ้นทดสอบผิวจะใช้ผิวขัดมันเท่านั้น โดยทั่วไปแล้วคุณภาพของผิวขึ้นงานจะต่ำกว่าขึ้นทดสอบ ความขรุขระของผิวน้ำก็ทำให้ขึ้นงานแตกหักเนื่องจากความล้าได้ง่ายขึ้นอีก เพราะฉะนั้นจึงต้องมีการปรับค่าขีดจำกัดความทนทานของขึ้นงานตามสภาพของผิวดังรูปที่ ก-1

ซึ่งแสดงตัวประกอบที่ใช้สำหรับลดค่าดังกล่าวนี้ของผิวขึ้นงานต่าง ๆ มีชื่อเรียกว่า ตัวประกอบของผิว (Surface factor) K_s สังเกตจากรูปที่ ก-1 พบว่าถ้าขึ้นงานที่มีโอกาสแตกหักเนื่องจากความล้าแล้วคุณภาพของผิวมีผลต่ออายุการใช้งานของขึ้นงานนั้นมาก

2. ตัวประกอบขนาด

การทดสอบหาขีดจำกัดความทนทานทำโดยใช้ขึ้นทดสอบขนาดมาตรฐาน เส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร ถ้าขนาดหน้าตัดโตขึ้นไปอีกจะพบว่าขีดจำกัดความทนทานลดลง ดังนั้นจึงต้องมีตัวประกอบมาคูณค่าขีดจำกัดความทนทานจากขึ้นงานทดสอบมาตรฐาน เพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมกับขึ้นงานที่มีขนาดใหญ่กว่าขึ้นทดสอบ ซึ่งมีชื่อเรียกว่า ตัวประกอบของขนาด (Size factor) K_b โดยแนะนำให้ใช้ค่าต่อไปนี้

$$K_b = 1.00 \quad \text{สำหรับ } d < 8 \quad \text{มิลลิเมตร}$$

$$K_b = 0.85 \quad \text{สำหรับ } 8 < d < 50 \quad \text{มิลลิเมตร}$$

$$K_b = 0.75 \quad \text{สำหรับ } d > 50 \quad \text{มิลลิเมตร}$$

ตัวประกอบของขนาดนี้ใช้ได้ทั้งการดึง การบิด และการดัด ในกรณีที่ขึ้นงานมีหน้าตัดไม่กลมก็ให้คิดความยาวส่วนสั้นที่สุดของหน้าตัดนั้นเป็นหลัก

3. ตัวประกอบของแรง

จากที่ได้ทราบมาแล้วว่า วัสดุทั่วไปมีคุณสมบัติในการรับความเค้นเฉือนได้น้อยกว่าความเค้นดึงหรือกด ในกรณีของขีดจำกัดความทนทานก็เช่นเดียวกัน จากการทดสอบจะพบว่าขีดจำกัดความทนทานสำหรับหารเฉือนมีค่าน้อยกว่าการดัดตัวประกอบที่ใช้ลดค่าขีดจำกัดความทนทานจากการดัดนี้เรียกว่า ตัวประกอบของแรง (Load Factor) K_c โดยแนะนำให้ใช้ค่าดังต่อไปนี้

$$K_c = 1.00 \quad \text{สำหรับการดัด}$$

$$K_c = 0.80 \quad \text{สำหรับการเฉือน}$$

$$K_c = 0.60 \quad \text{สำหรับการเฉือน}$$

เพราะฉะนั้น สำหรับการดัด
$$\sigma_n = K_a K_b \rho_n$$

$$\text{สำหรับการดึง} \quad \sigma_n = 0.80 \times (\sigma_n \text{ จากการตัด})$$

$$\text{สำหรับการเฉือน} \quad \tau_n = 0.60 \times (\sigma_n \text{ จากการตัด})$$

ค่า σ_n หรือค่า τ_n นี้คือ ค่าความต้านทานแรงทนทาน

4. ตัวประกอบความหนาแน่น

ความต้านทานแรงทนทานดังกล่าวมาแล้วเป็นค่าสำหรับชิ้นงานที่มีหน้าตัดคงที่ ในกรณีทั่วไปชิ้นงานอาจมีลักษณะขาดความต่อเนื่อง เช่น มีรู ร่องเจาะ หรือเปลี่ยนขนาด จึงทำให้ความเค้นที่เกิดขึ้นในบริเวณนี้มีค่าที่สูงกว่าค่าที่คำนวณตามปกติ นั่นคือ

$$\sigma_{MAX} = K_t \sigma_0$$

โดยที่ σ_0 เป็นค่าที่คำนวณจาก F/A , Mc/I หรือ Tr/J โดยพื้นที่หน้าตัดสุทธิ (Net) และ K_t มีชื่อเรียกว่าตัวประกอบความเค้นหนาแน่นทางทฤษฎี (Theoretical stress concentration factor)

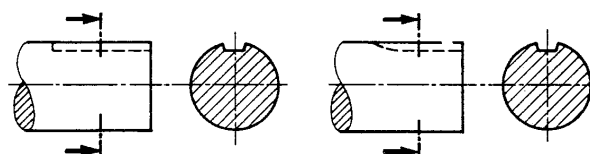
ค่า K_t นี้เป็นค่าที่ได้จากการทดลองชิ้นงานชนิดต่างๆ ซึ่งใช้วัสดุพิเศษโดยเฉพาะ เรียกว่าวัสดุยืดหยุ่นโปร่งแสง (Photoelastic material) ซึ่งแสดงอยู่ในรูปที่ ก-4 ถึงรูปที่ ก-6 ตามปกติแล้วชิ้นงานจริงจะเป็นวัสดุที่แตกต่างไปจากวัสดุที่ใช้ในการทดลอง ดังนั้นความไว (Sensitivity) ของวัสดุต่อการเพิ่มความเค้นบริเวณที่มี รู ร่อง หรือเปลี่ยนขนาดจึงแตกต่างกันไปด้วย เช่น เหล็กหล่อเป็นโลหะเนื้อพูน ฉะนั้นจึงอ้อมตัวต่อความเค้นหนาแน่นอยู่แล้ว ค่า K_t จึงควรเข้าใกล้ 1 (แสดงว่ามีความเค้นหนาแน่นเพิ่มขึ้น เนื่องจากความไม่ต่อเนื่องของชิ้นงานอีกน้อยมาก) ดัชนีที่บอกถึงความไวของวัสดุต่อการเกิดความเค้นหนาแน่นนี้เรียกว่า ความไวของรอยเจาะ (Notch sensitivity) q ซึ่งมีนิยามว่า

$$q = \frac{K_f - 1}{K_t - 1}$$

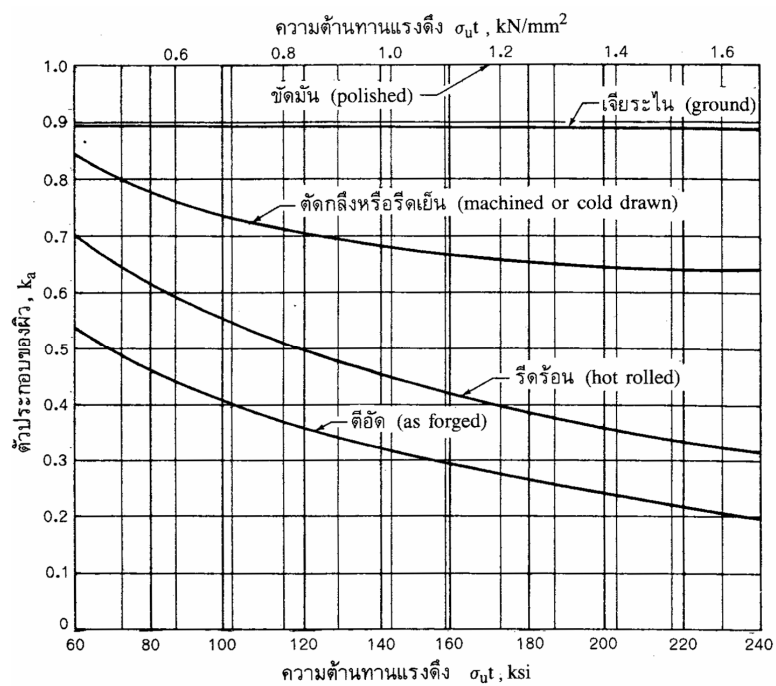
$$\text{หรือ} \quad K_f = 1 + q(K_t - 1)$$

โดยที่ K_f เป็นค่าตัวประกอบความเค้นหนาแน่นจริง (Actual stress concentration factor) ถ้า $q = 0$ จะได้ $K_f = 1$ แสดงว่าไม่มีผลของความหนาแน่น เนื่องจากความไม่ต่อเนื่องของชิ้นงานอยู่ด้วย แต่ถ้า $q = 1$ จะได้ $K_f = K_t$ ซึ่งแสดงว่าวัสดุมีความไวต่อความเค้นหนาแน่นเต็มที่ ค่าความไวของรอยเจาะนี้ได้แสดงในรูปที่ ก-2 และรูปที่ ก-3 ผู้ออกแบบบางคนนิยมให้ $K_f = K_t$ (ค่าสูงสุดของตัวประกอบความหนาแน่น) ทั้งนี้เพื่อความปลอดภัยของชิ้นงาน ดังนั้นในกรณีที่ข้อมูลไม่เพียงพอก็ควรใช้ $K_f = K_t$ แต่ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับความชำนาญของผู้ออกแบบที่จะกำหนดค่า K_f ขึ้นมาใช้

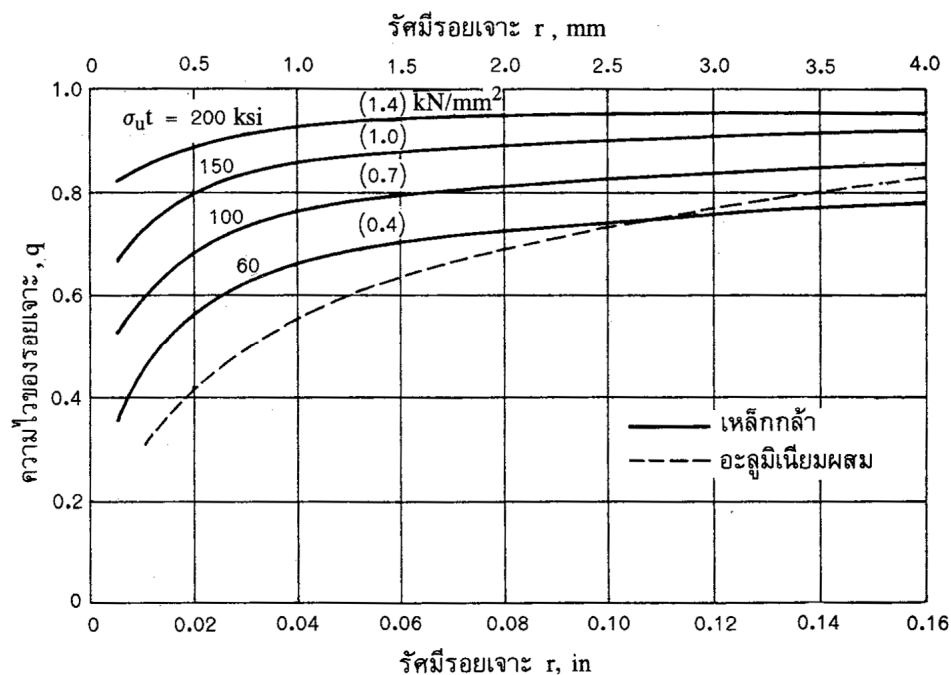
ตารางที่ ก-1 ตัวประกอบความเค้นหนาแน่นสำหรับล่องลิ้ม



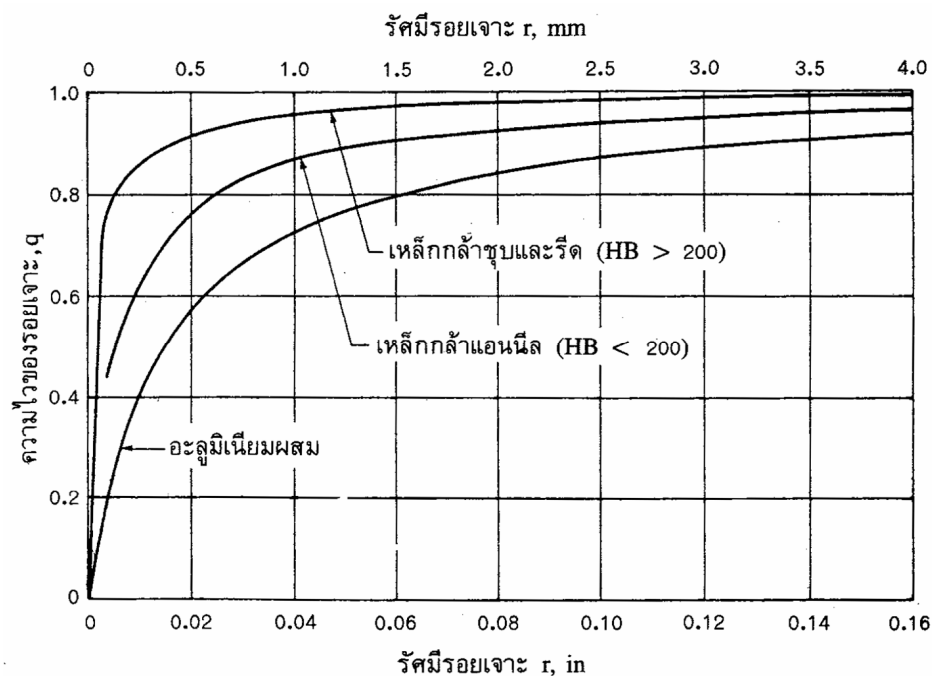
		PROFILE		SLED-RUNNER	
		ตัด	บิด	ตัด	บิด
		1, 6	1, 3	1, 3	1, 3
K_f	แอนนัล	1, 6	1, 3	1, 3	1, 3
	ซุบและรีด	2, 0	1, 6	1, 6	1, 6



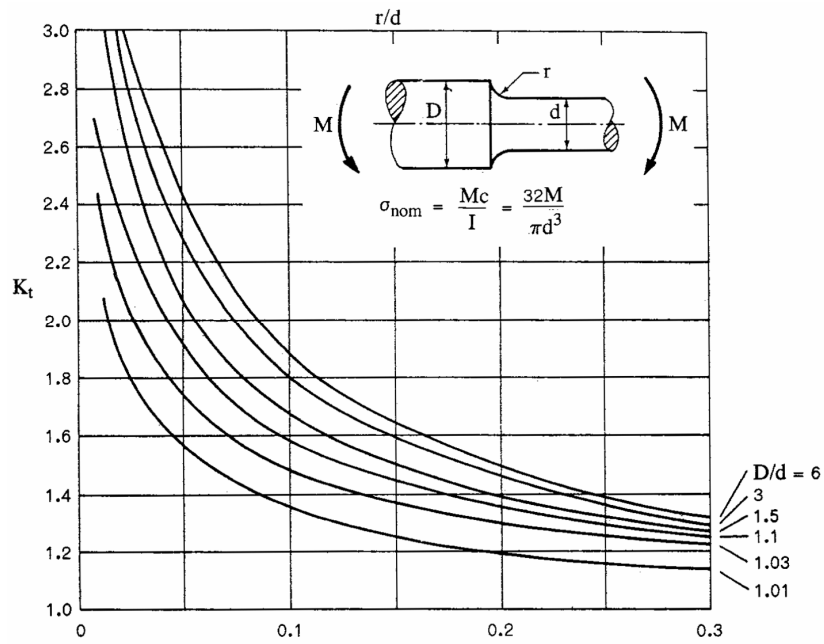
รูปที่ ก-1 ตัวประกอบของผิวสำเร็จสำหรับเหล็กกล้า



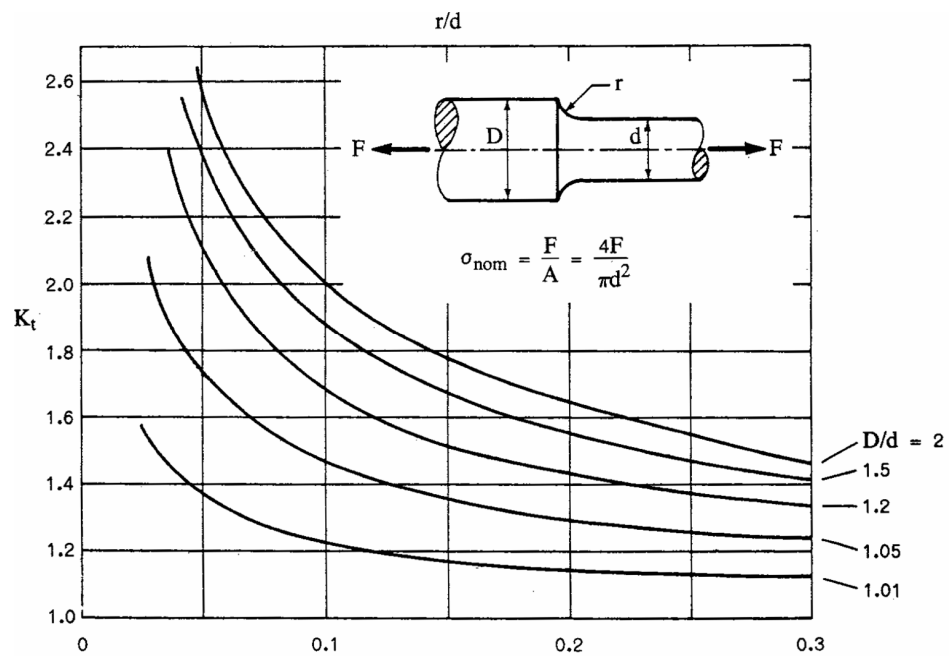
รูปที่ ก-2 แผนภูมิความไวของรอยเจาะสำหรับเหล็กกล้าและอะลูมิเนียมผสมเหนียวที่อยู่ภายใต้การ
ดัดกลับไปกลับมาหรือการดึงกดสลับกันในแนวนอน ในกรณีที่รัศมีรอยเจาะ
โตกว่าในรูปให้หาค่า q ที่ค่ารัศมี $r = 4$ มิลลิเมตร



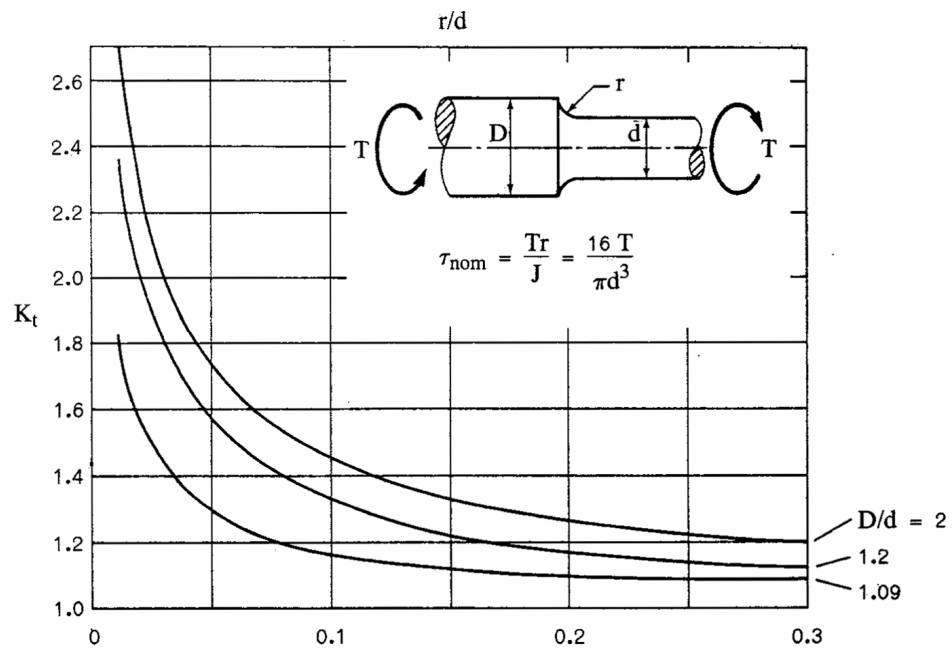
รูปที่ ก-3 แผนภูมิความไวของรอยเจาะของชิ้นงานที่อยู่ภายใต้การบิดกลับไปกลับมา (Reversed
torsion) ในกรณีที่รัศมีรอยเจาะโตกว่าในรูป ให้ค่า q ที่ค่ารัศมี $r = 4$ มิลลิเมตร



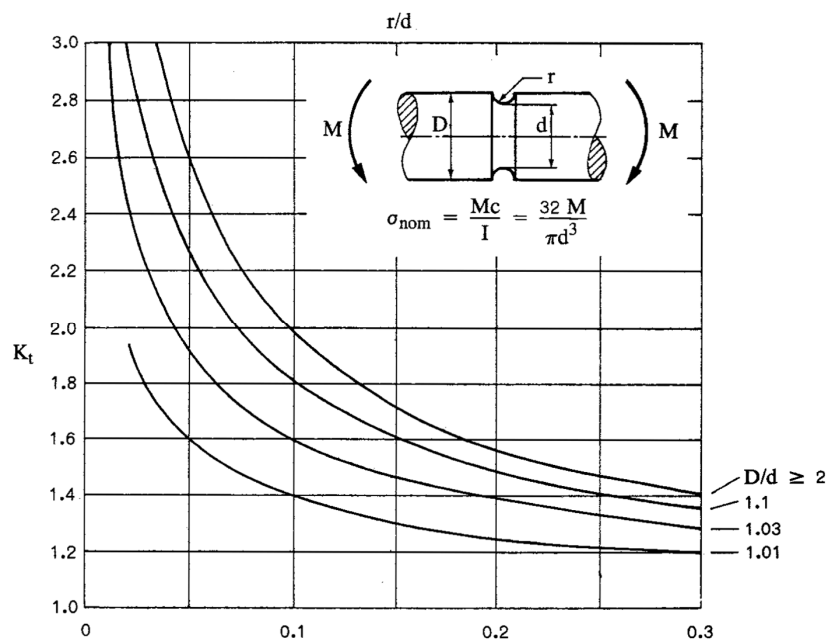
รูปที่ ก-4 เฟลาที่มีฟิลเลต (ก) อยู่ภายใต้แรงดัด



