

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

**การออกแบบและพัฒนาชุดทดสอบการรั่วซึมสำหรับชั้นวางเซลล์เชื้อเพลิง
แบบออกไซด์ของแข็งแบบแผ่น**

**Design and Development of the leakage test rig for the stack of Planar
Solid oxide fuel cell**



โดย

นายสมคิด

ชัยแก้ว

นายไพรวรรณ

มุกภาพร

นายภักพงษ์

ทิพย์สุด

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.จรัสวัตร

เจริญสุข

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน..... 83719

วัน,เดือน,ปี..... 15 ก.ย. 2551

b. 119 82305
i.....

**ปริญญาบัตรนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2550**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2550

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบและพัฒนาชุดทดสอบการรั่วซึมสำหรับชั้นวางเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์
ของแข็งแบบแผ่น

Design and Development of the leakage test rig for the stack of Planar Solid oxide
fuel cell

ผู้จัดทำ

1. นาย สมคิด ชัยแก้ว
2. นาย ไพรวรรณ มุทาพร
3. นาย กัทพงษ์ ทิมพิ์สุด

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบและพัฒนาชุดทดสอบการรั่วซึมสำหรับชิ้นวางเซลล์เชื้อเพลิงแบบ ออกไซด์ของแข็งแบบแผ่น

นาย สมคิด	ชัยแก้ว	48015399
นาย ไพรวรรณ	มูทาพร	48015386
นาย ภัทพงษ์	พิมพ์สุด	48015429
รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข		อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2550		

บทคัดย่อ

เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง (Solid Oxide Fuel cell, SOFC) เป็นเซลล์เชื้อเพลิงประเภทหนึ่งที่สามารถเปลี่ยนก๊าซเชื้อเพลิงเป็นกระแสไฟฟ้าและพลังงานความร้อนได้โดยตรง แต่จากการวิจัยที่ผ่านมาพบปัญหาการรั่วซึมของแก๊สเชื้อเพลิงและอากาศเกิดขึ้นที่บริเวณจุดเชื่อมต่อ ระหว่างอินเตอร์คอนเนกเตอร์กับเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง (Solid Oxide Fuel cell, SOFC) ส่งผลให้ประสิทธิภาพโดยรวมที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าลดลง และยังทำให้เกิดความร้อนสูงที่บริเวณที่เกิดการรั่ว (hotspot) ดังนั้นปัญหาของการป้องกันการรั่วซึมของแก๊สที่บริเวณจุดเชื่อมต่อจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญในการวิจัย บทความนี้จะได้กล่าวถึงการออกแบบชุดทดสอบ เพื่อป้องกันการรั่วซึมของแก๊สเชื้อเพลิงและอากาศที่บริเวณจุดเชื่อมต่อระหว่างอินเตอร์คอนเนกเตอร์กับเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง โดยการออกแบบอยู่บนพื้นฐานของ point load และ uniform load 0-3000 N กระทำกับอินเตอร์คอนเนกเตอร์ วัสดุที่ใช้ทำคือเหล็กสแตนเลส (Stainless Steel 430) ร่องป้องกันการรั่วเป็นรูปตัว U ขนาดความกว้าง 2 mm ลึก 2 mm วัสดุที่ใช้ฉนวนคือไมก้า (mica) โดยผลการออกแบบการกระจายแรงกดที่บริเวณจุดเชื่อมต่อ (อินเตอร์คอนเนกเตอร์) จะถูกอธิบายโดยเทคนิค Pressure Indicating Film และผลการออกแบบการวัดการรั่วถูกวัดด้วย manometer ตามมาตรฐานของ (ASTM F 37-89)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Design and Development of the leakage test rig for the stack of Planar Solid Oxide Fuel Cell

Mr. Somkid	Chailkaew	48015399
Mr. Priwan	Muthapon	48015386
Mr. Pukpong	Pimsood	48015429
Asst. Prof. Dr. Jaruwat	Charoensok	Advisor

ABSTRACT

Experiment had suggested that problem of gas leakage at the connecting point of the cell stack between the interconnecting zone and Solid Oxide fuel cell (SOFC) is one of the major issues in SOFC development. The gas leak leads to a deficit in overall efficiency, and temperature rise (hot spot). This paper focuses on the design of the connection at the part of fuel cell stack in order to prevent leakage of fuel gas. The design concept is based on point load and uniform load 0-3000 N. The interconnector is stainless steel 430. The groove was made in order to prevent leakage which is a having a width of 2 mm and a depth of 2 mm. Mica was used for preventing leakage. Compressive force distribution at contact plate will be explained by the Pressure Indicating Films and measurement leakage by manometer follow to base of ASTM F 37-89

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ได้จัดทำขึ้นเพื่อประกอบการเรียนวิชาโปรเจคต์ของนักศึกษาระดับปริญญาตรี เพื่อให้นักศึกษาสามารถนำความรู้ในภาคทฤษฎีมาถ่ายทอดเป็นการปฏิบัติการ เป็นการเพิ่มพูนองค์ความรู้และประสบการณ์ให้แก่ศึกษาอย่างครบถ้วน

ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาให้ความช่วยเหลือ ประคับประคองชี้แนะแนวทางการทำงานและแก้ไขปัญหา ตลอดจนถ่ายทอดความรู้และ ประสบการณ์ในการทำงาน จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ในการช่วยสนับสนุนเครื่องมือและ อุปกรณ์ในงานวิจัย และพี่ ฤกษ์วิชัยของศูนย์ฯ ทุก ๆ ท่าน

ขอกราบขอบพระคุณ สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ) และ สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ) ที่ช่วยสนับสนุนด้านแหล่งเงินทุนในงานวิจัย

ขอขอบคุณ นายนิติชัย ปัญญาบุตรกุล (พีไอค) ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ที่ได้ให้ความกรุณาช่วยเหลือในการทำงาน เป็นที่ปรึกษา และช่วยแก้ไขปัญหาดังกล่าวระหว่างการ ทำงาน ตลอดจนจัดหาอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยจนเสร็จสิ้นสมบูรณ์

ขอขอบคุณ นายธีรพัฒน์ ชมภูคำ(พีเซีย) และ นาย พิศาล มูลอำคา(พีเต็ม) และพี่ๆนักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง ที่ช่วยให้คำปรึกษาและ ช่วยสร้างอุปกรณ์ในงานวิจัย และขอขอบคุณ นายปัญญาพงศ์ พิบูลย์ และคณะ นักศึกษาของภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ในการสร้างอุปกรณ์ ตลอดจนเพื่อนๆ ทุกคนที่มีส่วน ช่วยเหลือในการทำงานวิจัยจนนำไปสู่ความสำเร็จของการทำปริญญาานิพนธ์เล่มนี้

ท้ายสุดนี้ สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและบูชายิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอด ประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

นาย สมคิด	ชัยแก้ว
นายไพรวรรณ	มูทาพร
นาย ภัทพงษ์	พิมพ์สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้าที่

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญภาพ.....	VIII
รายการสัญลักษณ์.....	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	2
1.3 ขอบเขตของการทำโครงการ.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิง	4
2.1 บทนำ.....	4
2.2 ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิง.....	4
2.3 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง.....	7
บทที่ 3 ทฤษฎีในการออกแบบ	9
3.1 การถ่ายเทความร้อน.....	9
3.1.1 การนำความร้อน (Conduction heat transfer).....	9
3.1.2 การพาความร้อน (Convection heat transfer).....	16
3.1.3 การแผ่รังสีความร้อน (Radiation heat transfer).....	19
3.2 การออกแบบเตาอบไฟฟ้า.....	20
3.3 ทฤษฎีของสลักเกลียว.....	24
3.3.1 มาตรฐานและค่าจำกัดความ.....	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้าที่
3.3.2 สลักเกลียว.....	29
3.3.3 ความแข็งแรงของรอยต่อที่ยึดด้วยสลักเกลียว.....	30
3.3.4 ความต้านแรงของสลักเกลียว.....	32
3.3.5 แรงดึงในรอยต่อที่เกิดจากไหลดภายนอก.....	36
3.3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดในสลักเกลียวกับแรงดึง.....	37
บทที่ 4 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	40
4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	40
4.2 วิธีการทดลอง.....	46
4.2.1 ทดสอบการกระจายตัวของแรงกดที่ชุดอินเตอร์คอนเนกเตอร์.....	46
4.2.2 ทดลองการรั่วซึมของแก๊สที่อุณหภูมิห้อง.....	48
บทที่ 5 ผลการทดลอง.....	52
5.1 ผลการทดลองการกระจายตัวของแรงกดที่ชุดอินเตอร์คอนเนกเตอร์.....	52
5.1.1 ผลการทดลองโดยการเขวบน้ำหนัก.....	52
5.1.1.3 ข้อสังเกตจากผลการทดลอง.....	66
5.1.2 ผลการทดลองโดยใช้สลักเกลียวยึด 4 ตัว.....	67
5.1.2.2 ข้อสังเกตจากผลการทดลอง.....	72
5.2 ผลการทดลองการรั่วซึมของแก๊ส ที่อุณหภูมิห้อง.....	73
5.2.1 ผลการทดลองโดยการเขวบน้ำหนัก.....	73
5.2.2 ผลการทดลองโดยการใช้สลักเกลียว.....	74
ตารางที่ 5-4 ผลการทดลองการรั่วซึมโดยการเขวบน้ำหนัก.....	75
ตารางที่ 5-5 ผลการทดลองการรั่วซึมโดยการใช้สลักเกลียว.....	76
บทที่ 6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	77
6.1 สรุปผลการทดลอง.....	77
6.1.1 สรุปผลการทดลองการกระจายตัวของแรงที่กดชุดอินเตอร์คอนเนกเตอร์.....	77
6.1.2 สรุปผลการทดลองการรั่วซึมของแก๊สโดยที่ไม่กำเป็นตัวผนึกแก๊ส.....	77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้าที่

6.2 วิจารณ์ผลการทดลอง.....	78
6.3 ข้อเสนอแนะ.....	79
บรรณานุกรม.....	80



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้าที่
ตารางที่ 3-1	แสดงการนำความร้อนของวัสดุชนิดต่าง ๆ 15
ตารางที่ 3-2	ตัวอย่างค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) 18
ตารางที่ 3-3	แสดงระยะทางมากที่สุดระหว่างช่วงต่อช่วงของเส้นลวดที่แนะนำให้ใช้ 22
ตารางที่ 3-4	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นที่หน้าตัดของเกลียว Coarse – Pitch และ Fine – Pitch 26
ตารางที่ 3-5	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นที่หน้าตัดมาตรฐานของ Unified Screw Threads UNC and UNF 27
ตารางที่ 3-6	ระยะพิทช์สำหรับเกลียวที่มีจุดยอดเมื่อนำมาใช้เป็นสกรูส่งกำลัง 28
ตารางที่ 3-7	ข้อแนะนำสำหรับการหาความแกร่งของสลักเกลียวและสกรูยึดชิ้นงาน 32
ตารางที่ 3-8	SAE Specification for steel Bolts 34
ตารางที่ 3-9	คุณสมบัติทางกลของสลักเกลียว สกรู และเกลียวปล้อย 34
ตารางที่ 3-10	ASTM Specification for Steel Bolts 35
ตารางที่ 3-11	ค่าความแกร่งของสลักเกลียว 12 NC ขนาด ¼ นิ้ว 37
ตารางที่ 3-12	การแจกแจงแรงกระทำเบื้องต้นในสลักเกลียว – F_t ที่ไม่มีการหล่อลื่น 38
ตารางที่ 3-13	การแจกแจงแรงกระทำเบื้องต้นในสลักเกลียว – F_t ที่มีการหล่อลื่น 39
ตารางที่ 3-14	Torque Factor – K 39
ตารางที่ 4-1	Physical Property of Muscovite and Phlogopite micas 45
ตารางที่ 5-1	ผลการทดลอง ลักษณะการกระจายตัวของแรงผ่าน Point load และ ท่อลูมินา ไปยังแผ่น Pressure Indicating Films ครั้งที่ 1 52
ตารางที่ 5-2	ผลการทดลองลักษณะการกระจายตัวของแรงผ่าน Point load และ ท่อลูมินา ไปยังแผ่น Pressure Indicating Films ครั้งที่ 2 58
ตารางที่ 5-3	ลักษณะการกระจายตัวของแรงโดยการใช้สลักเกลียว 4 ตัว (4 Point Loads) ไปยังแผ่น Pressure Indicating Films ครั้งที่ 1 67
ตารางที่ 5-4	ผลการทดลองการรั่วซึมโดยการแขวนน้ำหนัก 75
ตารางที่ 5-5	ผลการทดลองการรั่วซึมโดยการใช้สลักเกลียว 76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

	หน้าที่
รูปที่ 2-1	การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง 7
รูปที่ 3-1	การนำความร้อนผ่านผนังเรียบ 10
รูปที่ 3-2	วงจรความร้อนสมมูลสำหรับผนังหลายชั้นอย่างอนุกรม 13
รูปที่ 3-3	แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิต่อการนำความร้อน 15
รูปที่ 3-4	การพัฒนาชั้นขอบเขตในการพาความร้อน 16
รูปที่ 3-5	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตร- กำลังไฟฟ้า- อุณหภูมิ ของเตา ที่มีฉนวนกันความร้อน 20
รูปที่ 3-6	แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์อุณหภูมิกายในเตา และ Surface load 21
รูปที่ 3-7	ส่วนต่างๆ ของสกรู 24
รูปที่ 3-8	โปรไฟล์ของเกลียวพื้นฐาน โดย $H = 0.5(3)^{1/2} p$ 25
รูปที่ 3-9	เกลียวที่มีรูปทรงสี่เหลี่ยมกับรูปทรงที่มีจุดยอด 28
รูปที่ 3-10	สลักเกลียวหัวหกเหลี่ยม 29
รูปที่ 3-11	นอตยึดสลักเกลียวหัวหกเหลี่ยม 30
รูปที่ 3-12	การใช้สลักเกลียวและนอตในการจับยึดชิ้นงาน 31
รูปที่ 3-13	กราฟฮีสโตแกรมของค่าความต้านแรงสูงสุดของสลักเกลียว 33
รูปที่ 4-1	ฉนวนกันความร้อนและเตาอบไฟฟ้า 40
รูปที่ 4-2	ชุดอินเตอร์คอนเน็กเตอร์ (Interconnector) 41
รูปที่ 4-3	โครงสร้างของชุดบ่อนแรงและท่ออลูมิเนียมที่ประกอบชุด Interconnector 42
รูปที่ 4-4	อุปกรณ์วัดการรั่วซึม 43
รูปที่ 4-5	Load Cell 43
รูปที่ 4-6	ถังแก๊สฮีเลียม 44
รูปที่ 4-7	อุปกรณ์ควบคุมและวัดความดัน 44
รูปที่ 4-8	แผ่นไมก้า (Mica) 45
รูปที่ 4-9	อุปกรณ์ทดสอบแรงกด 46
รูปที่ 4.10	การประกอบอุปกรณ์วัดแรงกด Load cell 47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้าที่
รูปที่ 4-11	การติดตั้งแผ่น Pressure films..... 47
รูปที่ 4-12	ลักษณะการสัมผัสกันของแผ่น Pressure Films..... 48
รูปที่ 4-13	ชุดป้อนแรงที่ประกอบด้วยเตาอบไฟฟ้าและท่ออลูมิเนียม..... 49
รูปที่ 4-14	การติดตั้ง Pressure regulator gage..... 49
รูปที่ 4-15	ลักษณะการเดินท่อแก๊สฮีเลียมในท่ออลูมิเนียมเข้าสู่ Interconnector..... 50
รูปที่ 4-16	ลักษณะไม่ก้ำที่ใส่เข้าไปในร่องของตัว Interconnector..... 50
รูปที่ 4-17	การวัดการรั่วซึมโดยมานอมิเตอร์..... 51
รูปที่ 5-1	กราฟผลการทดลอง ระหว่าง Leakage Rate กับ Compressive force โดยการเขวบน้ำหนัก..... 73
รูปที่ 5-2	กราฟผลการทดลอง ระหว่าง Leakage Rate กับ Loads โดยการใช้สลักเกลียว 4 ตัว..... 74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ชื่อ/ความหมาย
ΔT	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ, °K
Δt	เวลา, Sec
d	เส้นผ่านศูนย์กลางหลอดแก้ว, m
Δt	เวลาที่ใช้ในการทดสอบ, Sec
P	กำลังไฟฟ้า, Watt
V	แรงเคลื่อนไฟฟ้า, Volt
L	ความยาวของเตาไฟฟ้า, m
k	ค่าสภาพการนำความร้อนของวัตถุ, W/m.°K
h	ระดับของเหลว, cm
K	สัมประสิทธิ์ของโมเมนต์บิด
ρ	ความต้านทานจำเพาะของฮีตเตอร์
ΔV	ปริมาตรแก๊ส, cm ³
A	พื้นที่หน้าตัด, m ²
α	สัมประสิทธิ์การขยายตัวของวัตถุ, °K ⁻¹
I	กระแสไฟฟ้า, Amp
q	การนำความร้อน, Watt
r_1, r_2	รัศมีภายใน, ภายนอก ของเตาไฟฟ้า, m
Ct	สัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิของฮีตเตอร์
F_i	Preload, N
T	ทอร์ค, N.m
d	เส้นผ่านศูนย์กลางสลักเกลียว, mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มา

ปัจจุบันความเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว มีการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นอย่างมาก ปัญหาที่ตามมาคือการขาดแคลนพลังงาน และปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เสื่อมโทรมอันเกิดจากการใช้พลังงานที่ผ่านการเผาไหม้โดยตรงก่อให้เกิดมลพิษ การแสวงหาพลังงานทดแทนแหล่งใหม่ ๆ และไม่ทำให้เกิดปัญหาด้านมลพิษเป็นเรื่องที่มีความจำเป็นในปัจจุบัน แหล่งพลังงานต่างๆ ดังกล่าว ได้แก่ พลังงานจากชีวมวล พลังน้ำ พลังงานแสงอาทิตย์ และลม เป็นต้น ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีด้านพลังงานที่ไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเกิดขึ้นอย่างกว้างขวาง เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell) เป็นเทคโนโลยีด้านพลังงานชนิดหนึ่งที่ได้มีการวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยหลักการของเซลล์เชื้อเพลิงเมื่อมีการป้อนเชื้อเพลิงจำพวกสารประกอบไฮโดรคาร์บอนด์และออกซิเจนเข้าไปอย่างสม่ำเสมอ โดยมีสารอิเล็กโทรไลต์ ขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทดเป็นอุปกรณ์พื้นฐานที่จะทำให้เกิดกระบวนการเปลี่ยนพลังงานเคมีของเชื้อเพลิง เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรงและจะสามารถผลิตพลังงานได้อย่างต่อเนื่องตรงเท่าที่มีการป้อนเชื้อเพลิงและมีการออกซิไดซ์ในทางทฤษฎีเซลล์เชื้อเพลิงสามารถประยุกต์ใช้งานกับอุปกรณ์ไฟฟ้าได้ทุกชนิด แต่ในขั้นตอนของการพัฒนาเทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อให้เกิดประโยชน์ในด้านการใช้งานนั้น ยังมีข้อจำกัดสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงบางชนิดที่ต้องมีการพัฒนาด้านวัสดุศาสตร์ เช่น วัสดุที่ใช้จะต้องสามารถทนความร้อนได้ ทนการกัดกร่อนระหว่างการทำปฏิกิริยากันกับแก๊สเชื้อเพลิง และการผนึกแก๊สเชื้อเพลิงไม่ให้รั่วไหลออกมาในระหว่างการทำงานและตลอดระยะเวลาการทำงาน เป็นต้น ซึ่งปัจจัยเหล่านี้เป็นประเด็นที่ต้องมีการวิจัยเพื่อให้ได้มาซึ่งเซลล์เชื้อเพลิงที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด [1].

ในโครงการนี้จะได้กล่าวถึงการออกแบบและสร้างอุปกรณ์เพื่อทดสอบการรั่วซึมของแก๊สโดยการออกแบบชั้นวางเซลล์ (Interconnector) จากนั้นเป็นการศึกษาวัสดุที่ใช้ผนึกแก๊สเชื้อเพลิงสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง แบบแผ่น (SOFC) เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้จะเริ่มกระบวนการทำปฏิกิริยากับแก๊สเชื้อเพลิงและอากาศที่อุณหภูมิสูงจึงเป็นปัญหาว่า เมื่อต้องทำงานที่สภาวะนั้นเป็นเวลานานๆ จะเกิดการเสียรูปทรงของวัสดุที่ใช้ทำ และเกิดการรั่วซึมของแก๊สเชื้อเพลิงและอากาศขึ้น ส่งผลกระทบให้เกิดความร้อนสูงและการทำปฏิกิริยาเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ ทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมลดลง โดยผลการทดลองที่ได้จากงานวิจัยนี้จะนำไปเป็นข้อมูลในการพัฒนาแบบของชั้นวางเซลล์และวัสดุที่ใช้ผนึกแก๊สสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็งแบบแผ่นต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. ออกแบบและสร้างอุปกรณ์ทดสอบการรั่วซึมของแก๊ส ระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็งแบบแผ่น กับชุดอินเตอร์คอนเนกเตอร์ (Interconnector Stainless 430)
2. ศึกษารูปแบบการผนึกแก๊สและวัสดุที่ใช้ผนึกเพื่อลดปัญหาการรั่วซึมของแก๊สสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง โดยการออกแบบชุดอินเตอร์คอนเนกเตอร์ (Interconnector) และใช้แผ่นไม้ก้ำเป็นตัวผนึกแก๊ส โดยใช้แก๊สฮีเลียมเป็นแก๊สทดสอบ

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1. สร้างอุปกรณ์เพื่อทดสอบการรั่วซึมของแก๊ส
2. ทดสอบการกระจายตัวของแรงกดบริเวณผิวสัมผัสของชุดอินเตอร์คอนเนกเตอร์ (Interconnector) โดยใช้เทคนิคของแผ่น Pressure Indicating Film เพื่อศึกษาลักษณะการกระจายตัวของแรงกดที่มีอิทธิพลต่อการรั่วซึม
3. ทดลองการรั่วซึมของแก๊ส โดยใช้แก๊สฮีเลียม และใช้แผ่นไม้ก้ำเป็นตัวผนึกแก๊ส

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาลักษณะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง
2. สืบค้นและศึกษาข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
3. ออกแบบอุปกรณ์บริเวณชั้นวางเซลล์ที่จะทดสอบการรั่วซึม และอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในการทดลอง
4. สร้างอุปกรณ์และติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลอง
5. ทดลองใช้งานอุปกรณ์ที่สร้างเสร็จในเบื้องต้น
6. ทำการทดสอบการกระจายตัวของแรงที่กดชุดอินเตอร์คอนเนกเตอร์ (Interconnector) และทดสอบการรั่วซึมของแก๊ส
7. ศึกษาผลการทดลองที่ได้
8. สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงปัญหาและองค์ประกอบของการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง
2. สามารถออกแบบและพัฒนาวัสดุที่ใช้สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็งแบบแผ่น เพื่อนำมาประยุกต์ใช้งานกับอุปกรณ์ไฟฟ้าได้
3. เซลล์เชื้อเพลิงเมื่อมีการพัฒนาถึงขั้นเป็นรูปผลิตภัณฑ์ จะมีประโยชน์มากมายสามารถใช้งานได้ทุกที่ทุกเวลาทุกอุปกรณ์ไฟฟ้า และไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม
4. ประสบการณ์ในการออกแบบอุปกรณ์ และการใช้เครื่องมือในการสร้างอุปกรณ์ และทดลอง
5. ประสบการณ์ในการทำงานเมื่อต้องร่วมงานกับหลายหน่วยงาน เป็นต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

เทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิง

2.1 บทนำ

ในปัจจุบันเซลล์เชื้อเพลิงมีอยู่มากมายหลากหลายชนิดแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับการออกแบบและชนิดของวัสดุที่ใช้ทำ โดยทั่วไปการออกแบบเซลล์จะประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลัก ๆ ได้แก่ ขั้นตอนการพัฒนาวัสดุสำหรับเซลล์เชื้อเพลิง ขั้นตอนการพัฒนาชุดทดสอบสำหรับเซลล์เชื้อเพลิง และขั้นตอนการพัฒนาสาธารณูปโภคโดยใช้เซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งในเบื้องต้นนี้จะได้นำเสนอชนิดของเซลล์เชื้อเพลิงบางส่วนที่มีการใช้งานและกำลังพัฒนาอยู่ในขณะนี้ จากนั้นจะเป็นการอธิบายถึงหลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง ซึ่งเป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่เกี่ยวกับงานวิจัยนี้

2.2 ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิง [2].