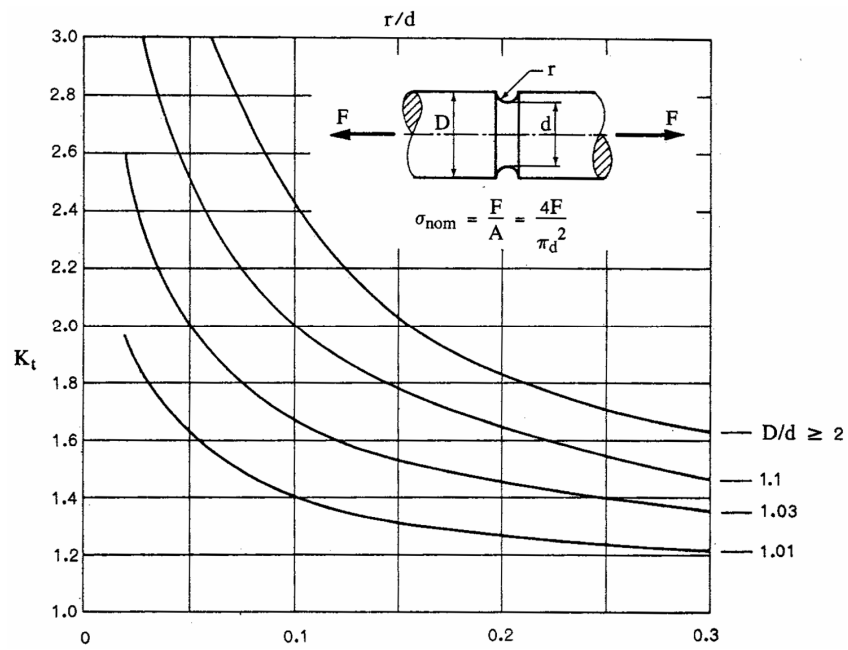
รูปที่ ก-4 เฟลาที่มีฟิลเลต (ข) อยู่ภายใต้แรงดึง



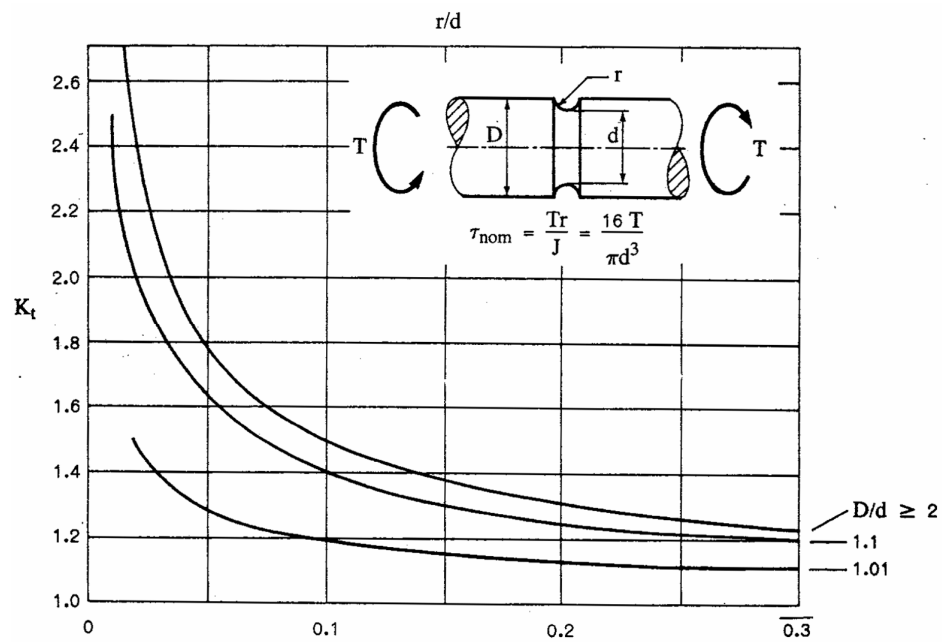
รูปที่ ก-4 เพลาที่มีฟิเลต (ค) อยู่ภายใต้แรงบิด



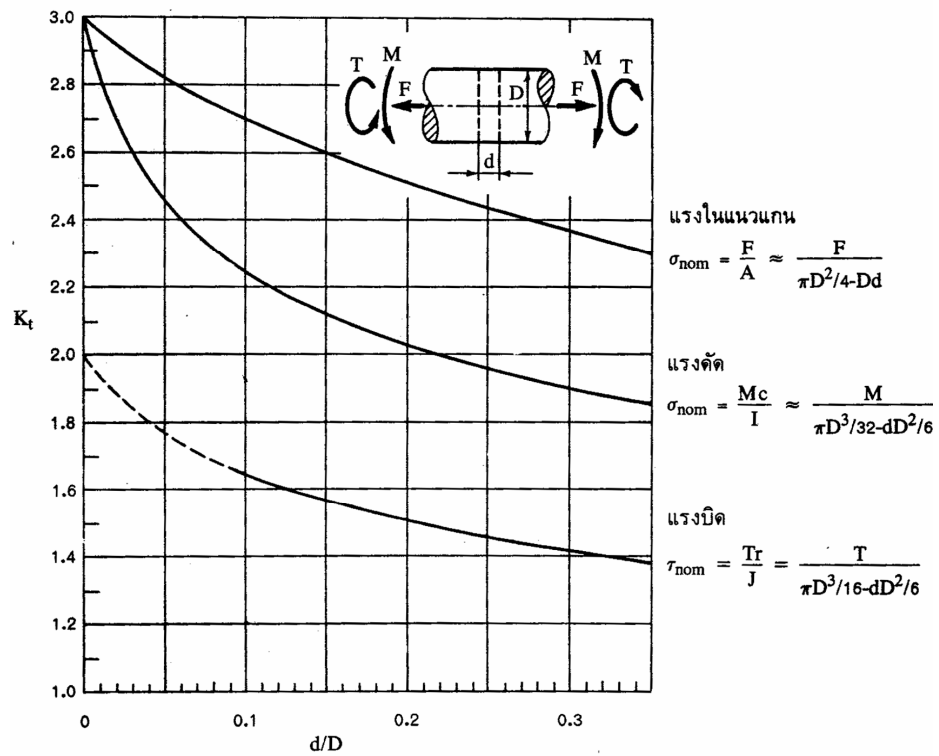
รูปที่ ก-5 เพลาที่มีร่องโดยรอบ (ก) อยู่ภายใต้แรงดัด



รูปที่ ก-5 เพลามีรูช่องโดยรอบ (ข) อยู่ภายใต้แรงดึง



รูปที่ ก-5 เพลามีรูช่องโดยรอบ (ค) อยู่ภายใต้แรงบิด



รูปที่ ก-6 เพลามีรูเจาะในแนวรัศมี

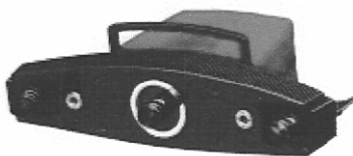
ภาคผนวก ข
เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องเก็บค่าพิกัดสามมิติระบบออปติก

เป็นอุปกรณ์ที่มีคุณภาพสูงสำหรับการวัดแบบจุด หรือใช้เมื่อพบกับสภาวะแวดล้อมที่ยากต่อการวัด อุปกรณ์นี้เป็นอุปกรณ์ที่มีความแม่นยำ และความสามารถในการทำงานที่สูง อีกทั้งยังสามารถติดต่อกับระบบวัดอื่นๆได้อีกด้วย

จุดเริ่มต้นเริ่มจากอุตสาหกรรมรถยนต์นั้นมีแรงผลักดันในการพัฒนาระบบของข้อมูลทางด้านดิจิทัล โดยที่ระบบสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการเก็บข้อมูลรถยนต์และส่วนประกอบอื่นๆของชิ้นส่วนรถยนต์ เพื่อสำหรับมาใช้เป็นข้อมูลในการผลิตในลักษณะในรูปแบบ Cad Model ไม่เพียงอุตสาหกรรมทางด้านยานยนต์เท่านั้น เครื่องสแกนนี้ได้มีการนำมาใช้ในหลายๆโรงงานในด้านการวัด การตรวจสอบ การวิเคราะห์ และการรับประกันคุณภาพ อย่างเช่น ในงานโลหะแผ่น ปัมป์ขึ้นรูปโลหะ และงานขึ้นรูปชิ้นส่วน งานประกอบ เป็นต้น [35]

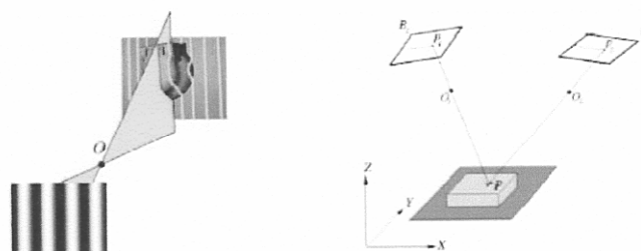
เครื่องเก็บพิกัดสามมิติระบบออปติกที่นำมาใช้ในครั้งนี้ตั้งอยู่ที่ ณ ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) เป็นเครื่องรุ่น ATOS II ดังแสดงในรูปที่ ข-1 ซึ่งตัวเครื่องมีความเบา กะทัดรัด ใช้งานง่าย ให้ความคมชัดสูงและแม่นยำ นอกจากนี้ยังสามารถเก็บพิกัดใน ส่วนของชิ้นงานซึ่งยากที่จะเข้าถึง รวมถึงความสามารถในการเปลี่ยนพิกัดของรูปทรงให้มีความคมชัดตามที่ต้องการได้ โดยคุณสมบัติของ เครื่องรุ่น ATOS II มีดังแสดงในตารางที่ ข-1



รูปที่ ข-1 เครื่องเก็บพิกัดสามมิติระบบออปติกรุ่น ATOS II

หลักการทำงานของเครื่องเก็บพิกัดสามมิติระบบออปติกจะใช้กฎของรูปสามเหลี่ยม (The Triangulation Principle) โดยมีชุดอุปกรณ์ส่งสัญญาณ (Sensor Unit) ส่ง Fringe Patterns ที่แตกต่างกันไปยังวัตถุที่ต้องการวัด และมีตัวจับสัญญาณคือกล้องสองตัว ดังที่แสดงในรูปที่ ข-2

จาก The Optical Transformation Equations และการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ก็จะได้พิกัดสามมิติของวัตถุ ซึ่งความถูกต้องของค่าที่ได้จะขึ้นกับความละเอียด (Resolution) ของกล้องที่ใช้ในการจับสัญญาณ [33-34]



รูปที่ ข-2 หลักการทำงานของเครื่องเก็บพิกัดสามมิติระบบออปติก

ตารางที่ ข-1 แสดงคุณสมบัติเครื่องเก็บค่าพิกัดสามมิติระบบออปติก

ปริมาตรที่สามารถเก็บค่าสามมิติได้	135 x 108 x 108 - 700 x 1360 x 1360 mm ³
เวลาที่ใช้ในการเก็บพิกัด 1 ครั้ง	7 วินาที
ขนาดเครื่อง	520/700/940 x 220 x 11
จำนวนพิกัดสามมิติที่เก็บได้	1300000 จุด
ระยะห่างระหว่างพิกัดจุด	0.08-1.0 mm ³
ระยะห่างในการกำจัดพิกัดรบกวน	0.002-0.02 mm ³

เครื่องเก็บพิกัดสามมิตินี้ได้มีการนำมาใช้งานในหลายด้าน เช่น

- ควบคุมคุณภาพ (Quality Control)
- วิศวกรรมย้อนรอย (Reverse Engineering)
- สร้างชิ้นงานต้นแบบรวดเร็ว (Rapid Prototyping)
- การกัดงานรวดเร็ว (Rapid Milling)
- แบบจำลองดิจิทัล (Digital Mock-Up)

2. CNC Milling Machining center

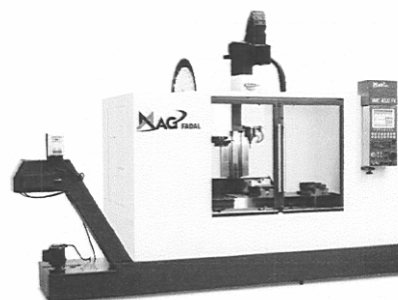
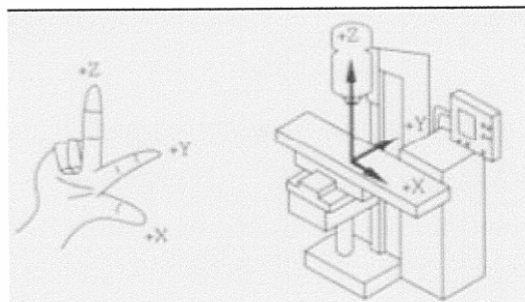


รูปที่ ข-3 CNC Machining Center ที่ใช้ในปัจจุบัน

1. การจำแนกประเภทของ CNC machining center

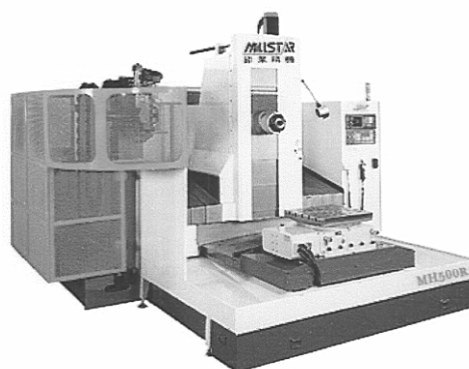
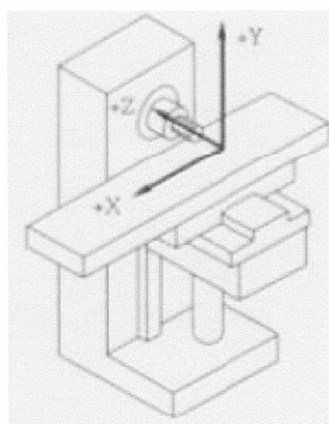
สามารถแบ่งได้ตามแบบทิศทาง การติดตั้งสปินเดิล ดังนี้

1. แนวตั้ง (Vertical Machining Center, VMC)



รูปที่ ข-4 การกำหนดแนวแกนของเครื่องกัดตั้ง

2. แนวนอน (Horizontal Machining Center, HMC)



รูปที่ ข-5 การกำหนดแนวแกนของเครื่องกัดนอน

เครื่องกัดแบบแนวตั้งนั้นมีจำนวนการใช้งานมากกว่าเครื่องแบบแนวนอนมากกว่า โดยเฉพาะในการนำมาใช้ผลิตชิ้นส่วนขนาดเล็กและกลาง รวมถึงขนาดใหญ่ด้วยเช่นกัน โดยที่ข้อดีของแบบแนวนอน คือ ไม่สะสมความร้อนที่ชิ้นงาน เศษโลหะจะตกลงพื้นไม่สะสมบนผิวของชิ้นงาน ที่อาจทำให้เกิดรอยขีดข่วนบนชิ้นงานได้

CNC Machining Center ที่สามารถเปลี่ยนตำแหน่งการติดตั้งหัวสปินเดิลให้อยู่ได้ทั้งในแนวนอนหรือแนวตั้ง โดยการใช้คำสั่ง CNC ในการเปลี่ยนตำแหน่งนั้น มีชื่อเรียกเครื่องประเภทนี้ว่า “Universal Machining Center” ฉะนั้นเครื่องจักรประเภทนี้จึงสามารถทำงานหลายขั้นตอนให้เสร็จได้ภายในเครื่องเดียวโดยไม่ต้องติดตั้งชิ้นงานใหม่ ซึ่งกัดได้ถึง 5-6 ด้านในครั้งเดียว

การแบ่งตามจำนวนของแกนการเคลื่อนที่ของทูล เมื่อเทียบกับชิ้นงาน ได้ดังนี้

1. แบบ 2 แกนครึ่ง (2½ Axes)

เป็นเครื่องที่สามารถเคลื่อนที่ได้ 3 แกน แต่เคลื่อนที่ได้พร้อม ๆ กันคราวละ 2 แกน เช่น X-Y, X-Z, Y-Z เป็นต้น เครื่องประเภทนี้เหมาะสำหรับการเจาะ (Drilling)

2. แบบ 3 แกน (3½ axes)

เป็นเครื่องที่สามารถเคลื่อนที่ได้พร้อม ๆ กันได้ทั้ง 3 แกน

3. แบบ 3 แกนครึ่ง (3 axes)

พบมากในเครื่อง HMC โดยเป็นการหมุนของ Indexing table ในแกน B แล้วจึงเคลื่อนที่ไปแกน X, Y และ Z ถ้าเป็นเครื่อง VMC จะติดตั้งให้หมุนในแกน A เป็นส่วนมาก

4. แบบ 4 แกน (4axes)

พบมากในเครื่อง HMC โดยแกนที่ 4 เป็นแกนหมุนของโต๊ะหมุน (Rotary Table) ในแกน B ไปพร้อม ๆ กับการเคลื่อนที่ที่เชิงเส้น (แกน X, Y และ Z) จึงเป็นการเคลื่อนที่ 4 แกนพร้อม ๆ กัน ถ้าเป็นแกนเครื่อง VMC จะติดตั้งให้หมุนในแกน A เป็นส่วนมาก

5. แบบ 5 แกน (5 axes)

มีการเคลื่อนที่เชิงเส้น (Linear Motion) 3 แกน (X Y Z) และการเคลื่อนที่เชิงมุม (Angular Motion) หรือการหมุน 2 แกน เครื่อง 5 แกนสามารถเคลื่อนที่ได้พร้อม ๆ กันทั้ง 5 แกน

นอกจากนี้แล้วเครื่องจักรในระบบซีเอ็นซีบางชนิดก็จะมีแนวแกนป้อนและแนวแกนหมุนรวมกันอยู่หลายแนวแกน ซึ่งในการกำหนดแนวแกนของเครื่องจักรกลซีเอ็นซีตามมาตรฐาน EIA-267-B (Electronic Industries Association) ได้กำหนดแนวแกนมาตรฐานไว้ทั้งหมด 14 แนวแกน ประกอบไปด้วยแนวแกนที่เคลื่อนที่ในแนวเส้นตรง 9 แนวแกน แนวหมุนอีก 5 แนวแกน

ส่วนประกอบหลักของเครื่อง Machining Center

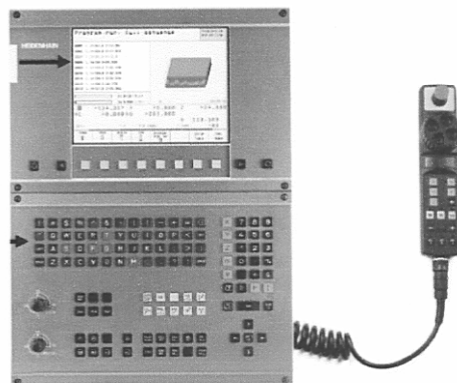
สามารถแบ่งได้ 4 ส่วนหลัก ได้แก่

- ชุดควบคุมการทำงาน (Controller)
- ระบบกลไกในการเคลื่อนที่ (Drive mechanisms)
- ตัวเครื่องจักร (Machine Body)
- อุปกรณ์เปลี่ยนทูลอัตโนมัติ (Automatic Tool Changer)

1. ชุดควบคุมการทำงาน (Controller)

ชุดควบคุมของ Machining Center เป็นระบบคอมพิวเตอร์ที่สามารถจัดเก็บโปรแกรมแก้ไขดัดแปลงได้ คอมพิวเตอร์เข้าใจโปรแกรมที่ป้อนและทำงานตามคำสั่งในโปรแกรม

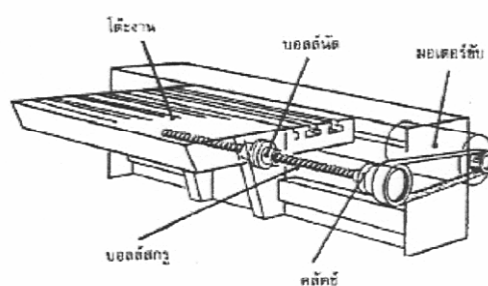
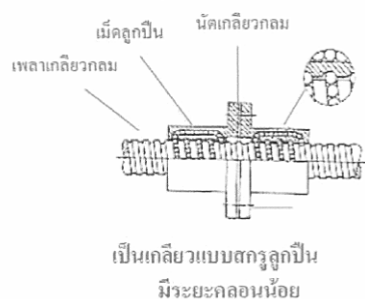
ชุดควบคุมประกอบไปด้วย แผงควบคุม (Control panel) จอภาพ (Monitor) แป้นพิมพ์ (Keyboard หรือ keypad) และปุ่มสวิตช์ควบคุมต่างๆ เช่น ความเร็วฟีด (Feed) และความเร็สปินเดิล (Spindle) เป็นต้น



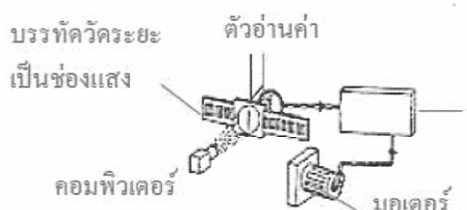
รูปที่ ข-6 แสดงชุดควบคุมการทำงาน (Controller)

2. กลไกการเคลื่อนที่

ได้แก่ ฟีดมอเตอร์ (Feed Motor) ซึ่งเป็นเซอร์โวมอเตอร์ (Servo motor) ควบคุมการเคลื่อนที่ของแกนต่างๆ ได้โดยใช้ บอลสกรู (Ball screw) แปลงการเคลื่อนที่เชิงมุม (Angular motion) เป็นการเคลื่อนที่เชิงเส้น (Linear motion) โดยมีตำแหน่งหรือระยะทางการเคลื่อนที่และความเร็วถูกควบคุมโดยรับสัญญาณจากคอนโทรลเลอร์ นอกจากนี้จะมีรางนำทาง (guide way) รองรับการเคลื่อนที่ที่แกนต่างๆ เป็นต้น



สำหรับเครื่องที่ต้องการความแม่นยำสูงจะมี ลิเนียร์สเกล (Linear scale) เป็นอุปกรณ์ตรวจรู้หรือเซนเซอร์ (sensor) บอกตำแหน่งในการเคลื่อนที่ในแต่ละแกน



3. ตัวเครื่องจักร

โครงสร้างที่ประกอบเป็นรูปร่างที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานตามประเภทของเครื่องจักรนั้นๆ ตัวเครื่องจักรมีส่วนประกอบหลัก เช่น

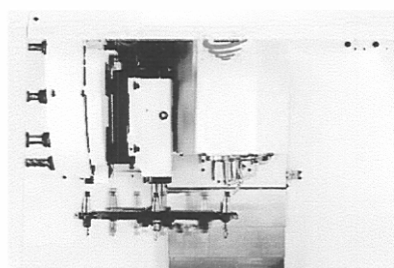
- แท่นเครื่อง (Machine bed) เป็นโครงสร้างหลักของตัวเครื่องจักร สำหรับรองรับอุปกรณ์และชิ้นส่วนต่างๆ ของเครื่องจักร
- หมอนรอง หรือ แสตเดิล (Saddle) เคลื่อนที่ได้ 1 แกน บนแท่นเครื่อง เช่น แกน X หรือ แกน Y
- โต๊ะ (Table) สำหรับวางชิ้นงาน โดยทั่วไปโต๊ะเคลื่อนที่อยู่บนหมอนรอง มีร่องรูปตัวที (T-slot) สำหรับใช้ในการจับยึดชิ้นงานให้แนบติดกับโต๊ะ มีระนาบโต๊ะตั้งติดกับเสา
- เสา (Column) เป็นโครงสร้างสำหรับติดตั้งสปินเดิล เครื่องแมชชีนนิ่งเซนเตอร์แนวตั้งรุ่นใหม่นิยมสร้างเป็นแบบเสาคู่ (Double Column) เพราะให้ความแม่นยำที่ดีกว่า
- สปินเดิล (Spindle) สำหรับติดตั้งชุดจับทูล แบบเทเปอร์แชงค์ (Tapered shank) หรือแบบ ไฮสปีด (High speed) โดยมีมอเตอร์สปินเดิล (Spindle motor) ขับเคลื่อนสปินเดิลผ่านเกียร์หรือสายพานหรือต่อตรงรวมเป็นชุดเดียวกัน

4. อุปกรณ์เปลี่ยนทูลอัตโนมัติ (Automatic Tool Changer, ATC)

ติดตั้งในเครื่องแมชชีนนิ่งเซนเตอร์ทั้งแบบแนวตั้ง (Vertical Machining Center หรือ VMC) และแบบแนวนอน (Horizontal machining center) สามารถเปลี่ยนทูลจากที่เก็บทูล (Tool Storage) หรือทูล แมกกาซีน (Tool Magazine) ประเภทของATC สามารถแยกได้ดังนี้

- เป็นแบบโซ่ (Chain-Type)
- แบบจานหมุน (Carousel-Type)

โดยแบบโซ่สามารถเก็บทูลได้จำนวนมากกว่าแบบจานหมุน ทั้งสองแบบจะมีแขนจับเปลี่ยนทูล (Tool changing Arm) ระหว่างที่เก็บทูลและสปินเดิล บางรุ่นอาจจะไม่ต้องใช้แขนหรือเป็นแบบไร้แขน (Armless)

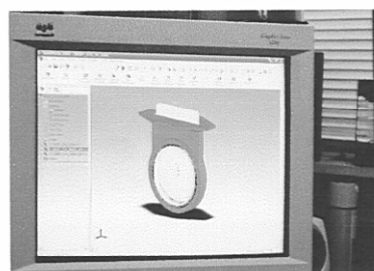
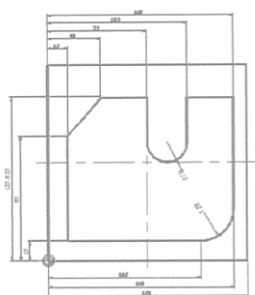


รูปที่ ข-7 แสดงชุดเปลี่ยนทูลอัตโนมัติ

5. ขั้นตอนการผลิตงานด้วยเครื่องจักร CNC Machining Center

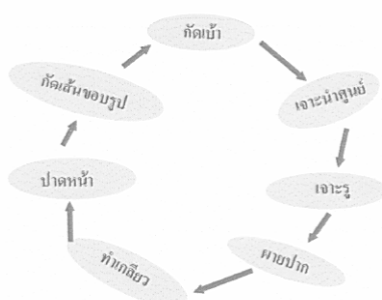
1. การออกแบบงาน

การผลิตชิ้นงานขึ้นมาไม่ว่าจะมาจากการออกแบบหรือจากต้นแบบนั้น งานผลิตมากมายส่วนมากแล้ว ล้วนต้องนำมาเขียนแบบลงใน CAD (Computer Aided Design) ก่อนเป็นส่วนใหญ่ทั้งสิ้นหรือหากว่างานนั้นไม่มีความละเอียดซับซ้อนมาก ก็ถือว่าไม่จำเป็น



รูปที่ ข-8 แสดงขั้นตอนการออกแบบด้วยคอมพิวเตอร์

2. การกำหนดขั้นตอนการกัดและเลือกเครื่องมือตัด



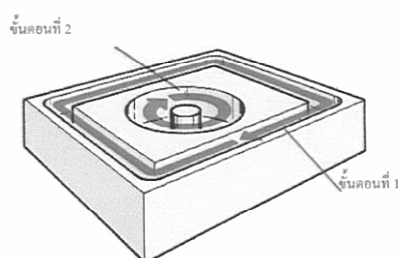
รูปที่ ข-9 แสดงขั้นตอนการกัดและเลือกเครื่องมือ

3. จัดเตรียมโปรแกรม NC ที่จะนำมาใช้งาน



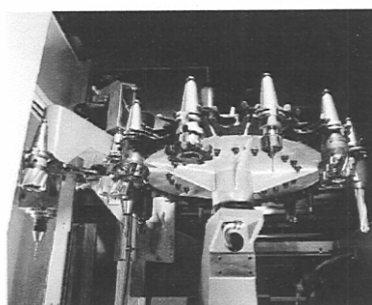
รูปที่ ข-10 แสดงจัดเตรียมโปรแกรม NC

4. การตรวจสอบโปรแกรม



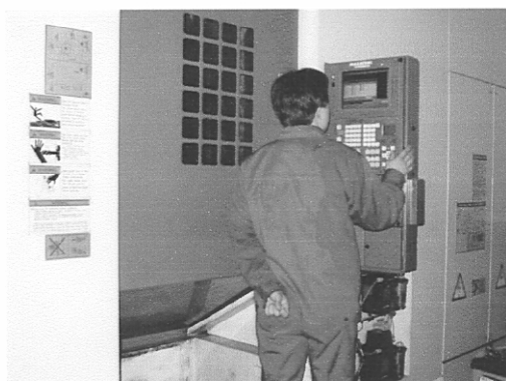
รูปที่ ข-11 แสดงการตรวจสอบโปรแกรม

5. จัดเตรียมเครื่องมือตัด



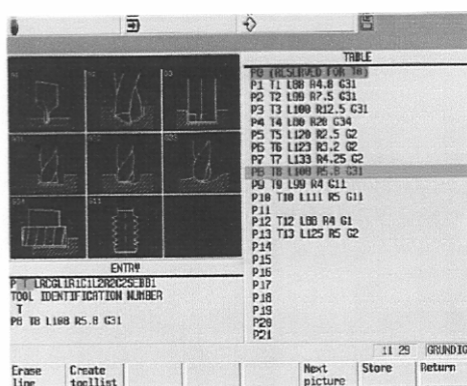
รูปที่ ข-12 แสดงการจัดเตรียมเครื่องมือตัด

6. ป้อนโปรแกรมเข้าเครื่อง



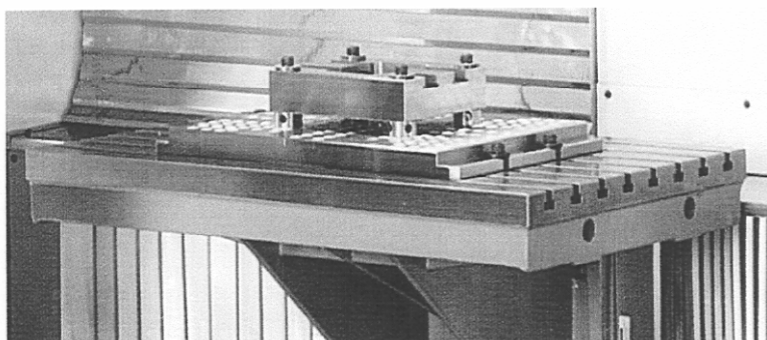
รูปที่ ข-13 แสดงป้อนโปรแกรมเข้าเครื่อง

7. ปรับตั้งค่าเครื่องมือตัด



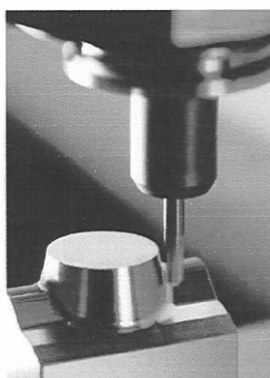
รูปที่ ข-14 แสดงปรับตั้งค่าเครื่องมือตัด

8. การจับยึดชิ้นงานบนโต๊ะงาน



รูปที่ ข-15 แสดงการจับยึดชิ้นงานบนโต๊ะงาน

9. ทดสอบกััดงานอย่างต่อเนื่อง



รูปที่ ข-16 แสดงการทดสอบการกัดงาน

ข้อดีของเครื่องจักรกล CNC

1. มีความเที่ยงตรงสูง
2. คุณภาพสม่ำเสมอทุกชิ้น
3. โอกาสเกิดความเสียหาย หรือ ต้องแก้ไขชิ้นงานน้อย
4. สามารถทำงานได้ตลอด 24 ชั่วโมงโดยไม่หยุด
5. มีความรวดเร็วในการผลิต ทำให้มีผลผลิตสูง
6. สามารถคาดคะเนและวางแผนการผลิตได้อย่างแม่นยำ เพราะเวลาไม่ขึ้นอยู่กับแรงงาน
7. สามารถสลับเปลี่ยนชิ้นงาน ได้หลากหลายรูปทรง สะดวกและรวดเร็ว
8. เมื่อเปรียบเทียบจำนวนผลผลิตที่เท่ากัน เครื่องจักรกล ซีเอ็นซี ใช้พื้นที่น้อยกว่า และลดพื้นที่การจัดเก็บชิ้นงาน
9. มีความสะดวก สำหรับใช้ในการผลิตชิ้นงานต้นแบบที่มีการแก้ไขบ่อย
10. ชิ้นงานที่มีความซับซ้อนสูงและมีหลายขั้นตอนการผลิต สามารถใช้เครื่องจักรกล ซีเอ็นซี เครื่องเดียว ทำให้ไม่ต้องย้ายไปทำที่เครื่องอื่น
11. ลดปริมาณการตรวจสอบคุณภาพ
12. ทำให้สามารถใช้ทุลหรือเครื่องมือตัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ
13. ลดแรงงานในสายการผลิต ผู้ควบคุมเครื่อง 1 คน สามารถคุมได้ 3 ถึง 5 เครื่อง
14. ใช้อุปกรณ์เสริมน้อย ไม่ต้องใช้แผ่นลอกแบบ (Cemplates หรือ Templates)

ข้อเสียของเครื่องจักรกล CNC

1. มีราคาแพง ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ
2. ค่าซ่อมแซมสูง การซ่อมแซมมีความซับซ้อน เพราะมีทั้ง ฮาร์ดแวร์ และ ซอฟต์แวร์ รวมถึงคอมพิวเตอร์และอุปกรณ์ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์
3. อุปกรณ์และซอฟต์แวร์เสริม (Option) มีราคาสูงและต้องใช้จากผู้ผลิตนั้นๆ เท่านั้น
4. ต้องมีความรู้พื้นฐานคณิตศาสตร์พอควรในการเขียนโปรแกรม
5. ต้องมีพื้นที่ และสิ่งอำนวยความสะดวกให้แก่ผู้เขียนโปรแกรม
6. ต้องหางานป้อนให้เครื่องทำประจำอย่าสม่ำเสมอ
7. ไม่เหมาะสมกับการผลิตงานจำนวนน้อยๆ
8. สัญญาค่าซ่อมบำรุงสูง
9. ชิ้นส่วนอะไหล่ในบางกรณี ต้องรอจากต่างประเทศ
10. คอนโทรลเลอร์ เป็นภาษาอังกฤษ ช่างต้องเรียนรู้ และมีการฝึกอบรมการใช้เครื่องและการเขียนโปรแกรมก่อนเริ่มใช้เครื่องได้

3. เครื่องกัดเซาะโลหะด้วยตัวนำไฟฟ้า (Electrical Discharge Machining Technology: EDM)

ปัจจุบันในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนโลหะหรืออุตสาหกรรมแม่พิมพ์ไม่ว่าจะเป็นแม่พิมพ์สำหรับโลหะหรือแม่พิมพ์สำหรับพลาสติกนั้น ล้วนแล้วแต่ต้องผ่านขั้นตอนการผลิตที่ใช้เครื่อง EDM หรือที่เรียกว่า Electrical Discharge Machine โดยแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก คือ

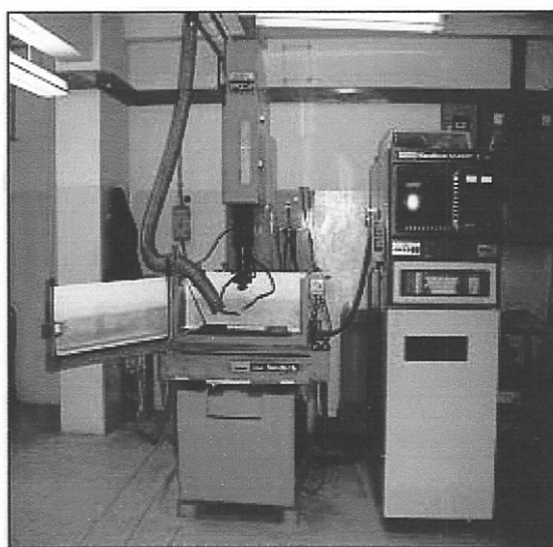
1. Sink-EDM

2. Wire-EDM

ซึ่งในปัจจุบันอุตสาหกรรมมีใช้อยู่เป็นจำนวนมาก โดยที่การกัดเซาะโลหะด้วยตัวนำไฟฟ้า (Electrical Discharge Machining Technology) เป็นกระบวนการที่มีผลต่อคุณภาพของชิ้นงานเป็นอย่างมาก เพราะเป็นกระบวนการที่ต้องเก็บรายละเอียดของชิ้นงาน ซึ่งเกือบจะเป็นขั้นตอนสุดท้าย อีกทั้งยังเป็นกระบวนการที่ใช้เวลาในการผลิตนานมาก

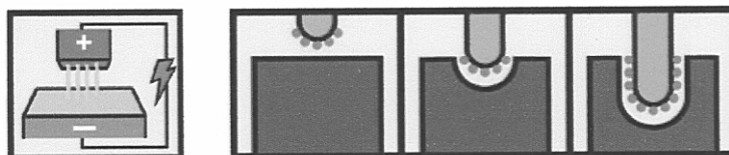
3.1 การกัดเซาะโลหะด้วยตัวนำไฟฟ้า (Electrical Discharge Machining; SINK - EDM)

ใช้ในงานผลิตชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนที่ทำด้วยวิธีการตัดเฉือนทั่วไปได้ยาก สามารถตัดเฉือนชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็งมาแล้ว ใช้ผลิตส่วนเบาของแม่พิมพ์ การตัดเฉือนโลหะ จะใช้การกัดเซาะทางไฟฟ้ามีอิเล็กโทรดเป็นตัวนำไฟฟ้า ข้อเสียคือ ในงานที่ต้องการความละเอียด จะต้องใช้ตัวอิเล็กโทรดหลายอัน และงานที่ซับซ้อนจะมีค่าใช้จ่ายในการผลิตที่มาก



รูปที่ ข-17 แสดงเครื่องการกัดเซาะโลหะด้วยตัวนำไฟฟ้า

หลักการ



รูปที่ ข-18 แสดงหลักการกัดเซาะโลหะด้วยตัวนำไฟฟ้า

การทำงานโดยการสปาร์ค โดยอาศัยการจ่ายประจุไฟฟ้าระหว่างชิ้นงาน (ขั้วลบ) และตัวกัดอิเล็กโทรด (ขั้วบวก) ซึ่งกระทำภายใต้ของเหลวฉนวนที่เรียกว่า ไดอิเล็กทริก (Dielectric)

การสปาร์คจะทำให้เกิดความร้อนสูงถึง 8,000 – 12,000 องศาเซลเซียส ทำให้ชิ้นงานเกิดการหลอมละลายและกัดกร่อน โดยกัดอิเล็กโทรด Electrode (ขั้วบวก) จะเคลื่อนตามรูปแบบที่กำหนดไว้ใน NC โปรแกรม ซึ่งระหว่างการหลอมละลายไดอิเล็กทริก (Dielectric) จะมีหน้าที่ช่วยลดอุณหภูมิและกำจัดเศษโลหะที่เกิดจากการกัดกร่อน

อิเล็กโทรด (Electrode)

1. ทำจากวัสดุอ่อนและขึ้นรูปได้ง่าย เช่น ทองแดง ทังสเตนคาร์ไบด์ ทองเหลือง แกรไฟต์ เป็นต้น
2. ต้องเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี
3. ชิ้นงานต้องเป็นตัวนำไฟฟ้าเท่านั้น

วิธีสร้างอิเล็กโทรด (Manufacturing method of electrodes)

1. การตัด (Cutting)
2. การเจียรระไน (Grinding)
3. ขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีไฟฟ้า (Electro forming)
4. ขึ้นรูปแบบฟอร์จิง (Cold forging)
5. สร้างด้วยวิธีใช้ EDM (Electrical discharge machine)

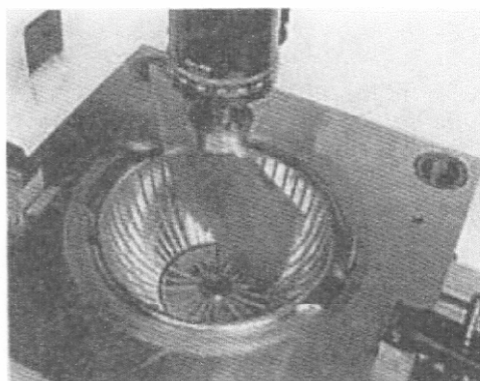
วิธีที่ใช้จับยึดและตั้งตำแหน่งของอิเล็กโทรด (Holding and positioning method of work pieces and electrodes)

1. ติดตั้งอิเล็กโทรดในช่องจับ และปรับอิเล็กโทรดให้ตั้งฉากกับผิวโต๊ะงาน
2. ติดตั้งชิ้นงานในที่จับและปรับให้ระนาบอ้างอิงของผิวงานขนานกับแนวทางเคลื่อนที่แกน X,Y ของโต๊ะงาน

3. ปรับตำแหน่งของอิเล็กโทรดให้ได้ตำแหน่งตรงตามระนาบอ้างอิงแกน X,Y ของผิวงานตามที่ต้องการ อาจใช้วิธีต่อไปนี้
 - 3.1 วิธีทำโดยการสัมผัสผิว (Contact sensing method)
 - 3.2 วิธีทำโดยลองปล่อยกระแสจำนวนเล็กน้อยขณะสัมผัสผิว (Small amount of discharge sensing method)
 - 3.3 วิธีทำโดยใช้รูและจิ๊กอ้างอิง (Use of reference hole and jigs)



รูปที่ ข-19 เครื่อง Sink - EDM



รูปที่ ข-20 ภาพแสดงขั้นตอนการทำงานของ Sink EDM

ชนิดของการทำ EDM

1. ขึ้นรูปรูทะลุ (Through hole machining)
2. ขึ้นรูปรูตัน (Blind hole machining)
3. ขึ้นรูปแบบจัดเป็นชุด (Gang machining)
4. กรรมวิธีพิเศษ เช่น อิเล็กโทรดหมุน กัดเกลียว (Special process, electrode rotating, thread cutting)