เซลล์เชื้อเพลิงที่มีใช้ในปัจจุบันมีหลายแบบซึ่งประกอบด้วยดังต่อไปนี้

2.2.1. เซลล์เชื้อเพลิงแบบกรดฟอสฟอริก (Phosphoric Acid)

เซลล์ชนิดนี้ใช้กรดฟอสฟอริกเป็นสารอิเล็กโทรไลต์ โดยปัจจุบันมีการผลิตเซลล์แบบนี้ออกมาเพื่อจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ เซลล์แบบกรดฟอสฟอริกทำงานในช่วงอุณหภูมิประมาณ 150 – 200 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิต่ำกว่านี้กรดฟอสฟอริกจะนำประจุไฟฟ้าได้น้อย เซลล์มีประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ แต่ว่าสามารถใช้ประโยชน์จากไอน้ำร้อนที่เกิดขึ้นโดยนำไปใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าวร่วม (cogeneration) ต่อได้

ข้อดี – เป็นเซลล์ที่สามารถใช้กับเชื้อเพลิงได้หลายชนิดแม้แต่น้ำมันเชื้อเพลิง แต่ต้องกำจัดกำมะถันในน้ำมันออกให้เหลือน้อยที่สุดก่อน

ข้อด้อย – ต้องใช้โลหะแพลทินัมที่มีราคาสูงเป็นสารเร่งปฏิกิริยา เซลล์มีขนาดใหญ่ น้ำหนักมากมีประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าต่ำเมื่อเทียบกับเซลล์ชนิดอื่น ชิ้นส่วนภายในจำเป็นต้องใช้วัสดุที่ทนทานต่อการกัดกร่อนของกรดได้ดี

2.2.2. เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange Membrane-PEM)

เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้อิเล็กโทรไลต์ในรูปแบบแผ่นโพลีเมอร์บาง ทำงานในสภาวะอุณหภูมิประมาณ 40 องศาเซลเซียส มีประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าประมาณ 40 - 50 เปอร์เซ็นต์สามารถให้พลังงานไฟฟ้าได้ตั้งแต่ช่วง 50-250 กิโลวัตต์

ข้อดี-เนื่องจากเซลล์ชนิดนี้ทำงานที่อุณหภูมิต่ำและใช้สารอิเล็กโทรไลต์เป็นของแข็ง จึงไม่มีปัญหาการรั่วซึมเกิดการกัดกร่อนน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อเสีย – ต้องใช้เชื้อเพลิงที่มีความบริสุทธิ์สูงเท่านั้น และใช้โลหะแพลทินัมเป็นสารเร่งปฏิกิริยา ซึ่งราคาแพง อีกทั้งแผ่นเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตรอนก็มีราคาสูงอีกด้วย

2.2.3 เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง (Solid Oxide)

เซลล์ชนิดนี้ใช้อิเล็กโทรไลต์ที่เป็นของแข็งทำจากสารประกอบเซรามิก เช่น เซอร์โคเนียออกไซด์เป็นต้น มีประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์และหากนำมาใช้กับระบบการผลิตกระแสไฟฟ้าแบบความร้อนร่วมแล้วจะให้ประสิทธิภาพสูงถึง 85 เปอร์เซ็นต์ เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ทำงานที่สภาวะอุณหภูมิ 600-1000 องศาเซลเซียส

ข้อดี – เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงทำงานที่สภาวะอุณหภูมิสูงมาก ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องใช้โลหะแพลทินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และไม่ต้องใช้ระบบรีฟอร์มเมอร์ (Reformer) ในการเปลี่ยนสภาพเชื้อเพลิงจึงอาจช่วยลดต้นทุนในการผลิต และนอกจากนี้ยังสามารถใช้เชื้อเพลิงได้หลากหลายชนิด เพราะเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ทนทานต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ดี

ข้อเสีย - เซลล์ทำงานในสภาวะอุณหภูมิสูงต้องเสียเวลาในการอุ่นเครื่องนาน และจำเป็นต้องสร้างผนังหนาเพื่อป้องกันความร้อนที่แผ่ออกมา

2.2.4 เซลล์เชื้อเพลิงแบบอัลคาไลน์ (Alkaline)

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้มีประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าสูงถึง 70 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งองค์การนาซาเคยใช้เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้เป็นแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าและน้ำให้กับยานอวกาศในโครงการอพอลโล และโครงการเจมินีมาแล้ว เชื้อเพลิงที่ใช้กับเซลล์ชนิดนี้คือไฮโดรเจนและออกซิเจนบริสุทธิ์ และใช้สารอิเล็กโทรไลต์ เช่น โพตัสเซียมไฮดรอกไซด์ สภาวะอุณหภูมิที่ใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าอยู่ในช่วง 150-200 องศาเซลเซียส

ข้อดี-มีประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าสูงและใช้สารอิเล็กโทรไลต์ เช่น โพตัสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ราคาถูก

ข้อเสีย - เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้จำเป็นต้องใช้ก๊าซไฮโดรเจนและออกซิเจนที่มีความบริสุทธิ์สูงมากซึ่งมีราคาแพงมากและต้นทุนการผลิตของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้มีราคาแพง ทำให้การใช้เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้จำกัดอยู่เฉพาะงานในด้านอวกาศเท่านั้น

2.2.5 เซลล์เชื้อเพลิงแบบเกลือคาร์บอนเนตหลอม (Molten Carbonate)

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ใช้สารลิเทียมคาร์บอเนต, โซเดียมคาร์บอเนต, โพตัสเซียมคาร์บอเนตที่หลอมเหลวเป็นสารอิเล็กโทรไลต์ อุณหภูมิทำงานของเซลล์ชนิดนี้ประมาณ 650 องศาเซลเซียส มีประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ และหากใช้ร่วมกับระบบผลิตความร้อนร่วมแล้วจะมีประสิทธิภาพสูงถึง 85 เปอร์เซ็นต์

ข้อดี – เนื่องจากเซลล์ทำงานที่สภาวะอุณหภูมิสูงดังนั้นจึงสามารถประยุกต์ใช้กับเชื้อเพลิงที่มีส่วนประกอบของไฮโดรเจนสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าได้หลายชนิด เช่น ก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซธรรมชาติ ก๊าซพรอพีน น้ำมันดีเซล เป็นต้น

ข้อเสีย – ที่สภาวะอุณหภูมิสูงจะมีการกัดกร่อนค่อนข้างมากจึงไม่เหมาะกับการใช้งานขนาดเล็กกว่าเมกกะวัตต์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำมาใช้ประโยชน์ด้านการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.6 เซลล์เชื้อเพลิงแบบป้อนสารเมทานอลโดยตรง (Direct Methanol)

เป็นเซลล์ที่เพิ่งถูกพัฒนาขึ้นมาจากแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน แต่มีแนวโน้มที่สามารถจะพัฒนาให้ใช้กับอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็กหรือในรถยนต์ได้ เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าจากเมทานอลได้โดยไม่ต้องผ่านสารเข้าระบบรีฟอร์มเมอร์ ซึ่งแตกต่างจากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่นที่ทำงานโดยการป้อนไฮโดรเจนเข้าระบบโดยตรง เซลล์เชื้อเพลิงแบบป้อนสารเมทานอลโดยตรงมีประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ ทำงานที่สภาวะอุณหภูมิระหว่าง 50-100 องศาเซลเซียส เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ทำงานที่สภาวะอุณหภูมิก่อนข้างต่ำ จึงเหมาะที่จะพัฒนาให้เป็นแหล่งพลังงานในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบพกพา เช่น คอมพิวเตอร์แล็ปท็อป โทรศัพท์มือถือ นอกจากนี้ยังเหมาะที่จะนำมาใช้กับรถยนต์ขับเคลื่อนด้วยพลังงานไฟฟ้าแบบเติมเมทานอลด้วย

2.2.7 เซลล์เชื้อเพลิงแบบระบบหมุนเวียนน้ำ (Regenerative)

เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่ทำงานแบบหมุนเวียนน้ำในระบบ น้ำจะถูกแยกด้วยไฟฟ้าที่ผลิตจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้เป็นไฮโดรเจนและออกซิเจน ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซออกซิเจนที่ได้จะถูกใช้เพื่อผลิตป้อนระบบเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าออกมา ซึ่งนอกจากกระแสไฟฟ้าแล้วยังได้ความร้อนและน้ำเป็นผลผลิตรวมด้วย น้ำที่ได้จะถูกนำไปแยกด้วยกระแสไฟฟ้าอีกครั้ง ดังนั้นน้ำจึงถูกหมุนเวียนอยู่ในระบบปิดตลอดเวลา ปัจจุบันเซลล์เชื้อเพลิงแบบนี้ยังอยู่ในขั้นการวิจัยและพัฒนาโดยองค์การนาซาและสถาบันอื่น ๆ ทั่วโลก

2.2.8 เซลล์เชื้อเพลิงแบบสังกะสี-อากาศ (Zinc-Air)

เซลล์เชื้อเพลิงแบบสังกะสี-อากาศ ใช้โลหะสังกะสีเป็นขั้วแอโนดเชื้อเพลิงที่ใช้คือก๊าซไฮโดรเจน หรือสารประกอบไฮโดรคาร์บอนก็ได้ ขั้วแคโทดเป็นอากาศ และใช้แผ่นกรองสำหรับแยกก๊าซออกซิเจนออกมาจากอากาศเพื่อป้อนเข้าระบบ เซลล์ชนิดนี้ใช้สารโปตัสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารอิเล็กโทรไลต์อุณหภูมิทำงานของระบบอยู่ในช่วงประมาณ 700 องศาเซลเซียส

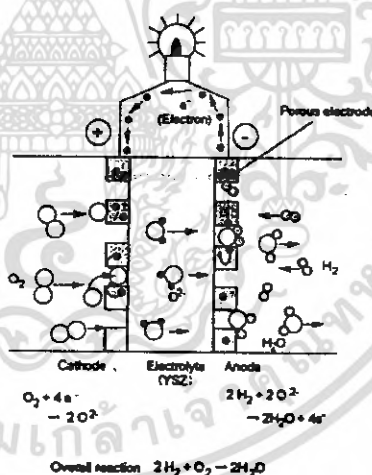
ข้อดี- โลหะสังกะสีที่ใช้ทำขั้วแอโนดมีราคาต่ำ เซลล์ทำงานได้โดยไม่ต้องใช้สารเร่งปฏิกิริยาและสามารถใช้เชื้อเพลิงได้หลายรูปแบบตั้งแต่ก๊าซไฮโดรเจนบริสุทธิ์จนถึงน้ำมันเชื้อเพลิง

ข้อเสีย - หลังจากทำปฏิกิริยาเคมีแล้วโลหะสังกะสีจะเปลี่ยนเป็นซิงค์ออกไซด์ (ZnO) จึงต้องคอยเปลี่ยนแผ่นสังกะสีใหม่เป็นระยะ

2.3 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง [3 : P 4-5]

เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC) เป็นเซลล์เชื้อเพลิงชนิดที่ทำงานที่อุณหภูมิสูงประมาณ 600-1000 °C โดยส่วนประกอบของเซลล์ทั้งหมดเป็นของแข็ง ทำให้ลดปัญหาเกี่ยวกับการกัดกร่อนเมื่อเทียบกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่นที่มีส่วนประกอบเป็นของเหลว นอกจากนี้การที่มีอุณหภูมิการทำงานที่สูงทำให้เกิดข้อดีหลายประการด้วยกัน เช่น สามารถใช้ได้กับเชื้อเพลิงหลายชนิดที่มีส่วนประกอบของสารไฮโดรคาร์บอน โดยป้อนเข้าทำปฏิกิริยากับเซลล์เชื้อเพลิงได้โดยตรง (Internal reforming) หรืออาจจะทำให้ไฮโดรเจนแตกตัวก่อนป้อนเข้าทำปฏิกิริยา (External reforming) ด้วยเหตุนี้จึงไม่จำเป็นต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีราคาแพง เช่น แพลตินัม ข้อดีอีกประการคือความร้อนและน้ำที่ได้จากการทำปฏิกิริยาซึ่งอยู่ในสถานะของไอน้ำสามารถนำไปป้อนกังหันเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าได้ เป็นต้น

โดยปกติแล้วองค์ประกอบพื้นฐานของเซลล์ชนิดนี้ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า (Electrode) 2 ขั้วประกบติดกับสารอิเล็กโทรไลต์ โดยขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 ขั้วเป็นวัสดุที่มีความพรุนตัว แต่อิเล็กโทรไลต์เป็นวัสดุที่แก๊สไม่สามารถแพร่ผ่านได้ โดยทั่วไปวัสดุที่นิยมใช้เป็นอิเล็กโทรไลต์ แคลโทด และ แอโนด ได้แก่ Ytria-Stabilised Zirconia (YSZ), Lanthanum Strontium Manganite (LSM), Nickel/Zirconia cermet (Ni/YSZ) ตามลำดับ



รูปที่ 2-1 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง [3 : P5]

การผลิตกระแสไฟฟ้าทำโดยการแพร่ผ่านก๊าซไฮโดรเจนผ่านรูพรุนของแอโนด (ขั้วบวก) ไปยังบริเวณที่แอโนดสัมผัสกับอิเล็กโทรไลต์ และทำปฏิกิริยาเกิดเป็นสภาวะ Three Phase Boundaries (TPB: แก๊ส, อิเล็กโทรด, และอิเล็กโทรไลต์) ที่อุณหภูมิทำงานแก๊สไฮโดรเจนจะทำปฏิกิริยารวมตัวกับออกซิเจนไอออนซึ่งวิ่งผ่านชั้นอิเล็กโทรไลต์มายังแอโนดได้น้ำ ความร้อน และอิเล็กตรอน แต่อิเล็กโทรไลต์นั้นมีคุณสมบัติไม่ยอมให้อิเล็กตรอนผ่าน (เป็นฉนวนไฟฟ้า) ดังนั้นอิเล็กตรอนจึงวิ่งผ่านไปยังขั้วแคโทดโดยผ่านทางวงจรรภายนอก (External Circuit)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับด้านแคโทด ออกซิเจนจากอากาศจะแพร่ผ่านรูพรุนของขั้วแคโทดไปยังบริเวณที่สัมผัสกับสารอิเล็กโทรไลต์เกิดสภาวะ Three Phase Boundaries ที่อุณหภูมิทำงานออกซิเจนจะรวมตัวกับอิเล็กตรอนได้ออกซิเจนไอออนซึ่งจะวิ่งผ่านอิเล็กโทรไลต์ไปยังขั้วแอโนด จากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะทำให้ได้กระแสไฟฟ้าออกมา และกระแสไฟฟ้าในลักษณะนี้จะเกิดขึ้นต่อเนื่องตราบเท่าที่มีเชื้อเพลิงและออกซิเจนสำหรับไฟฟ้าที่นำไปใช้งานได้แก่อิเล็กตรอนที่วิ่งผ่านวงจรภายนอกซึ่งเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ดังนั้นสิ่งที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าได้แก่เชื้อเพลิงและอากาศ องค์ประกอบหลักของเซลล์เชื้อเพลิงนอกจากอิเล็กโทรไลต์ แอโนด แคโทด แล้วยังมีชุดอินเตอร์คอนเนกเตอร์ (Interconnector) ซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าเชื่อมระหว่าง แอโนด และ แคโทดของเซลล์ที่อยู่ติดกัน เนื่องจากส่วนประกอบทั้งหมดของเซลล์เป็นของแข็ง ดังนั้นเซลล์ชนิดนี้จึงมีรูปแบบโครงสร้างเซลล์ได้หลากหลายกว่าเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่น ๆ ซึ่งในปัจจุบันที่นิยมกันมีอยู่ 4 รูปแบบ คือ Scalless Tubular design, Segmented-cell-in-series design, Monolithic design, และ Flat-plate or Planar design เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ทฤษฎีในการออกแบบ

3.1 การถ่ายเทความร้อน [4 : P2-30]

การถ่ายเทความร้อนสามารถแบ่งออกได้ 3 ประเภทคือ

3.1.1 การนำความร้อน (Conduction heat transfer)

การนำความร้อน เป็นรูปแบบหนึ่งของการถ่ายเทความร้อนในลักษณะของการแลกเปลี่ยนพลังงานจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ โดยลักษณะการเคลื่อนที่แบบจลน์ (Kinetic motion) หรือการชนกันโดยตรงของโมเลกุลซึ่งเป็นลักษณะที่เกิดขึ้นในของไหลที่หยุดนิ่ง ส่วนในกรณีของโลหะนั้นจะเป็นการไหลของกระแสอิเล็กตรอน สำหรับของแข็งที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีจะมีจำนวนอิเล็กตรอนอิสระมากมายที่เคลื่อนไหวอยู่ภายในโครงสร้างของโมเลกุล (Lattice) ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าวัตถุที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีจะเป็นตัวนำความร้อนที่ดีตามไปด้วย ยกตัวอย่างเช่น ทองแดง เงิน เหล็ก ฯลฯ

กฎสัมพัทธ์ของการนำความร้อนโดยถือเกณฑ์การสังเกตจากการทดลอง กำเนิดจากบิโอท์ (Biot) แต่ต่อมานัก ฟิสิกส์-คณิตศาสตร์ ชาวฝรั่งเศส ชื่อ โจเซฟ ฟูริเยร์ (Joseph Fourier) นำหลักการนี้มาใช้วิเคราะห์เป็นทฤษฎีความร้อน กฎนี้กล่าวไว้ว่าอัตราการไหลของการนำความร้อนในทิศทางที่กำหนดเป็นสัดส่วนกับพื้นที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของความร้อนและเกรเดียนต์ของอุณหภูมิของทิศทางนั้น สำหรับการไหลของความร้อนในทิศทาง x กฎของฟูริเยร์กำหนดเป็น

$$q_x = -kA \frac{dT}{dx} \quad \text{W} \quad (3.1)$$

$$q_x'' = \frac{dq_x}{A} = -k \frac{dT}{dx} \quad \text{W/m}^2 \quad (3.2)$$

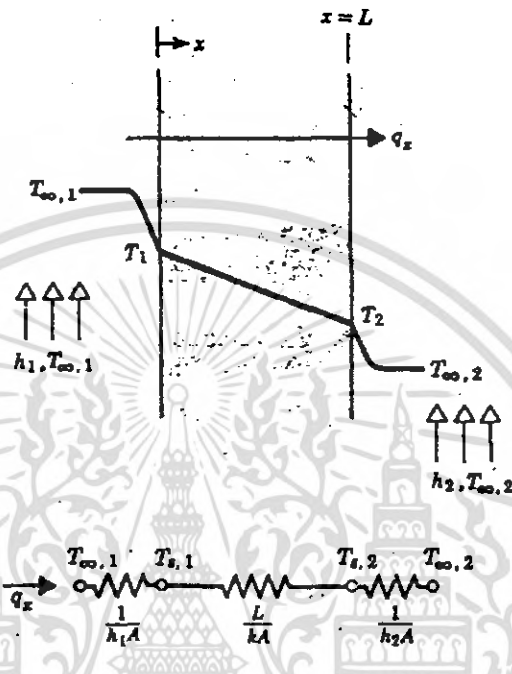
จากสมการ (3.1) ถ้าอุณหภูมิลดลงในทิศทางบวกของ x แล้ว dT/dx เป็นลบ ดังนั้น q_x'' (หรือ q_x) มีค่าเป็นบวกเนื่องจากสมการมีเครื่องหมายติดลบอยู่ เพราะฉะนั้นเครื่องหมายลบจึงต้องใส่ในสมการและเพื่อให้แน่ใจว่า q_x'' (หรือ q_x) เป็นปริมาณบวก เมื่อการไหลของความร้อนอยู่ในทิศทางบวกของ x ในทางกลับกันเมื่อทางด้านขวามือของสมการเป็นลบ แสดงว่าการไหลของความร้อนอยู่ในทิศทางลบของ x

ในการนำความร้อนในสภาวะสม่ำเสมอหนึ่งมิติ (One Dimension Steady-State Conduction) ลักษณะของการนำความร้อนแบบสม่ำเสมอที่จะกล่าวถึงนี้จะมีเกรเดียนต์ของอุณหภูมิ และการไหลของความร้อนขึ้นอยู่กับทิศทางเพียงทิศทางเดียว โดยมีอุณหภูมิแต่ละจุดของวัตถุไม่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1.1 การนำความร้อนผ่านผนังเรียบ (Plane wall)

สำหรับการนำความร้อนในหนึ่งมิติของผนังเรียบ อุณหภูมิจะเป็นฟังก์ชันของโคออร์ดิเนต x และการส่งผ่านความร้อนพิจารณาเฉพาะในทิศทางนี้



รูปที่ 3-1 การนำความร้อนผ่านผนังเรียบ [4 : P20]

ในรูป 3-1 ของไหล 2 ชนิดที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันไหลผ่านในแต่ละด้านของผนังเรียบ การถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นโดยการพาความร้อนจากของไหลร้อนที่ $T_{\infty,1}$ สู่วิหหนึ่งของผนังที่ T_1 และผ่านผนังโดยการนำไปยังอีกด้านหนึ่งที่ T_2 จากนั้นความร้อนจะถูกพาออกไปโดยของไหลเย็นที่ $T_{\infty,2}$ ในการหาอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำ สิ่งแรกที่จะต้องรู้คือการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในผนังเรียบ

3.1.1.2 การนำความร้อนในแนวรัศมี

ระบบรูปทรงกระบอกตามที่พบจะมีเกรเดียนอุณหภูมิในแนวทิศทางรัศมีเท่านั้นจึงสามารถคิดเป็นหนึ่งมิติได้ อย่างไรก็ตามภายใต้เงื่อนไขสภาวะสม่ำเสมอไม่มีการผลิตความร้อนระบบนั้นสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้วิธีมาตรฐาน ซึ่งเริ่มต้นด้วยสมการความร้อนที่เหมาะสมหรือวิธีอีกอย่างหนึ่งซึ่งเริ่มต้นด้วยกฎของฟูริเยร์ ในรูปที่เหมาะสม

สำหรับตัวอย่างทั่ว ๆ ไปของทรงกระบอกกลางซึ่งผิวภายในและภายนอกสัมผัสกับของไหลที่อุณหภูมิแตกต่างกัน สำหรับเงื่อนไขดังกล่าวสมการความร้อนทั่วไปจะลดรูปโดยใช้กฎของฟูริเยร์ในการหาอัตราการถ่ายเทความร้อนจะสมมุติว่าไหลตามแนวรัศมีเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การนำความร้อนผ่านผนังทรงกระบอกกลม

$$q_r = k \frac{2 \pi L (T_{s1} - T_{s2})}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (3.3)$$

ความต้านทานทางความร้อนในกรณีผิวทรงกระบอก

$$R_{t \text{ conduct}} = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2 \pi L k} \quad (3.4)$$

3.1.1.3 ความต้านทานทางความร้อน (Thermal resistance)

ความต้านทานไฟฟ้านั้นเกี่ยวข้องกับการนำไฟฟ้า ดังนั้นความต้านทานความร้อนก็ต้องมีส่วนเกี่ยวข้องกับการนำความร้อน ความต้านทานการนำความร้อน คือ

$$R_{t, \text{cond}} = \frac{(T_1 - T_2)}{q_x} = \frac{L}{kA} \quad (3.5)$$

ในทำนองเดียวกัน สำหรับการนำไฟฟ้าในระบบเดียวกัน กฎของโอห์มได้ให้รูปแบบความต้านทานไฟฟ้าเป็น

$$R_e = \frac{(E_1 - E_2)}{I} = \frac{L}{\sigma A} \quad (3.6)$$

นอกจากนี้ ความต้านทานความร้อนยังมีส่วนเกี่ยวข้องกับการพาความร้อน จากกฎการเย็นตัวของนิวตัน

$$q = hA(T_s - T_\infty) \quad (3.7)$$

ความต้านทานทางความร้อนสำหรับการพา คือ

$$R_{t, \text{conv}} = \frac{(T_s - T_\infty)}{q} = \frac{1}{hA} \quad (3.8)$$

วงจรความร้อนสมมูลสำหรับผนังเรียบที่มีการพาความร้อนที่ผิว แสดงในรูปที่ 3-1 อัตราการถ่ายเทความร้อนหาได้จาก การแยกพิจารณาของแต่ละช่วงวงจร จะได้สมการคือ

$$q_x = \frac{(T_{\infty,1} - T_1)}{1/(h_1 A)} = \frac{(T_1 - T_2)}{L/(kA)} = \frac{(T_2 - T_{\infty,2})}{1/(h_2 A)} \quad (3.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการถ่ายเทความร้อนอาจเขียนแทนด้วยเทอมของผลต่างอุณหภูมิทั้งหมด ($T_{\infty,1} - T_{\infty,2}$) และความต้านทานความร้อนรวม R_{tot}

$$q_x = \frac{(T_{\infty,1} - T_{\infty,2})}{R_{tot}} \quad (3.10)$$

เนื่องจากความต้านทานการนำและการพาต่ออนุกรมกัน จึงได้

$$R_{tot} = \frac{1}{h_1 A} + \frac{1}{kA} + \frac{1}{h_2 A} \quad (3.11)$$

3.1.1.4 การนำความร้อนผ่านผนังหลายชั้น (Composite wall)

วงจรความร้อนสมมูลอาจใช้สำหรับระบบที่ซับซ้อนได้เหมือนกัน เช่น ผนังหลายชั้น ซึ่งจำนวนความต้านทานความร้อนที่ต่ออนุกรมและขนานกันจะขึ้นอยู่กับชั้นของวัสดุที่แตกต่างกัน พิจารณาผนังเรียบหลายชั้นที่ต่ออนุกรมกันของรูปที่ 3-2 อัตราการถ่ายเทความร้อนในหนึ่งมิติของระบบนั้น เขียนได้เป็น

$$q_x = \frac{(T_{\infty,1} - T_{\infty,4})}{\sum R_i} \quad (3.12)$$

โดยที่ $(T_{\infty,1} - T_{\infty,4})$ เป็นผลต่างของอุณหภูมิทั้งหมด และ $\sum R_i$ เป็นผลรวมของความต้านทานความร้อน ดังนั้น

$$q_x = \frac{(T_{\infty,1} - T_{\infty,4})}{\left[(1/h_1 A) + (L_A/k_A A) + (L_B/h_B A) + (L_C/h_C A) + (1/h_4 A) \right]} \quad (3.13)$$

หรืออาจหาอัตราการถ่ายเทความร้อนได้จากการคิดในแต่ละช่วงก็ได้

$$q_x = \frac{(T_{\infty,1} - T_{\infty,4})}{(1/h_1 A)} = \frac{(T_1 - T_2)}{L_A/k_A A} = \frac{(T_2 - T_3)}{L_b/k_b A} = \dots \quad (3.14)$$

และถ้าให้ U เป็นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนทั้งหมด (Overall heat transfer coefficient)

ซึ่งกำหนดขึ้นมาจากความคล้ายคลึงกันกับกฎของการเย็นตัวของนิวตัน จะได้ว่า

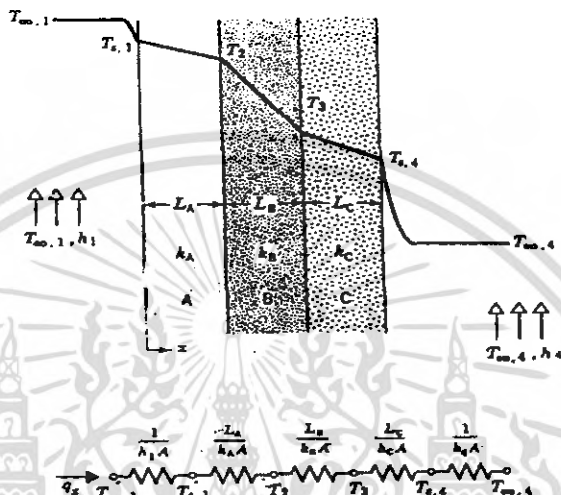
$$q_x = UA\Delta T \quad (3.15)$$

ซึ่ง ΔT เป็นผลต่างของอุณหภูมิตั้งแต่จุดเริ่มต้น จากสมการ (3.12) และ (3.15) จะพบว่า $UA = 1/R_{tot}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และสำหรับผนังหลายชั้นตามรูป 3-2

$$U = \frac{1}{R_{tot}A} = \frac{1}{\left[(1/h_1) + (L_A/k_A) + (L_B/k_B) + (L_C/k_C) + (1/h_4) \right]} \quad (3.16)$$