ลักษณะงานที่ได้จากเครื่อง Sink EDM

- ใช้ในอุตสาหกรรมรถยนต์ เช่น ทำฝากระโปรงรถยนต์ แม่พิมพ์สำหรับทำชิ้นส่วนรถยนต์
- ทำแม่พิมพ์สำหรับปั๊มเหรียญกษาปณ์
- ทำแม่พิมพ์สำหรับขึ้นส่วนวงจรอิเล็กทรอนิกส์
- ทำแม่พิมพ์สำหรับงานแม่พิมพ์พลาสติก

3.2 เครื่องตัดโลหะด้วยไฟฟ้า (Wire Cutting Machine)

จัดเป็นเครื่องจักรประเภทเดียวกับเครื่อง EDM แต่เปลี่ยนจากการใช้อิเล็กโทรดเป็นตัวตัดเฉือนชิ้นงานมาใช้ลวดทองเหลืองเป็นตัวตัดให้ได้รูปร่างตาม ต้องการในแนวดิ่ง เครื่อง Wire cut เป็นเครื่องที่ตัดงานด้วยความเที่ยงตรงขนาดสูงมาก สามารถควบคุมขนาดได้เล็กกว่า 5 ไมครอนเนื่องจากมีค่าใช้จ่ายสูงในการทำชิ้นงานจึงเหมาะกับงานที่ต้องการความเที่ยงตรงสูง



รูปที่ ข-21 เครื่องตัดโลหะด้วยไฟฟ้า (Wire Cutting Machine)

เครื่อง Wire-cut EDM คือเครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้า ซึ่งใช้การควบคุมการเดินของเครื่องด้วยคอมพิวเตอร์ เพื่อเดินทางกินรูปร่างที่ต้องการโดยใช้อิเล็กโทรดที่เป็นลวดตัดงานคล้ายลวดฉลุ ดังนั้น จึงไม่ต้องการอิเล็กโทรดที่รูปร่างเหมือนเครื่อง EDM. เครื่องจะควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์สั่งให้แกนเดินพร้อมกับลวดเดินต่อเนื่องภายใต้ความตึงที่เหมาะสมตามขนาดของลวดแต่ละขนาด

อิเล็กโทรดหรือลวดนี้จะทำจากทองเหลือง ทองแดง หรือวัสดุอื่นๆ ที่มีคุณสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้าได้มีขนาดความโต ระหว่าง 0.05-0.5 มิลลิเมตร ทางเดินของลวดนี้ จะถูกควบคุมด้วยแกนสองแกน คือแกน X และแกน Y ในกรณีที่ตัดงานขาดเป็นลักษณะเส้นตรง และจะควบคุมแกน X และสามารถควบคุมการเดินได้ช่วงสั้นสุดครั้งละ 0.001 มิลลิเมตร งานบางอย่างที่ต้องการความละเอียดและเที่ยงตรงสูง สามารถตัดได้ละเอียด โดยการตัดซ้ำหลายรอบ

ของเหลวไดอิเล็กทริก เป็นสารละลายที่ผ่านการทำดีไอไดไนซ์ (Deionize) ซึ่งจะทำให้การไหลวนชนิดตรงบริเวณตัดเพื่อไล่เศษโลหะที่เกิดจากการตัด ของเหลวไดอิเล็กทริกนี้ จะควบคุมความเป็นตัวนำไฟฟ้าระหว่างลวดและชิ้นงาน และยังช่วยลดความร้อนที่เกิดจากการสปาร์คด้วย

เครื่อง EDM. ประเภท Wire-cut EDM.กำเนิดจากการประยุกต์เครื่อง EDM.ประเภท Diesing เครื่องประเภทนี้จะขึ้นรูปเหมือนการวาดรูป โดยที่แกน X-Y เคลื่อนที่ในเวลาเดียวกันทั้งสองแกนจึงต้องมีอุปกรณ์ NC.เป็นตัวควบคุม ดังนั้น เราจึงสามารถกล่าวได้ว่า ถ้าไม่มีการพัฒนาอุปกรณ์ NC.ขึ้นมาเครื่อง Wire-cut EDM.จะไม่สามารถกำเนิดขึ้นมาได้

4. การเชื่อมโลหะด้วยวิธีทิก (TIG)

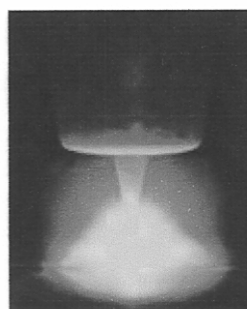
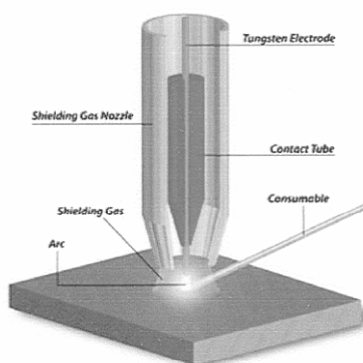
คำว่าทิก ((TIG) เป็นอักษรซึ่งย่อจาก Tungsten Inert Gas Arc Welding และอ่านเป็นคำใหม่ว่า TIG เป็นกรรมวิธีเชื่อมโลหะด้วยการอาร์คที่ทันสมัยวิธีหนึ่ง นำมาใช้สำหรับเชื่อมโลหะที่เชื่อมได้ยาก เช่น แมกนีเซียม อลูมิเนียม และสแตนเลสสตีล ครั้งแรกในอุตสาหกรรมสร้างเครื่องบิน ประมาณปี ค.ศ 1940 ปัจจุบันวิธีการเชื่อมแบบนี้ได้ใช้กันอย่างกว้างขวางในงานเชื่อมโลหะทั่วไป เช่น เครื่องพิมพ์หล่อดอกยาง ภาชนะบรรจุของเหลวและแก๊ส งานเชื่อมประกอบโครงสร้างที่ต้องการความเที่ยงตรง และคุณภาพของรอยเชื่อมสูง เป็นต้น นอกจากนี้วิธีการเชื่อมด้วยวิธีทิก ยังสามารถเชื่อมได้ทั้งโลหะประเภทเหล็ก (Ferrous Metals) และโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก Non ferrous Metals ที่มีความหนาต่างๆกันไปจนถึงโลหะแผ่นที่มีความบางต่ำที่สุดถึง 0.25 มิลลิเมตร (0.010")

ความพิเศษของการเชื่อมแบบทิก (TIG)

1. รอยเชื่อมและแนวเชื่อมมีคุณภาพสูง ทนต่อการสึกกร่อนได้ดีกว่าการเชื่อมวิธีอื่น
2. ขณะเชื่อมจะปราศจากสะเก็ด ประกายไฟและควัน
3. แนวเชื่อมหรือรอยเชื่อมสะอาด เพราะวิธีนี้ไม่มีขี้ตะกรันและเม็ดละอองโลหะ (Slag and Spatter)
4. ขณะเชื่อมสามารถมองเห็นการอาร์คและบ่อหลอมละลายได้ชัดเจน จึงควบคุมการเชื่อมได้ง่าย
5. การบิดงอในชิ้นงานเกิดน้อย
6. เชื่อมได้ทุกตำแหน่งท่าเชื่อม
7. ทำงานได้รวดเร็วและประหยัด

อุปกรณ์ที่จำเป็นสำหรับการเชื่อมด้วยวิธีทิก (TIG) ประกอบด้วย

- เครื่องเชื่อมแบบระบบความถี่สูง (Power Source & High Frequency Unit)
- หัวเชื่อมและแท่งสเตนนิลิกโทรด (Torch & Tungsten Electrode)
- แก๊สเฉื่อยและอุปกรณ์ควบคุมการไหล (Inert Gas, Flowmeter Regulator)
- น้ำระบายความร้อน (Water Circulating Unit)
- ลวดเชื่อม (Filler Metal)



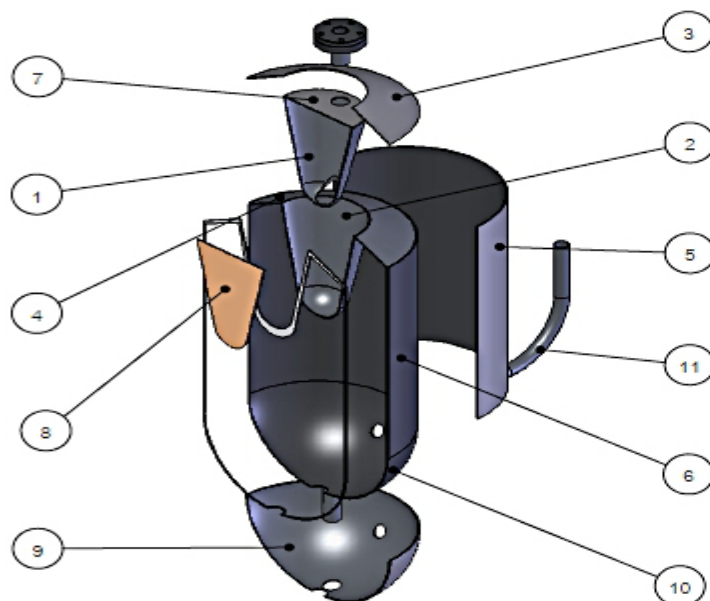
รูปที่ ข-22 แสดงหลักวิธีการเชื่อมแบบทิก TIG

หลักการและวิธีการเชื่อมทิก

หลักการทั่วไปคล้ายกับการเชื่อมโลหะด้วยไฟฟ้า กล่าวคือ ความร้อนที่ทำให้โลหะหลอมละลายนั้นเกิดจากการอาร์ค ระหว่างอิเล็กโทรด (Tungsten Electrode) กับชิ้นงาน ขณะเดียวกัน บริเวณที่เกิดอาร์คจะมีแก๊สเฉื่อย (Inert Gas) ปกคลุมรอบบริเวณนั้น เพื่อป้องกันออกซิเจน ไนโตรเจน และความชื้นซึ่งเป็นอากาศ เข้ามารวมกับโลหะที่กำลังหลอมละลาย เรียกว่า การเติมออกซิเจน (Oxidation) จนกระทั่งความร้อนจากการอาร์คหลอมละลายโลหะชิ้นงาน เกิดบ่อหลอมละลาย (Puddle) เมื่อบ่อหลอมละลายเกิดขึ้น ณ บริเวณรอยต่อ จึงทำให้ขอบของชิ้นงานหลอมละลายติดกัน แต่เนื่องจากแท่งสเตนนิลิกโทรดเป็นวัสดุที่ไม่ละลายเติมเป็นเนื้อโลหะเชื่อม และสิ้นเปลือง (Non Consumable Electrode) จึงจำเป็นต้องเติมเนื้อโลหะเชื่อม (Filler Metal) ลงในบ่อหลอมละลายนั้นด้วย ในกรณีที่เชื่อมโลหะแผ่นบางๆไม่จำเป็นต้องเติมลวดเชื่อมลงในบ่อหลอมละลายก็ได้

ภาคผนวก ค

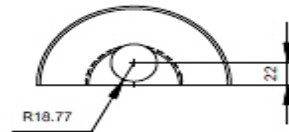
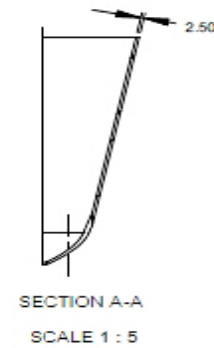
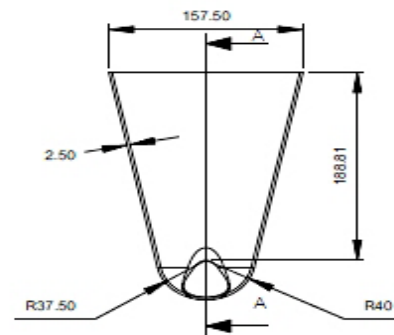
Drawing ของส่วนประกอบต่างๆ



11	Combustion_Pipe_01	SUS 304	2
10	Combustion_Frame_10	SS400	2
09	Combustion_Frame_09	SS400	2
08	Combustion_Frame_08	SS400	2
07	Combustion_Frame_07	SS400	2
06	Combustion_Frame_06	SS400	2
05	Combustion_Frame_05	SS400	2
04	Combustion_Frame_04	SS400	2
03	Combustion_Frame_03	SS400	2
02	Combustion_Frame_02	SS400	2
01	Combustion_Frame_01	SS400	2
ITEM NO.	NAME	DESCRIPTION	QTY.

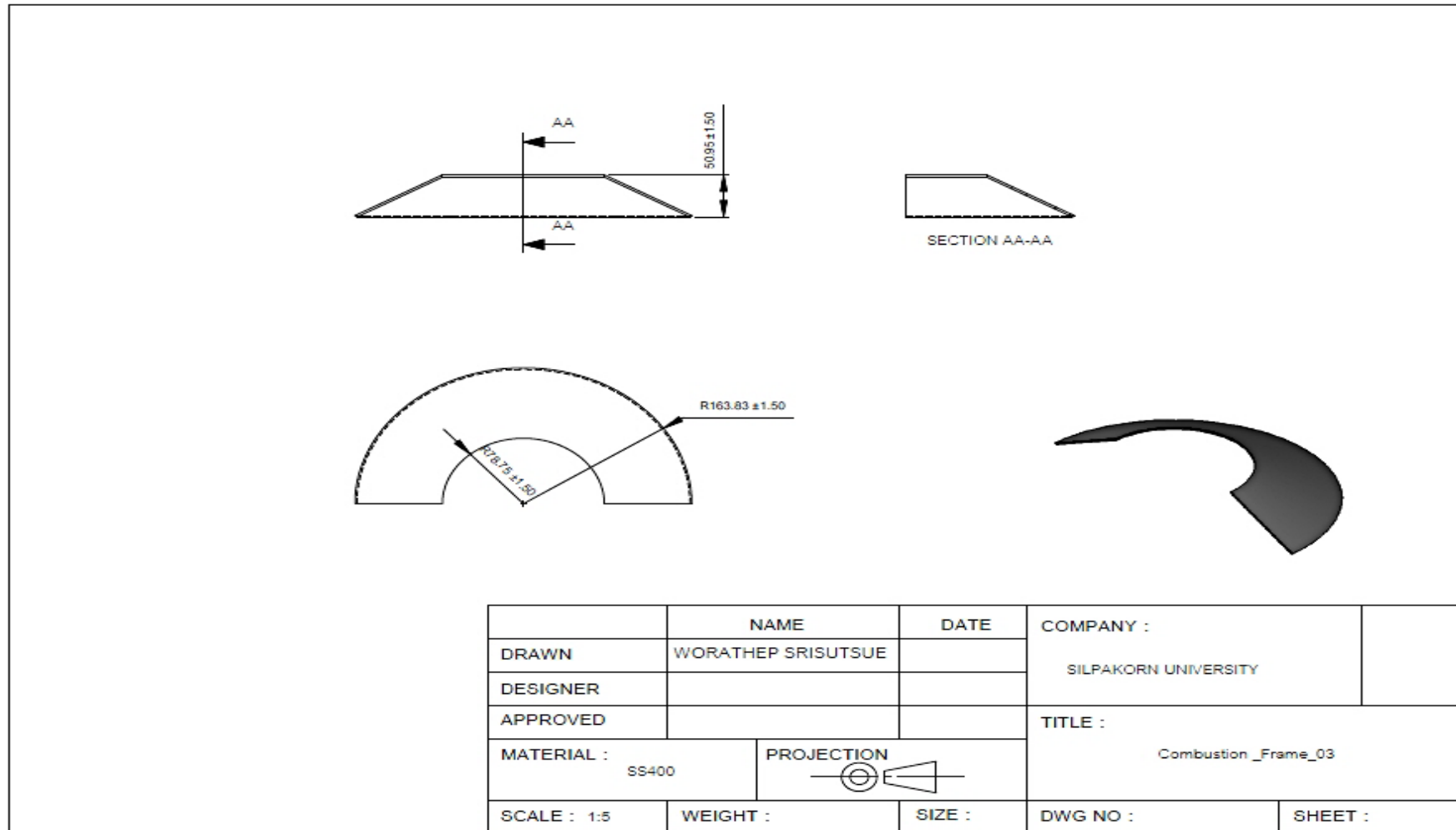
	NAME	DATE	COMPANY :	
DRAWN	WORATHEP SRISUTSUE		SILPAKORN UNIVERSITY	
DESIGNER				
APPROVED			TITLE :	ภาพประกอบห้องเผาไหม้
MATERIAL :	PROJECTION		Assembly_Combustion chamber	
SCALE : 1:10	WEIGHT :	SIZE :	DWG NO :	SHEET :

รูปที่ ค-1 ภาพประกอบห้องเผาไหม้

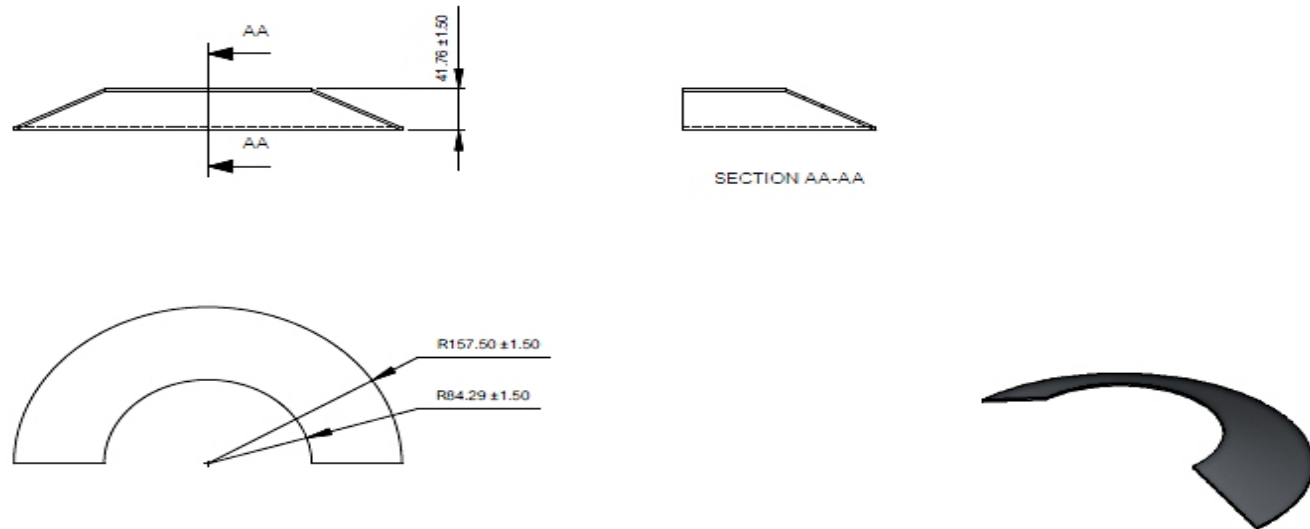


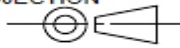
	NAME	DATE	COMPANY :	
DRAWN	WORATHEP SRISUTSUE		SILPAKORN UNIVERSITY	
DESIGNER				
APPROVED			TITLE :	
MATERIAL : SS-400	PROJECTION 		Combustion_Frame_01	
SCALE : 1:5	WEIGHT :	SIZE :	DWG NO :	SHEET :

รูปที่ ค-2 Drawing แสดงขนาดของ Combustion_Frame_01

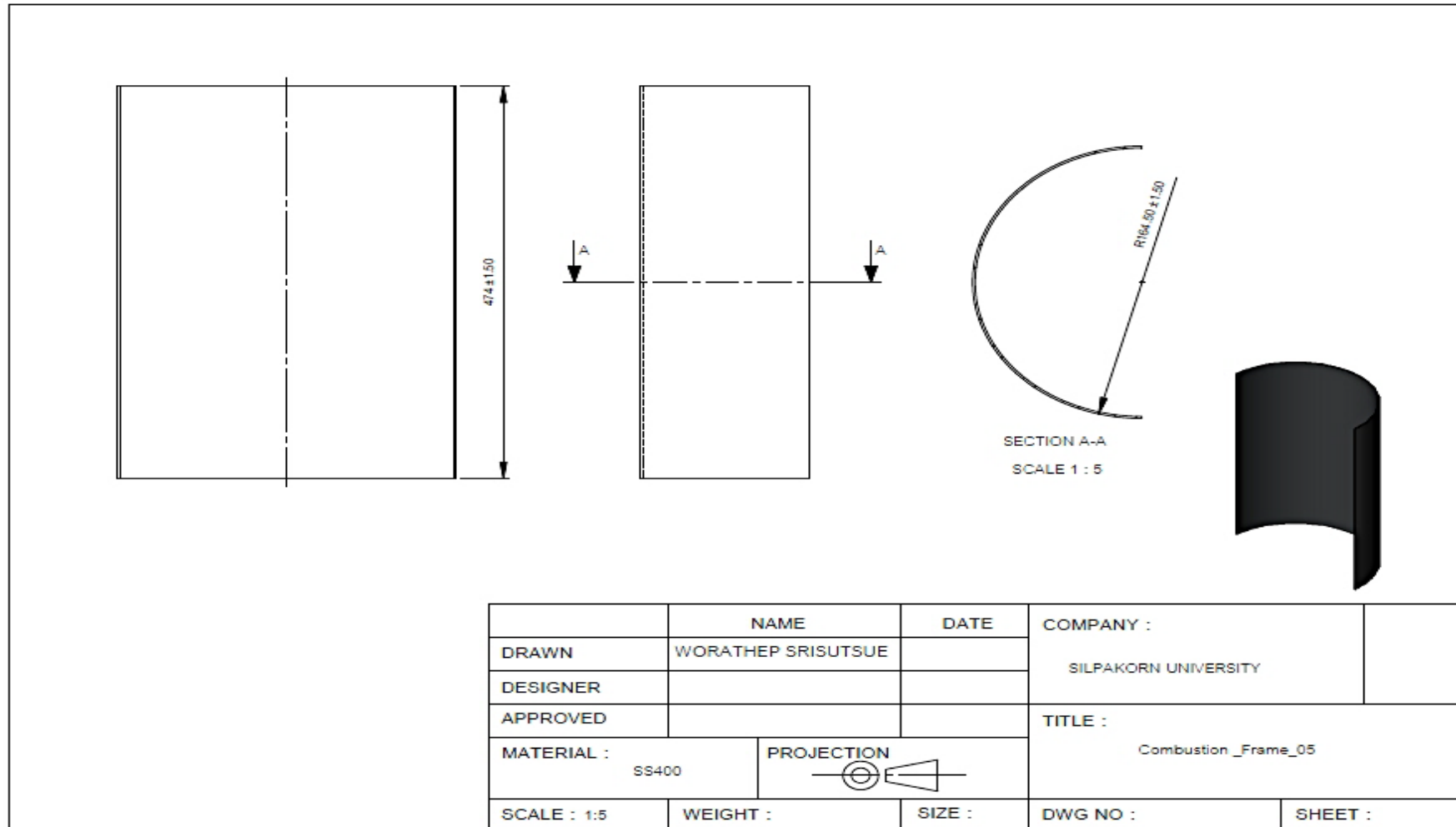


รูปที่ ค-3 Drawing แสดงขนาดของ Combustion_Frame_03

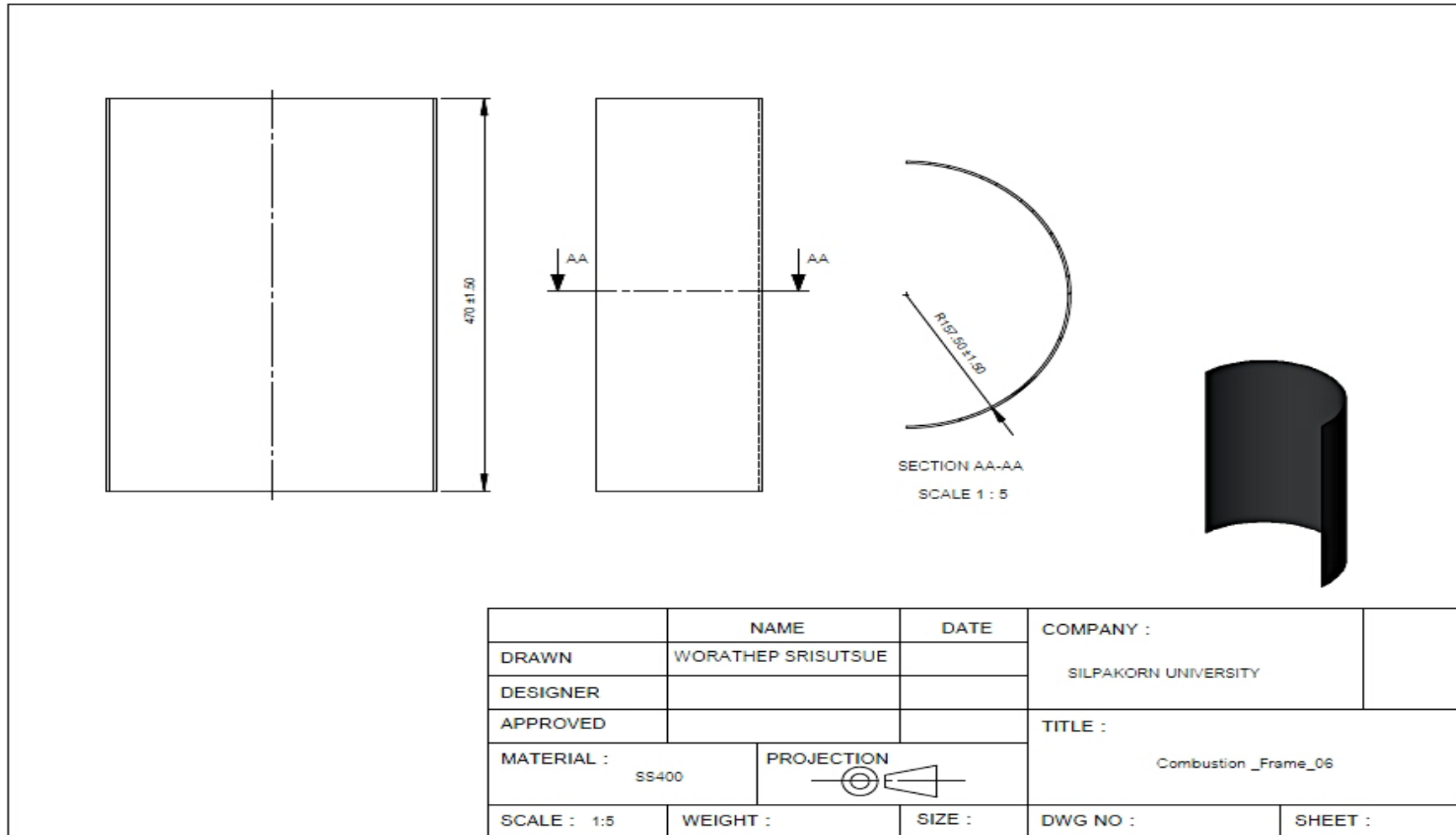


	NAME	DATE	COMPANY :	
DRAWN	WORATHEP SRISUTSUE		SILPAKORN UNIVERSITY	
DESIGNER				
APPROVED			TITLE :	
MATERIAL : SS400	PROJECTION 		Combustion_Frame_04	
SCALE : 1:5	WEIGHT :	SIZE :	DWG NO :	SHEET :

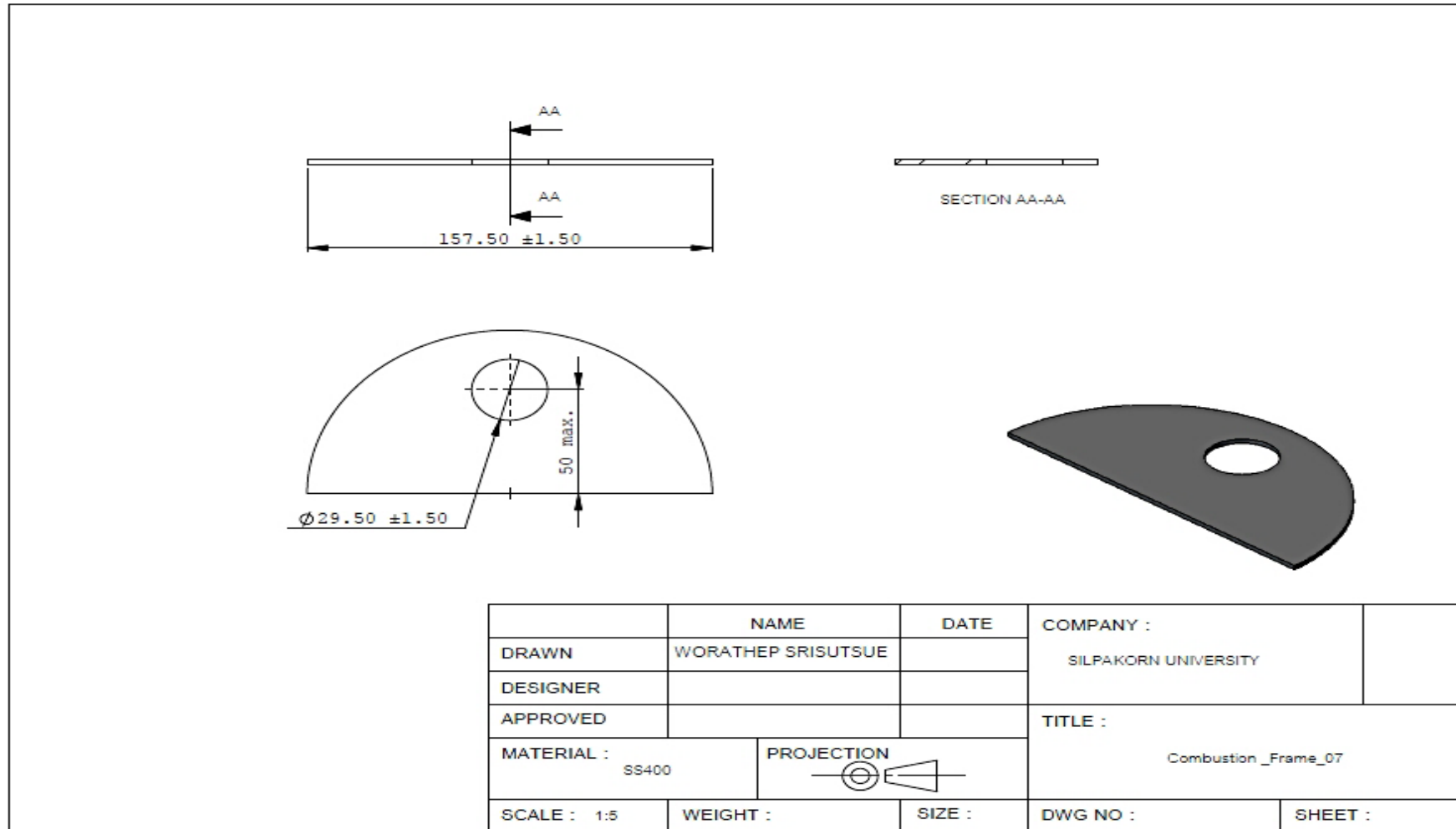
รูปที่ ค-4 Drawing แสดงขนาดของ Combustion_Frame_04



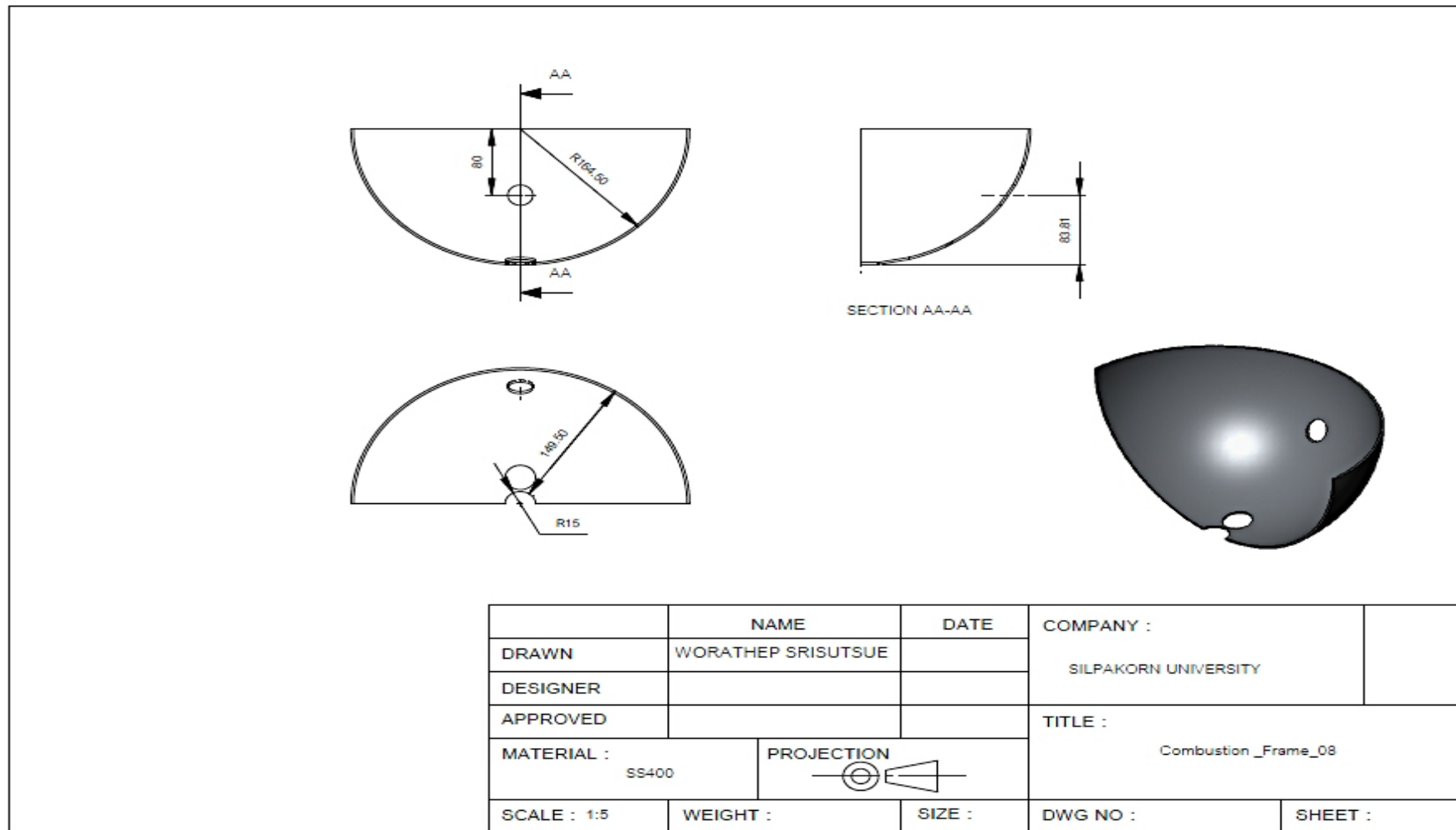
รูปที่ ค-5 Drawing แสดงขนาดของ Combustion_Frame_05



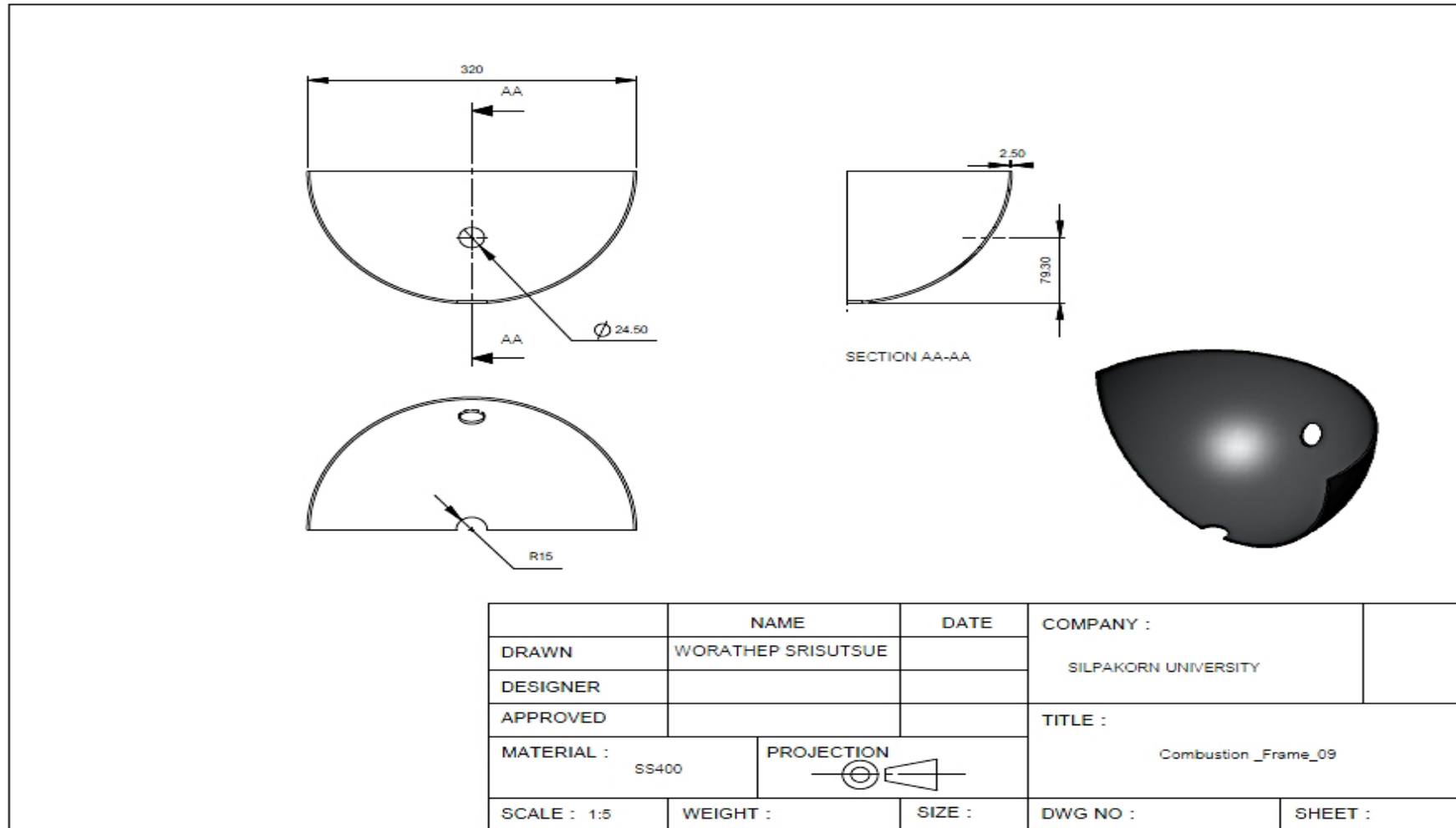
รูปที่ ค-6 Drawing แสดงขนาดของ Combustion_Frame_06



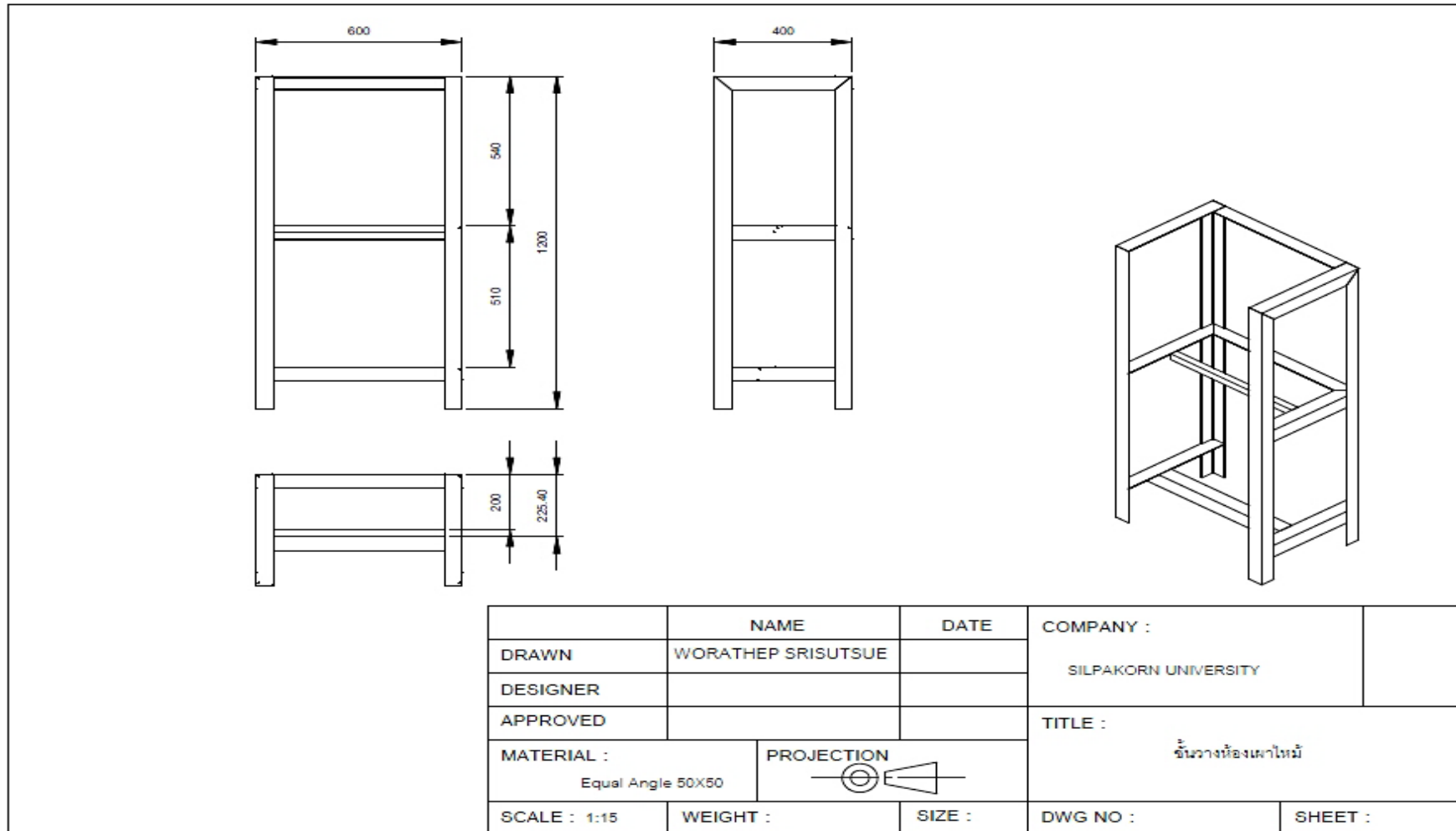
รูปที่ ค-7 Drawing แสดงขนาดของ Combustion_Frame_07