รูปที่ 3-2 วงจรความร้อนสมมูลสำหรับผนังหลายชั้นอย่างอนุกรม [4 : P22]

โดยทั่วไปอาจเขียนได้เป็น

$$R_{tot} = \sum R_t = \frac{\Delta t}{q} = \frac{1}{UA} \quad (3.17)$$

3.1.1.5 คุณสมบัติของวัสดุ (Material Properties)

ค่าความสามารถต่อการนำความร้อนของของแข็ง (Thermal conductivity of solid) ค่าความสามารถต่อการนำความร้อนของโลหะในเฟสที่เป็นของแข็งซึ่งเราทราบวัตถุที่เป็นองค์ประกอบสำหรับในชั้นต้นจะขึ้นอยู่กับค่าอุณหภูมิเท่านั้น โดยทั่วไปค่า k ในโลหะบริสุทธิ์จะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลง แต่สำหรับธาตุที่เป็นส่วนประกอบของโลหะผสมมีแนวโน้มในทางกลับกันกับแนวโน้มดังกล่าว ความสามารถในการนำความร้อนของโลหะปกติมักจะแสดงค่าอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่เป็นช่วงกว้างๆ ดังนี้

$$k = k_0(1 + b\theta + c\theta^2) \quad (3.18)$$

ซึ่ง $\theta = T - T_{ref}$ และ k_0 เป็นค่าการนำความร้อน ที่พิจารณาจากค่าอุณหภูมิที่จุดอ้างอิง (T_{ref}) สำหรับในงานวิศวกรรมหลายสาขาช่วงอุณหภูมิที่ใช้ส่วนใหญ่จะเป็นช่วงแคบและอาจกล่าวได้ว่ามีค่าประมาณ 100 กว่าๆ องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้ว่า

$$k = k_0(1 + b\theta) \quad (3.19)$$

ค่าความสามารถในการนำความร้อนที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Non homogeneous) ตามปกติจะกำหนดให้มีค่าที่ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นทั่วทั้งก้อนวัสดุที่ปรากฏจริง (Apparent bulk density) ซึ่งหาได้จากการนำเอามวลของวัสดุหารด้วยปริมาตรของวัสดุทั้งหมด ปริมาตรรวมของวัสดุทั้งหมดนี้จะรวมทั้งปริมาตรของส่วนที่เป็นช่องว่าง (Void volume) ดังเช่นช่องว่างของอากาศ (Air packets) ภายในขอบเขตทั้งหมดของชิ้นวัสดุ ดังนั้น ค่าความสามารถในการนำความร้อนจะเปลี่ยนแปลงตามค่าของอุณหภูมิ สำหรับกฎทั่วไปค่าของ k ในวัสดุที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น และยังเพิ่มขึ้นตามค่าความหนาแน่นทั่วทั้งก้อนที่ปรากฏจริงซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย

ค่าความสามารถในการนำความร้อนของของเหลว (Thermal conductivity of liquids)

การนำความร้อนของของเหลวนั้น โดยส่วนใหญ่จะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ยกเว้นกรณีที่เป็นน้ำ ค่า k จะเพิ่มขึ้นจนถึงอุณหภูมิ 300 °F และหลังจากนั้น ค่า k ของน้ำจะมีค่าลดลง น้ำจะมีค่าการนำความร้อนสูงสุดในบรรดาของเหลวทั้งหมด ยกเว้นในกรณีของโลหะเหลวน้ำจะมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำกว่าโลหะเหลว

ค่าความสามารถของการนำความร้อนของแก๊ส (Thermal conductivity of gas)

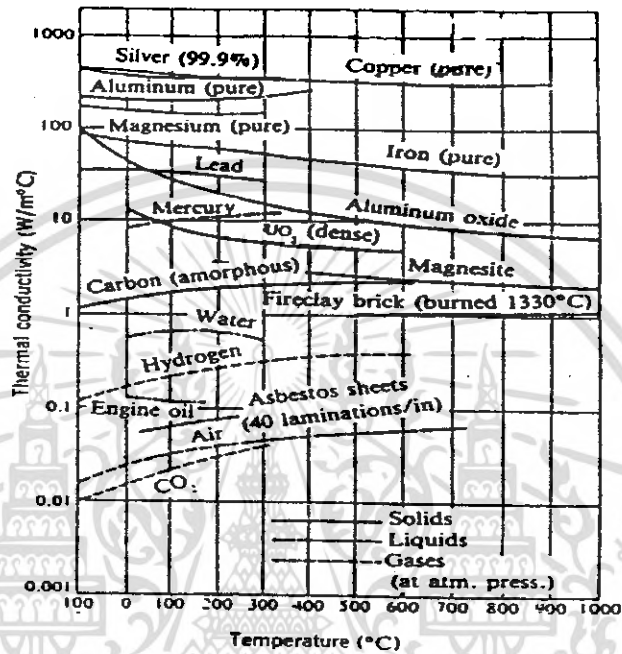
ค่าความสามารถของการนำความร้อนของแก๊สจะเพิ่มขึ้นเมื่อแก๊สอยู่ในระบบที่มีอุณหภูมิสูง และจะไม่ขึ้นอยู่กับค่าความดัน

คุณสมบัติทางความร้อนของสาร

การใช้กฎของฟูริเยร์จำเป็นต้องมีความรู้เกี่ยวกับค่าการนำความร้อน คุณสมบัตินี้จะเป็นตัวบ่งชี้ถึงอัตราที่ซึ่งพลังงานถูกถ่ายเทโดยขบวนการฟุ้งกระจาย อัตราการถ่ายเทพลังงานนี้ขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางฟิสิกส์ของสาร อะตอมและโมเลกุล ซึ่งเกี่ยวกับสภาวะของสาร ค่าการนำความร้อน (k) ในสมการต่างๆ ที่กล่าวมามีหน่วยเป็น W/m °K หรือ J/m.s.°K ในช่วงระหว่างก๊าซและโลหะที่นำความร้อนสูง เช่น ทองแดงหรือเงิน ค่า k จะแปรเปลี่ยนโดยตัวประกอบประมาณ 10^4 ดังเช่นตารางที่ 3-1 ค่าสูงสุดของการนำความร้อน คือ โลหะบริสุทธิ์นำความร้อนสูง และค่าต่ำสุดนั้นสำหรับก๊าซและไอต่าง ๆ ซึ่งไม่รวมระบบการเป็นฉนวนโดยการทำสุญญากาศของของแข็งพวกโลหะเดี่ยวต่างๆ ซึ่งอาจมีค่าการนำความร้อนสูงมาก ๆ เช่น ผลึกทองแดงมีค่าการนำความร้อน 8000 W/m °K หรือสูงกว่าก็เป็นได้

ค่าการนำความร้อนยังแปรเปลี่ยนกับอุณหภูมิเช่นกัน สำหรับสารบางตัวมีการแปรเปลี่ยนอุณหภูมิน้อยจนอาจถือได้ว่า ค่า k นั้นคงที่ได้ แต่ส่วนใหญ่แล้วเกือบทุกกรณีสารทุกตัวแปรเปลี่ยนกับอุณหภูมิโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อุณหภูมิต่ำมากๆ ค่า k จะเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วกับอุณหภูมิ

ยกตัวอย่างเช่นค่า k ของทองแดง อลูมิเนียม หรือเงิน จะมีค่าจาก 50 ถึง 100 เท่าของค่า k ของมัน ที่อุณหภูมิห้องปกติ รูปที่ 3-3 แสดงให้เห็นว่าค่าการนำความร้อนของสารทางวิศวกรรมบางอย่างแปรเปลี่ยนกับอุณหภูมิอย่างไร



รูปที่ 3-3 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิต่อการนำความร้อนของสาร [4 : P9]

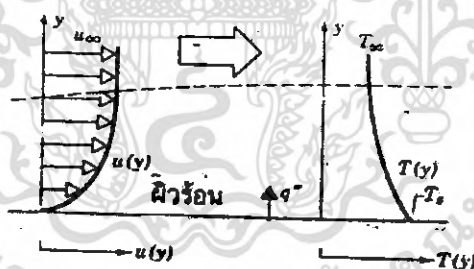
ตารางที่ 3-1 แสดงค่าการนำความร้อนของวัสดุชนิดต่างๆ [4 : P8]

วัสดุ	ค่าการนำความร้อน (k) (W/m °K)
โลหะบริสุทธิ์	35 - 450
โลหะผสม	20 - 200
โลหะเหลว	9 - 90
อโลหะเหลว	0.2 - 2.0
อโลหะแข็ง	0.02 - 20
ฉนวน	0.02 - 0.4
ก๊าซ	0.002 - 0.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 การพาความร้อน (Convection heat transfer)

เมื่อของไหลไหลผ่านวัตถุที่เป็นของแข็งหรือไหลผ่านภายในช่องทางของไหล โดยอุณหภูมิของของไหลและผิวของของแข็งมีค่าแตกต่างกัน การถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลและผิวของของแข็งจะเกิดขึ้นเมื่อของไหลเคลื่อนที่สัมผัสกับผิวของของแข็ง กลไกของการถ่ายเทความร้อนแบบนี้เรียกว่า “การพาความร้อน” ถ้าการเคลื่อนที่ของของไหลเกิดขึ้นโดยการทำขึ้นเองโดยใช้ปั๊มหรือพัดลมเป็นตัวทำให้เกิดแรงกระทำทำให้ของไหลไหลผ่านบนพื้นผิวการถ่ายเทความร้อนแบบนี้เรียกว่า “การพาความร้อนแบบบังคับ (force convection)” ถ้าการเคลื่อนที่ของของไหลเกิดจากแรงลอยตัว ซึ่งมีผลมาจากความแตกต่างของความหนาแน่นที่เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิภายในของไหลการถ่ายเทความร้อนแบบนี้เรียกว่า การพาความร้อนแบบอิสระหรือการพาความร้อนแบบธรรมชาติ (free or natural convection) เช่น ปล่อยแผ่นวัตถุร้อนที่วางอยู่ในแนวตั้งไว้ในอากาศเย็นที่หุดหนึ่ง ชั้นของอากาศที่ติดกับพื้นผิวของแผ่นวัตถุจะมีการเคลื่อนที่ เพราะอุณหภูมิในอากาศเป็นผลทำให้เกรเดียนของความหนาแน่นเพิ่มขึ้นซึ่งจะทำให้อากาศเกิดการเคลื่อนที่ โดยการเคลื่อนที่ของของไหลมีผลกระทบต่อสนามอุณหภูมิภายในของไหล การคำนวณหาการกระจายของอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนแบบการพาในทางปฏิบัติเป็นเรื่องที่สลับซับซ้อนมาก ในทางวิศวกรรมเพื่อให้การคำนวณหาการถ่ายเทความร้อนง่ายขึ้นระหว่างผิวที่ร้อน T_w และอุณหภูมิของของไหลที่เย็นที่ไหลผ่านบนผิวที่อุณหภูมิ T_f ตามที่แสดงในรูป 3-4



รูปที่ 3-4 การพัฒนาชั้นขอบเขตในการพาความร้อน [4 : P10]

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) ถูกกำหนดเป็น

$$q'' = h(T_w - T_f) \quad (3.20)$$

โดยที่ q'' เป็นฟลักซ์ความร้อนที่ถ่ายเทจากผนังที่ร้อนไปยังของไหลที่เย็น แต่ถ้การถ่ายเทความร้อนเกิดจากการไหลของของไหลที่ร้อนไปยังผนังเย็น จะได้ว่า

$$q'' = h(T_f - T_w) \quad (3.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย q'' เป็นฟลักซ์ความร้อนที่ถ่ายเทจากของไหลที่ร้อนไปยังผนังเย็น สมการ(3.20) และสมการ (3.21) เป็นสมการที่ได้มาจากกฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's law of Cooling) โดยที่อุณหภูมิมีหน่วยเป็นเซลเซียส หรือ เคลวิน และค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน h มีหน่วยเป็น $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน h (Convection heat transfer coefficient or film convection coefficient) จะมีค่าแปรเปลี่ยนไปตามชนิดของการไหล (เช่น ลามินาร์ หรือ เทอร์บูเลนต์) รูปทรงของวัตถุ พื้นที่ ที่ของไหลผ่าน คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของของไหลอุณหภูมิเฉลี่ย และตำแหน่งต่างๆ ตามพื้นผิวของวัตถุ นอกจากนี้ยังขึ้นกับกลไกของการถ่ายเทความร้อนว่าเป็นการพาความร้อนแบบบังคับ (การเคลื่อนที่ของของไหลเกิดจากปั๊มหรือพัดลม) หรือเป็นการพาความร้อนแบบธรรมชาติ (การเคลื่อนที่ของ ของไหลเนื่องจากแรงลอยตัว) ค่าของ h จะแปรเปลี่ยนไปตามตำแหน่งต่างๆ ตามพื้นผิววัตถุ ดังนั้นในทางวิศวกรรมแล้ว เพื่อความสะดวกจะใช้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยตลอดพื้นผิว (h_m) แทนค่า h ที่ตำแหน่งนั้นๆ ในการพิจารณาการพาความร้อนตลอดทั้งพื้นผิว สมการ (3.20) และ (3.21) ค่า h จึงถูกแทนด้วยค่า h_m ดังนั้นค่า q'' จึงเป็นค่าฟลักซ์ความร้อนเฉลี่ยตลอดบริเวณที่พิจารณา

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสามารถวิเคราะห์ได้จากการพิจารณาการไหลผ่านวัตถุซึ่งมีรูปทรงเรขาคณิตต่างๆ เช่น แผ่นเรียบหรือ การไหลภายในท่อทรงกระบอก สำหรับการไหลผ่านวัตถุที่มีรูปทรงสลับซับซ้อน ค่า h สามารถหาได้จากวิธีการทดลอง ซึ่งค่าที่ได้จะมีช่วงของความแตกต่างกันกว้างมากตามแต่ละรูปแบบ สำหรับการประยุกต์ต่างๆ

ตารางที่ 3-2 ตัวอย่างค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) [4 : P11]

ชนิดของการไหล	$h, W/m^2 \cdot ^\circ C$
การพาแบบอิสระ ที่ $\Delta T = 25^\circ C$	
แผ่นเรียบแนวดิ่ง 0.25 เมตร ใน:	
- อากาศบรรยากาศ	5
- น้ำมันเครื่องยนต์(น้ำ)	37 (440)
ทรงกระบอกแนวนอน O.D.= 0.02 เมตร ใน :	
- อากาศบรรยากาศ	8
- น้ำมันเครื่องยนต์(น้ำ)	62 (741)
ทรงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.02 เมตร ใน :	
- อากาศบรรยากาศ	9
- น้ำมันเครื่องยนต์(น้ำ)	60 (606)
การพาความร้อนแบบบังคับ	
อากาศบรรยากาศ $25^\circ C$, $U_\infty=10$ m/s ผ่านแผ่นเรียบ :	
L = 0.1 m	39
L = 0.5 m	17
การไหลที่ 5 m/s ผ่านทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 cm.	
- อากาศบรรยากาศ	85
- น้ำมันเครื่องยนต์(น้ำ)	1800
- น้ำที่ 1 kg/s ภายในท่อ 2.5 cm. (I.D)	10500
การเดือดของน้ำที่ 1 atm.	
- การเดือดภายในภาชนะ	3000
- การเดือดที่ฟลักซ์ความร้อนสูงสุด	35000
- การเดือดเป็นฟิล์ม	300
การกลั่นตัวของไอน้ำ	
- การกลั่นตัวเป็นแบบแผ่นบางๆ บนท่อแนวยาว	9000 – 25000
- การกลั่นตัวเป็นแบบแผ่นบางๆ บนท่อแนวดิ่ง	4000 - 11000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 การแผ่รังสีความร้อน (Radiation heat transfer)

การแผ่รังสีความร้อน คือ พลังงานที่ถูกส่งออกไปโดยสารซึ่งอยู่ที่อุณหภูมิจำกัดแน่นอน ถึงแม้ว่าเราจะเน้นการแผ่รังสีจากผิวของวัตถุแข็งก็ตาม การส่งของรังสีอาจเกิดขึ้นได้จากของเหลวและก๊าซดังนั้นโดยไม่ว่าคำนึงถึงรูปแบบของสาร การส่งออกของรังสีเชื่อว่าเป็นการเปลี่ยนการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนขององค์ประกอบอะตอมหรือโมเลกุล พลังงานของสนามการแผ่รังสีนั้นจะถูกนำออกไปโดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (หรือเรียกอีกอย่างว่าโฟตอน) ในขณะที่การถ่ายเทพลังงานโดยการนำหรือการพาต้องการวัตถุตัวกลาง แต่การแผ่รังสีไม่ต้องการ ในความเป็นจริงการถ่ายเทโดยการแผ่รังสีเกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุดโดยสุญญากาศ ค่าของฟลักซ์ความร้อนสูงสุดที่ซึ่งการแผ่รังสีถูกส่งออกไปได้จากพื้นที่ผิวหนึ่ง กำหนดโดยกฎของสตีเฟน โบลซ์แมน (Stefan – Boltzmann Law)

$$q = \sigma T_s^4 \quad (3.22)$$

โดยที่

T_s คือ ค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ (K) ของผิว

σ คือ ค่าคงที่ของสตีเฟน โบลซ์แมน $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}$

สมการ (3.22) ใช้หาอัตราการส่งพลังงานออกของผิว การคำนวณหาอัตราสุทธิซึ่งการแผ่รังสีถูกแลกเปลี่ยนระหว่างผิวโดยทั่วไปค่อนข้างยุ่งยากมาก อย่างไรก็ตามมีกรณีพิเศษซึ่งเกิดขึ้นบ่อยมากในทางปฏิบัติเกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนสุทธิระหว่างพื้นผิวเล็กๆ และผิวที่ใหญ่กว่ามากซึ่งอยู่ล้อมรอบผิวที่เล็กกว่านั่นเอง พื้นผิวและสิ่งแวดล้อมที่ถูกแยกจากกันโดยก๊าซซึ่งไม่มีอิทธิพลเกี่ยวกับการแผ่รังสีนั้น อัตราสุทธิของการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนระหว่างผิวและสิ่งแวดล้อมของมันเป็นต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของผิวกำหนดเป็น

$$q'' = \frac{q}{A} = \epsilon \sigma (T_s^4 - T_{sur}^4) \quad (3.23)$$

ในสมการนี้ A เป็นพื้นผิวและ ϵ เป็นสัมประสิทธิ์การส่งออก ในขณะที่ T_{sur} เป็นอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมมีการประยุกต์สมการนี้ในรูปอื่นเพื่อให้สะดวก คือ

$$q_{rad} = h_r A (T_s - T_{sur}) \quad (3.24)$$

ซึ่งจากสมการ (3.24) ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสี (h_r) คือ

$$h_r = \epsilon \sigma (T_s + T_{sur}) (T_s^2 - T_{sur}^2) \quad (3.25)$$

จุดประสงค์ที่ทำเช่นนี้เพื่อให้มีรูปแบบเหมือนการพาความร้อน สังเกตว่า ค่า h_r ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเป็นสำคัญ ในขณะที่ h ของการพาขึ้นอยู่กับอุณหภูมิตามปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การออกแบบเตาอบไฟฟ้า [5 : P 15-19]

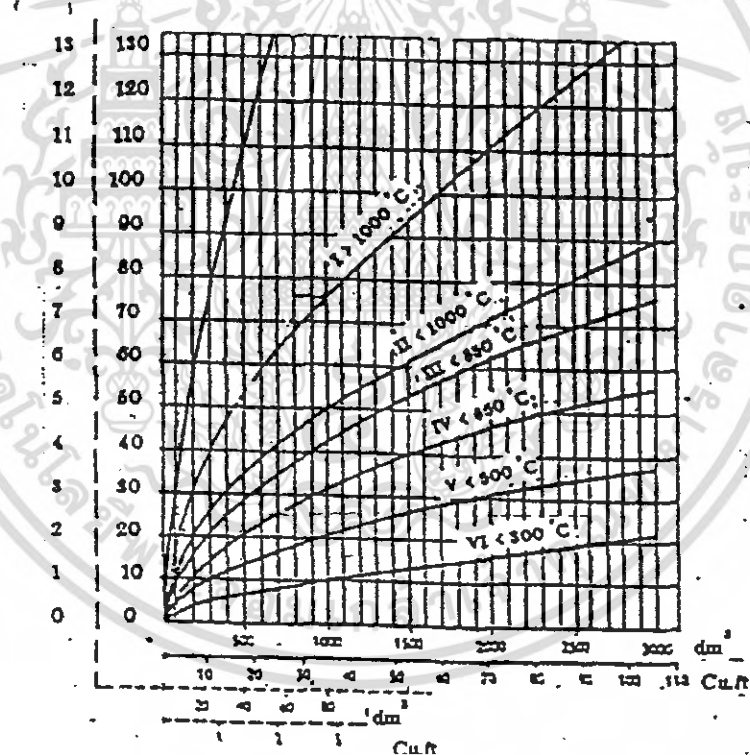
องค์ประกอบที่พิจารณาในการออกแบบเตาอบไฟฟ้ามีดังนี้

3.2.1 อุณหภูมิของเตาที่ต้องการ

ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ต้องการใช้งานโดยพิจารณาจากอุณหภูมิที่เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็งทำงาน โดยเริ่มต้นที่ $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ และระยะเวลาที่ใช้งานโดยทั่วไปอุณหภูมิของเตาอบจะสูงกว่าอุณหภูมิที่ต้องการประมาณ 10 %

3.2.2 กำลังไฟฟ้า

กำลังไฟฟ้าที่ต้องการนั้นขึ้นอยู่กับความร้อนที่ต้องการในการทำให้ภายในเตามีอุณหภูมิถึงตามที่ต้องการ และต้องเผื่อความร้อนที่อาจสูญเสีย (Heat Loss) ซึ่งปริมาณความร้อนที่ต้องใช้นั้นสามารถกำหนดได้จาก ปริมาตรภายในเตา ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากรูปนี้



รูปที่ 3-5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตร – กำลังไฟฟ้า – อุณหภูมิ ของเตาที่มีฉนวนกันความร้อน [5 : P16]

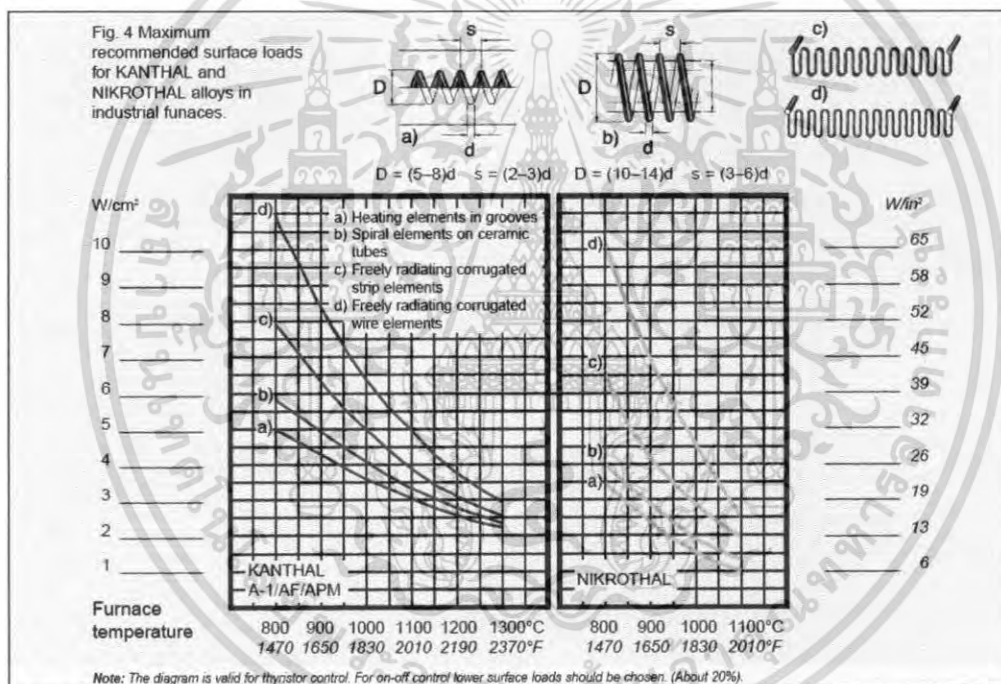
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 การเลือกชนิดขดลวดร้อน

โดยเลือกจากคุณสมบัติของลวดชนิดนั้นให้เหมาะสมตามความต้องการ ซึ่งโดยทั่วไปรูปร่างของขดลวด ความร้อนจะมี 2 ชนิดคือ แบบลวดกลม และลวดแบน

3.2.4 การกำหนดภาระที่ผิว (Surface Load)

Surface Load (W/cm^2) เป็นการวัดความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าของขดลวดความร้อนในเตาอบไฟฟ้า โดยเตาอบที่สภาวะอุณหภูมิสูงจะมีภาระที่ผิวสูงกว่าเตาอบไฟฟ้าที่สภาวะอุณหภูมิต่ำ ปัจจัยในการพิจารณา Surface Load ประกอบด้วย อุณหภูมิที่ผิวฮีตเตอร์ รูปทรงและการวางฮีตเตอร์ภายในเตา และกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเป็นต้น โดยมีข้อกำหนดดังนี้



รูปที่ 3-6 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์อุณหภูมิภายในเตา และ Surface load [5 : P17]

ฮีตเตอร์ a กำหนดจากฮีตเตอร์ ชนิดลวดกลม และลวดแบน ผึงอยู่ในร่องอิฐเท่านั้น

ฮีตเตอร์ b กำหนดจากฮีตเตอร์ชนิด ลวดกลม พันอยู่บนท่อเซรามิกเท่านั้น

ฮีตเตอร์ a และ b กำหนดจาก ลวดกลมเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดไม่ต่ำกว่า 3.0 mm เท่านั้น และลวดแบนมีความหนา 2.0 mm เป็นอย่างน้อย