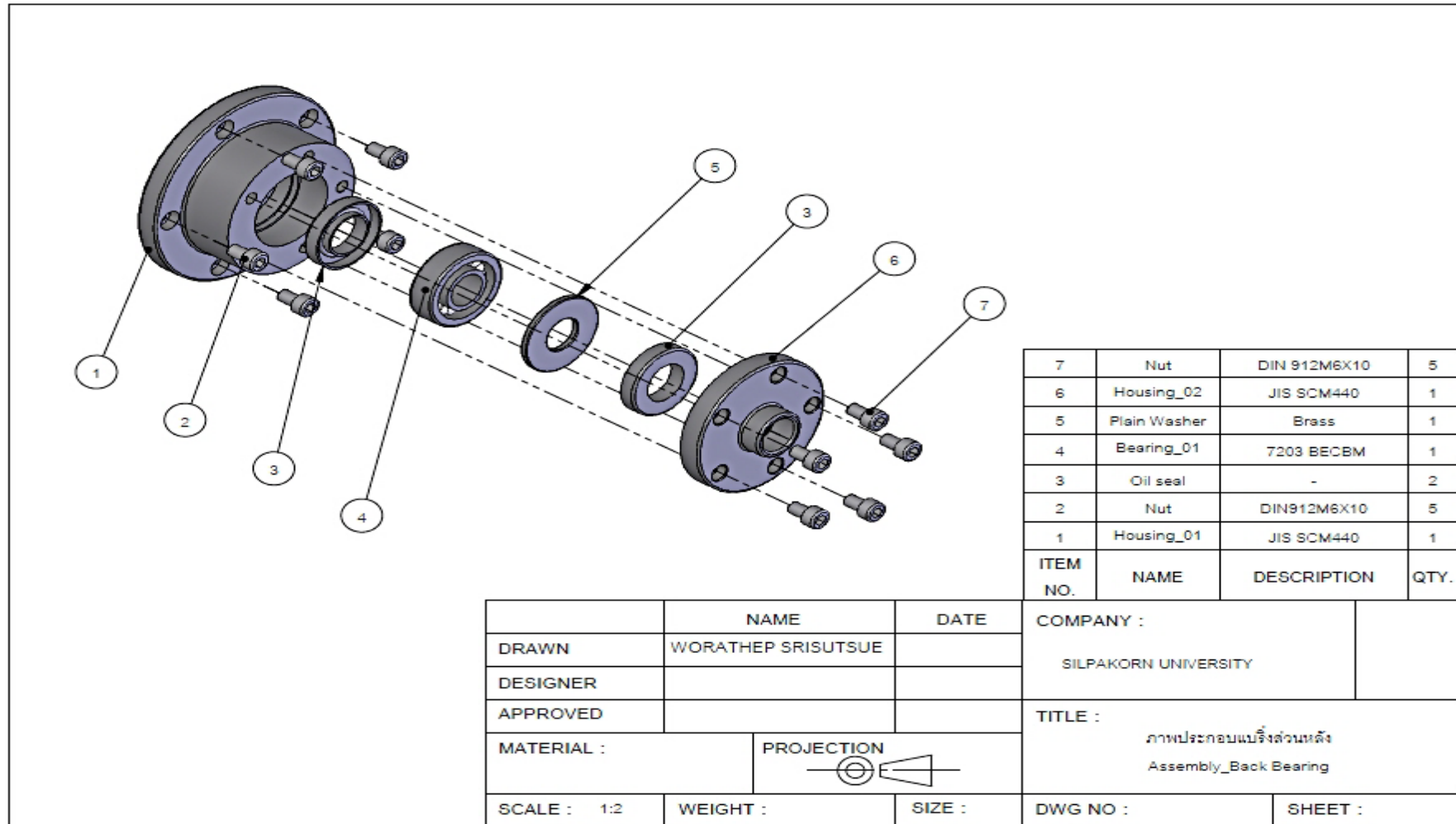
รูปที่ ค-8 Drawing แสดงขนาดของ Combustion_Frame_08



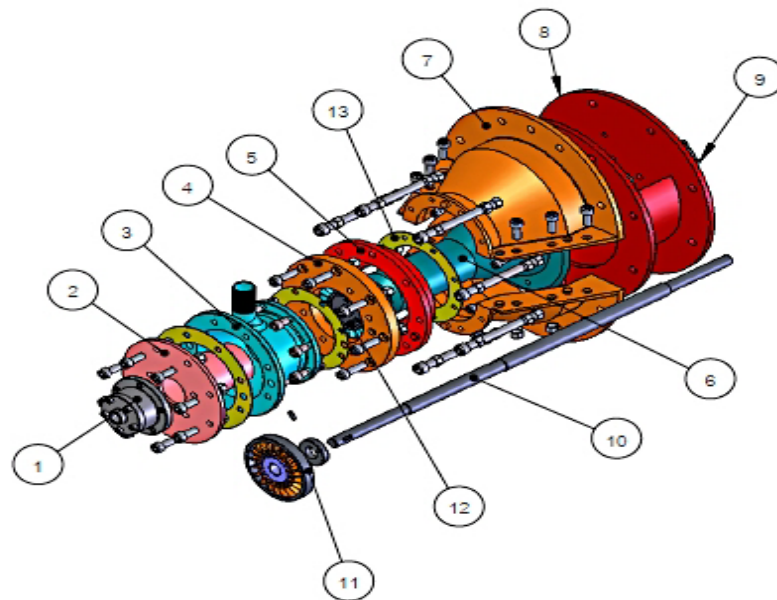
รูปที่ ค-9 Drawing แสดงขนาดของ Combustion_Frame_09



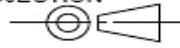
รูปที่ ค-10 Drawing แสดงขนาดชั้นวางห้องเผาไหม้



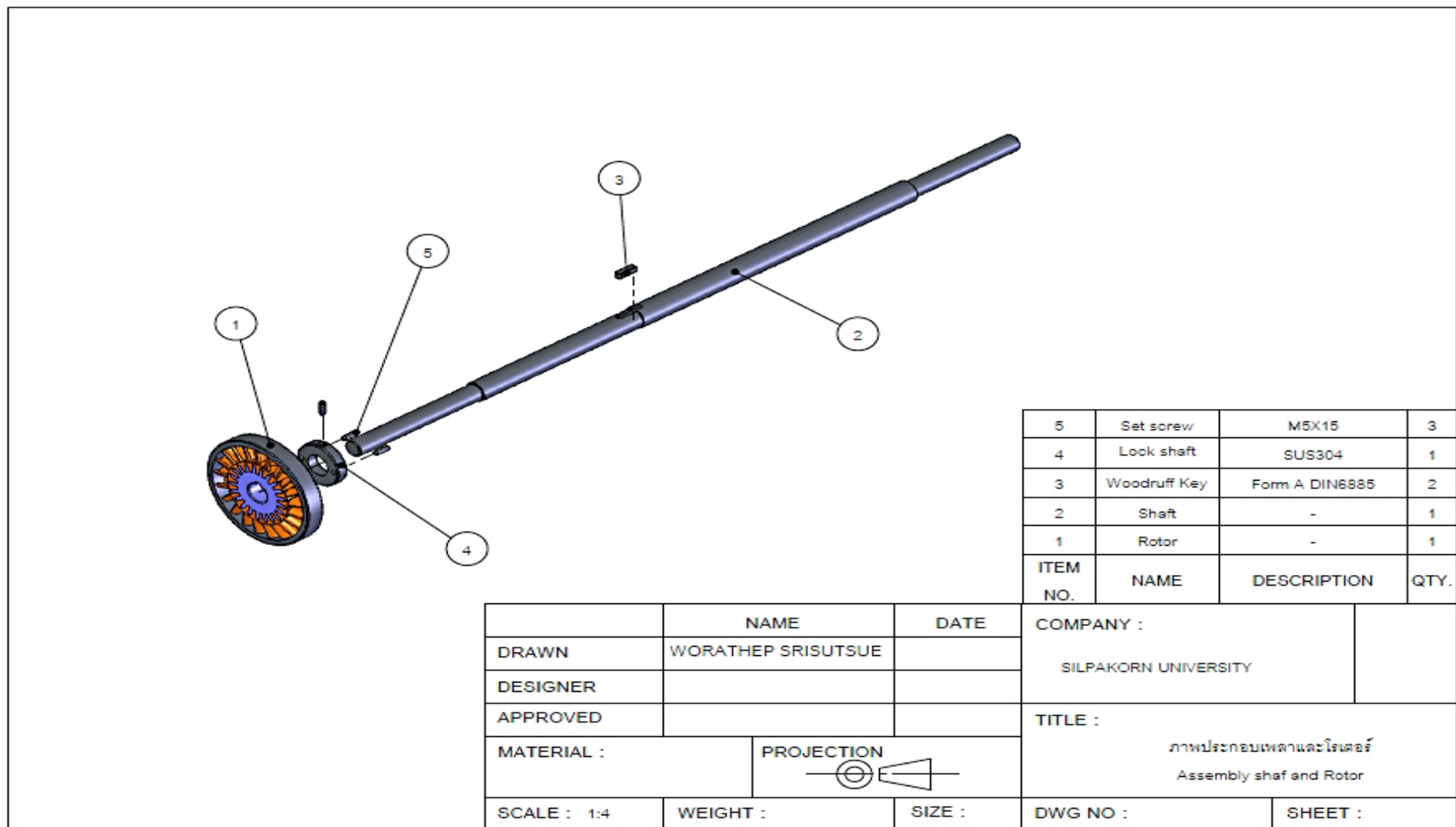
รูปที่ ค-11 ภาพประกอบเบร้งส่วนหน้า



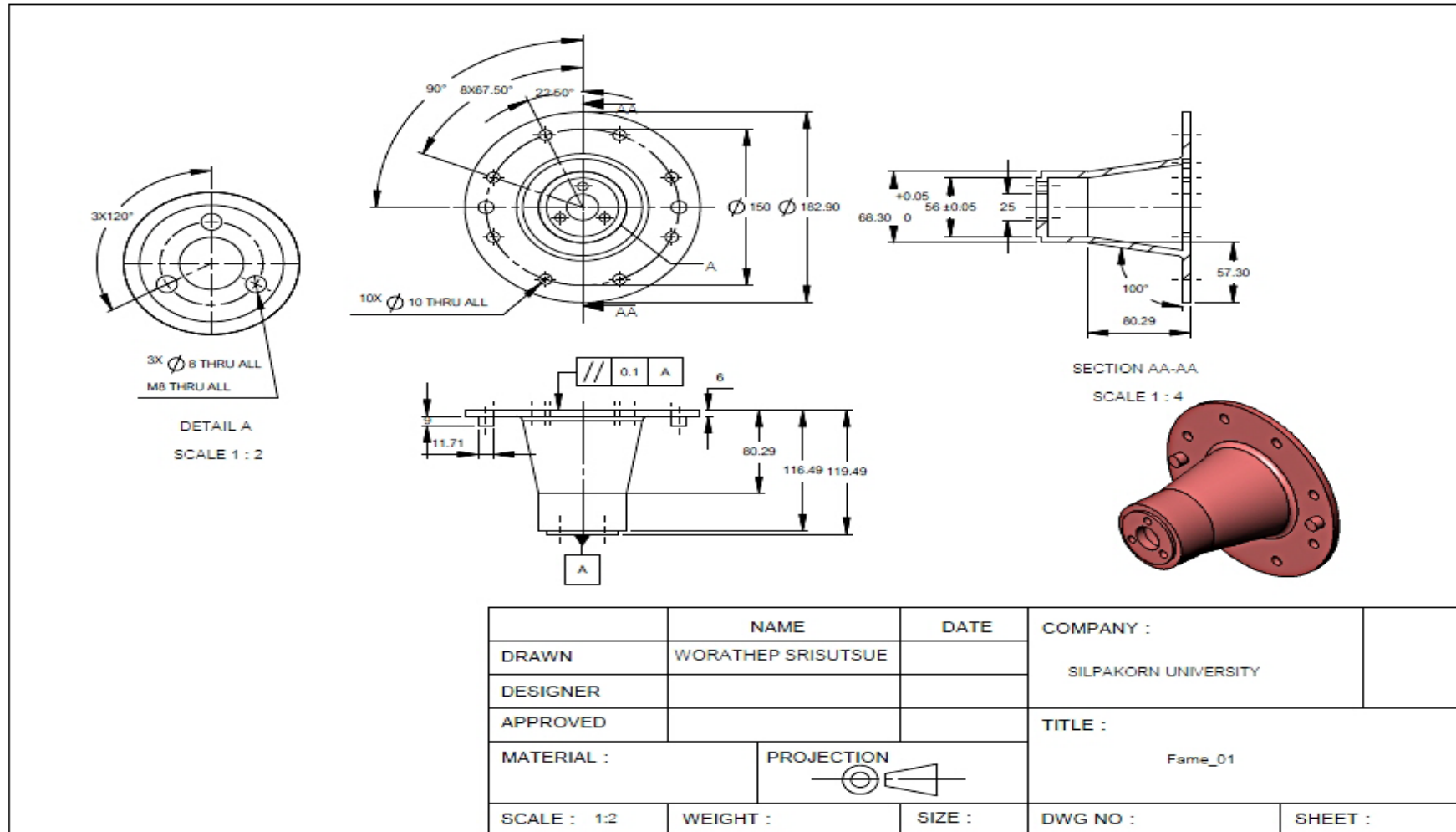
13	Gasket		-
12	Stator		-
11	Rotor		-
10	Shaft		-
09	Bearing		-
08	Fame_07		-
07	Fame_06		-
06	Fame_05		-
05	Fame_04		-
04	Fame_03		-
03	Fame_02		-
02	Fame_01		-
01	Bearing		-
ITEM NO.	NAME	DESCRIPTION	QTY.

	NAME	DATE	COMPANY :		
DRAWN	WORATHEP SRISUTSUE		SILPAKORN UNIVERSITY		
DESIGNER			TITLE : ภาพประกอบเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์ไบน์ Assembly_Gas turbine		
APPROVED					
MATERIAL :		PROJECTION 			
SCALE : 1:8	WEIGHT :	SIZE :	DWG NO :		

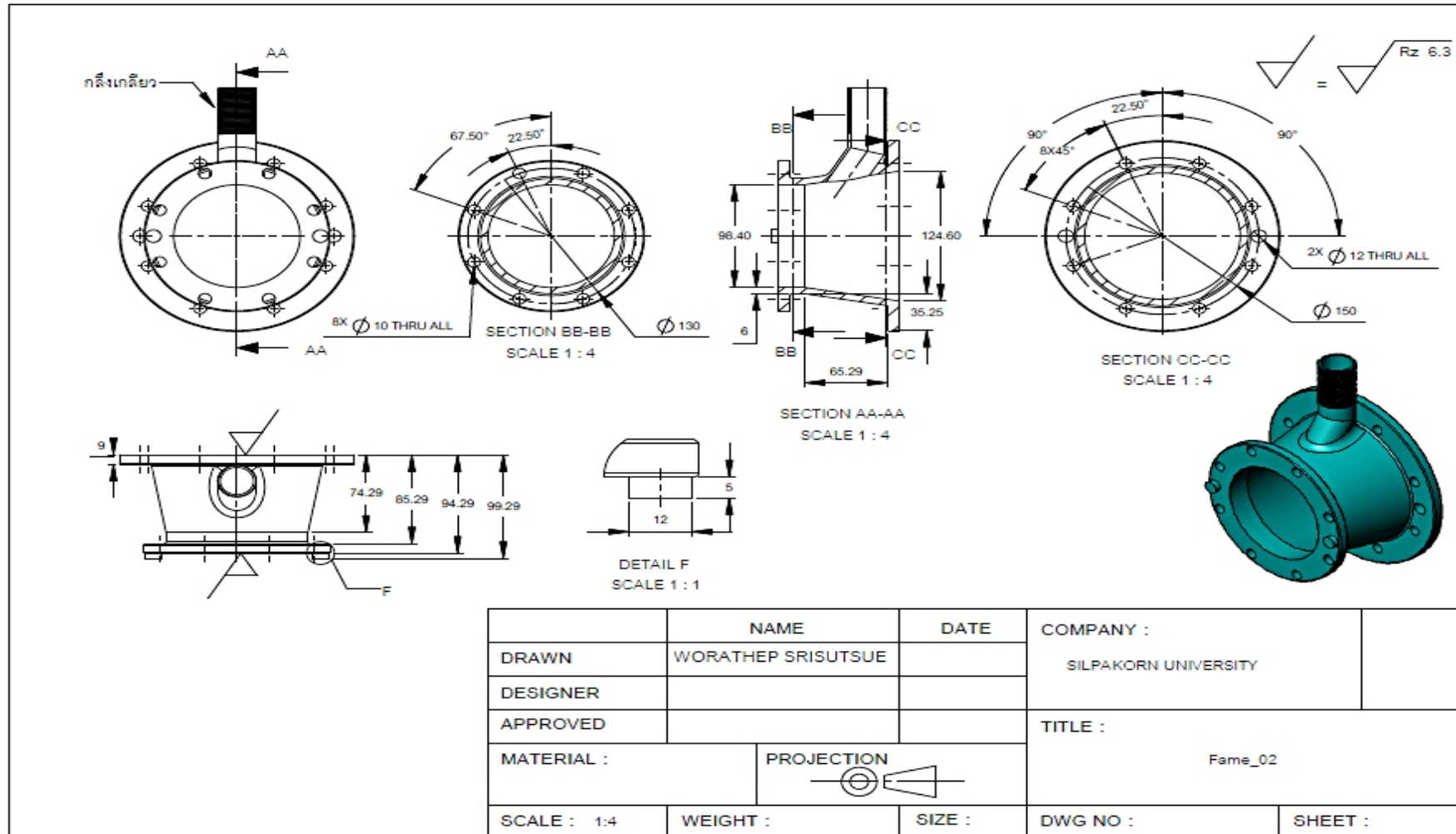
รูปที่ ค-12 ภาพประกอบเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์ไบน์



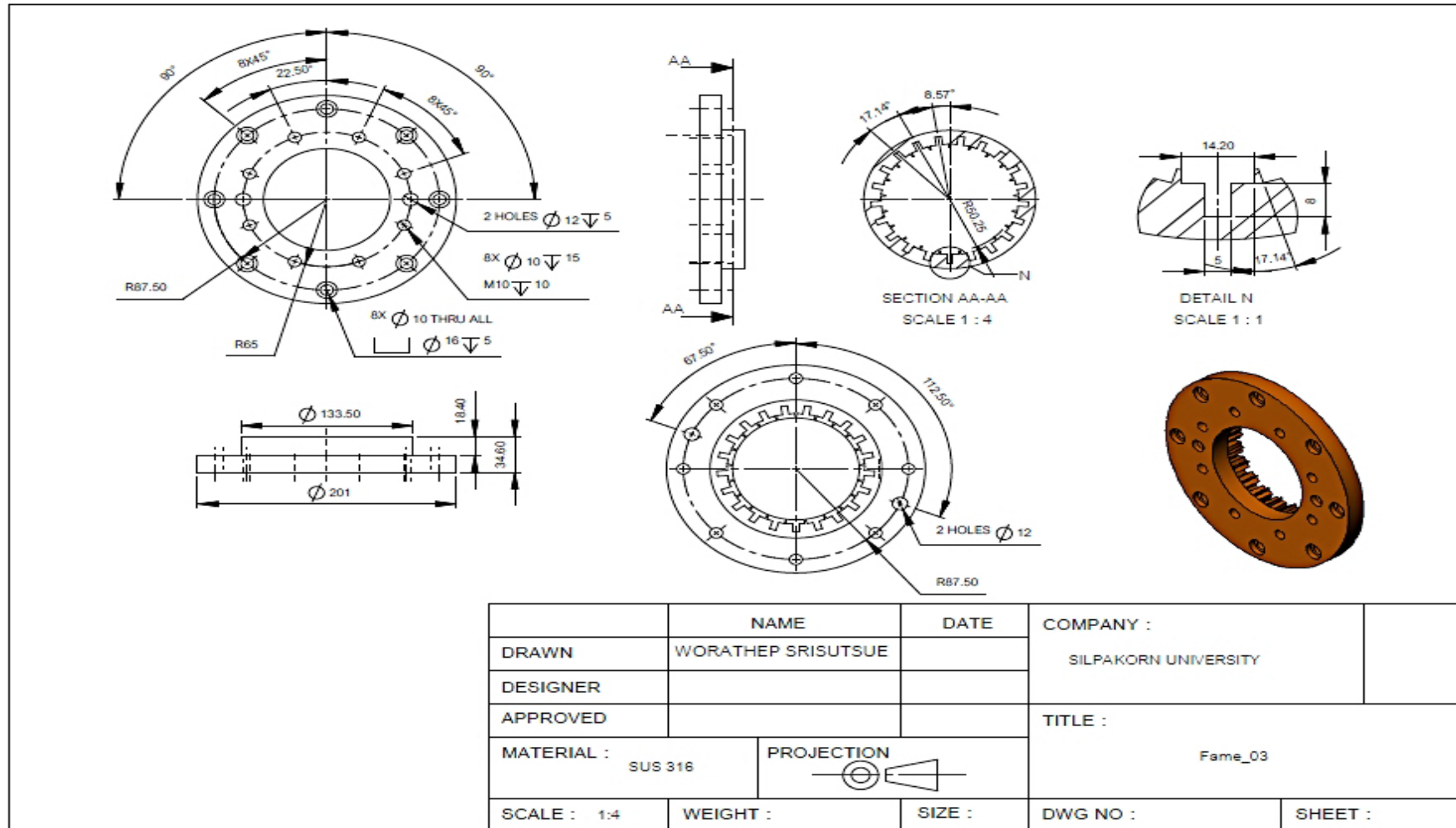
รูปที่ ค-13 ภาพประกอบเพลาและโรเตอร์



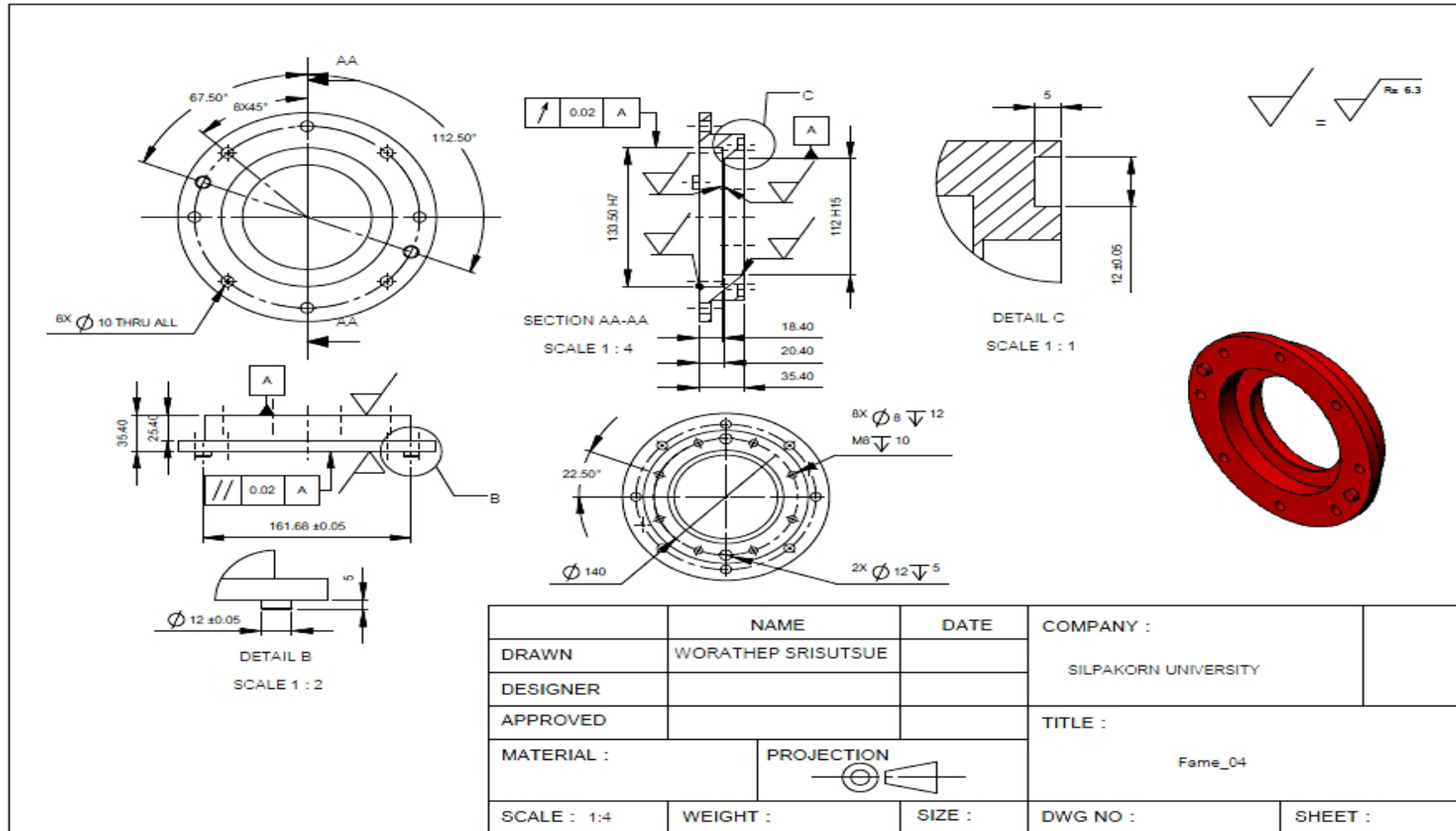
รูปที่ ค-14 Drawing แสดงขนาด Frame_01



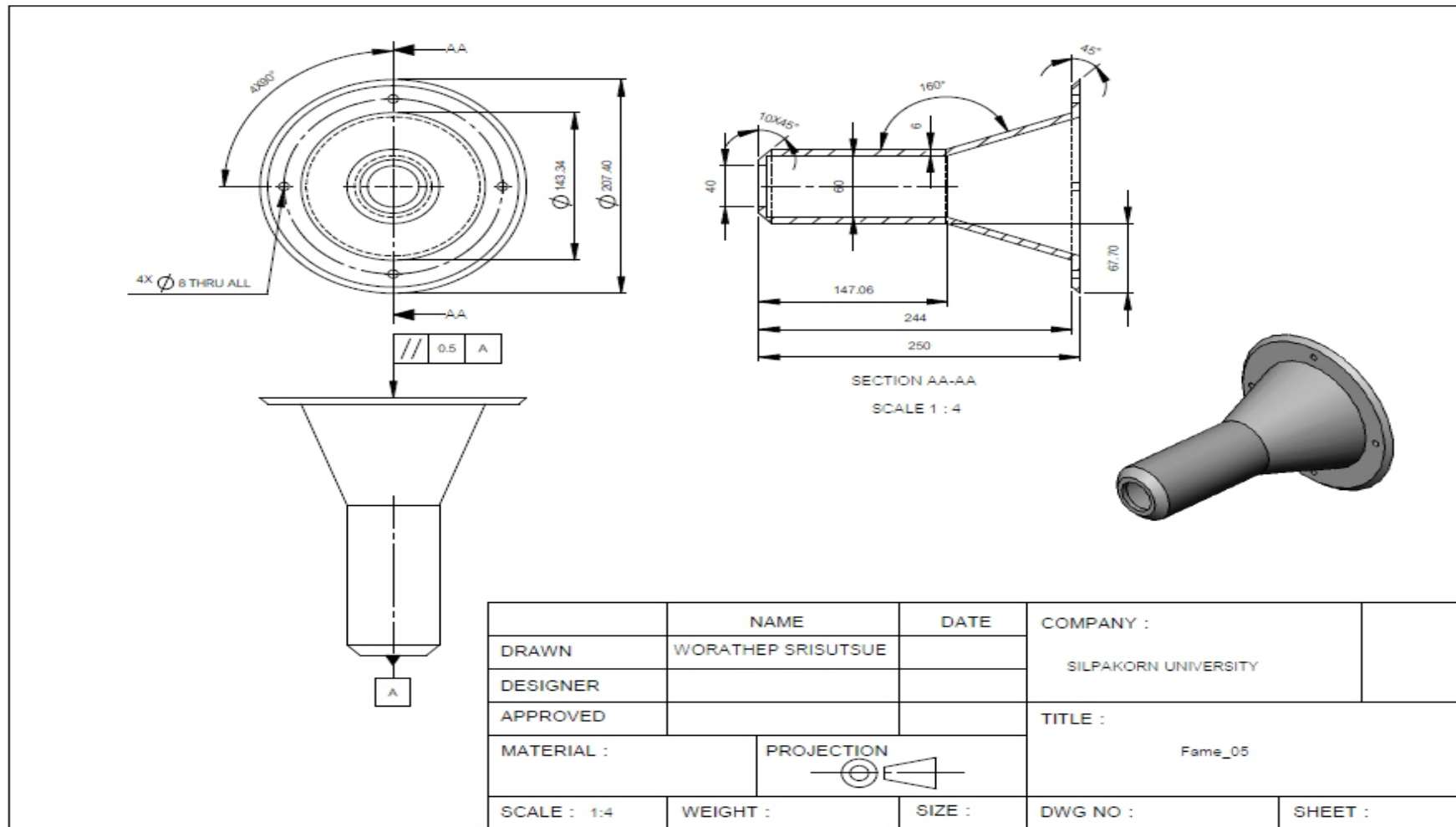
รูปที่ ค-15 Drawing แสดงขนาด Frame_02



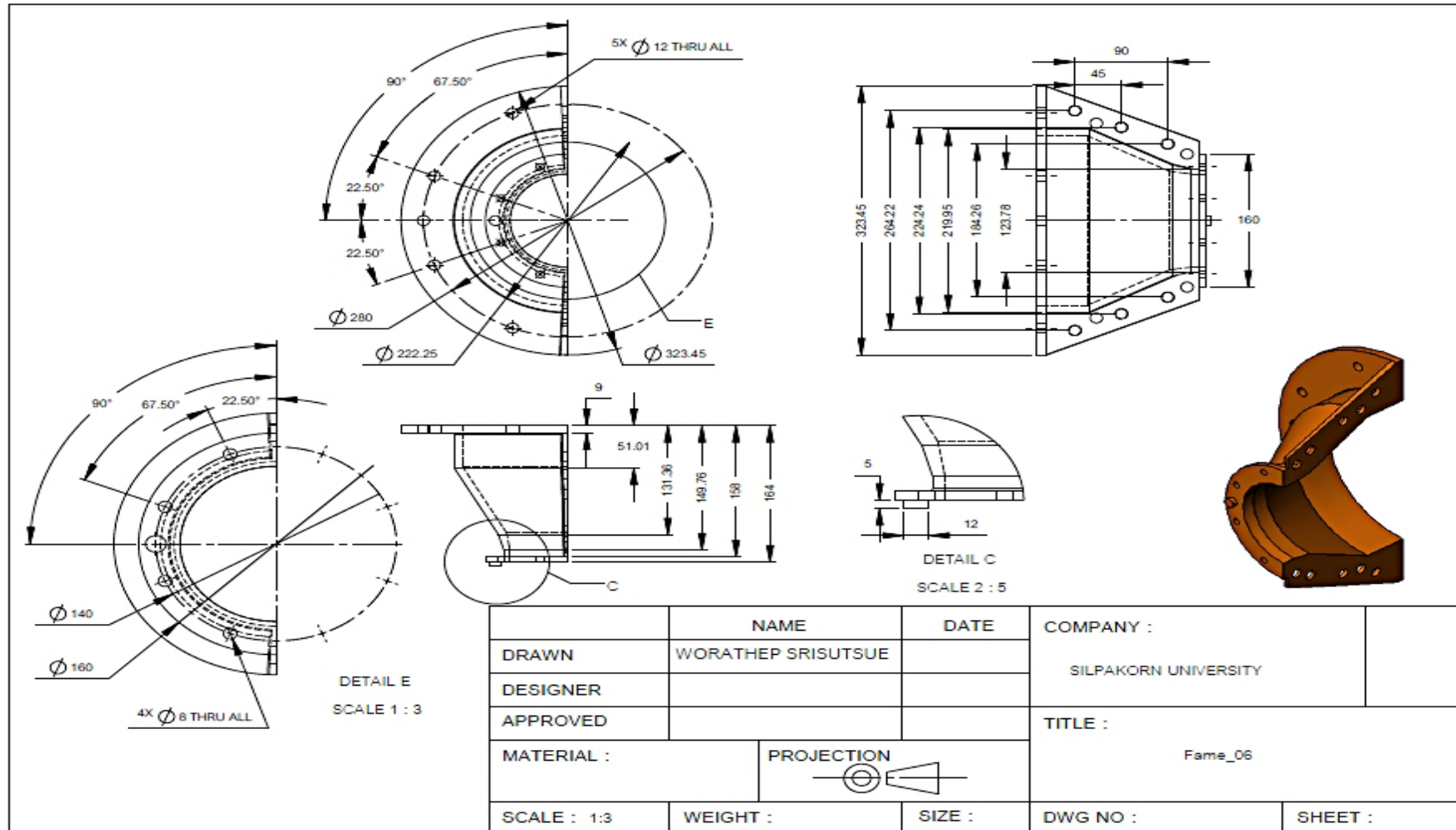
รูปที่ ค-16 Drawing แสดงขนาด Frame_03



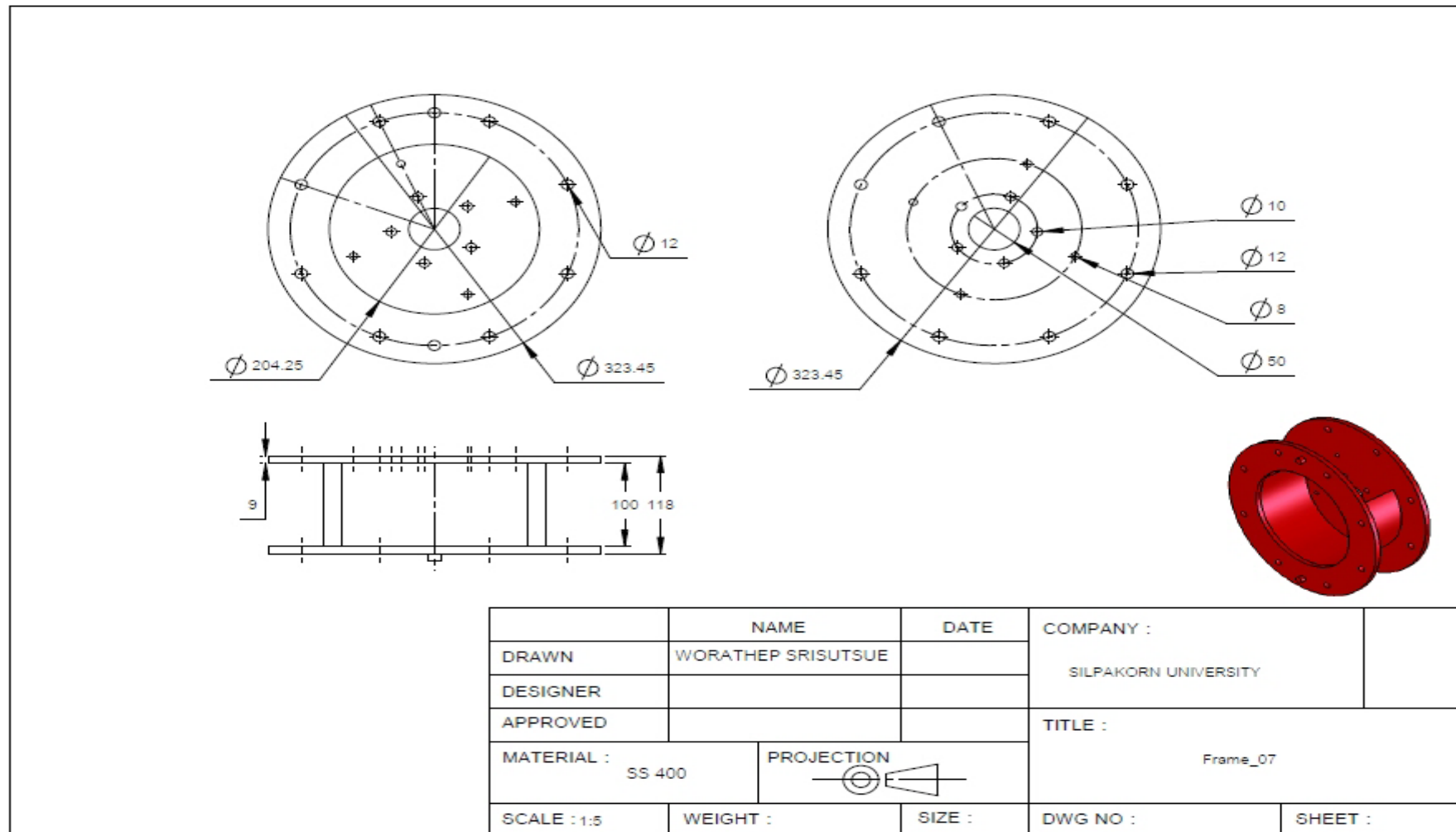
รูปที่ ค-17 Drawing แสดงขนาด Frame_04



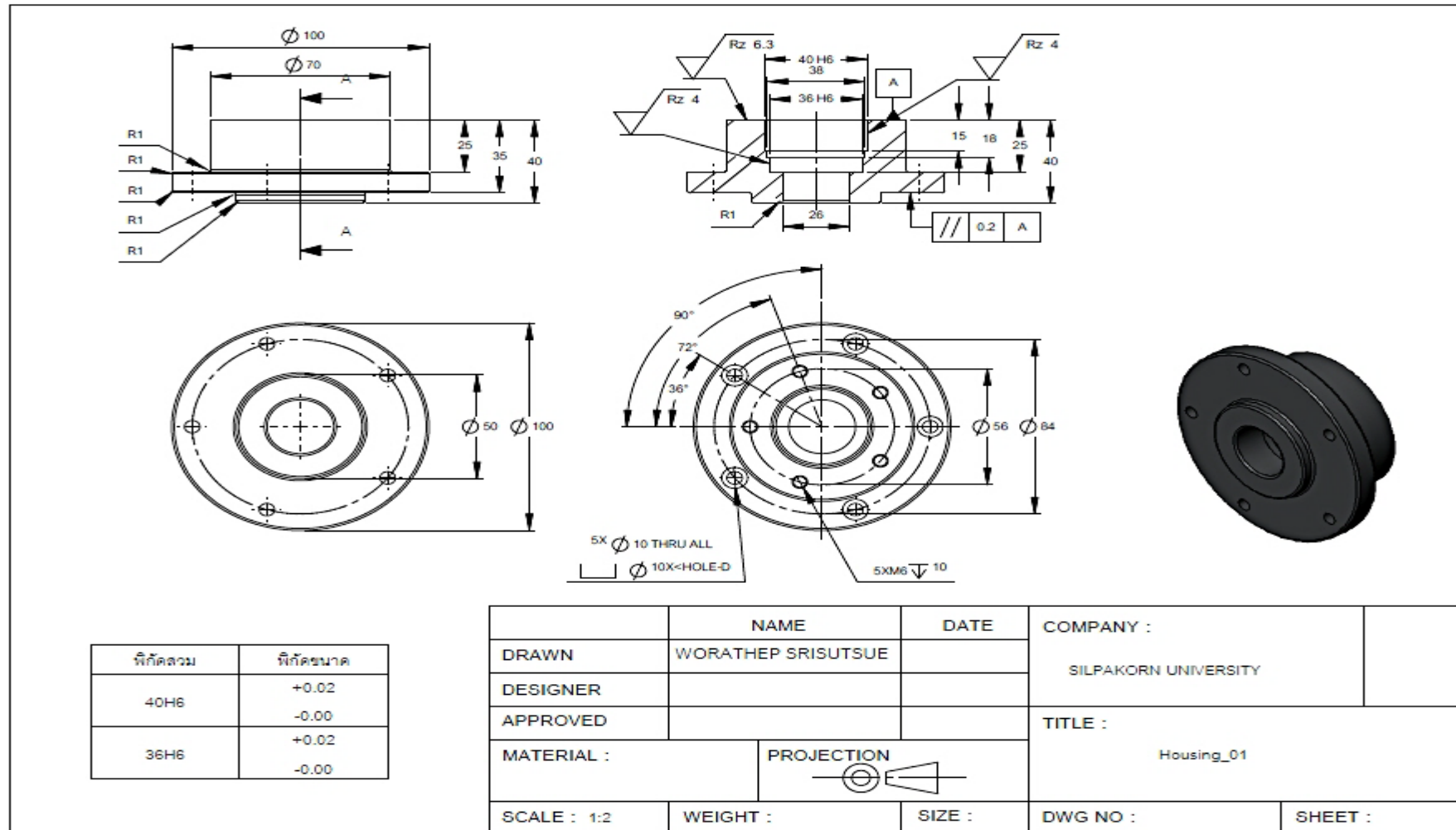
รูปที่ ค-18 Drawing แสดงขนาด Frame_05



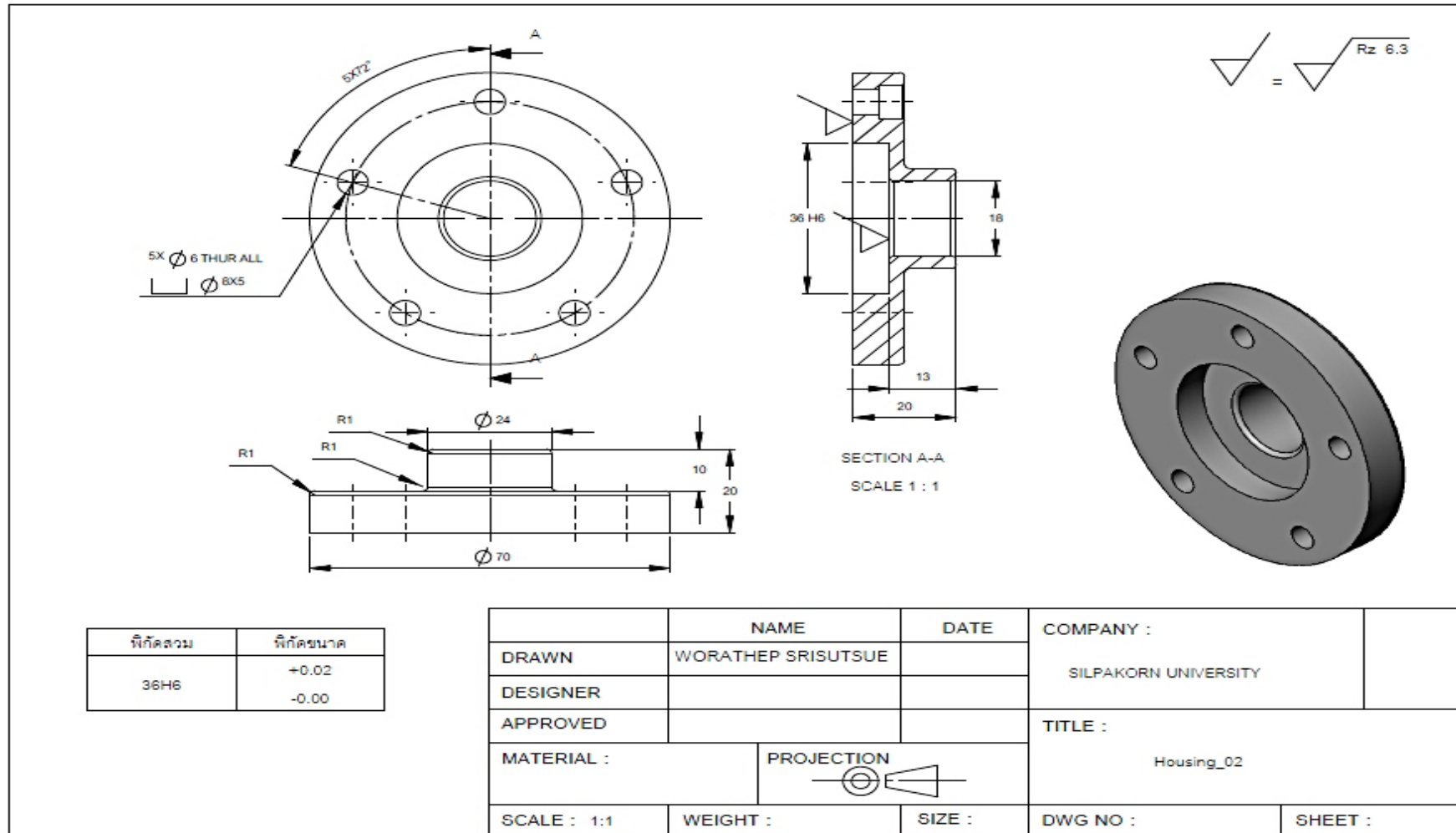
รูปที่ ค-19 Drawing แสดงขนาด Frame_06



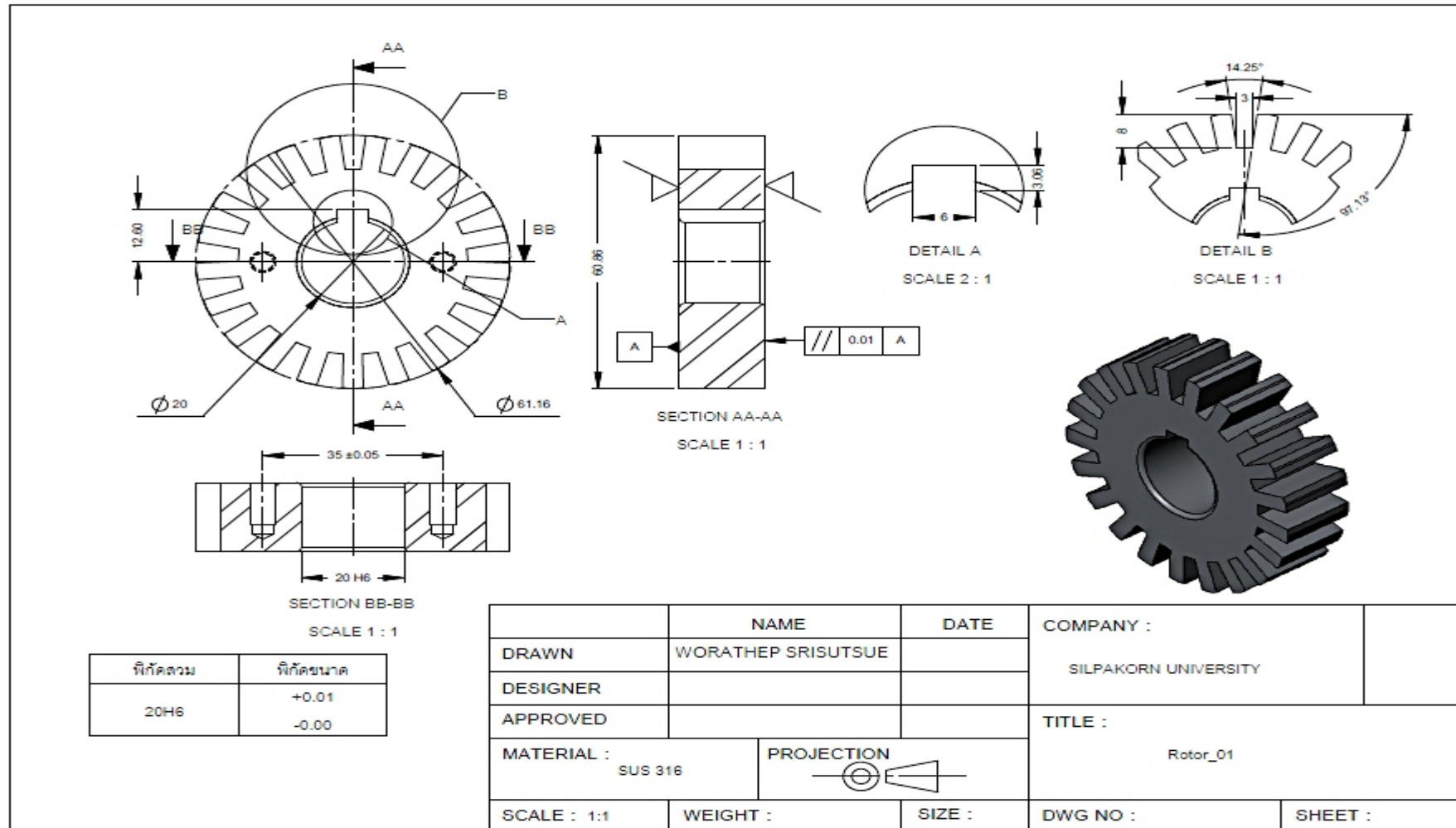
รูปที่ ค-20 Drawing แสดงขนาด Frame_07



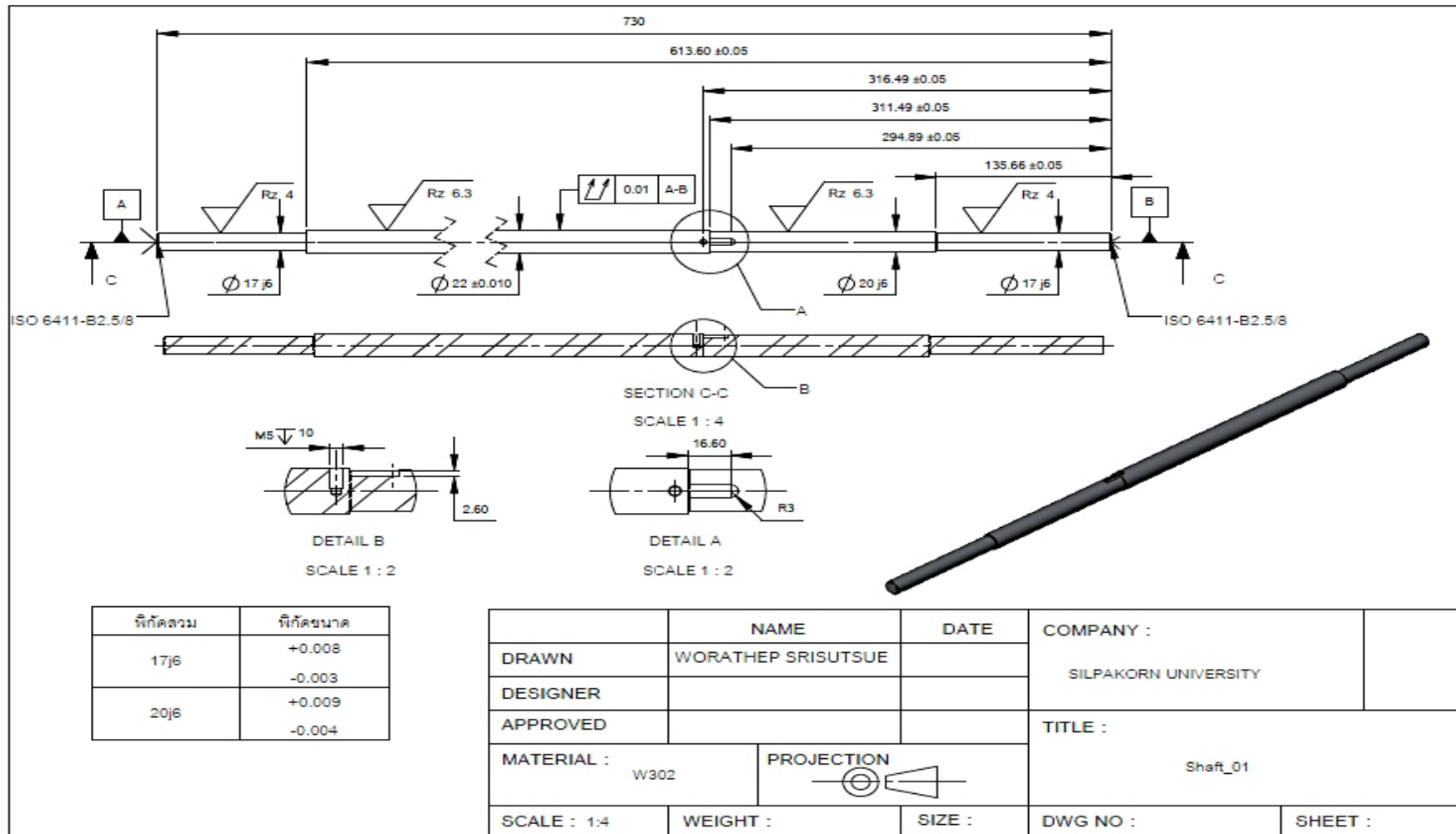
รูปที่ ค-21 Drawing แสดงขนาด Housing_01



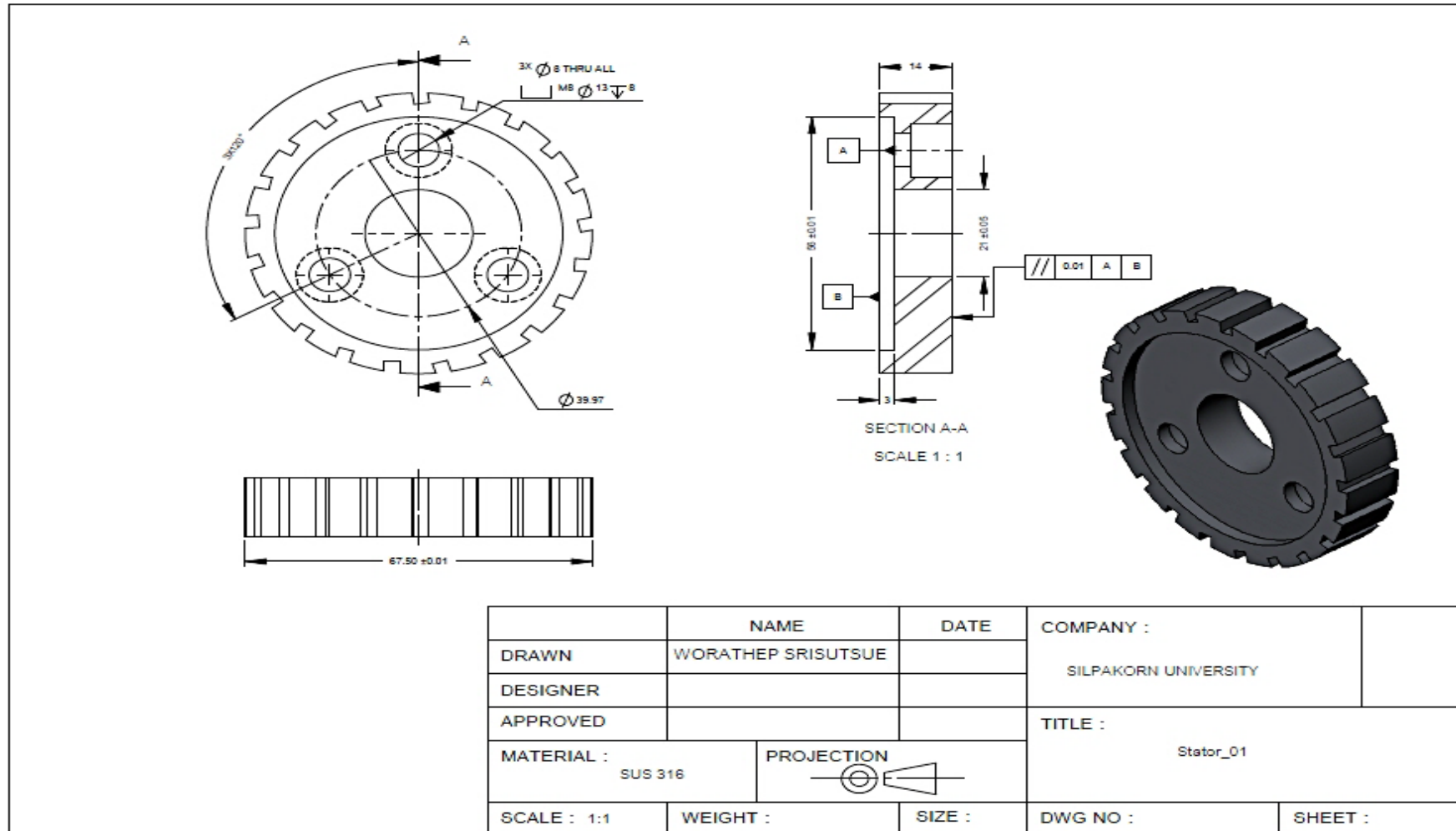