ฮีตเตอร์ c และ d กำหนดจาก ลวดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง อย่างน้อย 5.0 mm และสำหรับลวดแบนมีระยะห่างระหว่างขดลวดมากที่สุด และที่ Surface load สูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3-3 แสดงระยะห่างมากที่สุดระหว่างช่วงต่อช่วงของเส้นลวดที่แนะนำให้ใช้ [5 : P17]

อุณหภูมิ	ระยะห่างช่วงต่อช่วงของเส้นลวด (mm)
<900 °C	400
1000 °C	350
1100 °C	300
1200 °C	200
1300 °C	150

สำหรับขดลวดขนาดเล็กกว่า และบางกว่าข้อกำหนดต่างๆ ข้างต้นนี้จะต้องกำหนด Surface load ให้ต่ำลงและระยะห่างระหว่างช่วงต่อช่วงให้สั้นลงเพื่อลดการบิดเบี้ยวหลังจากการใช้งาน ซึ่งจะทำให้อายุของฮีตเตอร์สั้นลง

3.2.5 ภาระที่ผนังเตา (Wall Load)

ในการคำนวณขนาดของลวดต้านทานจะต้องคำนึงถึงอุณหภูมิและพื้นที่หน้าตัดของลวดต้านทาน และจะต้องพิจารณาถึงอายุการใช้งาน ภาระที่ผนังเตา คุณสมบัติของผนัง และวัสดุที่ทำตัวต้านทาน ตลอดจนสภาพการถ่ายเทความร้อน โดยเฉพาะเตาที่มีอุณหภูมิสูงค่านี้จะถูกต้องยิ่งขึ้นเมื่อการกระจายความร้อนสม่ำเสมอ และพื้นที่ผิวของผนังเตามาก

3.2.6 การกำหนดขนาดความโตเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นลวดฮีตเตอร์

$$d = \frac{1}{2.91} \sqrt[3]{\left(\frac{P}{v}\right)^2 \rho \left(\frac{C_r}{\dot{P}}\right)} \quad (3.26)$$

โดยที่

- p = กำลังวัตต์, (W)
- v = แรงเคลื่อนไฟฟ้า, (Volt)
- ρ = ความต้านทานจำเพาะของฮีตเตอร์
- C_r = สัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิ ของ ฮีตเตอร์
- \dot{P} = Surface load ของ ฮีตเตอร์, (W/cm²)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.7 การออกแบบลวดชนิดเป็นคอร์ลีย์

หลังจากที่กำหนดความโตของขดลวดแล้ว ต่อไปจะต้องกำหนดความยาวของลวดที่จะใช้

ความต้านทานลวดฮีตเตอร์ขณะเย็น

$$R_{20} = \frac{R_t}{C_t} \quad (3.27)$$

R_{20} = ความต้านทานลวดฮีตเตอร์ขณะเย็น

ความต้านทานลวดฮีตเตอร์ขณะร้อน

$$R_t = \frac{v^2}{P} \quad (3.28)$$

R_t = ความต้านทานลวดฮีตเตอร์ขณะร้อน

ขดลวดความร้อนแต่ละขนาดมีค่าความต้านทานต่อความยาวลวดขนาดต่างๆ ความยาวลวดขณะเย็น คือ

$$L = \frac{R_{20}}{\left(\frac{\Omega}{m}\right)} \quad (3.29)$$

เมื่อ L = ความยาวของลวดขณะเย็น

จาก *Khanthal Handbook* กำหนดอัตราส่วนระหว่าง เส้นผ่านศูนย์กลางขดลวดภายนอก และภายใน (ขึ้นอยู่กับารออกแบบ) คือ

$$\frac{D}{d} = 6 \quad (3.30)$$

จำนวนรอบของขดลวด

$$W = \frac{1000L}{\pi(D-d)} \quad (3.31)$$

เมื่อ W = จำนวนรอบของขดลวด

ความยาวของขดลวด (L_w)

$$L_w = Wd \quad (3.32)$$

จาก *Khanthal Handbook* กำหนด *Relative pitch* เป็น

$$\frac{s}{d} = 2 \quad (3.33)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวของขดลวดเมื่อยึดระยะพิทช์

$$L_p = L_w(S/d) \quad (3.34)$$

ความยาวของเดาที่จะร้อยขดลวด (Lf)

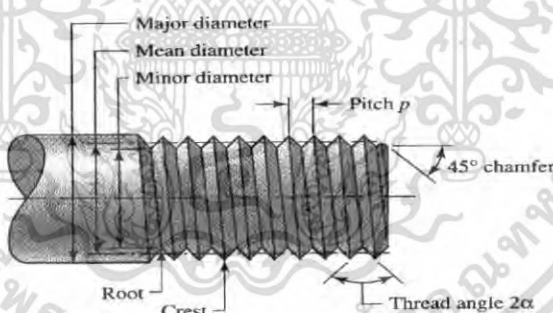
จำนวนขดลวดที่ต้องใช้ = L_p/L_f

3.3 ทฤษฎีของสลักเกลียว [6 : P 396-424]

สลักเกลียวนับว่าเป็นสิ่งประดิษฐ์ที่มีความสำคัญมากในเครื่องจักรกล ซึ่งหน้าที่คือเปลี่ยนอาการหมุนให้เป็นการเคลื่อนที่ในแนวตรงเพื่อส่งกำลัง หรือเพิ่มแรงให้สูงขึ้น (เช่น แทนพิมพ์ หรือแม่แรง เป็นต้น) และใช้ในการยึดตามจุดเชื่อมต่อต่างๆ ของเครื่องจักรกลให้แน่น ซึ่งในที่นี้จะกล่าวเกี่ยวกับทฤษฎีพื้นฐานของการใช้นอต หรือ สลักเกลียว ในการช่วยยึดจุดเชื่อมต่อให้ติดกัน

3.3.1 มาตรฐานและคำจำกัดความ (Standard and Definition)

คำศัพท์ที่ใช้สำหรับสกรูและสลักเกลียว แสดงดังในรูปที่ 3-7 มีคำอธิบายดังนี้



รูปที่ 3-7 ส่วนต่างๆ ของสกรู [6 : P397]

พิทช์ (Pitch – p) หมายถึงระยะห่างระหว่างเกลียวที่อยู่ติดกัน โดยมากมักจะบอกหน่วยเป็นจำนวนพิทช์ใน 1 นิ้ว

เส้นผ่านศูนย์กลางหลัก (Major diameter – d) คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่ที่สุดของส่วนที่เป็นเกลียว

เส้นผ่านศูนย์กลางรอง (Minor diameter – d_r หรือ d_i) คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กที่สุดของส่วนที่เป็นเกลียว

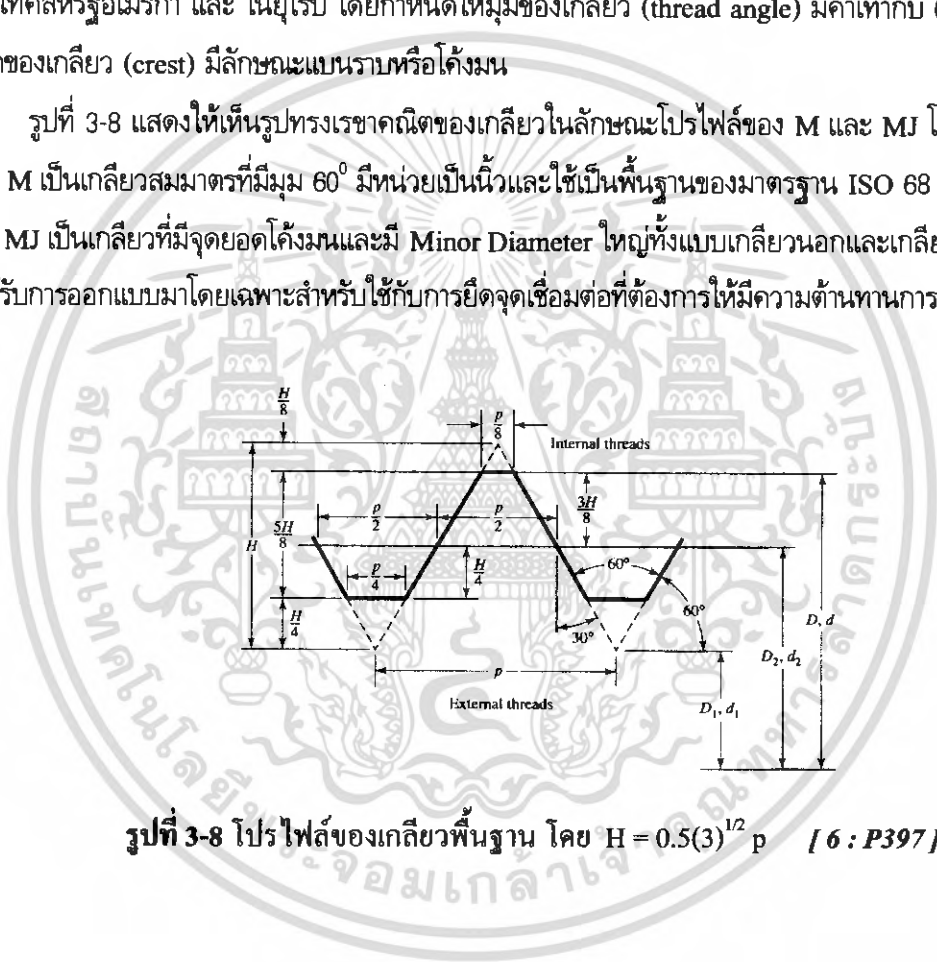
ระยะลีด (Lead- l) หมายถึงระยะทางที่สลักเกลียวเคลื่อนที่ไปในแนวแกนของสกรู เมื่อทำการหมุนเอียง 1 รอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สกรูที่มีหลายเกลียว หมายถึงสกรูที่มีเกลียวมากกว่า 2 ชุด วางเรียงอยู่ด้วยกัน สำหรับสกรูมาตรฐาน จะมีเกลียวเพียงชุดเดียว ระยะลีดจึงมีค่าเท่ากับระยะพิทช์ แต่สำหรับสกรูที่มีเกลียว 2 ชุด เรียกว่า “เกลียวสองปาก (Double-threaded screw)” ระยะลีดจะมีค่าเป็น 2 เท่าของระยะพิทช์ และสกรูที่มีเกลียว 3 ชุด เรียกว่า “เกลียวสามปาก (Triple-threaded screw)” ระยะลีดจะมีค่าเป็น 3 เท่าของระยะพิทช์ โดยทั่วไปการหมุนของเกลียวจะเป็นไปตามกฎมือขวา (Right-hand Rule)

American Nation (Unified) ได้กำหนดมาตรฐานสำหรับใช้ในการผลิตสกรู สลักเกลียว และ นอตในประเทศสหรัฐอเมริกา และ ในยุโรป โดยกำหนดให้มุมของเกลียว (thread angle) มีค่าเท่ากับ 60° และมีจุดยอดของเกลียว (crest) มีลักษณะแบนราบหรือโค้งมน

รูปที่ 3-8 แสดงให้เห็นรูปทรงเรขาคณิตของเกลียวในลักษณะโปรไฟล์ของ M และ MJ โดยที่โปรไฟล์ของ M เป็นเกลียวสมมาตรที่มีมุม 60° มีหน่วยเป็นนิ้วและใช้เป็นพื้นฐานของมาตรฐาน ISO 68 ส่วนโปรไฟล์ของ MJ เป็นเกลียวที่มีจุดยอดโค้งมนและมี Minor Diameter ใหญ่ทั้งแบบเกลียวนอกและเกลียวในโปรไฟล์นี้ได้รับการออกแบบมาโดยเฉพาะสำหรับใช้กับการยึดจุดเชื่อมต่อที่ต้องการให้มีความต้านทานการล้าสูง



รูปที่ 3-8 โปรไฟล์ของเกลียวพื้นฐาน โดย $H = 0.5(3)^{1/2} p$ [6 : P397]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3-4 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นที่หน้าตัดของเกลียว Coarse-Pitch และ Fine-Pitch
[6 : P398]

Nominal Major Diameter d	Coarse-Pitch Series			Fine-Pitch Series		
	Pitch p	Tensile- Stress Area A_t	Minor- Diameter Area A_r	Pitch p	Tensile- Stress Area A_t	Minor- Diameter Area A_r
1.6	0.35	1.27	1.07			
2	0.40	2.07	1.79			
2.5	0.45	3.39	2.98			
3	0.5	5.03	4.47			
3.5	0.6	6.78	6.00			
4	0.7	8.78	7.75			
5	0.8	14.2	12.7			
6	1	20.1	17.9			
8	1.25	36.6	32.8	1	39.2	36.0
10	1.5	58.0	52.3	1.25	61.2	56.3
12	1.75	84.3	76.3	1.25	92.1	86.0
14	2	115	104	1.5	125	116
16	2	157	144	1.5	167	157
20	2.5	245	225	1.5	272	259
24	3	353	324	2	384	365
30	3.5	561	519	2	621	596
36	4	817	759	2	915	884
42	4.5	1120	1050	2	1260	1230
48	5	1470	1380	2	1670	1630
56	5.5	2030	1910	2	2300	2250
64	6	2680	2520	2	3030	2980
72	6	3460	3280	2	3860	3800
80	6	4340	4140	1.5	4850	4800
90	6	5590	5360	2	6100	6020
100	6	6990	6740	2	7560	7470
110				2	9180	9080

*The equations and data used to develop this table have been obtained from ANSI B1.1-1974 and B18.3.1-1978. The minor diameter was found from the equation $d_r = d - 1.226869p$, and the pitch diameter from $d_p = d - 0.649519p$. The mean of the pitch diameter and the minor diameter was used to compute the tensile-stress area.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3-5 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นที่หน้าตัดมาตรฐานของ Unified Screw Threads

UNC และ UNF [6 : P399]

| Diameters and Area of Unified Screw Threads UNC and UNF*

Size Designation	Nominal Major Diameter in	Coarse Series—UNC			Fine Series—UNF		
		Threads per Inch N	Tensile-Stress Area A_t , in ²	Minor-Diameter Area A_m , in ²	Threads per Inch N	Tensile-Stress Area A_t , in ²	Minor-Diameter Area A_m , in ²
0	0.0600				80	0.001 80	0.001 51
1	0.0730	64	0.002 63	0.002 18	72	0.002 78	0.002 37
2	0.0860	56	0.003 70	0.003 10	64	0.003 94	0.003 39
3	0.0990	48	0.004 87	0.004 06	56	0.005 23	0.004 51
4	0.1120	40	0.006 04	0.004 96	48	0.006 61	0.005 66
5	0.1250	40	0.007 96	0.006 72	44	0.008 80	0.007 16
6	0.1380	32	0.009 09	0.007 45	40	0.010 15	0.008 74
8	0.1640	32	0.014 0	0.011 96	36	0.014 74	0.012 85
10	0.1900	24	0.017 5	0.014 50	32	0.020 0	0.017 5
12	0.2160	24	0.024 2	0.020 6	28	0.025 8	0.022 6
$\frac{1}{4}$	0.2500	20	0.031 8	0.026 9	28	0.036 4	0.032 6
$\frac{5}{16}$	0.3125	18	0.052 4	0.045 4	24	0.058 0	0.052 4
$\frac{3}{8}$	0.3750	16	0.077 5	0.067 8	24	0.087 8	0.080 9
$\frac{7}{16}$	0.4375	14	0.106 3	0.093 3	20	0.118 7	0.109 0
$\frac{1}{2}$	0.5000	13	0.141 9	0.125 7	20	0.159 9	0.148 6
$\frac{9}{16}$	0.5625	12	0.182	0.162	18	0.203	0.189
$\frac{5}{8}$	0.6250	11	0.226	0.202	18	0.256	0.240
$\frac{3}{4}$	0.7500	10	0.334	0.302	16	0.373	0.351
$\frac{7}{8}$	0.8750	9	0.462	0.419	14	0.509	0.480
1	1.0000	8	0.606	0.551	12	0.663	0.625
$1\frac{1}{4}$	1.2500	7	0.969	0.890	12	1.073	1.024
$1\frac{1}{2}$	1.5000	6	1.405	1.294	12	1.581	1.521

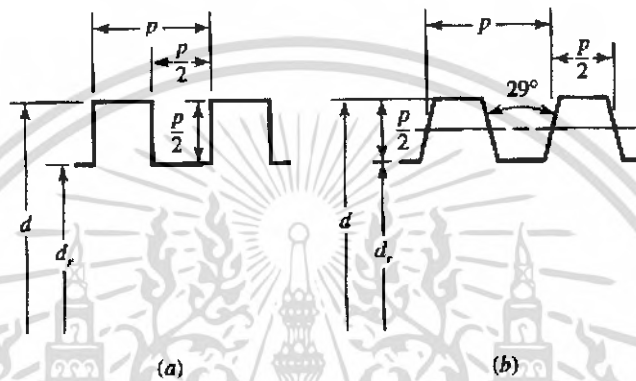
*This table was compiled from ANSI B1.1-1974. The minor diameter was found from the equation $d_m = d - 1.299\ 038p$, and the pitch diameter from $d_p = d - 0.649\ 519p$. The mean of the pitch diameter and the minor diameter was used to compute the tensile stress area.

ตารางที่ 3-4 และ 3-5 นับว่ามีประโยชน์ในการระบุขนาดและการออกแบบสลักเกลียว ให้สังเกตว่าขนาดของเกลียวจะถูกกำหนดโดยระยะพิทช์ (p) และจำนวนเกลียวในระยะ 1 นิ้ว (N) สำหรับขนาดของเกลียวในตารางที่ 3-5 ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า $\frac{1}{4}$ นิ้ว จะถูกกำหนดให้เป็นหมายเลขเกลจ ตัวอย่างเช่นในคอลัมน์ที่สองของตารางที่ 3-5 แสดงให้เห็นว่าสลัก No.8 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1640 นิ้ว

จากการทดสอบแรงดึงพบว่า สลักที่ไม่มีเกลียวจะมีความต้านแรงดึงเท่ากับสลักเกลียวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเป็นค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางพิทช์ ดังนั้น พื้นที่หน้าตัดของสลักที่ไม่มีเกลียวนี้จึงเรียกว่าพื้นที่หน้าตัดที่ใช้ในการทดสอบแรงดึง (A_t) ซึ่งมีแสดงอยู่ในตารางทั้งสองข้างต้น นอกจากนั้นตารางที่ 3-5 ยังแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่างขนาดมาตรฐานของ UN และ UNR เนื่องจาก UNR มีการคำนวณให้ลดความเค้นหนาแน่น จึงทำให้มีความต้านทานการล้าสูงขึ้น การเรียกชื่อเกลียวจึงถูกกำหนดโดยค่า Major Diameter ตามด้วยจำนวนของรอบเกลียวในระยะ 1 นิ้ว และซีรีส์ที่ใช้ เช่น $\frac{5}{8}$ in – 18 UNRF หรือ 0.625 in – 18 UNRF เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับเมตริกซ์ของขนาดเกลียวจะเขียนในรูปของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง คุณด้วยระยะพิทซ์ที่มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร ดังนั้น M12 x 1.75 จึงหมายถึง เกลียวที่เส้นผ่านศูนย์กลางหลัก 12 มิลลิเมตร และระยะพิทซ์ 1.75 มิลลิเมตร ให้สังเกตว่าตัวอักษร M ที่อยู่ข้างหน้าขนาด จะเป็นตัวชี้ให้เห็นตำแหน่งของเมตริกซ์ในตาราง รูปที่ 3-9 แสดงให้เห็นการเปรียบเทียบเกลียวที่มีรูปทรงเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส (a) กับรูปที่มีจุดยอด ซึ่งถูกนำมาใช้ในการทำสกรูส่งกำลัง



รูปที่ 3-9 เกลียวที่มีรูปทรงสี่เหลี่ยมกับรูปทรงที่มีจุดยอด [6 : P399]

ตารางที่ 3-6 ระยะพิทซ์สำหรับเกลียวที่มีจุดยอดเมื่อนำมาใช้เป็นสกรูส่งกำลัง [6 : P400]

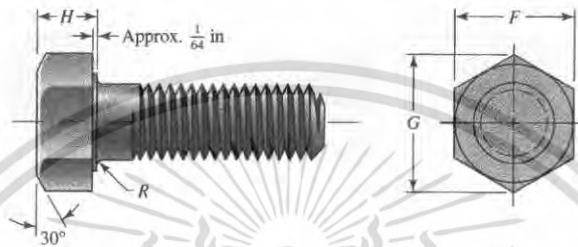
$d, \text{ in}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{5}{16}$	$\frac{3}{8}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{5}{8}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{7}{8}$	1	$1\frac{1}{4}$	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{3}{4}$	2	$2\frac{1}{2}$	3
$p, \text{ in}$	$\frac{1}{16}$	$\frac{1}{14}$	$\frac{1}{12}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$

นอกจากนั้นในการออกแบบยังมักจะต้องมีการปรับปรุงค่าบางอย่าง เป็นต้นว่าในบางครั้งการเลือกใช้เกลียวที่มีรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส จำเป็นต้องตัดช่องว่างระหว่างซี่ฟันเกลียวให้เป็นมุม 10-15 องศา เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งกำลัง หรือมีการปรับปรุงเกลียวที่มีรูปทรงซึ่งมีจุดยอดโดยการตัดซี่ฟันเกลียวให้สั้นเพื่อให้สกรูมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 สลักเกลียว (Threaded Fastener)

สลักเกลียวส่วนใหญ่จะผ่านการทดสอบการรับโหลดการล้ามาแล้ว และพบว่าการล้าจะมีผลต่อสลักเกลียวเพียงเล็กน้อย ดังนั้นในการศึกษาเรื่องสลักเกลียวการวิเคราะห์โดยวิธีการแบบสถิติศาสตร์จึงนับว่าเพียงพอแล้ว



รูปที่ 3-10 สลักเกลียวหัวหกเหลี่ยม [6 : P409]

รูปที่ 3-10 เป็นภาพของสลักเกลียวหัวหกเหลี่ยมมาตรฐาน จะเห็นได้ว่าจุดที่เกิดความเค้นหนาแน่นจะเป็นบริเวณรอยต่อของหัวสลักเกลียวที่จุดเริ่มต้นของฟันเกลียวและที่รากเกลียวเมื่อมีนอตมายึด สำหรับขนาดของสลักเกลียวหัวหกเหลี่ยมนั้น เส้นผ่านศูนย์กลางของนอตยึดจะมีขนาดเท่ากับขนาดของพื้นผิวด้านเรียบของหัวหกเหลี่ยม ส่วนความยาวของเกลียวจะมีความสัมพันธ์กับเส้นผ่านศูนย์กลางในหน่วยเป็นมิลลิเมตร ดังนี้

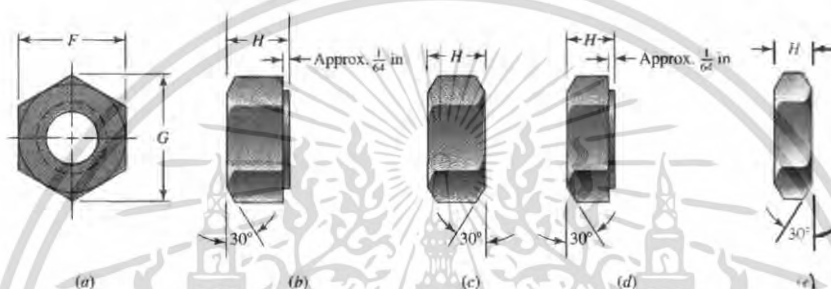
$$L_T = \begin{cases} 2D + \frac{1}{4} \text{ in} & L \leq 6 \text{ in} \\ 2D + \frac{1}{2} \text{ in} & L > 6 \text{ in} \end{cases} \quad (3.35)$$

$$L_T = \begin{cases} 2D + 6 & L \leq 125, D \leq 48 \\ 2D + 12 & 125 < L \leq 200 \\ 2D + 25 & L > 200 \end{cases} \quad (3.36)$$

ความยาวของสลักเกลียวในอุดมคติ คือ หลังจากการยึดด้วยนอตจนแน่น ให้ระยะเกลียวเหลือ 1-2 เกลียว การกวदनอตให้แน่นอาจทำให้นอตป็นเกลียวขึ้นไปบนรอยต่อของหัวสลักเกลียว ซึ่งจะทำให้ความเค้นหนาแน่นบริเวณรอยต่อเพิ่มมากขึ้น ดังนั้น ในการใช้งานจึงควรใส่แหวนรองไว้ใต้หัวสลักเกลียวสำหรับวัสดุที่ใช้ทำสลักเกลียวควรจะเป็นเหล็กกล้าชุบแข็ง และออกแบบให้ส่วนที่รับโหลดเป็นบริเวณผิวหน้าของสลักเกลียว

วัตถุประสงค์หลักของสลักเกลียวคือใช้ในการยึดชิ้นส่วน 2 ชิ้นให้ติดแน่นเข้าด้วยกัน โดยการกวदनอตให้แน่นจะทำให้สลักเกลียวเกิดการยึดตัวจนเกือบถึงขีดจำกัดของความยืดหยุ่น ถ้านอตไม่เกิดการคลายตัวเองแรงดึงที่เกิดขึ้นจะเป็นเหมือนโหลดที่กระทำต่อสลักเกลียว การศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการขันนอตจึงจำเป็นต้องยึดสลักเกลียวให้แน่น แล้วใช้เครื่องมือในการกวदनอตให้แน่น วิธีการเช่นนี้จะช่วยลดแรงเสียดทานที่เกิดจากการบิดสลักเกลียว ในรูปที่ 3-11 แสดงให้เห็น ลักษณะของนอตยึดสลักเกลียวหัวหกเหลี่ยมรูปแบบต่างๆ โดยขนาดนอตยึดสลักเกลียวหัวหกเหลี่ยมให้ดูจากตาราง การเลือกวัสดุที่ใช้ทำนอตยึดจะต้องเข้าคู่กันได้กับสลักเกลียว เนื่องจากในระหว่างการกวदनอตเกลียวแรกของสลักเกลียวมีแนวโน้มที่จะป็นเกลียวซึ่งจะทำให้มีเกลียวเพียงไม่กี่ซี่ที่รับโหลดทั้งหมด ซึ่งจะก่อให้เกิดความเสียหายได้ และหากเกิดเหตุการณ์เช่นนี้แล้วก็ไม่ควรที่จะนำนอตตัวนั้นมาใช้



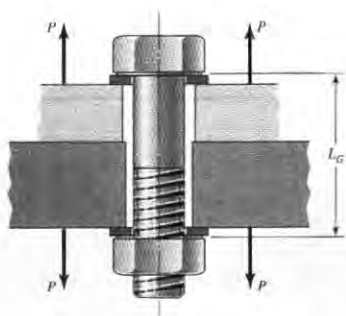
รูปที่ 3-11 นอตยึดสลักเกลียวหัวหกเหลี่ยม [6 : P410]

3.3.3 ความแข็งแรงของรอยต่อที่ยึดด้วยสลักเกลียว (Joints – Fastener Stiffness)

เมื่อจุดเชื่อมต่อได้รับการออกแบบให้สามารถถอดออกได้โดยไม่ใช้วิธีการที่ทำให้เกิดความเสียหาย และเป็นข้อต่อที่มีความแข็งแรงเพียงพอในการต้านทานโหลดแรงดึงจากภายนอก โมเมนต์ และความเฉือนหรือองค์ประกอบของโหลดต่างๆ เหล่านี้ การยึดข้อต่อด้วยสลักเกลียวจึงนับว่าเป็นทางออกที่ดี อย่างไรก็ตามการยึดจุดเชื่อมต่อด้วยวิธีนี้อาจจะก่อให้เกิดอันตรายต่อชิ้นงานได้ เว้นแต่ว่าชิ้นงานนั้นจะได้รับการออกแบบอย่างถูกต้องและประกอบโดยช่างที่ชำนาญ

รูปที่ 3-12 แสดงให้เห็นการยึดชิ้นงาน 2 ชิ้นเข้าด้วยกันโดยการใช้สลักเกลียวแล้วกวदनอต ให้สังเกตว่ามีช่องว่างในรูที่สอดสลักเกลียวผ่านเข้าไป จึงมีคำถามว่า “แรงที่กระทำต่อเกลียวจะขยายไปยังชิ้นงานที่ยึดติดกันได้อย่างไร” วัตถุประสงค์ของการใช้งานสลักเกลียวในกรณีนี้คือใช้ในการจับยึดชิ้นงานตั้งแต่ 2 ชิ้นขึ้นไปเข้าด้วยกัน ซึ่งแรงนี้จะเกิดขึ้นในชิ้นงานเมื่อกวदनอตจนแน่นดีแล้ว ไม่ว่าจะมียุทธศาสตร์ดึง P จากภายนอกมากกระทำหรือไม่ก็ตามและเป็นที่ยืนยันว่าเมื่อเกิดแรงยึดในชิ้นงาน ก็จะทำให้เกิดแรงดึงสลักเกลียวเพื่อกดให้ชิ้นงานยึดติดเข้าด้วยกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-12 การใช้สลักเกลียวและนอตในการจับยึดชิ้นงาน [6 : P411]

Grip – L_G คือความหนาทั้งหมดของชิ้นงานเมื่อยึดติดกัน ค่า Grip ในรูปที่ 3-12 คือผลรวมความหนาของชิ้นงานทั้งสองชิ้น และแหวนรองทั้ง 2 ตัว สำหรับ Grip ในรูปที่ 3-12 แสดงไว้ในตารางที่ 3-7 โดยทั่วไป ความแรงแรงของสลักเกลียวและสกรูภายนอกชิ้นงานจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ไม่มีร่องเกลียวที่จมลงไปชิ้นงาน และส่วนที่มีร่องเกลียวยึดติดกับชิ้นงาน ดังนั้น ค่าความแรงแรงของสลักเกลียวจึงมีค่าเทียบเท่ากับค่าคงที่ของสปริงที่ต่ออนุกรมกัน คือ

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} \quad \text{หรือ} \quad \frac{1}{k} = \frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2} \quad (3.37)$$

ค่าคงที่ของสปริงสำหรับสลักเกลียวส่วนที่มีเกลียว (k_t) และส่วนที่ไม่มีเกลียว (k_d) คือ

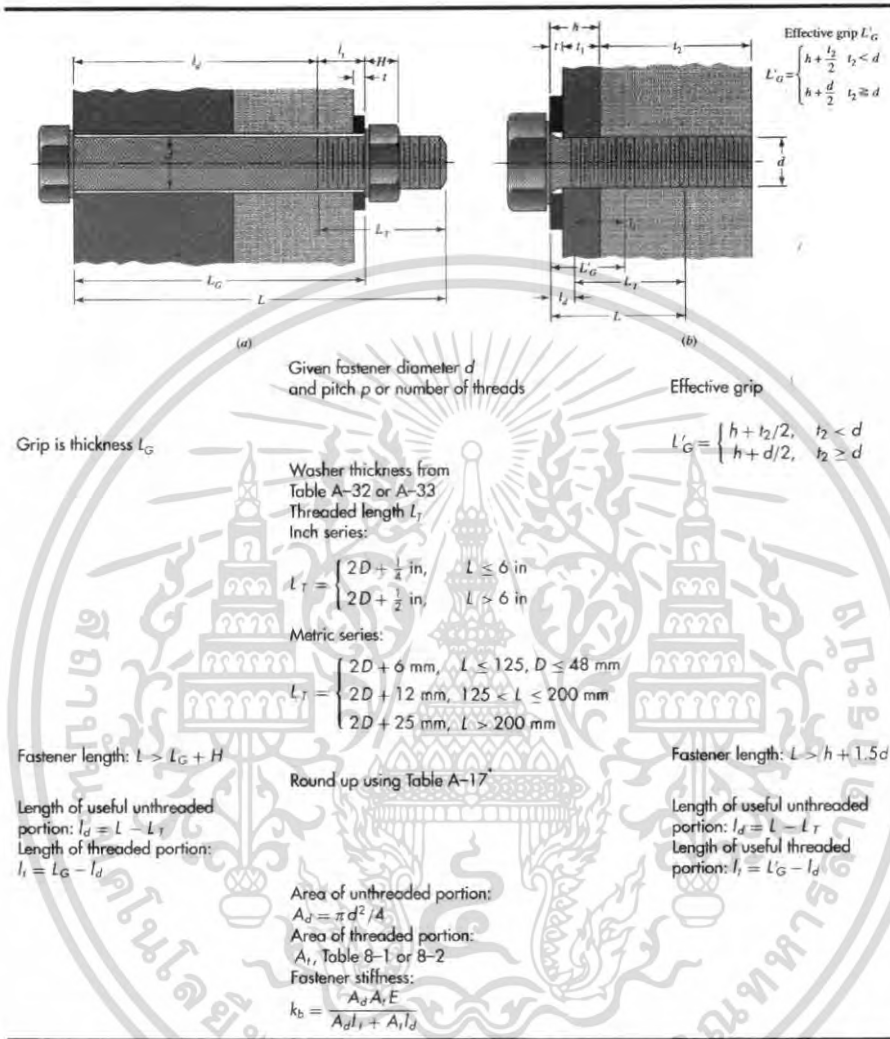
$$k_t = \frac{A_t E}{l_t} \quad \text{และ} \quad k_d = \frac{A_d E}{l_d} \quad (3.38)$$

ดังนั้น ความแรงแรงของสลักเกลียวทั้งสองส่วน (k_b) จะมีค่าดังนี้

$$k_b = \frac{A_d A_t E}{A_d l_t + A_t l_d} \quad (3.39)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 3-7 ข้อแนะนำสำหรับการหาความแข็งแรงของสลักเกลียวและสกรูยึดชิ้นงาน [6 : P412]



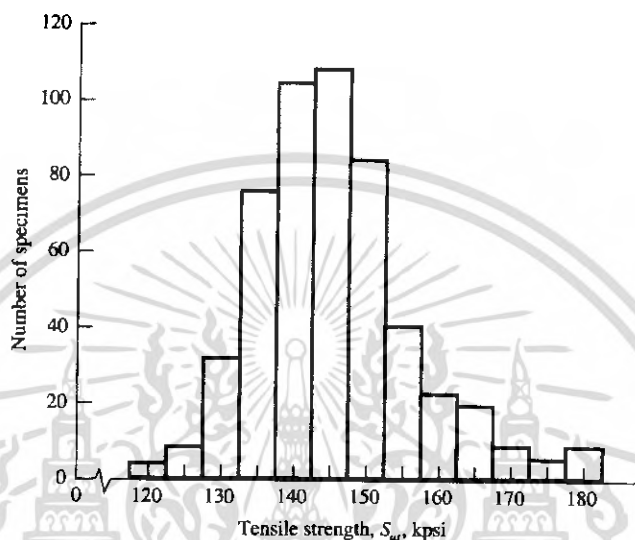
¹ Bolts and cap screws may not be available in all the preferred lengths listed in Table A-17. Large fasteners may not be available in fractional inches or in millimeter lengths ending in a nonzero digit. Check with your bolt supplier for availability.

3.3.4 ความต้านแรงของสลักเกลียว (Bolt Strength)

ในคุณสมบัติมาตรฐานของสลักเกลียว ค่าความต้านแรงถูกกำหนดโดยค่าต่ำสุดซึ่ง ASTM ระบุ คือ โหลดพิสูจน์ (Proof Load) ความต้านแรงพิสูจน์ (Proof Strength) และความต้านแรงดึงระบุ (Tensile Strength) โหลดพิสูจน์ของสลักเกลียว หมายถึงโหลด (แรง) สูงสุดที่สลักเกลียวสามารถรองรับได้โดยไม่ทำให้เกิดส่วนยึดติดถาวร ความต้านแรงพิสูจน์เป็นค่าขีดจำกัดของความเค้นที่คำนวณได้จากผลหารของโหลดพิสูจน์กับพื้นที่การรับความเค้นดึง สำหรับค่าความต้านแรงพิสูจน์เฉลี่ยและความต้านแรงดึงเฉลี่ย รวมทั้งค่าความแปรปรวน จะไม่มีกำหนดไว้ในส่วนใดส่วนหนึ่งของคุณลักษณะเฉพาะ จึงเป็นหน้าที่ของวิศวกรผู้ออกแบบที่จะคำนวณหาค่าต่างๆ เหล่านี้เอง

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3-13 แสดงให้เห็นกราฟการแจกแจงค่าความต้านแรงดึงสูงสุดของสลักเกลียวที่ได้จากสายการผลิต ถ้าความต้านแรงต่ำสุดที่กำหนดโดย ASTM มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 120 kpsi จะกำหนดให้ใช้สลักเกลียว SAE เกรด 5 โดย $S_u = 145.1 \text{ kpsi}$ และมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน $\hat{\sigma}_{su} = 10.3 \text{ kpsi}$



รูปที่ 3-13 กราฟฮิสโตแกรมของค่าความต้านแรงสูงสุดของสลักเกลียว [6 : P417]

ในตารางที่ 3-8 วิศวกรผู้ออกแบบจะเห็นค่า $S_u = 120 \text{ kpsi}$ อยู่ภายใต้สลักเกลียวเกรด 5 ขนาด 1/4 - 1 นิ้ว และในทำนองเดียวกันค่าความต้านแรงต่ำสุดจะแสดงไว้ในตารางที่ 3-9 และ 3-10

คุณสมบัติ SAE จะแสดงอยู่ในตารางที่ 3-8 เกรดของสลักเกลียวจะได้รับการกำหนดหมายเลขตามค่าความต้านแรงดึง สำหรับจุดเทคนิคจะหมายถึงวัสดุต่างๆ ที่ใช้ทำสลักเกลียวซึ่งมีความต้านแรงอยู่ในระดับเดียวกัน ทั้งสลักเกลียวและสกรูจะปรากฏอยู่ในรายการของทุกเกรด แต่สำหรับเกลียวปล่อยจะมีอยู่เฉพาะในเกรด 1, 2, 3, 4, 5, 8 และ 8.1

ตารางที่ 3-9 จะแสดงคุณสมบัติของสลักเกลียวในหน่วยเมตริกซ์

คุณสมบัติ ASTM จะแสดงอยู่ในตารางที่ 3-10 ซึ่งเกลียวของสลักเกลียวและสกรูที่กำหนดโดย ASTM จะมีขนาดสั้นกว่า ทั้งนี้เนื่องจาก ASTM จะให้ความสนใจในเรื่องของโครงสร้าง ซึ่งโดยทั่วไปการจับยึดหรือเชื่อมต่อโครงสร้างจะต้องรับโหลดการเฉือน จึงจำเป็นต้องลดความยาวของฟันเกลียว เพื่อให้สลักเกลียวสามารถเจาะลึกเข้าไปในชิ้นงานได้มากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3-8 SAE Specification for steel Bolts [6 : P418]

SAE Grade No.	Size Range Inclusive, in	Minimum Proof Strength,* kpsi	Minimum Tensile Strength,* kpsi	Minimum Yield Strength,* kpsi	Material	Head Marking
1	$\frac{1}{4}$ - $1\frac{1}{2}$	33	60	36	Low or medium carbon	
2	$\frac{1}{4}$ - $\frac{3}{4}$ $\frac{5}{8}$ - $1\frac{1}{2}$	55	74	57	Low or medium carbon	
		33	60	36		
4	$\frac{1}{4}$ - $1\frac{1}{2}$	65	115	100	Medium carbon, cold-drawn	
5	$\frac{1}{4}$ -1 $1\frac{1}{8}$ - $1\frac{1}{2}$	85	120	92	Medium carbon, Q&T	
		74	105	81		
5.2	$\frac{1}{4}$ -1	85	120	92	Low-carbon martensite, Q&T	
7	$\frac{1}{4}$ - $1\frac{1}{2}$	105	133	115	Medium-carbon alloy, Q&T	
8	$\frac{1}{4}$ - $1\frac{1}{2}$	120	150	130	Medium-carbon alloy, Q&T	
8.2	$\frac{1}{4}$ -1	120	150	130	Low-carbon martensite, Q&T	

*Minimum strengths are strengths exceeded by 99 percent of fasteners.

ตารางที่ 3-9 คุณสมบัติทางกลของสลักเกลียว สกรู และเกลียวปล่อย [6 : P419]

ASTM Specifications for Steel Bolts

ASTM Designation No.	Size Range, Inclusive, in	Minimum Proof Strength,* kpsi	Minimum Tensile Strength,* kpsi	Minimum Yield Strength,* kpsi	Material	Head Marking
A307	$\frac{1}{4}$ - $1\frac{1}{2}$	33	60	36	Low carbon	
A325, type 1	$\frac{1}{4}$ -1 $1\frac{1}{8}$ - $1\frac{1}{2}$	85	120	92	Medium carbon, Q&T	
		74	105	81		
A325, type 2	$\frac{1}{4}$ -1 $1\frac{1}{8}$ - $1\frac{1}{2}$	85	120	92	Low-carbon, martensite, Q&T	
		74	105	81		
A325, type 3	$\frac{1}{4}$ -1 $1\frac{1}{8}$ - $1\frac{1}{2}$	85	120	92	Weathering steel, Q&T	
		74	105	81		
A354, grade BC	$\frac{1}{4}$ - $2\frac{1}{2}$ $2\frac{3}{4}$ -4	105	125	109	Alloy steel, Q&T	
		95	115	99		
A354, grade BD	$\frac{1}{4}$ -4	120	150	130	Alloy steel, Q&T	
A449	$\frac{1}{4}$ -1 $1\frac{1}{8}$ - $1\frac{1}{2}$ $1\frac{3}{4}$ -3	85	120	92	Medium-carbon, Q&T	
		74	105	81		
		55	90	58		
A490, type 1	$\frac{1}{4}$ - $1\frac{1}{2}$	120	150	130	Alloy steel, Q&T	
A490, type 3	$\frac{1}{4}$ - $1\frac{1}{2}$	120	150	130	Weathering steel, Q&T	








*Minimum strengths are strengths exceeded by 99 percent of fasteners.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเลขที่กำกับอยู่บนหัวของสลักเกลียวจะเป็นตัวยืนยันว่า สลักเกลียวนั้นได้รับการผลิตให้มีคุณสมบัติเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด อย่างไรก็ตามประเทศต่างๆ ก็ยังสามารถนำเข้าสู่สลักเกลียวที่ไม่มีเครื่องหมายที่กำกับอยู่บนหัวได้ สำหรับนอตยึดสลักเกลียวจะได้รับการจัดเกรดให้เข้าคู่กันได้กับสลักเกลียว

ตารางที่ 3-10 ASTM Specification for Steel Bolts [6 : P420]

Metric Mechanical-Property Classes for Steel Bolts, Screws, and Studs *

Property Class	Size Range, Inclusive	Minimum Proof Strength, † MPa	Minimum Tensile Strength, † MPa	Minimum Yield Strength, † MPa	Material	Head Marking
4.6	M5-M36	225	400	240	Low or medium carbon	
4.8	M1.6-M16	310	420	340	Low or medium carbon	
5.8	M5-M24	380	520	420	Low or medium carbon	
8.8	M1.6-M36	600	830	660	Medium carbon, Q&T	
9.8	M1.6-M16	650	900	720	Medium carbon, Q&T	
10.9	M5-M36	830	1040	940	Low-carbon martensite, Q&T	
12.9	M1.6-M36	970	1220	1100	Alloy, Q&T	

*The thread length for bolts and cap screws is

$$l_T = \begin{cases} 2d + 6 & l \leq 125 \\ 2d + 12 & 125 < l \leq 200 \\ 2d + 25 & l > 200 \end{cases}$$

where l is the bolt length. The thread length for structural bolts is slightly shorter than given above.

† Minimum strengths are strength exceeded by 99 percent of fasteners.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.5 แรงดึงในรอยต่อที่เกิดจากโหลดภายนอก (Tension Joints- The External Load)

ในหัวข้อนี้เราจะพิจารณาว่าจะเกิดอะไรขึ้นเมื่อมีโหลดแรงดึงจากภายนอก P มากระทำกับรอยต่อด้วยสลักเกลียว ดังแสดงตามรูปที่ 3-12 เริ่มจากสมมติว่ามีแรงจับยึดซึ่งเกิดจากแรงดึงเบื้องต้นในสลักเกลียว F_i แรงนี้เกิดจากการกดรอยต่อยึดสลักเกลียวให้แน่นตามที่ต้องการก่อนที่จะมีแรงจากภายนอกมากระทำ ค่าตัวแปรต่างๆ ที่ใช้มีดังนี้

$$P_b = \text{โหลดส่วนที่สลักเกลียวรับ}$$

$$P_m = \text{โหลดส่วนที่ชิ้นงานรับ}$$

$$F_b = P_b + F_i = \text{แรงลัพธ์ที่สลักเกลียวได้รับ}$$

$$F_m = P_m - F_i = \text{แรงลัพธ์ที่ชิ้นงานได้รับ}$$

$$C = \text{สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของโหลดจากภายนอก } P \text{ ที่เกิดขึ้นบนสลักเกลียว}$$

$$1 - C = \text{สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของโหลดจากภายนอก } P \text{ ที่เกิดขึ้นบนชิ้นงาน}$$

เนื่องจากโหลด P เป็นแรงดึง จะทำให้รอยต่อเกิดการยืดตัวออกเป็นระยะ δ เราจึงสามารถหาความสัมพันธ์ของระยะการยืดตัวของรอยต่อกับค่าความแกร่งของรอยต่อได้คือ

$$\delta = \frac{P_b}{k_b} \text{ หรือ } \delta = \frac{P_m}{k_m} \quad (3.40)$$

จากนั้นเราจะทราบความสัมพันธ์ระหว่าง P_m กับ P_b คือ

$$P_m = P_b \frac{k_m}{k_b} \quad (3.41)$$

และเนื่องจาก $P = P_b + P_m$ จะได้

$$P_b = \frac{k_b P}{k_b + k_m} = CP \quad (3.42)$$

$$\text{และ} \quad P_m = P - P_b = (1-C)P \quad (3.43)$$

เมื่อ

$$C = \frac{k_b}{k_b + k_m} \quad (3.44)$$

ค่านี้เรียกว่า “ค่าคงที่ความแกร่งของรอยต่อ” ดังนั้น แรงลัพธ์ที่เกิดขึ้นในสลักเกลียวจึงมีค่า

$$F_b = P_b + F_i = CP + F_i \quad ; F_m < 0 \quad (3.45)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่ติดอยู่ด้วยกัน คือ

$$F_m = P_m + F_i = (1 - C)P - F_i \quad ; F_m < 0 \quad (3.46)$$

ตารางที่ 3-11 ได้รวบรวมข้อมูลค่าที่มีความสัมพันธ์กับความแข็งแรงของรอยต่อ ค่า Grip ในตารางนี้จะเป็นขนาดของการยึดชิ้นงานเพียง 2 ชิ้นเข้าด้วยกันโดยใช้สลักเกลียวที่ทำจากเหล็กกล้าโดยไม่ใช้แหวนรอง

ตารางที่ 3-11 ค่าความแข็งแรงของสลักเกลียว 12 NC ขนาด ¼ นิ้ว [6 : P422]

Bolt Grip, in	Stiffnesses, Mlb/in			
	k_b	k_m	C	1 - C
2	2.57	12.69	0.168	0.832
3	1.79	11.33	0.136	0.864
4	1.37	10.63	0.114	0.886

3.3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดในสลักเกลียวกับแรงดึงที่เกิดขึ้น

เราได้เรียนรู้มาแล้วว่าการออกแบบให้มีแรงดึงเบื้องต้นในสลักเกลียว (Preload) สูง จะมีความสำคัญกับรอยต่อที่ยึดด้วยสลักเกลียว ต่อไปเราจะพิจารณาวิธีการที่ทำให้มั่นใจได้ว่าได้มีการกำหนดแรงดึงเบื้องต้นในสลักเกลียวอย่างเที่ยงตรงเมื่อนำชิ้นงานมาประกอบเข้าด้วยกันและยึดด้วยสลักเกลียว

ถ้าเราสามารถวัดความยาวของสลักเกลียวในขณะที่จับยึดชิ้นงานได้ด้วยเครื่องมือที่เรียกว่า “ไมโครมิเตอร์” เราจะสามารถคำนวณระยะการยืดตัวของสลักเกลียวอันเนื่องมาจาก Preload ได้จากสูตร $\delta = F_i / AE$ จากนั้นให้กวาดนอตเข้าไปจนกระทั่งได้ระยะ δ จะทำให้มั่นใจได้ว่าการยึดชิ้นงานเป็นไปตาม Preload ที่ต้องการ

โดยทั่วไปเราจะไม่สามารถวัดระยะการยืดตัวของสกรูได้ ทั้งนี้เนื่องจากเกลียวที่ส่วนปลายของสกรูจะฝังอยู่ในชิ้นงาน และไม่สามารถมองเห็นได้ ในกรณีนี้ต้องการให้การจับยึดชิ้นงานมีแรงกระทำในเบื้องต้นเป็นไปตามการออกแบบเราจำเป็นต้องใช้เครื่องมือที่เรียกว่า “ประแจวัดโมเมนต์บิด (Torque wrench)” ในการกวาดสกรูให้เกิดการยืดตัวออกเป็นระยะ δ ก็จะได้แรงบิดที่ทำให้มีแรงดึงในเบื้องต้นเป็นไปตามที่ต้องการ และถึงแม้ว่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานอาจจะมีการแปรผันเป็นอย่างมาก แต่เราก็สามารถคาดคะเนค่าโมเมนต์บิดที่ทำให้เกิด Preload ที่ต้องการได้จากสมการดังต่อไปนี้

โมเมนต์บิดที่ทำให้เกิด Preload

$$T = \frac{F_i d_m}{2} \left(\frac{1 + \pi f d_m \sec \alpha}{\pi d_m - f l \sec \alpha} \right) + \frac{F_i f_c d_c}{2} \quad (3.47)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจาก $\tan \lambda = l / \pi d_m$ เราจึงนำ πd_m ไปหารทั้งตัวตั้งและตัวหารในเทอมแรกของสมการ (3.47) จะได้

$$T = \frac{F_i d_m}{2} \left(\frac{\tan \lambda + f \sec \alpha}{1 - f \tan \lambda \sec \alpha} \right) + \frac{F_i f_c d_c}{2} \quad (3.48)$$

เส้นผ่านศูนย์กลางของแหวนรองสลักเกลียวหัวทกเหลี่ยมจะมีขนาด $1^{1/2}$ เท่าของขนาดระบุ ดังนั้นเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของส่วนวงแหวนคือ $d_c = (d + 1.5d) / 2 = 1.25d$ เราจึงสามารถจัดรูปสมการข้างบนใหม่ได้เป็น

$$T = \left[\left(\frac{d_m}{2d} \right) \left(\frac{\tan \lambda + f \sec \alpha}{1 - f \tan \lambda \sec \alpha} \right) + 0.625 f_c \right] F_i d \quad (3.49)$$

ตอนนี้เราก็จะสามารถนิยามค่าสัมประสิทธิ์ของโมเมนต์บิด K ว่าเป็นเทอมที่อยู่ในวงเล็บใหญ่คือ

$$K = \left(\frac{d_m}{2d} \right) \left(\frac{\tan \lambda + f \sec \alpha}{1 - f \tan \lambda \sec \alpha} \right) + 0.625 f_c \quad (3.50)$$

ดังนั้น เราจึงสามารถเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$T = K F_i d \quad (3.51)$$

สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะขึ้นอยู่กับความเรียบของพื้นผิว ความเที่ยงตรง และระดับของการหล่อลื่น ค่าเฉลี่ยของ f และ f_c จะมีค่าประมาณ 0.15 สิ่งที่น่าสนใจในสมการคือความเป็นจริงของ $K = 0.20$ สำหรับ $f = f_c = 0.15$ โดยไม่คำนึงถึงขนาดของสลักเกลียว และไม่ว่าสลักเกลียวนั้นจะมีเกลียวหยาบหรือเกลียวละเอียดก็ตาม

Blake และ Kurtz ได้กำหนดค่าแรงดึงเบื้องต้นในสลักเกลียวสำหรับสลักเกลียว 20 UNF ขนาด $1/2$ นิ้ว เมื่อกวัดด้วยโมเมนต์บิด 90 N.m ในระบบเมตริกซ์ ตารางที่ 3-12 และ 3-13 แสดงให้เห็นการแปลงแรงกระทำในเบื้องต้น สำหรับสลักเกลียวทั้ง 2 กลุ่มข้างต้น ให้เป็นหน่วย SI

ตารางที่ 3-12 การแจกแจงแรงกระทำเบื้องต้นในสลักเกลียว F_i ที่ไม่มีการหล่อลื่น [6 : P423]

23.6,	27.6,	28.0,	29.4,	30.3,	30.7,	32.9,	33.8,	33.8,	33.8,
34.7,	35.6,	35.6,	37.4,	37.8,	37.8,	39.2,	40.0,	40.5,	42.7

*Mean value $F_i = 34.3$ kN. Standard deviation, $\sigma = 4.91$ kN.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3-13 การแจกแจงแรงกระทำเบื้องต้นในสลักเกลียว F_t ที่มีการหล่อลื่น [6 : P424]

30.3,	32.5,	32.5,	32.9,	32.9,	33.8,	34.3,	34.7,	37.4,	40.5
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	------

*Mean value $F_t = 34.18$ kN. Standard deviation, $\sigma = 2.88$ kN.

ให้สังเกตว่า แรงดึงเบื้องต้นในสลักเกลียวเฉลี่ยของทั้ง 2 กลุ่ม จะมีค่าเท่ากันคือประมาณ 34 kN สำหรับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสลักเกลียวที่ไม่มีสารหล่อลื่นมีค่า 4.9 kN และสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนมีค่าประมาณ 0.15 ในขณะที่ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสลักเกลียวที่มีการหล่อลื่นมีค่า 3 kN และสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนมีค่าประมาณ 0.09 การใช้สมการข้างบนเพื่อหาค่า K ของสลักเกลียวตัวอย่างทั้ง 2 กลุ่ม จะได้ $K = 0.208$

Bowman Distribution ซึ่งเป็นบริษัทผู้ผลิตสลักเกลียวรายใหญ่ ได้แนะนำค่า K สำหรับเงื่อนไขการใช้งานสลักเกลียวดังแสดงในตารางที่ 3-14

ตารางที่ 3-14 Torque Factor, K [6 : P424]

Bolt Condition	K
Nonplated, black finish	0.30
Zinc-plated	0.20
Lubricated	0.18
Cadmium-plated	0.16
With Bowman Anti-Seize	0.12
With Bowman-Grip nuts	0.09

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

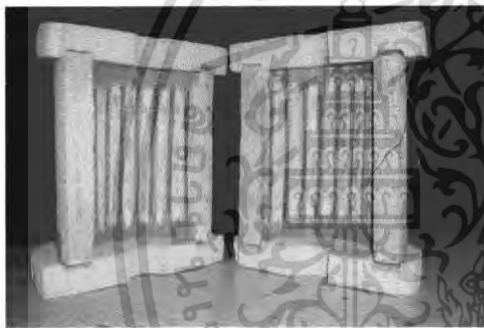
อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยดังต่อไปนี้

4.1.1 เตอบไฟฟ้า

เตอบไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์สำหรับให้ความร้อนแก่เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง ซึ่งเซลล์ชนิดนี้จะเริ่มกระบวนการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิประมาณ 600 องศาเซลเซียสขึ้นไป โดยลักษณะของเตอบจะใช้กำลังไฟฟ้าเป็นแหล่งพลังงานเพื่อเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน กำลังไฟฟ้าที่ใช้คือ 2,200 วัตต์



ก.ผนังซีเมนต์ทนไฟ



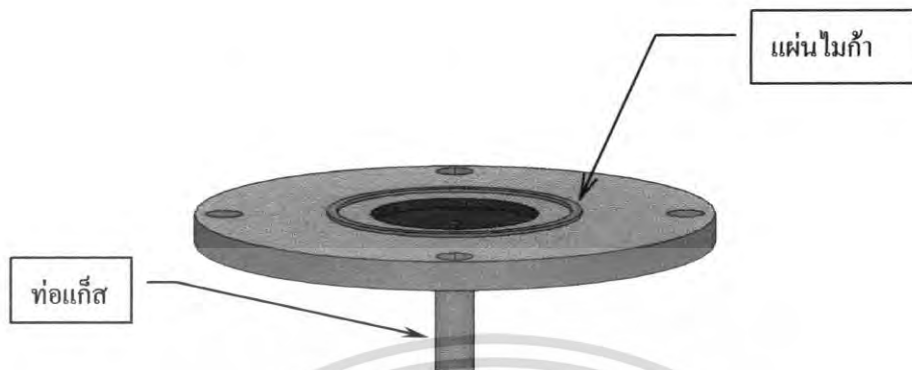
ข.เตอบไฟฟ้า

รูปที่ 4-1 ฉนวนกันความร้อนและเตอบไฟฟ้า

4.1.2 ชุดอินเตอร์คอนเนกเตอร์ (Interconnector) ร่อง U-Shape ขนาด 2x2 mm

ชุดอินเตอร์คอนเนกเตอร์ คืออุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบวัสดุผนึกแก๊สและลักษณะการรั่วซึมของแก๊ส โดยจะได้พิจารณาจากลักษณะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง เมื่อมีอุณหภูมิสูงวัสดุต่าง ๆ ที่ประกอบเป็นเซลล์เชื้อเพลิงจะมีการเสียรูปร่าง ซึ่งที่สภาวะการทำงานแบบนั้นภายใต้ระยะเวลาาน อุปกรณ์จะมีปัญหาด้านวัสดุที่ไม่สามารถทนอุณหภูมิ และแก๊สที่ปล่อยเข้าไปทำปฏิกิริยากับเซลล์จะเกิดการรั่วไหลออกมา ในการออกแบบชุดทดสอบจะได้ออกแบบไว้สำหรับทดสอบลักษณะการเป็นประเก็นของวัสดุที่อยู่ภายใต้แรงกด และอุณหภูมิสูง โดยการผนึกจะได้ออกแบบไว้ให้อยู่ในร่องรูปตัว U ดังรูปที่ 4-2 A.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



A. ชุดทดสอบ (Interconnector) และการผนึกด้วยไม้ก้ำในร่อง U-Shape



B. ท่ออลูมิเนียมประกอบกับ Interconnector

รูปที่ 4-2 ชุดอินเตอร์คอนเนกเตอร์ (Interconnector) และท่ออลูมิเนียม

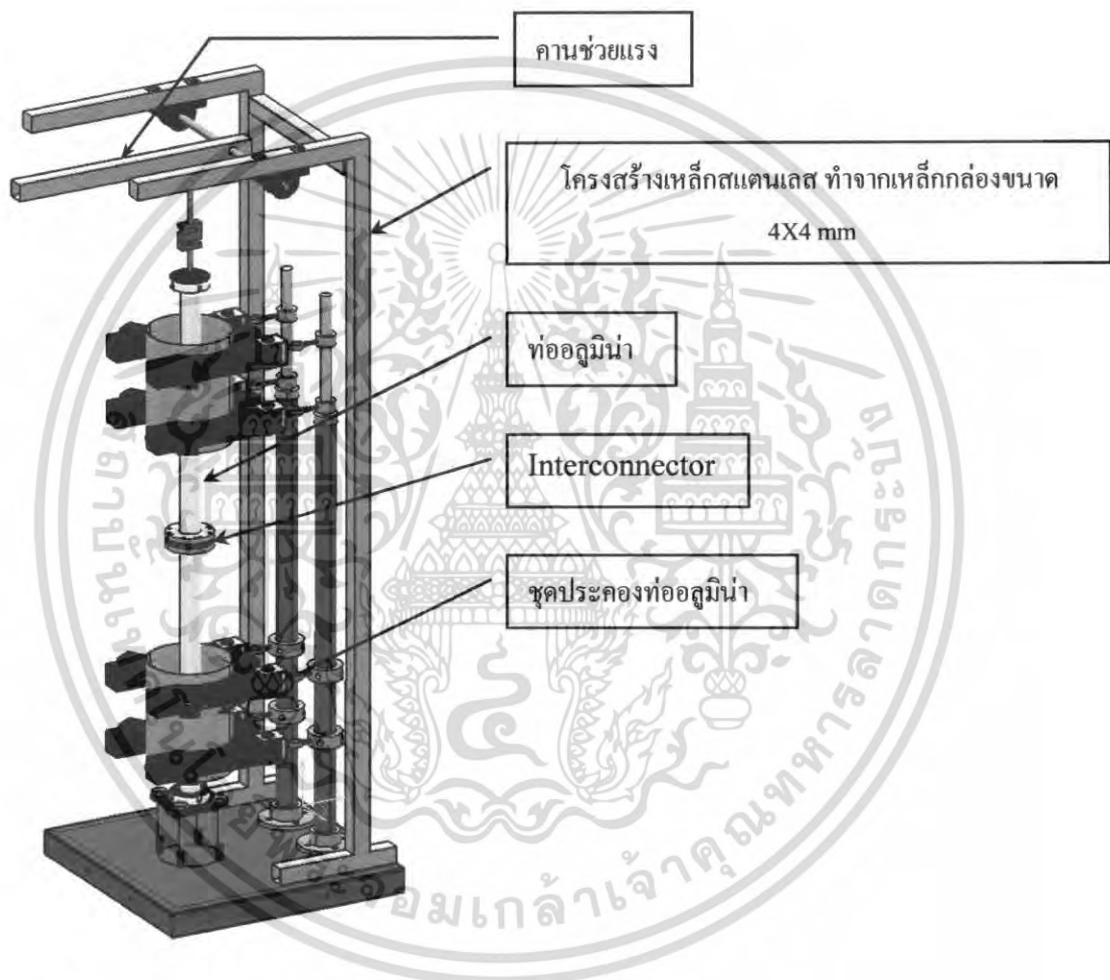
4.1.3 ชุดป้อนแรงให้กับท่ออลูมิเนียมและ Interconnector

ชุดป้อนแรงเป็นอุปกรณ์ที่สร้างแรงกดให้แก่ท่ออลูมิเนียมเพื่อที่จะกดชุดอินเตอร์คอนเนกเตอร์ เพื่อให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างหน้าแปลนของแผ่นเหล็กมากที่สุด ในการออกแบบได้ออกแบบคานช่วยแรงเพื่อใช้แขวนน้ำหนัก โดยโครงสร้างของชุดป้อนแรงและคานช่วยแรงทำจากเหล็กสแตนเลส ดังรูปที่ 4-3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชุดป้อนแรง ประกอบด้วย

1. โครงสร้างเหล็กสแตนเลส ทำจากเหล็กกล่องขนาดพื้นที่หน้าตัด 4x4 mm
2. ชุดประกอบท่ออลูมิน่า
3. คานช่วยแรง



รูปที่ 4-3 โครงสร้างของชุดป้อนแรงและท่ออลูมิน่าที่ประกอบชุด Interconnector

4.1.4 อุปกรณ์วัดการร้าวซึม

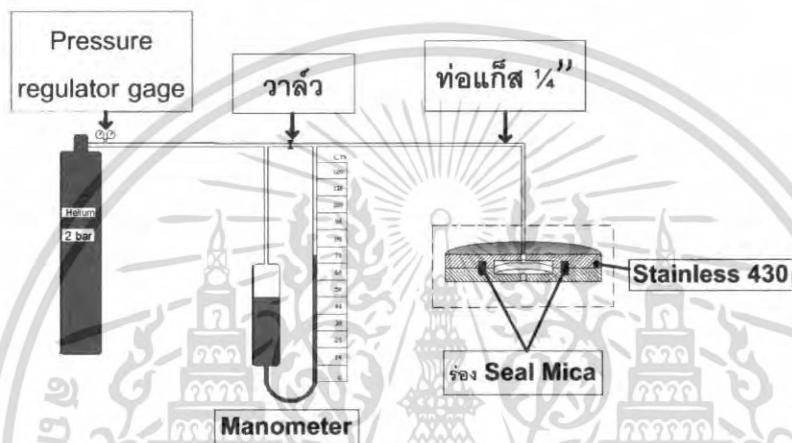
อุปกรณ์วัดการร้าวซึม คืออุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดปริมาณแก๊สที่รั่วซึมในการทดลองการร้าวซึมของแก๊ส สำหรับการวัดการร้าวซึมจะจับเวลาระดับของเหลวที่บรรจุในมานอมิเตอร์หลังจากปล่อยแก๊สฮีเลียมเข้าไปในชุด อินเทอร์เน็ตคอนเนกเตอร์และให้แก๊สอยู่ในระบบอย่างสมดุลจึงทำการวัดระดับของเหลวที่เปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะของอุปกรณ์ที่ใช้วัดการรั่วซึมของแก๊สประกอบด้วย

1. ถังแก๊ส ฮีเลียม
2. มานอมิเตอร์
3. ท่อแก๊สขนาด 1/4"

เมื่อติดตั้งอุปกรณ์ทั้งหมดเข้าด้วยกันจะมีลักษณะดังรูปที่ 4-4



รูปที่ 4-4 อุปกรณ์วัดการรั่วซึม

4.1.5 เทอร์โมคัปเปิ้ล (Thermocouple)

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิภายในเตา โดยเทอร์โมคัปเปิ้ลที่ใช้เป็นแบบ Type K สามารถวัดอุณหภูมิได้ตั้งแต่ 0 -1200 องศาเซลเซียส โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของปลอก 2.5 mm.

4.1.6 เครื่องมือวัดแรงกด

โหลดเซลล์เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดแรงกดตามแนวแกน โดยการต่อกับมิเตอร์สามารถอ่านค่าแรงกดได้โดยตรง



รูปที่ 4-5 Load Cell

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

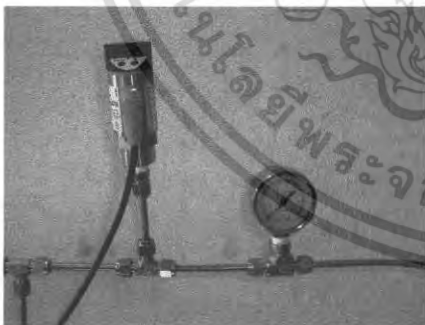
4.1.7 ถังแก๊สฮีเลียม

ในการทดลองการรั่วซึมของแก๊ส และคุณสมบัติการเป็นประเก็นของวัสดุที่นำมาทดลองผืนก ซึ่งการทดลองจะใช้แก๊สฮีเลียมทดลองในเบื้องต้น



รูปที่ 4-6 ถังแก๊สฮีเลียม

4.1.8 อุปกรณ์ควบคุมและวัดความดัน



A. ซ้าย Pressure transducer, ขวา Pressure gage



B. Pressure regulator gage

รูปที่ 4-7 อุปกรณ์ควบคุมและวัดความดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.9 แผ่นไมก้า (Mica)

ไมก้าเป็นวัสดุที่ใช้สำหรับการฉนวนกันแก๊สฮีเลียมสำหรับการทดลองการรั่วซึมของแก๊ส โดยลักษณะของไมก้าเป็นแผ่นบาง ดังรูป 4-8

รูปที่ 4-8 แผ่นไมก้า (Mica)

ไมก้าแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ Muscovite Mica และ Phlogopite Mica ซึ่งมีคุณสมบัติดังตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 Physical Property of Muscovite and Phlogopite micas [7 : P 310-316]

Property	Muscovite	Phlogopite
Color	Ruby/green	Amber/Yellow
% Chemical Water	4.5	3.0
Volume resistivity at 25°C (Ω cm)	40×10^{13} to 2×10^{17}	1×10^{12}
Tensile strength (Mpa)	170	105
Compressive strength (Mpa)	190 – 220	No data
CTE perpendicular to cleavage plane($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	9×10^6 to 36×10^6	30×10^6 to 60×10^6
Thermal conductivity perpendicular to cleavage plane ($\text{W m}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)	0.52	0.43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 วิธีการทดลอง

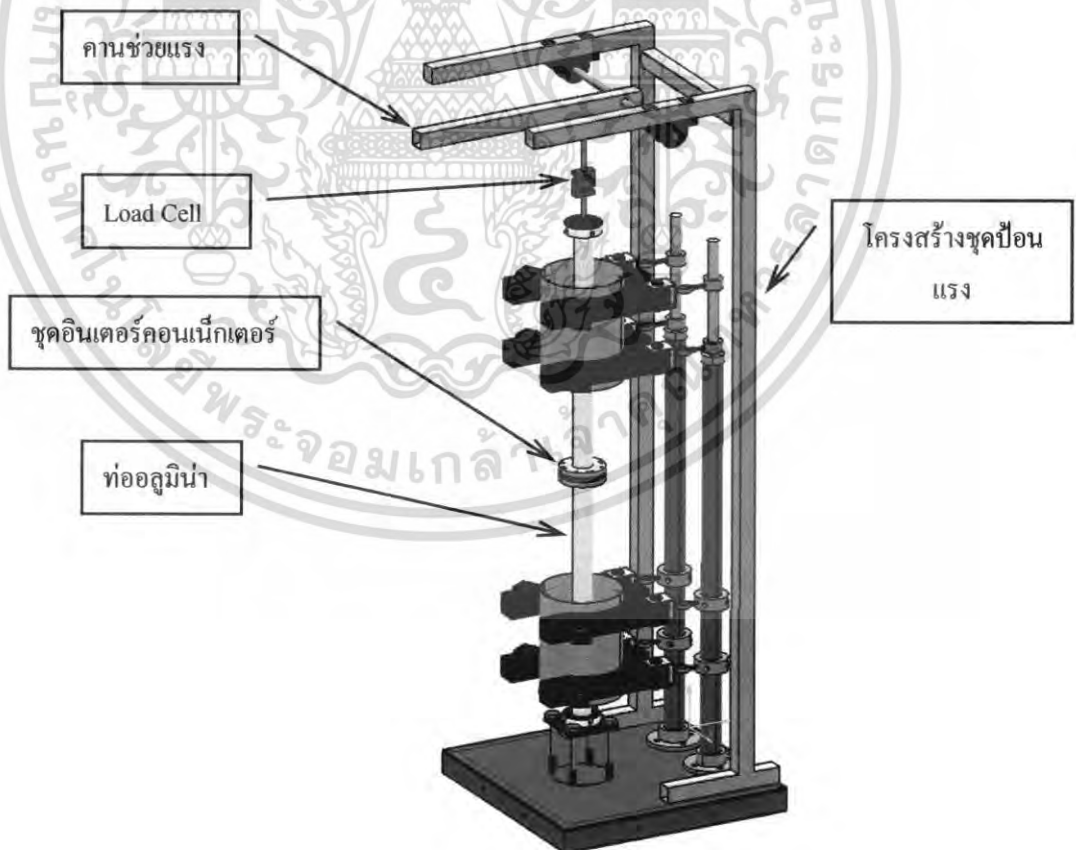
การทดลองแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

4.2.1 ทดสอบการกระจายตัวของแรงกดที่ชุดอินเตอร์คอนเน็กเตอร์ (Interconnector)

ทดลองโดยใช้เทคนิคของแผ่น Pressure Indicating Films เพื่อพิจารณาถึงลักษณะการกระจายตัวของแรงกด และลักษณะการส่งถ่ายแรงที่มีอิทธิพลต่อการกระจายตัวของแรงบริเวณหน้าแปลนของชุดอินเตอร์คอนเน็กเตอร์ (Interconnector) ผลการทดลองที่ได้สามารถนำมาพิจารณาขนาดของแรงกด และลักษณะการสัมผัสกันของแผ่นเหล็ก ที่จะส่งผลต่อการร่วซึมของแก๊สบริเวณผิวสัมผัสของชุดอินเตอร์คอนเน็กเตอร์ (Interconnector) ได้

ขั้นตอนการทดลอง

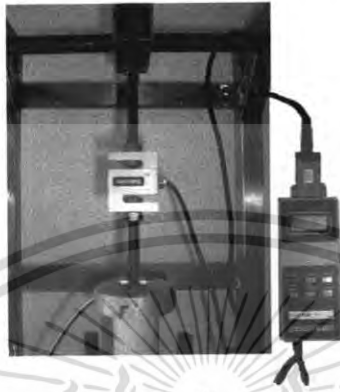
1. ประกอบอุปกรณ์ ดังรูป



รูปที่ 4-9 อุปกรณ์ทดสอบแรงกด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ประกอบชุดกดท่อลูมิน่า ที่มี Load cell เป็นตัวอ่านค่าแรงกดจากคานช่วยแรงที่เขวมน้ำหนักและส่งผ่านแรงมายังท่อลูมิน่า โดยการประกอบเข้าระหว่างคานช่วยแรงและท่อลูมิน่าดังรูป



รูปที่ 4-10 การประกอบอุปกรณ์วัดแรงกด Load cell

3. ตัดแผ่น Pressure Films 2 แผ่น คือ แผ่น Donor sheet และแผ่น Receiver sheet โดยตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมด้านเท่า โดยขนาดของแผ่นที่ตัดให้ใหญ่กว่าหน้าแปลนของชุดอินเตอร์คอนเนกเตอร์พอประมาณ

4. ติดแผ่น Pressure Films ที่ผิวของแผ่นเหล็กของชุดอินเตอร์คอนเนกเตอร์ ดังรูป 4-11

4.1 Donor sheet

- ผิวมัน ติดกับชิ้นงาน
- ผิวหยาบ matte (rough) sides ติดกับ Receiver sheet

4.2 Receiver sheet

- ผิวมัน ติดกับชิ้นงาน
- ผิวหยาบ matte (rough) sides ติดกับ Donor sheet



Donor Sheet

Receiver sheet

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเฉพาะเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4-11 การติดตั้งแผ่น Pressure films

5. เลื่อนท่ออลูมินาลงเพื่อให้หน้าแปลนสัมผัสกัน จากนั้นก็เขวนน้ำหนักที่คานช่วยแรงเพื่อให้กดท่ออลูมินา และชุดอินเทอร์คอนเนกเตอร์ ดังรูป



รูปที่ 4-12 ลักษณะการสัมผัสกันของแผ่น Pressure Films

4. ทำการเขวนน้ำหนักเพื่อกดชุดอินเทอร์คอนเนกเตอร์โดยเพิ่มน้ำหนักทีละ 10 Kg และในระหว่างการเปลี่ยนน้ำหนักก็ทำการถ่ายรูปสี่ที่เกิดขึ้นกับแผ่น Pressure Film ที่น้ำหนักขณะนั้นเป็นการบันทึกผลการทดลอง

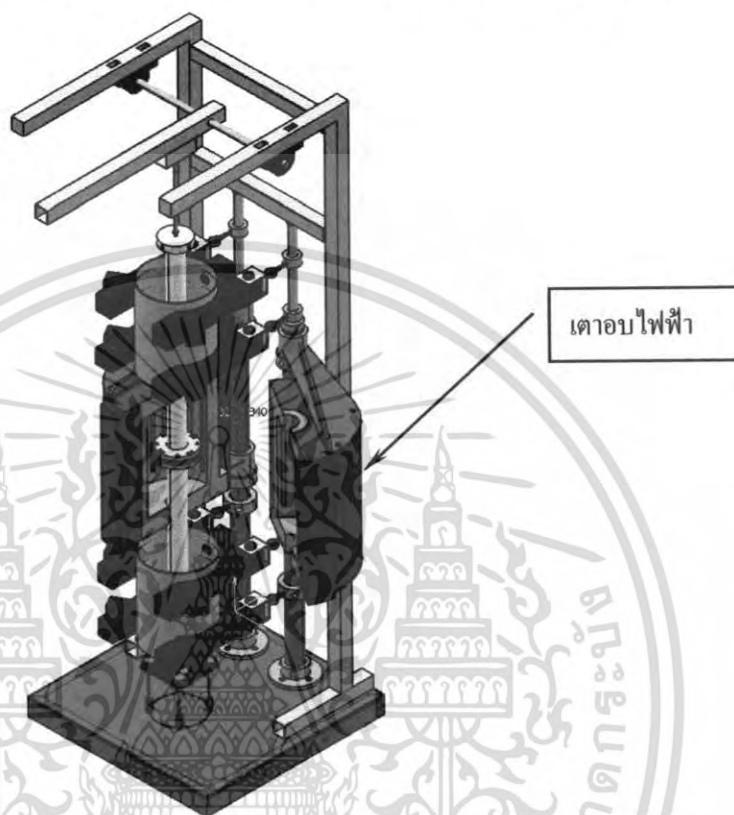
4.2.2 ทดลองการรั่วซึมของแก๊สที่อุณหภูมิห้อง

การทดลองนี้จะพิจารณาลักษณะการรั่วซึมที่เกิดขึ้นเมื่อใช้แผ่นไมก้า (Mica) เป็นตัวผนึกแก๊ส โดยใช้แก๊สฮีเลียมเป็นแก๊สทดสอบ และชุดอินเทอร์คอนเนกเตอร์จะถูกเจาะร่องใส่แผ่นไมก้า ขนาดลึก 2 mm กว้าง 2 mm โดยการทดลองกระทำ 2 ลักษณะ คือการทดลองโดยการเขวนน้ำหนักกดท่ออลูมินาเพื่อส่งถ่ายแรงไปยังชุดอินเทอร์คอนเนกเตอร์ กับการทดลองยึดชุดอินเทอร์คอนเนกเตอร์โดยใช้สลักเกลียว 4 ตัว การทดลองกระทำที่อุณหภูมิห้อง ผลการทดลองที่ได้จะนำมาวิเคราะห์ลักษณะการรั่วซึมที่เกิดขึ้นเพื่อเป็นข้อมูลเบื้องต้นของการพัฒนาวัสดุที่ใช้ผนึกแก๊ส เมื่อต้องนำไปใช้กับเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็งแบบแผ่นต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการทดลอง

1. ประกอบชุดอุปกรณ์โดยประกอบเตาอบไฟฟ้า และ ชุดปั๊มแรงที่มีท่ออลูมินาเข้าด้วยกันดังรูป 4-13



รูปที่ 4-13 ชุดปั๊มแรงที่ประกอบกับเตาอบไฟฟ้าและท่ออลูมินา

2. ติดตั้ง Pressure regulator gage เข้ากับถังซีลียมดังรูป



รูปที่ 4-14 การติดตั้ง Pressure regulator gage

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ต่อก๊าซแก๊สแทนเลขขนาด $1/4$ " จาก Pressure regulator gage เข้าสู่ชุดวัดการรั่วซึมที่ประกอบด้วย มาณอร์มิเตอร์และวาล์วเปิดปิด ภายในมาณอร์มิเตอร์บรรจุของเหลวซึ่งมีสีแดงเพื่อให้สังเกตได้ง่าย จาก มาณอร์มิเตอร์ด้านทางออกจะต่อก๊าซเข้าสู่ชุด Interconnector โดยเดินท่อไว้ภายในท่ออลูมิเนียม ดังรูป



A. ด้านบนท่ออลูมิเนียม



B. ภายในท่ออลูมิเนียม

รูปที่ 4-15 ลักษณะการเดินท่อแก๊สฮีเลียมในท่ออลูมิเนียมเข้าสู่ Interconnector

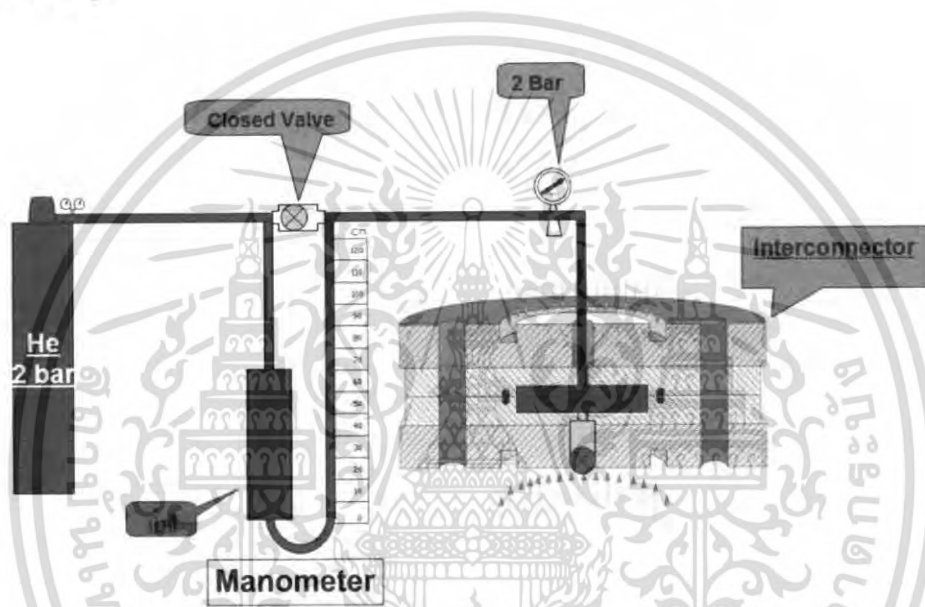
4. ใส่แผ่นไม้ก้ำที่ตัดไว้เข้าไปในร่องของตัว Interconnector ดังรูป



รูปที่ 4-16 ลักษณะไม้ก้ำที่ใส่เข้าไปในร่องของตัว Interconnector

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. แขนงน้ำหนักเพื่อให้น้ำหนักกดที่ Load cell และท่ออลูมิน่า จากนั้นก็ปล่อยแก๊สฮีเลียมจากถังเข้าสู่ มานอร์มิเตอร์และตัว Interconnector ทั้งเวลาไว้ประมาณ 30 นาที โดยความดันที่ใช้คือ 2 bar ให้สังเกตดู ความดันจาก Pressure gage ให้ได้ 2 bar เช่นกัน จากนั้นก็ปิดวาล์วท่อแก๊สบริเวณตรงกลางของ มานอร์มิเตอร์เพื่อให้แก๊สเปลี่ยนทิศทางวิ่งเข้าสู่มานอร์มิเตอร์แล้วดันของเหลวให้เปลี่ยนระดับ การทดลอง จะจับเวลาการเพิ่มขึ้นของระดับของเหลวในมานอมิเตอร์ ผลที่ได้คือปริมาณแก๊สที่มีการรั่วซึมออกที่บริเวณ Interconnector ดังรูป



รูปที่ 4-17 การวัดการรั่วซึม โดยมานอมิเตอร์

6. การทดลองการรั่วซึมจะแบ่งออกเป็น 2 การทดลอง คือ

6.1 การทดลองโดยการแขวนน้ำหนักเพื่อกดท่ออลูมิน่าและชุด Interconnector โดยการเพิ่มน้ำหนักที่ คานช่วยแรงที่ละ 10 kg และทำการจับเวลาการเพิ่มขึ้นของของเหลวในตำแหน่งที่แขวนน้ำหนักตอนนั้น

6.2 การทดลองโดยการใช้สลักเกลียวยึดตัวอินเตอร์คอนเนกเตอร์ (Interconnector) เข้าด้วยกัน การ จับเวลาของเหลวจะกระทำเหมือนกับข้อ 6.1 แต่เปลี่ยนลักษณะการส่งถ่ายแรงจากท่ออลูมิน่ามาเป็นการใช้ สลักเกลียวแทน โดยทอร์คเริ่มต้นที่ใช้คือ 0.2 N.m – 6.0 N.m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ผลการทดลอง

5.1 ผลการทดลองการกระจายตัวของแรงที่ชุดอินเตอร์คอนเนกเตอร์ (Interconnector)

การทดลองแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

- ทดลองโดยวิธีแขวนน้ำหนักเพื่อกดท่ออลูมินา ซึ่งแรงที่เกิดเป็นแบบ Point Load โดยแรงจะถูกส่งผ่านท่ออลูมินาไปยังชุดอินเตอร์คอนเนกเตอร์
- ทดลองโดยการใช้สลักเกลียวยึดชุดอินเตอร์คอนเนกเตอร์ โดยใช้สลักเกลียว 4 ตัว


5.1.1 ผลการทดลองโดยการแขวนน้ำหนัก

การทดลองโดยการแขวนน้ำหนักนี้ จะได้ทำการทดลอง 2 ครั้งด้วยกัน โดยใช้เงื่อนไขในการทดลองเดียวกัน เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่แม่นยำและน่าเชื่อถือ

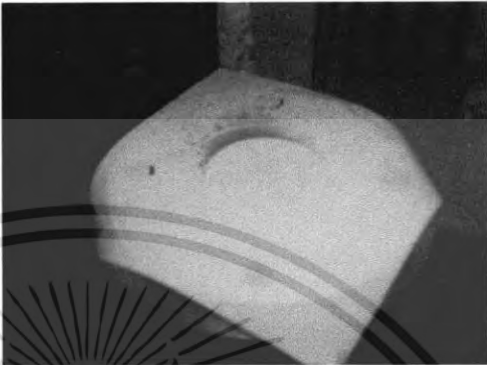

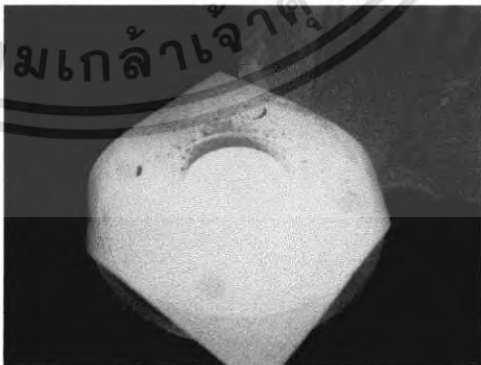
5.1.1.1 ผลการทดลองครั้งที่ 1

- ทดลองโดยใช้เทคนิค Pressure Indicating Film
- ลักษณะของแรงกด Uniform load (Alumina OD 55 mm. ID 45 mm.)
- ทดลองที่อุณหภูมิห้อง

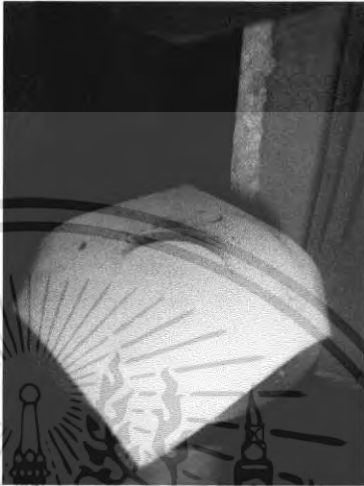


ตารางที่ 5-1 ผลการทดลอง ลักษณะการกระจายตัวของแรงผ่าน Point load และท่ออลูมินาไปยังแผ่น Pressure Indicating Film ครั้งที่ 1

น้ำหนัก (kN)	ผลการทดลอง Pressure Indicating film
Initial load 0.122	

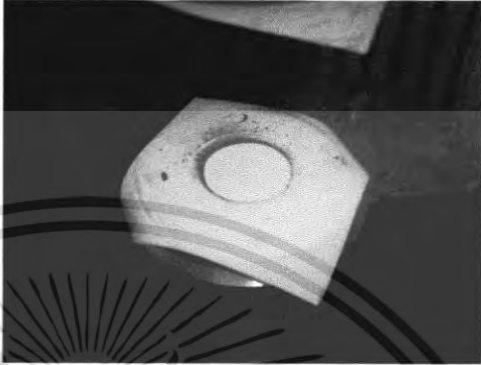

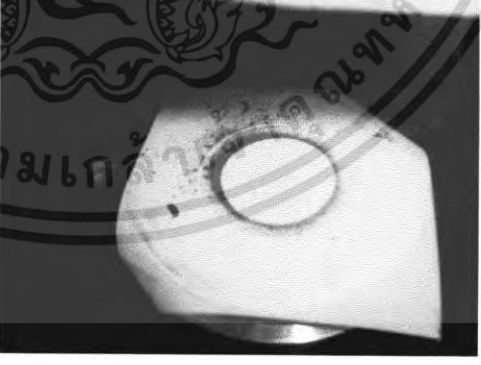
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนัก (kN)	ผลการทดลอง Pressure Indicating film
0.215	
0.313	
0.412	

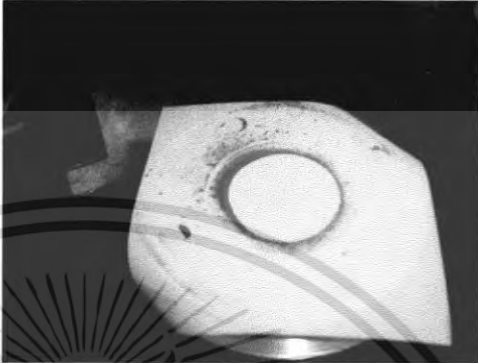


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนัก (kN)	ผลการทดลอง Pressure Indicating film
0.510	
0.608	
0.706	

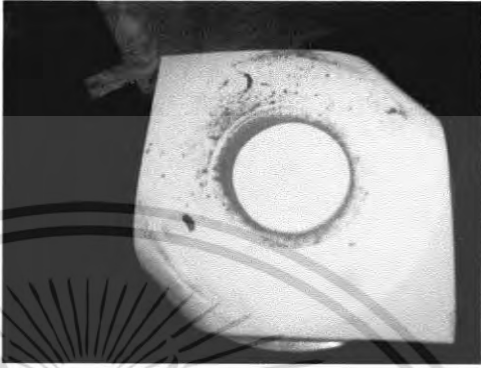

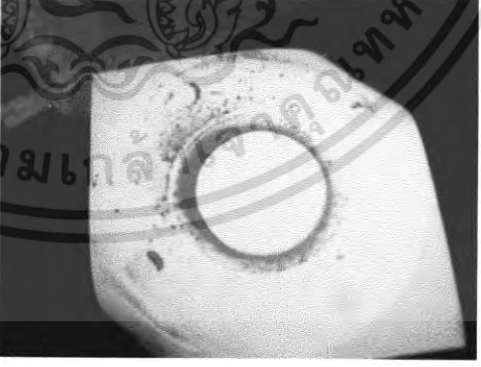
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนัก (kN)	ผลการทดลอง Pressure Indicating film
0.804	
0.902	
1.00	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนัก (kN)	ผลการทดลอง Pressure Indicating film
1.098	
1.197	
1.295	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



น้ำหนัก (kN)	ผลการทดลอง Pressure Indicating film
1.393	
1.491	
1.590	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

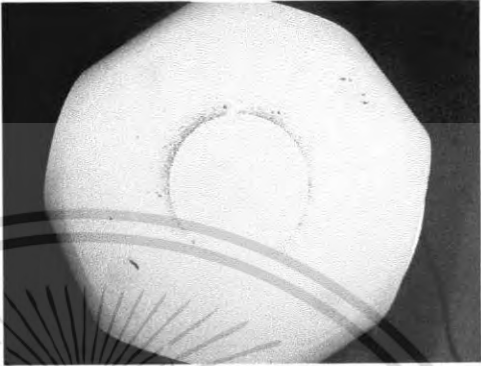

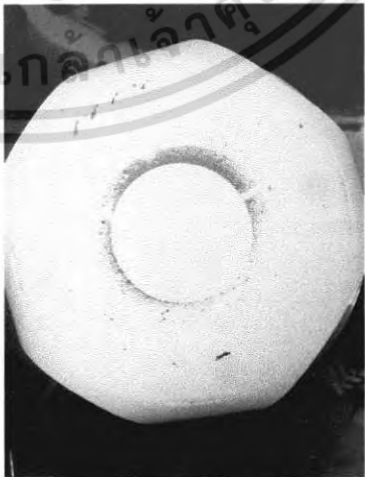
5.1.1.2 ผลการทดลองครั้งที่ 2

- ทดลองโดยใช้เทคนิค Pressure Indicating Film
- ลักษณะของแรงกด Uniform load (Alumina OD 55 mm. ID 45 mm.)
- ทดลองที่อุณหภูมิห้อง



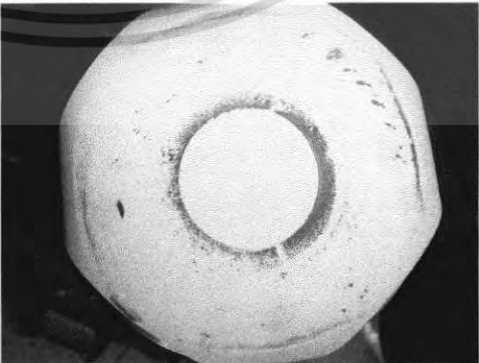
ตารางที่ 5-2 ผลการทดลองลักษณะการกระจายตัวของแรงผ่าน Point load และท่ออลูมินา ไปยังแผ่น Pressure Indicating Film ครั้งที่ 2

น้ำหนัก (kN)	ผลการทดลอง Pressure Indicating Film
0.125	
0.223	

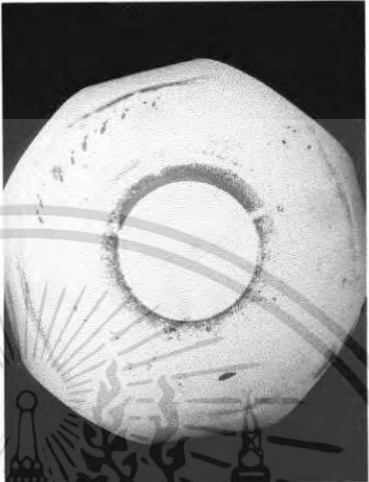


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนัก (kN)	ผลการทดลอง Pressure Indicating Film
0.321	
0.419	
0.517	

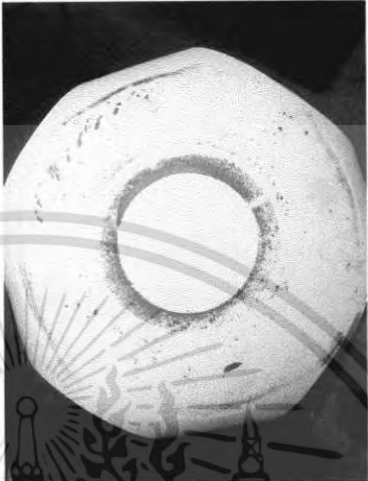

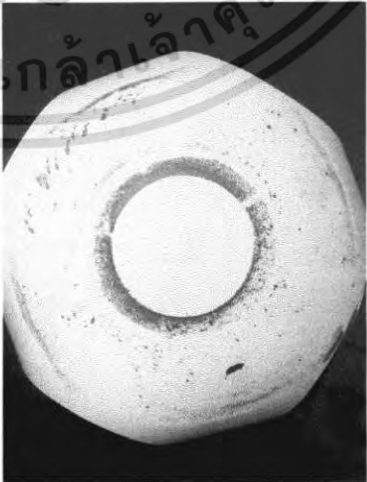
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนัก (kN)	ผลการทดลอง Pressure Indicating Film
0.615	
0.713	
0.811	

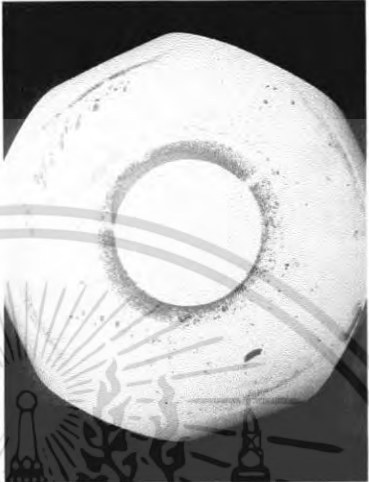

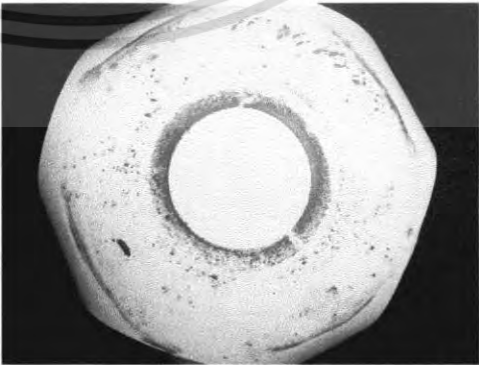
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนัก (kN)	ผลการทดลอง Pressure Indicating Film
0.909	
1.001	
1.106	

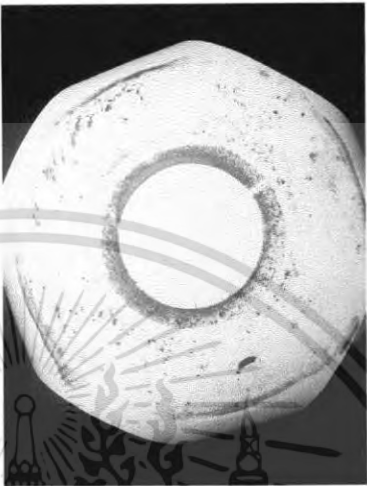


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนัก (kN)	ผลการทดลอง Pressure Indicating Film
1.204	
1.302	
1.40	

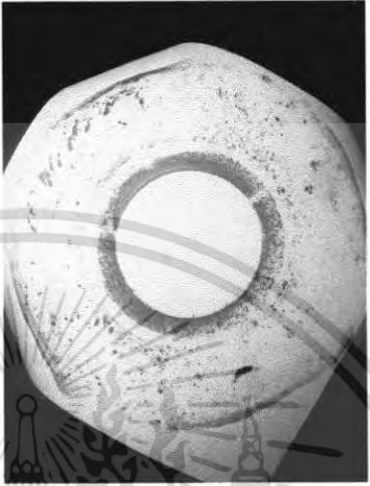
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนัก (kN)	ผลการทดลอง Pressure Indicating Film
1.498	
1.596	
1.694	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนัก (kN)	ผลการทดลอง Pressure Indicating Film
1.792	
1.890	
1.988	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนัก (kN)	ผลการทดลอง Pressure Indicating Film
2.087	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.1.3 ข้อสังเกตจากการทดลองการกระจายตัวของแรงกดที่ชุดอินเตอร์คอนเนกเตอร์ (Interconnector) โดยวิธีการแขวนน้ำหนักกดท่ออลูมิน่า

จากผลการทดลองการกระจายตัวของแรงกดที่ชุดอินเตอร์คอนเนกเตอร์ (Interconnector) โดยทำการทดลอง 2 ครั้ง สามารถพิจารณาได้ดังนี้

การทดลองครั้งที่ 1 เม็ดสีที่เกิดขึ้นกับแผ่น Pressure Film มีลักษณะที่มีการกระจายตัวของเม็ดสีที่ค่อนข้างไม่เป็นแบบสม่ำเสมอ โดยมีความเข้มเป็นบางตำแหน่งเท่านั้น สังเกตได้จากความเข้มของสีที่ไม่เท่ากัน สาเหตุเกิดจากการที่ชุดอินเตอร์คอนเนกเตอร์ (Interconnector) เกิดการสัมผัสกันไม่เต็มพื้นที่ผิวของแผ่นเหล็ก ซึ่งก็มีสาเหตุมาจากอุปกรณ์บางส่วนด้วยเช่นกัน เช่น ชุดป้อนแรง โครงสร้างของชุดป้อนแรง และการส่งถ่ายแรงผ่านท่ออลูมิน่ามายังชุดอินเตอร์คอนเนกเตอร์ที่ไม่ตั้งตรงในแนวตั้งตลอดเวลา จากสาเหตุนี้ก็จะได้ทำการแก้ไขในส่วนของอุปกรณ์โดยทำการปรับแต่งในเบื้องต้น จากนั้นก็จะได้ทำการทดลองซ้ำอีกครั้งเพื่อต้องการผลของการกระจายตัวที่เป็นแบบสม่ำเสมอมากขึ้น

การทดลองครั้งที่ 2 หลังจากรับทราบปัญหาจากการทดลองครั้งแรก แล้วนำมาสู่การทดลองครั้งที่ 2 พบว่า การกระจายตัวของเม็ดสีที่เกิดขึ้นค่อนข้างที่จะมีการกระจายตัวที่ดีกว่า สาเหตุเกิดจากการปรับแต่งอุปกรณ์ โดยเน้นที่การส่งถ่ายแรงจากท่ออลูมิน่ามายังชุดอินเตอร์คอนเนกเตอร์ต้องให้อยู่ในแนวตั้ง และปรับแต่งชุดประคองท่อให้สามารถประคองท่ออลูมิน่าให้ตั้งตรงตลอดการทดลอง ส่งผลให้สามารถแขวนน้ำหนักกดท่ออลูมิน่าและชุดอินเตอร์คอนเนกเตอร์ได้มากขึ้น และเกิดการสัมผัสกันเต็มพื้นที่มากขึ้น



การกระจายตัวของแรงที่กดชุดอินเตอร์คอนเนกเตอร์นั้น จะส่งผลให้ผิวสัมผัสของแผ่นเหล็กด้านใน (Interface) สนิทกันและมีช่องว่างระหว่างแผ่นเหล็กน้อย ด้วยเหตุผลนี้ก็จะส่งผลดีต่อการรั่วซึมที่เกิดขึ้น โดยจะสามารถช่วยลดปริมาณการรั่วซึมของแก๊สให้น้อยลงได้

5.1.2 ผลการทดลองโดยการใช้สลักเกลียว 4 ตัว (4 Point Loads)

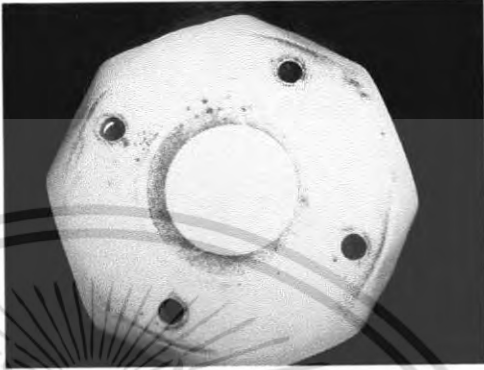


5.1.2.1 ผลการทดลองครั้งที่ 1

- ทดลองโดยใช้เทคนิค Pressure Indicating Film
- ลักษณะของแรงกด 4 Point loads (Alumina OD 55 mm. ID 45 mm.)
- ทดลองที่อุณหภูมิห้อง

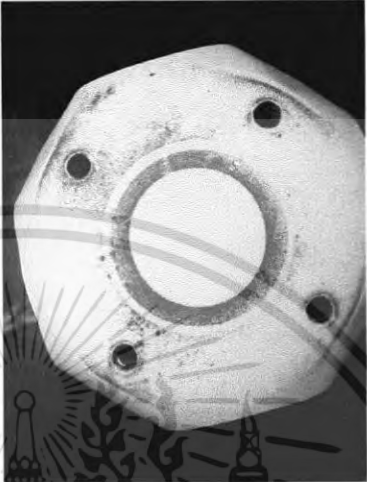

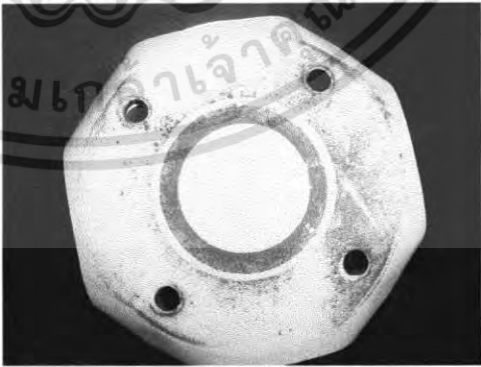
ตารางที่ 5-3 ลักษณะการกระจายตัวของแรงโดยการใช้สลักเกลียว 4 ตัว (4 Point Loads) ไปยังแผ่น Pressure Indicating Film ครั้งที่ 1

ทอร์ค (T) (N.m)	ผลการทดลอง Pressure Indicating film
Initial Loads	
0.20 N.m	

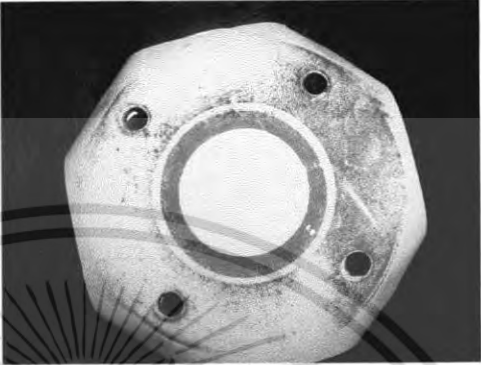
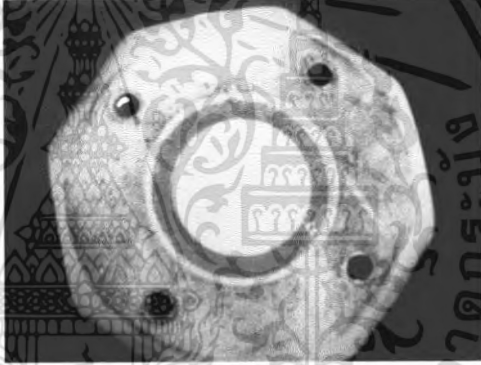

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทอร์ค (T) (N.m)	ผลการทดลอง Pressure Indicating film
0.40 N.m	
0.60 N.m	
0.80 N.m	

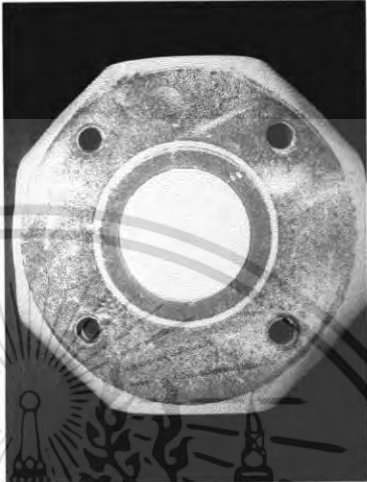


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทอร์ค (T) (N.m)	ผลการทดลอง Pressure Indicating film
1.0 N.m	
1.5 N.m	
2.0 N.m	

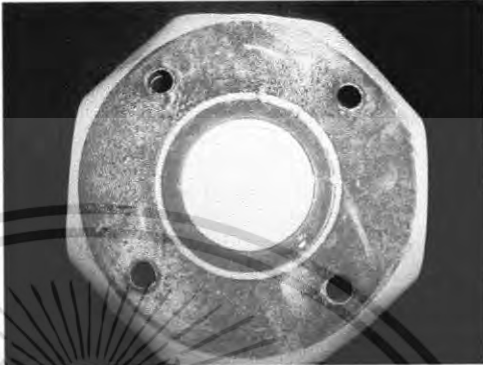

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทอร์ค (T) (N.m)	ผลการทดลอง Pressure Indicating film
2.5 N.m	
3.0 N.m	
3.5 N.m	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทอร์ค (T) (N.m)	ผลการทดลอง Pressure Indicating film
4.0 N.m	
4.5 N.m	
5.0 N.m	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทอร์ค (T) (N.m)	ผลการทดลอง Pressure Indicating film
5.5 N.m	
6.0 N.m	

5.1.2.2 ข้อสังเกตผลการทดลองการกระจายตัวของแรงกดที่ชุดอินเตอร์คอนเนกเตอร์ (Interconnector) โดยการใช้สลักเกลียว 4 ตัว (4 Point Loads)

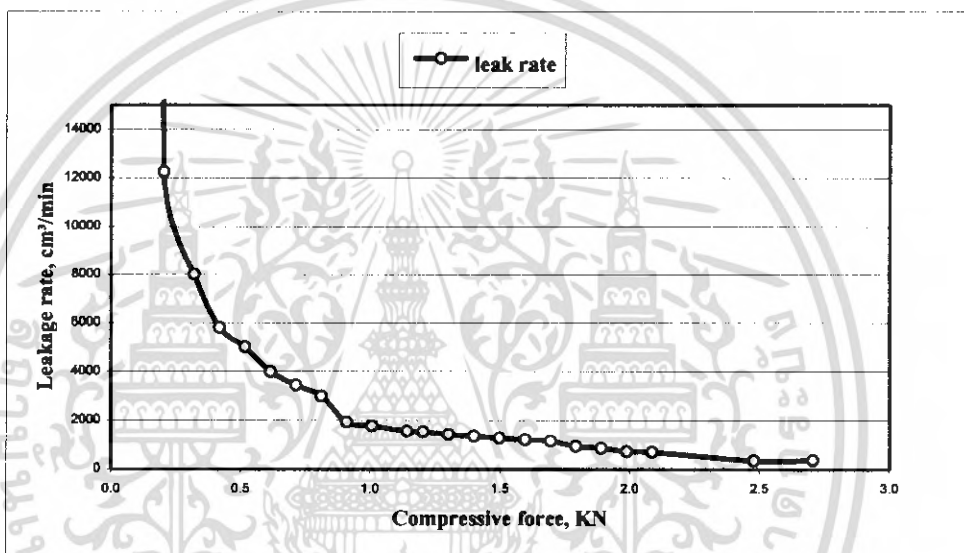
จากการทดลองพบสีที่เกิดขึ้นค่อนข้างมีการกระจายตัวของเม็ดสีที่เกิดขึ้นสาเหตุที่เกิดจากการใช้สลักเกลียวยึดตรงตำแหน่งรอบ ๆ ของแผ่นเหล็ก ทำให้เกิดการบีบตัวของแผ่นเหล็กในทุก ๆ ตำแหน่งเท่ากันจนเกิดเป็นสีที่มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งแตกต่างจากการทดลองโดยการใช้วิธีการแขวนน้ำหนัก ด้วยขนาดของแรงกดที่มากกว่าและลักษณะของการส่งถ่ายแรงที่แตกต่างกัน ทำให้เกิดการกระจายตัวของแรงกดที่แสดงออกเป็นลักษณะของสีที่มากกว่านั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ผลการทดลองการรั่วซึมของแก๊ส ที่อุณหภูมิห้อง (33.7 °C)

5.2.1 ผลการทดลองโดยการแขวนน้ำหนัก

- ใช้ไม้ก้ำเป็นตัวผนึกแก๊ส
- เส้นผ่านศูนย์กลางของหลอดแก้วมานอมิเตอร์ , $D_i=1.2$ cm.พื้นที่หน้าตัด, $A = 1.131$ cm²
- ระดับของเหลว 90 cm. (10.6 cm ถึง 100.6 cm)
- ปริมาตรแก๊ส 101.79 cm³



รูปที่ 5-1 กราฟผลการทดลอง ระหว่าง Leakage Rate กับ Compressive force โดยการแขวนน้ำหนัก

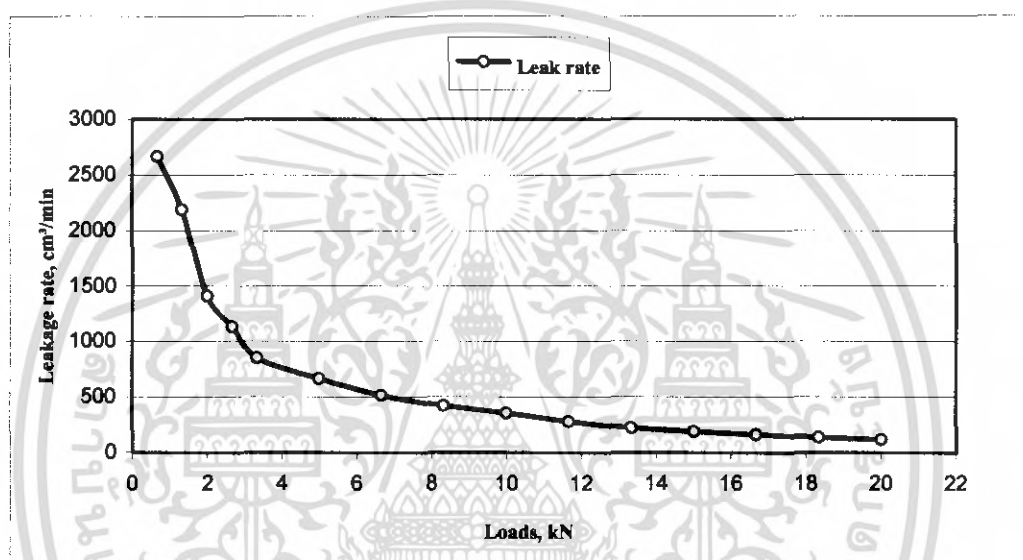
ข้อสังเกต

- แรงกดน้อยที่สุด คือ 0.12 kN. อัตราการรั่วซึมมากที่สุด คือ 203,580 cm³/min.
- ที่แรงกด.....0.62 kN. อัตราการรั่วซึม คือ 3991.76 cm³/min.
- แรงกดมากที่สุด คือ 2.70 kN. อัตราการรั่วซึมน้อยที่สุด คือ 378.40 cm³/min.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.2 ผลการทดลองโดยการใช้สลักเกลียว 4 ตัว (4-Point Loads)

- แรงบิดที่ใช้ 0.2 N.m – 6.0 N.m
- พื้นที่หน้าตัดตลอดแก้ว , $A = 1.131 \text{ cm}^2$
- ระดับของเหลว 90 cm, (10.6 cm ถึง 100.6 cm)
- ปริมาตรแก๊ส 101.79 cm^3
- เส้นผ่านศูนย์กลางหลักสลักเกลียว, $D_o = 6.0 \text{ mm}$.



รูปที่ 5-2 กราฟผลการทดลอง ระหว่าง Leakage Rate กับ Loads โดยการใช้สลักเกลียว 4 ตัว

ข้อสังเกต

- แรงกดยน้อยที่สุด คือ 0.68 kN. อัตราการรั่วซึมมากที่สุด คือ $2664.66 \text{ cm}^3/\text{min}$.
- แรงกดยมากที่สุด คือ 20.0 kN. อัตราการรั่วซึมน้อยที่สุด คือ $115.60 \text{ cm}^3/\text{min}$.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5-4 ผลการทดลองการรั่วซึมโดยการเขวบน้ำหนัก

น้ำหนัก (kg)	แรง (kN)	เวลาที่ของเหลวเพิ่มขึ้นในหลอดแก้ว (sec)			เวลาเฉลี่ย (sec)	Leak rate (cm ³ /min)
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3		
12.7	0.12	0.02	0.04	0.04	0.03	203580.0
22.7	0.20	0.48	0.53	0.50	0.50	12263.85
32.7	0.32	0.71	0.79	0.77	0.76	8014.96
42.7	0.42	1.05	1.00	1.09	1.05	5816.57
52.7	0.52	1.19	1.20	1.28	1.22	5014.29
62.7	0.62	1.41	1.30	1.87	1.53	3991.76
72.7	0.71	1.68	1.73	1.89	1.77	3450.51
82.7	0.81	2.01	2.19	1.93	2.04	2993.82
92.7	0.91	3.15	3.11	3.26	3.17	1927.84
102.7	1.01	3.44	3.29	3.63	3.45	1770.26
112.7	1.14	3.91	3.79	4.03	3.91	1561.20
122.7	1.20	4.03	4.03	3.94	4.00	1526.09
132.7	1.30	4.34	4.28	4.28	4.30	1419.67
142.7	1.40	4.53	4.47	4.50	4.50	1357.20
152.7	1.49	4.85	4.66	4.87	4.79	1275.56
162.7	1.60	4.97	5.03	5.06	5.02	1216.13
172.7	1.70	5.28	5.28	5.31	5.29	1154.08
182.7	1.80	6.44	6.50	6.41	6.45	946.88
192.7	1.90	7.13	7.00	7.00	7.04	867.77
202.7	1.99	8.37	8.25	8.22	8.28	737.61
212.7	2.09	8.54	8.69	8.56	8.60	710.33
252.7	2.48	17.00	17.00	17.10	17.03	358.67
275.7	2.70	16.66	15.87	15.88	16.14	378.40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5-5 ผลการทดลองการรั่วซึมโดยการใช้สลักเกลียวยึด 4 ตัว

Torque N.m	แรง (Bolt 4 ตัว) kN	เวลาที่ของเหลวเพิ่มขึ้นในหลอดแก้ว (sec)				Leak rate (cm ³ /min)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เวลาเฉลี่ย	
0.20	0.68	2.22	2.35	2.31	2.29	2664.66
0.40	1.32	2.78	2.78	2.72	2.76	2189.03
0.60	2.00	4.31	4.32	4.34	4.32	1413.75
0.80	2.68	5.28	5.44	5.38	5.37	1137.32
1.00	3.32	7.19	7.25	7.10	7.18	850.38
1.50	5.00	9.16	9.15	9.16	9.16	666.60
2.00	6.68	11.85	11.81	11.84	11.83	516.18
2.50	8.32	14.45	14.45	14.48	14.46	422.37
3.00	10.00	17.22	17.25	17.18	17.22	354.67
3.50	11.68	21.90	21.88	21.90	21.89	279.03
4.00	13.32	27.72	27.75	27.75	27.74	220.18
4.50	15.00	32.38	32.41	32.37	32.39	188.57
5.00	16.68	37.50	37.38	37.47	37.45	163.07
5.50	18.32	44.35	44.31	44.33	44.33	137.78
6.00	20.00	52.69	52.57	53.22	52.83	115.60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการทดลอง

6.1.1 สรุปผลการทดลองการกระจายตัวของแรงที่กดชุดอินเตอร์คอนเนกเตอร์

ในการทดลองนี้จะใช้เทคนิคของแผ่น Pressure Indicating Film ซึ่งมีคุณสมบัติในการทดสอบบริเวณที่มีการสัมผัสกันของชิ้นส่วนต่าง ๆ แล้วแสดงผลในรูปการกระจายตัวของสี ซึ่งการวิเคราะห์ผลจะสามารถอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นกับชิ้นส่วนนั้น ๆ เช่น ความหนาแน่นของแรงที่กระจายตัวบริเวณที่เกิดการสัมผัสกัน และความเค้น เป็นต้น

จากการทดลองพบว่า แรงที่ส่งผ่านท่ออลูมินาเพื่อกดชุดอินเตอร์คอนเนกเตอร์โดยการแขวนน้ำหนักนั้น จะเป็นแรงที่กระทำในลักษณะเป็นจุดตำแหน่งเดียว (1 Point Load) เท่านั้น โดยเฉพาะบริเวณตรงกลางของชุดอินเตอร์คอนเนกเตอร์ ผลที่เกิดขึ้นจากการกดลักษณะนี้คือการแอ่นตัวในแนวรัศมีของแผ่นเหล็กของชุดอินเตอร์คอนเนกเตอร์เมื่อมีการแขวนน้ำหนักที่มากขึ้น ซึ่งสังเกตเห็นได้จากเม็ดสีที่เกิดขึ้นจะมีความเข้มข้นมากที่บริเวณตรงกลางรอบนอกแนวของร่องไม้ก้ำเท่านั้น แต่ในบริเวณขอบรอบนอกของแผ่น Pressure film จะมีการกระจายตัวของสีที่น้อย ซึ่งแตกต่างจากการทดลองยึดชุดอินเตอร์คอนเนกเตอร์ด้วยสลักเกลียวจำนวน 4 ตัว (4 Point Loads) สีที่เกิดขึ้นมีความสม่ำเสมอและเข้มข้นมากกว่าอย่างเห็นได้ชัด ด้วยเหตุผลของลักษณะแรงที่มีการกระจายตำแหน่งโดยผ่านสลักเกลียวทั้ง 4 ตัว ซึ่งสามารถสร้างแรงกดและกระจายตัวได้มากกว่าทั่วบริเวณพื้นที่ผิวสัมผัส และด้วยคุณสมบัติของสลักเกลียวในการจับยึดชิ้นส่วนเข้าด้วยกันทำให้มีแรงกดมากและสม่ำเสมอ ซึ่งแตกต่างจากการสร้างแรงกดด้วยการแขวนน้ำหนักที่สามารถสร้างแรงกดได้น้อยกว่า และมีขีดจำกัดของโครงสร้างที่ไม่อาจจะทนต่อสภาวะที่มีการกระแทกขึ้นด้วยนั่นเอง

6.1.2 สรุปผลการทดลองการรั่วซึมของแก๊สโดยใช้ไม้ก้ำเป็นตัวผนึกแก๊ส

จากที่ได้ทราบถึงลักษณะของแรงที่มีอิทธิพลต่อชุดอินเตอร์คอนเนกเตอร์แล้ว จากนั้นก็จะเป็นการทดลองการรั่วซึมของแก๊ส โดยการพิจารณาแรงที่มากที่สุดในแต่ละกรณีคือ การแขวนด้วยน้ำหนัก และการใช้สลักเกลียวยึดเพื่อใช้กดท่ออลูมินาและชุดอินเตอร์คอนเนกเตอร์ โดยมีแผ่นไม้ก้ำเป็นตัวผนึกและใช้แก๊สฮีเลียมเป็นแก๊สทดสอบในเบื้องต้น

จากการทดลองพบว่า อัตราการรั่วซึมของแก๊สกรณีที่ใช้วิธีการแขวนน้ำหนักเพื่อส่งถ่ายแรงผ่านท่ออลูมินาไปยังชุดอินเตอร์คอนเนกเตอร์มีอัตราการรั่วซึมที่มาก โดยที่ตำแหน่งของแรงกดน้อย ๆ จะมีการรั่วซึมมากที่สุดจนเกือบจะไม่สามารถจับเวลาการเพิ่มขึ้นของระดับของของเหลวในแมนอร์มิเตอร์ได้ จากนั้นเมื่อเพิ่มแรงกดมากขึ้นจะสังเกตเห็นว่าแนวโน้มการรั่วซึมจะน้อยลงเรื่อย ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากแรงที่เกิดชุดอินเตอร์คอนเนกเตอร์จะทำให้เกิดการบีบอัดแผ่นไม้ก้ำที่ใส่เข้าไปเพื่อผนึกแก๊สทำให้ลดช่องว่างระหว่างแผ่นเหล็กและแผ่นไม้ก้ำ อย่างไรก็ตามสำหรับกรณีนี้ยังไม่สามารถที่จะนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการทดลองโดยการใช้สลักเกลียวได้โดยตรง เพราะแนวโน้มการรั่วซึมจากกรณีของสลักเกลียวน้อยที่สุดที่ตำแหน่งแรงกดสูงสุดคือ $115.60 \text{ cm}^3/\text{min}$ ที่ 20 kN ในขณะที่ตำแหน่งของแรงกดสูงสุดที่มีการรั่วซึมน้อยที่สุดในกรณีของการแขวนน้ำหนักคือ $378.40 \text{ cm}^3/\text{min}$ แต่แรงกดสูงสุดเพียง 2.70 kN เท่านั้น ซึ่งมีค่าที่แตกต่างกัน

แนวโน้มนำสำหรับการรั่วซึมที่เกิดขึ้นทั้ง 2 กรณี มีแนวโน้มที่คล้ายกัน คือ จะลดลงเรื่อย ๆ เมื่อมีแรงกดชุดอินเตอร์คอนเนกเตอร์มากขึ้น แตกต่างกันในขนาดของแรงกดและวิธีการส่งถ่ายแรงเท่านั้น แต่สำหรับค่าที่ได้จากผลการทดลองนี้ ยังไม่สามารถบอกได้ว่าเป็นผลที่แน่ชัดหรือถูกต้องแล้ว เพราะว่าทำการทดลองที่อุณหภูมิห้องและทดลองเพียงกรณีละครั้งเท่านั้น ซึ่งยังไม่เพียงพอสำหรับข้อมูลเบื้องต้น อีกทั้งยังต้องมีการทดลองในกรณีที่มีอุณหภูมิ 800°C อีกด้วย

6.2 วิจารณ์ผลการทดลอง

6.2.1 แบบอินเตอร์คอนเนกเตอร์มีปัญหาเมื่อมีแรงกด

จากผลการทดลองพบว่า การรั่วซึมของแก๊สที่จุดเชื่อมต่อยังอยู่ในช่วงที่ค่อนข้างมาก ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อการทำปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่ไม่สมบูรณ์ ทำให้สิ้นเปลืองแก๊สเชื้อเพลิง และไม่เกิดประโยชน์ที่จะได้รับเท่าที่ควรเมื่อนำไปใช้งานจริง สาเหตุเกิดจากหลายปัจจัยด้วยกัน เช่น ชุดอินเตอร์คอนเนกเตอร์เมื่อเพิ่มแรงกดมากขึ้นจะเกิดการบิดโก่งตัวบริเวณขอบของแผ่นเหล็กในแนวรัศมี เพราะแรงที่เกิดจากท่ออลูมิน่าจะกดตรงกลางของแผ่นเหล็กเท่านั้นจึงทำให้เกิดการรั่วซึมมาก

6.2.2 โครงสร้างชุดป้อนแรง

เมื่อแขวนน้ำหนักมาก ๆ ทำให้เกิดการบิดตัวของโครงสร้าง ส่งผลให้จุดที่จะต้องกดกับท่ออลูมิน่าไม่อยู่ในแนวศูนย์กลางท่อตลอดเวลาทำให้บริเวณจุดเชื่อมต่อไม่สัมผัสกันอย่างแนบสนิทตามไปด้วย และในการประกอบท่ออลูมิน่าให้อยู่ในแนวตั้งตลอดเวลาเมื่อแขวนน้ำหนักที่คานมาก ๆ จะเกิดปัญหาการบิดโก่งของโครงสร้าง และเกิดปัญหาการปรับเลื่อนตำแหน่งทำได้ค่อนข้างลำบากเนื่องจากมีความฝืด และเกิดการรัดกันส่งผลให้ท่ออลูมิน่าเอียงและจุดเชื่อมต่อไม่สัมผัสกันอย่างสนิทแนบแน่น ทำให้เกิดการรั่วซึมมาก

6.2.3 การวัดการรั่วด้วยมานอมิเตอร์

ปัญหาที่พบคือการอ่านค่าระดับของเหลวและการจับเวลาการเคลื่อนที่ของของเหลวทำโดยการสังเกตด้วยตาเปล่า ในการทดลองเมื่อเกิดการรั่วซึมมาก ของเหลวในหลอดแก้วจะเพิ่มระดับเร็วมากจนไม่สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่า และระหว่างการทดลองจะต้องเปิดปิดวาล์วบ่อย ๆ ครั้งเพื่อให้แก๊สไหลเข้าไปในมานอมิเตอร์ และทำการจับเวลาการเพิ่มระดับของของเหลวนั้น กระทำได้ไม่ค่อยสะดวกนักและอาจทำให้วาล์วเกิดความเสียหายได้ ซึ่งทำให้การทดลองเกิดความคลาดเคลื่อนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.4 การฉีกด้วยแผ่นไม้ก้ำ

การเจาะร่องเป็นรูปตัว U ลึก 2 mm กว้าง 2 mm ปัญหาที่พบคือ การใส่แผ่นไม้ก้ำในร่องที่มีขนาดเล็กไม่ค่อยสนิท เพราะการตัดแผ่นไม้ก้ำให้ได้ขนาดนั้นค่อนข้างยากต้องใช้ความละเอียดสูงและต้องตัดให้ได้ขนาดพอดี เพราะถ้าแผ่นไม้ก้ำใหญ่หรือเล็กไปจะทำให้เกิดการรั่วซึมมาก

6.2.5 วัสดุฉนวนกันแก๊ส

อาจจะต้องพิจารณาเลือกใช้วัสดุอื่นที่มีคุณสมบัติทนความร้อนสูงได้ มีความยืดหยุ่นตัวได้ และไม่เป็วัสดุพอรุนตัว เมื่ออยู่ในสภาวะที่อุณหภูมิสูง เป็นต้น

6.3 ข้อเสนอแนะ

6.3.1 ชุดอินเตอร์คอนเนกเตอร์มีปัญหาเมื่อมีแรงกด

การแก้ปัญหาอาจจะต้องมีการพัฒนารูปแบบชุดอินเตอร์คอนเนกเตอร์ใหม่ เพื่อรองรับแรงกดให้มากขึ้น เพื่อช่วยในการฉีกแก๊สโดยอาจจะทำให้ชิ้นงานหนาขึ้นและทนต่ออุณหภูมิสูงได้เป็นต้น

6.3.2 โครงสร้างชุดป้อนแรง

อาจจะต้องมีการออกแบบใหม่ โดยเปลี่ยนจากการใช้คานช่วยแรงแล้วแขวนน้ำหนักเพื่อกดท่ออลูมิเนียมมาเป็นแบบใช้ระบบไฮดรอลิกส์แทน

6.3.3 ร่องใส่ไม้ก้ำและการฉีกแก๊ส

ในการทดลองที่ผ่านมาเกิดการรั่วซึมเกิดขึ้นมาก การแก้ปัญหาอาจจะต้องเพิ่มร่องในการฉีก หรือจะมีการเพิ่มขนาดแผ่นไม้ก้ำให้ใหญ่ขึ้น หรืออาจจะพิจารณาทำร่องในลักษณะอื่นก็อาจจะช่วยลดปัญหาการรั่วซึมได้เป็นต้น

6.3.4 วัสดุฉนวนกันแก๊ส

พิจารณาวัสดุชนิดที่ไม่เป็นวัสดุพอรุนตัว และสามารถทนอุณหภูมิสูงได้

บรรณานุกรม

- [1] ปัตตมาภรณ์ ชิมากุล, ภาวดี อังศ์วัฒนะ, “ไฮโดรเจนและเซลล์เชื้อเพลิงพลังงานทางเลือกใหม่สำหรับวันพรุ่งนี้”, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ กรุงเทพฯ.
- [2] บุญรักษ์ กาญจนวรวณิษฐ์, “สารนำร่องของเซลล์เชื้อเพลิง”, ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ, กรุงเทพฯ.
- [3] นรินทร์ ปลื้มกระจ่าง, เอกลักษณ์ ฐป่ออิน, ชนะชัย วนะรุจิ, “การศึกษาผลกระทบของรูปร่างของชุดกระจายการไหลต่อการไหลเข้าภายในห่อเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง”, ปรินญาณิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์, สจล. กรุงเทพฯ. 2547
- [4] พงษ์เจต พรหมวงศ์, “การถ่ายเทความร้อน”, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, 2542
- [5] กุลลดา จันทระคุปต์, ธเนศ กิตติธาดาชัยกุล, อนุศาสตร์ แทบหอม, “เตาอบไฟฟ้า”, ปรินญาณิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์, สจล. กรุงเทพฯ 2544
- [6] Joseph E. Shigley, Charless R. Mischke, Richard G. Budynus
“Mechanical Engineering Design”, Seventh Edition, McGraw Hill Companies, 2004
- [7] Steven P. Simner, Jeffry W. Stevenson, “Compressive mica seal for SOFC applications”, Journal of Power sources 102(2001) 310-316, Pacific Northwest National Laboratory, Materials Resource Department, P.O. Box 999, Richland, WA 99352, 15 May 2001, USA
- [8] Apichart Jinnapat, Sirithan Jiamsirilert, Sumittra Charojrochkul,
“Study of Ceramic seal for Solid oxide fuel cell”, Advances in Technology of Materials and Materials Processing Journal, 9[1](2007) 109-114
- [9] N. Punbusayakul, W. Wongklang. K. Wongtida, J. Charoensuk, S. Charojrochkul,
“Behaviour of various Glass seal for planar solid oxide fuel cell”,
Paper of SmartMat08&Iworm-2, Chaing Mai, Thailand, 2008
- [10] ASTM Standard Test Method committee, “Standrads Test Method for seal ability of Gasket materials”, ASTM standard Institute, 2000
- [11] Frank P. Incropera, David P. Dewitt, Theodore L.Bergman, Adrienne S. Lavine,
“Fundamental of Heat and MassTransfer”, Sixth Edition, John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd, 2007
- [12] R.C. Hibbeler “Mechanics of Materials” SI Second Edition, Pearson Prentice hall, 2005

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้