รูปที่ ค-22 Drawing แสดงขนาด Hosing_02



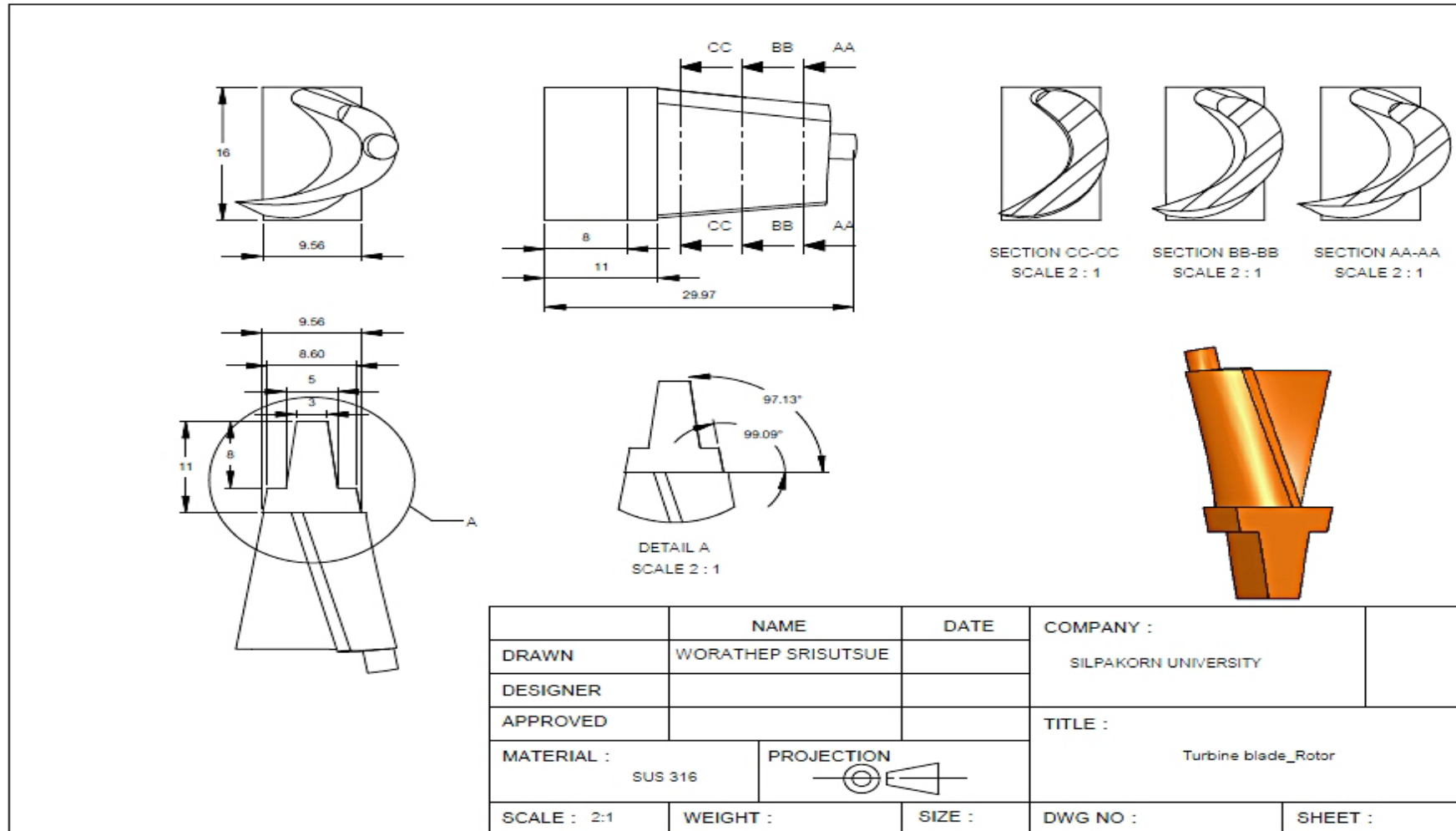
รูปที่ ค-23 Drawing แสดงขนาด Rotor_01



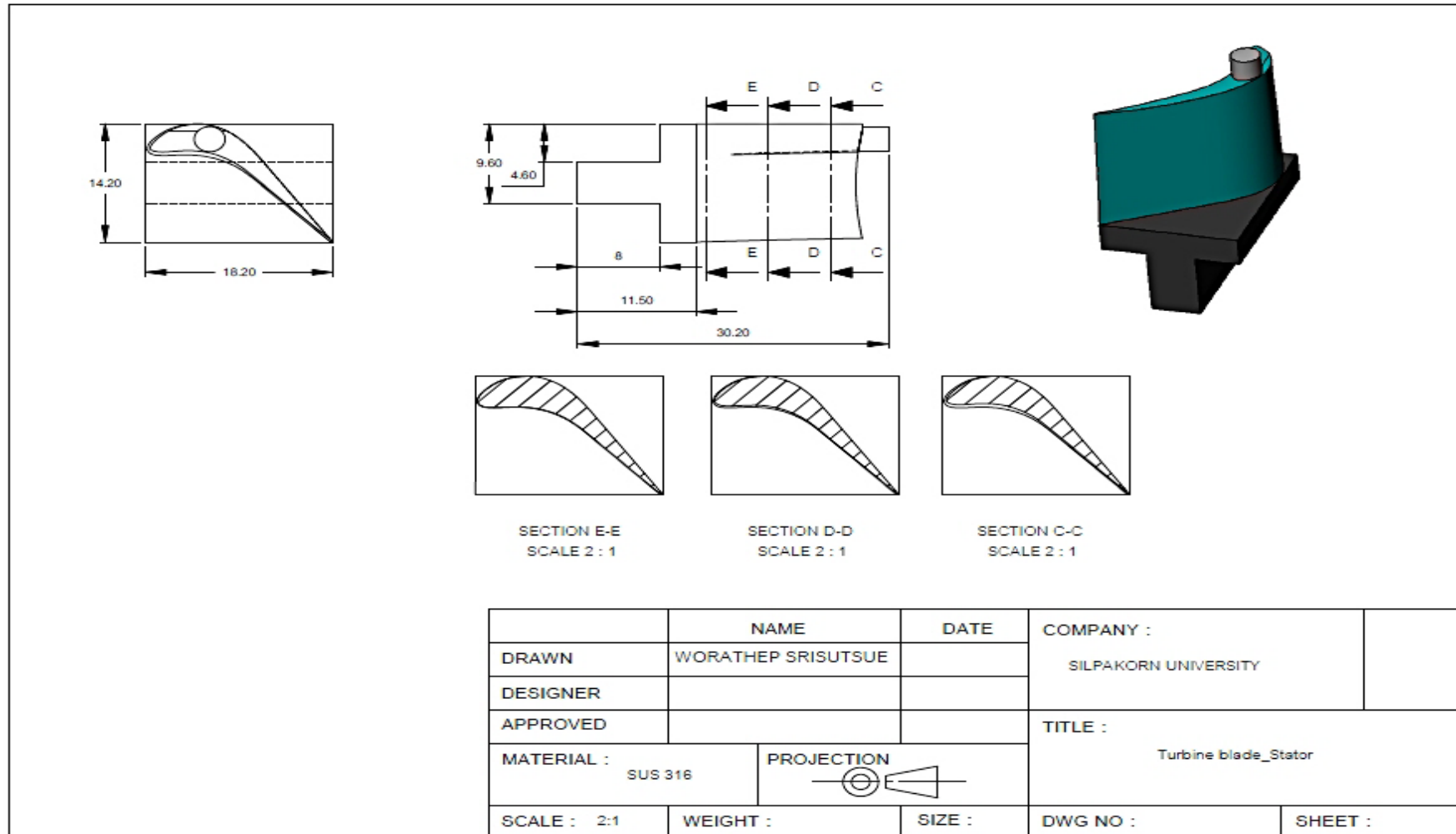
รูปที่ ค-24 Drawing แสดงขนาด Shaft_01



รูปที่ ค-25 Drawing แสดงขนาด Stator_01



รูปที่ ค-26 Drawing แสดงขนาด Turbine blade_Rotor



รูปที่ ค-27 Drawing แสดงขนาด Turbine blade_Stator

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-นามสกุล นายวรเทพ สีสัตย์ชื่อ

ที่อยู่ 34 หมู่ 5 ตำบลบางพลวง อำเภอบ้านสร้าง จังหวัดปราจีนบุรี 25150

ประวัติการศึกษา

- พ.ศ 2548 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเส้นใย
สังเคราะห์ จากสถาบันเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อ.ธัญบุรี จ. ปทุมธานี
- พ.ศ 2548 ศึกษาต่อระดับปริญญาโทบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร